

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



PODIPLOMSKI ŠTUDIJ
GRADBENIŠTVA

DOKTORSKI ŠTUDIJ

Kandidat:

mag. IZTOK KLEMENC, univ. dipl. inž. grad.

**PREISKAVE TRAJNIH PREDNAPETIH PRAMENSKIH
GEOTEHNIČNIH SIDER RAZLIČNIH ZASNOV
VEZNEGA DELA**

Doktorska disertacija štev.: 214

**INVESTIGATION TESTS OF PERMANENT
PRESTRESSED STRAND GROUND ANCHORS WITH
VARIOUS DESIGNS OF TENDON BOND LENGTH**

Doctoral thesis No.: 214

Soglasje k temi doktorske disertacije je dala Komisija za doktorski študij na 21. seji dne 14. maja 2009 in za mentorja imenovala doc. dr. Janka Logarja, za somentorja pa prof. dr. Gorana Turka.

Ljubljana, 6. julij 2011

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
gradbeništvo in
geodezijo



Komisijo za oceno ustreznosti teme doktorske disertacije v sestavi

- doc. dr. Janko Logar,
- prof. dr. Goran Turk,
- izr. prof. dr. Stanislav Škrabl, UM FG,
- izr. prof. dr. Jakob Likar, UL NTF

je imenoval Senat Fakultete za gradbeništvo in geodezijo na 26. redni seji
dne 25. marca 2009.

Komisijo za oceno doktorske disertacije v sestavi

- prof. dr. Bojan Majes,
- izr. prof. dr. Jakob Likar, UL NTF,
- izr. prof. dr. Stanislav Škrabl, UM FG,

je imenoval Senat Fakultete za gradbeništvo in geodezijo na 19. redni seji
dne 30. marca 2011.

Komisijo za zagovor doktorske disertacije v sestavi

- prof. dr. Matjaž Mikoš, dekan UL FGG, predsednik,
- izr. prof. dr. Janko Logar, mentor,
- prof. dr. Goran Turk, somentor,
- prof. dr. Bojan Majes,
- izr. prof. dr. Jakob Likar, UL NTF,
- izr. prof. dr. Stanislav Škrabl, UM FG,

je imenoval Senat Fakultete za gradbeništvo in geodezijo na 22. redni seji
dne 22. junija 2011.

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisani **mag. Iztok KLEMENC, univ. dipl. inž. grad.**, izjavljam, da sem avtor doktorske disertacije z naslovom: »**PREISKAVE TRAJNIH PREDNAPETIH PRAMENSKIH GEOTEHNIČNIH SIDER RAZLIČNIH ZASNOV VEZNEGA DELA**«.

Izjavljam, da je elektronska različica v vsem enaka tiskani različici.

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v repozitoriju UL FGG.

Ljubljana, 6. julij 2011

.....
(podpis)

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK: 624.131:(043.3)
Avtor: mag. Iztok Klemenc
Mentor:izr. prof. dr. Janko Logar
Somentor: prof. dr. Goran Turk
Naslov: Preiskave trajnih prednapetih pramenskih geotehničnih sider različnih zasnov veznega dela
Obseg in oprema: 383 str., 36 pregl., 149 sl., 75 en.
Ključne besede: trajna geotehnična sidra, prednapeta geotehnična sidra, večkratna sidra, sidra spremenljive togosti, preiskava sidra, odpornost na izvlek, preskušanja in-situ, laboratorijske preiskave, relaksacija, ekscentričnost dinamometra

Izvleček

Osrednji namen disertacije je priprava v praksi izvedljive tehnološke zasnove trajnih prednapetih pramenskih geotehničnih sider s skupnim zaščitnim polietilenskim ovojem z različnimi izvedbami veznih delov: sider z veznimi deli s povečano togostjo veznega dela (RCP/D-K), večkratnih sider z zamaknjenimi veznimi deli podsider, zasnovanimi na ideji sidra SBMA Barleya, le da se vsa podsidra nahajajo v skupnem polietilenskem ovoju (RCP/D-Z) in sider spremenljive togosti veznega dela po patentu Škrabla (RCP/D-I). V disertaciji podajamo opise preskušanj, ki smo jih opravili na testnem polju opornega zidu OZ-05, kot tudi analizo rezultatov obnašanja modificiranih tipov sider pri preiskavah sider, ki smo jih primerjali z obnašanjem referenčnih sider RCP/D. Zasnovali in izdelali smo računalniško orodje odprte zasnove za sprotno vrednotenje parametrov obnašanja sider pri preiskavah sider, ki omogoča analizo obnašanja sidra kot celote, podsider in posameznih pramen sidra, kot tudi možnost izločanja posameznih porušenih pramen sidra. Za vsako sidro smo po štirih različnih metodah določili merodajne intervalne mere lezenja k_{int} . S povprečenjem izvlečkov vseh pramen sidra smo določili odpornosti sidra kot celote na izvlek R_a , ki smo jo primerjali z vsoto odpornosti na izvlek posameznih pramen sidra. Zahteve veljavnih predpisov za določanje skupne karakteristične odpornosti na izvlek sider objekta R_{ak} niso jasno opredeljene, zato smo vrednosti R_{ak} določili po različnih pristopih; pri dveh pristopih smo z uporabo statističnih metod izkoristili razpoložljive pretekle podatke številnih preiskav sider, opravljenih v zadnjem desetletju. Na podlagi preiskav sider smo za sidra opornega zidu OZ-05 določili dopustno mero lezenja za sidra objekta k_{adm} , a smo ugotovili, da v praksi k_{int} sider objekta niso vedno manjše od k_{adm} . Z analizo rezultatov preiskav štirih objektov iz prakse smo poiskali razloge za takšno obnašanje sider.

Za ugotovitev razlogov za visoke vrednosti mer lezenja pri nizkih stopnjah sile preiskav sider smo izvedli dva tipa laboratorijskih preskusov: opravili smo raziskave vpliva ekscentrične lege obročastega dinamometra (glede na os kabla sidra) na izmerjene sile, kot tudi raziskave vpliva izotermne relaksacije na obnašanje pramena. V obeh primerih smo preskušanja opravili po postopku za preiskave prednapetih sider, zato smo lahko rezultate laboratorijskih preskušanj direktno primerjali z rezultati preiskav sider.

V zaključku disertacije podajamo usmeritve za učinkovito izvedbo modificiranih tipov trajnih prednapetih pramenskih sider kot tudi predloge za izvedbo in analizo rezultatov preiskav sider v praksi, s katerimi lahko premostimo vrzeli in nejasnosti v veljavni evropski regulativi glede izvedbe in vrednotenja preiskav sider prednapetih pramenskih sider.

BIBLIOGRAFIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND SUMMARY

UDK:

Author: Iztok Klemenc, MSc

Supervisor: Assoc. Prof. Janko Logar, PhD

Co-supervisor: Prof. Goran Turk, PhD

Title: Investigation tests of permanent prestressed strand ground anchors with various designs of tendon bond length

Notes: 383 p., 36 tab., 149 fig., 75 eq.

Key words: permanent ground anchors, prestressed ground anchors, single bore multiple anchors, anchors of variable stiffness, investigation test, pull-out resistance, in-situ testings, laboratory testings, relaxation, load cell eccentricity

Abstract

A preparation of a practically feasible technological design of permanent prestressed strand ground anchors with a different concept of bond lengths, contained within joint polyethylene cover, is the main idea of this thesis. Anchors with increased stiffness of bond length (RCP/D-K), multiple anchors with staggered anchor units based on Barlay's anchors SBMA, only that all anchor units are placed within common polyethylene cover (RCP/D-Z) and anchors with variable stiffness of bond lengths after the patent of Škrabl (RCP/D-I) have been used. In the thesis description of testings, performed on the testing field of the retaining wall OZ-05, as well as descriptions of results of behaviour analysis of modified anchor types at investigation tests are given and compared with the behaviour of original RCP/D anchors. The software tool of open design for simultaneous evaluation of anchors' behaviour parameters at investigation tests has been prepared, whereat analysis of the whole anchor, anchor units as well as individual strands is feasible. The separation of pulled individual strand of an anchor is also possible. For each anchor competent interval creep displacement rates k_{int} were determined after four different methods. The pull-out resistance R_a of the anchor as a whole has been evaluated with averaging of displacements of all strands, and compared with the sum of pull-out resistances of individual strands of the anchor. Requirements for the definition of the common characteristic pull-out resistance of the production anchor R_{ak} are not evidently defined in the valid regulation. Therefore different approaches has been used for the determination of R_{ak} values, whereat statistical methods and available historical data of numerous investigation tests, performed in the last decade, have been used. Admissible creep displacement rate k_{adm} for the retaining wall OZ-05 production anchors has been defined on the basis of the investigation tests. However, values of k_{int} for production anchors in practice are not always smaller than k_{adm} . With the analysis of investigation tests results of four anchored structures, carried out in practice, reasons for such behaviour of anchors has been found out.

By means of the two types of laboratory testings reasons for high values of creep displacement rates at low force levels of investigation tests has been found out. Investigations of eccentric positions of ring load cell as for anchor tendon on measured forces, as well as investigations of the influence of isothermal relaxation on the behaviour of a strand, have been performed. In both cases of testings the procedure of an investigation test of prestressed ground anchors has been used. For this reason the results of laboratory testings can be directly compared with the results of investigation tests.

Guidelines for effective realization of modified types of permanent prestressed strand anchors as well as the proposals for the performance and analysis of investigation tests are suggested in the conclusion of this thesis. This guidelines could be used for filling up gaps and vagueness of valid European regulation regarding execution and evaluation of investigation tests of prestressed strand anchors.

ZAHVALE

Na tem mestu se iskreno zahvaljujem mentorju izr. prof. dr. Janku Logarju in somentorju prof. dr. Goranu Turku za vse njune usmeritve, nasvete, pripombe in potrpežljivost med nastajanjem disertacije, s čimer sta prispevala k boljši in lažji razumljivosti ter kakovosti tega dela, obenem pa je obseg disertacije ostal v še razumnih mejah.

Na tem mestu se zahvaljujem družbi DARS, d.d. za financiranje razvojno-raziskovalne naloge (RRN) *Racionalizacija pri uporabi trajnih geotehničnih sider – 2. del*, v sklopu katere smo opravili terenski del preskušanj na testnem polju opornega zidu OZ-05 ter proizvajalcu sider CA.TI. Carnica Tiranti, S.r.l. iz Italije, ki je s svojimi izkušnjami pomagal pri realizaciji prototipov sider, kot tudi za donacijo sider. Iskreno se zahvaljujem družbi GEOT, d.o.o., ki je v sklopu RRN sidra dobavila, vgradila sidra in izvedla preskušanja nosilnosti sider na testnem polju, kar še posebej velja za odprt pristop in nesebično pomoč pri leta 2009 ponovljenih preskušanjih, ki so presegala vnaprej dogovorjeni obseg preskusov, potrebnih za izvedbo RRN. Posebna zahvala gre skrbniku RRN Andreju Ločniškarju (DDC - SKTR) za zavzetost in pomoč pri organizacijsko zahtevnem projektu.

Posebna zahvala gre sodelavcema Gregorju Konjarju in Eriku Pagonu iz Odseka za geotehnična sidra Zavoda za gradbeništvo Slovenije (ZAG), saj brez njiju zahtevnih terenskih in laboratorijskih preskušanj ne bi mogli opraviti. Izvedba laboratorijskih preskušanj na opremi v laboratorijih ZAG ne bi bila možna brez razumevanja sodelavcev Slavka Pandže, Francija Mihelčiča, Antona Štiblerja, Branka Ceruta in Primoža Oblaka, ki so nam navkljub polni obremenjenosti in zasedenosti opreme v času intenzivne gradnje avtocestnega križa omogočili izvedbo preskušanj na opremi, ki jo uporabljajo pri vsakodnevnem delu.

S to disertacijo se zaokroža pot mojega formalnega izobraževanja, zato se želim na tem mestu zahvaliti staršema za svet vrednot in pozitivnega odnosa do dela, v katerem sem odraščal, še posebej pa se od srca zahvaljujem mami za brezpogojno podporo tekom celotnega študija. V času moje predanosti raziskavam in pisanju disertacije so se nenačrtovano pričela dela pri izvedbi našega novega doma, čemur sem moral posvečati svoje redke proste trenutke. Posledično je breme številnih vsakodnevnih družinskih obveznosti brez oklevanja prevzela soproga Sabina, ki je navkljub temu še našla energijo za izkazovanje podpore in razumevanja za delo, ki sem ga ustvarjal zadnja štiri leta. Za njeno energijo, predanost in podporo se ji iskreno in od srca zahvaljujem. Sinovoma Petru in Maticu se zahvaljujem za potrpežljivost, obenem pa se jima tudi opravičujem za pogoste trenutke, ko sem bil z mislimi pri analizah raziskav in disertaciji, tako da se jima nisem uspel posvečati v tolikšni meri, kot bi si to sam želel.

KAZALO VSEBINE

1	NAMEN IN STRUKTURA DISERTACIJE	1
1.1	SPLOŠNO.....	1
1.2	CILJI DISERTACIJE	1
1.3	STRUKTURA DISERTACIJE	3
2	PREDSTAVITEV TRAJNIH PREDNAPETIH PRAMENSKIH GEOTEHNIČNIH SIDER.....	8
2.1	TEMELJNE ZNAČILNOSTI, SESTAVLJANJE IN VGRADNJA PREDNAPETIH PRAMENSKIH GEOTEHNIČNIH SIDER V NAŠI PRAKSI	9
2.1.1	Uvod.....	9
2.1.2	Uvedba trajnih prednapetih pramenskih sider s celovito protikorozijsko zaščito.....	10
2.1.3	Zasnova trajnih prednapetih pramenskih geotehničnih sider	11
2.1.4	Sestavljanje in vgradnja trajnih prednapetih geotehničnih sider.....	14
2.1.5	Preskušanje nosilnosti in dokončanje trajnih prednapetih geotehničnih sider.....	15
2.2	SESTAVNE KOMPONENTE TRAJNIH PREDNAPETIH PRAMENSKIH GEOTEHNIČNIH SIDER.....	19
2.2.1	Jeklana pramena.....	19
2.2.2	Jeklene komponente glav sider.....	22
2.2.3	Zaščitni ovoj trajnih prednapetih geotehničnih sider	24
2.2.4	Zaščitno protikorozijsko sredstvo (vazelin in mast).....	25
2.2.5	Cementna injekcijska masa.....	25
3	IN-SITU PRESKUŠANJA TRAJNIH ELEKTRIČNO IZOLIRANIH PREDNAPETIH PRAMENSKIH GEOTEHNIČNIH SIDER S SKUPNIM PE OVOJEM RAZLIČNIH ZASNOV VEZNEGA DELA.....	28
3.1	PREGLED LITERATURE V ZVEZI S PRINCIPI DELOVANJA VEZNIH DELOV SIDER.....	28
3.2	IZHODIŠČA ZA RAZLIČNE TEHNOLOŠKE ZASNOVE VEZNEGA DELA TRAJNIH PREDNAPETIH PRAMENSKIH SIDER V SKUPNEM PE OVOJU.....	42
3.3	SESTAVLJANJE TRAJNIH PREDNAPETIH PRAMENSKIH SIDER Z RAZLIČNIMI VEZNIMI DELI V SKUPNEM PE OVOJU.....	44
3.3.1	Običajna trajna prednapeta električno izolirana pramenska sidra RCP/D.....	44
3.3.2	Sidra s povečano togostjo veznega dela RCP/D-K.....	46
3.3.3	Večkratna sidra z zamaknjenimi veznimi deli RCP/D-Z.....	47
3.3.4	Sidra spremenljive togosti veznega dela RCP/D-I.....	50
3.3.5	Lokalna kontaminacija pramen v veznem delu sider z vazelinom.....	52
3.4	VGRADNJA MODIFICIRANIH TRAJNIH PREDNAPETIH PRAMENSKIH GEOTEHNIČNIH SIDER S SKUPNIM PE OVOJEM NA TESTNEM POLJU	55
3.5	PRESKUŠANJA NOSILNOSTI SIDER NA TESTNEM POLJU V SKLOPU RRN LETA 2008	60
3.5.1	Oprema za izvedbo preskušanj nosilnosti sider.....	60
3.5.2	Opis izvedbe preskušanj nosilnosti sider	61
3.5.3	Rezultati preskušanj nosilnosti sider testnega polja doseženi leta 2008.....	65
3.5.3.1	Sidra RCP/D.....	69
3.5.3.2	Sidra RCP/D-K.....	71
3.5.3.3	Sidra RCP/D-Z.....	73
3.5.3.4	Sidra RCP/D-I.....	76

3.5.3.5	Mehanizmi popuščanja veznih delov sider	79
3.5.3.6	Primerjava rezultatov preskusov nosilnosti sider RCP/D in različnih tipov modificiranih sider RCP/D-K, RCP/D-Z in RCP/D-I, dobljenih po metodi IP	81
3.5.4	Vpliv metode določitve merodajnih mer lezenja na odpornosti na izvlek sider z različnimi koncepti veznih delov za preiskave sider opravljene leta 2008	86
3.6	PONOVITEV PRESKUSOV NOSILNOSTI SIDER TESTNEGA POLJA LETA 2009	89
3.6.1	Opis izvedbe ponovljenih preskusov nosilnosti sider testnega polja leta 2009	89
3.6.2	Rezultati leta 2009 ponovljenih preskušanj nosilnosti sider	95
3.6.2.1	Sidra RCP/D	96
3.6.2.2	Sidra RCP/D-K	97
3.6.2.3	Sidra RCP/D-Z	98
3.6.2.4	Sidra RCP/D-I	99
3.6.2.5	Ocena trenja v območju glav sider pri PS in VPN leta 2009	101
3.6.2.6	Analiza padcev sil pred korekcijo na predpisano raven stopnje sile pri PS in VPN	102
4	ANALIZA IN-SITU PRESKUSOV NOSILNOSTI SIDER Z DOLOČITVIJO ODPORNOSTI NA IZVLEK	107
4.1	PRIMERJAVA ODPORNOSTI NA IZVLEK ZA SIDRA KOT CELOTO DOSEŽENIH PRI PREISKAVAH SIDER NA TESTNEM POLJU	108
4.2	PRIMERJAVA ODPORNOSTI NA IZVLEK DOBLJENIH S SEŠTEVANJEM ODPORNOSTI POSAMEZNIH PRAMEN Z VREDNOSTMI ZA SIDRO KOT CELOTO	110
4.3	DOLOČITEV SKUPNE ODPORNOSTI NA IZVLEK VSEH PREISKAV SIDER OBJEKTA TER OPREDELITEV KRITERIJEV ZA NAPENJANJE SIDER	116
4.3.1	Določitev merodajne odpornosti na izvlek vseh v letu 2008 opravljenih preskušanj – PS in VPN – sider testnega polja objekta OZ-05	116
4.3.1.1	Pristop vrednotenja preiskav sider po TSC 07.202	116
4.3.1.2	Vrednotenje preiskav sider z določitvijo karakteristične vrednosti odpornosti na izvlek ob uporabi standarda EN 1997-1 in statističnih metod	118
4.3.1.3	Vrednotenje preiskav sider po EN 1537 in SIA 267	134
4.3.1.4	Vrednotenje preiskav sider na podlagi sile kritičnega lezenja sidra določene iz bilinearnega diagrama po osnutku standarda prEN ISO 22477-5	135
4.3.1.5	Določitev najustreznejše skupne aproksimacijske funkcije za vsak tip sidra testnega polja in vse pristope vrednotenja PS in VPN	138
4.3.1.6	Primerjava rezultatov PS in VPN izvedenih leta 2008 ter vrednotenih po različnih predpisih in metodah	142
4.3.2	Določitev kriterijev za napenjanje sider objekta OZ-05	145
4.3.3	Primerjava merodajnih mer lezenja po predlaganem postopku z dejansko doseženimi vrednostmi pri EPN in CPN sider opornega zidu OZ-05	146
4.3.4	Določitev kriterijev za napenjanje sider objekta s primerjavo merodajnih mer lezenja z dejansko doseženimi vrednostmi pri EPN in CPN sider tipa RCP/D izbranih sidranih objektov AC programa	151
5	LABORATORIJSKI PRESKUS VPLIVA EKSCENTRIČNE LEGE OBROČASTEGA DINAMOMETRA NA IZMERJENE VREDNOSTI SIL	162
6	LABORATORIJSKA PRESKUŠANJA IZOTERMNE RELAKSACIJE JEKLENIH PRAMEN PRI PREISKAVAH SIDER	167
6.1	PREDHODNA PRESKUŠANJA IZOTERMNE RELAKSACIJE PO STOPNJAH SIL PREISKAV SIDER BREZ SPREMLJANJA ČASA VNOSA SILE	170
6.2	PRESKUŠANJA IZOTERMNE RELAKSACIJE PO STOPNJAH SIL PREISKAV SIDER S SPREMLJANJEM ČASA VNOSA SILE	172

6.2.1	Postopek preskušanja izotermne relaksacije po fazah preiskav sider brez dodajanja upadlih sil	173
6.2.2	Vpliv ponovitve postopka preskušanja izotermne relaksacije po fazah preiskav sider brez dodajanja upadlih sil	174
6.2.3	Postopek preskušanja izotermne relaksacije po stopnjah sil faz preiskav sider z dodajanjem upadlih sil s spremljanjem časa vnosa sile	176
6.3	ZAKLJUČKI LABORATORIJSKEGA PRESKUŠANJA IZOTERMNE RELAKSACIJE JEKLENIH PRAMEN ZA POTREBE PRESKUŠANJA SIDER	177
7	POVZETEK IN ZAKLJUČKI	182
7.1	PREDLOG ZA PRAKSO UPORABNIH KONCEPTOV MODIFICIRANIH SIDER	186
7.2	PREDLOG ZA DOPOLNITEV POSTOPKOV IZVEDBE PREISKAV SIDER	187
7.3	PREDLOG ZA ZAPOLNITEV VRZELI IN OPREDELITEV NEJASNOSTI PRI OBDELAVI IZMERJENIH VREDNOSTI PRI PREISKAVAH PREDNAPETIH PRAMENSKIH SIDER	188
7.4	PRIPOROČILA ZA NADALJNJE DELO	191
	SUMMARY	193
	VIRI	203

SEZNAM DODATKOV V PRILOGI

- A. ZGODOVINSKI PREGLED RAZVOJA SISTEMOV PREDNAPENJANJA IN TRAJNIH PREDNAPETIH GEOTEHNIČNIH SIDER
- B. REZULTATI PRESKUSOV NOSILNOSTI SIDER RCP/D, RCP/D-K, RCP/D-Z IN RCP/D-I, OPRAVLJENIH NA TESTNEM POLJU LETA 2008 IN 2009
- C. RAČUNALNIŠKO ORODJE ZA SPROTNO VREDNOTENJE IN NAKNADNO ANALIZO PARAMETROV OBNAŠANJA MODIFICIRANIH TIPOV PREDNAPETIH SIDER PRI PREISKAVAH SIDER
- D. UPORABA METODE NAJMANJŠIH KVADRATOV PRI ANALIZI REZULTATOV PREISKAV SIDER
- E. LABORATORIJSKA PRESKUŠANJA VPLIVA EKSCENTRIČNE LEGE OBROČASTEGA DINAMOMETRA NA IZMERJENE VREDNOSTI SIL
- F. LABORATORIJSKA PRESKUŠANJA IZOTERMNE RELAKSACIJE JEKLENIH PRAMEN PO POSTOPKU ZA IZVEDBO PREISKAV SIDER

SEZNAM PREGLEDNIC

Preglednica 2.1: Priporočene vrednosti odpornosti na izvlek R_a in dolžine veznega dela sidra l_v švicarskega proizvajalca AVT Anker + Vorspanntechnik AG (AVT, 2005).....	13
Preglednica 2.2: Dimenzije in značilnosti jeklenih pramen po podatkih različnih proizvajalcev.....	22
Preglednica 3.1: Osnovni podatki o referenčnih preskusnih sidrih RCP/D in modificiranih tipih sider RCP/D-K, RCP/D-Z in RCP/D-I opornega zidu OZ-05.	58
Preglednica 3.2: Podatki o vgradnji referenčnih preskusnih sider RCP/D in modificiranih tipih sider RCP/D-K, RCP/D-Z in RCP/D-I na območju opornega zidu OZ-05.....	59
Preglednica 3.3: Stopnje sil pri PS in VPN na testnem polju opornega zidu OZ-05.	63
Preglednica 3.4: Vrste preskusov nosilnosti referenčnih preskusnih sider RCP/D in modificiranih tipov sider RCP/D-K, RCP/D-Z in RCP/D-I leta 2008 izvedene na opornem zidu OZ-05.....	65
Preglednica 3.5: Zgornje in spodnje meje efektivnih prostih dolžin pramen referenčnih preskusnih sider RCP/D in modificiranih tipov sider RCP/D-K, RCP/D-Z in RCP/D-I opornega zidu OZ-05.	68
Preglednica 3.6: Rezultati preiskav sider izvedenih na referenčnih preskusnih sidrih RCP/D testnega polja (sidra SBz) in preskusnih sidrih opornega zidu OZ-05 (sidra TS-01 do TS-07).....	71
Preglednica 3.7: Rezultati preskušanj nosilnosti modificiranih prednapetih geotehničnih sider tipa RCP/D-K s povečano togostjo veznega dela sidra vgrajenih na testnem polju.	73
Preglednica 3.8: Rezultati preskušanj nosilnosti modificiranih prednapetih geotehničnih sider tipa RCP/D-Z (zaporedno nameščeni kratki vezni deli podsider) vgrajenih na testnem polju.....	76
Preglednica 3.9: Rezultati preskušanj nosilnosti modificiranih prednapetih geotehničnih sider tipa RCP/D-I (s spremenljivo togostjo vzdolž veznega dela sidra) vgrajenih na testnem polju.....	78
Preglednica 3.10: Preskušanje domnev o razlikah pričakovanih vrednosti v primerih neznanih in različnih varianc za tipe sider, preskušene na testnem polju.....	85
Preglednica 3.11: Odpornosti sider na izvlek dobljene pri preiskavah sider leta 2008 kot presečišča odsekoma ravne krivulje merodajnih mer lezenja na podlagi povprečja vseh pramen s k_{krit}	88
Preglednica 3.12: Vrednosti sil zaklinjenja po končanih preskušanjih leta 2008 in ocenjene vrednosti sidrskih sil v sidrih testnega polja pred začetkom preskušanj leta 2009.	91
Preglednica 3.13: Ravni sil v preostalih pramenih sidra ob predpostavki, da v enem ali več pramenih (izločenih iz skupnega hidravličnega sistema) preostala sila znaša samo še 25 kN.....	93
Preglednica 3.14: Vrste ponovljenih preskusov nosilnosti na referenčnih preskusnih sidrih RCP/D in modificiranih tipih sider RCP/D-K, RCP/D-Z in RCP/D-I opornega zidu OZ-05 leta 2009.....	94
Preglednica 4.1: Odpornosti sider na izvlek dobljene pri preiskavah sider leta 2008 in 2009 kot presečišča odsekoma ravne krivulje merodajnih mer lezenja povprečja vseh pramen s k_{krit}	108
Preglednica 4.2: Vrednosti odpornosti sider testnega polja na izvlek določene po metodi IP – primerjava vrednosti R_a določenih na podlagi povprečij lezenja vseh pramen $R_{a,S(k-povp)}$ in vrednosti izračunane kot vsote odpornosti vseh pramen na izvlek $R_{a,S(\Sigma pramen)}$	112
Preglednica 4.3: Rezultati vrednotenja PS in VPN sider testnega polja po <i>TSC 07.202</i>	117
Preglednica 4.4: Rezultati vrednotenja PS in VPN sider testnega polja po <i>EN 1997-1</i>	118
Preglednica 4.5: Rezultati vrednotenja PS in VPN sider testnega polja OZ-05 z uporabo statističnih metod.	133

Preglednica 4.6: Rezultati vrednotenja PS in VPN sider testnega polja OZ-05 iz vrednotene po postopku EN 1537 in SIA 267.....	135
Preglednica 4.7: Vrednosti sil kritičnega lezenja P_c za sidra testnega polja OZ-05 iz vrednotene na podlagi intervalnih mer lezenja k_{int} dobljenih po metodi IP.	137
Preglednica 4.8: Vrednosti skupne odpornosti na izvlek $R_{a,s(k-povp)}$ za vsa sidra istega tipa, dosežene na testnem polju leta 2008, določene po različnih metodah (IP, SIA, 10 in ISO).	140
Preglednica 4.9: Vrednosti dopustnih mer lezenja na ravni preskusnih sil $k_{adm}(P_p)$, neposredno odčitane iz najustreznejših aproksimacijskih funkcij sider tipa RCP/D.....	146
Preglednica 4.10: Podatki o dejansko doseženih intervalnih merah lezenja k_{int} na zadnji stopnji sile CPN in EPN sider opornega zidu OZ-05, ter primerjava k_{int} z dopustnimi vrednostmi k_{adm} iz analiz PS.	148
Preglednica 4.11: Osnovni podatki o preskusnih sidrih RCP/D in njihovi vgradnji.	153
Preglednica 4.12: Primerjava doseženih intervalnih mer lezenja k_{int} z dopustnimi vrednostmi mer lezenja projektantov $k_{adm,proj}$ in z vrednostmi iz analiz PS po metodah IP, SIA in ISO.....	155

LIST OF TABLES

Table 2.1:	Recommended values of anchor pull-out resistance R_a and tendon bond lengths l_v from Swiss manufacturer AVT Anker + Vorspanntechnik AG (AVT, 2005).	13
Table 2.2:	Dimensions and properties of steel strand according to various manufacturers' data.	22
Table 3.1:	Basic data regarding comparative testing anchors RCP/D and modified anchor types RCP/D-K, RCP/D-Z and RCP/D-I of the retaining wall OZ-05.	58
Table 3.2:	Data on installation of comparative testing anchors RCP/D and modified anchor types RCP/D-K, RCP/D-Z and RCP/D-I in the region of retaining wall OZ-05.	59
Table 3.3:	Load steps of investigation tests and comprehensive suitability tests at the testing field of the retaining wall OZ-05.	63
Table 3.4:	Types of load-bearing capacity tests performed in 2008 on comparative testing anchors RCP/D and modified anchor types RCP/D-K, RCP/D-Z and RCP/D-I of the retaining wall OZ-05.	65
Table 3.5:	Upper and lower limits of apparent strand free lengths of comparative testing anchors RCP/D and modified anchor types RCP/D-K, RCP/D-Z and RCP/D-I of the retaining wall OZ-05.	68
Table 3.6:	Results of investigation tests on testing anchors performed on comparative testing anchors RCP/D of testing field (SBz anchors) and testing anchors of the retaining wall OZ-05 (anchors TS-01 to TS-07).	71
Table 3.7:	Results of load bearing capacity testing of modified prestressed ground anchors of type RCP/D-K (increased stiffness of the bond anchor length) installed in the testing field.	73
Table 3.8:	Results of load bearing capacity testing of modified prestressed ground anchors of type RCP/D-Z (successively positioned anchor units short bond lengths) installed in the testing field.	76
Table 3.9:	Results of load bearing capacity testing of modified prestressed ground anchors of type RCP/D-I (variable stiffness along anchor bond length) installed in the testing field.	78
Table 3.10:	Hypotheses testing of the difference between means when the variances are unknown and unequal for the different anchor types, tested on the testing field.	85
Table 3.11:	Anchor pull-out resistances received in 2008 at investigation tests as the cross-sections of sectionally straight competent creep displacement curves (based on all strands average) with k_{krit}	88
Table 3.12:	Values of lock-off forces after finished testings in 2008 and estimated values of anchor forces in the anchors of testing field before beginning of testings in 2009.	91
Table 3.13:	Force levels in the remaining strands of an anchor considering that one or more strands, separated from the joint hydraulic system, sustain the force of only 25 kN.	93
Table 3.14:	Types in 2009 repeated load-bearing capacity tests on comparative testing anchors RCP/D and modified anchor types RCP/D-K, RCP/D-Z and RCP/D-I of the retaining wall OZ-05.	94
Table 4.1:	Anchor pull-out resistances obtained at investigation tests in 2008 and 2009 as the crossings of sectionally straight competent creep displacement curves (as average of all strands) with k_{krit}	108
Table 4.2:	Values of anchor pull-out resistances for testing field anchors defined after the method IP – comparison of R_a values defined on the basis of average creeps of all strands $R_{a,S(k-povp)}$ and values calculated as sums of pull-out resistances of all strands $R_{a,S(\Sigma pramen)}$	112

Table 4.3:	Results of evaluation of PS and VPN tests performed on the testing field anchors, determined according to <i>TSC 07.202</i>	117
Table 4.4:	Results of evaluation of PS and VPN tests performed on the testing field anchors, determined according to the standard <i>EN 1997-1</i>	118
Table 4.5:	Results of evaluation of PS and VPN tests performed on the OZ-05 testing field anchors, obtained using statistical methods.	134
Table 4.6:	Results of evaluation of PS and VPN tests performed on the OZ-05 testing field anchors, obtained according to <i>EN 1537</i> and <i>SIA 267</i> procedure.....	135
Table 4.7:	Values of the critical creep load P_c for the OZ-05 testing field anchors calculated on the basis of interval creep displacement rates k_{int} , obtained after the IP method.	137
Table 4.8:	Values of external anchor resistance $R_{a,s(k-povp)}$ for all testing field anchors of the same type, obtained by different methods (IP, SIA, 10 and ISO), on the testing field in 2008.....	141
Table 4.9:	Allowable creep limit values at testing force levels $k_{adm}(P_p)$, directly readed from the best fitted model functions for anchor type RCP/D.	146
Table 4.10:	Data about interval creep displacement rates k_{int} actually obtained on the attained last load level at CPN and EPN of OZ-05 retaining wall anchors; comparison of k_{int} with admissible values k_{adm} obtained from analysis of investigation tests PS and VPN.....	149
Table 4.11:	Basic data about testing anchors RCP/D and theirs installation.	153
Table 4.12:	Comparison between interval creep displacement rates k_{int} with admissible design creep displacement rates $k_{adm,proj}$ as well as with values, obtained from analysis of investigation tests after IP, SIA and ISO method.....	155

SEZNAM SLIK

Slika 2.1:	Shema trajnega prednapetega geotehničnega sidra (spodaj) z značilnima prečnima prerezoma preko veznega dela (levo zgoraj) in prostega dela (desno zgoraj) (prirejeno po Stahlton, 2009).....	12
Slika 2.2:	Detajlni prikaz glave sidra in območja pod glavo sidra za prednapeto geotehnično sidro s celovito protikorozijsko zaščito švicarskega proizvajalca AVT (prirejeno po AVT, 2005).....	14
Slika 2.3:	Sistema za preskus nosilnosti in izvedbo meritev izvlečkov prednapetega geotehničnega sidra: sistem s skupno napenjalko, meritev izvlečkov glede na nepomično točko (levo), sistem s posamičnimi napenjalkami, odčitavanje izvlečkov pramen neposredno na napenjalkah (desno).....	16
Slika 2.4:	Varianti izvedbe glav prednapetih geotehničnih sider: sistem s skupno sidrno kotvo (levo), sistem s posamičnimi kotvami (desno).....	17
Slika 2.5:	Tipične sestavne komponente trajnih prednapetih pramenskih geotehničnih sider.....	19
Slika 2.6:	Detajl jeklenega pramena z nizko relaksacijo \varnothing 15,2 mm.....	21
Slika 2.7:	Odvisnost med natezno napetostjo in deformacijo tipičnega jekla za prednapenjanje (prirejeno po <i>SIST EN 1992-1-1:2005</i>).....	21
Slika 2.8:	Sheme podložnih plošč za sidrne sisteme z dvema do šestimi posamičnimi kotvami.....	23
Slika 2.9:	Detajl posamične kotve zaklinjenega pramena: ogled s sprednje strani (levo), detajl oprijema zagozd na mestu prerezne ravnine (sredina). Desno je prikazan vzdolžni prerez skozi zagozdo v kotvi ter pogled na zagozdo od zgoraj.....	23
Slika 3.1:	Primerjava zasnove tlačnega tipa (levo) in nateznega tipa (desno) prednapetega sidra (prirejeno po Sabatini in sod., 1999).....	29
Slika 3.2:	Potek strižnih napetosti vzdolž veznega dela sidra: (a) dolg vezni del sidra s progresivnim popuščanjem, (b) primer veznega dela sidra iste skupne dolžine, teoretično sestavljenega iz 4 kratkih veznih delov z zanemarljivim progresivnim popuščanjem (prirejeno po Ostermayer in Barley, 2003).....	31
Slika 3.3:	Večkratno sidro z veznim delom dolžine 25 m v tleh zaledja mešane nosilnosti (Ostermayer in Barley, 2003).....	33
Slika 3.4:	Označena dela sidranega opornega zidu OZ-05 z vgrajenimi trajnimi prednapetimi električno izoliranimi geotehničnimi sidri z modificiranimi veznimi deli (območji testnega polja).....	43
Slika 3.5:	Koncept zasnove veznih delov trajnih prednapetih električno izoliranih pramenskih sider: zgoraj izhodiščni tip sidra RCP/D, spodaj modificirani tipi sider RCP/D-K (sidro povečane togosti), RCP/D-Z (večkratno sidro), RCP/D-I (sidro spremenljive togosti).....	44
Slika 3.6:	Trajno prednapeto električno izolirano 4-pramensko sidro CATI-ZRMK tip RCP/D.....	45
Slika 3.7:	Shema veznega dela modificiranega prednapetega geotehničnega sidra RCP/D-K.....	46
Slika 3.8:	Detajla izdelave modificiranega prednapetega geotehničnega sidra RCP/D-K: potek žic med prameni (levo), zgornji del veznega dela sidra RCP/D-K s tesnilnim stikom (desno).....	46
Slika 3.9:	Večkratno sidro SBMA (izumitelj Barley, A.D., patent številka EP 0 356 215 A2, datum objave prijave 28.02.1990).....	47
Slika 3.10:	Potek kontaktnih napetosti vzdolž veznega dela večkratnega sidra dolžine 12 m sestavljenega iz štirih podsider (po Barley in Ostermayer, 2003).....	49

Slika 3.11:	Shema veznega dela modificiranega prednapetega geotehničnega sidra RCP/D-Z.....	49
Slika 3.12:	Izdelava modificiranega prednapetega geotehničnega sidra RCP/D-Z: (a) oblikovani vezni deli podsider, (b) detajl tesnilnega stika podsider, (c) vezni del sidra RCP/D-Z pred namestitvijo rebraste PE cevi.....	50
Slika 3.13:	Prednapeto geotehnično sidro spremenljive togosti (izumitelj Škrabl, S., patent številka 21320, datum objave prijave 30.04.2004).....	51
Slika 3.14:	Shema veznega dela modificiranega prednapetega geotehničnega sidra RCP/D-I.....	51
Slika 3.15:	Izdelava modificiranega prednapetega geotehničnega sidra RCP/D-I: (a) oblikovani vezni deli podsider, na golih pramenih so lokalno vidni sledovi vazelina, (b) polnjenje tesnilnega stika podsidra, (c) detajl poteka pramen v zgornjem območju veznega dela podsidra.....	52
Slika 3.16:	Kontaminacija golih pramen veznega dela sider z vazelinom (zgoraj), mehansko čiščenje madežev vazelina s krtačo in razredčilom (spodaj levo), sledovi čiščenja vazelina z golih pramen veznega dela sidra RCP/D-I (spodaj desno).....	53
Slika 3.17:	Preskušanje uspešnosti razmaščevanja jeklenega pramena: (a) popolnoma razmaščen vzorec TKE zalit z injekcijsko maso v jeklen valj, (b) vzorec pramena v trgalnem stroju pripravljen za preskus, (c) primerjava stanja obeh vzorcev pramen po izvleku (levo vzorec ORG, desno vzorec TKE).....	54
Slika 3.18:	Diagrama laboratorijskih izvlečnih preskusov vzorcev razmaščenega pramena zalitega v injekcijski masi: vzorec ORG v osnovno očiščenem stanju (levo), vzorec TKE popolnoma razmaščen s tetrakloretilenom (desno).....	54
Slika 3.19:	Razkrita nosilna tla v območju opornega zidu OZ-05 oktobra 2006.....	55
Slika 3.20:	Testno polje z označenimi mesti vgradnje referenčnih RCP/D in modificiranih sider RCP/D-K, RCP/D-Z in RCP/D-I: (a) leva stran in (b) desna stran testnega polja OZ-05.....	57
Slika 3.21:	Sistem za preskušanje nosilnosti prednapetih pramenskih geotehničnih sider s posamičnimi napenjalkami (levo), merilne urice za odčitavanje izvlečkov posameznih pramen (desno).....	61
Slika 3.22:	Intervalne mere lezenja določene po inženirski metodi (metoda IP) za vsa sidra RCP/D, vgrajena v oporni zid OZ-05.....	70
Slika 3.23:	Detajl prehoda veznega dela v prosti del sidra RCP/D-K.....	72
Slika 3.24:	Intervalne mere lezenja določene po metodi IP za sidra RCP/D-K, vgrajena v oporni zid OZ-05.....	72
Slika 3.25:	Intervalne mere lezenja določene po metodi IP za sidra RCP/D-Z, vgrajena v oporni zid OZ-05.....	75
Slika 3.26:	Intervalne mere lezenja določene po metodi IP za sidra RCP/D-I, vgrajena v oporni zid OZ-05.....	78
Slika 3.27:	Izvečeno slabo zainjektirano trajno prednapeto geotehnično sidro, vgrajeno pod kotom 5°.....	80
Slika 3.28:	Intervalne mere lezenja določene po metodi IP za vsa sidra RCP/D, RCP/D-K, RCP/D-Z in RCP/D-I leta 2008 preskušena na opornem zidu OZ-05.....	81
Slika 3.29:	Povprečne intervalne mere lezenja določene po metodi IP za referenčna sidra in modificirana sidra v odvisnosti od stopnje sile, normalizirane z odpornostjo po jeklu sider (preskušanja na opornem zidu OZ-05 opravljena leta 2008).....	83
Slika 3.30:	Intervalne mere lezenja določene po metodi inženirske presoje (IP), po SIA 267/1 (SIA), po DIN 4125 (10) in po SIST prEN ISO 22477-5 (ISO) za vsa preskusna sidra testnega polja RCP/D, RCP/D-K, RCP/D-Z in RCP/D-I, na katerih so bile leta 2008 izvedene preiskave sidra do porušitve njihovih veznih delov.....	87

Slika 3.31:	Spreminjanje sil s časom izmerjenih v merilnih sidrih z vgrajenim dinamometrom v vrsti SBz sidranega objekta, v obdobju izvajanj preskušanj na testnem polju.....	92
Slika 3.32:	Modificirano sidro RCP/D-K z nameščenimi mononapenjalkami med preskusom nosilnosti (levo), detajlni pogled na razdelilno postajo hidravličnega sistema (desno).	92
Slika 3.33:	Primerjava intervalnih mer lezenja določenih leta 2008 in leta 2009 po metodi IP za sidra RCP/D, vgrajena v opornem zidu OZ-05.....	96
Slika 3.34:	Primerjava intervalnih mer lezenja določenih leta 2008 in leta 2009 po metodi IP za sidra RCP/D-K, vgrajena v opornem zidu OZ-05.....	97
Slika 3.35:	Primerjava intervalnih mer lezenja določenih leta 2008 in leta 2009 po metodi IP za sidra RCP/D-Z, vgrajena v opornem zidu OZ-05.	98
Slika 3.36:	Primerjava intervalnih mer lezenja določenih leta 2008 in leta 2009 po metodi IP za sidra RCP/D-I, vgrajena v opornem zidu OZ-05.	100
Slika 3.37:	Diagram $P_i - \Delta s_i$ pramena #2 sidra SBz-59 tipa RCP/D med ponovitvijo preiskave sidra leta 2009: običajen diagram (levo), nadgrajeni diagram z dodanim trenjem pri obremenjevanju in razbremenjevanju ter podanimi vmesnimi odčitki pri razbremenjevanju sidra (desno).	102
Slika 3.38:	Izmerjene vrednosti sil trenja pri obremenjevanju in razbremenjevanju sidra pri ponovljenih preskušanjih leta 2009.	102
Slika 3.39:	Vrednosti upadlih sil v sidru ΔP pred popravkom na stopnjah sile P_i med preiskavami sider tipov RCP/D, RCP/D-I, RCP/D-K in RCP/D-Z na testnem polju maja 2009.	104
Slika 3.40:	Povprečni popravki upadle sile v sidru ΔP pred odčitkom na posamezni stopnji sile P_i PS / VPN 6-pramenskega sidra: (a) simulacija na podlagi povprečja laboratorijskih rezultatov izotermne relaksacije vzorcev R-4 do R-9 in vzorcev RPR, (b) dejansko povprečne izmerjene vrednosti po tipih sider RCP/D, RCP/D-I, RCP/D-K in RCP/D-Z (testno polje, maj 2009).	105
Slika 3.41:	Razlike povprečnih popravkov upadle sidrne sile ΔP pred odčitkom na posamezni stopnji sile PS/VPN leta 2009 in povprečnih izmerjenih upadlih sil vzorcev RPR pri laboratorijskih preskusih izotermne relaksacije za 6-pramensko sidro.	106
Slika 4.1:	Rezultati dosedanjih preiskav sider: odpornosti 335 posameznih sider na izvlek glede na dolžino veznega dela (levo), povprečna odpornost sider na izvlek 87 objektov glede na koeficient variacije dosežen na posameznem sidranem objektu (desno).....	122
Slika 4.2:	Histogram frekvenc povprečnih odpornosti na izvlek za vseh 87 objektov v primerjavi z gostotama verjetnosti normalne porazdelitve in Gumbelove porazdelitve minimuma.....	124
Slika 4.3:	Kumulativna frekvenca odpornosti na izvlek R_a vseh 87 objektov v primerjavi s porazdelitvenima funkcijama normalne porazdelitve in Gumbelove porazdelitve minimuma.	124
Slika 4.4:	Histogram frekvenc koeficientov variacije V_{R_a} za prvo skupino (71 objektov) v primerjavi z gostotama verjetnosti normalne in logaritemsko normalne porazdelitve.....	127
Slika 4.5:	Kumulativna frekvenca koeficientov variacije V_{R_a} za prvo skupino (71 objektov) v primerjavi s porazdelitvenima funkcijama normalne in logaritemsko normalne porazdelitve.....	127
Slika 4.6:	Histogram frekvenc koeficientov variacije V_{R_a} za drugo skupino (32 objektov) v primerjavi z gostotama verjetnosti normalne in Gumbelove porazdelitve maksimuma.....	129
Slika 4.7:	Kumulativna frekvenca koeficientov variacije V_{R_a} za drugo skupino (32 objektov) v primerjavi s porazdelitvenima funkcijama normalne porazdelitve in Gumbelove porazdelitve maksimuma.	130

Slika 4.8:	Določitev sile kritičnega lezenja P_c za primer sidra SBz-26 tipa RCP/D na podlagi rezultatov preiskave sidra.	136
Slika 4.9:	Aproksimacijske funkcije referenčnih sider RCP/D za rezultate preskusov PS in VPN, kot tudi za različne metode določanja k_{int} (IP, SIA, 10 in ISO), določene po metodi najmanjših kvadratov.	139
Slika 4.10:	Primerjava odpornosti na izvlek R_a , doseženih pri preskušanjih leta 2008 na testnem polju: (a) pri določanju aproksimacijskih funkcij so bile upoštevane vse točke ($P_i, k_{int,i}$), (b) pri določanju aproksimacijskih funkcij niso bile upoštevane točke na stopnjah sile P_1 in P_2	142
Slika 4.11:	Primerjava karakterističnih odpornosti sider na izvlek R_{ak} , dobljenih iz rezultatov preskušanj sider na testnem polju leta 2008, izvrnotenih po različnih metodah.	143
Slika 4.12:	Kumulativna frekvenca intervalnih mer lezenja pri CPN in EPN, opravljenih na sidrih opornega zidu OZ-05: (a) skupen prikaz za vsa sidra objekta, (b) prikaz sider objekta ločeno po preskusnih silah.	148
Slika 4.13:	Kumulativna frekvenca intervalnih mer lezenja pri CPN in EPN opravljenih na sidrih objektov A, B, C in D.	154
Slika 5.1:	Primerja iz prakse – ekscentrični legi obročastega dinamometra SISGEO med preskušanjem nosilnosti sidra.	162
Slika 5.2:	Obročasti dinamometer SISGEO L216V150 in referenčni dinamometer KTN-DZY v hidravlični stiskalnici Amsler med preskušanjem vpliva ekscentrične lege na velikost izmerjenih sil.	163
Slika 5.3:	Pogled na namestitev obročastega dinamometrom SISGEO in zamik med osema obročastega in referenčnega dinamometra KTN-DZY pri ekscentričnosti 40 mm.	163
Slika 5.4:	Razlike vrednosti med referenčnim in obročastim dinamometrom: pri ekscentričnosti 0 mm (levo) in pri tlačni sili 150 kN v odstotku izbrane sile F_i (desno).	165
Slika 5.5:	Razlike med začetno prosto dolžino 28 m in (na podlagi netočno izmerjenih sil) izračunanimi efektivnimi prostimi dolžinami za 6-pramensko sidro pri rotaciji dinamometra 15°	166
Slika 6.1:	Elementi merilnega sistema za izvedbo preskušanj izotermne relaksacije po postopku izvedbe preiskav prednapetih geotehničnih sider.	169
Slika 6.2:	Izmerjene vrednosti upadlih sil ΔP (levo) in odvisnosti $P - \varepsilon$ (desno) vzorca pramena na vseh ravneh sil P_1 do P_8 preskusa relaksacije vzorca pramen R-2 po postopku za preiskavo sidra s kontrolirano hitrostjo vnosa sile na posameznih stopnjah sile P_i	172
Slika 6.3:	Izmerjene povprečne vrednosti upadlih sil ΔP (levo) in izvrnotene vrednosti relaksacije ρ (desno) med preskusi relaksacije vzorcev R-4 do R-9 po postopku za preiskavo sidra s spremljanjem časa vnosa sile (brez dodajanja upadlih sil).	174
Slika 6.4:	Izmerjene povprečne vrednosti upadlih sil ΔP pri preskusih relaksacije vzorcev pramen RPR po postopku za preiskavo sidra s stalnim dodajanjem upadlih sil s spremljanjem časa vnosa sile.	176
Slika 6.5:	Končne povprečne vrednosti upadlih sil ΔP vzorcev pramen $\varnothing 15,2$ mm trdnostnega razreda 1860 MPa istega proizvajalca glede na raven napetosti v vzorcih pramena.	177

LIST OF FIGURES

Figure 2.1:	Outline of a permanent prestressed ground anchor (below) with typical cross sections through a fixed length (above left) and a free length (above right) (adapted after Stahlton, 2009).	12
Figure 2.2:	Detail view of anchor head and inner anchor head of an prestressed ground anchor with comprehensive corrosion protection of Swiss manufacturer AVT (adapted after AVT, 2005). ...	14
Figure 2.3:	Setups for testing of a load-bearing capacity and displacement measurements of prestressed ground anchor: system of multi-strand testing, displacement measurement as to fixed point (left), system of monostrand stressing, displacement measurement of each individual strand directly on the monostrand jack (right).....	16
Figure 2.4:	Concepts of prestressed ground anchor head implementation: system with multiple wedge plate (left), system with individual bushes (right).	17
Figure 2.5:	Typical constituent components of permanent prestressed strand ground anchors.....	19
Figure 2.6:	Detail view of a low-relaxation steel strand \varnothing 15,2 mm.....	21
Figure 2.7:	Tension stress-strain relationship for typical prestressed steel (adapted after <i>SIST EN 1992-1-1:2005</i>).	21
Figure 2.8:	Diagrams of anchor plates for anchoring systems with two to six bushes.....	23
Figure 2.9:	Detail view of a bush with a locked-off strand: front view (left), detail view of a grip of a wedge in the cut through plane (middle). Layout of a longitudinal section through wedge placed in a bush as well as top view of a wedge are presented on the right.	23
Figure 3.1:	Comparison between different design of a prestressed anchor: compressive type (left) and a tensile type (right) (adapted after Sabatini et al., 1999).....	29
Figure 3.2:	Bond stress distribution along a fixed anchor length: (a) long fixed length of an anchor with progressive debonding, (b) example of the same total fixed length of an anchor theoretically composed of 4 short fixed length with negligible effect of debonding (adapted after Ostermayer and Barley, 2003).	31
Figure 3.3:	A Single bore multiple anchor with 25 m fixed length founded in mixed ground conditions (Ostermayer and Barley, 2003).....	33
Figure 3.4:	Anchored retaining wall OZ-05 with denoted regions where permanent prestressed electrically isolated ground anchors with modified bond lengths were installed (testing field regions).	43
Figure 3.5:	Conceptual diagrams of bond lengths of permanent prestressed electrically isolated strand anchors: above – original type of anchor RCP/D, below – modified types of anchors RCP/D-K (increased stiffness of bond length), RCP/D-Z (multiple anchor), RCP/D-I (anchor of variable stiffness).	44
Figure 3.6:	Permanent prestressed electrically isolated 4-strand anchor CATI-ZRMK tip RCP/D.....	45
Figure 3.7:	Outline of the bond length of a modified prestressed ground anchor of type RCP/D-K.	46
Figure 3.8:	Details of production of a modified prestressed ground anchor (type RCP/D-K): positioning of wires between strands (left), upper part of bond length of the anchor RCP/D-K with packing connection (right).....	46
Figure 3.9:	A Single Bore Multiple Anchor (inventor Barley, A.D., patent number EP 0 356 215 A2, date of publication of application 28.02.1990).	47

Figure 3.10:	Development of bond stress distribution along a four unit single bore multiple anchor containing within a 12 m fixed length (after Barley and Ostermayer, 2003).	49
Figure 3.11:	Outline of the bond length of a modified prestressed ground anchor of type RCP/D-Z.	49
Figure 3.12:	Production of a modified prestressed ground anchor of type RCP/D-Z: (a) formed lengths of anchor units, (b) detail view of an anchor unit packing connection, (c) bond length of the RCP/D-Z anchor before installation of corrugated PE duct.....	50
Figure 3.13:	A prestressed ground anchor of variable stiffness (inventor Škrabl, S., patent number 21320, date of publication of application 30.04.2004).	51
Figure 3.14:	Outline of the bond length of a modified prestressed ground anchor of type RCP/D-I.	51
Figure 3.15:	Production of a modified prestressed ground anchor of the type RCP/D-I: (a) formed lengths of anchor units, locally visible traces of vaseline on bare strands, (b) filling of packing connection of an anchor unit, (c) detail view of strand positioning in the upper part of bond length of an anchor unit.....	52
Figure 3.16:	Bare strands of anchors' bond length smeared with vaseline (above), mechanical cleaning of vaseline stains with brush and diluter (below left), traces of removed vaseline from bare strands of bond length of an RCP/D-I anchor (below right).	53
Figure 3.17:	Efficiency testing of degreasing of steel strand: (a) completely degreased sample TKE grouted within steel cylinder, (b) a strand sample in the tensile testing machine prepared for testing, (c) comparison of both samples after pull-out (sample ORG – left, sample TKE – right).....	54
Figure 3.18:	Diagrams of laboratory pull-out tests of grouted degreased strand samples: sample ORG in elementary degreased condition (left), sample TKE completely degreased with tetrachloroethylene (right).	54
Figure 3.19:	Uncovered bearing ground in the region of retaining wall OZ-05 (October 2006).	55
Figure 3.20:	Testing field with marked locations, where original RCP/D and modified anchors RCP/D-K, RCP/D-Z and RCP/D-I were installed: (a) left side and (b) right side of the testing field OZ-05.	57
Figure 3.21:	System for load-bearing capacity testing of prestressed strand ground anchors using monostrand jacks (left), displacement transducers for measuring of extensions of individual strands (right).....	61
Figure 3.22:	Interval creep displacement rates defined after the engineering judgement method (IP method) for all RCP/D anchors installed in the retaining wall OZ-05.	70
Figure 3.23:	Detail view of transition between tendon bond and free length of an RCP/D-K anchor.....	72
Figure 3.24:	Interval creep displacement rates defined after the IP method for RCP/K anchors installed in the retaining wall OZ-05.	72
Figure 3.25:	Interval creep displacement rates defined after the IP method for RCP/Z anchors installed in the retaining wall OZ-05.	75
Figure 3.26:	Interval creep displacement rates defined after the IP method for RCP/I anchors installed in the retaining wall OZ-05.	78
Figure 3.27:	Pulled-out permanent prestressed ground anchor poorly grouted under angle of 5°.	80
Figure 3.28:	Interval creep displacement rates defined after the IP method for all RCP/D, RCP/K, RCP/Z as well as RCP/I anchors tested in 2008 on the retaining wall OZ-05.	81
Figure 3.29:	Average interval creep displacement rates defined after the IP method for reference and modified anchors in relation to the load level, normalised with the internal anchor resistance (testings performed on the OZ-05 retaining wall in 2008).	83

Figure 3.30:	Interval creep displacement rates defined after the engineering judgement method (IP), after the <i>SIA 267/I</i> (SIA), after the <i>DIN 4125</i> (10) and after the <i>oSIST prEN ISO 22477-5</i> (ISO) for all RCP/D, RCP/D-K, RCP/D-Z and RCP/D-I anchors of the testing field, on which investigation tests (up to the rupture of the anchors' bond lengths) have been performed in 2008.	87
Figure 3.31:	Variations of forces in the time period of the testing field investigations, measured in measuring anchors (equipped with load cell), installed at the SBz level of the anchored structure.	92
Figure 3.32:	Modified anchor of type RCP/D-K with placed monostrand jacks during the testing of load-bearing capacity (left), detail view of the central manifold of hydraulic system (right).....	92
Figure 3.33:	Comparison of interval creep displacement rates calculated in 2008 and 2009 after the IP method for RCP/D anchors, installed in the retaining wall OZ-05.	96
Figure 3.34:	Comparison of interval creep displacement rates calculated in 2008 and 2009 after the IP method for RCP/D-K anchors, installed in the retaining wall OZ-05.	97
Figure 3.35:	Comparison of interval creep displacement rates calculated in 2008 and 2009 after the IP method for RCP/D-Z anchors, installed in the retaining wall OZ-05.....	98
Figure 3.36:	Comparison of interval creep displacement rates calculated in 2008 and 2009 after the IP method for RCP/D-I anchors, installed in the retaining wall OZ-05.....	100
Figure 3.37:	Diagram $P_i - \Delta s_i$ for the strand #2 (anchor SBz-59 of type RCP/D) during investigation test, repeated in 2009: usual diagram (left), upgraded diagram supplemented with friction at loading and unloading as well as with intermediate read-offs, taken during unloading of the anchor (right).	102
Figure 3.38:	Measured friction forces during loading and unloading phases of anchor testing, repeated in 2009.	102
Figure 3.39:	Values of decreased forces ΔP before correction on force levels P_i during investigation tests of anchor types RCP/D, RCP/D-I, RCP/D-K and RCP/D-Z (testing field, May 2009).	104
Figure 3.40:	Average supplements of decreased forces ΔP before reading on individual level of force P_i of PS / VPN of an 6-strand anchor: (a) simulation based on average laboratory results of isothermal relaxation tests of samples R-4 to R-9 as well as samples RPR, (b) actual average values measured on anchor types RCP/D, RCP/D-I, RCP/D-K and RCP/D-Z (testing field, May 2009).	105
Figure 3.41:	Subtractions of average supplements of decreased forces ΔP before reading on individual level of force of PS/VPN in 2009 and average values of decreased forces measured on samples RPR at laboratory isothermal relaxation tests for an 6-strand anchor.	106
Figure 4.1:	Previous investigation test results: external resistances of 335 individual anchors in relation to the bond length (left), average anchors external resistance for 87 anchored structures in relation to the coefficient of variation attained on individual anchored structure (right).	122
Figure 4.2:	Frequency histogram of average external anchor resistances for all 87 structures in comparison with normal density distribution and Gumbel distribution of the minimum.	124
Figure 4.3:	Cumulative frequency of external anchor resistance R_a for all 87 structures in comparison with cumulative distribution functions of normal distribution and Gumbel distribution of the minimum.	124
Figure 4.4:	Frequency histogram of coefficients of variation V_{R_a} for group No. 1 (71 structures) in comparison with normal density and log-normal density distribution.	127
Figure 4.5:	Cumulative frequency of coefficients of variation V_{R_a} for group No. 1 (71 structures) in comparison with cumulative distribution functions of normal and log-normal distribution.	127

Figure 4.6:	Frequency histogram of coefficients of variation V_{R_a} for group No. 2 (32 structures) in comparison with normal density and density of the Gumbel distribution of maximum.	129
Figure 4.7:	Cumulative frequency of coefficients of variation V_{R_a} for group No. 2 (32 structures) in comparison with cumulative distribution functions of normal distribution and the Gumbel distribution of maximum.	130
Figure 4.8:	Determination of the critical creep load P_c on the basis of investigation test results for the case of anchor SBz-26 (type RCP/D).	136
Figure 4.9:	Model functions for VPN and PS tests performed on reference anchors RCP/D, defined after least square method, where different methods (IP, SIA, 10 and ISO) were used for calculation of k_{int}	139
Figure 4.10:	Comparison of external anchor resistance R_a obtained on field testing in 2008: (a) model functions obtained by considering of all points ($P_i, k_{int,i}$), (b) points obtained on the force levels P_1 and P_2 has not been considered at the determination of model functions.	142
Figure 4.11:	Comparison of the characteristic external anchors resistances R_{ak} calculated after different methods from testing results obtained on the testing field in 2008.	143
Figure 4.12:	Cumulative frequency of interval creep displacement rates at CPN and EPN performed on the anchors of the retaining wall OZ-05: (a) joint presentation for all production anchors, (b) separated presentation after proof loads for production anchors.	148
Figure 4.13:	Cumulative frequency of interval creep displacement rates at CPN and EPN performed on the anchors of structures A, B, C and D.	154
Figure 5.1:	Practical examples of eccentrical positions of ring load cell SISGEO taken during load-bearing testing of anchors.	162
Figure 5.2:	Ring load cell SISGEO L216V150 and reference load cell KTN-DZY in the hydraulic press Amsler during the testing of influence of eccentrical positions on measured forces.	163
Figure 5.3:	View of setting up of ring load cell SISGEO and spacing between axes of ring load cell and reference load cell KTN-DZY at the eccentricity of 40 mm.	163
Figure 5.4:	Subtracted values of measured forces on reference load cell and ring load cell: at eccentricity of 0 mm (left) and at compressive force 150 kN, represented as a percentage of selected force F_i (right).	165
Figure 5.5:	Differences between original tendon free length of 28 m for 6-strand anchor and actual apparent free lengths calculated with the consideration of inexact measured forces at 15° rotation of load cell.	166
Figure 6.1:	Elements of the instrumentation system used for isothermal relaxation tests according to the procedure of investigation test of prestressed ground anchors.	169
Figure 6.2:	Measured values of decreased forces ΔP (left) and relation $P - \varepsilon$ (right) of a strand sample on all force levels P_1 to P_8 of relaxation test for sample R-2, performed by the anchors' investigation test procedure with controlled speed of loading at individual force level P_i	172
Figure 6.3:	Values of decreased forces ΔP (left) and values of relaxation ρ (right) obtained during the relaxation tests of samples R-4 to R-9 by the anchors' investigation test procedure with time registration for loading (without supplements of decreased forces).	174
Figure 6.4:	Average values of decreased forces ΔP measured at the relaxation tests of strand samples RPR performed by the anchors' investigation test procedure with permanent supplement of decreased forces and with time registration for loading.	176
Figure 6.5:	Final average values of decreased forces ΔP for strand samples $\varnothing 15,2$ mm of grade 1860 MPa (all made by the same manufacturer) as regards the stress level in the strand samples.	177

1 NAMEN IN STRUKTURA DISERTACIJE

1.1 SPLOŠNO

Sodobna prednapeta geotehnična sidra so bila prvič vgrajena v sklopu sanacije pregrade Cheurfas v Alžiriji leta 1934. V začetku 1950-ih so bila v Švici vgrajena prva prednapeta sidra, izdelana po tehnologiji sistemov prednapenjanja konstrukcij, v sredini 1960-ih so opravili prve korake pri razvoju samostojne tehnike sidranja s sidri z gibljivim prostim delom, medtem ko so se sidra z dvojno protikorozijsko zaščito začela pojavljati v začetku 1980-ih. Leta 1985 so v Švici izvedli obsežnejše sidranje na območju elektrificirane železnice, kjer so sistem protikorozijske zaščite vgrajenih sider prvič preverili z meritvami električne upornosti, prva uspešna električna izolacija glave sidra je bila izvedena leta 1992. Za trajna prednapeta električno izolirana geotehnična sidra je značilna popolna električna izoliranost jeklenih delov sidra od okolja: pramena so po celotni dolžini obdana s polietilenskim ovojem, vodotesno priključenim na elemente glave sidra, medtem ko so jekleni deli glave sidra električno ločeni od sidrane konstrukcije in pokriti z zaščitnim pokrovom. Ideja električne izolacije sidra temelji na dejstvu, da je korozija elektrokemičen pojav: v jeklenem nateznem elementu, zalitem v injekcijski masi, ki je od okolja popolnoma električno izoliran, ne more teči električni tok, ki bi pospeševal korozijske procese, kar je še posebej pomembno na področjih, kjer se pojavljajo blodeči tokovi in povsod, kjer moramo računati z nastankom makroelementov. Z električno izolacijo je že sama po sebi zagotovljena tudi vodotesnost, zato je notranji prostor sidra istočasno zanesljivo zaščiten proti vdoru agresivnega medija (vode), kadarkoli pa je možna tudi kontrola nepoškodovanosti polietilenskega ovoja sidra.

Zaradi omejenih zemljišč za gradnjo v urbanih okoljih ter potrebe po izkopih in tehnikah podpiranja v neugodnih geoloških in topografskih pogojih, se prednapeta geotehnična sidra vedno pogosteje uporabljajo takrat, ko je izvedba drugih geotehničnih ukrepov močno otežena, omejena ali pa sploh ni možna, bistveno se je zmanjšal obseg potrebnega zemljišča za gradnjo, hkrati pa so se zmanjšali tudi stroški gradnje. Sidra so v tehnološkem smislu zasnove in konstrukcije sidra, kot tudi vgradnje in izdelave protikorozijske zaščite, že dosegla tisto raven trajnosti, da bodo (pod pogojem primerne vzdrževanja) sposobna dolgoročno opravljati svojo funkcijo. Z nadgradnjo sistema protikorozijske zaščite in tehnološkimi izboljšavami je hkrati s kakovostjo sider rastla tudi njihova cena, zato so vedno bolj prisotne težnje po racionalizaciji izvajanja sider, ki pa je zaradi ostrih zahtev po trajnosti možna edinole v smislu doseganja večjih nosilnosti sider. Eden od učinkovitih pristopov je usmerjen v iskanje cenovno ugodnih in konstrukcijsko učinkovitih rešitev v smislu doseganja večjih odpornosti in boljše izrabe sider, kar je možno doseči s spremembami veznega dela običajnih sider v slabo nosilnih zemljinah in mehkih kamninah. Po drugi strani pa moramo na vsakem sidranem objektu čimbolj izkoristiti razpoložljivo nosilnost tal, zato na posebej vgrajenih preskusnih sidrih, vgrajenih na območju sidranega objekta, izvedemo preiskave sider do porušitve za ugotovitev dosegljive odpornosti na izvlek.

1.2 CILJI DISERTACIJE

Eden od najpomembnejših ciljev doktorske disertacije je bil pripraviti v praksi izvedljivo tehnološko zasnovo pramenskih sider s skupnim zaščitnim polietilenskim ovojem s tremi različnimi koncepti modificiranih veznih delov ter izvesti preskuse nosilnosti teh sider v mehkih kamninah oziroma trdnih zemljinah testnega polja.

Glede na to, da pri večstopenjskih preskusih napenjanja ni smelo priti do porušitve veznih delov, je pomemben cilj predstavljal razvoj in izdelava računalniškega orodja za izvedbo preiskav sider in večstopenjskih preskusov napenjanja z dovolj odprto zasnovo, ki bo omogočalo sprotno vrednotenje vseh ključnih parametrov obnašanja sider z različnimi dolžinami pramen pri preiskavah sider in večstopenjskih preskusih napenjanja na testnem polju. Za potrebe kasnejše analize obnašanja vseh tipov modificiranih sider na testnem polju smo pričakovali, da bo treba računalniško orodje ustrezno nadgraditi. Pri sidrih tipov RCP/D-Z (glej [poglavje 3.3.3](#)) in RCP/D-I (glej [poglavje 3.3.4](#)) lahko namreč analiziramo obnašanje ne samo sidra kot celote, pač pa tudi podsider in posameznih pramen sidra in to tudi v primerih, ko bomo pri preiskavah sider in večstopenjskih preskusih napenjanja izločevali posamezna porušena pramena iz skupnega hidravličnega sistema, zaradi česar bodo sile v pramenih istega sidra različne. Računalniško orodje smo želeli oblikovati tako, da bi med preskusi lahko spremljali tudi oblike krivulj v diagramih $P - \Delta s$ pri prehodih iz posamezne stopnje sile P_i na začetno silo P_a , silo trenja pri obremenjevanju in razbremenjevanju sider kot tudi beležili padce sil pred izvedbo odčitkov izvlečkov pramen v predpisanih časovnih intervalih.

Kot končni cilj terenskih preskušanj smo po končani obdelavi rezultatov preiskav sider in večstopenjskih preskusov napenjanja želeli analizirati rezultate vseh treh konceptov modificiranih sider, preskušanih na testnem polju in jih primerjati z obnašanjem referenčnih sider RCP/D (glej [poglavje 3.3.1](#)). Ob tem smo pri določitvi merodajnih intervalnih mer lezenja k_{int} hoteli hkrati preveriti vpliv različnih metod vrednotenja odčitkov, dobljenih pri preiskavah sider. Zadali smo si nalogo, da bomo odpornost na izvlek R_a posameznih sider določili po različnih metodah in sicer tako za odpornost na izvlek, dobljeno na podlagi povprečenja izvlečkov vseh pramen kabla sidra, kot tudi za primer vrednosti R_a sider, dobljene kot vsote odpornosti na izvlek posameznih pramen kabla sidra. Želeli smo preveriti, ali sta taki vrednosti enaki oz. poiskati razloge, zakaj se morebiti razlikujeta.

Nadaljnji izziv je bil na podlagi odpornosti R_a posameznih sider določiti skupno karakteristično odpornost na izvlek vseh preskusnih sider objekta R_{ak} , na osnovi katere se določita preskusna sila za preskusno nosilnosti P_p in sila zaklinjenja P_0 sider objekta. Možni pristopi so bili različni, veljavni evropski predpisi so glede določitve R_{ak} nedorečeni, zato smo hoteli R_{ak} določiti po različnih pristopih, pri čemer smo želeli uporabiti tudi statistične metode in razpoložljive rezultate številnih preiskav sider, opravljenih v zadnjem desetletju. Zanimalo nas je, kolikšen bo raztros vrednosti R_{ak} , dobljenih po različnih metodah.

Pomemben cilj preiskav sider ni samo določitev razpoložljive karakteristične odpornosti na izvlek R_{ak} na lokaciji sidranega objekta, pač pa moramo na podlagi opravljenih preiskav sider določiti tudi dopustno mero lezenja za sidra objekta k_{adm} . Za sidra testnega polja, kot tudi sidra nekaj sidranih objektov iz prakse, smo hoteli preveriti, ali bodo dosežene intervalne mere lezenja k_{int} manjše od dopustne mere k_{adm} , v kolikor pa temu ne bo tako, pa bo treba ugotoviti razloge za takšno obnašanje sider.

Na podlagi spremljanja velikega števila preiskav sider in dolgoletnih izkušenj smo vedeli, da obnašanja sider v začetnih fazah preiskav sider, v smislu visokih vrednosti mer lezenja, ne moremo pojasniti s popuščanjem veznih delov sider pri nizkih stopnjah sil. Kot enega od ciljev smo si zadali, da bomo z izvedbo laboratorijskih preskusov iskali odgovore na takšno obnašanje preskusnih sider pri preiskavah sider v območju nizkih sil. Kot potencialni možnosti smo predvideli vpliv relaksacije pramen iz visokovrednega jekla pri konstantni temperaturi, ki je sicer znan kot pojav pri prednapetih konstrukcijah (pri katerih nas sicer zanima dolgoročni upad sil), kot tudi morebitni vpliv ekscentrične lege obročastega dinamometra (glede na os sidra) na velikosti sil med preiskavami sider. Da bi lahko rezultate terenskih

preskusov neposredno primerjali z ugotovitvami laboratorijskih preskušanj smo oba tipa laboratorijskih preskusov izvedli po enakem postopku obremenjevanja pramen, kot sicer izvajamo preiskave sider na terenu.

Kot končni cilj smo si na podlagi izvedenih in analiziranih preiskav sider na testnem polju zadali nalogo pripraviti predlog za dopolnitev postopkov izvedbe in analize rezultatov preiskav sider v praksi, s katerim bi poskušali odpraviti pomanjkljivosti v veljavnih predpisih in bi premostili nejasnosti v obstoječi evropski regulativi glede izvedbe in vrednotenja preiskav sider prednapetih pramenskih sider. Po drugi strani bo rezultat opravljenega dela tudi potrditev, ali so preskušene variante modificiranih tipov trajnih prednapetih pramenskih sider s skupnim zaščitnim polietilenskim ovojem v praksi izvedljive. Na podlagi obstoječih preskusov smo pričakovali, da bomo lahko podali tudi ustrezne usmeritve za učinkovito izvedbo takšnih sider v praksi.

1.3 STRUKTURA DISERTACIJE

Glede na velik obseg zbranega materiala, rezultatov in zapisov opravljenega dela smo se zaradi preglednosti odločili, da bomo disertacijo vsebinsko razdelili na dva dela: v besedilo disertacije smo vključili vse bistvene podatke, opise ter rezultate preskušanj in analiz vključno s komentarji ter končnimi ugotovitvami, medtem ko v šestih dodatkih podajamo zgodovinsko ozadje prednapetih sider, podrobnejše rezultate preskušanj, opravljenih na testnem polju, predstavljamo računalniško orodje za sprotno vrednotenje in analizo rezultatov preiskav sider, podajamo opis metode najmanjših kvadratov s poudarkom na analizi rezultatov preiskav sider, kot tudi podrobnejše opise laboratorijskih preskusov vpliva ekscentrične lege dinamometra na izmerjene sile in izotermne relaksacije pramen po postopku za izvedbo preiskave sidra.

Vsebinske dele za prvim poglavjem, ki poleg orisa vsebine podaja namen in cilje dela, smo razdelili v sklope, ki si sledijo v smiselnem zaporedju:

- Sklop A – Uvodna predstavitev trajnih sider (poglavje 2),
- Sklop B – Terenska preskušanja z analizo dobljenih rezultatov (poglavji 3 in 4),
- Sklop C – Laboratorijska preskušanja (poglavji 5 in 6),
- Sklop D – Zaključki (poglavje 7).

V **sklopu A** so predstavljene najpomembnejše značilnosti, sestavljanje in vgradnja trajnih prednapetih pramenskih geotehničnih sider. Zelo na kratko so opisane sestavne komponente obravnavanih sider s poudarkom na predstavitvi jeklenih komponent (pletениh pramen in elementov glav sider).

Najobsežnejši del disertacije predstavlja **sklop B**, ki se navezuje na izvedbo in analizo rezultatov terenskih (in-situ) preskušanj sider. V poglavju 3 najprej podajamo pregled principov delovanja veznih delov sider, povzet po literaturi, na podlagi katerega smo pripravili izhodišča za različne tehnološke zasnove veznih delov sider: kot osnovo za oblikovanje sider smo vzeli sidra RCP/D s skupno dolžino sider ($l = 35,0$ m) in dolžino veznega dela ($l_v = 7,0$ m), kot so že bila vgrajena na opornem zidu OZ-05. Del tega objekta je bil namenjen za testno polje, v katerega smo vgradili referenčna in modificirana sidra, ki smo jih zaradi primerljivosti oblikovali tako, da sta bili dolžini l in l_v vseh sider enaki kot pri sidrih objekta. V testno polje so bila vgrajena tri referenčna sidra RCP/D, ter po pet modificiranih sider vsakega tipa: sidra z veznimi deli s povečano togostjo (RCP/D-K), večkratnega sidra z zamaknjenimi

veznimi deli, zasnovana na ideji sidra SBMA Barleya, a spremenjenega tako, da se vsa podsidra nahajajo v skupnem polietilenskem ovoju (RCP/D-Z) in sidra spremenljive togosti po patentu Škrabla (RCP/D-I).

Sidra RCP/D in po eno modificirano sidro vsakega tipa so bili preskušeni do porušitve (preiskava sidra), ostala sidra pa so bila preskušena po enakem postopku, le da smo preskus prekinili tik preden se je vezni del sidra porušil (večstopenjski preskusi napenjanja). Prvi del preskušanj smo izvedli leta 2008, leto kasneje pa smo preskušanja v celoti ponovili, pri čemer smo preverili izvedljivost možnosti izločanja posameznih pramen iz hidravličnega sistema po porušitvi njihovega veznega dela, dodatno smo spremljali silo trenja pri obremenjevanju in razbremenjevanju sider ter beležili padce sil pred izvedbo odčitkov izvlečkov pramen v predpisanih časovnih intervalih.

V poglavju 4 smo se osredotočili na analizo rezultatov preiskav sider in večstopenjskih preskusov napenjanja. Na podlagi povprečenja izvlečkov pramen sidra smo določili in primerjali odpornosti na izvlek R_a sider vseh tipov (RCP/D, RCP/D-K, RCP/D-Z in RCP/D-I), pri čemer smo obenem preverili vpliv štirih različnih metod vrednotenja pri določitvi merodajnih intervalnih mer lezenja k_{int} (metoda inženirske presoje IP, metoda SIA po pristopu standarda *SIA 267*, metoda 10 po starem nemškem standardu *DIN 4125* in metoda ISO po osnutku standarda *prEN ISO 22477-5*). Po drugi strani smo odpornost sidra na izvlek R_a določili tudi kot vsoto odpornosti na izvlek posameznih pramen kabla sidra, pri čemer so bile vrednosti k_{int} določene po metodi IP. Vrednosti R_a določene za sidro kot celoto in kot vsoto odpornosti posameznih pramen, določene po metodi IP, smo medsebojno primerjali. Na podlagi analize rezultatov posameznih sider smo nadalje določali skupno karakteristično odpornost na izvlek sider objekta R_{ak} ; glede na to, da so veljavni evropski predpisi glede določitve R_{ak} nedorečeni, smo vrednost R_{ak} določili po različnih pristopih: po *TSC 07.202*, Evrokodu *1997-1* (z uporabo korelacijskega faktorja ξ), statističnih metodah predvidenih v Evrokodih (med drugim smo uporabili tudi razpoložljive rezultate številnih preiskav sider, opravljenih v zadnjem desetletju), standardih *EN 1537* in *SIA 267* ter osnutku standarda *prEN ISO 22477-5*, poskusili pa smo tudi primernost ideje, da bi na podlagi vseh intervalnih mer lezenja k_{int} vseh sider objekta istega tipa, po metodi najmanjših kvadratov, določili najustreznejše aproksimacijske funkcije. Dobljene vrednosti R_{ak} smo primerjali in komentirali.

Na podlagi rezultatov preiskav sider smo določili dopustne mere lezenja $k_{adm}(P_p)$ za sidra objekta OZ-05. Ugotovili smo, da intervalne mere lezenja k_{int} pri sidrih objekta niso bile vedno manjše od dopustne mere k_{adm} . Zaradi specifičnosti opornega zidu OZ-05 razlogi za takšen rezultat na tem objektu niso bili jasno razvidni, zato smo izbrali vzorec štirih objektov iz prakse, na katerih smo po pristopih te disertacije ponovili obdelave preiskav sider in preskusov nosilnosti sider. Tudi pri teh objektih smo ponovno ugotovili, da intervalne mere lezenja k_{int} pri sidrih objekta niso bile vedno manjše od dopustne mere k_{adm} , pri čemer smo iz primerjave podatkov o izvedenih preiskavah sider izluščili najpomembnejše razloge za takšno obnašanje sider.

V poglavju 5 **sklopa C** podajamo povzetek laboratorijskih preskušanj z namenom preverbe, kolikšen je vpliv ekscentričnega lege obročastega dinamometra glede na os kabla sidra na izmerjene vrednosti sil. Ugotovili smo, da se pomembna odstopanja sil pojavljajo predvsem na prvi, v manjši meri pa tudi na drugi stopnji sile PS. Na kasnejših stopnjah sile je vpliv ekscentrične lege dinamometra manjši, a se odraža v odstopanjih efektivnih prostih dolžin sider. Na podlagi preskušanj predlagamo določene spremembe postopka izvedbe preiskave sidra, pogostejšo kalibracijo dinamometrov in opozarjamo na ustrezno namestitev elementov območja glave preskusnega sidra.

Strnjen povzetek laboratorijskih preskušanj izotermne relaksacije pramen po postopku obremenjevanja, kot se uporablja pri preiskavah sider, podajamo v poglavju 6. Zaradi občutljivosti in zahtevnosti izvedbe preskušanj, smo preskušanja izvedli v več zaporednih fazah: po predhodnih preskušanjih, na podlagi katerih smo ugotovili ključne vplivne parametre (pri katerih se je kot še posebej pomembno izkazalo spremljanje časa vnosa sile), smo nato izvedli preskušanja izotermne relaksacije po stopnjah sil preiskav sider brez in z dodajanjem upadlih sil, posebej pa smo preverili vpliv takojšnjih (zaporednih) ponovitev izvedbe preiskave sidra na vrednosti upadlih sil. Preskušanja izotermne relaksacije smo po razpoložljivih podatkih kot prvi na svetu izvedli s stališča izvedbe preiskave sidra, pri čemer smo med drugim ugotovili vzroke za visoke vrednosti mer lezenja na začetnih stopnjah preiskave sidra, ki jih ne moremo pojasniti s popuščanjem veznih delov sider. Za prakso pomemben rezultat opravljenih preskušanj je ugotovitev, da se z zaporednim ponavljanjem preiskav sider vrednosti relaksacije ρ , v območju natezних napetosti nad 60 % nazivne natezne trdnosti pramen, manjšajo.

V **sklopu D** navajamo povzetek in bistvene zaključke disertacije, podajamo predlog za oblikovanje za prakso uporabnih modificiranih sider kot tudi predlog za izvedbo in vrednotenje preiskav sider. V poglavju 7 podajamo tudi smernice za nadaljnje delo.

Sestavni del doktorske disertacije so tudi dodatki, ki jih zaradi boljše preglednosti disertacije, podajamo posebej:

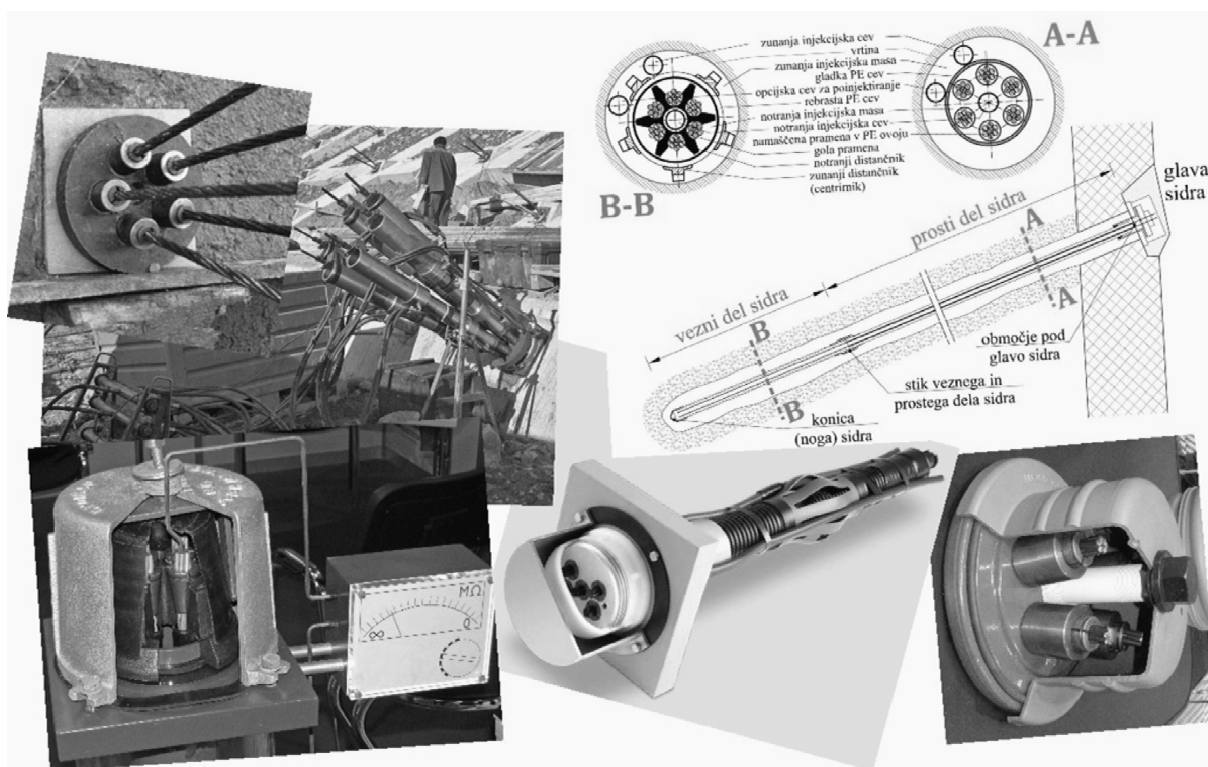
- V **dodatku A** na podlagi razpoložljivih virov podajamo zgodovinski pregled razvoja sistemov prednapenjanja in geotehničnih sider. Posebno pozornost smo namenili razvoju sistema protikorozijske zaščite trajnih prednapetih sider. Sledi kratek pregled uveljavljanja sider po svetu.
- Rezultati vseh izvedenih preskusov nosilnosti sider, opravljenih na testnem polju leta 2008 in 2009, so zbrani v **dodatku B**. Za vse štiri tipe sider (RCP/D, RCP/D-K, RCP/D-Z in RCP/D-I) so za vsak izvedeni preskus sistematično podani kratki opisi obnašanja sidra v smislu pojava mer lezenja k , kot tudi razvoja efektivne proste dolžine l_f in trajnih izvlečkov ΔS_{bl} .
- Za operativno izvedbo preskušanj na testnem polju in analizo rezultatov preskušanj, smo razvili računalniško orodje, ki ga podrobneje opisujemo v **dodatku C**. Kot podlago za pripravo koncepta delovanja tega orodja smo izbrali modificirana sidra tipov RCP/D-Z in RCP/D-I, pri katerih smo morali zaradi različnih dolžin prostih oz. veznih delov sider spremljati in analizirati obnašanje ne samo sidra kot celote, pač pa tudi obnašanje podsider in posameznih pramen kabla sidra. Zaradi odprte zasnove in možnosti velike prilagodljivosti smo orodje izdelali v programu Microsoft Excel. V dodatku opisujemo zasnovo orodja od vnosa podatkov v lista 1 in 2 orodja, od koder se podatki avtomatsko prenašajo na naslednje liste, kjer se preračunavajo in v obliki diagramov prikazujejo vrednosti efektivnih prostih dolžin l_f in trajnih izvlečkov ΔS_{bl} , po štirih opisanih metodah (IP, SIA, 10 in ISO) pa se izvednotijo intervalne mere lezenja k_{int} , na podlagi katerih se izračunavajo odpornosti sider na izvlek R_a .
- V **dodatku D** na kratko podajamo ozadje metode najmanjših kvadratov, ki smo jo uporabili pri analizi rezultatov preiskav sider. V tem dodatku navajamo izbrane aproksimacijske funkcije, katerih primernost smo preverili na primeru dveh preiskav sider izvedenih na opornem zidu OZ-05.
- Podrobnejši opis opreme in izvedbe laboratorijskega preskusa ekscentrično obremenjenega obročastega dinamometra SISGEO tip L216V150, kot smo ga uporabili tudi pri izvedbi preskušanj na testnem polju, se nahaja v **dodatku E**. Med preskusom smo obročasti dinamometer, pod določenim kotom nameščen v stiskalnico, sistematično zamikali in merili silo na obročastem in referenčnem dinamometru. Na podlagi dobljenih rezultatov smo analizirali obnašanje obročastega dinamometra,

pri čemer smo pojasnili vpliv ekscentričnosti dinamometra na obnašanje sider med preiskavami sider.

- V **dodatku F** smo se osredotočili na laboratorijska preskušanja izotermne relaksacije pramen. V prvem delu dodatka podajamo pregled literature v zvezi z relaksacijo pramen in njenim standardiziranim preskušanjem, kot se izvaja pri prednapenjanju konstrukcij. Po razpoložljivih podatkih smo kot prvi na svetu izvedli preskus relaksacije pramen sidra po postopku za izvedbo preiskave sidra, katere namen ni vpogled v dolgoročen padeč sile v prednapetem pramenu, pač pa smo študirali vpliv prednapetja in relaksacije prednapetega pramena na sam potek in rezultate preiskav sider. Na podlagi predhodnih preskušanj pramen po postopku preiskave sidra smo spoznali pomembne parametre izvedbe preskušanja. V nadaljevanju smo preskušanja opravili po stopnjah preiskave sidra brez korekcije upadlih sil (postopek podoben standardiziranem preskušanju), s korekcijo upadlih sil (neposredna analogija dejanskemu postopku preiskave sidra v praksi), prav tako pa smo preverili, kakšen vpliv ima relaksacija na obnašanje sider pri zaporedno ponovljenih preiskavah sider. Na podlagi opravljenih preskušanj smo pojasnili vpliv napenjanja na izvlečke (in posredno na mere lezenja k) na začetnih stopnjah sile preiskave sidra.

Sklop A

UVODNA PREDSTAVITEV TRAJNIH SIDER



2 PREDSTAVITEV TRAJNIH PREDNAPETIH PRAMENSKIH GEOTEHNIČNIH SIDER

Prednapeta geotehnična sidra so konstrukcijski elementi, ki prenašajo natezno silo s sidrane konstrukcije v nosilna tla zaledja, katerih vezni deli so vgrajeni v nosilna tla dovolj oddaljena od sidrane konstrukcije. Taka sidra se uporabljajo v vseh tistih primerih, ko je uporaba drugih geotehničnih ukrepov ali metod varovanja močno otežena, omejena ali pa sploh ni izvedljiva oz. ni ekonomsko upravičena. Za omejitev pomikov sidrane konstrukcije in tal zaledja na še sprejemljivo raven se sidra predhodno *prednapnejo* – vanje se vnese natezna sila, ki je potrebna za vzpostavitev ravnotežja med sidrom, sidrano konstrukcijo, na katero se sidro opira, in tlemi zaledja, v katera je sidro vgrajeno.

Predpogoj za nastanek prednapetih geotehničnih sider je bil razvoj sistemov prednapenjanja, katerih ideja in koncept sta bila prenesena na prednapeta geotehnična sidra. V [dodatku A](#) disertacije je podan podrobnejši zgodovinski pregled razvoja sistemov prednapenjanja in trajnih prednapetih geotehničnih sider. Prvo idejo prednapenjanja je že leta 1886 patentiral P.H. Jackson, leta 1923 je R.E. Dill ugotovil tako pomembnost izgub pri napenjanju zaradi lezenja in krčenja betona kot tudi, da moramo za uspešno prednapenjanje uporabiti žice iz jekla visoke trdnosti, ki pa jih je poleg tega treba napeti z visokimi silami. Za pionirja današnjega prednapetega betona velja francoski inženir E. Freyssinet, ki je prepoznal prednosti prednapenjanja in je ključno prispeval k njegovemu razvoju – najprej je patentiral prednapenjanje betonskih konstrukcijskih elementov z okroglimi jeklenimi elementi visoke trdnosti prednapetimi vsaj na 400 MPa, nato pa še različne izume v zvezi z napenjalkami za prednapenjanje. Freyssinet je patentirani sistem prednapenjanja prvič praktično uporabil pri sanaciji terminala preko-oceanke Normandie v pristanišču Le Havre leta 1933.

Prvo dokumentirano navedbo poskusov uporabe geotehničnih sider iz kovanega železa vgrajenih za podpiranje brežine prekopa je leta 1874 podal Frazer, nekako v istem času so v zgornješlezjskih premogovnikih za varovanje področja temena rudarskih izkopov že uporabljali kratka sidra v obliki jeklenih palic. Prelomni primer ene od prvih in zelo impresivnih uporab sidranja s prednapetimi geotehničnimi sidri je bila ojačitev masivne pregrade Cheurfas v Alžiriji (Barrage des Cheurfas), prvotno izgrajene leta 1882. V sklopu sanacije pregrade je v obdobju 1934-1935 francoski inženir A. Coyne v rastru 3,5 m vgradil vrsto navpičnih geotehničnih sider nosilnosti 10 MN, ki so z veznim delom segala približno 15 m globoko pod temelj pregrade in so bila naknadno prednapeta. Po drugi svetovni vojni je z začetkom proizvodnje jeklenih žic in pramen visokih trdnosti kot tudi razvojem metod vrtnanja in injektiranja v številnih evropskih državah prišlo do razvoja prednapetih geotehničnih sider, pri čemer pa so se prednapeta geotehnična sidra v gradbeništvo v večjem obsegu začela uporabljati po letu 1958, ko je bilo uspešno vgrajeno prvo sidro v zemljini. Leta 1978 je T. Barley izvedel izvlečne preskuse zelo kratkih veznih delov pramen, ki so pokazali, da se je kljub kratkim veznim delom pramen sila v celoti prenesla na smolo. Ti rezultati so bili podlaga za razvoj večkratnih sider s kratkimi veznimi deli medsebojno zamaknjenih podsider.

Razvoju sposobnosti sider za prevzem sidrskih sil je sledil tudi razvoj protikorozijske zaščite, ki se je v pretežni meri odvijal v Evropi. Sprva so se na osnovi tehnologije sistemov prednapenjanja konstrukcij nekje od 1960 do 1975 vgrajevala *prednapeta sidra s polno povezavo*, pri katerih so bile jeklene žice vzdolž celotne dolžine zalite s cementno injekcijsko maso. V sredini 1960-ih so se že pojavila prva *sidra z gibljivim prostim delom*, pri katerih so bila pramena v prostem delu namaščena in oplaščena. Ta sidra so se v drugi polovici 1970-ih že močno uveljavila, vendar pa so bila, zaradi nedodelanih

tehnoloških rešitev in posledičnih nenadnih porušitev, od začetka 1980-ih nadomeščena s *sidri z dvojno protikorozijsko zaščito*, pri katerih je jeklen kabel vzdolž celotne dolžine zaščiten s plastično cevjo. Zaradi potrebnih izboljšav stika plastične cevi v območju prehoda veznega v prosti del, kot tudi prehoda prostega dela na glavo sidra ter izpostavljenosti blodečim tokovom, so v začetku 1990-ih v Švici razvili *električno izolirana sidra s celovito protikorozijsko zaščito*, kot jih še danes uporabljamo tudi pri nas. Ta tehnologija med drugim omogoča kontrolo nepoškodovanosti zaščitnega plastičnega ovoja jeklenih delov sider kadarkoli med življenjsko dobo sidranja.

2.1 TEMELJNE ZNAČILNOSTI, SESTAVLJANJE IN VGRADNJA PREDNAPETIH PRAMENSKIH GEOTEHNIČNIH SIDER V NAŠI PRAKSI

2.1.1 Uvod

Prednapeta geotehnična sidra so močno obremenjeni konstrukcijski elementi, ki preko pramen iz visokovrednega jekla predstavljajo natezni vezni člen med tehnološko obvladovano in dostopno sidrano konstrukcijo, na katero aktivno deluje sila prednapetja, ter mestom vgradnje globoko v tleh zaledja, ki je nedostopno in praktično nikoli ni povsem poznano. S prednapenjanjem in zaklinjenjem sider je omogočeno njihovo takojšnje aktiviranje še pred pojavom deformacij oz. pomikov zaledja, s čimer se preprečujejo prekomerni pomiki in deformacije sidranega objekta. Za učinkovitost prednapetja moramo na eni strani zagotoviti zadostno nosilnost (odpornost) stika veznega dela sidra in tal zaledja, na drugi strani morajo biti sestavne komponente medsebojno združljive (skladne), imeti pa morajo tudi ustrezne mehanske lastnosti, ki bodo omogočale dolgoročni prenos obremenitev in zagotavljale trajno protikorozijsko zaščito, torej se v življenjski dobi sidra lastnosti materialov ne smejo spremeniti v taki meri, da sidra ne bi več zagotavljala minimalnih zahtev glede nosilnosti in togosti.

Geotehnična sidra, ki delujejo po principu mobilizacije trenja vzdolž osi sidra, delimo na:

- **Prednapeta geotehnična sidra**, katerih kabel je narejen iz jekla visoke trdnosti z nizko relaksacijo. Zanje je značilen prosti del sidra, ki se neovirano razteza, medtem ko je vezni del sidra vedno umaknjen v globino zaledja, tako da se v celoti nahaja za t.i. aktivnim klinom. Za ta sidra je značilno, da se nosilnost vsakega vgrajenega sidra preskuša s hidravlično napenjalko. V disertaciji bomo obravnavali preiskave trajnih prednapetih pramenskih sider s celovito protikorozijsko zaščito, katerih jekleni deli so električno izolirani od okolja.
- **Nenapeta geotehnična sidra** so oblikovana na enak način kot prednapeta sidra (torej imajo oblikovan prosti del), le da je njihov kabel izdelan iz jekla nizke trdnosti. Tudi pri teh sidrih se izvajajo preskusi nosilnosti, vendar se ta sidra ne prednapenjajo na začetno silo.
- **Pasivna geotehnična sidra** so običajno palična sidra izdelana iz jekla nizke trdnosti, zalita vzdolž celotne dolžine sidra, ki deluje kot vezni del. Uporabljajo se bolj v funkciji splošne ojačitve tal in ne kot tipična sidra. Preskušanje nosilnosti se izvajajo le na manjšem delu vgrajenih sider.

Pri zahtevnejših objektih in posegih v prostor, ki se izvajajo na razgibanem in geološko zahtevnem terenu, pri katerih se novozgrajeni objekti in konstrukcije zajedajo globoko v obstoječi prostor, so najpogostejša izbira trajna prednapeta pramenska geotehnična sidra. S takimi sidri v tla vnašamo natezne sile, ki so za tla precej neugodne, saj je sposobnost večine materialov tal za prenos nateznih obremenitev slaba. Nekatere vrste zemljin in kamnin sicer imajo omejeno sposobnost prevzema nateznih obremenitev (Hanna, 1982), vendar pa se le-ta zaradi vplivov izravnave površnih tlakov in razvoja razpok s časom spreminja.

Predpogoj za uveljavitev trajnih prednapetih geotehničnih sider je bil med drugim razvoj tehnike vrtnanja, ki sedaj omogoča zadostno hitrost vrtnanja tudi v zahtevnejših tleh (tako zemljinah kot tudi kompaktnih kamninah), možne pa so tudi izvedbe daljših vrtin dolžin 40 do 60 m pa tudi več. Vrtanje se lahko učinkovito izvaja tudi v zaledjih s talno vodo, možne so različne metode odstranjevanja izvrtanine, z dvojnimi vrtnimi sistemom sestavljenim iz zunanje obložne cevi in notranjega vrtnega droga je možno tudi vrtanje v potencialno nestabilnih tleh (Dausch in Kluckert, 2001). Z razvojem zasnove, tehnologije vgradnje in metod preskušanja trajnih prednapetih sider ter pridobljenimi izkušnjami, se taka sidra vedno bolj uveljavljajo kot finančno učinkovita in tehnično uveljavljena metoda za izvedbo raznih oblik globokih izkopov in varovanj. Prednosti prednapetih sider pred drugimi (klasičnimi) metodami podpiranja lahko predstavimo na primeru primerjave izvedbe sidranega in težnostnega zidu (Sabatini in sod., 1999): sidrani zid je istočasno že trajna konstrukcija, zato začasno podpiranje za izvedbo izkopa ni več potrebno, prav tako ni potrebno globoko temeljenje, delovna površina za izvedbo izkopa ni ovirana zaradi morebitnih opor podporne konstrukcije, sidrani zid omogoča prevzem relativno visokih bočnih pritiskov, ne da bi bilo pri tem treba povečati prečni prerez samega zidu, odpade zasipavanje za zidom, čas izvajanja gradbenih del se skrajša, za izvedbo del je potreben manjši delovni prostor, manjše površine deponij, zaradi manjšega obsega potrebnih transportov pa je manjša tudi obremenitev okolja.

Primeri uporabe prednapetih geotehničnih sider so (Hunkeler in sod., 2005):

- oporne in podporne konstrukcije – razni sidrani zidovi in pilotne stene, varovanje in utrjevanje naravnih brežin in pobočij, podpiranje vkopov, sanacije nestabilnih pobočij in plazov,
- varovanje sten izkopa globokih gradbenih jam predvsem v urbanih središčih pri izvajanju gradbenih del dlje od dveh let oz. pri izvedbi globokih gradbenih jam v agresivnejših tleh,
- varovanje in utrjevanje odprtih pri podzemnih gradnjah, pri katerih se ne more izoblikovati tlačni obok (npr. razcepi predorov, kaverne), varovanje brežin portalov predorov,
- pritrjevanje porušeni in nestabilni delovni kamnine na neporušeno trdno osnovo, povečevanje sile trenja na stikih plasti v tleh,
- prevzem vzgonskih sil pri hidrotehničnih konstrukcijah, podzemnih gradnjah, temeljih in kletih, ki segajo v območje podzemnih voda, povezovanje morebitnih nadgradenj z obstoječim objektom (ojačevanje pregrad), varovanje pregradnih zidov za primere povišanja ravni vode ali potresov,
- vzpostavljanje ugodnega napetostnega stanja v kritičnih conah in preprečevanje nezaželenih deformacij pri visokih pregradah,
- preprečevanje prevrnitev in zagotavljanje stabilnosti konstrukcij, ki prenašajo natezne sile zgornje konstrukcije v tla (npr. sidranje opornikov premostitvenih objektov, različnih drogov in stebrov, anten, pritrdišč tlačnih cevovodov, postaj žičnic, visečih mostov).

2.1.2 Uvedba trajnih prednapetih pramenskih sider s celovito protikorozijsko zaščito

Med trajna prednapeta geotehnična sidra uvrščamo tista prednapeta sidra, katerih življenjska doba je vsaj enaka predvideni življenjski dobi sidrane konstrukcije. Vgrajujejo se v primerih vgrajevanja sider v agresivno okolje in v vseh primerih, ko je predvidena življenjska doba sidranja več kot dve leti. Sidra so tudi električno izolirana, zato so primerna tudi za vgradnjo v področjih, kjer je možna prisotnost blodečih tokov. Možne so naslednje izvedbene različice prednapetih sider:

- **preskusna (testna) sidra** oblikovana in vgrajena identično sidrom objekta, le da so praviloma opremljena z dodatnim pramenom; namenjena so za izvedbo preiskav sider do porušitve, s katerimi na lokaciji sidranega objekta ugotavljamo dosegljive odpornosti veznega dela sider na izvlek R_a ,

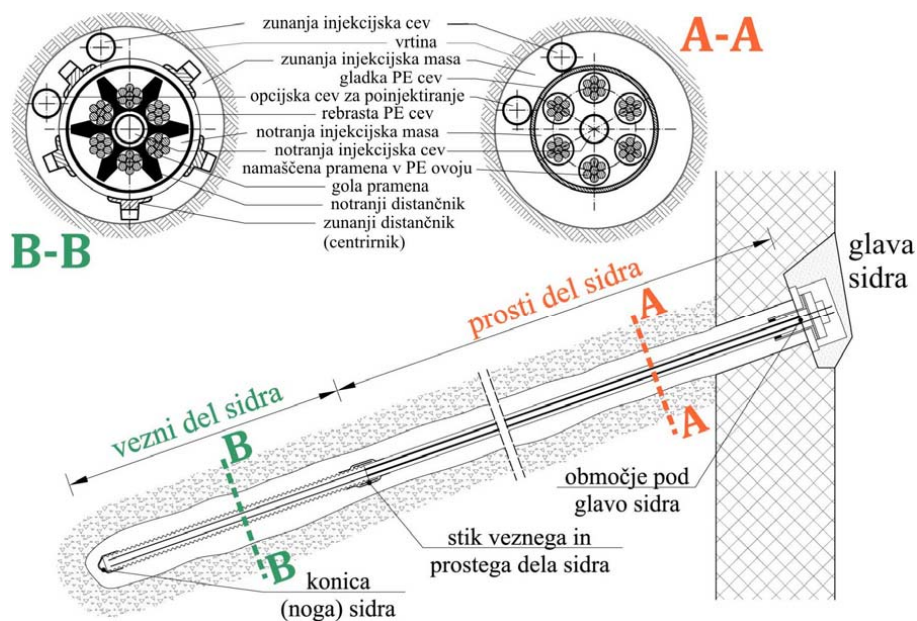
- **konstrukcijska sidra**, ki so sestavni konstrukcijski elementi sidranega objekta,
- **kontrolna sidra**, na katerih se lahko v poljubnem času življenjske dobe sidranega objekta izvajajo dodatni preskusi za ugotavljanje nosilnih karakteristik sider ter
- **merilna sidra**, ki so opremljena z napravo za merjenje sile – dinamometrom, tako da je možno kadarkoli med življenjsko dobo sidranega objekta izmeriti sidrno silo.

Pri načrtovanju Nacionalnega programa avtocest v Republiki Sloveniji (NPIA) se je izkazalo, da bo zaradi zahtevnosti umestitve avtocestnega telesa v prostor, nujno izvesti številna sidranja, zato je bilo treba pri izvedbi NPIA vključiti najnovejša dognanja stroke na področju sidranja. Tehnološki korak naprej pri izvedbi trajnih prednapetih geotehničnih sider smo v Sloveniji naredili leta 1996, ko smo preko smernic *SODOC 16 Smernice za geotehnična sidra* uveljavili v tistem času najmodernejši predpis tako s stališča protikorozijske zaščite kot tudi preskušanja nosilnosti sider – priporočilo *SIA V 191*. Skladno s tem priporočilom (in kasneje tudi s standardoma *SIA 267* in *SIA 267/1*) morajo trajna prednapeta geotehnična sidra izpolnjevati zahteve **celovite protikorozijske zaščite**: jeklena pramena morajo biti popolnoma in trajno ločena od tal oz. zavarovana pred dostopom agresivnega medija (vode), hkrati pa mora biti preprečen električni kontakt z objektom. Na vsakem sidru moramo izvesti meritve **izolacijske upornosti** R_I med nosilnimi jeklenimi deli sidra in tlemi zaledja, s katero se dokaže, da je sidro galvanjsko ločeno od tal zaledja ter da je zaščitni polietilenski ovoj sidra v brezhibnem stanju. Neoporečnost celotnega zaščitnega ovoja sidra kakor tudi splošna električna izoliranost sidra od tal in sidrane konstrukcije je dokazana, če je pri 500 V enosmernega toka med jeklenimi prameni oz. glavo sidra in tlemi izmerjena upornost $R_I \geq 0,1 \text{ M}\Omega$. Pri sidrih, pri katerih ta pogoj ni izpolnjen, moramo z meritvijo **ozemljitvene upornosti** R_{II} vsaj dokazati, da ni neposrednega stika med glavo sidra in armaturo sidrane konstrukcije: v tem primeru mora biti izpolnjen pogoj $R_{II} \geq 100 \Omega$. Funkcionalnost protikorozijske zaščite mora biti zagotovljena ves čas uporabe sidranega objekta, kar pri nedostopnih jeklenih delih pomeni, da mora trajanje protikorozijske zaščite ustrezati času uporabe sider.

V letu 1997 je bil v sklopu NPIA že izveden prvi sidrani objekt, v katerega so bila vgrajena trajna prednapeta geotehnična sidra, ki so izpolnjevala zahteve *SIA V 191*. Pogostnost vgradnje trajnih prednapetih sider je z leti hitro naraščala, tako da je bilo v zadnjih 15 letih samo za potrebe izgradnje ali obnove avtocestnega omrežja, železniških povezav in v okviru hidroenergetskih objektov po dostopnih podatkih izvedenih več kot sto sidranih objektov.

2.1.3 Zasnova trajnih prednapetih pramenskih geotehničnih sider

Osnovna nosilna komponenta trajnih prednapetih geotehničnih sider je kabel sidra, sestavljen iz jeklenih pramen, ki so na dolžini veznega dela sidra zaradi zagotavljanja prenosa sil v vezi jekla z injekcijsko maso gola, medtem ko so po celotni prosti dolžini sidra namaščena in opláščena s polietilensko (PE) cevjo. Kabel sidra je vzdolž celotne dolžine obdan z zunanjim zaščitnim PE ovojem, ki ga v prostem delu predstavlja gladka PE cev, v veznem delu pa, zaradi boljšega stika sidra s cementno injekcijsko maso, rebrasta PE cev. Pri nas se je uveljavila uporaba prednapetih geotehničnih sider, ki so sestavljena iz dveh do šest pramen nominalnega premera 15,2 mm oz. 15,7 mm iz jekla nazivne natezne trdnosti 1770 MPa oz. 1860 MPa. Značilen primer takega sidra je podan na [sliki 2.1](#), na kateri so označeni tudi najpomembnejši sestavni deli sidra. Zaradi jasnosti predstavitve je vezni del sidra prikazan poenostavljeno, saj sta dolžina kabla veznega dela sidra in dolžina rebraste PE cevi identični, čeprav je v praksi rebrasta cev nekoliko zamaknjena v prosti del sidra.



Slika 2.1: Shema trajnega prednapetega geotehničnega sidra (spodaj) z značilnima prečnima prerezoma preko veznega dela (levo zgoraj) in prostega dela (desno zgoraj) (prirejeno po Stahlton, 2009).

Figure 2.1: Outline of a permanent prestressed ground anchor (below) with typical cross sections through a fixed length (above left) and a free length (above right) (adapted after Stahlton, 2009).

Značilni sestavni deli trajnega prednapetega sidra so:

- **Prosti del sidra**, v katerem je omogočeno neovirano raztezanje pramen kabla sidra, služi kot povezovalni člen za prenos natezne sile z glave sidra v vezni del sidra. Delovanje sidra zavisi od prostega dela sidra, zato potrebna računsko prosta dolžina sidra l_{fr} izhaja iz dokaza globalne varnosti nosilnosti in uporabnosti celotne sidrane konstrukcije. Za omejitev padca sidrskih sil pri zaklinjanju in porasta sil pri premikih zaledja med življenjsko dobo sidranja konstrukcije je smiselno izbrati večjo prosto dolžino sidra, kot je minimalna računsko potrebna (najmanj 7 m). V prostem delu je vsak od pramen oploščan v ovojno PE cev, vmesni votli prostor pa je zapolnjen s trajnoplastičnim protikorozijskim sredstvom. Za preprečitev prodora injekcijske mase v prostor med pramenom in ovojno PE cevjo so pramena na stiku z veznim delom sidra zatesnjena. Kabel sidra je v tem delu obdan še z zunanjo gladko PE cevjo, ki je stikovana na rebrasto PE cev veznega dela sidra tako, da je spoj mehansko dovolj trden, kemično obstojen in električno izolativen. V kolikor so v območju prostega dela sidra pričakovani prečni pomiki tal glede na os sidra, mora prostor med gladko PE cevjo sidra in vrtino ostati prazen.

Na prosti del sidra se nanašata dva različna izraza: **računska prosta dolžina l_{fr}** – dolžina prostega dela, kot jo na podlagi zahteve projektanta med sestavljanjem sidra dejansko izdelata in oblikuje proizvajalec sidra ter **efektivna prosta dolžina sidra l_f** – dolžina, na kateri se pramena sidra med napenjalnim preskusom ali med zaklinjenjem sidra dejansko raztegnejo.

- **Vezni del sidra** je območje prenosa natezne sile iz kabla sidra v nosilna tla zaledja, v katerem se votla prostora (v rebrasti PE cevi in med rebrasto PE cevjo in steno vrtine) zapolnita s cementno injekcijsko maso (slika 2.1). Za preprečevanje neugodnih medsebojnih vplivov med veznimi dolžinami sosednjih sider, znaša minimalna razdalja med veznimi deli sider vsaj 1,5 m. Vezni del sidra se praviloma vzdolž celotne dolžine nahaja v istem tipu tal (v zemljini ali v kamnini), pri čemer moramo upoštevati, da na obnašanje veznega dela sidra vgrajenega v kamnino, poleg trdnosti kamenine vplivata tudi njena plastovitost in razpokanost.

Za zagotovitev učinkovitejšega prenosa sile iz pramen sidra preko injekcijske mase v tla zaledja je v veznem delu zaščitna PE cev sidra rebrasta, pri čemer mora biti cev kemično obstojna in električno izolativna, na spodnjem delu pa zaključena s PE konico. Dolžino veznega dela preskusnih sider predhodno oceni projektant, dejansko dolžino veznega dela sider objekta pa projektant določi na podlagi rezultatov preiskav sider izvedenih na posameznem sidranem objektu. Vezna dolžina sidra naj bo omejena na območje nekje med 3 in 8 m oz. največ 10 m, medtem ko povečanje dolžine nad 10 m praktično nima več vpliva na povečanje nosilnosti sider – odpornosti na izvlek (Barley, 1997a, Wichter in Meiniger, 2000 ter Ostermayer in Barley, 2003). V Švici velja praksa, da proizvajalci sider v svoji tehnični dokumentaciji glede na tipe tal že predvidijo orientacijske vrednosti odpornosti na izvlek R_a in dolžine veznega dela sidra l_v . V **preglednici 2.1** povzemamo priporočene vrednosti švicarskega proizvajalca AVT Anker + Vorspanntechnik AG: kot spodnjo mejo proizvajalec priporoča minimalno dolžino veznega dela 4 m (v zemljinah) in 3 m (v kamninah), medtem je dolžina veznega dela navzgor omejena na 8 m (v zemljinah) in 10 m (v kamninah).

Preglednica 2.1: Priporočene vrednosti odpornosti na izvlek R_a in dolžine veznega dela sidra l_v švicarskega proizvajalca AVT Anker + Vorspanntechnik AG (AVT, 2005).

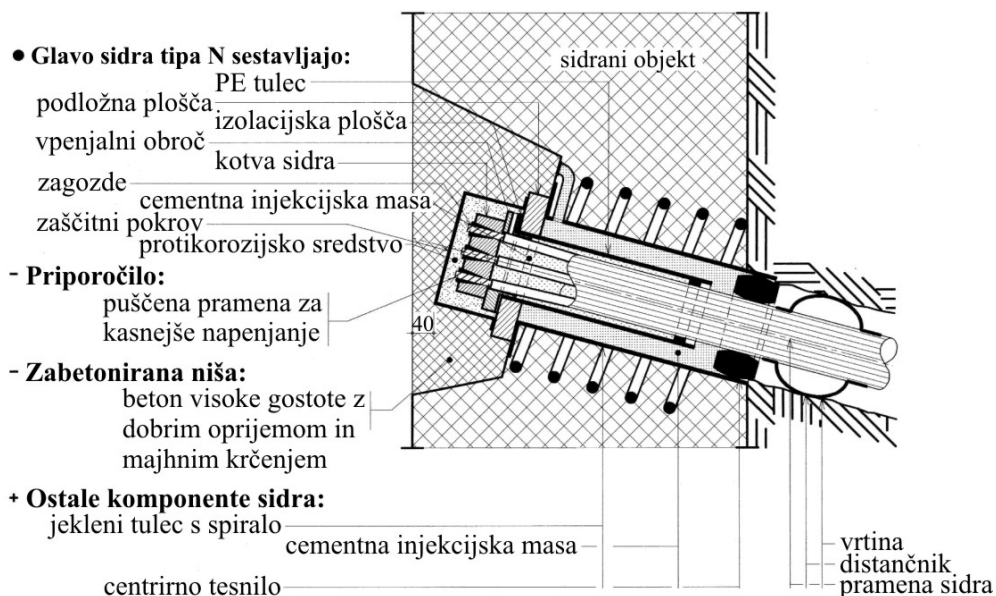
Table 2.1: Recommended values of anchor pull-out resistance R_a and tendon bond lengths l_v from Swiss manufacturer AVT Anker + Vorspanntechnik AG (AVT, 2005).

Vrsta tal (zemljine)	R_a^* [kN]	l_v [m]
Normalno konsolidirani zaglinjeni melji (sedimenti)	150 – 200	4 – 6
Normalno konsolidiran melj (fini pesek)	250 – 400	4 – 6
Rahli grobi peski, prodi (aluvialne zemljine)	350 – 600	4 – 7
Prekonsolidirani melji, fini peski (ledeniško predobremenjeni sedimenti)	500 – 900	5 – 8
Gosti grobi peski in prodi (slabo zlepljen grušč, ledeniško predobremenjen grušč prodornin)	700 – 1100	5 – 8
Močno zgoščena mešana tla iz gline, melja, peska in proda (talna morena)	500 – 1200	5 – 8
Vrsta tal (kamnine)	R_a [kN]	l_v [m]
Laporast, rahlo preperel molasni peščenjak	300 – 600	4 – 6
Drobnozrnati, rahlo preperel molasni peščenjak	400 – 900	4 – 8
Apnenčasti peščenjak, molasno apnenčasti peščenjak, biotitno granitni gnajsi	800 – 2000	3 – 8
Finozrnati molasni peščenjak	800 – 3500	3 – 8
Granit, gnajs, trdi apnenci in dolomiti	1100 – 5000	3 – 10

Opomba: * ... Vrednosti odpornosti na izvlek R_a je v zemljinah možno povečati s poinjektiranjem.

- **Glava sidra** sestavljena iz sidrne (podložne) plošče, ene ali več kotev (v odvisnosti od sistema napenjanja) in zagozd. Preko glave sidra se sidrna sila iz jeklenih pramen prenaša na sidrani objekt in ga pritiska na zaledje. Zasnovana in oblikovana mora biti tako, da pri odklonu pramen od normale na sidrno ploščo do največ 3° brez poškodb prevzame 97 % porušne sile po pramenih P_{pk} . Za zagotovitev trajnosti sider je ključnega pomena vodotesna izvedba priključka glave sidra na zainjektirano tovarniško izdelano telo sidra, istočasno pa moramo zagotoviti pravokoten in centričen položaj elementov glave sidra glede na os kabla vgrajenega sidra. Po dokazani zadostni odpornosti sidra se sidro napne na projektno silo zaklinjenja P_0 , nato pa se izvedejo predvideni

ukrepi protikorozijske zaščite glave sidra (pritrudi se zaščitna kapa napolnjena s protikorozijskim sredstvom, lahko pa se preko pokrova konstrukcijskih sider dobetonira še betonska bradavica). Na [sliki 2.2](#) je primer izvedbe vodotesne in električno izolirane glave sidra in območja pod glavo za sidro s celovito protikorozijsko zaščito švicarskega proizvajalca AVT (2005).



Slika 2.2: Detajlni prikaz glave sidra in območja pod glavo sidra za prednapeto geotehnično sidro s celovito protikorozijsko zaščito švicarskega proizvajalca AVT (prirejeno po AVT, 2005).

Figure 2.2: Detail view of anchor head and inner anchor head of an prestressed ground anchor with comprehensive corrosion protection of Swiss manufacturer AVT (adapted after AVT, 2005).

2.1.4 Sestavljanje in vgradnja trajnih prednapetih geotehničnih sider

Prvi korak v proizvodnem procesu sider je izvedba namaščevanja in oplasčenja pramen v PE cevi v prostih delih ter rezanje pramen na predvidene projektne dolžine. Sledi povezovanje pramen z notranjo injekcijsko cevjo z distančniki v snop, nato pa se preko sidra natakmeta zunanji zaščitni – gladka in rebrasta – PE cev, izvede zatesnitev na stiku prosti/vezni del ter na konici sidra. V sklepem delu se na sidro pritrdi zunanja injekcijska cev, v veznem delu pa tudi zunanji distančniki. Na sestavljenem sidru se z meritvijo izolacijske upornosti R_1 v kadi z vodo preveri brezhibnost zunanjega zaščitnega PE ovoja, nato pa se sidro zvije v kolut premera primerne za transport in shrani na deponiji obrata do prevoza na gradbišče. Na mestu vgradnje se najprej izvrti vrtina, pri čemer se izbere metodo, ki povzroča minimalne spremembe tal oz. povzroča spremembe, ki najboljše vplivajo na odpornost sider. Pred vstavljanjem sidra v vrtino se sidro vizualno pregleda in vstavi v vrtino. Takoj po vstavitvi, najkasneje pa po 12 urah, se običajno pristopi k injektiranju notranjosti PE ovoja sidra, ki se neprekinjeno izvaja od najnižje spodnje točke navzgor do popolne zapolnjenosti notranjosti sidra. Sledi injektiranje zunanjega dela sidra (t.j. prstanestega votlega prostora med PE ovojem sidra in steno vrtine), pri čemer se uporablja cementna injekcijska masa prilagojena sposobnostim tal za injektiranje. Za zagotavljanje odpornosti sidra je poleg izkušenosti vrtalca, ki opravi vrtnanje in pravilno očisti vrtino, potrebna tudi izkušnost vgrajevalca sider, ki izbere primerno injekcijsko maso, injekcijske tlak za zapolnjevanje votlega prostora v vrtini, kot tudi izvede postopek injektiranja, ki se jih za vsak primer posebej določi na podlagi rezultatov opravljenih geotehničnih raziskav, preiskav sider in podatkov dobljenih med vrtnanjem vrtin.

2.1.5 Preskušanje nosilnosti in dokončanje trajnih prednapetih geotehničnih sider

Za prednapeta geotehnična sidra je značilno, da se pred vnosom po projektu predvidene sile zaklinjenja P_0 najprej izvede dokazni preskus nosilnosti vsakega vgrajenega sidra. Že priporočilo *SIA V 191* je predvidevalo "piramidalno obliko" preskušanja nosilnosti sider od posameznih preskusov žrtvenih sider do porušitve do enostavnih preskusov nosilnosti na vseh sidrih objekta, ki se izvedejo pri nižjih silah:

- še pred začetkom vgrajevanja sider objekta moramo na nekaj posebej vgrajenih preskusnih sidrih izvesti 6- do 10-stopenjske **preiskave sider** do porušitve, katerih namen je potrditi tehnologijo vgradnje sider in ugotoviti razpoložljivo odpornost veznega dela sider na dani lokaciji,
- sledi začetek vgrajevanja sider objekta, pri čemer se na vsaj 10 % sider objekta najprej izvedejo tristopenjski **celoviti preskusi nosilnosti**, na podlagi katerih se potrdijo parametri odpornosti sider, določeni pri preiskavah sider; v kolikor je obnašanje sider slabše, se išče vzroke za tako stanje in izvede dopolnilne preiskave sider,
- v nasprotnem primeru se na vseh preostalih sidrih objekta izvede enostopenjski **enostavni preskus napenjanja**, s katerim se potrdi zadostna odpornost vsakega sidra objekta.

Skladno s standardoma *EN 1997-1* in *EN 1537* so za ugotavljanje nosilnosti prednapetih geotehničnih sider predvidene naslednje vrste preskusov:

- **preiskave sider** – obremenilni preskusi, s katerimi ugotavljamo odpornost veznega dela preskusnih sider po vezi injekcijske mase s tlemi zaledja in s katerimi določimo karakteristike sidra v predvidenem območju delovne sidrne sile (angl. investigation test);
- **ustreznostni preskusi** – obremenilni preskusi na mestu vgraditve, ki potrjujejo, da bodo s projektom predvidena sidra v danih geotehničnih pogojih ustrezna (angl. suitability test);
- **odobritveni preskusi** – obremenilni preskusi na mestu vgraditve, za potrditev izpolnjevanja projektnih zahtev na vsakem vgrajenem sidru (angl. acceptance test).

Sistem ugotavljanja nosilnosti sider v *SIA V 191* in kasnejših *SIA 267* in *SIA 267/1* je podoben, pri čemer so postopki izvedbe preskusov, kot tudi vrednotenja rezultatov, obravnavani bistveno bolj podrobno, kot v evropskih standardih. V novih švicarskih standardih *SIA 267* in *SIA 267/1*, ki sta usklajena tako z *EN 1997-1* kot tudi *EN 1537*, so predvideni naslednji preskusi:

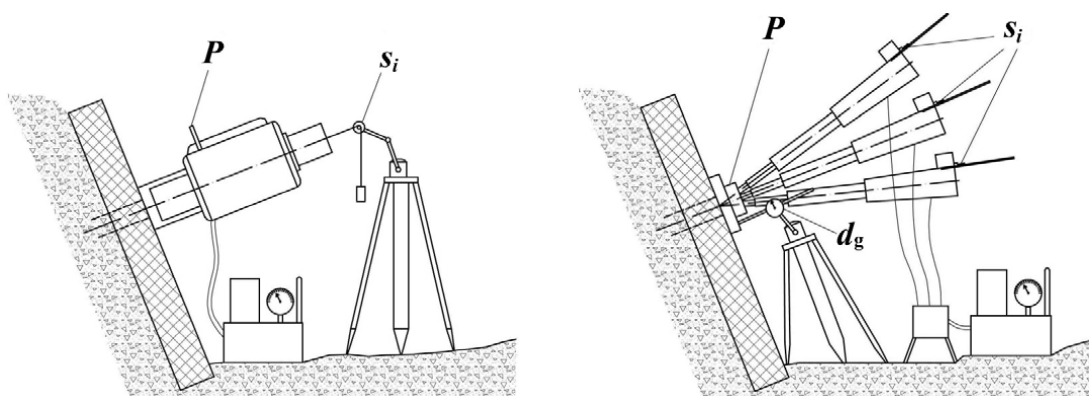
- **preiskave sider** (v nadaljevanju: **PS**), ki zajemajo tako predhodno izvedene preiskave sider (*EN 1537*: angl. investigation test) kot tudi preiskave sider na začetku oz. med izvajanjem del (*EN 1537*: angl. suitability test),
- preskusi nosilnosti, ki se izvajajo na vseh sidrih, vgrajenih v objekt (*EN 1537*: angl. acceptance test) se nadalje razvrščajo na **celovite preskuse napenjanja** (v nadaljevanju: **CPN**) in **enostavne preskuse napenjanja** (v nadaljevanju: **EPN**).

Postopek preskušanja nosilnosti sider v praksi se prične z ugotavljanjem dejanske možnosti prenosa sidrne sile v nosilna tla zaledja, zato moramo najprej izvesti PS na preskusnih (testnih) sidrih. Na podlagi dejansko doseženih rezultatov PS projektant določi kriterije za izvedbo napenjalnih preskusov (CPN in EPN) na sidrih objekta, ki služijo presoji nosilnosti (odpornosti na izvlek) in prevzemu teh sider. Na sidrih objekta se najprej izvedejo CPN na 10 % vseh sider (vendar najmanj na treh sidrih). V kolikor so rezultati CPN v pričakovanem okviru (t.j. skladni z rezultati PS), se preostala sidra objekta preverijo z EPN, v nasprotnem primeru pa se odredijo dodatne PS. Če pri EPN s predpisanimi kriteriji ni pričakovati zanesljivih rezultatov, se predpišejo daljši opazovalni časi, po potrebi pa se pri preostalih sidrih objekta odredi **večstopenjske preskuse napenjanja** (v nadaljevanju: **VPN**).

Samo v sklopu vgradnje trajnih prednapetih geotehničnih sider v večje infrastrukturne objekte je bilo v Sloveniji izvedenih približno 500 PS in okoli 1700 CPN. Navkljub številnim dosedanjim izkušnjam pa je področje izvajanja preskusov sider v smislu ugotavljanja odpornosti veznih delov trajnih prednapetih geotehničnih sider in določanju zahtev za napenjalne preskuse na sidrih objektov še vedno ostalo precej odprto, tudi v luči sprejetega Evrokoda 7-1 (*EN 1997-1*) in standarda za izvedbo prednapetih geotehničnih sider *EN 1537*. Primerjava teh dveh dokumentov namreč pokaže, da medsebojno nista dovolj usklajena, nekatere določbe pa so si medsebojno celo protislovne. Velik problem ostaja, kako na podlagi opravljenih PS nedvoumno določiti merodajno odpornost sider na izvlek ter kako določiti kriterije za napenjanje sider objekta. Sedaj veljavne določbe zgoraj omenjenih evropskih predpisov tega namreč ne omogočajo.

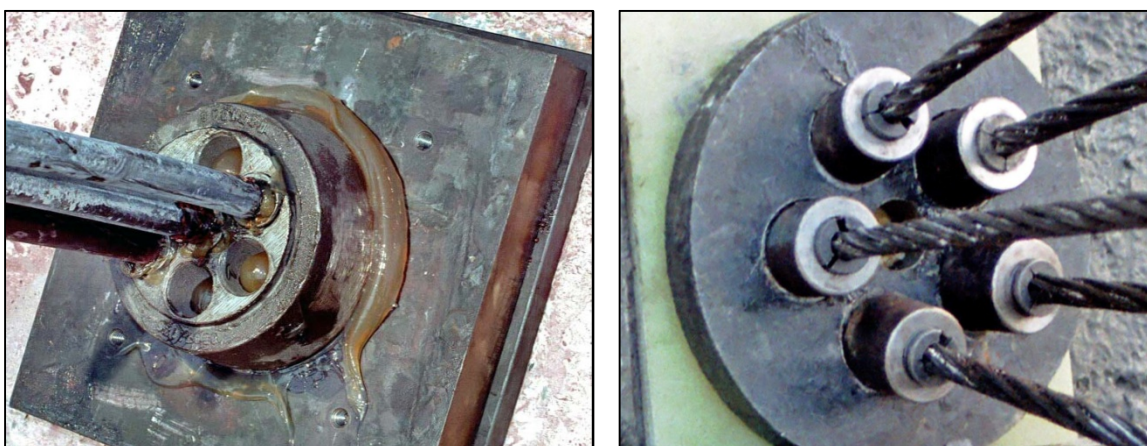
Za izvedbo glav sider in napenjanja prednapetih geotehničnih sider se uporabljata dva različna načina:

- **Sistem napenjanja vseh pramen sidra s skupno napenjalko**, pri katerem preko hidravličnega sistema kontroliramo silo v sidru, odčitek izvlečka kabla sidra pa spremljamo preko merilnika izvlečkov, na katerem odčitavamo pomik bata napenjalke glede na nepomično zunanjo referenčno točko (*sliki 2.3 levo in 2.4 levo*). Pri tem sistemu vsa pramena kabla sidra napenjamo in zaklinimo hkrati, pri čemer je vsak pramen posebej zaklinjen s svojo zagozdo v svoji odprtini skupne kotve. Skupne napenjalke so praviloma težke in okorne, vendar je po njihovi natančni namestitvi delo z njimi hitro in enostavno, izvlečki vseh pramen sidra so identični, zato sta zajem podatkov med preskusi in njihova kasnejša obdelava in analiza enostavna. Na drugi strani pa z njimi ne moremo kontrolirati, koliko sile prevzema posamezni pramen (kar velja tako za sile med preskusom kot tudi po zaklinjenju). To je še posebej pomembno pri sidrih s kratkimi (s tem pa tudi togimi) prostimi deli (po Xanthakos, 1991 ter Littlejohn in Bruce, 1977 so to prosti deli dolžin pod 10 m), kjer so izvlečki majhni in s tem vplivi večji. Pri tem sistemu napenjanja in odčitovanju izvlečkov na ločenem stojalu so pomiki sidranega objekta (vtiskanje gibkih sidranih konstrukcij v mehka zaledja) že avtomatsko izničeni, zato so odčitane vrednosti izvlečkov že kar prave vrednosti izvlečkov kabla sidra. Tak sistem je še posebej primeren za dostopna sidra z večjim številom pramen, saj za namestitev napenjalke potrebujemo bistveno manj prostora v območju glave sidra v primerjavi s sistemom napenjanja z mononapenjalkami.



Slika 2.3: Sistema za preskus nosilnosti in izvedbo meritev izvlečkov prednapetega geotehničnega sidra: sistem s skupno napenjalko, meritev izvlečkov glede na nepomično točko (levo), sistem s posamičnimi napenjalkami, odčitavanje izvlečkov pramen neposredno na napenjalkah (desno).

Figure 2.3: Setups for testing of a load-bearing capacity and displacement measurements of prestressed ground anchor: system of multi-strand testing, displacement measurement as to fixed point (left), system of monostrand stressing, displacement measurement of each individual strand directly on the monostrand jack (right).



Slika 2.4: Varianti izvedbe glav prednapetih geotehničnih sider: sistem s skupno sidrno kotvo (levo), sistem s posamičnimi kotvami (desno).

Figure 2.4: Concepts of prestressed ground anchor head implementation: system with multiple wedge plate (left), system with individual bushes (right).

- **Sistem napenjanja pramen sidra z mononapenjalkami**, pri katerem se med napenjanjem sidra vsak pramen sidra opremi s svojo mononapenjalko. Vse mononapenjalko so vzporedno vezane na skupni hidravlični sistem, tako da napenjanje vseh pramen poteka hkrati preko skupne hidravlične črpalke, ki zagotavlja isti hidravlični tlak v vseh napenjalkah (sliki 2.3 desno in 2.4 desno). V fazi zaklinjenja je vsak pramen opremljen s svojo kotvo in svojo zagozdo, pri čemer se zaklinjenje vseh pramen pri istem hidravličnem tlaku oz. sili zaklinjenja izvede hkrati.

Sistem z mononapenjalkami je priročen za izvedbo napenjanja sider z manjšim številom pramen (nekje do šest pramen), saj so mononapenjalko v primerjavi s skupno napenjalko bistveno lažje in so zato primernejše za uporabo na težje dostopnih mestih. Za razliko od prejšnjega sistema so v tem primeru v vseh pramenih enake sile (medsebojno se minimalno razlikujejo zaradi razlik notranjih premerov valjev posamičnih napenjalk za nekaj 0,01 mm), so pa lahko zato izvlečki posameznih pramen, ki jih spremljamo med preskusi nosilnosti in na podlagi katerih iz vrednotimo karakteristike lezenja pramen, medsebojno kar precej različni. Posledično je sistem spremljanja pomikov, kot tudi kasnejše obdelave in analize rezultatov, precej bolj zahteven kot pri prejšnjem sistemu, saj se na vsako napenjalko posebej pritrudi svoj merilnik izvlečkov, s katerim spremljamo izvleček pramena glede na ohišje mononapenjalko. Ločeno je potrebno spremljati pomike sidranega objekta v smeri osi sidra, ter jih odšteti od izmerjenih izvlečkov posameznih pramen, saj v nasprotnem primeru vtiskanje sidranega objekta v zaledje dejansko prištejemo kar k lezenju veznega dela sidra, kar pa ni točno. V praksi se je izkazalo, da se meritve pomikov sidranega objekta (zaradi motečih pogojev okolja in pogosto ne povsem nepremičnega naleganja podpore tega merilnika) lahko izvajajo kvečjemu z za en razred nižjo točnostjo, kot izvajamo meritve izvlečkov pramen. V večini primerov kakovostno izvedenih oz. vpetih sidranih objektov (npr. pilotne stene) s centrično lego sidra in dobro utrjeno naležno površino brežine se je izkazalo, da lahko za samo vrednotenje mer lezenja k vtisnjenje sidranega objekta zanemarimo, saj so opazovanja na posameznih stopnjah sil relativno kratka in se večina pomika izvrši takoj po vnosu sile na posamezni stopnji, kar pa ne vpliva na mero lezenja k , ki jo vrednotimo šele od prve minute (v nadaljevanju: 1') naprej. Upoštevanje manj natančnih pomikov objekta pri vrednotenju mer lezenja k v takih primerih ne prispeva k večji natančnosti rezultatov meritev, pač pa jih zaradi različne točnosti odčitkov pomikov zidu in izvlečkov posameznih pramen le dodatno zamegli.

Pri vseh preskusih nosilnosti (PS, VPN, CPN in EPN) se odpornost veznega sidra na izvlek ocenjuje na podlagi odčitkov izvlečkov pramen kabla sidra, ki se izvajajo v vnaprej predpisanih časovnih intervalih. Že od uvedbe nemškega standarda *DIN 4125 – 2. del* (1976) dalje se na podlagi teh odčitkov vrednotijo **mera lezenja k** , ki se izračunajo po izrazu:

$$k = \frac{s_2 - s_1}{\log \frac{t_2}{t_1}}, \quad (2.1)$$

kjer je s_1 vrednost izvlečka na glavi sidra v času odčitka t_1 , s_2 pa vrednost izvlečka na glavi sidra v času odčitka t_2 . Kritična mera lezenja, ki določa popustitev sidra, je opredeljena kot $k_{krit} = 2$ mm.

Pred začetkom izvedbe sidranega objekta se v območju objekta po predvideni tehnologiji vgradnje sider objekta vgradijo preskusna sidra, na katerih se izvedejo PS do porušitve. Rezultat opravljenih PS so odpornosti na izvlek preskusnih sider R_a , na podlagi katerih se določi karakteristična odpornost na izvlek R_{ak} sider objekta, ki služi kot izhodišče za določitev preskusne sile P_p in sile zaklinjenja P_0 sider objekta. Na podlagi opravljenih PS in analize dobljenih rezultatov projektant pripravi **program napenjanja**, v katerem opredeli kriterija (k_{adm} – dopustno mero lezenja in $\Delta S_{bl,adm}$ – dopustni trajni izvleček), ki jih morajo izpolnjevati sidra objekta.

Po zaključenem opazovanju pri preskusu nosilnosti se v prednapetem geotehničnem sidru preskusna sila P_p spusti na začetno silo P_a , rezultati preskusa pa se ovrednotijo. Sidro objekta se po standardih *SIA 267* in *SIA 267/1* lahko zaklini na silo zaklinjenja P_0 le tedaj, ko je izpolnilo naslednje pogoje:

- mera lezenja sme biti največ enaka dopustni: $k \leq k_{adm}$, (2.2)
- trajni izvleček sme biti največ enak dopustnemu: $\Delta S_{bl}(P_p) \leq \Delta S_{bl,adm}$, (2.3)
- efektivna prosta dolžina pri preskusni sili se mora nahajati znotraj intervala: $0,9 \cdot l_{fr} \leq l_f(P_p) \leq l_{fr} + 0,3 \cdot l_v$, (2.4)
- zaščitni ovoj sidra izkazuje zadostno električno upornost (kontrola brezhibnosti zaščitnega ovoja): $R_I \geq 0,1 \text{ M}\Omega$ in $R_{II} \geq 100 \Omega$. (2.5)

V postopku zaklinjenja se z vtisnjenjem zagozd v odprtine kotev v glavo sidra vnese predvideno silo zaklinjenja P_0 , ki potem silo preko sidrne plošče nadalje prenaša na sidrano konstrukcijo. Pri prenosu sile iz napenjalke na glavo sidra v trenutku, ko čeljusti napenjalke spustijo pramena in posledično pride do uvlačanja zagozd v kotve, pride do določenih izgub pri zaklinjenju (angl. seating losses). Velikost teh izgub je bistveno manjša, če je napenjalka opremljena s tretjim hidravličnim vodom, ki v trenutku zaklinjenja fizično vtisne zagozde v odprtine kotve. Za učinkovit oprijem zagozd na žice pramen in preprečitev zdrsa pramen skozi zagozde pri kasnejšem porastu sidrne sile mora biti zaklinjenje izvedeno pri zadostni minimalni sili v pramenih sidra: po *SIA 267* je to vsaj 30 % nazivne natezne trdnosti pramen R_m , Sabatini in sod. (1999) spodnjo mejo sile postavljajo kot 50 % R_m , medtem ko na drugi strani standard *EN 1537* glede tega nima nobenega določila. Raven sile med življenjsko dobo sidra je omejena tudi navzgor, kar je pomembno tako zaradi povečevanja nevarnosti vodikove krhkosti in napetostno-korozijskega pokanja kot tudi nevarnosti lokalnih preobremenitev žic pramena. Poleg tega se moramo zavedati, da žice vseh napetih pramen kabla sidra niso povsem identične dolžine (predpisi ne zahtevajo obveznega nameščanja distančnikov v prostem delu sider), zato lahko nekatere žice pramen dosežejo mejo tečenja še preden bosta pramen oz. kabel sidra kot celota preobremenjena. Tudi zato v praksi obstaja zgornja meja še dopustne sile v kablju sidra, ki je v *EN 1537* določena kot vrednost 65 % karakteristične natezne porušne sile kabla P_{pk} , *SIA 267* pa to vrednost določa kot 70 %

P_{pk} . Nad to ravnijo obremenitve se v žicah pramen povečajo izgube zaradi relaksacije, lahko pa je opazna tudi sprememba vrednosti elastičnega modula.

Po zaklinjenju glave sidra sledi izdelava končne protikorozijske zaščite jeklenih delov, od katere je odvisno zadovoljivo delovanje trajnih prednapetih sider in njihova sposobnost dolgoročnega prenosa sidrskih sil. Enakomerna površinska korozija običajno nima večjega vpliva na odpornost prednapetih pramen, dokler ne pride do zmanjšane prečnega prereza elementa in je posredno presežena odpornost preostalega dela prereza. V primeru izpostavljenosti prednapetega jekla lokalnim korozijskim napadom v obliki točkastih ali širših točkastih izjed, lahko zaradi krhke porušitve že v relativno kratkem času pride do pretrga pramena. Zaradi tovarniške zaščitenosti sidra vzdolž celotne dolžine pramen z neprepustnim PE ovojem lahko do korozijskih pojavov pride le v območju priključka sidra na glavo sidra oz. v območju slabe ali celo neizvedene zaščite glave sidra. V obeh primerih lahko agresivni medij (voda, kontaminirana z različnimi snovmi, v okolici cest so to v zimskem času zlasti kloridi) prodre do najbolj občutljivega in mehansko lokalno zelo obremenjenega dela pramen v območju oprijema zagozd. Že relativno plitke lokalne korozijske izjede globine 0,6 mm so lahko dovolj za pretrg hladno vlečene žice iz jekla trdnosti 1800 MPa natezno obremenjene na 70 % natezne trdnosti (*Key-to-metals*, 2009).

2.2 SESTAVNE KOMPONENTE TRAJNIH PREDNAPETIH PRAMENSKIH GEOTEHNIČNIH SIDER

Trajna prednapeta geotehnična sidra predstavljajo enega od najzahtevnejših gradbenih proizvodov, sestavljena tudi iz več kot 40 različnih sestavnih komponent in materialov (slika 2.5). Za zagotavljanje odpornosti, kot tudi ustrezne dolgoročne protikorozijske zaščite, je ključnega pomena kakovost sestavnih materialov in komponent, zato se pred začetkom sestavljanja sider odvzamejo in preskusijo vzorci jeklenih pramen in jeklenih komponent glav sider (sidrne plošče, kotve, zagozde), zaščitne gladke in rebraste polietilenske (PE) cevi ter protikorozijskega sredstva za namaščevanje pramen in izvedbo zaščite glav sider. Posebej je treba preveriti primernost recepture injekcijske mase, katere vzorce se vedno odvzema in preverja med vgradnjo sider.



Slika 2.5: Tipične sestavne komponente trajnih prednapetih pramenskih geotehničnih sider.
Figure 2.5: Typical constituent components of permanent prestressed strand ground anchors.

2.2.1 Jeklena pramena

Ključno vlogo pri prenosu natezne sile iz glave sidra v vezni del sidra igrajo jeklena pramena, katerih elastičnost v kombinaciji z visoko odpornostjo omogoča delovanje prednapetih sider. V splošnem se jeklo pramen obnaša elastično z visoko (in relativno konstantno) vrednostjo elastičnega modula vse do meje tečenja, pa tudi preko te meje ima zaradi kristalne strukture in kovinskih vezi, ki povezujejo gradnike kristalov, veliko sposobnost prevzemanja plastičnih deformacij, s čimer je zagotovljena njegova duktilnost (Vojvodič-Tuma, 2002). Jeklena pramena morajo imeti poleg visoke natezne trdnosti še naslednje lastnosti: zadostno duktilnost, upogibnost, dober oprijem, potreben pri prednapetih elementih z vnosom sile preko mehanizma trenja, nizko relaksacijo za zmanjšanje padca sile, ter nenazadnje, majhno občutljivost na korozijske procese (Sengupta in sod., 2009, *Key-to-metals*, 2009). Za delovanje prednapetih sider je izrednega pomena dolgoročno ohranjanje nateznih sil v jeklenih pramenih, katerih mehanske lastnosti izhajajo iz kombinacije kemijske sestave dekapirane vroče valjane žice iz ogljikovega jekla, njene toplotne in mehanske obdelave v proizvodnem procesu izdelave pramen v povezavi s tehnologijo in opremo, od katerega so pomembno odvisne končne lastnosti pramen. Na lastnosti pramen pomembno vpliva patentiranje, pri katerem jeklo dobi enakomerno avstenitno strukturo z relativno grobimi kristalnimi zrni, ki mu sledijo hladni vleki žice skozi votlice, pri katerih se preuredi kristalna mreža, zrna se raztegnejo in orientirajo v vzdolžni smeri žice, posledično se močno povešujeta trdnost in trdota jekla. V postopku prevlačenja proizvajalci žice premažejo z mazivom za zmanjševanje trenja, ki ga pred sestavljenjem žic v pramena v glavnem odstranijo. Pri obremenitvi pramena sidra se preko čeljusti oz. zagozd v zunanjih šest žic pramena vnese natezna sila, zaradi katere se zunanje žice raztegnejo, istočasno pa se poskušajo tudi izravnati, s čimer pritisnejo in zagotovijo oprijem na osrednji žico. Za boljši oprijem med žicami mora biti premer osrednje žice za nekaj odstotkov večji od premera zunanjih žic, vendar pa zaradi ostankov maziva na stiku osrednje žice z zunanjimi pride do zdrsa, zaradi česar so napetosti v zunanjih žicah pramena višje od napetosti v osrednji žici. Ta pojav smo v območju nizkih nateznih sil opazili pri naših preskušanjih izotermne relaksacije, opisanih v [dodatku F](#). Do zdrsa med žicami pramen sicer prihaja tudi med napenjanjem pramen v zgornjem območju odpornosti (Pritchard in sod., 2006). Končna faza proizvodnje pramen z nizko relaksacijo je termomehanski postopek napetostnega pomirjanja, v katerem se v pramenu sprostijo zaostale notranje napetosti, ki so nastale v postopku izdelave, zaradi česar je pramen bolj duktilen, predvsem pa bodo v fazi uporabe padci napetosti zaradi relaksacije nižje.

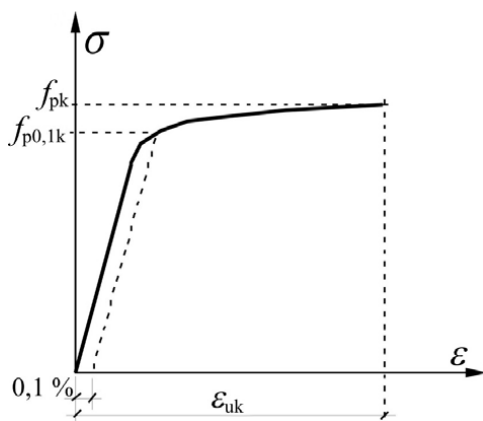
Poleg mikrostrukture na mehanske lastnosti jekla vpliva tudi njegova sestava: osnovna komponenta jekla pramen je železo, vendar pa ima lahko že zelo majhen dodatek ostalih elementov (med pomembnejšimi so ogljik, mangan, fosfor, krom, molibden, nikelj in silicij) izrazit vpliv na tip in lastnosti jekla. S stališča mehanskih lastnosti ima od vseh dodanih elementov najpomembnejši vpliv dodatek ogljika – z naraščanjem njegovega deleža v jeklu naraščata natezna trdnost in trdota, duktilnost pa se zmanjšuje. Dodani elementi zlasti vplivajo na mikrostrukture jekla ter za dani način toplotne obdelave in proizvodnih pogojev ob zelo nizki vsebnosti ogljika omogočajo zahtevano trdnost jekla (*Steel Designers' Manual*, 2003). Na drugi strani se z manjšanjem premera žice povečuje natezna trdnost jeklenih žic (Hanna, 1982), zato se za osrednjo nosilno komponento prednapetih sider uporabijo pramena, ki so spletena iz več žic manjšega premera, s čimer dosežemo tako visoko odpornost jeklenih pramen ob majhnem prečnem prerezu, kot tudi gibkost pramen, kar pri prednapetih sidrih pramenom daje prednost pred palicami, saj so postopki proizvodnje, shranjevanja, transportov in vgradnje sider enostavnejši. Kot sestavni del prednapetih geotehničnih sider se v praksi najpogosteje uporabljajo pramena sestavljena iz sedmih žic z nizko relaksacijo iz hladno vlečene patentirane žice iz nelegiranih jekel z 0,6 do 0,8 % ogljika, ki dosežejo trdnosti v območju med 1400 in 2200 N/mm² ([slika 2.6](#)).



Slika 2.6: Detajl jeklenega pramena z nizko relaksacijo \varnothing 15,2 mm.

Figure 2.6: Detail view of a low-relaxation steel strand \varnothing 15,2 mm.

Osnovne zahteve za jeklo za prednapenjanje podaja *Evrokod 2: Projektiranje betonskih konstrukcij – 1-1. del: Splošna pravila in pravila za stavbe (EN 1992-1-1)*, ki za jekla pramen navaja naslednje karakteristične vrednosti (slika 2.7): natezno trdnost f_{pk} (izvrednoteno iz največje sile pri centričnem nategu deljene s površino nazivnega prečnega prereza), napetost $f_{p0,1k}$, pri kateri pri razbremenitvi ostane 0,1 % nepovratne deformacije, ter deformacijo pri največji obremenitvi ϵ_{uk} . Za $\sigma - \epsilon$ diagram prednapetega jekla je značilno, da nima izrazite meje elastičnosti in platoja tečenja (v primerjavi z običajnim konstrukcijskim jeklom), do določenega nelinearnega obnašanja prihaja že pri relativno nizkih napetostih, zato se točka meje elastičnosti privzame pri napetosti $f_{p0,1k}$ (torej pri doseženi nepovratni deformaciji 0,1 %), ki je praviloma večja od 85 % natezne trdnosti f_{pk} , nekateri raziskovalci so pri preskušanjih dobili celo vrednosti višje od 90 % f_{pk} (Hill, 2006).



Slika 2.7: Odvisnost med natezno napetostjo in deformacijo tipičnega jekla za prednapenjanje (prirejeno po *SIST EN 1992-1-1:2005*).

Figure 2.7: Tension stress-strain relationship for typical prestressed steel (adapted after *SIST EN 1992-1-1:2005*).

Poleg vrednosti $f_{p0,1k}$, f_{pk} in ϵ_{uk} je pomemben tudi podatek o togosti jekla za prednapenjanje, ki je podan z začetnim modulom elastičnosti in je odvisen od oblike prednapetega jekla (palice, žice ali pramena). Glede na to, da pramen ni monolitni element, pač pa je sestavljen iz osrednje in šestih zunanjih spiralno oblikovanih žic, je vrednost modula elastičnosti pramen nižja od vrednosti modula elastičnosti armaturnih palic ali konstrukcijskega jekla: za projektno vrednost modula elastičnosti pramen E_p standard *EN 1992-1-1* podaja vrednost 195 GPa. Dejanska vrednost E_p je odvisna od proizvodnega postopka in leži med 185 in 205 GPa, pri čemer so vrednosti E_p pri pramenih manjšega prereza (\varnothing 12,7 mm) za nekaj odstotkov višje kot pri pramenih večjega prereza (\varnothing 15,2 mm) (Loflin, 2008). Modul elastičnosti snopa večih pramen (t.j. kabla sidra) je do 10 % nižji od modula elastičnosti posameznega pramena (Littlejohn in Bruce, 1977, Littlejohn, 1993). Pri prednapetih pramenskih sidrih je izbira vrednosti E_p pomembna, saj z njo pri vrednotenju PS, CPN in EPN neposredno vplivamo na izračunano efektivno prosto dolžino sidra l_f .

Splošne zahteve za prednapeto jeklo določa osnutek standarda *prEN 10138-1:2000 Prestressing steels – Part 1: General requirements*, ki med različnimi izdelki iz jekla visoke natezne trdnosti med drugim obravnava tudi jeklena pramena. Bistvene zahteve za pletena pramena, sestavljena iz jeklenih žic visoke nateznej trdnosti, na katerih je bil opravljen postopek toplotne obdelave za pomiritev napetosti, so podane v osnutku standarda *prEN 10138-3:2000 Prestressing steels – Part 3: Strand*. Osnovne značilnosti jeklenih pramen, ki jih proizvajalci, prisotni na slovenskem trgu, v praksi najpogosteje uporabljajo za izdelavo trajnih prednapetih geotehničnih sider, so podane v preglednici 2.2. Poleg teh vrednosti so pomembne še naslednje lastnosti jeklenih pramen:

- minimalni raztezek pri maksimalni sili A_{gt} mora znašati vsaj 3,5 %,
- maksimalna vrednost relaksacije po 1000 urah, za vzorce izpostavljene natezni sili velikosti 70 % dejansko dosežene povprečne maksimalne natezne sile, lahko znaša največ 2,5 % ter
- razmerje med napetostjo $R_{p0,1}$ (izvrednoteno iz sile tečenja $F_{p0,1}$ pri raztežku 0,1 %) in natezno trdnostjo (izvrednoteno iz maksimalne vrednosti sile F_m).

Preglednica 2.2: Dimenzije in značilnosti jeklenih pramen po podatkih različnih proizvajalcev.
Table 2.2: Dimensions and properties of steel strand according to various manufacturers' data.

Oznaka jekla	Nazivni premer pramena [mm]	Natezna trdnost jekla R_m [MPa]	Nominalni prečni prerez [mm ²]	Tipična vrednost maksimalne sile F_m [kN]	Tipična vrednost maksimalne sile $F_{m,max}$ [kN]	Tipična vrednost sile pri 0,1 % raztežku $F_{p0,1}$ [kN]
Y1860S7	15,2	1860	140	260	298	224
	15,7	1860	150	279	319	240
Y1770S7	15,2	1770	140	248	282	213
	15,7	1770	150	265	302	228

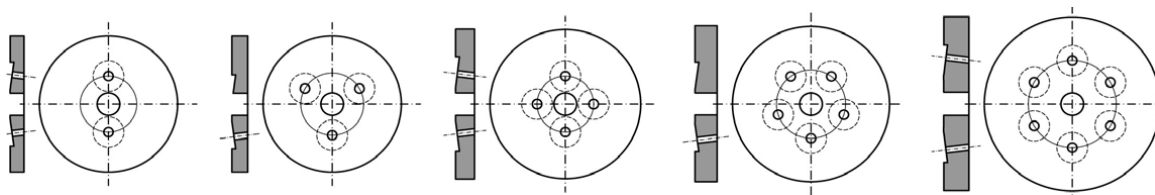
Poleg pramen iz jekla z nazivno natezno trdnostjo 1860 in 1770 MPa so se na svetovnem tržišču že pojavila tudi pramena \varnothing 15,2 mm iz jekel z zelo visoko trdnostjo (angl. ultra-high prestressing strand) in nizko relaksacijo, ki so narejena iz novo razvite jeklene žice z več ogljika, silicija in kroma, glede na jeklo obstoječih žic. Po podatkih v literaturi karakteristična vrednost maksimalne sile novih pramen znaša 313 kN, s čimer je njihova odpornost glede na pramena \varnothing 15,2 mm razreda Y1860S7 večja za 20 %, za pramena razreda Y1770S7 pa za 26 % (Maekawa in sod., 2007).

2.2.2 Jeklene komponente glav sider

V glavo sidra, ki je edini sestavni del sidra sestavljen in zaščiten na mestu vgradnje, se vgrajujejo jeklene komponente, razvite za uporabo v prednapetih betonskih konstrukcijah. Skladno z *EN 1992-1-1* in *EN 1537* do porušitve kabla sidra ne sme priti zaradi priključka pramen na glavo sidra, obenem pa mora biti nosilnost jeklenih delov glave sidra dovolj velika, da lahko prevzame največjo možno silo kabla sidra na ravni dejanske natezne trdnosti pramen sidra. Ob tem je pri vgradnji in zaklinjenju nujno zagotoviti tako centrično lego glave sidra glede na položaj kabla sidra kot tudi pravokotnost na os sidra, saj v nasprotnem primeru prihaja do lokalnih (pre)obremenitev tako na komponentah glave sidra kot tudi na žicah pramen na mestu oprijema zagozd. Pred vgradnjo v sidro jeklene komponente glave sidra ne smejo biti korodirane, dopustna je rahla enakomerna površinska (t.i. obrisna) korozija, katere produkti se lahko odstranijo z drgnjenjem s suho krpo.

Jeklene komponente dele glav prednapetih pramenskih geotehničnih sider predstavljajo:

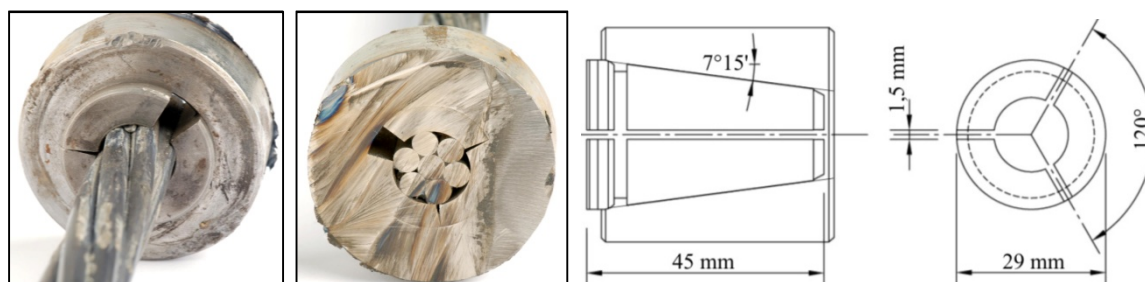
- **Podložne (sidrne) plošče**, ki neposredno nalegajo na sidrni objekt in preko katerih se sidrna sila neposredno vnaša v sidrano konstrukcijo, njihova naloga pa je preprečiti lokalno preobremenitev sidrane konstrukcije na mestu vnosa sile. Sidrne plošče za sisteme s posamičnimi kotvami so krožno oblikovane in imajo glede na število pramen krožno razvrščena izrezkana ležišča za posamezne kotve (slika 2.8). Sidrne plošče sistemov s skupno kotvo so običajno prav tako krožnih oblik, pri čemer imajo lahko izdelane posebne izvrtine za izvedbo tesnjenja ali polnjenje notranjosti sidrišča s protikorozijskim sredstvom.



Slika 2.8: Sheme podložnih plošč za sidrne sisteme z dvema do šestimi posamičnimi kotvami.

Figure 2.8: Diagrams of anchor plates for anchoring systems with two to six bushes.

- **Skupna ali posamične kotve** (v odvisnosti od sistema napenjanja prednapetega sidra), v območju katerih se izvede mehanski stik pramen sidra na sidrno ploščo, ki neposredno nalega na sidrni objekt. V primeru sistemov s posamičnimi kotvami so kotve manjših dimenzij (v primeru na sliki 2.9 je prikazana posamična kotva pramena $\varnothing 50$ mm), medtem ko so v primeru sistemov s skupno kotvo njihovi premeri večji (lahko tudi do $\varnothing 175$ mm), v njih pa so izdelane cilindrično konične odprtine za namestitev zagozd vseh pramen kablja sidra. Le-te morajo biti izdelane še posebej skrbno, tako da na njihovih površinah ni geometrijskih anomalij, zaradi katerih bi lahko prišlo do poškodb zagozd.



Slika 2.9: Detajl posamične kotve zaklinjenega pramena: ogled s sprednje strani (levo), detajl oprijema zagozd na mestu prerezne ravnine (sredina). Desno je prikazan vzdolžni prerez skozi zagozdo v kotvi ter pogled na zagozdo od zgoraj.

Figure 2.9: Detail view of a bush with a locked-off strand: front view (left), detail view of a grip of a wedge in the cut through plane (middle). Layout of a longitudinal section through wedge placed in a bush as well as top view of a wedge are presented on the right.

- **Zagozde** so izredno obremenjene komponente glave sidra, ki zagotavljajo dejanski prenos sidrne sile iz pramen kablja sidra na kotve/sidrno ploščo. Geometrijsko so oblikovane kot prevrtano telo stožca, razdeljeno na tri kline, medsebojno spete z žičnim elastičnim prstanom, ki imajo na notranji strani vrezane posebej oblikovane zobe in se preko njih zajedajo v žice pramena, na drugi strani pa nalegajo na konično površino v kotvi. Za dolgoročno funkcionalnost sidra je izrednega pomena,

da na eni strani ne pride do poškodb klinov zagozde, na drugi strani pa mora biti zagotovljen dober oprijem zagozd na žice pramena, pri katerem pa ne sme priti do prevelikih zareznih poškodb na žicah pramen, ki bi lahko dolgoročno prispevale k razvoju napetostno-korozijskih pojavov. Izkušnje iz prakse kažejo, da je prenos sile iz pramena preko zagozde na kotvo zelo učinkovit, saj za polni prenos sile ni potrebna celotna dolžina zagozde: v primeru na [sliki 2.9](#) je bila kotva zaklinjenega pramena prerezana približno na polovici zagozde, pa je bil v praksi še vedno zagotovljen prenos vzpostavljene natezne sile. Na drugi strani pa moramo upoštevati tudi dolgoročno delovanje zagozd, pri čemer lahko pride tudi do pojava korozije na tem izredno občutljivem stiku žic pramena in zagozde, zaradi česar obstaja nevarnost zdrsa pramena po stiku z zagozdo.

2.2.3 Zaščitni ovoj trajnih prednapetih geotehničnih sider

Za izdelavo zunanjega zaščitnega ovoja trajnih prednapetih geotehničnih sider se pri nas uporabljajo zaščitne polietilenske (PE) cevi: v prostem delu sider se običajno uporabljajo gladke PE cevi dostopne na tržišču, medtem ko so rebraste PE cevi za izvedbo zaščitnega ovoja sider v veznem delu sider zaradi specifičnih zahtev (v smislu robustnosti, izpostavljenosti dolgotrajnim obremenitvam, geometrijskega oblikovanja profila reber kot tudi prilagoditve premera rebrastih cevi premeru gladkih cevi) posebej zasnovane ter namensko izdelane prav za posamezni tip trajnega prednapetega sidra. Gladke PE cevi omogočajo prosto raztezanje oplaščenih pramen kabla sidra in jim zagotavljajo dodatno protikorozijsko zaščito. Zaradi velike debeline (približno 4 mm) so te cevi robustne in relativno neobčutljive na poškodbe ob transportih, skladiščenju in vgradnji sider. Rebraste PE cevi v območju veznega dela sidra imajo dvojno pomembno funkcijo – služijo tako za protikorozijsko zaščito golih jeklenih pramen kot tudi za učinkovit prenos sidrne sile iz kabla sidra preko strjene cementne injekcijske mase in stene vrtine v nosilna tla zaledja, zato je pomembna lastnost teh cevi oblika (geometrija profila) stene cevi, ki je specifična pri vsakem proizvajalcu teh cevi, pri čemer na robustnost rebrastih PE cevi vpliva tudi debelina stene cevi, ki mora pri nas znašati vsaj 2 mm.

Poleg gladkih in rebrastih PE cevi zunanji zaščitni ovoj trajnih prednapetih pramenskih geotehničnih sider sestavljajo še: PE tulec s tesnilom v območju pod glavo sidra (izvedba vodotesnega in električno izoliranega prehoda iz tovarniško izgotovljenega telesa sidra na elemente glave sidra), manšeta iz termokrčne cevi za stikovanje zunanjega PE ovoja, PE cevi za oplaščenje pramen, namenjene za zaščito in ločitev pramen od injekcijske mase v prostem delu sidra, ter čep na konici (zatesnitev konice sidra in preprečitev poškodb konice sidra pri vstavljanju sidra v vrtino). Obvezna komponenta vsakega sidra s celovito protikorozijsko zaščito je izvedba električne izolacije glave sidra od sidranega objekta, na vsakem sidru pa je kot končni zaključni element za protikorozijsko zaščito glave sidra preko ustreznega tesnila trdno privijačen zaščitni pokrov.

Minimalni potrebni odmik sidra od stene vrtine ter centrično lego sidra v vrtini (s tem pa tudi zadostno oblitost telesa sidra s cementno injekcijsko maso) zagotavljajo zunanji PE distančniki (angl. centralizers), pritrjeni na zunanji zaščitni PE ovoj veznega dela sidra. Priporočilo dobre prakse je, da se ti distančniki (sicer v manjši gostoti kot na veznem delu) razporedijo tudi na prostem delu sider, s čimer se preprečuje neraven potek pramen v prostem delu sidra ter olajša obdelavo in interpretacijo rezultatov preskusov nosilnosti sider (Hanna, 1982). V notranjosti rebraste PE cevi veznega dela sidra ustrezen potek pramen in oblitost s plastjo cementne injekcijske mase zagotavljajo notranji PE distančniki (angl. spacers).

2.2.4 Zaščitno protikorozijsko sredstvo (vazelin in mast)

V proizvodnji se jeklena pramena prednapetih geotehničnih sider po celotnem prostem delu namastijo in oplaščijo s PE cevmi, pri čemer namaščevalna naprava preko razklenjenih žic pramena prostega dela sidra prelije protikorozijsko sredstvo (segreti vazelin ali mast), tako da je votli prostor med pramenom in ovojno PE cevjo v prostem delu pretežno zapolnjen s protikorozijskim sredstvom. Tako zaščitno sredstvo se uporabi tudi za zaščito jeklenih delov glave sidra, kot tudi območje prehoda jeklenih pramen v glavo sidra. Pred uporabo se na vzorcu vsake šarže zaščitnega protikorozijskega sredstva izvede serija predpisanih laboratorijskih preskušanj s katerimi se preveri, ali sredstvo ustreza predpisanim zahtevam. Poleg tega se v sklopu kontrole proizvodnje prednapetih geotehničnih sider preverja tudi stopnja zapolnjenosti votlega prostora med ovojno PE cevjo in pramenom prostega dela sidra s protikorozijskim sredstvom, s čimer se preveri ustreznost protikorozijske zaščite in oceni velikosti sile trenja na ravnih pramenih v prostem delu sider. V praksi je sila trenja seveda višja, saj pramena niso ravna kot med laboratorijskim preskusom, prav tako pa na oplaščen pramen delujejo tlačne sile v radialni smeri.

2.2.5 Cementna injekcijska masa

Za funkcionalnost sidra je izrednega pomena ohranjati dobro stanje in delovanje jeklenih pramen, zato mora cementna injekcijska masa primarno zagotavljati dobro vez pramen kabla veznega dela sidra z nosilnimi tlemi zaledja, sekundarno pa tudi omogočati protikorozijsko zaščito pramen. Naloga injekcijske mase je tudi zapolnjevanje votlih mest neposredno ob vrtini sidra, s čimer se omogoči čim enakomernjši prenos sile iz sidra v tla zaledja. Za dolgoročno delovanje sidra je torej pomembno brezhibno izvesti postopek injektiranja notranjosti zaščitnega ovoja sidra, kot tudi zunanega votlega prostora med sidrom in vrtino, kar se izvede z injekcijsko maso primerne sestave, na kakovost katere vplivajo materiali komponent, natančnost doziranja, trajanje, način in kakovost mešanja kot tudi temperatura okolja.

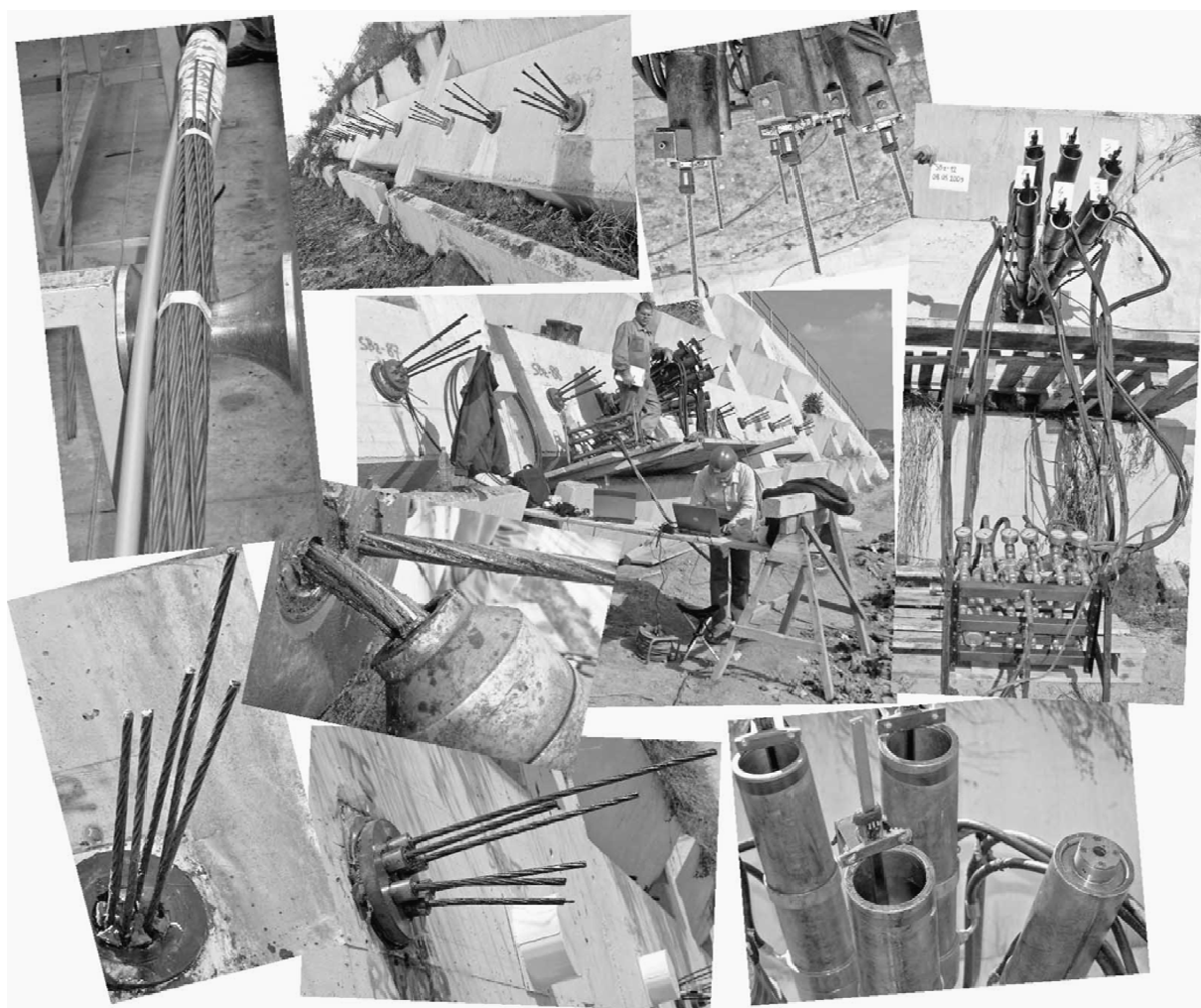
Pri pripravi injekcijske mase se v mešalec injektorja najprej vlije čista (pitna) voda, nato se doda in premeša dodatek, šele nato sledi cement. Z umešanjem cementa v vodo se začne prva faza hidratacije cementa. Sledi postopek mešanja mase, pri čemer se, zaradi nizkega vodocementnega (v/c) faktorja in posledično majhne vsebnosti vode, intenzivno turbulentno mešanje izvaja pri visokih hitrostih. V kolikor se mešanje izvaja dovolj časa, se v injekcijski masi, ki ima določene lastnosti koloidne mešanice prej navedenih sestavin (zaradi prevelikih zrn cementa težko rečemo, da je prava koloidna mešanica), zrna cementa temeljito ločijo, premešajo ter oblijejo z vodo in dodatkom. V kolikor se injekcijska masa pripravi na opisani način, potem je vsako zrno cementa popolnoma omočeno, s čimer se izboljša zmožnost penetracije mase v fine razpoke, obenem pa je za popolno hidratacijo (potrebno za doseganje končne trdnosti in trajnosti) omogočena kemična aktivacija vsakega zrna (Houlsby, 1990). Kapaciteta injektorja mora zagotavljati zadostne količine dobro premešane injekcijske mase, ki se sproti začasno shranjuje v agitatorju injektorja, v katerem se masa stalno domešava, vendar le toliko, da ne pride do izločanja in posedanja zrn cementa iz mase. Pri injektiranju sidra se injekcijska masa brez prekinitive črpa iz agitatorja v sidro, dokler ni zainjektirana tako notranjost kot tudi zunanost zaščitnega ovoja sidra.

Za injektiranje notranjosti zaščitnega PE ovoja sidra se lahko uporabi le cementna injekcijska masa pripravljena v razmerju in s sestavnimi materiali po predhodno potrjeni recepturi: zaradi protikorozijske zaščite jeklenih pramen mora biti v/c faktor mase čimbolj skrbno izbran, tako da je v masi dovolj vode

za dokončanje procesa hidratacije, medtem ko naj bo presežna količina vode, potrebna za vgrajevanje, čim manjša. Sestava injekcijske mase v notranjosti zaščitnega PE ovoja sidra je ves čas enaka, medtem ko je smiselno sestavo injekcijske mase za injektiranje votlega prostora med steno vrtine in sidrom prilagoditi lokalnim pogojem na dani lokaciji, kar še posebej velja v primeru votlavosti in razpokanosti tal ob vrtini. V takem primeru se količina izgubljene mase omeji z znižanjem v/c faktorja, po potrebi pa se masa zgosti tudi z dodajanjem inertnega polnila. V primerih, ko so tla ali talna voda močno kontaminirani z agresivnimi snovmi, ki škodljivo vplivajo na cementno injekcijsko maso (npr. tla v neposredni bližini kemičnih obratov, tla s kislimi talnimi vodami, tla z visoko vsebnostjo sulfatov), se sider praviloma ne sme vgraditi. Izjema so le tla, pri katerih je bila v sklopu določitve agresivnosti okolja ugotovljena nizka vsebnost sulfata; v tem primeru se sidra lahko vgradijo pod pogojem, da se za injekcijsko maso v stiku s steno vrtine uporablja cement z večjo odpornostjo na sulfate.

Sklop B

TERENSKA PRESKUŠANJA



3 IN-SITU PRESKUŠANJA TRAJNIH ELEKTRIČNO IZOLIRANIH PREDNAPETIH PRAMENSKIH GEOTEHNIČNIH SIDER S SKUPNIM PE OVOJEM RAZLIČNIH ZASNOV VEZNEGA DELA

3.1 PREGLED LITERATURE V ZVEZI S PRINCIPI DELOVANJA VEZNIH DELOV SIDER

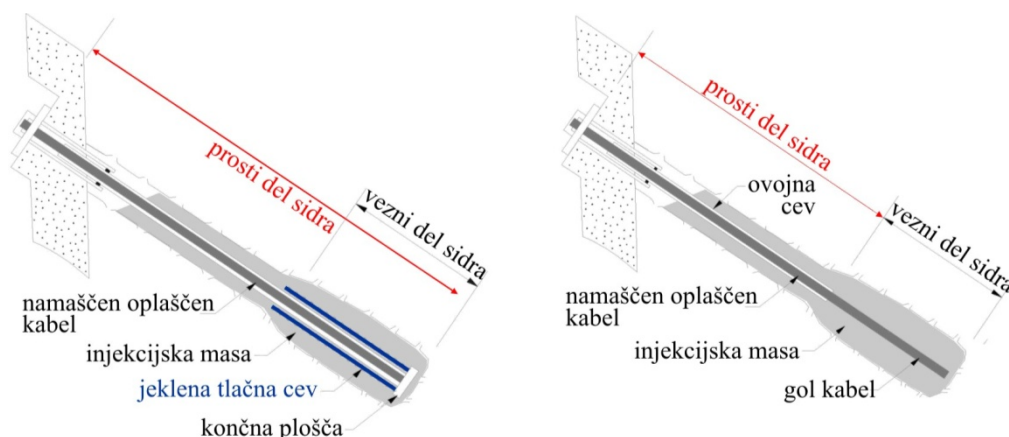
V primerih zainjektiranih geotehničnih sider, ki spadajo med t.i. trenjska sidra, se sidrna sila iz injekcijske mase v tla zaledja vnaša preko strižnih napetosti porazdeljenih vzdolž veznega dela, pri čemer sta možna dva različna principa oblikovanja sidra (slika 3.1): v veznem delu *sidra tlačnega tipa* se natezna sila v tla zaledja vnaša od spodnje točke veznega dela (konice sidra) navzgor, medtem ko se pri *sidru nateznega tipa* sila vnaša od zgornje točke veznega dela sidra (od točke stika s prostim delom) navzdol. Pri obeh tipih sider so vzroki za porušitev pravzaprav enaki: pri prenosu sidrne sile lahko popusti (1) telo sidra (bodisi jekleni kabel bodisi sama glava sidra), (2) lahko pride do porušitve vezi pri prenosu sile iz sidra v temeljna tla (na vezi kabla sidra z injekcijsko maso, na rebrasti PE cevi ali pa na vezi injekcijske mase s steno vrtine), (3) lahko pa pride tudi do porušitve tal zaledja ob steni vrtine. Kateri od teh vzrokov bo pri konkretnem sidranju merodajen primarno zavisi od koncepta sidranja, mehanskih karakteristik in tipa jeklenega kabla ter zaščitnega ovoja, tal zaledja in injekcijske mase:

- Že Littlejohn in Bruce (1977) sta preučevala vzroke za porušitev nateznih sider v kamninah, pri čemer sta ugotovila, da so za vez nateznega jeklenega kabla z injekcijsko maso značilni trije mehanizmi: *adhezija*, ki predstavlja začetno vez pred zdrsom in izvira predvsem iz fizičnega lepljenja mikroskopsko hrapavega jekla in okoliške injekcijske mase, *trenje*, ki zavisi od stopnje objetja, karakteristik površine jekla in obsega zdrsa, a je na drugi strani v veliki meri neodvisno od velikosti napetosti v nateznem elementu ter *mehanski medsebojni spoj* (angl. mechanical interlock), pri katerem se ob izrazitejših nepravilnostih nateznega elementa (npr. ob rebrih, zavojih) mobilizira strižna trdnost injekcijske mase. Pri kratkih dolžinah veznega dela je najpomembnejša adhezija, pri daljših pa so pomembni vsi trije mehanizmi (najprej adhezija na bližnjem koncu, območje delovanje katere se progresivno odmika proti oddaljenemu koncu, ob čemer jo nadomeščata trenje in/ali mehanski medsebojni spoj). V povprečju so mejne sprijemne napetosti pri pramenih za približno $\frac{1}{3}$ nižje od doseženih pri palicah, kar je posledica različnih mehanizmov obnašanja: prenos sil z jekla na injekcijsko maso pri pramenih je odvisen od kemične adhezije in trenja, medtem ko se pri navojnih palicah sile prenašajo preko mehanskega medsebojnega spoja (Benmokrane in sod., 1992).
- Za vez injekcijske mase s steno vrtine eksperimentalne in teoretične analize kažejo, da je značaj te vezi kompleksen in zavisi od dodatnih parametrov, ki pogosto privedejo do izrazite nelinearne porazdelitve napetosti. Zaradi razlik v elastičnih modulih jekla kabla sidra, cementne injekcijske mase in tal zaledja je prenos napetosti vzdolž veznega dela sidra nelinearen, kar izrazito velja za sidra nateznega tipa (Ostermayer in Barley, 2003).

Prednapeta pramenska geotehnična *sidra tlačnega tipa* so se koncem 1970-ih pojavila kot alternativa konvencionalnim (nateznim) tipom sider (Xanthakos, 1991). Za sidra tlačnega tipa je značilno, da se prosti del sidra razteza po celotni dolžini sidra t.j. od mesta zaklinjenja na glavi sidra pa vse do konice sidra, kjer je izveden priključek na togo zunanjo tlačno cev. Zelo pomemben detajl teh sider je tehnološka rešitev na mestu vnosa sidrne sile iz kabla sidra na tlačno cev, ki mora biti izveden na način, da zagotavlja dolgoročno varno mehansko vez, kar vključuje tudi oblikovanje takšne protikorozijske

zaščite tega območja, da je preprečena popustitev te vezi kadarkoli med življenjsko dobo sidranja. Porušitev te vezi bi namreč pomenila tudi hipno popustitev sidra kot celote, kar je zelo neugoden mehanizem porušitve. V kolikor vez kabla sidra s tlačno cevjo ni vprašljiva, taka zasnova sidra omogoča, da sta tako jeklena tlačna cev kot tudi injekcijska masa obremenjeni tlačno. Zaradi tega mora biti jeklena tlačna cev ustreznih dimenzij in togosti, da je pri vnosu tlačnih sil preprečena izbočitev cevi, pa tudi tlačna trdnost injekcijske mase mora biti zadostna, da se zaradi visokih tlačnih napetosti ne bi začela drobiti, kar se lahko prepreči tudi z armiranjem mase (Briaud in sod., 1998).

V primerjavi s togostjo pramen kabla sidra je togost tlačne cevi kar nekajkrat večja, zato je raznos sidrne sile vzdolž cevi v obliki strižnih napetosti po plašču tlačne cevi bistveno bolj enakomeren kot pri nateznih sidrih, torej do pojava progresivnega popuščenja pri tem tipu sidra ne more priti, pa tudi poškodbe injekcijske mase vzdolž tlačne cevi so zaradi enakomernije porazdelitve napetosti precej manjše. V dobrih tleh je v primerjavi z nateznim tipom sider za isto odpornost kabla sidra potrebna vrtina manjšega premera, dolžina veznega dela sidra je lahko krajša, manjša pa je tudi verjetnost pojava nateznih razpok, kar izboljšuje protikorozijsko zaščito. Pri vgradnji sider tlačnega tipa v slabih tleh moramo izdelati vrtine večjega premera, ki omogočajo porazdelitev strižnih napetosti vezi tlačne cevi z injekcijsko maso na bistveno večjo stično površino med injekcijsko maso in steno vrtine, s čimer se strižne napetosti porazdelijo precej enakomerno, vendar pa se po drugi strani zvišujejo stroški izdelave vrtine. Taka sidra naj se ne bi uporabljala pri sidrih majhnega premera v nevezljivih naplavinah, lahko pa se uporabljajo pri sidrih velikega premera v vezljivih zemljinah (Sabatini in sod., 1999).



Slika 3.1: Primerjava zasnove tlačnega tipa (levo) in nateznega tipa (desno) prednapetega sidra (prirejeno po Sabatini in sod., 1999).

Figure 3.1: Comparison between different design of a prestressed anchor: compressive type (left) and a tensile type (right) (adapted after Sabatini et al., 1999).

Nedvomno so najbolj razširjena trenjska geotehnična sidra **sidra nateznega tipa** (Limelette, 2008). Pri teh sidrih je natezno obremenjeni jekleni kabel sidra zalit z injekcijsko maso v tleh zaledja, pri čemer se po strditvi mase vzpostavi vez med jeklenim kablom in injekcijsko maso, ki se upira silam, ki želijo povzročiti zdrs kabla v vzdolžni smeri. Raziskovalci že več kot 70 let ugotavljajo, da je v takšnih primerih porazdelitev sil neenakomerna. Že v prvi polovici 20. stoletja so Gilkey in sod. (1938) pojasnili pojav **progresivnega popuščenja** (angl. progressive debonding) na vezi natezno obremenjene jeklene palice z betonom, pri čemer so ugotovili, da potek strižnih napetosti vzdolž vezi jeklene palice z betonom ni enakomeren. Do enakih ugotovitev so od leta 1970 naprej prihajali tudi številni raziskovalci, ki so raziskovali porazdelitev napetosti vzdolž veznega dela nateznih sider. Coates in Yu (1970) sta na

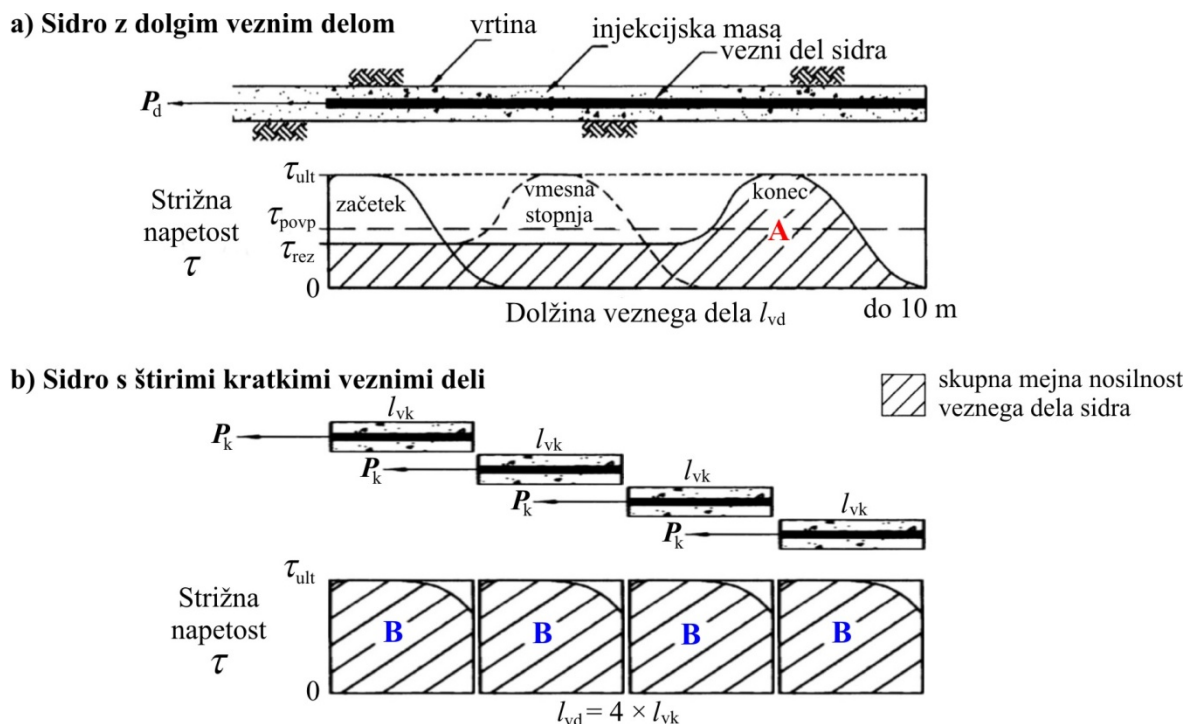
podlagi rezultatov numeričnih analiz na elastičnih modelih zemljin pokazala, da je porazdelitev strižnih napetosti vzdolž veznega dela sidra močno odvisna od razmerja med modulom elastičnosti tal in modulom elastičnosti sidra, zaradi česar je porazdelitev napetosti v mehkih zemljinah približno enakomerna, medtem ko se v trdnih zemljinah na bližnjem delu veznega dela sidra pojavi koncentracija napetosti, pri čemer pa se raven napetosti proti konici sidra zmanjšuje. Pri nateznih sidrih torej v zgornjem območju veznega dela sidra injekcijska masa vedno razpoka, zato v tej coni natezno sidrno silo prevzamejo pramena, pri čemer je osna togost razpokane cone bistveno manjša od osne togosti podobnega tlačno obremenjenega odseka. Sidra z dolgim veznim delom so manj toga, zato je v trenutku, ko dno sidra doseže maksimum, zgornji del sidra že v zmanjšanem rezidualnem območju, trenje vzdolž sidra pa je nekje med maksimumom in končno rezidualno vrednostjo. Na drugi strani je sidro s krajšim veznim delom bolj toga, zato je razlika med pomikom zgornjega in spodnjega dela manjša, zato se lahko vzdolž celega veznega dela sidra mobilizira maksimalno trenje.

Po eksperimentalnih rezultatih aktivno območje veznega dela sider ni odvisno od skupne dolžine veznega dela sidra, pač pa od premera vrtine in mehanskih lastnosti okoliških tal zaledja, še posebej pa od modula elastičnosti tal (Berardi, 1967). Računska modeliranja triosne porazdelitve napetosti vezi injekcijske mase s kamnino, opravljena leta 1970, so pokazala, da porazdelitev strižnih napetosti na tej vezi zavisi od razmerja med elastičnima moduloma materiala sidra (t.j. injekcijske mase z jeklenim kablom) ter kamnine: manjše kot je to razmerje (torej pri zelo elastičnem sidru v bolj togih tleh), večje so koncentracije napetosti na bližnjem območju sidra, na drugi strani pa večje kot je to razmerje, bolj enakomeren je potek napetosti vzdolž cele vezne dolžine (Littlejohn in Bruce, 1977). V praksi se torej porazdelitev mobiliziranih strižnih napetosti vzdolž vezi kamnine in injekcijske mase malokdaj približa enakomerni, razen v primeru izredno šibkih kamnin (pri razmerju med elastičnima moduloma injekcijske mase in kamnine večjem od 10), medtem ko v vseh ostalih primerih lahko privzamemo, da je potek strižnih napetosti neenakomeren. Značaj vezi na stiku sidra s kamnino je kompleksen, pri čemer je delovanje vezi odvisno od kombinacije mehanizmov adhezije, trenja in mehanskega medsebojnega spoja (Littlejohn, 1993).

Na sredini 1970-ih so bili objavljeni rezultati obsežnih podrobnih raziskav, opravljenih na vzorcu 300 sider, ki so obsegale izvedbo PS do dovoljene delovne sidrne sile, povečane za 50 %, ter naknadno izkopavanje in detajlno pregledovanje preskušanih sider (Ostermayer, 1975). Raziskave so bile izvedene na različnih sistemih sidranja in protikorozijske zaščite sider vgrajenih v vezljive in nevezljive zemljine (gline, peske in prode), v sklopu katerih je Ostermayer postavil osnovne definicije preskušanja sider v smislu opazovanja *mer lezenja k*. Podrobno je analiziral obnašanje sider in pojasnil neenakomerno porazdelitev kontaktnih napetosti in progresivno koncentracijo obremenitev vzdolž veznega dela sider, pri čemer je ugotovil, da so vplivni faktorji na nosilnost sider, vgrajenih v vezljive in nevezljive zemljine, različni, vendar pa v vseh primerih s povečanjem dolžine veznega dela sidra padejo vrednosti kontaktnih napetosti. Podobno so pri svojih eksperimentalnih raziskavah na instrumentiranih sidrih ugotovili Mastrantuono in Tomiolo (1977), Ostermayer in Scheele (1977) ter Schields in sod. (1978): v vseh primerih so potrdili izrazito koncentracijo kontaktnih napetosti v začetnem območju veznega dela nateznih sider, medtem ko so bile napetosti na večjem preostalem območju veznega dela proti konici sidra manjše. Posledica koncentracije kontaktnih napetosti je progresivno popuščanje, zaradi katerega razpoložljiva in-situ nosilnost tal ostaja precej neizkoriščena: pri pogojih obremenitve, pri katerih se izkorišča nosilnost tal globoko v veznem delu sider, je bila nosilnost tal nad tem mestom že prekoračena in nudi le še rezidualne vrednosti trdnosti. Raziskave obnašanja trajnih sider so se v tistem času izvajale tudi pri nas – na takratnem ZRMK so jih opravili Štrucl in sod. (1983), pri čemer so na navojne palice

nalepili uporabne lističe in izvedli terenske preskuse nosilnosti do porušitve po *DIN 4125-2*, na podlagi katerih so potrdili mehanizem porušitve z neenakomernim potekom napetosti.

Opravljene raziskave kažejo, da se pri nateznih sidrih pri vnosu sile v sidro koncentracija strižnih napetosti pojavi v zgornjem območju veznega dela sidra (t.j. ob stiku s prostim delom sidra), kjer se nahaja začetna točka mobilizacije strižnih napetosti, pri čemer pa je v tem trenutku spodnje območje veznega dela neobremenjeno (slika 3.2a).



Slika 3.2: Potek strižnih napetosti vzdolž veznega dela sidra: (a) dolg vezni del sidra s progresivnim popuščanjem, (b) primer veznega dela sidra iste skupne dolžine, teoretično sestavljenega iz 4 kratkih veznih delov z zanemarljivim progresivnim popuščanjem (prirejeno po Ostermayer in Barley, 2003). **Figure 3.2:** Bond stress distribution along a fixed anchor length: (a) long fixed length of an anchor with progressive debonding, (b) example of the same total fixed length of an anchor theoretically composed of 4 short fixed length with negligible effect of debonding (adapted after Ostermayer and Barley, 2003).

Pramena sidra z veznim delom dolžine 10 m se morajo na bližnjem koncu raztegniti za 30 mm preden se sidrna sila vnese v skrajni spodnji del veznega dela sidra (Barley, 1997). Elastično obnašanje zainjektiranih tal v okolici sidra ni kompatibilno z elastičnim obnašanjem jeklenega nateznega elementa (kabela sidra), zato porazdelitev sidrne sile vzdolž veznega dela ni enakomerna, pač pa zavisi od strižnih karakteristik tal, togosti tal in togosti pramen sidra (Limelette, 2008). Iz tega razloga se v vezi golih pramen s cementno injekcijsko maso v masi pojavljajo natezne napetosti, ki zaradi njene nizke natezne trdnosti vodijo v razvoj prečnih razpok glede na os sidra. Z naraščanjem sile v sidru strižne napetosti v vezi pramen z injekcijsko maso oz. v vezi injekcijske mase s tlemi naraščajo. Po prekoračitvi maksimalne strižne trdnosti v vezi pride do zdrsa, pri čemer po izvršenem pomiku v vezi strižne napetosti padejo na nižjo rezidualno vrednost. Ko v najšibkejši vezi (običajno je to vez injekcijske mase s tlemi) strižne napetosti dosežejo mejno vrednost, potem v tem območju veznega dela sidra strižne napetosti v drugih vezeh ne morejo več naraščati, s čimer je to območje veznega dela sidra

doseglo mejno odpornost in bo v nadaljevanju obremenjevanja sidra odpornost na tem območju upadla in bo do konca obremenjevanja ostala na ravni rezidualne vrednosti. Zaradi povečevanja sile v sidru se območje koncentriranih napetosti premika vzdolž veznega dela proti konici sidra in se v trenutku pred poružitvijo približa spodnji točki veznega dela sidra. Za opisani mehanizem progresivnega popuščanja je značilno eksponentno upadanje sidrne sile proti konici sidra (Weerasinghe in Littlejohn, 1997), pri čemer odpornost takega sidra dobimo z integracijo napetosti (na [sliki 3.2a](#) označeni kot površina pod krivuljo "A") vzdolž njegovega veznega dela. Iz poteka napetosti "A" je očitno, da se nosilnost takega sidra s povečanjem dolžine veznega dela zelo malo povečuje, zato je v praksi dolžina veznega dela običajnih nateznih sider v odvisnosti od tipa tal omejena na 8 do 10 m.

Druga možnost je, da običajno sidro preoblikujemo v sidro sestavljeno iz večjega števila podsider z relativno kratkimi veznimi deli vgrajenimi v isto vrtino – tako bi lahko na primer 4-pramensko sidro z dolgim veznim delom, katerega delovanje je prikazano na [sliki 3.2a](#), razdelili na štiri podsidera, od katerih znaša dolžina veznega dela vsakega podsidera l_{vk} teoretično le $\frac{1}{4}$ skupne dolžine veznega dela sidra l_{vd} , čeprav je v praksi zaradi izdelave tesnitev pramen na stiku prosti-vezni del še nekoliko krajša. V takem sidru, sestavljenem iz štirih podsider, vsako podsidro prevzame $\frac{1}{4}$ sidrne sile, vendar pa je zaradi bistveno ugodnejše razporeditve strižnih napetosti vzdolž kratkih veznih delov pramen ([slika 3.2b](#)) odpornost vsakega podsidera večja, kar je razvidno tudi iz razmerja površin pod diagramoma strižnih napetosti na [sliki 3.2](#) ($4 \times B > A$). Nosilnosti podsider se lahko enostavno seštejejo (Ostermayer in Barley, 2003), pri čemer pa je nosilnost tako sestavljenega sidra opazno večja od nosilnosti sidra z dolgim veznim delom sidra ($4 \times P_k > P_d$).

Leta 1978 je Barley izvedel raziskovalne izvlečne preskuse zelo kratkih veznih delov pramen v obliki treh medsebojno zamaknjenih podsider zalitih v smoli v jekleni cevi dolžine 2 m, ki jih lahko smatramo kot prvi preskus **večkratnega sidra** (Barley 1995, 1997a, Barley in Windsor, 2000). Rezultate teh raziskav je Barley uporabil kot izhodišče za oblikovanje koncepta večkratnega sidra, pri katerem se izvede prenos sidrne sile na več krajših (bolj togih) veznih delov, s čimer je omogočeno mobiliziranje maksimalnega razpoložljivega trenja vzdolž pretežne dolžine veznega dela, posledično pa se učinkovito mobilizira tudi razpoložljiva nosilnost tal, kar se odraža v povečani odpornosti sidra. Visoke vrednosti strižnih napetosti v vezi strjene injekcijske mase s tlemi zaledja (zemljin in mehkih kamnin) so v splošnem rezultat **učinka razmikanja** (angl. dilatancy effect), pri katerem se morajo zrna v strižni coni tal najprej razmakniti, zaradi česar pride do povečanja prostornine, da lahko pride do prestriga, kot tudi **mehanskega medsebojnega spoja** (angl. mechanical interlock) grobih površin, oba kot posledica povečanja normalnih radialnih napetosti. Preskusi, izvedeni na velikih modelih, so pokazali, da pri nevezljivih zemljinah normalne napetosti lahko dosežejo vrednosti, ki za faktor desetkrat presežejo napetosti zaradi lastne teže tal σ_z (Ostermayer in Barley, 2003), povečanje radialnih napetosti pa se že med vgradnjo sider lahko doseže tudi s poinjektiranjem.

Prva uporaba delno prefabriciranega večkratnega sidra je bila izvedena v Shrewburyju (Velika Britanija), kjer so bila sidra napeta s skupno napenjalko, zato različni izvlečki posameznih podsider niso bili izvedljivi, posledično so bile sile, ki so delovale v posameznih podsiderih, različne. V času do prave komercialne uporabe večkratnih sider leta 1988 v Southamptonu (Velika Britanija) je bil razvit sistem večjih hidravlično sinhroniziranih mononapenjalk, ki omogočajo sočasno napenjanje pramen podsider z različnimi prostimi dolžinami. Z uporabo večkratnih sider so se dosegljive odpornosti običajnih sider iz 1970-ih in 1980-ih (v zemljinah med 500 in 800 kN) bistveno povečale vse do 3000 do 4000 kN v zemljinah in mehkih kamninah, pogosto pa se v takšna tla vgrajujejo sidra z delovnimi sidrnimi silami 800 do 2000 kN (Barley in Windsor, 2000).

V sklopu raziskav izvlečenja veznih delov pramen je Barley (1997c) ugotovil štiri potencialne porušne mehanizme: izpuljenje več posameznih pramen, izpuljenje celotne skupine pramen, porušitev po zunanji ploskvi notranje rebraste cevi in porušitev po zunanji ploskvi zunanje rebraste cevi. Kasneje se je izkazalo, da se najbolje obnesejo pramena podsider, ki so v veznem delu za boljši oprijem na cementno injekcijsko maso preoblikovana (angl. deformed strands). V primerih, ko je v skupnem rebrastem ovoju vgrajenih več kot sedem pramen, pride do spremembe mehanizma obnašanja veznih delov pramen, saj se namesto tendence izvlečenja posameznih pramen začne pojavljati tendenca izvlečenja celotne skupine pramen, kar je posledica velike koncentracije strižnih napetosti na obodu skupine pramen.

V kolikor so vezni deli podsider dovolj kratki, da ne pride do pojava progresivnega popuščanja, potem se lahko v homogenih tleh sočasno, približno enakomerno vzdolž celotne dolžine veznega dela sidra, mobilizira maksimalna razpoložljiva nosilnost tal (Barley, 1997). V primerjavi z omejitvijo dolžine veznega dela na 8 do 10 m pri običajnih sidrih, pri večkratnih sidrih ni teoretične omejitve skupne dolžine veznega dela sidra, poleg tega pa se lahko v nehomogenih pogojih tal vezne dolžine posameznih podsider prilagodi pogojem tal (npr. podaljšanje veznih delov v slabo nosilnih plasteh tal oz. skrajšanje veznih delov v bolj nosilnih plasteh tal), pri čemer potem vsa podsidera prevzamejo približno isti delež sidrne sile (slika 3.3). Iz tega razloga je bolj razširjena uporaba večkratnih sider v vezljivih materialih tal in tleh heterogene plastovite sestave (Ostermayer in Barley, 2003), v katerih lahko pri kakšnem podsideru v zelo šibki plasti tal zaledja že pride do porušitve, medtem ko ostala podsidera istega sidra še vedno prevzemajo svoj delež sidrne sile, tako da odpornost sidra kot celote ni ogrožena. Pri običajnih sidrih takšna šibka plast lahko v skrajnem primeru povzroči odpoved celotnega sidra, medtem ko se sidrna sila v večkratnem sidru le zmanjša na račun popustitve veznega dela podsidera, ki se nahaja v šibki plasti.



Slika 3.3: Večkratno sidro z veznim delom dolžine 25 m v tleh zaledja mešane nosilnosti (Ostermayer in Barley, 2003).

Figure 3.3: A Single bore multiple anchor with 25 m fixed length founded in mixed ground conditions (Ostermayer and Barley, 2003).

Na začetku razvoja večkratnih sider je bil v vsakem podsideru le po en pramen, vendar pa so z uporabo sider v praksi za doseganje večjih odpornosti na izvek in za zagotovitev porušitve vezi injekcijske mase s tlemi zaledja v vsako podsidro začeli vključevati po dva pramena (Barley in Windsor, 2000). S teoretičnega stališča bi bilo sicer najbolj izkoriščeno večkratno sidro sestavljeno iz velikega števila podsider s kratkimi veznimi deli, vendar pa Barley (1997a) oz. Barley in Windsor (2000) opozarjata, da moramo pri določanju števila podsider in njihovih nosilnosti (odpornosti) v praksi upoštevati naslednja dejstva:

- Dolžine veznih delov pramen podsider l_v in kontaktni mehanizem v vezi pramen z injekcijsko maso vsakega podsidera naj omogočijo varno izrabo polne odpornosti pramen sidra, pri čemer naj bodo zaradi varnosti dolžine l_v večje od minimalno potrebnih, vendar pa se s podaljševanjem na drugi strani zmanjšuje učinkovitost mobilizacije nosilnosti tal (vezni deli sider dolžin 2 do 4 m so npr. učinkovitejši od veznih delov dolžin 4 do 8 m). Čeprav bi bila lahko polna odpornost pramen dosežena že vzdolž veznega dela dolžine 1 do 1,5 m, se v britanski praksi zaradi varnosti uporabljajo dolžine veznih delov 2 do 3 m (Barley in Windsor, 2000), v ameriški praksi pa nekje med 1,5 in 3,5 m (Bruce in sod., 2007).
- Vpliv prehoda prostih dolžin podsider, katerih vezni deli so vgrajeni globlje proti konici sidra, na odpornost vezi podsider, vgrajenih bližje glavi sidra (pojav razpok v injekcijski masi) in posledične prenatrpanosti vrtine. Pri prenosu sile, z natezno obremenjenih pramen na injekcijsko maso v notranjosti rebraste PE cevi, v injekcijski masi namreč pride do pojava cepilnih napetosti, pri čemer je sposobnost strjene injekcijske mase za prevzem teh napetosti zaradi omejene natezne trdnosti močno omejena. Cepilne napetosti ne povzročijo pojava razpok v valjasti cevi strjene injekcijske mase le v primeru tal zaledja, ki imajo dobre mehanske lastnosti in zagotavljajo učinkovito objetje valja strjene cementne mase v radialni smeri. V primerih večkratnih sider prosti deli daljših podsider (z daljšimi prostimi deli) potekajo neposredno ob veznih delih krajših podsider (s krajšimi prostimi deli), zato je v teh območjih strjena injekcijska masa v notranjosti PE ovoja oslabljena, zaradi PE cevi za oplaščenje pramen prostih delov kot tudi izdelanih tesnilnih stikov pramen na stiku prosti-vezni del pa je učinkovitost objetja pramen podsider s krajšimi prostimi deli zmanjšana. Iz tega razloga so najbolj izpostavljena podsidera z najkrajšimi prostimi deli, pri katerih v okolici njihovih veznih delov poteka večje število prostih delov daljših podsider. Poleg tega so pri preskušanjih sider ugotovili, da se v prostih delih daljših podsider zaradi prehoda ob veznih delih krajših podsider pojavlja tudi trenje, kar se posledično izkazuje v krajših efektivnih prostih dolžinah.
- Za delovanje večkratnih sider je pomemben premer vrtine, ki naj pri mehkih hribinah znaša 140 mm, kot tudi premer in tip protikorozijskega ovoja (oblika zaščitnih cevi) v veznih delih podsider.
- Pri večkratnih sidrih omejitve predstavlja razpoložljivi prostor za razporeditev večjega števila mononapenjalk v hidravlično sinhroniziranem sistemu na glavi večkratnega sidra.
- Ena od prednosti večkratnih sider se pokaže pri preskušanju njihove nosilnosti, saj za vsako podsidro posebej pridobimo popoln in vsestranski nabor podatkov o njegovem elastičnem in neelastičnem obnašanju in odpornosti veznega dela (t.j. za večkratno sidro s šestimi podsidri pridobimo šestkrat več podatkov kot pri običajnem sidru).
- Posebna pazljivost je potrebna v primerih sidranih objektov, ko so tekom njihove življenjske dobe pričakovani pomiki objekta, saj so pri večkratnih sidrih prirasti oz. upadi sil zaradi teh pomikov v pramenih posameznih sider odvisni od dolžine njihovih prostih delov, zato so podsidera s krajšimi prostimi deli bolj občutljiva na pomike sidrane konstrukcije od podsider z daljšimi prostimi deli (torej so prirasti oz. upadi sil v krajših podsidrih v primerjavi z daljšimi podsidri sorazmerno večji).

Kot merilo za enostavno oceno učinkovitosti mobilizacije razpoložljive mejne strižne nosilnosti τ_{ult} v vezi injekcijske mase s tlemi zaledja (predvsem v zemljinah in mehkih kamninah) je Barley vpeljal *faktor učinkovitosti* f_{eff} (Barley, 1995), ki ga je sicer v osnovi predlagal Bassett (1970), a ne v direktni povezavi z učinkovitostjo veznega dela sidra. Za primer običajnega sidra z dolgim veznim delom, prikazanega na [sliki 3.2a](#), faktor učinkovitosti izračunamo kot razmerje med silo, ki jo dobimo z integracijo strižnih napetosti vzdolž l_{vd} sidra (površina "A" na [sliki 3.2](#)) ter mejno razpoložljivo silo:

$$f_{\text{eff}} = \frac{\int_0^{l_{\text{vd}}} \tau(x) dx}{\tau_{\text{ult}} \cdot l_{\text{vd}}}, \quad (3.1)$$

pri čemer pa je f_{eff} zaradi odvisnosti oblike poteka strižnih napetosti $\tau(x)$ od dolžine veznega dela sidra l_{vd} posledično odvisen tudi od l_{vd} . Na podlagi znanega faktorja učinkovitosti lahko izračunamo mejno odpornost enega podsidra $P_{\text{u,ps}}$ (Ostermayer in Barley, 2003):

$$P_{\text{u,ps}} = P_{\text{m}} \cdot l_{\text{vk}} \cdot f_{\text{eff}}, \quad (3.2)$$

pri čemer je P_{m} mejna strižna nosilnost na en meter kratkega zainjektiranega veznega dela podsidra l_{vk} (slika 3.2b), v katerem je vpliv elastičnosti kabla sidra na strižno nosilnost majhna ali zanemarljiva. Pri tem je "kratka dolžina" praviloma krajša od 2 oz. 3 m, vendar pa je natančneje določena z relativno elastičnostjo med jeklenim kablom in zainjektiranimi tlemi (v primerih zelo elastičnih kablov sider kot "kratke dolžine" veljajo krajše l_{vk}). Po istem viru se pri takšnem pristopu nelinearnost med odpornostjo sidra in dolžino veznega dela sidra praviloma upošteva pri dolžinah veznega dela daljših od 3 m. Glede na to, da je osna togost natezno obremenjenega kabla sidra pri konstantni površini prečnega prereza pramen A_t in modula elastičnosti E_p obratno sorazmerna dolžini kabla, je osna togost krajših veznih delov kablov sidra večja, zaradi česar je pričakovati, da se poveča učinkovitost mehanizma vezi med kablom sidra in injekcijsko maso, zaradi česar se lahko mobilizira večji delež razpoložljive nosilnosti tal zaledja. Za primer večkratnega sidra, sestavljenega iz štirih podsider dolžin veznih delov po 3 m, medsebojno zamaknjenih po veznem delu skupne dolžine 12,2 m, tako v trdnih do zelo trdnih zemljinah dosežemo več kot dvojno odpornost običajnega sidra z 12,2 m veznim delom; razlika v doseženi odpornosti gre na račun faktorja učinkovitosti f_{eff} , saj pri 3 m veznem delu podsidra znaša $f_{\text{eff}} = 85 \%$, medtem ko znaša f_{eff} veznega dela običajnega sidra dolžine 12,2 m le 38 % (Bruce in Barley, 2003).

Že od začetka 1970-ih so številni raziskovalci v sklopu svojih eksperimentalnih raziskav ugotavljali, da se v različnih zemljinah odpornost sidra na izvlek v splošnem zmanjšuje s povečanjem dolžine veznega dela sidra, torej s povečanjem dolžine veznega dela sidra strižne napetosti nelinearno padajo. Le nekoliko kasneje je več raziskovalcev **z uporabo računskih metod in simulacij** poskušalo vpliv neenakomerne porazdelitve napetosti vzdolž veznega dela sider ponazoriti tudi z razvojem in uporabo različnih numeričnih modelov. Desai in sod. (1986) so že v obdobju močno omejenih zmožnosti računalniške opreme po metodi končnih elementov (MKE) zasnovali 3-D osnosimetričen model enostavnega paličnega sidra zalitega s cementno injekcijsko maso v nevezljivi zemljini (peskih). Model so pripravili tako, da so za jeklo palice in injekcijsko maso privzeli linearno elastično obnašanje, za obnašanje peska so privzeli elastoplastični model z utrjevanjem, poskušali pa so simulirati tudi obnašanje vezi injekcijska masa-pesek, pri čemer so za normalne in strižne karakteristike vezi privzeli kar podatke za pesek. Rezultate numerične analize so primerjali z rezultati obnašanja sidra pri izvlečnem preskusu na testnem polju, kjer se je izkazalo, da je do porušitve sidra prišlo po pesku in sicer v neposredni bližini vezi injekcijska masa-pesek. Najboljše ujemanje so dobili v primeru, ko so upoštevali, da začetne normalne napetosti na elemente vezi znašajo 40 % začetnega tlaka injektiranja. Na obnašanje veznega dela sidra dolžine 2 m so pomembno vplivali nelinearno obnašanje vezi in interakcijski vplivi, pri čemer so pomike zgornje točke veznega dela sidra ocenili tako, da so od izmerjenih pomikov na glavi sidra odšteli elastične (osne) raztezke vzdolž celotne dolžine prostega dela sidra. Rezultati nelinearne analize numeričnega modela pri visokih sidrskih silah so pokazali pomembno prerazporeditev napetosti vzdolž veznega dela sidra, pri čemer so se napetosti v skrajni zgornji točki veznega dela zmanjšale na nič, kar kaže na popustitev oz. pretrganje vezi sidra z zemljino. Rezultati predstavljenega numeričnega modela tako podajajo zadovoljivo korelacijo ključnih rezultatov prostega dela sidra s prevladujočim linearnim

odzivom numerične simulacije z in-situ stanjem pri dejanskih preskusih, s čimer omogočajo vpogled v dejansko prazuporeditev normalnih in strižnih napetosti vzdolž veznega dela sidra, vendar pa na drugi strani ne omogočajo zadovoljive simulacije linearnega dela pomikov veznega dela ter nelinearne prazuporeditve napetosti v vezi, ki je posledica prazuporeditve nateznih napetosti in relativnih pomikov med sidrom in zemljino.

Casnovas (1989) je v sklopu računskega modeliranja vezi med injekcijsko maso in tlemi zaledja predlagal poenostavljeno metodo v kateri se telo strjene injekcijske mase okoli jeklene palice sidra razdeli na krajše tlačne obročaste elemente, ki se opirajo na steno vrtine tal zaledja. Glede na to, da sidro pretežno del sidrne sile v tla zaledja vnese v omejenem območju veznega dela sidra, je ta del sidra definiral kot "efektivno vezno dolžino", v območju katerega ima na odpornost vgrajenega sidra prevladujoč vpliv odpornost zemljine, zato za povečanje odpornosti sidra podaljšanje veznega dela sidra nima praktično nobenega vpliva. Casnovas je za primer sider v peskih in gramozih predlagal uvedbo dodatnega faktorja, ki omogoča vrednotenje efektivne vezne dolžine sidra in preko katerega zajamemo neenakomerni potek napetosti vzdolž veznega dela sider. Delovanje predlagane računske metode je preveril na dveh primerih, pri čemer je ugotovil zadovoljivo ujemanje računske maksimalne strižne trdnosti z eksperimentalno dobljenimi vrednostmi, s čimer je možno dovolj natančno napovedati mejno odpornost zainjektiranih sider v obravnavanih tleh zaledja.

Hyett in sod. (1996) so v svojem članku obravnavali nelinearni matematični model nosilnosti sider, sestavljenih iz jeklenega nosilnega elementa zalitega s cementno injekcijsko maso v kamnini, ki se pretežno uporabljajo pri podpiranju podzemnih prostorov v rudarstvu – v tem primeru gre za sidranje s pasivnimi pramenskimi sidri brez prostega dela (angl. cable bolting). Čeprav takih sider ne gre enačiti s trajnimi prednapetimi sidri, pa so osnovne zakonitosti delovanja veznega dela natezno obremenjenega sidra, po enaki tehnologiji vgrajenega v kamnini, pravzaprav zelo podobne. V članku raziskovalci podajajo analitične rešitve za porazdelitev pomikov in obremenitev vzdolž veznega dela sidra kot tudi togosti vezi nenapetega popolnoma zainjektiranega elastičnega sidra. Glede na to, da mehanika porušitve vezi zavisi od tipa sidra in uporabljene injekcijske mase, je v drugem delu članka za 7-žična pramenska sidra, zalita s cementno injekcijsko maso, predstavljen model končnih diferenc, v katerem je zajet tudi nelinearni model vezi. Rezultati opravljene parametrične študije nakazujejo, da so dosežene odpornosti veznih delov sider, zaradi trenjskega značaja vezi in njene odvisnosti od objekta kamnine vrtine, pri istih pomikih mas mehkih kamnin, nižje. Posledično v mehkih hribinah pogosto ni možno izkoristiti odpornosti pramen po jeklu, saj prej pride do porušitve vezi pramen z injekcijsko maso, zato do primerov pretrganja pramen sider prihaja predvsem le v trdnih blokih kamnine.

Za vključitev sicer kompleksnega mehanizma neenakomerno porazdeljenih napetosti vzdolž veznega dela sidra, v rutinsko projektiranje sidranj, sta Woods in Barkhordari (1997) uporabila že prej omenjen faktor učinkovitosti f_{eff} . Na podlagi omejenega števila rezultatov terenskih in laboratorijskih preskušanj sider sta, na podlagi vzorca porazdelitve napetosti vzdolž veznega dela sider, numerično po metodi najmanjših kvadratov določila izraz, ki najbolje opisuje faktor učinkovitosti za vzorčne peske in gline. Pripravila sta enostaven matematičen model za simulacijo progresivnega popuščanja, oblikovan kot algoritmična zanka, ki je primeren za uporabo v splošno razširjenem programu Microsoft Excel. V modelu se sidro razdeli na segmente enake dolžine, v katerih so vrednosti parametrov konstantne, pri čemer sta z dvofaznim modelom ponazorila injekcijsko maso in tla v okolici vrtine kot tudi vmesno vez, ki sta jo ponazorila s posebnimi veznimi elementi. Uporabnost modela je za našo prakso močno omejena, saj temelji na predpostavkah, da zaradi izboljšane vezi pramen z injekcijsko maso v obliki

lokalnih razširitev žic pramen (kar se v naši praksi ne uporablja) na vezi pramen z injekcijsko maso ne pride do ločitve, torej bo do popuščanje veznega dela sidra prišlo na vezi injekcijske mase s steno vrtine tal zaledja.

Kot ena od oblik računskih metod je bila predstavljena tudi enostavna grafična metoda za določitev diagrama sila-izvleček in nosilnosti zainjektiranih zemljinskih sider (Mecsi 1995, 1997). Po tej metodi se na podlagi aktivacije specifične izvlečne odpornosti, povzročene z relativnim osnim pomikom med zemljino in sidrom, z vpeljavo brezdimenzijskih koeficientov določi približna izvlečna odpornost zainjektiranega zemljinskega sidra. Ta izvlečna odpornost je pravzaprav odpornost z natezno silo obremenjenega razširjenega valja strjene injekcijske mase veznega dela sidra po vezi z zemljino. Po tej metodi je vezni del sidra razdeljen na dolžino aktivirane strižne trdnosti v zgornjem delu (v kateri so po celotni dolžini strižne napetosti konstantne in enake mobilizirani strižni trdnosti), v preostalem spodnjem delu pa so strižne napetosti manjše od strižnih trdnosti in proti konici sidra upadajo. Na podlagi eksperimentalno izmerjenih sil in raztezkov, znanih karakteristik tal, znane geometrije in togosti sidra, lahko z uporabo predlagane metode iz obtežbenega diagrama preskusa ocenimo približno vrednost izvlečne odpornosti in pripadajoče dolžine cone aktivirane strižne trdnosti.

Logar in sod. (2004) so za obnašanje trajnih prednapetih pramenskih geotehničnih sider razvili tri računske modele. Prvi model je preprost in je v osnovi analitičen model, ki se uporablja za račun obnašanja trenjskih pilotov, katerega nedvomna prednost je enostavnost, a je modeliranje vezi injekcijske mase s hribino omejeno le na uporabo idealnega elastoplastičnega delovnega diagrama. Ta model so nadgradili z novim, ki je sicer odpravil slabost prejšnjega, vendar pa so bili po predhodnih računih pomiki glave sider pri napenjanju premajhni, saj model ne upošteva deformabilnosti obremenjene hribine v širši okolici veznega dela sidra. Zato so na podlagi drugega izpeljali še tretji model, v katerem so upoštevali še deformabilnost hribine, zajeli so elastično togost jekla ter injekcijsko maso v nategu (do nastanka razpok), pri čemer model omogoča uporabo poljubnega točkovno podanega delovnega diagrama vezi med sidrom in hribino, kot tudi deformacije hribine zaradi obremenitev s sidrom. Predstavljeni modeli še ne omogočajo upoštevanja reoloških vplivov (tečenja), ki se zlasti zaradi primerjave z merjenim parametrom – mero lezenja k – izkazujejo za pomembne. S parametričnimi študijami so preverili določene vplive na obnašanje sider in sicer oblike interakcijskega diagrama vezi med sidrom in hribino (rezidualna trdnost), začetne togosti obnašanja te vezi, širine platoja v interakcijskem diagramu stika, strižnega modula hribine, togosti sidra, vrhunske trdnosti vezi sidra s tlemi ter dolžine veznega dela sidra. Ugotovili so, da program s tretjim modelom omogoča simulacijo dejanskega obnašanja sidra, saj se izmerjene vrednosti, dobljene pri PS izvedenih na realnih konstrukcijah, dobro ujemajo z izračunanimi vrednostmi, prav tako pa so dobljene rezultate primerjali tudi z rezultati dobljenimi s programom Plaxis po MKE, pri čemer je bilo ujemanje, glede na povsem različno izhodišče obeh metod, zelo dobro.

Logar in sod. (2004) so opravili tudi statistično analizo rezultatov napenjalnih preskusov večjega vzorca sider, dobljenih pri preskušanjih realnih konstrukcij, pri čemer so med drugim ugotovili, da dolžine veznega dela sider pomembno vplivajo na obnašanje sider, saj se s podaljševanjem vezne dolžine sidra mere lezenja k povečujejo, kar so tolmačili kot manjšo odpornost, medtem ko so bile pri krajših veznih delih mere lezenja k manjše. Do enakega zaključka so prišli tudi Briaud in sod. (1998), ki so na podlagi vzorca desetih preskušanih in analiziranih navpičnih sider iste skupne dolžine 13,8 m, a dveh različnih dolžin veznih delov (4,6 in 9,2 m) ugotovili, da je odpornost sider s krajšim veznim delom večja, mere lezenja k pa nižje, pri čemer so imela v njihovem primeru sidra s krajšim veznim

delom daljše proste dele, torej se sidrna sila v tla vnaša v bolj oddaljeno (napetostno bolj ugodno) območje od ravni tal in sidrane konstrukcije. Do iste ugotovitve so prišli tudi Logar in sod. (2004): na obnašanje sider in njihovo odpornost vpliva tudi dolžina prostega dela in sicer so vrednosti k nižje pri večji prosti dolžini sidra, kar bi lahko povezovali z ugodnejšim napetostnim stanjem v večji globini zaledja (boljše objetje strjene injekcijske mase) in, v večini praktičnih primerov, boljšo sestavo tal v večjih globinah zaledja. V povezavi z obnašanjem, da so bile mere lezenja k pri večjem številu pramen (pri sidrih z veznim delom enake dolžine) nižje, to pravzaprav pomeni, da so mere lezenja k pri sidrih z bolj togim veznim delom nižje.

Čeprav so številni raziskovalci že razvili analitične izraze za opis relacije strižnih napetosti in zdrsa, kot tudi za porazdelitev sprijemnih napetosti za različne izvlečne preskuse, pa je bila slabost teh modelov omejeno število prostih parametrov, ki jih je možno prilagajati, s čimer je posledično omejen splošni matematični opis zakona vezi. Za premostitev te omejitve so Banholzer in sod. (2005) na osnovi splošnega matematičnega opisa relacije strižnih napetosti glede na zdrs, za izvlečne preskuse sider izpeljali analitičen model, ki omogoča račun porazdelitve sil v odvisnosti od pomikov. Značilnost tega modela je, da se oblikovanje delovnega diagrama strižnih napetosti (v odvisnosti od zdrsa vezi jeklenega elementa z injekcijsko maso) lahko izvede s poljubnim številom odsekoma ravnih segmentov, torej je v vsakem od segmentov predpostavljen linearen zakon vezi. V članku so avtorji podali tudi kratek predstavitveni model, na katerem so rezultate analitičnega modela primerjali z eksperimentalnimi rezultati izvlečnih preskusov, pri čemer je bilo ujemanje med njimi zelo dobro.

Za raziskovanje mehanizma prenosa sil v veznem delu tako nateznih kot tudi tlačnih geotehničnih sider, zainjektiranih pri nizkih tlakih v prepereli zemljini, so Kim in sod. (2007) uporabili postopek modeliranja po MKE in modeliranja nosilec-steber (angl. beam-column modeling), ki se uporablja za modeliranje podpornih zidov izpostavljenih horizontalnim ali vertikalnim obtežbam. V modeliranje so zajeli modeliranje zemljine, injekcijske mase in jeklenih pramen, kot tudi vezi injekcijske mase s tlemi ter pramen sidra z injekcijsko maso, pri čemer so raziskovalci izpostavili, da je za rezultate analize izrednega pomena natančno modeliranje obeh vezi. Računsko modeliranje so izvedli z računalniškim programom Abacus, pri čemer so rezultati pokazali, da je do plastifikacije prišlo po vezi injekcijske mase s tlemi in po zemljini neposredno ob veznem delu sidra. Modeliranje prenosa obremenitev pri nateznem sidru ni tako dobro uspela kot pri tlačnem sidru, problem pa je bil tako pri raztrosu eksperimentalnih podatkov kot tudi pri nerealnih numeričnih parametrih, pri čemer so kot ključne parametre numerične simulacije opredelili: koeficient trenja med pramenom in injekcijsko maso, koeficient trenja med injekcijsko maso in zemljino, kot tudi maksimalno strižno napetost (adhezijo) v vezi pramena z injekcijsko maso. Rezultate numerične analize so primerjali z meritvami pri terenskih preskusih nosilnosti (Kim, 2003). Ugotovili so, da metodi MKE in nosilec-steber dobro napovedujeta zvezo sila-pomik geotehničnih sider, čeprav so bile vrednosti sile med zemljino in injekcijsko maso nateznih sider podcenjene.

Nekateri raziskovalci so v zadnjem času sicer že uspeli razviti dobre numerične modele, vendar pa je eksaktno modeliranje obnašanja veznih delov trajnih prednapetih električno izoliranih sider zaradi številnih vezi in specifične oblikovanja veznih delov sider še vedno izredno kompleksno, pri čemer bi morali poznati številne medsebojne vplive v notranjosti zaščitnega PE ovoja sidra, na podlagi katerih bi lahko kompetentno izbrali vplivne faktorje. Praksa kaže, da z vnaprejšnjo simulacijo obnašanja natezno obremenjenih veznih delov sider navkljub tehnološkemu napredku v zadnjih desetletjih, ki je omogočil nadaljnji razvoj numeričnih metod, z njimi še vedno ne moremo v zadovoljivi meri zajeti in

simulirati vseh vplivnih parametrov, saj pri modeliranju, poleg bolj obvladljivih parametrov (adhezija in trenje na vezi kabla sidra in cementne injekcijske mase, kot tudi na prehodu preko rebraste PE cevi obojestransko zalite v cementno injekcijsko maso), še vedno ostaja odprtih cela vrsta ostali parametrov, ki se nanašajo na:

- mikrolokacijo vgradnje sidra – podatke o tleh zaledja (mehanske lastnosti tal, hidrološke razmere, razpokanost in plastovitost tal, kot tudi praktično vedno bolj ali manj izrazito nehomogenost tal) le v omejenem obsegu pridobimo s predhodnimi raziskavami, saj se pogoji v praksi od vrtine do vrtine pogosto spreminjajo in jih zabeležimo šele med vrtnanjem vrtine posameznega sidra;
- tehnološke parametre izdelave vrtine (dejanskega premera vrtine, izbira dleta, način in tehnološki parametri vrtnanja ter odstranjevanja navrtanine, stopnja očiščenja stene vrtine, čas v katerem se po končanem vrtnanju v vrtino vstavi in zainjektira sidra, sestava ter v/c faktor injekcijske mase v območju med steno vrtine in rebrasto PE cevjo, tlak injektiranja, morebitno poinjektiranje, starost injekcijske mase pri napenjanju sider ipd.);
- tehnološke specifičnosti oblikovanja in izvedbe detajlov veznih delov pri sestavljanju sider.

Teoretično gledano bi bili poskusi razvoja računskih modelov, ki bi zajeli vse vplivne vidike in parametre delovanja veznih delov sider, glede na današnjo raven tehnološkega razvoja sicer možni, vendar pa je vprašljivo, v kolikšni meri bi uspeli učinkovito in dovolj natančno zajeti vse vplivne parametre, ne da bi si pri tem pomagali z eksperimentalnimi raziskavami. V vsakem primeru bi bili računski modeli za izvedbo natančne numerične simulacije trajnih prednapetih električno izoliranih geotehničnih sider zelo kompleksni, stroški za njihovo izdelavo in testiranje izjemno visoki, potrebni čas pa zelo dolg. Iz teh razlogov, kot tudi ob upoštevanju relativne nezanesljivosti rezultatov, na katere lahko vplivajo številni vplivi izdelave sider, pogojev tal na mikrolokaciji vgradnje posameznih sider kot tudi same vgradnje sider, je stališče stroke, ki ga povzemajo tudi sedaj veljavni predpisi (kot tudi predpisi, ki so trenutno v pripravi), še vedno takšno, da moramo na sidrnih objektih z izvedbo in-situ preskusov nosilnosti sider do porušitve (PS) na lokaciji sidranih objektov ugotoviti dosegljivo mejno odpornost na izvlek vnaprej izbranih tipov sider ter potrditi ustreznost načina njihove vgradnje.

Delovanje mehanizma prenosa sidrne sile in vezi so v obliki **laboratorijskih izvlečnih preskusov** prototipov oz. pomanjšanih modelov raziskovali številni raziskovalci. Benmokrane in sod. (1992) so raziskovali vpliv tipa cementne injekcijske mase na kontaktne napetosti in zdrs jeklenih pramen sestavljenih iz sedmih žic, kot tudi vpliv dolžine zalitja, lastnosti površine nateznega elementa in injekcijske mase (z ali brez dodatkov) na potek kontaktnih trdnosti. Pričakovano so ugotovili, da so tako tlačna in natezna trdnost injekcijske mase kot tudi elastični modul in Poissonov količnik pomembno odvisni od v/c faktorja injekcijske mase. Z nadomestitvijo 10 % cementa z mikrosiliko je bila za 13 % povečana tlačna trdnost strjene mase, medtem ko dodatek 40 % peska na maso cementa ne poveča tlačne trdnosti, pač pa poveča njegovo natezno trdnost in modul elastičnosti. Takšen rezultat so pojasnili z manjšim krčenjem injekcijske mase s peskom, saj se je v tem primeru v injekcijski masi krčilo le 60 % materiala.

Raziskavam vezi jeklenega nateznega elementa sidra z injekcijsko maso sta se posvetila Jarred in Haberfield (1997), ki sta podala rezultate laboratorijskih preskušanj vezi jeklenih navojnih palic $\varnothing 26$ mm s cementno injekcijsko maso. To vez sta namreč določila kot kritično za določitev odpornosti veznih delov sider, vgrajenih v dobrih tleh zaledja. Ugotovila sta, da odpornost stične površine na enoto površine s povečevanjem napetosti objekta in vsebnostjo nabrekajočega cementa, ki zaradi povečanih normalnih napetosti ugodno vplivajo na strižno nosilnost, narašča, ter na drugi strani, s povečevanjem

dolžine zalitja, zaradi neenakomerne porazdelitve napetosti vzdolž stične površine nateznega elementa in injekcijske mase, upada. Tudi Barley (1997b) na podlagi opravljenih laboratorijskih preskusov vzorcev pramen, zalitih s cementno injekcijsko maso v jeklenih ceveh, navaja, da močnejše kot je objetje (praviloma izraženo kot večji elastični modul tal) večja je odpornost pramen na izvlek.

Littlejohn in Weerasinghe (1997) sta za laboratorijske raziskave veznih delov sider, vgrajenih v mehko kamnino (muljevec), razvila posebno preskuševalno napravo, katere osrednji element je predstavljala razstavljiva jeklena cev, v katero so vgradili vezne dele sider, medtem ko so mehko kamnino nadomestili s posebno nadomestno maso na osnovi cementa in zmletega pepela. Cilj preskušanj v tej napravi (angl. gunbarrel testing) je bil pojasniti način popuščanja sider v šibkih zaglinjenih kamninah, zato sta se raziskovalca osredotočila na proučevanje mehanizmov prenosa sile in mehanizma porušitve veznega dela sidra v kamninah ter določitev kontaktnih napetosti v vezi injekcijske mase s prameni pri različnih oblikah kabla sidra. Za bodoča primerjalna fizična modeliranja in za validacijo teoretičnih modelov sta tudi vzpostavila podatkovno bazo. Adams in Littlejohn (1997) podajata predhodne ugotovitve preskusov opravljenih v posebni preskuševalni napravi, pri čemer sta raziskovala kontaktne (strižne) napetosti in mehanizem prenosa sile v šibkih in trdnih kamninah pri naraščajoči ciklični natezni obtežbi štirih pramen \varnothing 15,2 mm, ki so bila v veznem delu dolžine 3 m oz. 3,6 m oblikovana na različne načine (referenčna ravna pramena, žagast potek pramen, lokalne razširitve žic pramen bodisi v zamaknjenem vzorcu bodisi zbrane na istih mestih). Glavni namen raziskav je bil ugotoviti, s kakšnim načinom oblikovanja pramen veznega dela je v mehkih kamninah možno doseči potencialno največje povečanje odpornosti vezi pramen z injekcijsko maso, pri čemer so ugotovili, da največjo odpornost izkazujejo sidra z žagastim potekom pramen v veznem delu.

Weerasinghe in Littlejohn (1997) sta izvedla tudi terenska preskušanja začasnih pramenskih sider, pri čemer sta raziskovala vpliv različnega oblikovanja vrtine kot tudi veznega dela sider. Sidra sta zasnovala tako, da bodo odpovedala po vezi injekcijske mase s kamnino, zato sta za povečanje odpornosti vezi pramen z injekcijsko maso predvidela lokalno razmikanje žic pramen v veznem delu sider (angl. nodding). Rezultati preskušanj večkratnih sider so pokazali, da je pri večini pramen prišlo do nenadnega popuščanja in zdrsa pramen za 30 do 40 mm (izvlačenje pramen iz injekcijske mase), kar sta pripisala zelo kratkim dolžinam veznega dela pramen (0,75 m) v kombinaciji z nezadostnim radialnim objetjem muljevca v plitkih globinah. Pri večkratnih sidrih je prišlo do porušitve enega pramena pred ostalimi, pri čemer sta vsoto sil vseh štirih pramen smatrala kot maksimalno silo, ki jo nosi sidro. Raziskovalca predlagata, da se sider, ki v ravnih vrtinah kažejo znake porušitev, ne zavrže, pač pa se predvideno nosilnost (odpornost) sidra zmanjša za varnostni faktor 2, nato pa se na sidru opravi odobritveni preskus.

Na podlagi laboratorijskih in terenskih raziskav pramenskih sider, zainjektiranih v kamnini, so Hyett in sod. (1992) ugotovili, da odpornost pramen, zalitih v injekcijski masi, najbolj zavisi od v/c faktorja injekcijske mase, dolžine zalitja in radialnega objetja, ki deluje na zunanjo površino strjene cementne injekcijske mase: z naraščanjem stopnje objetja se porušni mehanizem spremeni iz radialnega razpokanja in bočnih pomikov injekcijske mase (pri šibkem objetju) do prestriga cementnih brazd in izvlečenja jeklenega elementa vzdolž cilindrične trenjske površine (pri močnem objetju). Na raziskovanje obnašanja vezi injekcijske mase z vrtino sta se osredotočila Haberfield in Baycan (1997): izvedla sta 36 izvlečnih preskusov do porušitve sider vgrajenih v zmerno preperelem meljevcu v vrtine različnih premerov (\varnothing 98 mm in \varnothing 300 mm), pri čemer sta sidra namensko zasnovala tako, da so vezni deli popuščali po vezi injekcijske mase z vrtino. Na podlagi rezultatov preskusov sta preučevala vpliv parametrov kot so

premer in hrapavost vrtine ter količina dodanega ekspanzivnega cementa v injekcijski masi. Ugotovila sta, da je trdnost adhezijske vezi večja pri vrtinah manjšega premera (\varnothing 98 mm), prav tako pa je pri tem premeru vrtine opaznejši večji učinek dodajanja ekspanzivnega cementa, pri čemer pa se v vseh primerih s povečanjem količine dodanega ekspanzivnega cementa povečuje trdnost adhezijske vezi, medtem ko je na drugi strani pri manjši količini dodanega ekspanzivnega cementa ta vez šibkejša, tako da v tem primeru prevladuje trenjska odpornost. Že Johnston (1977) je ugotovil, da je odpornost vezi na stiku z vrtino v kamninah odvisna od stopnje objetja okoliške kamnine, izražene kot normalna togost K_n :

$$K_n = \frac{E_m}{(1+\nu_m)r} = \frac{\Delta\sigma_n}{\Delta r}, \quad (3.3)$$

kjer so: E_m elastični modul kamnine, ν_m Poissonov količnik kamnine, r polmer vrtine, Δr povečanje polmera vrtine (angl. dilation) med izvlačenjem sidra, $\Delta\sigma_n$ pa so normalne napetosti, nastale med povečanjem polmera vrtine. Iz enačbe (3.3) je razvidno, da bo pri vrtinah istega polmera povečanje količine ekspanzivnega cementa privedlo do povečanja normalne napetosti $\Delta\sigma_n$, s tem pa tudi do povečanja normalne togosti K_n ; na drugi strani bo pri isti količini dodanega ekspanzivnega cementa pri vrtinah večjega polmera povečanje normalne togosti K_n manjše. Izkazalo se je, da je odpornost veznega dela sider v mehkih kamninah odvisna tudi od neravnosti površine stene vrtine oz. razpoložljivega trenja v vezi injekcijske mase z vrtino, saj se je neravnost površine stene vrtine izkazala kot glavni faktor, ki vpliva na razmikanje, s tem pa tudi na odpornost veznega dela sidra.

Nekateri raziskovalci pa so se osredotočili tudi na tematiko kratkih veznih delov pramen, pri čemer naj bo po Briaud in sod. (1998) vezni del sidra dolg le toliko, da bo omogočen prenos sidrne sile s pramena na injekcijsko maso. Opredelitve, kolikšne naj bi bile predlagane minimalne potrebne dolžine zalitja pramen pa so različne: čeprav so raziskave pokazale, da se z zalitjem pramen na dolžini 1 do 1,5 m že lahko doseže polna nosilnost (odpornost) pramen, Barley (1997a) za prakso (zaradi večje varnosti) predlaga dolžine veznega dela podsider med 2 in 3 m, Bruce in sod. (2007) predlagajo dolžine veznega dela podsider med 1,5 in 3,5 m, medtem ko proizvajalec sider Dywidag na svoji spletni strani (Multi-Stage Strand Anchor, 2009) navaja, da v splošnem tipične dolžine veznih delov pramen med 2 in 4,5 m omogočajo najbolj učinkovito porazdelitev sidrne sile v tla zaledja. Ob tem velja opozoriti, da na izbiro vezne dolžine pramen močno vpliva sama oblika oz. "deformiranost" pletenih pramen (torej ali so žice pramen gladke in ravne ali pa so v veznem delu pramena žice pramen razmaknjene oz. so pramena oblikovana v žagastem vzorcu). Barley in Bruce (2005) ugotavljata, da v kolikor so pramena lokalno deformirana, potem je prenos sidrne sile s pramena na injekcijsko maso zagotovljen že na dolžini 2 m, pri čemer naj bo v praksi najkrajša efektivna dolžina vezi nateznega elementa in dolžine veznega dela na stiku med injekcijsko maso in zemljino v območju 2 do 2,5 m. Na tako kratki dolžini veznega dela se telo injekcijske mase z nateznim elementom smatra kot monolitno, obtežbe, ki se preko tako kratke dolžine veznega dela prenaša v zemljino, pa se smatrajo kot enakomerne.

Stanje na področju sidranja in preskušanje nosilnosti sider po svetu je zajeto v številnih virih, vendar pa v nobenem od njih niso celovito obravnavani vplivni parametri, ki vplivajo na končni rezultat v obliki odpornosti sidra na izvlek. Opis praktičnega postopka preskušanj sider v kamnini, ki so ga v 1970-ih izvajali v Veliki Britaniji, navajata Littlejohn in Bruce (1977), medtem ko so po Ostermayer in Barley (2003) v istem obdobju preskušanja izvajali tudi v zemljinah. 30 letne francoske izkušnje sidranja vključno s preskušanjem nosilnosti sider so zbrane v *Recommendations* (1989). Opis izvedbe različnih tipov preskušanj in ovrednotenja rezultatov na podlagi takrat veljavnih zahtev *BS 8081*, *FIP* ter švicarskih in avstrijskih standardov v Hong Kongu podaja *GEOSPEC 1* (1997), prakso preskušanj sider po *PTI* v ZDA opisujejo Sabatini in sod. (1999), medtem ko opis preskušanja nosilnosti

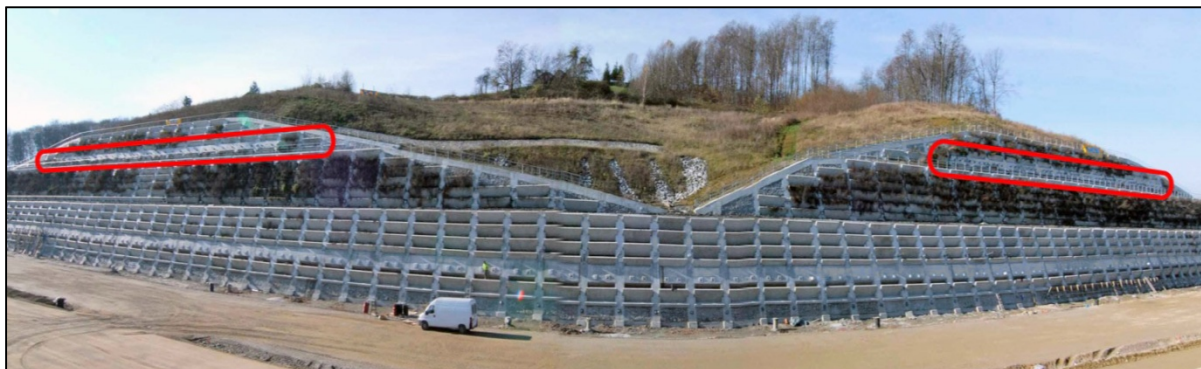
po *DIN 4125* (1990) v Nemčiji podajata Wichter in Meiniger (2000). Verzija predpisa *DIN 4125-2* (1976) je bila prva, pri kateri se je za oceno odpornosti veznega dela sider pojavila mera lezenja k . Modernejše pristope preskušanja prednapetih geotehničnih sider sta v priročniku zbrala Ostermayer in Barley (2003). Obsežnejše raziskave na vzorcu 57 začasnih paličnih, samovrtalnih in pramenskih sider so v Belgiji opravili na testnem polju Limelette (2008), pri čemer so bila sidra različnih tipov vgrajena v različne vrste zemljin. Eden od najpomembnejših razlogov za izvedbo tega projekta je bila ugotovitev avtorjev, da razpoložljivi evropski predpisi niso dovolj natančni in jasni, da bi omogočali natančno projektiranje vseh tipov sider, ki se vgrajujejo v belgijski praksi, zato so si za cilj postavili pripraviti enotne nacionalne smernice za izvedbo, projektiranje in preskušanje geotehničnih sider, ki bodo dopolnjevale evropske predpise za sidranje. Takšne ugotovitve potrjujejo tudi Merrifield in sod. (1997), ki ugotavljajo, da je v stroki prevladala ocena, da v *EN 1997-1* v poglavju "8 Sidranje" manjkajo zlasti realistične zahteve za geotehnično projektiranje sider, istočasno pa je v tem predpisu zelo malo napotkov za izvedbo preskusov nosilnosti sider, zato so ta pojasnila podana v *EN 1537*. Omeniti velja tudi tezo, da karakteristike lezenja tal sledijo logaritmični časovni funkciji, zato teoretična odpornost na izvlek zainjektiranega telesa injekcijske mase po 50 letih pravzaprav ni manjša kot po dveh letih, zaradi dolgoročne konsolidacije tal ob vezi tal s strjeno injekcijsko maso je lahko celo opazno večja, zaradi česar ni potrebe, da bi bile zahteve glede odpornosti trajnih sider na izvlek ostrejšje kot pri začasnih sidrih. Hkrati Merrifield in sod. (1997) zagovarjajo stališče, da naj bo karakteristična odpornost na izvlek telesa strjene injekcijske mase iz vrtine R_{ak} večja (ali največ enaka) karakteristični odpornosti po kablu sidra R_{ik} .

3.2 IZHODIŠČA ZA RAZLIČNE TEHNOLOŠKE ZASNOVE VEZNEGA DELA TRAJNIH PREDNAPETIH PRAMENSKIH SIDER V SKUPNEM PE OVOJU

Logar in sod. (2008) smo v sklopu razvojno-raziskovalne naloge (RRN) DARS *Racionalizacija pri uporabi trajnih geotehničnih sider (2. del)* raziskovali možnosti povečanja odpornosti na izvlek običajnih izvedb trajnih prednapetih električno izoliranih geotehničnih sider. V sklopu RRN smo z relativno enostavnimi konstrukcijskimi spremembami v notranjosti rebraste PE cevi veznega dela trajnih prednapetih električno izoliranih geotehničnih sider, ob pogoju iste skupne dolžine in dolžine veznega dela sider, kot tudi ob praktično enakih stroških izdelave sider, poskušali zasnovati, izdelati, vgraditi in preskusiti modificirana sidra, ki bi omogočala boljše karakteristike vnosa sidrne sile v tla zaledja. Na ta način bi bila ob praktično enakih stroških možna precejšnja racionalizacija brez škodljivih vplivov na zmanjšanje zanesljivosti sidranih objektov.

V obdobju 2006 do 2008 smo FGG Univerze v Ljubljani, Zavod za gradbeništvo Slovenije in GEOT, d.o.o. RRN tudi dejansko izvedli. Na podlagi našega predloga tehnološke zasnove veznih delov modificiranih veznih delov so bila modificirana sidra za preskušanje na testnem polju sestavljena v industrijskem obratu CA. TI. Carnica Tiranti, S.r.l. v Roveredo in Piano (Italija), kjer se tudi sicer sestavljajo sidra CATI-ZRMK tip RCP/D, ki so bila podlaga za zasnovo modificiranih tipov sider. Sestavljena modificirana sidra so bila dostavljena na oporni zid OZ-05 (trasa AC odseka Slivnica – Pesnica), kjer so bila vgrajena v testno polje – območje zgornje grede SBz na levem in desnem delu opornega zidu OZ-05 (slika 3.4). Modificirana sidra smo med sidra objekta vgradili tako, da so bili različni tipi sider čimbolj enakomerno porazdeljeni po obeh delih grede SBz, tako da bi bil vpliv spremenljivih pogojev tal na karakteristike nosilnosti (odpornosti) sider čim manjši. Na vgrajenih modificiranih in referenčnih sidrih smo nato izvedli preskuse nosilnosti sider, pri čemer pa smo le na manjšem delu vgrajenih sider lahko izvedli preiskavo sidra (PS) do porušitve. Na preostalih sidrih smo izvedli večstopenjske preskuse

nosilnosti (VPN), ki smo jih sicer izvedli po postopku za PS, vendar smo preskuse ob prvih znakih popuščanja veznih delov sider prekinili, s čimer smo preprečili popolno popustitev oz. uničenje veznega dela sider, nato pa smo sidra zaklinili, tako da so ostala v funkciji kot sidra objekta.



Slika 3.4: Označena dela sidranega opornega zidu OZ-05 z vgrajenimi trajnimi prednapetimi električno izoliranimi geotehničnimi sidri z modificiranimi veznimi deli (območji testnega polja).

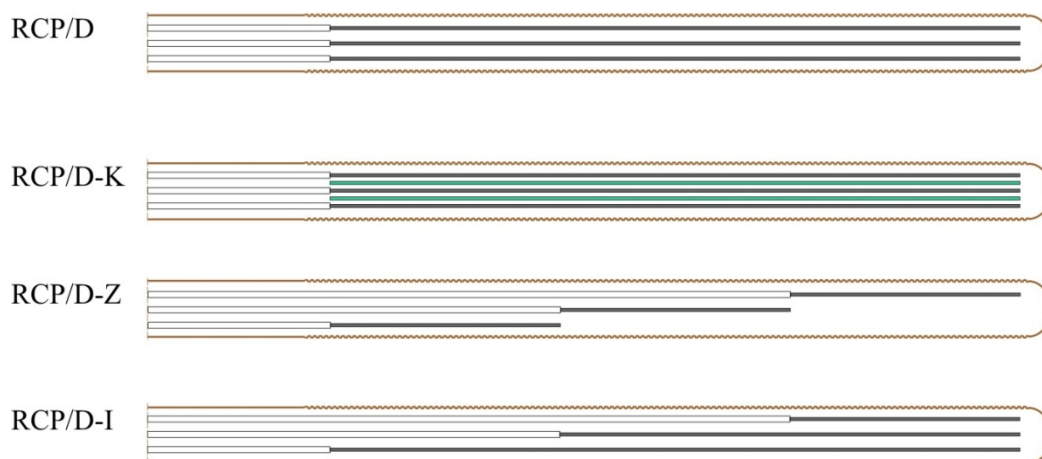
Figure 3.4: Anchored retaining wall OZ-05 with denoted regions where permanent prestressed electrically isolated ground anchors with modified bond lengths were installed (testing field regions).

Kot temeljna izhodišča za smernice oblikovanja veznih delov modificiranih sider smo uporabili zaključke prvega dela razvojno-raziskovalne naloge DARS *Racionalizacija pri uporabi trajnih geotehničnih sider*, ki so jo Logar in sod. (2004) izvedli na FGG Univerze v Ljubljani. V sklopu te naloge je bila statistično potrjena domneva, da je mera lezenja k , kot mera za odpornost veznih delov na vezi s tlemi zaledja, statistično značilno odvisna od togosti njihovih veznih delov – pri večjem številu jeklenih pramen v sidru z geometrijsko enako dolgim veznim delom, so ugotovili zmanjšanje mer lezenja k , kar pravzaprav pomeni, da večja kot je togost veznega dela sidra, manjša je mera lezenja k . Na podlagi tega spoznanja so raziskovalci predlagali naslednje možne modifikacije geotehničnih sider za povečanje togosti veznega dela sider:

- povečanje števila jeklenih pramen,
- dodatno armiranje injekcijske mase znotraj in zunaj zaščitne PE cevi ob enakem številu pramen,
- povečanje togosti injekcijske mase,
- povečanje togosti zaščitne cevi (izbira bolj toge snovi),
- skrajšanje veznega dela ter
- kombinacijo naštetih možnosti.

Kot osnovo za oblikovanje modificiranih sider smo vzeli referenčna trajna prednapeta električno izolirana pramenska sidra CATI-ZRMK tip RCP/D. Pripravili smo naslednje konceptualne zasnove veznih delov modificiranih sider (**slika 3.5**), pri katerih smo želeli s spremembami oblikovanja veznega dela sider doseči ugodnejši potek napetosti vzdolž veznega dela pramen kabla sidra, s čimer smo pričakovali ugoden vpliv na povečanje odpornosti na izvlek sider kot celote:

- tip **RCP/D-K**: sidro s povečano togostjo veznega dela z dodanimi vzdolžnimi jeklenimi elementi v veznem delu sidra,
- tip **RCP/D-Z**: večkratno sidro z medsebojno zamaknjenimi kratkimi veznimi deli podsider,
- tip **RCP/D-I**: sidro spremenljive togosti z zamaknjenimi in različno dolgimi veznimi deli podsider.



Slika 3.5: Koncept zasnove veznih delov trajnih prednapetih električno izoliranih pramenskih sider: zgoraj izhodiščni tip sidra RCP/D, spodaj modificirani tipi sider RCP/D-K (sidro povečane togosti), RCP/D-Z (večkratno sidro), RCP/D-I (sidro spremenljive togosti).

Figure 3.5: Conceptual diagrams of bond lengths of permanent prestressed electrically isolated strand anchors: above – original type of anchor RCP/D, below – modified types of anchors RCP/D-K (increased stiffness of bond length), RCP/D-Z (multiple anchor), RCP/D-I (anchor of variable stiffness).

3.3 SESTAVLJANJE TRAJNIH PREDNAPETIH PRAMENSKIH SIDER Z RAZLIČNIMI VEZNIMI DELI V SKUPNEM PE OVOJU

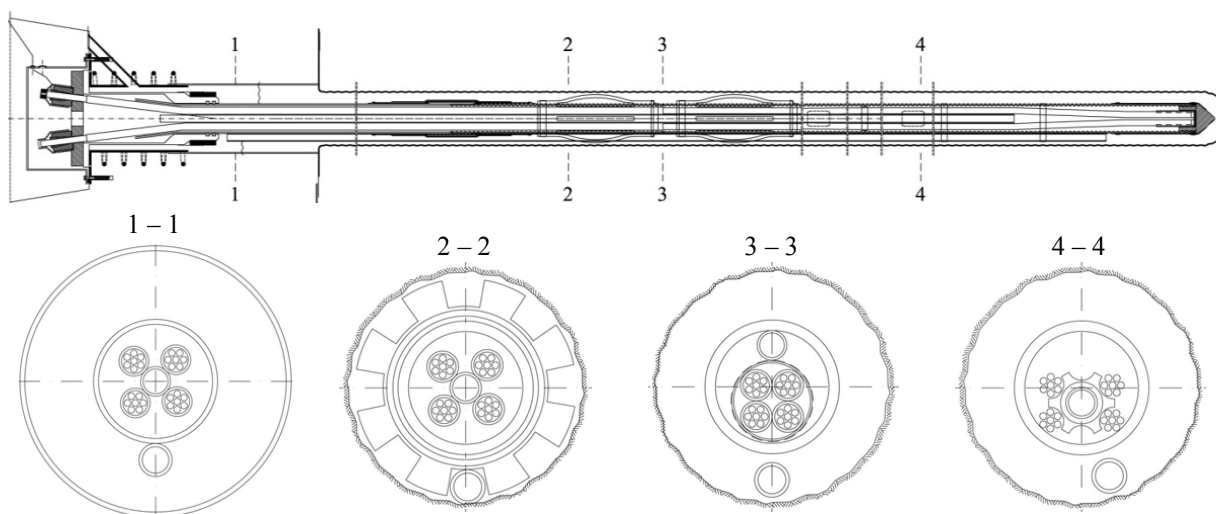
Skladno z zahtevami standarda *SIA 267/1* se sidra, na katerih se izvajajo PS, v primerjavi s sidri objekta opremijo z ojačenim jeklenim kablom (praviloma se v taka sidra vgradi dodatni pramen), s čimer preskusna sidra lahko obremenimo na preskusno silo P_{pv} , ki bo večja od pretržne sile jeklenega kabla sider objekta, če pa tega ni možno zagotoviti, pa mora preskusna sila P_{pv} vsaj za 67 % preseči predvideno silo zaklinjenja sider objekta P_0 . Sicer morajo biti preskusna sidra oblikovana kot sidra objekta, kar še zlasti velja za premera vrtine in zaščitnega ovoja sidra, protikorozijsko zaščito, injekcijsko maso kot tudi čakalni čas med injektiranjem in preskusom nosilnosti.

Pri zasnovi in oblikovanju sider za vgradnjo na testnem polju opornega zidu OZ-05 smo se prilagodili projektnim zahtevam za izvedbo sidranja na tem objektu, torej smo sidra z modificiranimi veznimi deli želeli čimbolj približati referenčnim sidrom RCP/D objekta, tako da bi lahko v nadaljevanju neposredno primerjali rezultate preskusov nosilnosti med vsemi tipi vgrajenih sider. Zasnova vseh tipov modificiranih sider je bila enaka: sidra so bila oblikovana kot 6-pramenska sidra, v katera so bila vgrajena pramena nazivnega premera 15,2 mm, nazivne površine prečnega prereza pramena 140 mm^2 iz jekla $f_{p0,1k}/f_{pk} = 1670/1860 \text{ MPa}$ z nizko relaksacijo. Skupna dolžina vseh vgrajenih sider je bila $l = 35 \text{ m}$, medtem ko je dolžina veznega dela sider znašala $l_v = 7 \text{ m}$.

3.3.1 Običajna trajna prednapeta električno izolirana pramenska sidra RCP/D

Podlaga za vse izvedbene variante modificiranih tipov sider je bilo trajno prednapeto električno izolirano sidro CATI-ZRMK tip RCP/D nazivne nosilnosti od 300 do 900 kN iz dveh do šestih pramen nazivnega premera 15,2 mm (slika 3.6). Telesa sider se v celoti sestavijo v industrijskem obratu, izjema so le zunanji distančniki, ki se na PE ovoj sidra pritrdijo pred vgradnjo v vrtino. Zaradi zagotavljanja sprejemnosti in prenosa sil v vezi jekla s cementno injekcijsko maso so pramena na dolžini veznega

dela sidra RCP/D gola. Prednapenjanje sider RCP/D tako v fazi preskušanja nosilnosti kot tudi pri zaklinjenju sider je možno izvajati le v primeru, če pramena vzdolž prostega dela sidra niso sprijeta z injekcijsko maso v notranjosti PE ovoja sidra in se lahko neovirano raztegujejo, zato se vsak pramen posebej vzdolž celotne proste dolžine namasti in oplašči s PE cevjo. Postopek namaščevanja pramen poteka na avtomatizirani napravi, pri čemer naprava preko dodajalne naprave direktno s kolutov odvzema jeklena pramena kot tudi zaščitne PE cevi za oblačenje pramen. Dodajalna naprava omogoča transport, meritev dolžine pramena in mazanje pramena s tekočim (na ustrezno temperaturo segretim) vazelinom. Da bi se v prostem delu sidra zagotovila tudi ustrezna protikorozijska zaščita žic pramena se namaščevanje pramen izvaja na razklenjenih žicah pramena, tako da se s protikorozijskim sredstvom lahko zapolni tudi votel prostor med posameznimi žicami pramena.

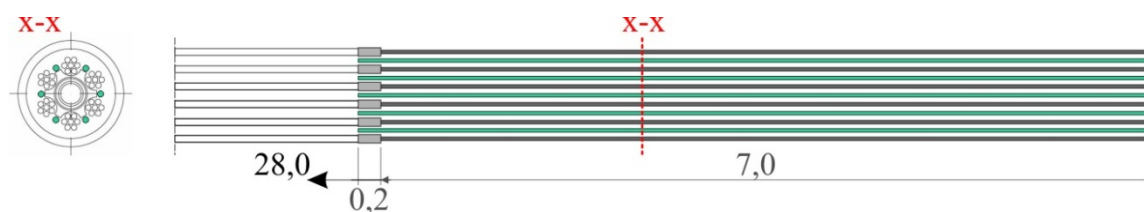


Slika 3.6: Trajno prednapeto električno izolirano 4-pramensko sidro CATI-ZRMK tip RCP/D.
Figure 3.6: Permanent prestressed electrically isolated 4-strand anchor CATI-ZRMK tip RCP/D.

Vzdolž celotne dolžine pramen so sidra RCP/D obdana z vodotesnim PE ovojem, ki se vodotesno priključuje na elemente glave sidra: v prostem delu zaščitni ovoj predstavlja gladka PE cev, v veznem delu pa, zaradi boljše vezi sidra s cementno injekcijsko maso, rebrasta PE cev. Na stiku gladke in rebraste PE zaščitne cevi je vstavljen poseben stični element, ki zagotavlja pravilno namestitvev obeh PE zaščitnih cevi in mehansko ojačitev stika, kontinuiteta PE ovoja na tem mestu pa je zagotovljena z zatesnitvijo s termokrčno manšeto. V notranjosti sidra je na stiku med prostim in veznim delom sidra izveden izolacijski stik tako vsakega pramena kot tudi sidra kot celote. V območju glave sidra so jekleni deli sidra od sidrane konstrukcije ločeni s PE tesnilno izolacijskim tulcem ter prekriti z zaščitno kapo, ki prekriva vse jeklene dele glave sidra. Tako oblikovanje sidra zagotavlja ločitev vseh nosilnih jeklenih delov sidra v smislu celovite protikorozijske zaščite od agresivnih vplivov okolja, kar vključuje tudi električno izoliranost od morebitnih blodečih tokov, kadarkoli pa je možna tudi kontrola stanja zaščitnega PE ovoja sidra. Sidra RCP/D spadajo med sidra z enojno plastično cevjo, ki je edini zaščitni ovoj trajnega sidra, za katera moramo skladno z *EN 1537* s preskusom na mestu vgradnje z meritvijo električne upornosti preveriti nepoškodovanost zaščitnega ovoja vzdolž celotne dolžine sidra, s čimer se preverja izpolnjenost zahtev celovite protikorozijske zaščite. Na vsakem vgrajenem sidru se pri 500 V enosmernega toka med jeklenimi prameni oz. glavo sidra in tlemi izmeri izolacijsko upornost R_1 . Neoporečnost celotnega zaščitnega ovoja sidra kakor tudi splošna električna izoliranost sidra od tal in sidrane konstrukcije je dokazana, če je izmerjena izolacijska upornost $R_1 \geq 0,1 \text{ M}\Omega$.

3.3.2 Sidra s povečano togostjo veznega dela RCP/D-K

Kot enega od pomembnih zaključkov RRN DARS *Racionalizacija pri uporabi trajnih geotehničnih sider* Logar in sod. (2004) navajajo statistično potrjeno domnevo, da je mera lezenja k statistično značilno odvisna od togosti veznega dela sidra, torej se pri večjem številu jeklenih pramen v sidru z enako dolgim veznim delom zmanjša mera lezenja k (in obratno manjša kot je togost veznega dela sidra, večja je mera lezenja k). To ugotovitev smo uporabili kot izhodišče za oblikovanje veznega dela sidra RCP/D-K (slika 3.7): osnovni koncept tega tipa sidra je identičen osnovnemu tipu sidra RCP/D, s to razliko, da smo veznemu delu sidra RCP/D-K osno togost povečali tako, da smo v prazne prostore med šest pramen $\varnothing 15,2$ mm vzdolž celotne dolžine veznega dela sidra namestili dodatne jeklene žice.



Slika 3.7: Shema veznega dela modificiranega prednapetega geotehničnega sidra RCP/D-K.
Figure 3.7: Outline of the bond length of a modified prestressed ground anchor of type RCP/D-K.



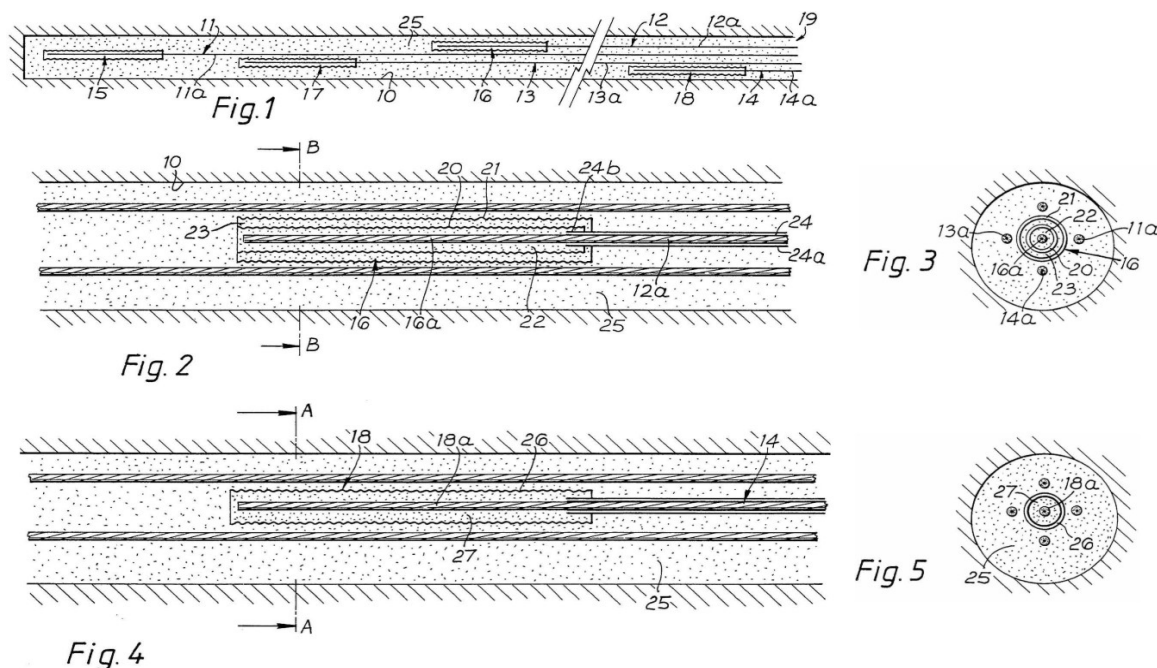
Slika 3.8: Detajla izdelave modificiranega prednapetega geotehničnega sidra RCP/D-K: potek žic med prameni (levo), zgornji del veznega dela sidra RCP/D-K s tesnilnim stikom (desno).
Figure 3.8: Details of production of a modified prestressed ground anchor (type RCP/D-K): positioning of wires between strands (left), upper part of bond length of the anchor RCP/D-K with packing connection (right).

Prvotna ideja zasnove povečanja togosti veznega dela sidra je bila, da bi v tem delu sidra vložili šest pramen $\varnothing 12,5$ mm, vendar smo to idejo opustili iz dveh razlogov: pramen $\varnothing 12,5$ mm proizvajalec sidra ni imel na zalogi, saj jih ne uporablja pri redni proizvodnji sider, zato bi njihova nabava in dobava vzela precej časa, ki pa ga zaradi kratkega roka za dokončane RRN nismo imeli, pojavil pa se je tudi pomislek, da bi bil votli prostor znotraj rebraste PE cevi preveč zapolnjen in bi pri injektiranju notranjosti PE ovoja sidra lahko prišlo do nepopolne zapolnitve votlega prostora. Namesto tega smo se odločili, da bomo osno togost veznega dela sider RCP/D-K povečali z dodajanjem šestih osrednjih žic $\varnothing 5$ mm, dobljenih z razpletanjem pramen $\varnothing 15,2$ mm, ki smo jih nato v območju veznega dela sidra vstavili na

prazna mesta med pramena. Krojenje pramen in sestavljanje sider RCP/D-K je potekalo povsem na identičen način, kot se vrši redna proizvodnja sider RCP/D, saj so bili vsi prosti deli pramen dolgi 28 m, vezni deli pa 7 m. Edina razlika glede na sidra RCP/D je bilo dodajanje jeklenih žic $\varnothing 5$ mm v prazne prostore veznega dela sidra med pramena (sliki 3.7 in 3.8 levo), pri čemer smo te žice podaljšali še v območje stika prosti-vezni del sidra (slika 3.8 desno).

3.3.3 Večkratna sidra z zamaknjenimi veznimi deli RCP/D-Z

Že v poglavju 3.1 smo zapisali, da je za običajna natezna trenjska sidra na vseh ravneh sidrskih sil značilna neenakomerna porazdelitev strižnih napetosti vzdolž veznega dela sider, pri čemer dejanski potek napetosti vzdolž veznega dela proti konici sidra zavisi od karakteristik tal in togosti kabla sidra (Limelette, 2008). Za doseganje boljše izkoriščenosti veznega dela sidra je Barley na osnovi rezultatov opravljenih raziskav predlagal koncept sidra, ki omogoča prenos sidrne sile na več krajših veznih delov, kjer bo učinkovito mobilizirana in-situ nosilnost tal in na katerih bo mehanizem progresivnega popuščanja zelo omejen, posledično pa se bo povečala nosilnost sidra. Leta 1990 je Barley patentiral koncept večkratnega sidra SBMA – *Single Bore Multiple Anchor System* (slika 3.9), za katerega je značilno, da se v isto vrtino vgradi več samostojnih enot sider (podsider), ki pa medsebojno niso povezane – vsaka enota sidra ima svoja pramena, svoj vezni del in svoj protikorozijski zaščitni ovoj, pri čemer pa so vezni deli podsider zaporedno razporejeni po območju vrtine veznega dela sidra. Takšna sidra se pogosto uporabljajo v vezljivih zemljinah in tleh heterogene sestave (Ostermayer in Barley, 2003).



Slika 3.9: Večkratno sidro SBMA (izumitelj Barley, A.D., patent številka EP 0 356 215 A2, datum objave prijave 28.02.1990).

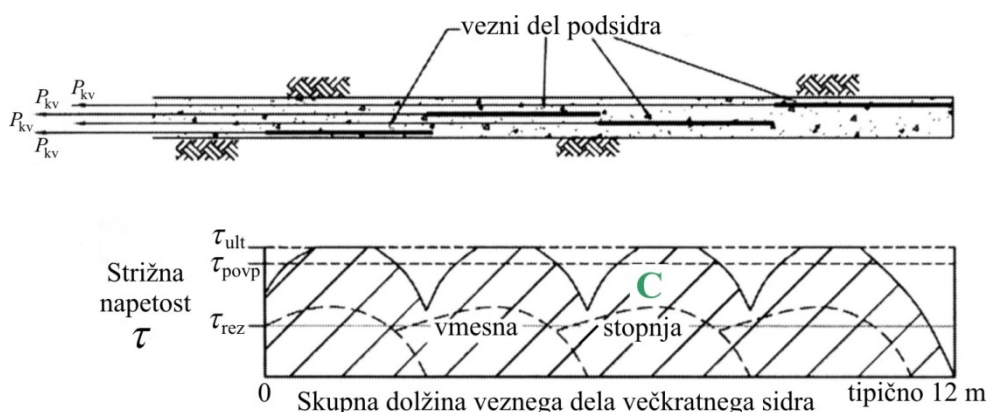
Figure 3.9: A Single Bore Multiple Anchor (inventor Barley, A.D., patent number EP 0 356 215 A2, date of publication of application 28.02.1990).

Slabost sider SBMA se skriva v dejstvu, da za vgradnjo sidra sestavljenega iz večih samostojnih podsider potrebujemo vrtino dovolj velikega premera, da omogoča vstavitve in zalitje vseh samostojnih veznih delov podsider, kar posledično pomeni potrebne večje premere vrtin, s tem pa tudi večje stroške

vrtnja. Ker so vezni deli podsider porazdeljeni po veznem delu sidra, so dolžine prostih delov enot sider različne, zato mora biti vsako podsidro opremljeno s svojo napenjalko, saj bodo pri hkratnem napenjanju napenjalk, vezanih v skupni hidravlični sistem, zaradi različnih dolžin prostih delov, izvlečki pramen podsider pri istih silah različni. Zaradi tega je vrednotenje rezultatov preskusov nosilnosti večkratnih sider SBMA še posebej zahtevno, saj sočasno preskušamo nosilnost vseh podsider večkratnega sidra. Pri opisanem konceptu večkratnega sidra SBMA je izredno težko, če že ne nemogoče, zagotoviti električno izoliranost jeklenih delov sidra od okolice.

Bistvena prednost združevanja podsider v skupno sidro je, da se vsak vezni del podsider nahaja v svojem delu vrtine, zato je porazdelitev napetosti vzdolž kratkih veznih delov podsider enakomernejša, izkoristek nosilnosti tal pa boljši. Po drugi strani pri konceptu večkratnih sider SBMA, za razliko od običajnih sider, pri katerih so vezne dolžine omejene na 8 do 10 m, omejitev skupne dolžine veznega dela sidra SBMA ni več smiselna. Teoretično gledano bi bilo torej najbolj izkoriščeno večkratno sidro SBMA sestavljeno iz velikega števila podsider z relativno kratkimi veznimi deli, vendar je pri določanju števila podsider in njihovih odpornosti vseeno treba upoštevati določena dejstva:

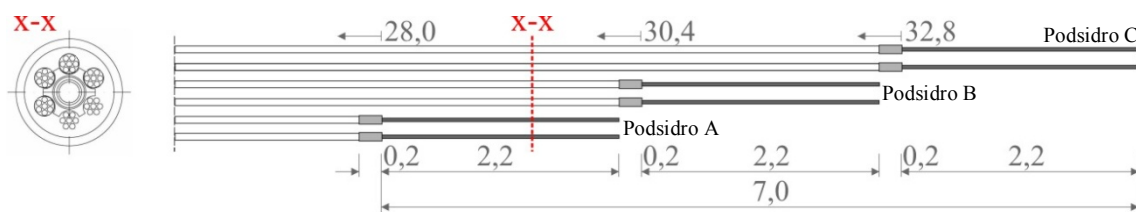
- Pri vgradnji večkratnih sider SBMA nam število podsider omejuje razpoložljivi prostor. V notranjosti zaledja je to premer vrtine, v katerega je možno vstaviti le omejeno število podsider, ki morajo biti pri trajnih različicah sider oblečena v zaščitne cevi. Drugo omejitev predstavlja območje glave sidra, v katerem moramo izvesti ločeno napenjanje in zaklinjenje podsider.
- Kljub temu, da je teoretično gledano podsidro najbolj učinkovito pri oblikovanju kratkega veznega dela, mora biti vez pramena z injekcijsko maso dovolj dolga, da omogoča varen prenos sidrne sile iz pramena preko injekcijske mase v tla zaledja. Barley (1997a) sicer ugotavlja, da se z zalitjem pramen na dolžini 1 do 1,5 m sicer že lahko doseže polna nosilnost (odpornost) pramen, vendar pa zaradi večje varnosti predlaga, da dolžine veznih delov podsider v praksi znašajo med 2 in 3 m.
- Pri zaklinjenju večkratnega sidra vsako podsidro prevzema enak delež sile sidra. V kolikor kasneje med življenjsko dobo sidranja pride do premikov območja zaledja za sidranim objektom, bodo prirastki sil v posameznih podsidrih zaradi različnih prostih dolžin različni. V takih primerih so posebej izpostavljena podsidra s kratkimi prostimi deli, čeprav pri večkratnih sidrih porušitev veznega dela enega podsidera samo po sebi še ne pomeni tudi porušitve sidra kot celote.
- Pri večkratnih sidrih se pojavljajo lokalni vplivi prehoda prostih dolžin podsider, katerih vezni deli so vgrajeni globlje, na odpornost veznih delov podsider, vgrajenih bližje glavi sidra. Posledica delovanja mehanizmov prenosa natezne sile s pramen na injekcijsko maso in iz injekcijske mase na zaščitne cevi je pojav razpok v injekcijski masi, ki so posledica nizke natezne trdnosti cementne injekcijske mase. Tla zaledja sicer objemajo injekcijsko maso in preprečujejo valjasti cevi strjene injekcijske mase, da bi se pri nizkih silah razcepila, vendar pa prisotnost številnih prostih delov pramen, ki potekajo v bližini veznega dela enega podsidera predstavlja precejšnjo oslabitev valjaste cevi strjene injekcijske mase in zmanjšuje učinkovito objetje. V slabših tleh (zemljine), kjer je učinkovitost objetja omejena, bi bilo treba v območju teh prehodov izvesti določene ojačitve, ki bi omejile možnost nastanka razpok v injekcijski masi. Posledica teh omejitev je nekoliko manjša učinkovitost veznih delov sider, vendar pa je prispevek posameznih krajših veznih delov k nosilnosti sidra še vedno velik in presega nosilnost klasičnega sidra z veznim delom iste dolžine. Večkratno sidro s štirimi podsidri z dolžinami veznih delov po 3 m (slika 3.10) ima dvakratno odpornost na izvlek običajnega 12 m sidra, pri čemer pa se površina pod diagramom strižnih napetosti "C" zelo približa teoretično seštetim odpornostim podsider (površina $4 \times B$) na sliki 3.2(b), nedvomno pa je bistveno večja od odpornosti običajnega sidra (površina A) prikazanega na sliki 3.2(a) (Barley in Ostermayer, 2003).



Slika 3.10: Potek kontaktnih napetosti vzdolž veznega dela večkratnega sidra dolžine 12 m sestavljenega iz štirih podsider (po Barley in Ostermayer, 2003).

Figure 3.10: Development of bond stress distribution along a four unit single bore multiple anchor containing within a 12 m fixed length (after Barley and Ostermayer, 2003).

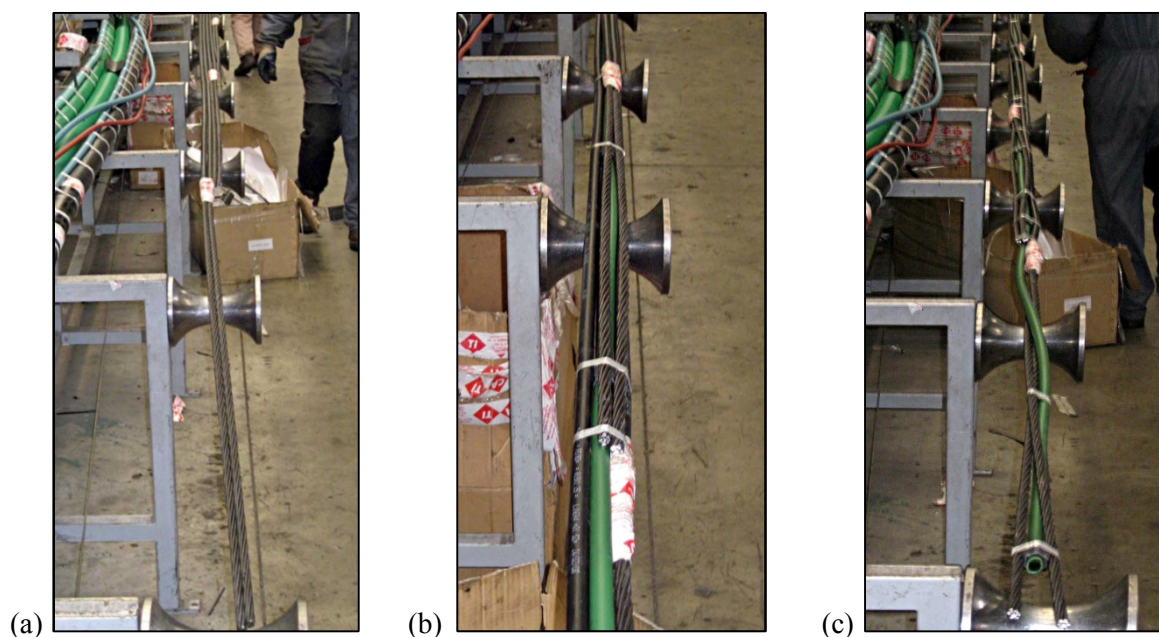
Pri zasnovi koncepta **večkratnega sidra** RCP/D-Z smo želeli izkoristiti nedvomne prednosti bolj enakomerno porazdeljenih napetosti vzdolž veznega dela večkratnega sidra glede na vezni del običajnega sidra, pri čemer je bil ključni cilj podsidera vgraditi znotraj električno izoliranega zaščitnega PE ovoja trajnega prednapetega sidra, s čimer bi izkoristili prednosti obeh sistemov sidranja, torej tako v smislu nosilnosti kot tudi v smislu trajnosti. Na sidru RCP/D (slika 3.6) smo spremenili vezni del sidra tako, da smo kabel sidra razdelili na tri podsidera s po dvema pramenoma, katerih dolžina golih delov v veznem delu podsider je znašala 2,2 m. Dolžine veznih delov posameznih podsider smo minimalno zamaknili za 0,2 m, tako smo dobili sidro skupne predvidene dolžine veznega dela sidra 7 m (slika 3.11).



Slika 3.11: Shema veznega dela modificiranega prednapetega geotehničnega sidra RCP/D-Z.

Figure 3.11: Outline of the bond length of a modified prestressed ground anchor of type RCP/D-Z.

Proizvodnja sider RCP/D-Z je potekala na analogen način proizvodnji sider RCP/D, pri čemer se je bistvena razlika nanašala na krojenje in namaščevanje pramen. Skladno z zasnovo na sliki 3.11 smo vezne dele vseh pramen podsider oblikovali tako, da je dolžina golih pramen znašala 2,2 m. Da bi dosegli zamike veznih delov podsider, smo morali temu prilagoditi prosto dolžino pramen, ki je znašala 28 m (pramena najkrajšega podsidera A), 30,4 m in 32,8 m (pramena najdaljšega podsidera C). Na vseh pramenih je bil izdelan tesnilni stik na prehodu veznega v prosti del pramena. Za dva pramena, združena v podsidero, smo izdelali še skupni tesnilni stik po analognem detajlu, kot se to izvaja za vsa pramena sidra RCP/D, pri čemer so tesnilni stiki vseh podsider razvidni iz slike 3.12(a). Na sosednji sliki 3.12(b) je prikazan detajl stika podsidera, iz katerega je razvidno, da takšen stik predstavlja mehko mesto znotraj injekcijske mase v PE ovoju sidra, kar je bil tudi razlog, da smo vezne dele podsider načrtovano zamaknili za razdaljo 0,2 m (slika 3.11). Na sliki 3.12(c) pa je prikazan končno oblikovan vezni del sidra RCP/D-Z z vsemi nameščenimi komponentami pred navlačenjem zaščitne rebraste PE cevi.

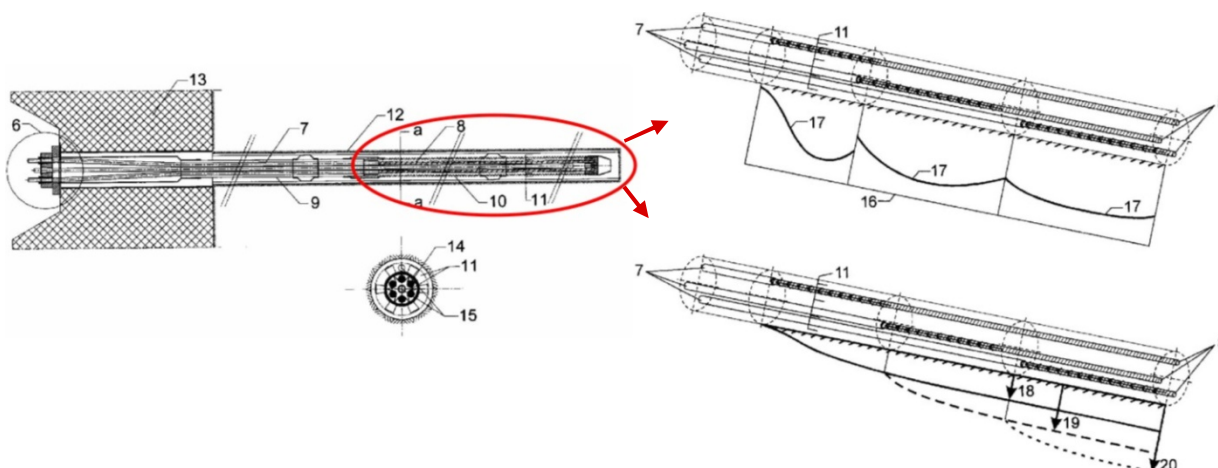


Slika 3.12: Izdelava modificiranega prednapetega geotehničnega sidra RCP/D-Z: (a) oblikovani vezni deli podsider, (b) detajl tesnilnega stika podsider, (c) vezni del sidra RCP/D-Z pred namestitvijo rebraste PE cevi.

Figure 3.12: Production of a modified prestressed ground anchor of type RCP/D-Z: (a) formed lengths of anchor units, (b) detail view of an anchor unit packing connection, (c) bond length of the RCP/D-Z anchor before installation of corrugated PE duct.

3.3.4 Sidra spremenljive togosti veznega dela RCP/D-I

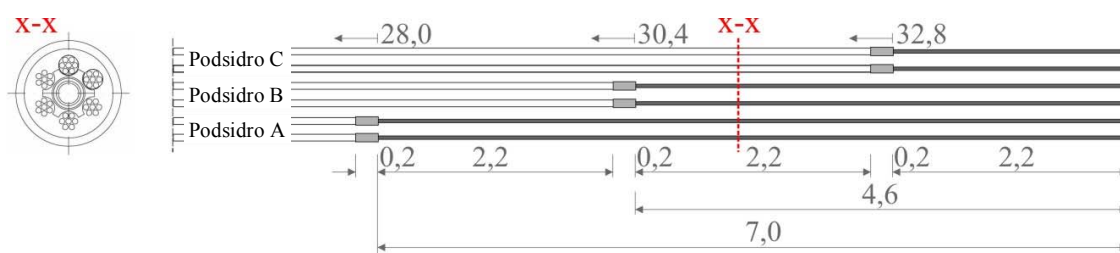
Logična kombinacija tipov RCP/D-K in RCP/D-Z je sidro, ki bi v istem veznem delu vključevalo prednosti obeh sistemov modificiranih sider: na eni strani bi tako sidro omogočalo učinkovit porazdeljen vnos sile v tla zaledja preko kratkega območja veznega dela pramen, medtem ko bi spodnji del istega pramena lahko služil za povečanje togosti veznega dela sidra. Izkazalo se, da je takšno idejo koncepta sidra kot **prednapeto geotehnično sidro spremenljive togosti** že leta 2004 patentiral Škrabl (slika 3.13). Po patentni prijavi je prednapeto geotehnično sidro spremenljive togosti namenjeno reševanju problematike sidranja objektov v slabših geotehničnih pogojih (zemljinah in krških hribinah), kjer je učinkovitost sidranja z običajnimi sidri (katerih dolžine vseh pramenov v prostem in veznem delu so enake) zaradi velikih koncentracij napetosti v začetnem delu veznega dela sider močno omejena. Večkratno sidro SBMA Barleya sicer omogoča boljši izkoristek nosilnosti tal vzdolž vrtine, vendar pa se zaradi enake togosti vzdolž vrtine še vedno pojavljajo večje koncentracije napetosti. Večkratna sidra SBMA so kompleksnejša in ekonomsko manj spremenljiva v primerih vgradnje velikega števila različnih podsider, pri čemer je za vsako podsidero treba zagotoviti ločeno primarno injektiranje kot tudi zagotavljanje in kontroliranje protikorozijske zaščite, medtem ko sidro spremenljive togosti na drugi strani na nek način predstavlja sistem zaporednih in med sabo povezanih geotehničnih sider. Po patentu so lastnosti sidra spremenljive togosti (nosilnost, ekonomičnost in trajnost) boljše kot pri sidru SBMA, pri čemer izumitelj v svoji patentni prijavi predvideva, da se za doseganje optimalnih učinkov v prvo stopnjo veznega dela sidra namesti manj pramen kot v ostale stopnje veznega dela sidra, obenem pa glede na tip tal predlaga število pramenov po posameznih stopnjah. Objekti sidrani s sidri, katerih vezni deli so razporejeni v različnih globinah tal, so v primerjavi z izvedbo običajnih sider na majhnih medsebojnih razdaljah (nevarnost odpovedi vseh sider hkrati) varnejši in zanesljivejši.



Slika 3.13: Prednapeto geotehnično sidro spremenljive togosti (izumitelj Škrabl, S., patent številka 21320, datum objave prijave 30.04.2004).

Figure 3.13: A prestressed ground anchor of variable stiffness (inventor Škrabl, S., patent number 21320, date of publication of application 30.04.2004).

Tip sidra RCP/D-I, kot smo označili sidro spremenljive togosti, smo zasnovali na podlagi tehnoloških izhodišč vseh modificiranih tipov sider (6-pramenska sidra, dolžina veznega dela $l_v = 7$ m), pri čemer smo v največji možni meri vključili koncept sidra spremenljive togosti. Zaradi vnaprej določenega števila pramen smo se odločili, da bodo vsa podsidera sestavljena iz po dveh pramen (2-2-2), saj je bila taka razdelitev po naši oceni boljša rešitev od razdelitve pramen po podsiderih 1-2-3 (edina možna porazdelitev pramen dosledno po patentni prijavi). Modificirani tip sidra RCP/D-I smo zasnovali tako, da smo običajno sidro RCP/D, predstavljeno na [sliki 3.6](#), spremenili tako, da smo kabel sidra razdelili na tri podsidera s po dvema pramenoma, katerih dolžina golih pramen v veznem delu podsider je znašala: 2,2 m (podsidro A), 4,6 m (podsidro B) in 7 m (podsidro C), odgovarjajoče dolžine prostih delov pramen pa so bile 32,8 m, 30,4 m in 28 m ([slika 3.14](#)). Po razpoložljivih podatkih so bila sidra RCP/D-I preskušena na testnem polju opornega zidu OZ-05 prvi preskus patentiranega sidra spremenljive togosti v praksi.

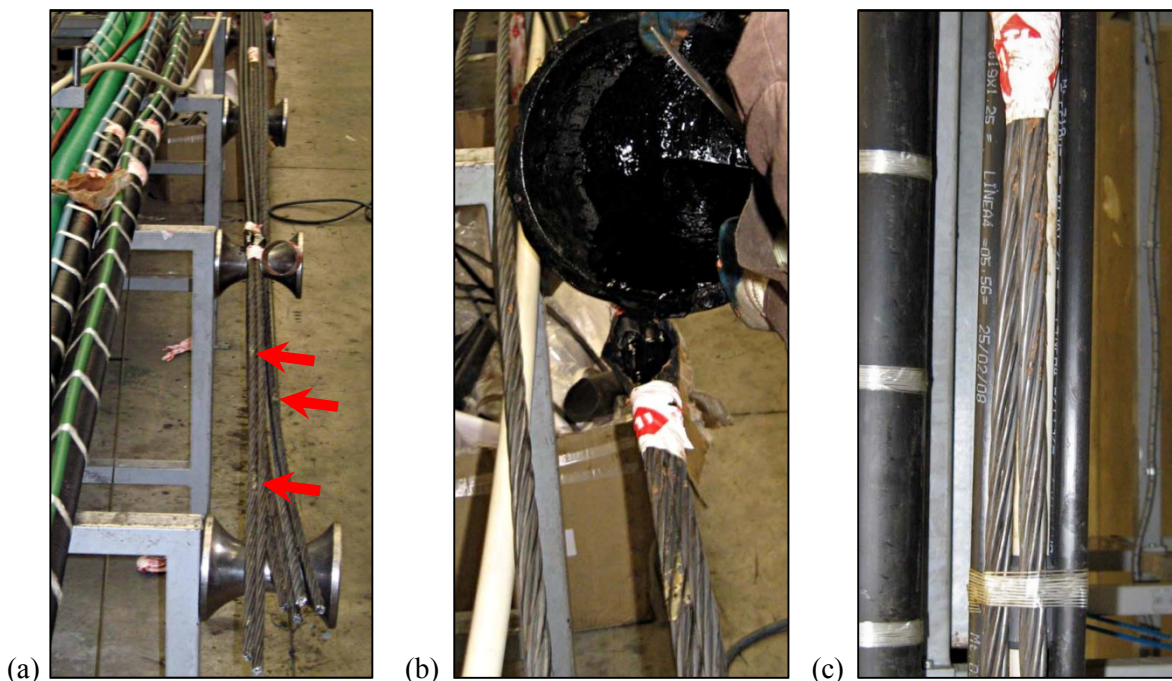


Slika 3.14: Shema veznega dela modificiranega prednapetega geotehničnega sidra RCP/D-I.

Figure 3.14: Outline of the bond length of a modified prestressed ground anchor of type RCP/D-I.

Proizvodnja sider RCP/D-I je potekala na analogen način proizvodnji sider RCP/D-Z, pri čemer so bile dolžine prostih delov pramen podsider identične kot pri sidrih RCP/D-Z (28 m, 30,4 m in 32,8 m), razlika pa je bila v dolžini golih pramen v veznih delih podsider. Pri sidrih RCP/D-Z so bile dolžine vseh veznih delov golih pramen enake (2,2 m), medtem ko so bile pri sidrih RCP/D-I različne na način, da so se vse podaljševale od konca prostega dela do skupne dolžine 35 m (torej so znašale v odvisnosti od dolžine prostega dela 7 m pri podsideru A, 4,6 m pri podsideru B oz. 2,2 m pri podsideru C). Oblikovana pramena podsider so razvidna iz fotografije na [sliki 3.15\(a\)](#), na kateri pa je opaziti tudi z vazelinom

lokalno kontaminirana mesta golih pramen. V času naše prisotnosti v proizvodnji sider je proizvajalec sestavil prvo prototipno sidro tipa RCP/D-I, pri čemer smo opazili, da je do nezaželene kontaminacije pramen prišlo v avtomatizirani fazi postopka namaščevanja in krojenja pramen. Na [sliki 3.15\(b\)](#) je prikazan detajl zalivanja stika prosti-vezni del podsidra s tesnilno maso, medtem ko je na skrajno desni [sliki 3.15\(c\)](#) prikazan detajl poteka pramen v zgornjem območju veznega dela podsidra.



Slika 3.15: Izdelava modificiranega prednapetega geotehničnega sidra RCP/D-I: (a) oblikovani vezni deli podsider, na golih pramenih so lokalno vidni sledovi vazelina, (b) polnjenje tesnilnega stika podsidra, (c) detajl poteka pramen v zgornjem območju veznega dela podsidra.

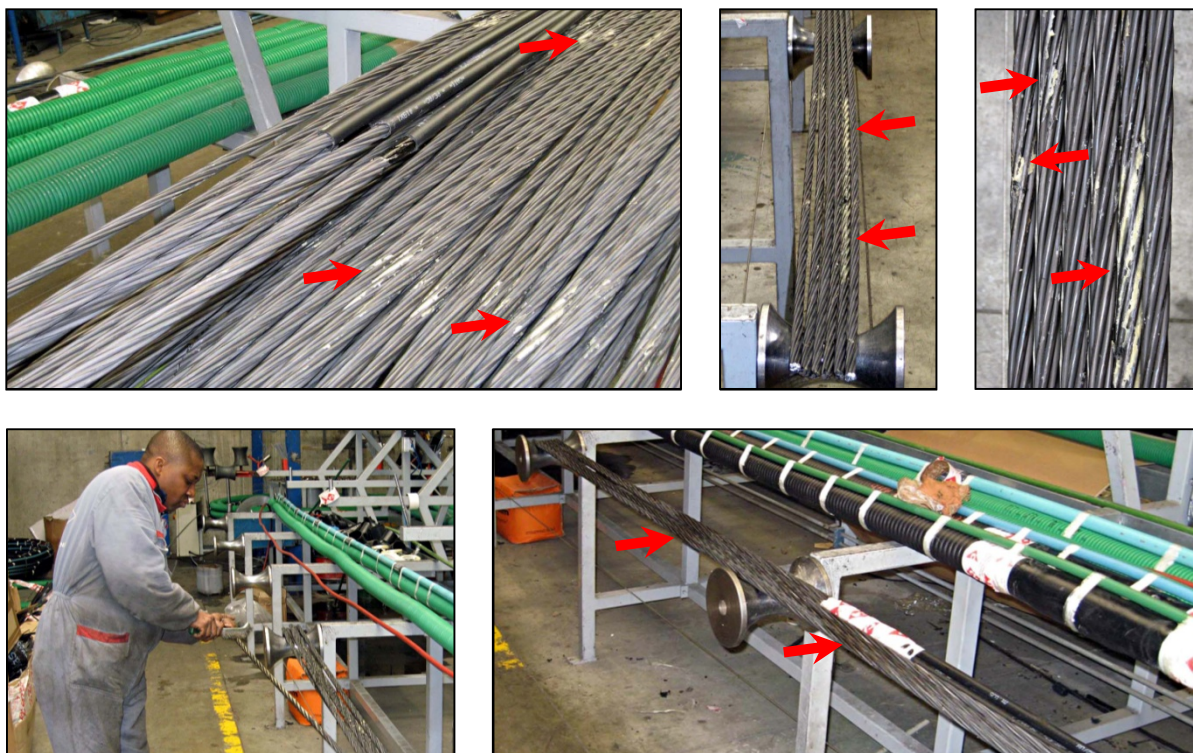
Figure 3.15: Production of a modified prestressed ground anchor of the type RCP/D-I: (a) formed lengths of anchor units, locally visible traces of vaseline on bare strands, (b) filling of packing connection of an anchor unit, (c) detail view of strand positioning in the upper part of bond length of an anchor unit.

3.3.5 Lokalna kontaminacija pramen v veznem delu sider z vazelinom

Za namaščevanje in oblačenje pramen v prostem delu sider, kot tudi za razrez pramen na prave dolžine proizvajalec uporablja avtomatizirano napravo, v sklopu katere so izdelane posebne oprijemalne čeljusti, ki v posameznih fazah proizvodnje oprimejo pramen, pri čemer pa je naprava zasnovana in izdelana tako, da iste čeljusti oprimejo tako čist (gol) pramen veznega dela, kot tudi namaščen pramen prostega dela.

V primerih intenzivnega odvijanja proizvodnega procesa, ko operater ne uspe dovolj pogosto očistiti oprijemalne čeljusti stroja, se ostanki vazelina sprva nabirajo na čeljustih, nato pa zdrsnejo s čeljusti na pramen, ki se nahaja neposredno pod čeljustmi. V kolikor do tega pride med vtiskanjem čistih (golih) pramen veznega dela skozi ovojno PE cev za oblačenje pramen prostega dela sidra, se ti ostanki razmažejo po golih pramenih, kar v tem primeru povzroči lokalno kontaminacijo pramena v veznem delu sidra. Takšen pojav smo opazili med proizvodnjo prototipov modificiranih sider RCP/D-K, RCP/D-Z in RCP/D-I ([slika 3.16 zgoraj](#)). Pred sestavljanjem sidra je proizvajalec sicer poskušal madeže vazelina

odstraniti z drgnjenjem z žično krtačo predhodno pomočeno v razredčilo (slika 3.16 spodaj levo), kar mu je sicer večinoma uspelo, vendar pa po tem postopku čiščenja površine pramen ni uspel povrniti v prvotno intaktno stanje, kar je razvidno tudi iz slike 3.16 spodaj desno. S takšno metodo odstranjevanja vazelina je možna le groba odstranitev vazelina s površine pramena, medtem ko se preostali delež razmaže po površini zunanjih spiralnih žic, deloma pa se vtisne v prazen prostor med žice pramena.

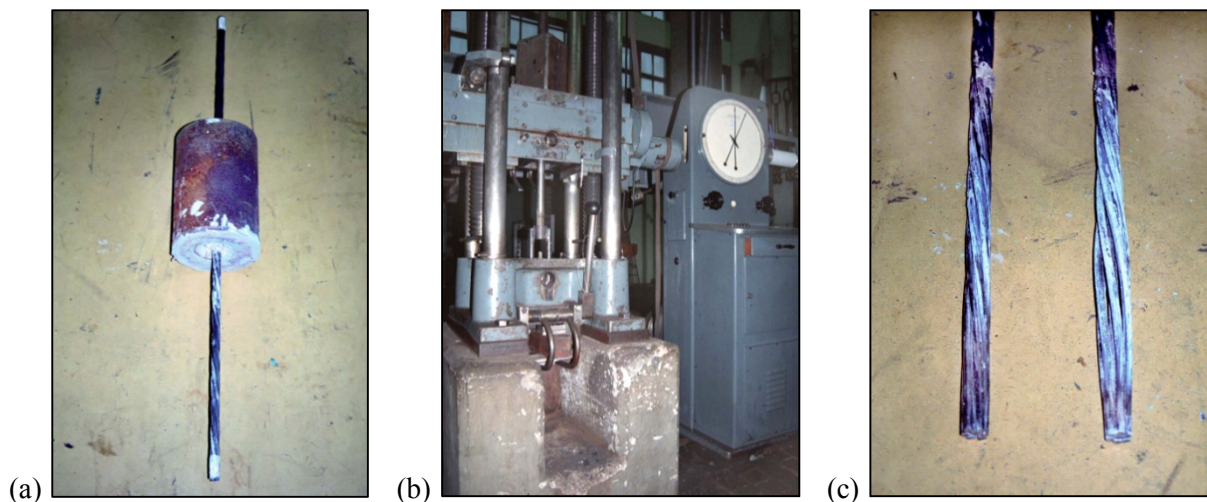


Slika 3.16: Kontaminacija golih pramen veznega dela sider z vazelinom (zgoraj), mehansko čiščenje madežev vazelina s krtačo in razredčilom (spodaj levo), sledovi čiščenja vazelina z golih pramen veznega dela sidra RCP/D-I (spodaj desno).

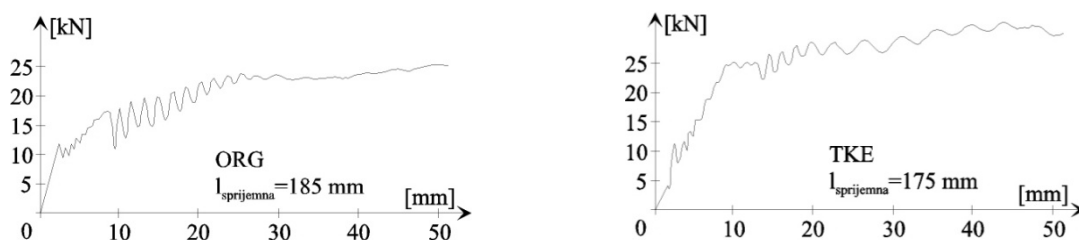
Figure 3.16: Bare strands of anchors' bond length smeared with vaseline (above), mechanical cleaning of vaseline stains with brush and diluter (below left), traces of removed vaseline from bare strands of bond length of an RCP/D-I anchor (below right).

Littlejohn (1993) navaja, da na odpornost vezi jeklenih pramen s cementno injekcijsko maso pomembno vpliva stanje površine pramen, še posebej, če se na stiku obeh materialov nahajajo nevezani materiali ali maziva, zato površina pramen kabla sidra ne sme biti kontaminirana z nevezanimi korozijskimi produkti (angl. loose rust), kakršnimikoli nečistočami, mastjo ali drugim mazivom. Tudi naše dosedanje izkušnje kažejo, da je namaščeno površino pramena izredno težko v celoti očistiti in spraviti v prvotno čisto stanje – pred leti smo v sklopu potrditve postopka razmaščevanja sicer tovarniško namaščenega pramena ugotavljali uspešnost postopka razmaščevanja. Razmastitev pramena je bila izvedena na posebni napravi, ki je razklenila žice pramena, preko katerega je pod tlakom 50 barov brizgala vroča voda, segreti na 90 °C, pri čemer pa je bil vzorec pramena, za doseganje boljšega učinka razmastitve, očiščen dvakrat. Iz razmaščenega pramena smo odrezali dva vzorca, na katerih smo nato v laboratoriju ugotavljali uspešnost razmastitve: prvi vzorec z oznako ORG smo preskusili v odvzetem stanju, medtem ko smo drugi vzorec z oznako TKE temeljito razmastili s tetrakloretilenom. Oba vzorca smo v vzdolžni smeri centrično namestili v jeklen valj \varnothing 160 mm z debelino stene 5 mm in ju zalili s

cementno injekcijsko maso – vzorec ORG na dolžini 185 mm, popolnoma očiščeni vzorec TKE pa na dolžini 175 mm (slika 3.17(a)). Oba vzorca smo v trgalnem stroju z isto hitrostjo obremenjevali do porušitve (slika 3.17(b)), pri čemer smo zabeležili diagram sila-deformacija (slika 3.18).



Slika 3.17: Preskušanje uspešnosti razmaščevanja jeklenega pramena: (a) popolnoma razmaščen vzorec TKE zalit z injekcijsko maso v jeklen valj, (b) vzorec pramena v trgalnem stroju pripravljen za preskus, (c) primerjava stanja obeh vzorcev pramen po izvleku (levo vzorec ORG, desno vzorec TKE).
Figure 3.17: Efficiency testing of degreasing of steel strand: (a) completely degreased sample TKE grouted within steel cylinder, (b) a strand sample in the tensile testing machine prepared for testing, (c) comparison of both samples after pull-out (sample ORG – left, sample TKE – right).



Slika 3.18: Diagrama laboratorijskih izvlečnih preskusov vzorcev razmaščenega pramena zalitega v injekcijski masi: vzorec ORG v osnovno očiščenem stanju (levo), vzorec TKE popolnoma razmaščen s tetrakloretilenom (desno).

Figure 3.18: Diagrams of laboratory pull-out tests of grouted degreased strand samples: sample ORG in elementary degreased condition (left), sample TKE completely degreased with tetrachloroethylene (right).

Ugotovili smo, da do zdrsa na popolnoma očiščenem vzorcu TKE pride pri sili približno 25 kN, medtem ko do istega pojava pri intaktnem vzorcu ORG pride pri sili približno 17,5 kN, kar je le 70 % sile dosežene pri popolnoma očiščenem vzorcu TKE. Če na diagramih zanemarimo začetni del prilagajanja sistema ob vnosu sile, je nagib diagrama vzorca TKE pred doseženo silo zdrsa večja od vzorca ORG. Na sliki 3.17(c) sta prikazana oba vzorca pramen po popolnem izvleku iz jeklenih valjev zapolnjenih z injekcijsko maso, pri čemer je na levem delu fotografije pramen ORG, na katerem je manjši ostanek strjenega cementnega kamna glede na pramen TKE, prav tako pa je na slednjem zaradi boljše sprijemnosti z injekcijsko maso prišlo tudi do začetka razpletanja žic pramena.

Navedeni primer razmaščevanja ni bil identičen razmaščevanju s krtačo in razredčilom, prikazanem na [sliki 3.16 spodaj levo](#), vendar pa lahko na podlagi preostalih madežev na fotografiji [sliki 3.16 spodaj desno](#) utemeljeno sklepamo, da razmastitev madežev z golih pramen veznega dela sidra v tem primeru zagotovo ni popolnoma uspela, kar posledično škodljivo vpliva tudi na sprjem injekcijske mase in pramen v notranjosti PE ovoja sidra, vgrajenega na testnem polju, s čimer bo adhezija na tem stiku zagotovo slabša od adhezije vzorcev s čistimi golimi prameni. Glede na to, da stanje v zvezi s kontaminacijo veznega dela pramen zagotovo poznamo le za prvo sidro vsakega tipa, je bila posledično močno otežena oz. zamegljena primerjava obnašanja med posameznimi tipi modificiranih sider.

3.4 VGRADNJA MODIFICIRANIH TRAJNIH PREDNAPETIH PRAMENSKIH GEOTEHNIČNIH SIDER S SKUPNIM PE OVOJEM NA TESTNEM POLJU

Na širšem gričevnatem območju, preko katerega poteka odsek trase AC Slivnica – Pesnica, hribinsko osnovo sestavljajo različni sedimenti miocena, kot so laporovec in meljasti laporovec s tankimi lečami oz. plastmi meljevca in peščenjaka, te pa prekrivajo različni aluvialni, deluvialni in proluvialni materiali ([slika 3.19](#)).



Slika 3.19: Razkrita nosilna tla v območju opornega zidu OZ-05 oktobra 2006.

Figure 3.19: Uncovered bearing ground in the region of retaining wall OZ-05 (October 2006).

Za varovanje leve brežine vkopa trase pododseka AC Drava – Pesnica je bil izveden oporni zid OZ-05, zasnovan in izdelan kot segmentna oporna konstrukcija z vmesnima bermama, grajena po kampadah od zgoraj navzdol. Po geotehničnem poročilu projekta (z dne 09.11.2000, Geoinženiring, d.o.o) obravnavano pobočje, v katerega bo vkopana trasa AC, varovana z opornim zidom OZ-05, sestavljajo tri trdnostno-deformacijsko različne plasti:

- Deluvialna preperina (d_e) sestavljena iz meljno-peščenih glin v lahko gnetnem do težko gnetnem (izjemoma poltrdnem) konsistentnem stanju, peščeni melji, redko meljast pesek, pogosto zameljen

do zaglinjen grušč laporja in peščenjaka v srednjegostem do gostem stanju. Deluvijalni sedimenti so slabo prepustni, voda se preceja na kontaktu s preperelo hribino. Debelina sedimentov znaša približno 0,5 do 5,5 m.

- Preperela hribina (M_{pr}) iz preperelega laporja s plastmi in polami preperelega peščenega meljevca ter kremenovega peščenjaka. Hribina je preperela približno od 3 do 10,5 m globoko in je delno prepustna.
- Kompaktna hribina (M): laporji, peščeni laporji s prehodi v peščen meljevec, meljasti glinovec do meljevec in sljudnat kremenov peščenjak. Plasti vpadajo generalno približno 15° do 17° proti severu do severozahodu proti ravnini izkopa, ugotovljeni so bili tudi subhorizontalni in subvertikalni razpoklinski sistemi. Hribina je v celoti zelo slabo prepustna, precejanje je vezano na posamezne razpoke in pole slabo vezanih peščenjakov.

Oporni zid OZ-05 skupne dolžine 472 m in višine do največ 35 m je izveden kot armiranobetonska (AB) konstrukcija v obliki sidranih navpičnih AB slopov na medosni razdalji 4 in 5 m, z vmesno zapolnitvijo s prefabriciranimi AB plohi. Konstrukcija je zasnovana v treh etažah z vmesnima bermama, pri čemer so bili slopi vsake etaže v osnovi sidrani v dveh ravneh. Med gradnjo opornega zidu se je izkazalo, da so geološko-geomehanske razmere tal za obravnavanim zidom slabše od predvidenih, zato so bile na treh ravneh izdelane dodatne vodoravne AB grede, prav tako sidrane s trajnimi prednapetimi geotehničnimi sidri. V oporni zid OZ-05 je bilo vgrajenih skupno 814 trajnih prednapetih geotehničnih sider RCP/D. Na ravni SBz opornega zidu OZ-05 je bilo na levem in desnem delu objekta OZ-05 izvedeno testno polje (sliki 3.4 in 3.20), v sklopu katerega so bila poleg referenčnih sider RCP/D vgrajena tudi modificirana sidra tipov RCP/D-K, RCP/D-Z in RCP/D-I. Izvajalec sidrnih del GEOT, d.o.o. iz Ljubljane je v območju testnega polja v času od 31.03.2008 do 07.05.2008 na dodatni gredi objekta vgradil skupno tri referenčna preskusna sidra tipa RCP/D in 15 modificiranih sider (t.j. po pet sider vsakega od tipov RCP/D-K, RCP/D-Z in RCP/D-I). V preglednici 3.1 so zbrani osnovni podatki o referenčnih preskusnih sidrih RCP/D kot tudi o vseh treh tipih modificiranih sider vgrajenih in preskušanih tako v sklopu RRN kot tudi PS objekta do porušitve.

Vrtanje vrtin z geološko spremljavo in popisom vrtin, kot tudi vgrajevanje prednapetih geotehničnih sider, je izvedla družba GEOT, d.o.o., ki je metodo vrtanja vrtin za sidra prilagodila tlem in potrebnemu premeru vrtine. Izvajalec je vrtanje vrtin, od vodoravnice odklonjene 15° navzdol, izvajal z vrtalno garnituro Casagrande M6A-1, pri čemer je pri udarno-rotacijskem vrtanju uporabljal globinsko kladivo Halco Dominator 400 z dletom premera 140 mm (brez sistema istočasne cevitve, saj zaradi stabilnosti stene vrtin nevarnosti zarušitve vrtin ni bilo), navrtanine pa je izpihoval z zrakom. Izbrani premer vrtine mora biti zadosten glede na izbrani kabel sidra, pri čemer naj jekleni kabel sidra ne zapolni več kot 15 % površine prečnega prereza vrtine (Littlejohn, 1993). V primeru sider testnega polja znaša nazivna površina prečnega prereza 6-pramenskega sidra 840 mm^2 , kar znaša le približno 5,5 % teoretične površine prečnega prereza vrtine, torej je bil izdelani premer vrtine zadosten. Za vsa sidra iz preglednice 3.1 so podatki o vgradnji sider, vključno s sestavo tal v območju vrtin in pojavom talne vode, kot tudi količine vgrajene cementne injekcijske mase, zbrane v preglednici 3.2. Popisi vrtin niso bili izvedeni najbolj natančno, zato smo na podlagi razpoložljivih podatkov privzeli, da je bilo stanje tal zaledja pretežno enakomerno, torej so bili pogoji sidranja relativno homogeni.



Slika 3.20: Testno polje z označenimi mesti vgradnje referenčnih RCP/D in modificiranih sider RCP/D-K, RCP/D-Z in RCP/D-I: (a) leva stran in (b) desna stran testnega polja OZ-05.

Figure 3.20: Testing field with marked locations, where original RCP/D and modified anchors RCP/D-K, RCP/D-Z and RCP/D-I were installed: (a) left side and (b) right side of the testing field OZ-05.

Preglednica 3.1: Osnovni podatki o referenčnih preskusnih sidrih RCP/D in modificiranih tipih sider RCP/D-K, RCP/D-Z in RCP/D-I opornega zidu OZ-05.

Table 3.1: Basic data regarding comparative testing anchors RCP/D and modified anchor types RCP/D-K, RCP/D-Z and RCP/D-I of the retaining wall OZ-05.

Zap. št.	Oznaka sidra	Tip sidra	Število pramen	A_p [mm ²]	E_p [GPa]	l_{sidra} [m]	$l_{\text{fr,A}}$ [m]	$l_{\text{fr,B}}$ [m]	$l_{\text{fr,C}}$ [m]	$l_{\text{v,A}}$ [m]	$l_{\text{v,B}}$ [m]	$l_{\text{v,C}}$ [m]
1	SBz-12	RCP/D-I	6	140,7	194,4	35,0	28,0	30,4	32,8	7,0	4,6	2,2
2	SBz-15	RCP/D-Z	5 ^①	140,7	194,4	35,0	28,0	30,4	32,8	2,2	2,2	2,2
3	SBz-18	RCP/D-K	6	140,7	194,4	35,0	28,0			7,0		
4	SBz-33	RCP/D-I	6	140,7	194,4	35,0	28,0	30,4	32,8	7,0	4,6	2,2
5	SBz-36	RCP/D-Z	6	140,7	194,4	35,0	28,0	30,4	32,8	2,2	2,2	2,2
6	SBz-39	RCP/D-K	6	140,7	194,4	35,0	28,0			7,0		
7	SBz-56	RCP/D-Z	6	139,3	197,4	35,0	28,0	30,4	32,8	2,2	2,2	2,2
8	SBz-60	RCP/D-I	6	140,7	194,4	35,0	28,0	30,4	32,8	7,0	4,6	2,2
9	SBz-63	RCP/D-Z	6	140,7	194,4	35,0	28,0	30,4	32,8	2,2	2,2	2,2
10	SBz-66	RCP/D-K	6	140,7	194,4	35,0	28,0			7,0		
11	SBz-78	RCP/D-I	6	140,7	194,4	35,0	28,0	30,4	32,8	7,0	4,6	2,2
12	SBz-81	RCP/D-Z	6	140,7	194,4	35,0	28,0	30,4	32,8	2,2	2,2	2,2
13	SBz-84	RCP/D-K	6	140,7	194,4	35,0	28,0			7,0		
14	SBz-86	RCP/D-I	6	139,3	197,4	35,0	28,0	30,4	32,8	7,0	4,6	2,2
15	SBz-89	RCP/D-K	6	139,3	197,4	35,0	28,0			7,0		
16	SBz-23	RCP/D	6	139,3	197,4	35,0	28,0			7,0		
17	SBz-26	RCP/D	6	140,7	194,4	35,0	28,0			7,0		
18	SBz-59	RCP/D	6	140,7	194,4	35,0	28,0			7,0		
I	TS-01	RCP/D	5	140 ^②	195 ^②	22,0	15,0			7,0		
II	TS-02	RCP/D	5	140 ^②	195 ^②	22,0	15,0			7,0		
III	TS-03	RCP/D	5	140 ^②	195 ^②	22,0	15,0			7,0		
IV	TS-04	RCP/D	5	140 ^②	195 ^②	22,0	15,0			7,0		
V	TS-05	RCP/D	6	140 ^②	195 ^②	17,0	10,0			7,0		
VI	TS-06	RCP/D	6	140 ^②	195 ^②	17,0	10,0			7,0		
VII	TS-07	RCP/D	6	140 ^②	195 ^②	17,0	10,0			7,0		

Opombe: A_p in E_p dejanske izmerjene vrednosti površine prečnega prereza pramena in modula elastičnosti uporabljene šarže jeklenih pramen,

$l_{\text{fr,A}}$, $l_{\text{fr,B}}$ in $l_{\text{fr,C}}$ dolžine prostega dela podsider A, B in C,

$l_{\text{v,A}}$, $l_{\text{v,B}}$ in $l_{\text{v,C}}$ dolžine veznega dela podsider A, B in C,

① na 6-pramenskem sidru SBz-15 je bil eden od pramen prekratek za namestitvev mononapenjalk (preskušanih in zaklinjenih je bilo le 5 pramen sidra),

② nazivni vrednosti površine prečnega prereza in modula elastičnosti pramen.

Preglednica 3.2: Podatki o vgradnji referenčnih preskusnih sider RCP/D in modificiranih tipih sider RCP/D-K, RCP/D-Z in RCP/D-I na območju opornega zidu OZ-05.

Table 3.2: Data on installation of comparative testing anchors RCP/D and modified anchor types RCP/D-K, RCP/D-Z and RCP/D-I in the region of retaining wall OZ-05.

Zap. št.	Oznaka sidra	Tip sidra	Datum vgradnje	Popis sestave vrtine (globina, tip materiala)	Globina pojava vode [m]	β [°]	Vgrajen cement [kg]	VIM [dm ³ /m ¹ vrtine]	R ₁ po vgradnji [MΩ]
1	SBz-12	RCP/D-I	01.04.08	0-35 m, L II	suha vrtina	15	800	17,3	> 200
2	SBz-15	RCP/D-Z	01.04.08	0-35 m, L II	suha vrtina	15	800	17,3	> 200
3	SBz-18	RCP/D-K	31.03.08	0-35 m, L II	suha vrtina	15	800	17,3	> 200
4	SBz-33	RCP/D-I	06.05.08	0-35 m, L II	27,6 vlažno	15	800	17,3	> 200
5	SBz-36	RCP/D-Z	06.05.08	0-35 m, L II	28,4 vlažno	15	800	17,3	> 200
6	SBz-39	RCP/D-K	07.05.08	0-35 m, L II	28,3 vlažno	15	800	17,3	> 200
7	SBz-56	RCP/D-Z	24.04.08	0-35 m, L II	28,3 vlažno	15	800	17,3	2,56
8	SBz-60	RCP/D-I	25.04.08	0-35 m, L II	28,1 vlažno	15	800	17,3	> 200
9	SBz-63	RCP/D-Z	23.04.08	0-35 m, L II	27,1 vlažno	15	800	17,3	> 200
10	SBz-66	RCP/D-K	23.04.08	0-35 m, L II	27,1 vlažno	15	800	17,3	0,199
11	SBz-78	RCP/D-I	22.04.08	0-35 m, L III	27,1 vlažno	15	800	17,3	> 200
12	SBz-81	RCP/D-Z	22.04.08	0-35 m, L II	28,2 vlažno	15	800	17,3	> 200
13	SBz-84	RCP/D-K	22.04.08	0-35 m, L II	27,5 vlažno	15	800	17,3	147,8
14	SBz-86	RCP/D-I	21.04.08	0-35 m, L II	27,7 vlažno	15	800	17,3	122,8
15	SBz-89	RCP/D-K	21.04.08	0-35 m, L II	28,2 vlažno	15	800	17,3	> 200
16	SBz-23	RCP/D	31.03.08	0-35 m, L II	27,0 vlažno	15	800	17,3	0,246
17	SBz-26	RCP/D	07.05.08	0-35 m, L II	28,1 vlažno	15	800	17,3	> 200
18	SBz-59	RCP/D	24.04.08	0-35 m, L II	27,2 vlažno	15	800	17,3	> 200
I	TS-01	RCP/D	20.08.06	0-2,8 m, PL I 2,8-22 m, L II	7,5 in 11,5 vlažno	15	600	20,7	> 200
II	TS-02	RCP/D	19.05.06	0-3,3 m, PL I 3,3-22 m, L II	suha vrtina	15	500	17,2	> 200
III	TS-03	RCP/D	25.07.06	0-2,9 m, PL I 2,9-22 m, L II	suha vrtina	15	400	13,8	> 200
IV	TS-04	RCP/D	21.07.06	0-3,9 m, PL I 3,9-22 m, L II	suha vrtina	15	500	17,2	> 200
V	TS-05	RCP/D	31.05.07	0-17 m, L II	suha vrtina	15	400	17,8	> 200
VI	TS-06	RCP/D	30.05.07	0-17 m, L II	suha vrtina	15	450	20,1	> 200
VII	TS-07	RCP/D	08.06.07	0-17 m, L II	suha vrtina	15	400	17,8	> 200

Opombe: VIM količina vgrajene cementne injekcijske mase na tekoči meter sidra,
 PL I preperel laporovec s polami peščenjaka in meljevca,
 L II laporovec s polami peščenjaka in meljevca, siv, trden,
 L III laporovec z do 0,5 m debelimi plastmi peščenjaka in meljevca, siv, trden.

Sidra so bila v izvrtane in očiščene vrtine vgrajena v čim krajšem možnem času po končanem vrtnanju veznega dela sidra, najkasneje pa v 12 urah. Izjema je bilo le sidro SBz-23 tipa RCP/D, ki je bilo takoj po končanem vrtnanju sicer vstavljeno v vrtino, vendar pa je bilo zaradi okvare injektorja s cementno injekcijsko maso zalito šele čez dva dni. Za zalivanje praznega notranjega prostora med prameni in zaščitnimi PE cevmi, kot tudi praznin med sestavljenimi sidri in vrtinami (injektiranje zunanjih delov sider) je bila uporabljena cementna injekcijska masa potrjene recepture z $v/c = 0,42$. Izvajalec je na licu mesta pripravil zadostno količino injekcijske mase, ki je omogočala kontinuirano zainjektiranje sidra vzdolž celotne dolžine brez prekinitev. Pred pričetkom injektiranja je izvajalec preveril pretočnost in temperaturo injekcijske mase, nato pa je začel z injektiranjem notranjosti sidra, ki se je neprekinjeno izvajalo od najnižje spodnje točke sidra toliko časa, dokler ni bila notranjost PE ovoja sidra v celoti zapolnjena. Za preprečitev poškodb zaščitnega PE ovoja sidra je pritisk na izhodu injekcijske cevi v notranjosti sidra omejil na 300 kPa (3 bare). Sledilo je injektiranje zunanjega dela sidra, ki se je izvajalo toliko časa, da je injekcijska masa iz vrtine izrinila vso morebitno vodo in je bil pretok mešanice na iztoku enak kot na vstopu. Za vsa sidra, vgrajena v sklopu RRN, je izvajalec zabeležil isto količino vgrajenega cementa, kar kaže na to, da je bilo stanje tal zaledja v smislu votlavosti vzdolž vrtin pri vseh sidrih istega velikostnega reda. Na podlagi znanih vrednosti v/c faktorja in količine cementa smo po Houlsby (1990) v **preglednici 3.2** izvrednotili povprečno količino vgrajene injekcijske mase na tekoči meter vgrajenega sidra, ki pri vseh štirih tipih sider testnega polja znaša $17,3 \text{ dm}^3/\text{m}^1$, medtem ko se je pri preskusnih sidrih objekta (TS-01 do TS-07) količina vgrajene mase gibala med $13,8$ in $20,7 \text{ dm}^3/\text{m}^1$. Povprečna količina vgrajene injekcijske mase sider testnega polja je torej znotraj območja vgrajene injekcijske mase preskusnih sider objekta. Za oceno količine vgrajene injekcijske mase smo uporabili kriterij standarda *EN 1537*, po katerem v primerih, ko količina injektirane mase, ob uporabi pritiska za izenačitev napetosti zaradi lastne teže tal, presega trikratnik prostornine vrtine, porabo mase za polnjenje praznin ob vrtini lahko smatramo kot povečano. Pri vseh sidrih iz **preglednice 3.2** je bila količina vgrajene injekcijske mase v okviru običajnih vrednosti.

3.5 PRESKUŠANJA NOSILNOSTI SIDER NA TESTNEM POLJU V SKLOPU RRN LETA 2008

3.5.1 Oprema za izvedbo preskušanj nosilnosti sider

Napenjanje referenčnih sider RCP/D in vseh tipov modificiranih sider smo izvedli po sistemu napenjanja pramen sidra z mononapenjalkami, opisanem v **poglavju 2.1.5**, pri čemer smo uporabljali napenjalko za ločeno napenjanje posameznih pramen družbe GEOT, d.o.o. (**slika 3.21 levo**). Čeprav je bil vsak pramen sidra opremljen s svojo napenjalko, so bile vse napenjalko vzporedno vezane na isto hidravlično razdelilno postajo, tako da je ista hidravlična črpalka v vseh napenjalkah ves čas zagotavljala isti tlak, tako da je bila ves čas trajanja preskusov nosilnosti v vseh pramenih sidra zagotovljena praktično ista sila. Za kontrolo sile smo uporabljali elektronski dinamometer tipa L216V150 proizvajalca SISGEO S.r.l., podrobneje opisan v **dodatku E** disertacije. Meritve izvlečkov (izmerjene vrednosti pomika bata glede na ohišje mononapenjalko) smo izvajali na vsakem pramenu posebej (**slika 3.21 desno**), pri čemer smo digitalni merilnik pomika ločljivosti $0,01 \text{ mm}$ z magnetom pritrdili na ohišje napenjalko. Glede na to, da se izvlečki pramen sidra med preskusom nosilnosti niso spremljali glede na nepomično referenčno točko, pač pa smo meritve izvajali neposredno na mononapenjalkah, bi morali pri vrednotenju mere lezenja upoštevati tudi premike glave sidra (oz. sidranega objekta) glede na zunanjo nepremično točko zunaj območja sidranega objekta. Premik objekta smo spremljali z merilno urico na stojalu z enako ločljivostjo ($0,01 \text{ mm}$), pri čemer se je izkazalo, da so izmerjeni pomiki glav sider v okviru merilne negotovosti meritev.



Slika 3.21: Sistem za preskušanje nosilnosti prednapetih pramenskih geotehničnih sider s posamičnimi napejalkami (levo), merilne urice za odčitavanje izvlečkov posameznih pramen (desno).

Figure 3.21: System for load-bearing capacity testing of prestressed strand ground anchors using mono-strand jacks (left), displacement transducers for measuring of extensions of individual strands (right).

3.5.2 Opis izvedbe preskušanj nosilnosti sider

Kot smo že omenili, smo vsa sidra testnega polja (referenčna sidra RCP/D, kot tudi modificirana sidra RCP/D-K, RCP/D-Z in RCP/D-I) obremenjevali po enakem postopku – t.j. po obremenilnih stopnjah in metodologiji za PS, kot ga podaja *SIA 267/1*. Opazovanje smo pri PS izvajali dokler vezni del sidra ni popolnoma popustil, medtem ko smo VPN zaključili že ob prvih znakih popuščanja veznega dela sidra, torej takoj, ko je bila dosežena kritična mera lezenja $k_{krit} = 2$ mm.

Pri PS se preskusno sidro napenja v ciklično naraščajočih stopnjah sile, pri čemer se v posameznih časovnih trenutkih najprej popravi silo na predpisano raven sile te stopnje, nakar se odčitajo izvlečki pramen, na podlagi katerih se iz vrednotijo pripadajoče mere lezenja k , spremljajo pa se tudi pomiki sidrne plošče glav sider. Zgornja in spodnja mejna sila območja obremenjevanja se določita skladno s *SIA 267/1*:

- Zgornjo mejo določa največja še dopustna sila $P_{pv,max}$, s katero lahko obremenimo preskusno sidro, ki omejuje neelastične deformacije jekla pramen. Kot smo že omenili je pri pramenih točka tečenja dogovorno določena kot napetost $f_{p0,1k}$ pri 0,1 % nepovratne deformacije (glej poglavje 2.2.1), saj se pri natezno obremenjenem pramenu krivulja v diagramu $\sigma - \varepsilon$ začne kriviti že pri nižji napetosti od $f_{p0,1k}$, torej do pojava neelastičnih deformacij pride že pri napetostih nižjih od $f_{p0,1k}$. Zato je največja še dopustna preskusna sila pri PS $P_{pv,max}$ določena ne pri karakteristični natezni napetosti jekla pramen $f_{p0,1k}$, pač pa nekoliko nižje – kot 95 % $f_{p0,1k}$, kar pri 6-pramenskem sidru iz pramen nazivne površine prečnega prereza 140 mm^2 iz jekla $f_{p0,1k}/f_{pk} = 1670/1860 \text{ MPa}$ pomeni:

$$P_{pv,max} = 0,95 \cdot A_t \cdot f_{p0,1k} = 0,95 \cdot 6 \cdot 140 \cdot 1670 = 1332,7 \text{ kN.} \quad (3.4)$$

Na drugi strani je potrebno zagotoviti zadosten varnostni faktor odpornosti veznega dela sidra na izvlek glede na predvideno silo zaklinjenja sider objekta P_0 . Iz tega razloga minimalno še dopustno silo $P_{pv,min}$ določimo najmanj kot za 67 % povečano predvideno silo zaklinjenja sider objekta P_0 , ki v našem primeru znaša:

$$P_{pv,min} = 1,67 \cdot P_0 = 1,67 \cdot 450 = 751,5 \text{ kN.} \quad (3.5)$$

V primeru sider, kot so vgrajena v testnem polju, bomo zahteve SIA 267/I izpolnili, če preskusno silo P_{pv} za izvedbo PS in VPN izberemo v območju med 752 in 1333 kN. Za preskušanja na testnem polju smo, zaradi primerljivosti z rezultati preskusnih sider objekta (v preglednici 3.1 označeni kot TS-01 do TS-07), za 6-pramenska sidra izbrali silo $P_{pv} = 1254$ kN, medtem ko smo za sidro SBz-15, pri katerem smo zaradi enega prekratkega pramena lahko napeli le 5 pramen, izbrali silo $P_{pv} = 1116$ kN.

- Spodnjo mejo ciklično naraščajočih sil določa začetna sila P_a , ki mora biti taka, da mononapenjalka tudi pri tej sili še vedno zagotavljajo zadostno prednapetost med elementi glave sidra, obenem pa še ne pride do povesa mononapenjalk zaradi lastne teže. Na ta način so v celotnem območju gibanja sil med PS zagotovljeni medsebojno primerljivi odčitki izvlečkov pramen, kar pa dosežemo, če začetno silo P_a izberemo v območju med 10 % in 15 % končne preskusne sile P_{pv} . Glede na preskusne sile P_{pv} , dejansko izbrane v prejšnji alineji, mora biti tako sila P_a pri 6-pramenskih sidrih testnega polja izbrana iz območja med 125,4 in 188,1 kN (dejansko smo izbrali silo 150 kN), pri 5-pramenskih sidrih pa iz območja med 111,6 in 167,4 kN (dejansko smo izbrali silo 125 kN).

Z izbrano zgornjo mejo (preskusno silo P_{pv}) in spodnjo mejo (začetno silo P_a) je območje gibanje sile med PS natančno določeno. V naslednjem koraku moramo to področje razdeliti na šest do deset enakih prirastkov sile ΔP . Praksa kaže, da je razdelitev na osem prirastkov ΔP dobra izbira, saj je razdelitev bolj podrobna kot pri šestih stopnjah, kjer je razdelitev sil (pre)groba za natančno spremljanje nosilnosti sidra pri VPN (pri 6-stopenjskih PS so pogoste nenadne porušitve sidra na zadnji stopnji dosežene sile, kar pri naših VPN sider testnega polja ni bilo dopustno), po drugi strani pa je trajanje PS in VPN pri razdelitvi na deset stopenj sile za predvideni obseg preskušanja zelo zamudno, obenem pa natančnost pridobljenih rezultatov ni izrazito večja, prav tako pa se bistveno ne poveča nadzor nad obnašanjem veznega dela sidra pri VPN. Stopnje sil, ki smo jih uporabili pri PS in VPN testnega polja, so podane v preglednici 3.3: pri vseh sidrih testnega polja (torej tipov RCP/D, RCP/D-K, RCP/D-Z in RCP/D-I) smo uporabili stopnje sil iz stolpca *b*, izjema sta le sidri RCP/D-Z SBz-15, kjer smo napenjali le pet pramen (stolpec *c*) ter sidro RCP/D SBz-23, ki je bilo zaradi okvare injektorja zalito šele čez dva dni in je prišlo do relaksacije tal v okolici vrtine, v vrtini pa se je nabrala tudi voda. Pričakovali smo manjšo odpornost sidra na izvlek, zato smo območje preskusne sile $P_{pv} - P_a$ razdelili na deset stopenj (stolpec *d*). V stolpcih *e* in *f* je podana razdelitev sil za 5-pramenska preskusna sidra iz prve faze PS objekta ter 6-pramenska preskusna sidra objekta iz druge faze PS objekta.

Pred začetkom PS in VPN smo na vsako sidro najprej namestili podložno in sidrno ploščo, med kateri je bil stisnjen obročasti dinamometer. Nato smo na vsak pramen sidra nataknili svojo mononapenjalko, pri čemer pa smo vsako drugo mononapenjalko izmenično podložili s posebno kotvo, saj v nasprotnem primeru zaradi omejenega prostora na sidrni plošči ne bi bilo možno namestiti vseh šestih mononapenjalk. Nato smo v kabel sidra vnesli začetno silo P_a . Zatem smo na ohišje vsake napenjalka pritrdili merilno urico za meritve izvlečkov pramena med izvajanjem PS in VPN. Pri prvih PS in VPN smo na ločeno stojalo (t.j. na zunanjo nepremično točko) namestili še merilno urico za spremljanje pomikov glav sider, vendar so meritve pokazale, da so izmerjeni pomiki glav sider v okviru merilne negotovosti meritev, zato jih v nadaljevanju preskušanj nismo več spremljali. Pred začetkom vsake PS in VPN smo nato preverili raven sile P_a , ki smo jo nastavili na točno vrednost, vse merilne urice za merjenje izvlečkov kot tudi pomika glave sidra pa smo resetirali (nastavili na nič). PS in VPN smo začeli tako, da smo v kabel sidra z enakomernim naraščanjem hidravličnega tlaka v mononapenjalkah v okviru natančnosti obročastega dinamometra vnesli točno vrednost silo prve stopnje P_1 , nato pa smo v časovnih trenutkih

0', 1', 2', 5', 10' in 15' izvedli odčitek izvlečka vsakega od pramen sidra. Odčitane izvlečke posameznih pramen s_i smo vnesli v preglednico, kjer smo preračunali prirastke izvlečkov glede na zadnji predhodni odčitek, tako za posamezna pramena ($\Delta s_{1,i}$, $\Delta s_{2,i}$, $\Delta s_{3,i}$, $\Delta s_{4,i}$, $\Delta s_{5,i}$ in $\Delta s_{6,i}$), pri sidrih tipov RCP/D-Z in RCP/D-I tudi povprečne prirastke za podsidra ($\Delta s_{12,i}$, $\Delta s_{34,i}$ in $\Delta s_{56,i}$), kot tudi povprečni izvleček vseh pramen sidra $\Delta s_{povp,i}$. Na podlagi izmerjenih vrednosti smo za vse našteje vrednosti izračunali merodajne mere lezenja k , ki je mera za časovno odvisno povečanje pomikov veznega dela sidra pri konstantni sili v sidru: iz vrednotili smo jo tako za posamezna pramena ($k_{i,1}$ do $k_{i,6}$) ter povprečje za sidro kot celoto (k_{1-6}), pri sidrih tipov RCP/D-Z in RCP/D-I pa tudi za podsidra ($k_{12,i}$, $k_{34,i}$ in $k_{56,i}$).

Preglednica 3.3: Stopnje sil pri PS in VPN na testnem polju opornega zidu OZ-05.

Table 3.3: Load steps of investigation tests and comprehensive suitability tests at the testing field of the retaining wall OZ-05.

Stopnja sile [kN]	Minimalni opazovalni čas [min]	Testno polje (6-pramen)	Testno polje RCP/D-Z SBz-15*	Testno polje RCP/D SBz-23**	Referenčno RCP/D (5-pramen)	Referenčno RCP/D (6-pramen)
<i>stolpec</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>
ΔP	–	138	142	110	115	138
P_a	–	150	125	150	125	150
P_1	15'	288	249	260	240	288
P_2	15' (30' <i>f</i>)	426	373	371	355	426
P_3	30' (15' <i>f</i>)	564	497	481	470	564
P_4	15'	702	621	592	585	702
P_5	15'	840	744	702	700	840
P_6	15'	978	868	812	815	978
P_7	15'	1116	992	823	930	1116
P_8	15'	–	–	1033	–	–
P_9	15'	–	–	1144	–	–
P_{pv}	60'	1254	1116	1254	1045	1254

Opombi: *..... eden od 6 pramen kabla sidra je bil prekratek za napenjanje (VPN je bil izveden na 5 pramenih), **..... sidro je bilo zainjektirano 2 dni po vstavitvi v vrtino, med injektiranjem je iz vrtine iztekala voda.

Kot je razvidno iz stolpca *a* **preglednice 3.3** je minimalni čas opazovanja na vsaki stopnji sile v splošnem znašal 15 minut (15'), izjema sta bili le ravni sile, ki sta bili najbližje sili zaklinjenja sider objekta (minimalni čas opazovanja 30') ter raven preskusne sile P_{pv} (minimalni čas opazovanja 60'). Tako predpisanega minimalnega časa nismo podaljševali, v kolikor je bil prirastek izvlečka stopnji sile P_1 med 2' in 5' oz. med 5' in 15' manjši od 0,20 mm. Če je bila ta vrednost pri stopnji sile P_1 prekoračena oz. je bilo iz diagramov lezenja ($\Delta s - \log t$) razvidno, da se mere lezenja v pramenih niso umirile, smo nadaljnji postopek določili na podlagi diagrama lezenja. V kolikor je v diagramu lezenja naklon linij $\Delta s - \log t$ (ki je pravzaprav mera lezenja k) jasno upadel, smo opazovanje sidra na tej stopnji zaključili. V nasprotnem primeru (t.j. v kolikor so se nakloni linij $\Delta s - \log t$ na koncu minimalnega opazovalnega časa povečali) smo opazovalni čas podaljšali, dokler mere lezenj k niso bile enolično določljive oz. dokler naklon krivulj lezenja ni začel spet upadati ali dokler ni bilo ugotovljeno, da mera lezenja k prekoračuje mero lezenja k_{krit} . Po končani stopnji sile P_1 smo sidro razbremenili na začetno silo P_a , da bi dobili informacijo o trajnih in elastičnih izvlečkih. Glede na to, da je bil izvleček na ravni

začetne sile P_a enak nič, so izmerjene vrednosti po razbremenitvi na raven sile P_a predstavljale že kar trajni izvleček Δs_{bl} po končani prvi stopnji sile. V naslednjem koraku smo silo v mononapenjalkah najprej z enakomerno hitrostjo dvignili do sile prve stopnje (P_1) ter izvedli odčitke izvlečka vseh pramen sidra. Nato smo z enako hitrostjo kot prej dvignili silo do ravni naslednje stopnje sile (P_2), kjer smo izvlečke pramen opazovali in vrednotili na analogen način, kot na ravni sile P_1 . Po končanem opazovanju na ravni sile P_2 smo sidro razbremenili na začetno silo P_a in odčitali trajni izvleček Δs_{bl} po končani drugi stopnji sile. Na enak način smo PS in VPN nadaljevali tudi na naslednjih stopnjah sile, pri čemer smo v območju sile zaklinjenja P_0 opazovalni čas podaljšali najmanj na 30', presojo diagramov lezenja in nadaljnji postopek pa smo izvedli skladno s prej opisanim potekom za druge stopnje sil. V kolikor je bilo med PS in VPN očitno, da vezni del sidra ne bo mogel prevzeti ravni sile naslednje stopnje, smo na tej (zadnji) stopnji sile pri PS opazovanje podaljšali na 60', pri VPN pa to ni bilo vedno mogoče, saj bi to pogosto lahko privedlo do porušitve veznega dela sidra. Pri sidrih, pri katerih smo uspeli priti do končne preskusne sile P_{pv} , smo minimalni čas opazovanja podaljšali najmanj na 60', pri čemer smo pri tistih PS, kjer je bila že pri krajšem opazovalnem času večkrat zaporedoma nedvoumno presežena kritična mera lezenja $k_{krit} = 2$ mm oz. je bila dosežena zgornja meja zmogljivosti preskuševalne opreme, PS prekinili tudi pred 60'. Nasprotno smo pri VPN z opazovanjem prenehali takoj, ko se je v pramenih sider mera lezenja približala k_{krit} . V vseh primerih smo po razbremenitvi sidra na raven začetne sile P_a odčitali končni trajni izvleček Δs_{bl} .

PS referenčnih sider do porušitve za potrebe izvedbe objekta OZ-05 (preskusna sidra TS-01 do TS-07 iz [preglednice 3.4](#)) so bile izvedene v času med 05.06.2006 in 19.06.2007. Na treh referenčnih sidrih tipa RCP/D in po enem sidru vsakega od modificiranih tipov RCP/D-K, RCP/D-Z in RCP/D-I smo v času med 09.04.2008 in 09.05.2008 prav tako izvedli PS do porušitve, medtem ko smo na ostalih štirih sidrih vsakega od modificiranih tipov v času med 12.05.2008 in 23.05.2008 izvedli VPN po obremenilnih stopnjah in metodologiji za PS, pri čemer smo pri prvih znakih popuščanja veznega dela posameznega sidra preskus nosilnosti sidra takoj prekinili. Na ta način smo preprečili uničenje veznih delov teh sider in omogočili, da so se sidra lahko zaklinila in ostala v funkciji kot sidra objekta.

Kot je razvidno iz [preglednice 3.4](#) je bila starost cementne injekcijske mase sider, na katerih smo izvedli PS, med 9 in 18 dni, medtem ko je bila starost cementne injekcijske mase sider, na katerih smo izvedli VPN, med 15 in 21 dni. Po eno sidro od vsakega tipa modificiranih sider je bilo preskušeno z VPN po 49 oz. 50 dneh po končanem zainjektiranju (vgradnji) posameznega sidra v vrtino, pri čemer so bila ta sidra med prvimi, vgrajenimi v območju testnega polja. S povečanjem starosti cementne injekcijske mase se njena tlačna trdnost povečuje, zato smo poskušali tako PS kot tudi VPN opraviti na sidrih približno enake starosti, medtem ko smo s po enim preskusom vsakega od modificiranih tipov sider poskušali indikativno ugotoviti, ali bo višja tlačna trdnost vgrajene injekcijske mase kaj doprinesla k boljšemu obnašanju sidra pri preskusu nosilnosti bodisi v smislu preprečitve izvleka pramen iz injekcijske mase v notranjosti rebraste PE cevi bodisi v smislu dosežene večje odpornosti na izvlek vezi injekcijske mase z vrtino.

Vrednosti izmerjene izolacijske upornosti R_1 vseh obravnavanih sider, navedene v zadnjem stolpcu [preglednice 3.4](#), kažejo na nepoškodovanost zaščitnega PE ovoja sider pred izvedbo preskusov nosilnosti sider.

Preglednica 3.4: Vrste preskusov nosilnosti referenčnih preskusnih sider RCP/D in modificiranih tipov sider RCP/D-K, RCP/D-Z in RCP/D-I leta 2008 izvedene na opornem zidu OZ-05.

Table 3.4: Types of load-bearing capacity tests performed in 2008 on comparative testing anchors RCP/D and modified anchor types RCP/D-K, RCP/D-Z and RCP/D-I of the retaining wall OZ-05.

Št.	Oznaka sidra	Tip sidra	Datum preskusa	Vrsta preskusa	Starost IM ^①	$R_{I,pred}$ ^② [MΩ]
1	SBz-23	RCP/D	09.04.08	PS	9	0,246
2	SBz-26	RCP/D	19.05.08	PS	12	> 200
3	SBz-59	RCP/D	06.05.08	PS	12	> 200
4	SBz-89	RCP/D-K	09.05.08	PS	18	> 200
5	SBz-18	RCP/D-K	19.05.08	VPN	49	> 200
6	SBz-39	RCP/D-K	23.05.08	VPN	16	> 200
7	SBz-66	RCP/D-K	13.05.08	VPN	20	0,199
8	SBz-84	RCP/D-K	12.05.08	VPN	20	147,2
9	SBz-56	RCP/D-Z	06.05.08	PS	12	2,56
10	SBz-15	RCP/D-Z	21.05.08	VPN	50	> 200
11	SBz-36	RCP/D-Z	22.05.08	VPN	16	> 200
12	SBz-63	RCP/D-Z	14.05.08	VPN	21	> 200
13	SBz-81	RCP/D-Z	12.05.08	VPN	20	> 200
14	SBz-86	RCP/D-I	09.05.08	PS	18	112,8
15	SBz-12	RCP/D-I	21.05.08	VPN	50	> 200
16	SBz-33	RCP/D-I	21.05.08	VPN	15	> 200
17	SBz-60	RCP/D-I	14.05.08	VPN	19	> 200
18	SBz-78	RCP/D-I	13.05.08	VPN	21	> 200
I	TS-01	RCP/D	07.09.06	PS	18	1,62
II	TS-02	RCP/D	05.06.06	PS	17	> 200
III	TS-03	RCP/D	07.08.06	PS	13	> 200
IV	TS-04	RCP/D	01.08.06	PS	11	> 200
V	TS-05	RCP/D	11.06.07	PS	11	> 200
VI	TS-06	RCP/D	18.06.07	PS	19	> 200
VII	TS-07	RCP/D	19.06.07	PS	11	> 200

Opombi: ①..... starost cementne injekcijske mase sidra v času PS/VPN,
 ②..... vrednost izolacijske upornosti sidra R_I pred PS/VPN.

3.5.3 Rezultati preskušanj nosilnosti sider testnega polja doseženi leta 2008

Pri preskušanju do porušitve trajnih prednapetih pramenskih električno izoliranih geotehničnih sider se običajno pojavljata naslednja načina popustitve veznega dela sidra:

- Najobičajnejši (pričakovani) način je popustitev veznega dela sidra po **zunanjem stiku sidra** (izven rebraste PE cevi), torej v območju vezi rebrasta PE cev – cementna injekcijska masa – stena vrtine (oz. tla zaledja). Do takšne porušitve veznega dela sidra lahko pride le v primerih, ko je v notranjosti rebraste PE cevi zagotovljena zadostna odpornost na izvlek vezi pramen – cementna injekcijska masa

– rebrasta PE cev. Predpogoj je brezhibno zalitje pramen, katerih stanje površine in dolžina veznega dela pramen omogočata zadostno zasidranje pramena v cementni injekcijski masi, tako da ne more priti do izvlečenja pramen iz notranjosti rebraste PE cevi. Do primerov šibkejšega zunanjskega stika pogosto prihaja v primerih, ko zaradi razpokanosti tal skozi steno vrtine odteka cementna injekcijska masa ali pa pri izdelavi vrtine ni bila uporabljena ustrezna tehnologija vrtanja in čiščenja vrtine, zaradi česar je površina stena vrtine zaglajena oz. degradirana (primeri izpiranja vrtin v tleh občutljivih na vodo), v primerih dotoka zaledne vode pa do takega mehanizma lahko predčasno pride v primerih neustreznega izvedenega postopka injektiranja votlega prostora med sidrom in vrtino (razredčenje cementne injekcijske mase z zaledno vodo).

- Do manj pogostega in tudi nezaželenega načina porušitve veznega dela sidra po **notranjem stiku sidra** (izvlačenje posameznih pramen ali celotnega kabla sidra iz cementne injekcijske mase v notranjosti rebraste PE cevi) prihaja v primerih, ko je odpornost vezi zunanjskega stika sidra večja od odpornosti vezi notranjskega stika, kar je lahko posledica bodisi kontaminiranosti površine pramen, ki ne zagotavlja dobre sprijetosti pramen s cementno injekcijsko maso, bodisi je posledica prekratke dolžine pramen veznega dela sidra, v najslabšem primeru pa je lahko tudi kombinacija obeh.

Kot smo že opisali v predhodnem podpoglavju, smo v vsaki posamezni fazi PS oz. VPN (t.j. na vsaki stopnji sile P_i) v posameznih časovnih trenutkih odčitavali izvlečke pramen, na podlagi katerih smo izračunavali mere lezenja k med dvema zaporednima odčitkoma. Na ta način smo za vse časovne intervale na vsaki stopnji sile P_i dobili nabor mer lezenja k , katerih vrednosti so se medsebojno razlikovale, zato je bilo treba določiti merodajne intervalne mere lezenja k_{int} , ki bodo na vsaki stopnji sile P_i reprezentativno opisovale obnašanje pramen, podsider kot tudi sidra kot celote. V sklopu analize rezultatov sider RCP/D in modificiranih tipov RCP/D-K, RCP/D-Z in RCP/D-I, preskušanih na testnem polju, smo za določitev intervalnih mer lezenja k_{int} , izvrednotenih na podlagi povprečja izvlečkov vseh pramen kabla sidra, uporabili **metodo inženirske presoje (metoda IP)**, opisano v poglavju C.4 dodatka. Vrednosti k_{int} smo vrisali v diagram $k_{int} - P_i$, pri čemer smo odpornost sidra na izvlek določili kot presečišče odsekoma ravne krivulje intervalne mere lezenja k_{int} z vodoravnico $k_{krit} = 2$ mm, ki opredeljuje administrativno mejo za porušitev sidra. V primerih, ko to presečišče ne obstaja, odpornosti sidra na izvlek R_a ne moremo natančno določiti, pač pa jo lahko le ocenimo. Švicarski predpis v primerih, ko ni dosežena porušitev sidra, dopušča oceno odpornosti R_a kot ekstrapolacijo preskusne sile, povečane do največ 10 %. Problem pri tem ostaja ocena, kdaj lahko sidro smatramo kot porušeno in v katerih primerih je upravičena ocena, da bi bil vezni del sidra sposoben prevzeti za 10 % povečano silo zadnje stopnje PS. Izkušnje iz prakse kažejo, da je čimbolj točna ocena odpornosti na izvlek R_a zahtevna naloga, saj je možno na podlagi istih vrednosti mer lezenja, dobljenih pri PS in VPN sider, izvrednotiti različne vrednosti R_a . Po študiji rezultatov večkrat ponovljenih ciklov vrednotenja vseh rezultatov PS, VPN in CPN terenskih preskusov, opravljenih v letih 2008 in 2009, smo ugotovili, da je najustreznejša podlaga za oceno odpornosti sidra na izvlek R_a in morebitne odločitve o ekstrapolaciji dosežene sile za 10 % kombinacija naslednjih kriterijev:

- **Aproksimacija linearne trenda** vsakega pramena posebej in povprečja vseh za sidro kot celoto: na podlagi izvrednotenih mer lezenja za vse odčitke v predpisanih časovnih intervalih zadnje faze preskusa smo v računalniškem orodju po metodi najmanjših kvadratov izvrednotili linearni trend, ki smo ga praviloma ekstrapolirali do konca predvidenega najdaljšega časa opazovanja na tej stopnji sile. V primerih, ko je trend izkazoval izrazito naraščanje mer lezenja s časom (ne glede na vrednost merodajne intervalne mere lezenja k_{int} , izvrednotene na zadnji stopnji sile P_i), smo ocenili, da pri določitvi vrednosti R_a , umiritev lezenja veznega dela sidra ni pričakovana, zato ekstrapolacija dosežene zadnje stopnje sile ni utemeljena.

- Kot drug pomemben kriterij smo določili vrednost **največje mere lezenja** k_{\max} , ki se je na posameznem pramenu oz. sidru kot celoti pojavila na posamezni stopnji sile P_i . V kolikor je bil na ravni zadnje stopnje sile izpolnjen kriterij $k_{\max} \geq k_{\text{krit}}$, potem smo prav tako zaključili, da ne moremo več pričakovati večje odpornosti veznega dela pramena oz. sidra na izvlek, torej tudi v tem primeru ekstrapolacija ni utemeljena. Kot izjemo smo upoštevali le mero lezenja med 1' in 2' ($k_{1,2}$), pri kateri zaradi različnih vzrokov (podrobneje jih navajamo v poglavjih 5 in 6 z opisi laboratorijskih preskušanj) lahko pride tudi do vrednosti $k > 2$ mm, ki pa dejansko niso posledica popuščanij veznega dela pramena oz. sidra. Seveda morata to oceno potrditi tako primeren trend brez jasne tendence naraščanja, kot tudi dovolj nizka vrednost merodajne intervalne mere lezenja k_{int} .
- Kot zadnji kriterij, ki kaže na tolikšno odpornost veznega dela pramena oz. sidra, da bi bila možna ekstrapolacija, smo opredelili **merodajno intervalno mero lezenja** k_{int} . Z uporabo samo tega kriterija, lahko dobimo tudi močno zavajajoče rezultate v obliki precenjene sposobnosti veznega dela za prevzem sidrne sile. Na drugi strani se je pokazalo, da lahko z uporabo vrednosti k_{int} (v kombinaciji z vrednostjo k_{\max} in oceno trenda), precej zanesljivo ocenimo sposobnost sidra za prevzem morebitne povečane (za 10 % ekstrapolirane) sile zadnje stopnje preskusa. Vnaprej nismo mogli natančno določiti, kolikšna bi še lahko bila vrednost k_{int} , da je ekstrapolacija še lahko utemeljena, a je večkratna analiza vseh razpoložljivih rezultatov pokazala, da smo se za ekstrapolacijo sile odločili v primerih, ko se je vrednost k_{int} gibala v območju med 0,23 in 1,25 mm, izjemoma le v enem primeru (pri sidru SBz-33, preskušnem leta 2009), ko je trend jasno nakazoval upadanje mer lezenja, pa je vrednost k_{int} dosegla 1,33 mm.

V primerih, kjer smo na podlagi zgornjih treh kriterijev ocenili, da je stanje veznega dela sidra takšno, da bo sposobno prevzeti silo na zadnji stopnji preskusa, ekstrapolirano za 10 %, smo kot oceno odpornosti pramena oz. sidra na izvlek upoštevali $R_a = 1,10 \cdot P_{i,\max}$, kjer je $P_{i,\max}$ sila na zadnji doseženi stopnji sile preskusa nosilnosti sidra.

Na podlagi izmerjenega elastičnega skrčka Δs_{el} pri razbremenitvi pramen iz sile posamezne stopnje P_i na začetno silo P_a , ter znanih karakteristik pramen (površine prečnega prereza kabla sidra A_p in modula elastičnosti E_p), lahko izračunamo njihovo efektivno prosto dolžino l_f :

$$l_f(P_i) = \frac{\Delta s_{\text{el}}}{P_i - P_a} A_p E_p. \quad (3.6)$$

V preglednici 3.5 smo zbrali spodnje in zgornje meje prostih dolžin (na ravni odpornosti na izvlek R_a) za vse kombinacije računskih prostih dolžin l_{fr} , veznih dolžin l_v kot tudi odreznih dolžin l_{odr} (posamezne mononapenjalko so bile zaradi omejenega prostora na sidrni plošči glave sidra izmenično podložene), kot so se pojavljale pri preskusnih sidrih RCP/D opornega zidu OZ-05 (PS izvedene v sklopu gradnje objekta) in pri sidrih tipov RCP/D, RCP/D-K, RCP/D-Z in RCP/D-I testnega polja, znotraj katerih se lahko gibljejo vrednosti efektivne proste dolžine l_f . Zaradi primerljivosti rezultatov izračunanih po obeh standardih smo tudi v primeru obeh izrazov po SIA 267/1 upoštevali tudi odrezno dolžino pramen, ki je potrebna za namestitev mononapenjalk ter izvedbo preskusov in napanjanja sider, čeprav besedilo švicarskega standarda v tej zvezi ne podaja nobenega napotka. Primerjava vrednosti kaže, da so v konkretnem primeru spodnje meje, določene po švicarskem standardu, za približno 18 % višje od spodnjih meja določenih po evropskem standardu, medtem ko na drugi strani zgornje meje po švicarskem standardu znašajo med 94 in 100 % zgornje meje po evropskem standardu. Iz navedenega izhaja, da so pri oceni efektivne proste dolžine pramen, pri doseženi odpornosti na izvlek $l_f(R_a)$, kriteriji SIA 267/1 strožji od kriterijev EN 1537, saj so območja gibanja efektivne proste dolžine l_f ožja (glej tudi diagrame l_f v dodatku B disertacije).

Preglednica 3.5: Zgornje in spodnje meje efektivnih prostih dolžin pramen referenčnih preskusnih sider RCP/D in modificiranih tipov sider RCP/D-K, RCP/D-Z in RCP/D-I opornega zidu OZ-05.

Table 3.5: Upper and lower limits of apparent strand free lengths of comparative testing anchors RCP/D and modified anchor types RCP/D-K, RCP/D-Z and RCP/D-I of the retaining wall OZ-05.

Računska prosta dolžina l_{fr} [m]	Vezni del l_v [m]	Odrezni del l_{odr} [m]	SIA 267/I		EN 1537	
			$l_{f,min}$ [m] $0,95 \cdot l_{fr} + l_{odr}$	$l_{f,max}$ [m] $l_{fr} + 0,5 \cdot l_v + l_{odr}$	$l_{f,min}$ [m] $0,80 \cdot l_{fr} + l_{odr}$	$l_{f,max}^*$ [m]
10,0	7,0	0,23	9,73	13,73	8,23	13,73
15,0	7,0	0,23	14,48	18,73	12,23	18,73
28,0	7,0	0,23	26,83	31,73	22,63	31,73
28,0	7,0	0,33	26,93	31,83	22,73	31,83
28,0	2,2	0,23	28,83	29,33	22,63	31,03
28,0	2,2	0,33	26,93	29,43	22,73	31,13
30,4	4,6	0,23	29,11	32,93	24,55	33,67
30,4	4,6	0,33	29,21	33,03	24,65	33,77
30,4	2,2	0,23	29,11	31,73	24,55	33,67
30,4	2,2	0,33	29,21	31,83	24,65	33,77
32,8	2,2	0,23	31,39	34,13	26,47	36,31
32,8	2,2	0,33	31,49	34,23	26,57	36,41

Opomba: *..... $l_{f,max} = \max\{l_{fr} + l_{odr} + 0,5 \cdot l_v, (1,10 \cdot l_{fr} + l_{odr})\}$.

Pri preskusih nosilnosti prednapetih geotehničnih sider, pri katerih vsak pramen sidra napenjamo s svojo mononapenjalko, povezano v skupen hidravlično sinhroniziran sistem, o obnašanju veznih delov sider sklepamo le na podlagi vrednosti izvlečkov pramen, odčitanih na merilnikih pomikov pritrjenih na mononapenjalkah. Obseg razpoložljivih podatkov je zato omejen, prav tako v območje veznega dela sidra globoko v tleh zaledja nimamo fizičnega vpogleda v dejansko dogajanje, zato se pri končni presoji obnašanja prednapetega sidra pri PS ne opiramo le na mere lezenja k . Vrednosti k so nedvomno ključni kazalniki obnašanja prednapetega sidra med PS, vendar pa ni nujno, da je vsak izvleček pramen, izmerjen na glavi sidra, tudi dejansko posledica popuščenja veznega dela sidra. Zato smo pri analizi rezultatov PS vrednosti mer lezenja k posameznega pramena, iz vrednotene na stopnji sile P_i , vedno primerjali z rezultati ostalih pramen, kot tudi neposredno izmerjenimi vrednostmi trajnih izvlečkov Δs_{bl} in efektivnih prostih dolžin l_f , na katerih so se pramena pri spuščanju s trenutne stopnje sile P_i na raven začetne sile P_a krčila. Vse navedene vrednosti smo opazovali za vsak pramen kabla sidra posebej, poleg tega pa smo iste vrednosti spremljali tudi na ravni posameznih podsider (sidra tipov RCP/D-Z in RCP/D-I), kot tudi sidra kot celote. Iz tega razloga je bilo izrednega pomena, da smo že med izvedbo PS in VPN odčitane vrednosti takoj vpisovali v računalniško orodje (glej **dodatek C**), zaradi česar smo lahko ves čas PS in VPN sproti spremljali obnašanje sidra in se nanj tudi pravočasno odzvali (prekinitev ali podaljševanja opazovanja na posamezni stopnji sile P_i), v skrajnem primeru pa smo se pri VPN lahko še pravočasno odločili za prekinitev preskusa še predno je bil vezni del sidra povsem porušen.

V nadaljevanju tega poglavja so zbrane najpomembnejše ugotovitve in zaključki o obnašanju po posameznih tipih sider, medtem ko podrobnejši opis rezultatov preskušanj nosilnosti sider testnega polja doseženih leta 2008 podajamo v **dodatku B** disertacije: v **podpoglavju B.1.1** za sidra tipa RCP/D, **B.1.2** za sidra tipa RCP/D-K, **B.1.3** za sidra tipa RCP/D-Z in **B.1.4** za sidra tipa RCP/D-I.

3.5.3.1 Sidra RCP/D

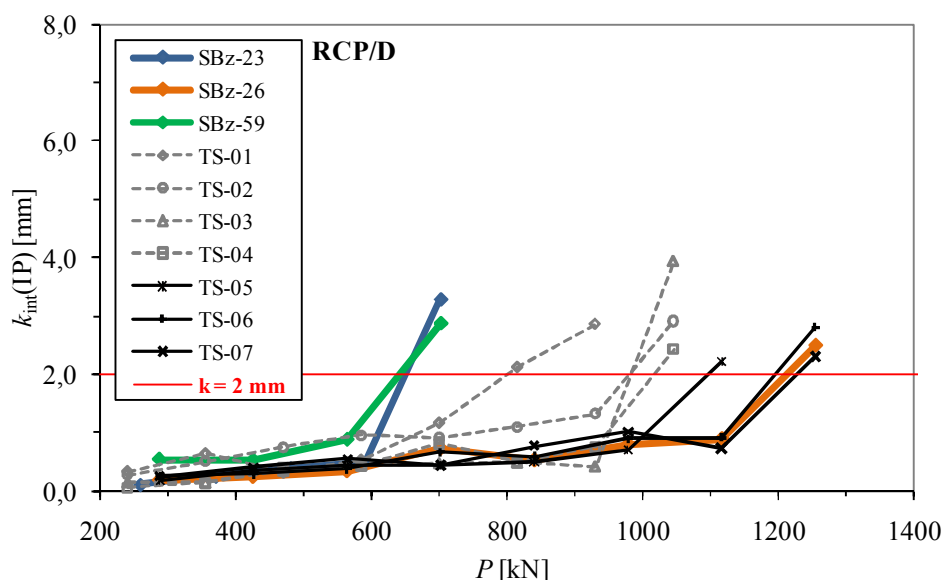
Na opornem zidu OZ-05 je bilo vgrajeno skupno deset referenčnih sider tipa RCP/D, na katerih so bile izvedene PS do porušitve: v sklopu gradnje objekta so bila preskušena štiri 5-pramenska (TS-01 do TS-04) in tri 6-pramenska referenčna sidra tipa RCP/D (TS-05 do TS-07), medtem ko so bila v območju testnega polja RRN na istem objektu vgrajena še tri 6-pramenska referenčna sidra (SBz-23, SBz-26 in SBz-59). Če povzamemo rezultate vseh naštetih PS referenčnega tipa sidra RCP/D, podrobneje podane v poglavju B.1.1 dodatka B disertacije, lahko ugotovimo, da se je v splošnem med izvedbo PS pojavil en pramen, katerega izvlečki so bili večji od izvlečkov ostalih pramen. Glede na tehnološko zasnov veznega dela sidra (prečni prerez 4-4 na sliki 3.6) v praksi spet sveženj pramen kabla sidra po spodnjem robu zaradi lastne teže nalega na rebrasto PE cev, zato je oblitje pramena v najbolj obremenjenem območju začetka veznega dela sidra, ki je v stiku z rebrasto PE cevjo, najslabše. Posledično ta pramen predstavlja šibki člen, saj je odpornost vezi na izvlek tega pramena s cementno injekcijsko maso v notranjosti PE ovoja najmanjša, zato zaradi slabe oblitosti pride do drobljenja injekcijske mase v okolici pramena, s čimer se poveča tudi efektivna prosta dolžina pramena l_f . V kolikor je kateri od golih pramen na začetnem območju veznega dela pramena kontaminiran z vazelinom (poglavje 3.3.5), potem se pogoji za prenos sile iz pramena v injekcijsko maso še poslabšajo. Iz istega razloga lahko pride do povečanja l_f ne le pri enem, pač pa pri več z vazelinom kontaminiranih pramenih.

Mejne vrednosti, ki določajo območje dopustnih vrednosti efektivnih prostih dolžin l_f , kot so določene v dodatku C po enačbi (C.2) (SIA 267/I) oz. (C.3) (EN 1537), so za primere referenčnih sider RCP/D in ostalih treh tipov modificiranih sider zbrane v preglednici 3.5. Vrednosti l_f se nanašajo na vrednosti efektivne proste dolžine pri doseženi odpornosti na izvlek $l_f(R_a)$; ne glede na to, lahko iste meje uporabimo tudi pri oceni obnašanja sider med izvedbo PS. Natančnejši pregled diagramov na sliki B.1 dodatka B pokaže, da so vrednosti l_f pri referenčnih sidrih RCP/D RRN blizu spodnje meje (ali celo pod njo), kot jo določa SIA 267/I, v primeru sider SBz-23 in SBz-59 pa je ena vrednost l_f celo pod spodnjo mejo, kot jo določa EN 1537. Po drugi strani so vrednosti l_f pri referenčnih preskusnih sidrih opornega zidu OZ-05 (sliki B.2 in B.3) z eno izjemo znotraj dovoljenega območja efektivnih prostih dolžin, kot jih določata SIA 267/I in EN 1537. Končne merodajne vrednosti $l_f(R_a)$ so pri vseh obravnavanih PS RCP/D znotraj območij, kot jih določata SIA 267/I in EN 1537.

Na podlagi povprečne vrednosti odčitkov izvlečkov pramen med PS vsakega sidra RCP/D smo za vsak časovni interval določili povprečno mero lezenja sidra (k_{1-5} za 5-pramensko oz. k_{1-6} za 6-pramensko sidro). Na vsaki stopnji sile P_i smo na podlagi teh povprečnih vrednosti k_{1-5} oz. k_{1-6} po metodi inženirske presoje (metodi IP), opisani v poglavju C.4 dodatka C, določili merodajne intervalne mere lezenja k_{int} (IP). Na sliki 3.22 je za vsako izvedeno PS referenčnega tipa RCP/D, podana po ena krivulja, ki ponazarja intervalne mere lezenja k_{int} (IP) tega sidra na različnih ravneh sile P_i . Na podlagi diagrama za sidra RCP/D na sliki 3.22 lahko podamo naslednje zaključke:

- Majhna odpornost na izvlek sidra SBz-23 je posledica hipne porušitve sidra po injekcijski masi, ki jo povezujemo z zakasnjanim zainjektiranjem sidra šele dva dni po vstavitvi sidra v vrtino.
- Tudi pri sidru SBz-59 je bila dosežena majhna odpornost na izvlek, ki je posledica popuščanja veznega dela pramena #1 že na ravni sile P_3 , v naslednji fazi pa je popustil še pramen #2.
- Eden od razlogov za doseženo manjšo odpornost na izvlek sidra TS-01 glede na primerljiva sidra TS-02 do TS-04 bi lahko bila povečana količina vgrajene cementne injekcijske mase pri tem sidru v deležu 20 do 50 % glede na ostala tri primerljiva sidra, ki je običajno posledica razpokanosti tal vzdolž vrtine.

- Dolžina veznega dela l_v vseh preskusnih sider objekta (TS-01 do TS-07) je enaka. Dolžina prostega dela l_{fr} 5-pramenskih sider TS-01 do TS-04 znaša 15 m, medtem ko znaša dolžina l_{fr} 6-pramenskih sider TS-05 do TS-07 le 10 m. Sidra TS-01 do TS-04 torej segajo globlje v nosilna tla zaledja, pri čemer se z globino nosilnostne karakteristike tal običajno izboljšujejo, posledično bi pričakovali boljše nosilnostne karakteristike sider (nižje vrednosti k in večje dosežene odpornosti na izvlek R_a). Zakaj v našem primeru temu ni tako lahko pripišemo večjemu številu pramen sider TS-05 do TS-07 (večja osna togost kabla sidra 6-pramenskih sider v primerjavi s 5-pramenskimi) in popuščanju posameznih pramen kabla sidra (t.j. izvlačenju posameznih pramen iz cementne injekcijske mase v notranjosti rebraste PE cevi med PS). Izvlačenje posameznega pramena iz injekcijske mase notranjosti PE ovoja sidra je bilo pri preskusnih sidrih TS-05 do TS-07 manj izrazito kot pri sidrih TS-01 do TS-04. Zaradi pojava izvlačenja posameznih pramen se ni mogla aktivirati celotna razpoložljiva odpornost na izvlek po zunanjem stiku sidra. Tako domnevo potrjuje tudi obnašanje sider vgrajenih v sklopu RRN (sidra SBz-23, SBz-26 in SBz-59), pri katerih je ravno sidro, pri katerem ni bilo opaziti znakov izvlačenja posameznega pramena, doseglo najnižje vrednosti k in največjo odpornost na izvlek R_a .



Slika 3.22: Intervalne mere lezenja določene po inženirski metodi (metoda IP) za vsa sidra RCP/D, vgrajena v oporni zid OZ-05.

Figure 3.22: Interval creep displacement rates defined after the engineering judgement method (IP method) for all RCP/D anchors installed in the retaining wall OZ-05.

Na podlagi odsekoma ravnih krivulj intervalnih mer lezenja $k_{int}(IP)$ sidra pri različnih ravneh sile P_i lahko na sliki (slika 3.22) odčitamo vrednosti sil na presečiščih teh krivulj s kritično mero lezenja $k_{krit} = 2,0$ mm, ki opredeljujejo odpornost sider na izvlek R_a preskusnih sider tipa RCP/D. Glede na to, da smo merodajne mere lezenja iz vrednotili po metodi inženirske presoje $k_{int}(IP)$, smo v preglednici 3.6 vrednosti odpornosti sider RCP/D na izvlek označili kot $R_a(IP)$. Povprečna vrednost odpornosti na izvlek vseh desetih preskusnih sider tipa RCP/D znaša 980 kN; povprečna odpornost na izvlek 6-pramenskih sider RCP/D je nekoliko večja – znaša 1004 kN, medtem ko je povprečna odpornost na izvlek 5-pramenskih sider RCP/D nekoliko manjša – znaša 944 kN.

Preglednica 3.6: Rezultati preiskav sider izvedenih na referenčnih preskusnih sidrih RCP/D testnega polja (sidra SBz) in preskusnih sidrih opornega zidu OZ-05 (sidra TS-01 do TS-07).

Table 3.6: Results of investigation tests on testing anchors performed on comparative testing anchors RCP/D of testing field (SBz anchors) and testing anchors of the retaining wall OZ-05 (anchors TS-01 to TS-07).

Oznaka sidra	Tip sidra	Datum preskusa	Vrsta preskusa	Starost IM	ŠP	P_{pv} [kN]	Zadnja stopnja sile	$P_{i,max}$ [kN]	R_a (IP) [kN]	$R_{a,povp}^{RCP/D}$ (IP) [kN]
SBz-23	RCP/D	09.04.08	PS	9	6	1254	5 / 10	702	651	835
SBz-26	RCP/D	19.05.08	PS	12	6	1254	8 / 8	1254	1211	
SBz-59	RCP/D	06.05.08	PS	12	6	1254	4 / 8	702	642	
TS-01	RCP/D	07.09.06	PS	18	5	1045	7 / 8	930	800	1042
TS-02	RCP/D	05.06.06	PS	17	5	1045	8 / 8	1045	979	
TS-03	RCP/D	07.08.06	PS	13	5	1045	8 / 8	1045	981	
TS-04	RCP/D	01.08.06	PS	11	5	1045	8 / 8	1045	1015	
TS-05	RCP/D	11.06.07	PS	11	6	1245	7 / 8	1116	1095	
TS-06	RCP/D	18.06.07	PS	19	6	1245	8 / 8	1254	1195	
TS-07	RCP/D	19.06.07	PS	11	6	1245	8 / 8	1254	1227	

Opombe: IMcementna injekcijska masa,
 ŠPštevilo pramen sidra,
 $P_{i,max}$ zadnja dosežena stopnja sile PS,
 R_a (IP)odpornost na izvlek izrednotena (na podlagi povprečne mere lezenja vseh pramen sidra) po metodi inženirske presoje (IP).

3.5.3.2 Sidra RCP/D-K

V sklopu testnega polja opornega zidu OZ-05 je bilo vgrajenih pet modificiranih 6-pramenskih sider tipa RCP/D-K z veznim delom l_v dolžine 7 m in prostim delom l_{fr} dolžine 28 m, ki so po zasnovi najbližje referenčnim sidrom RCP/D, s tem, da je bila osna togost njihovega veznega dela povečana z dodatnimi šestimi jeklenimi žicami premera 5 mm, vloženi v prazne prostore med pramena veznega dela sidra. Na enem od sider tega tipa smo izvedli PS do porušitve, na preostalih štirih pa VPN do prvih znakov popuščanja veznega dela sidra.

Podrobnejši opis rezultatov opravljenih preskušanj je podan v poglavju B.1.2 dodatka B. Navkljub podobnosti med referenčnimi sidri RCP/D in sidri povečane togosti veznega dela RCP/D-K primerjava rezultatov PS in VPN obeh tipov sider pokaže, da je bilo obnašanje sider RCP/D-K nekoliko drugačno od obnašanja referenčnih sider. Pri sidrih RCP/D se je med izvedbo PS pojavljal splošen problem enega pramena, katerega prirastki izvlečki so bili večji od prirastkov izvlečkov ostalih pramen, kar smo povezovali s tehnološko zasnovi veznega dela sidra. V primeru sider RCP/D-K takega pojava nismo opazili, se je pa zato na drugi strani v posameznih pramenih sidra pojavljal problem povečanega prirasta izvlečkov takoj po vnosu stopnje sile P_i . Pri sidrih RCP/D-K je praznega prostora, ki ga zapolni cementna injekcijska masa, med svežnjem pramen sidra kabla sidra in rebrasto PE cevjo, zaradi namestitve dodatnih jeklenih žic, bistveno manj, kar še posebej velja za območje stika prostega in veznega dela sidra (sliki 3.8 in 3.23), kjer so izvedeni tako izolacijski stiki pramen kot tudi izolacijski stik zunanega PE ovoja sidra. Rezultati izvedenih PS in VPN kažejo, da smo sicer uspeli doseči popolno zatesnitev PE ovoja sidra, vendar pa je bila notranjost PE ovoja na stiku rebraste in gladke PE cevi očitno prezapolnjena, zaradi česar je v tem območju pri vnosu sidrskih sil prišlo do določenega trenja.

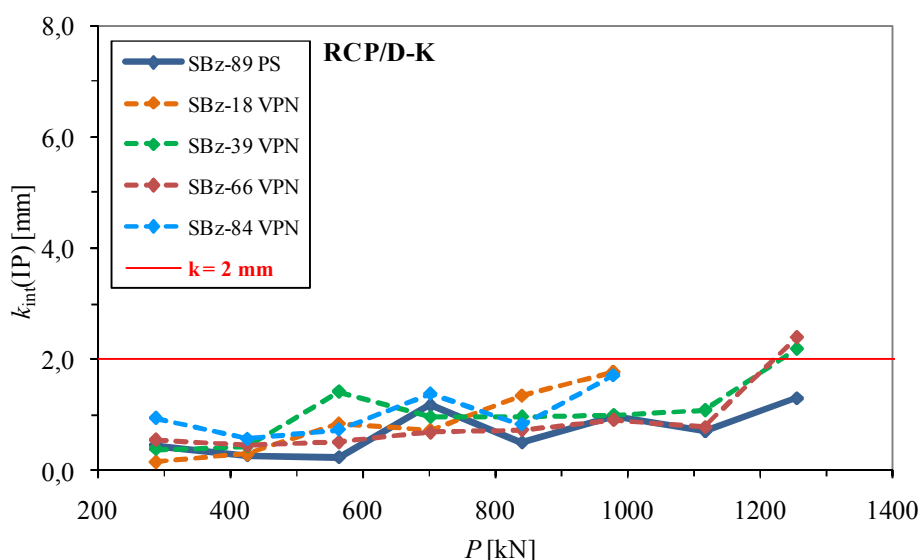


Slika 3.23: Detajl prehoda veznega dela v prosti del sidra RCP/D-K.

Figure 3.23: Detail view of transition between tendon bond and free length of an RCP/D-K anchor.

Pri pramenih sider tipa RCP/D-K, pri katerih se je pri vnosu stopnje sile P_i pojavljalo določeno trenje, ki se je izkazovalo v velikih prirastkih izvlečkov v prvih intervalih opazovanja na stopnji sile P_i (visoke vrednosti k), se je po razbremenitvi na začetno silo P_a praviloma odražalo na manjših dejanskih vrednostih elastičnih izvlečkov pri razbremenitvi (Δs_{el}), ki so posledično vplivale na krajše efektivne proste dolžine l_f . Do takega pojava je prihajalo na začetku PS oz. VPN, nato pa vpliv trenja ni bil več opazen, vrednosti $l_f(R_a)$ pramen pa so večinoma znotraj dovoljenega območja efektivnih prostih dolžin, kot jih določa *SIA 267/1*, vedno pa so znotraj območja, kot ga določa *EN 1537*.

Na podlagi odčitkov izvlečkov pramen med PS in VPN sider RCP/D-K smo za vsak časovni interval določili povprečno mero lezenja sidra k_{1-6} . Na vsaki stopnji sile P_i smo na podlagi teh povprečnih vrednosti k_{1-6} po metodi inženirske presoje določili merodajne intervalne mere lezenja $k_{int}(IP)$. Na **sliki 3.24** je za vsak izveden preskus sidra (PS oz. VPN) modificiranega tipa RCP/D-K, podana ena krivulja, ki ponazarja intervalne mere lezenja $k_{int}(IP)$ tega sidra na različnih ravneh sile P_i . Ugotovimo lahko, da se krivulje modificiranih sider RCP/D-K, v primerjavi s krivuljami referenčnih sider RCP/D na **sliki 3.22**, nahajajo nižje (torej so merodajne intervalne vrednosti mere lezenja $k_{int}(IP)$ nižje), pri čemer v nobenem primeru ni prišlo do popustitve veznega dela sidra RCP/D-K prej kot pri sili $P_6 = 978$ kN in to kljub temu, da smo na štirih sidrih izvajali VPN, kjer smo preskuse prekinili takoj po prvih znakih popuščanja veznega dela sider.



Slika 3.24: Intervalne mere lezenja določene po metodi IP za sidra RCP/D-K, vgrajena v oporni zid OZ-05.

Figure 3.24: Interval creep displacement rates defined after the IP method for RCP/K anchors installed in the retaining wall OZ-05.

Na podlagi krivulj intervalnih mer lezenja $k_{int}(IP)$ sidra na različnih ravneh sile P_i lahko iz vrednotimo presečišča teh krivulj s kritično mero lezenja k_{krit} , ki opredeljujejo odpornost sider na izvlek R_a . Glede na to, da smo merodajne mere lezenja iz vrednotili po metodi inženirske presoje, smo v **preglednici 3.7** vrednosti odpornosti sider RCP/D-K na izvlek označili kot $R_a(IP)$.

Preglednica 3.7: Rezultati preskušanj nosilnosti modificiranih prednapetih geotehničnih sider tipa RCP/D-K s povečano togostjo veznega dela sidra vgrajenih na testnem polju.

Table 3.7: Results of load bearing capacity testing of modified prestressed ground anchors of type RCP/D-K (increased stiffness of the bond anchor length) installed in the testing field.

Oznaka sidra	Tip sidra	Datum preskusa	Vrsta preskusa	Starost IM	ŠP	P_{pv} [kN]	Zadnja stopnja sile	$P_{i,max}$ [kN]	$R_a(IP)$ [kN]	$R_{a,povp}^{RCP/D-K}(IP)$ [kN]
SBz-89	RCP/D-K	09.05.08	PS	18	6	1254	8 / 8	1254	1254	1132
SBz-18	RCP/D-K	19.05.08	VPN	49	6	1254	6 / 8	978	978	
SBz-39	RCP/D-K	23.05.08	VPN	16	6	1254	8 / 8	1254	1231	
SBz-66	RCP/D-K	13.05.08	VPN	20	6	1254	8 / 8	1254	1220	
SBz-84	RCP/D-K	12.05.08	VPN	20	6	1254	6 / 8	978	978	

Opombe: PS preiskava sidra,
 VPN večstopenjski preskus napenjanja,
 IM cementna injekcijska masa,
 ŠP število pramen sidra,
 $R_a(IP)$... odpornost na izvlek iz vrednotena (na podlagi povprečne mere lezenja vseh pramen sidra) po metodi inženirske presoje (IP).

Primerjava odpornosti na izvlek $R_a(IP)$ doseženih na testnem polju opornega zidu OZ-05, iz vrednotenih pri PS oz. VPN referenčnih sider RCP/D in sider s povečano togostjo veznega dela RCP/D-K, podanih v **preglednicah 3.6** in **3.7**, kaže, da so sidra tipa RCP/D-K dosegala večje odpornosti na izvlek od sider RCP/D. Še višjo nosilnost vezi pramen z injekcijsko maso bi lahko dosegli, v kolikor bi bil premer reb-raste PE cevi večji in bi v veznem delu zagotovili debelejši sloj injekcijske mase okoli vseh jeklenih žic in pramen, s čimer bi preprečili drobljenje injekcijske mase, ki se pojavlja v območjih zgoščenih žic in pramen (Hutchinson in Diederichs, 1996).

3.5.3.3 Sidra RCP/D-Z

V okviru testnega polja opornega zidu je bilo vgrajenih pet modificiranih 6-pramenskih sider RCP/D-Z, ki po konceptu oblikovanja veznega dela temeljijo na patentu Barleya (glej **poglavje 3.3.3**), le da se pri sidrih RCP/D-Z vsa podsidera nahajajo v skupnem PE ovoju. Kabel sider je razdeljen na tri podsidera s po dvema pramenoma, katerih dolžina golih pramen v veznem delu podsider je znašala 2,2 m, medtem ko so dolžine prostih delov podsider l_{fr} znašale 28 m (podsidero A), 30,4 m (podsidero B) oz. 32,8 m (podsidero C). Na enem od sider smo izvedli PS do porušitve, na preostalih štirih pa VPN do prvih znakov popuščanja veznih delov sider, pri čemer je podrobnejši opis rezultatov preskušanj podan v **poglavju B.1.3 dodatka B**. Primerjava rezultatov PS in VPN sider RCP/D-Z z rezultati referenčnih sider RCP/D, kot tudi z modificiranimi sidri s povečano togostjo veznega dela tipa RCP/D-K, pokaže, da je bilo obnašanje sider RCP/D-Z bistveno slabše, saj so vezni deli sider popustili pri nižjih stopnjah sile VPN in PS, prav tako je bil v vseh primerih prisoten mehanizem popuščanja veznega dela pramen po notranjem stiku sidra. Na začetku PS oz. VPN smo takoj po vnosu sile običajno na enem pramenu izmerili prirastke izvlečkov večje od prirastkov izvlečkov ostalih pramen, kar smo povezovali s pojavom trenja.

Iz opisov obnašanja sider v poglavju B.1.3 izhaja, da je v vseh primerih sider RCP/D-Z prišlo do popuščanja vezi pramen s cementno injekcijsko maso v notranjosti rebraste PE cevi, v nekaterih primerih pa so bila posamezna pramena tudi fizično izvlečena. Logična posledica namestitve dveh veznih delov pramen podsidera drug ob drugega (slika 3.12(c)) je, da začetek nastanka razpok v injekcijski masi ob enem pramenu zaradi neposredne bližine avtomatsko pomeni poškodbe in oslabitev injekcijske mase ob drugem pramenu. Barley podsidera oblikuje iz dveh pramen, pri čemer v svojih člankih (1995, 1997a) navaja, da za doseganje polne odpornosti na izvlek zadostuje že zalitje pramen na dolžini 1 do 1,5 m, a zaradi večje varnosti za prakso predlaga dolžine veznih delov podsider med 2 in 3 m. Iz patenta Barleya (patent številka EP 0 356 215 A2, datum objave prijave 28.02.1990) je razvidno, da je Barley predvidel namestitev zaščitnih cevi na vsak pramen sidra posebej, pri čemer pa iz patenta ni jasno, kolikšna je minimalna predvidena debelina oblitja posameznega pramena z injekcijsko maso.

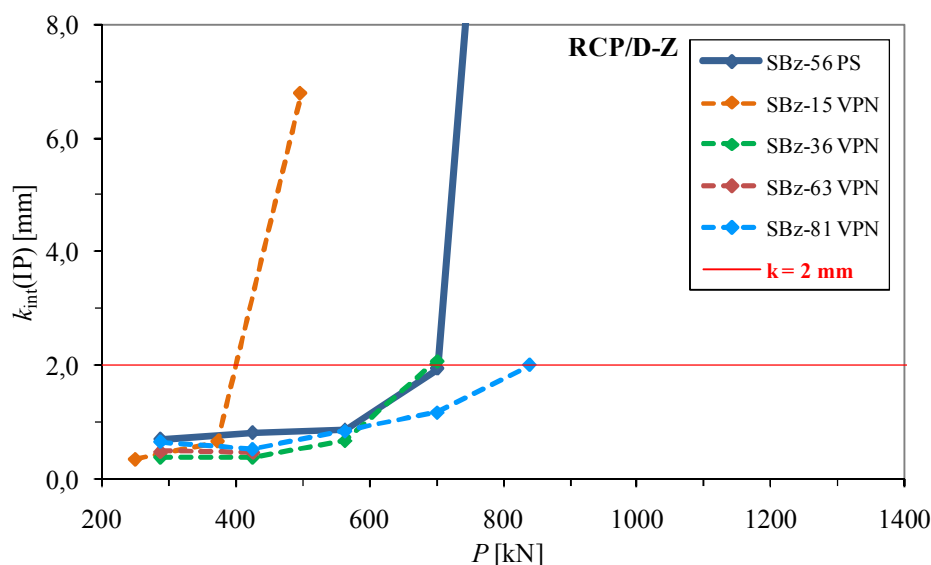
Najverjetnejši razlog za majhne odpornosti sider tipa RCP/D-Z na izvlek je v oblikovanju veznih delov podsider sider RCP/D-Z, pri katerih nismo imeli na voljo posebnega notranjega distančnika, ki bi zagotavljal žagasti potek golih veznih delov pramen (angl. general nodding) v smislu izmeničnega pahljačastega prostorskega razširjanja in stiskanja pramen, ki se sicer uporablja pri referenčnih sidrih tipa RCP/D in se v praksi izvede s spenjanjem pramen med notranimi distančniki. Za takšno oblikovanje veznega dela sider sta sicer Adams in Littlejohn (1997) eksperimentalno potrdila, da je najbolj učinkovit način zagotavljanja prenosa sidrskih sil s pramen v injekcijsko maso veznega dela sider v šibkih kamninah. Le nekoliko manj učinkovito je lokalno razširjanje žic pramen, ki pa morajo biti za doseganje zadostne učinkovitosti za vsa pramena z istim veznim delom izvedena v istem območju veznega dela. Sicer je eksperimentalne raziskave vezi med prednapetim sidrom in okoliško kamnino v smislu nastanka razpok v veznem delu sidra izvajal tudi Jirovec (1995), ki je na treh tipih sider izvedel praktične preskuse, nakar je sidra z injekcijsko maso izvlekel ter pregledal vzorec razpok. Nastanek razpok je pojasnil z različnimi raztezki in nateznimi trdnostmi jekla sidra in injekcijske mase, pri čemer je že pri majhnih sidrskih silah raztezek jekla večji od raztezkov, ki v injekcijski masi povzročajo prekoračitev razpoložljive natezne trdnosti, zaradi česar nastanejo prve razpoke. Pri porastu sil, s tem pa tudi raztezkov, se pojavljajo nove razpoke. Ker vsak nastanek razpok prinaša povečanje prostornine, poleg razmikanja (dilatacije) v razpokanem delu veznega dela pride tudi do efekta zagozdenja, s čimer je preprečeno nadaljnje izvlečenje sidra iz injekcijske mase. V notranjosti rebraste PE cevi je bil steber strjene injekcijske mase, zaradi prostih delov sosednjih pramen, oplaščenih v PE cevi, ki zmanjšujejo objetje v injekcijski masi veznega dela (slika 3.12(b)), oslabiljen, zaradi česar razmikanje (dilatacija) vzdolž zgornjih dveh podsider A in B ni bilo preprečeno, prav tako pa ni moglo priti do efekta zagozdenja, zato je vzdolž celotne dolžine veznega dela popustila vez jeklenih pramen z injekcijsko maso.

Edini ukrep, ki smo ga za zagotovitev čimboljše vezi pramen z injekcijsko maso izvedli – pramena podsider so bila spiralno zavita (slika 3.12(c)) – očitno ni bil dovolj učinkovit, da bi preprečil popustitev vezi pramen z injekcijsko maso. Poleg tega se je izkazalo, da je pri sidrih s prameni tako kratkih veznih delov, kot so se pojavljali pri sidrih RCP/D-Z, ključnega pomena brezhibno stanje površine žic pramen, ki mora biti brez kakršnihkoli sledov kontaminacije s snovmi, ki slabijo vez pramen z injekcijsko maso.

Ob predpostavkah, da pogoji tal ob steni vrtine niso bili zelo spremenljivi ter da so pogoji znotraj PE rebraste cevi sider RCP/D-Z zaradi najmanjše oblitosti in manjše obodne togosti (stopnje objetja) v neposredni bližini pramen podsidera A najslabši (največja zapolnjenost s prostimi deli sosednjih pramen podsider B in C), bi pričakovali, da bo pri preskusu vedno najprej popustilo podsidero A. Primeri sider SBz-36 in SBz-81, verjetno pa tudi pri sidrih SBz-15 in SBz-63, kažejo, da je vzrok za popuščanje

veznih delov pramen podsider iskati tudi drugje. Predvidevamo, da je pri teh sidrih prišlo do lokalne kontaminacije golih veznih delov pramen podsider z vazelinom (glej poglavje 3.3.5), ki so bili precej kratki – bolj ob spodnji meji za prakso predlaganih dolžin Barleya – zaradi česar v primeru kontaminirane površine žic ostane malo preostalega veznega dela pramena, na katerem se lahko vrši prenos natezne sile pramena na cementno injekcijsko maso, obenem pa tak pojav zelo neugodno vpliva na mehanizem progresivnega popuščanja veznega dela.

V kolikor na pramenih sider RCP/D-Z niso bili opazni znaki dejanskega izvlečenja pramen, so bile efektivne proste dolžine pramen $l_f(R_a)$ bodisi znotraj dovoljenega območja efektivnih prostih dolžin, kot jih določa *SIA 267/1*, ali tik pod spodnjo mejo, vedno pa so bile znotraj območja, kot ga določa *EN 1537*. Na podlagi odčitkov izvlečkov pramen med PS vsakega sidra RCP/D-Z smo za vsak časovni interval določili povprečno mero lezenja sidra ($k_{1,5}$ za 5-pramensko oz. $k_{1,6}$ za 6-pramensko sidro). Na vsaki stopnji sile P_i smo na podlagi teh povprečnih vrednosti $k_{1,5}$ oz. $k_{1,6}$ po metodi IP določili merodajne intervalne mere lezenja $k_{int}(IP)$. Na **sliki 3.25** je za vsako izvedeno PS oz. VPN sider RCP/D-Z, podana po ena krivulja, ki ponazarja intervalne mere lezenja $k_{int}(IP)$ sidra na različnih ravneh sile P_i .



Slika 3.25: Intervalne mere lezenja določene po metodi IP za sidra RCP/D-Z, vgrajena v oporni zid OZ-05.

Figure 3.25: Interval creep displacement rates defined after the IP method for RCP/Z anchors installed in the retaining wall OZ-05.

Slika 3.25 z diagramom odvisnosti merodajnih intervalnih mer lezenja $k_{int}(IP)$ od stopnje sile P_i pri PS oz. VPN potrjuje manjše odpornosti na izvlek modificiranih sider tipa RCP/D-Z v primerjavi z modificiranimi sidri RCP/D-K in referenčnimi sidri RCP/D. Na podlagi take krivulje intervalnih mer lezenja $k_{int}(IP)$ lahko za vsako sidro iz vrednotimo presečišče krivulje s kritično mero lezenja k_{krit} , ki opredeljuje odpornost sidra na izvlek $R_a(IP)$. Za sidra tipa RCP/D-Z smo vrednosti $R_a(IP)$ zbrali v **preglednici 3.8**. Ugotovimo lahko, da je do popuščanj veznih delov sider RCP/D-Z prihajalo pri bistveno manjših silah kot pri ostalih dveh tipih sider (RCP/D in RCP/D-K), pri čemer so vezni deli sider SBz-15, SBz-63 in SBz-56 zaradi izvleka pramen podsider iz injekcijske mase znotraj rebraste PE cevi popolnoma popustili.

Preglednica 3.8: Rezultati preskušanj nosilnosti modificiranih prednapetih geotehničnih sider tipa RCP/D-Z (zaporedno nameščeni kratki vezni deli podsider) vgrajenih na testnem polju.

Table 3.8: Results of load bearing capacity testing of modified prestressed ground anchors of type RCP/D-Z (successively positioned anchor units short bond lengths) installed in the testing field.

Oznaka sidra	Tip sidra	Datum preskusa	Vrsta preskusa	Starost IM	ŠP	P_{pv} [kN]	Zadnja stopnja sile	$P_{i,max}$ [kN]	R_a (IP) [kN]	$R_{a,povp}^{RCP/D-Z}$ (IP) [kN]
SBz-56	RCP/D-Z	09.05.08	PS	12	6	1254	5 / 8	840	702	620
SBz-15	RCP/D-Z	19.05.08	VPN	50	5	1116	3 / 8	497	400	
SBz-36	RCP/D-Z	23.05.08	VPN	16	6	1254	4 / 8	702	694	
SBz-63	RCP/D-Z	13.05.08	VPN	21	6	1254	3 / 8	564	469	
SBz-81	RCP/D-Z	12.05.08	VPN	20	6	1254	5 / 8	840	837	

Opombe: PS / VPN..... preiskava sidra / večstopenjski preskus napenjanja,
 IM..... cementna injekcijska masa,
 ŠP..... število pramen sidra,
 $P_{i,max}$ zadnja dosežena stopnja sile PS,
 R_a (IP)..... odpornost na izvlek izrednotena (na podlagi povprečne mere lezenja vseh pramen sidra) po metodi inženirske presoje (IP).

3.5.3.4 Sidra RCP/D-I

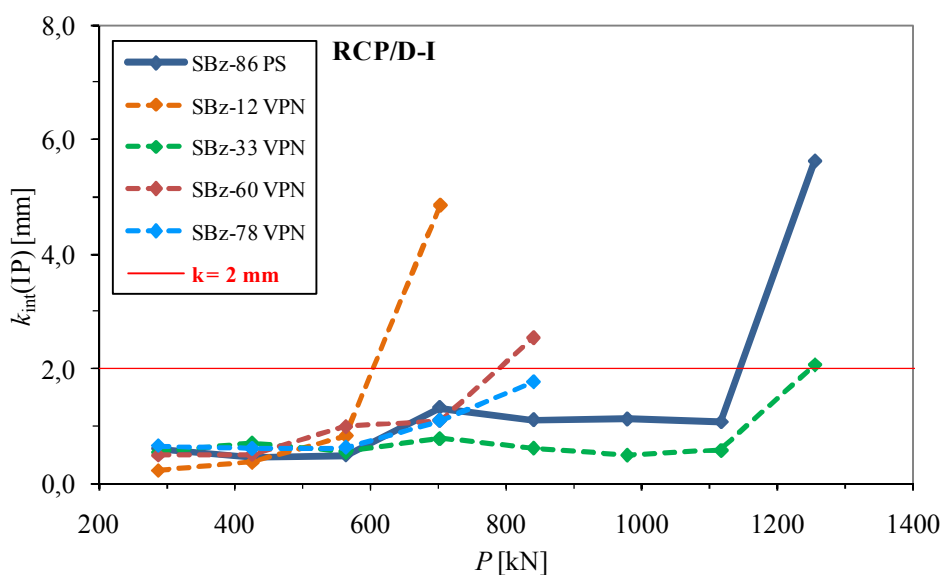
V oporni zid OZ-05 je bilo vgrajenih tudi pet modificiranih 6-pramenskih sider RCP/D-I, oblikovanih po izhodiščih patenta Škrabla (patent številka 21320, datum objave prijave 30.04.2004) in ki vključujejo prednosti obeh sistemov modificiranih sider RCP/D-K in RCP/D-Z. Tudi kabel teh sider je razdeljen na tri podsidera s po dvema pramenoma, pri čemer pa se dolžine podsider spreminjajo: pri podsidru A je znašala dolžina golih pramen veznega dela $l_{v,A} = 7$ m, dolžina pramen prostega dela je bila $l_{fr,A} = 28$ m, pri podsidru B sta znašali dolžini $l_{v,B} = 4,6$ m in $l_{fr,B} = 30,4$ m, pri podsidru C pa $l_{v,C} = 2,2$ m in $l_{fr,C} = 32,8$ m. Podrobnejši opis obnašanja teh sider in dobljenih rezultatov je podan v poglavju B.1.4, pri čemer primerjava rezultatov PS in VPN sider RCP/D-I z rezultati referenčnih sider RCP/D, kot tudi z modificiranimi sidri s povečano togostjo veznega dela tipa RCP/D-K pokaže, da je bilo obnašanje sider RCP/D-I slabše, a na drugi strani vseeno boljše kot pri modificiranih sidrih tipa RCP/D-Z (v dveh od petih primerov smo sidri lahko obremenili do preskusne sile, pa tudi v ostalih primerih smo dosegli eno stopnjo sile več). Tako pri sidrih RCP/D-Z, kot tudi pri sidrih RCP/D-I, so v podobni meri razvidni pari pramen podsider. Zanimivo je, da je do izrazite popustitve prvega pramena podsidera vedno prišlo v podsidru C (sidra SBz-12, SBz-60 in SBz-78) z najkrajšim prostim delom, pri čemer je bil v teh primerih mehanizem popuščenja veznega dela sider enak kot pri sidrih RCP/D-Z (popuščenje po notranjem stiku sidra). Pri podsidru A je bila v zgornjem območju $l_{v,A}$ (prvih 2,2 m) oblitost pramen veznega dela najmanjša, najmanjša pa je bila tudi obodna togost v neposredni bližini pramen, vendar pa je bilo pod njim še srednje območje $l_{v,A}$, kjer sta bila oblitost in obodna togost že nekoliko večja, pod njim pa je bil še spodnje območje $l_{v,A}$, ki je bilo neokrtnjeno in oblikovano kot pri sidru RCP/D. Pri podsidru B je bila oblitost in obodna togost manjša le v zgornji polovici veznega dela tega podsidera $l_{v,B}$, v spodnji polovici $l_{v,B}$ pa je bil vezni del podsidera oblikovan kot pri sidrih RCP/D. Tako oblikovanje podsider A in B je omogočalo prenos obremenitev iz manj ugodnega zgornjega območja veznega dela podsidera, kjer je bilo objetje manjše, v ugodnejše spodnje območje veznega dela podsidera, zaradi česar znaki izvlačanja pramen podsider A in B niso bilo opazni. Tudi v primeru sider RCP/D-I ocenjujemo, da je bil najverjetnejši razlog za izrazitejšo izvlačanje enega pramena podsidera C (sidra SBz-12, SBz-60 in SBz-78) kontaminacija golih pramen veznega dela podsidera z vazelinom.

Poleg razlogov za manjšo učinkovitost veznih delov pramen, opisanih že pri sidrih RCP/D-Z, je po naši oceni slabše obnašanje veznih delov pramen sider RCP/D-I tudi posledica zasnove in izdelave izolacijskih stikov prostih in veznih delov pramen (slika 3.15(b)): izbrani način izdelave stikov je sicer učinkovito preprečil vdor injekcijske mase in morebitne izcedne vode v območje pramen prostega dela sidra, vendar pa je bitumen v takšnem stiku mehak. Zaradi tega v injekcijski masi znotraj rebraste PE cevi lahko pride do pojava razpok zaradi delovanja cepilnih napetosti, saj v tem lokalnem območju ni zagotovljeno učinkovito objetje, ki bi preprečevalo, da se strjena injekcijska masa (z omejeno natezno trdnostjo) ne bi razcepila. Poleg tega moramo upoštevati tudi dejstvo, da so bili izolacijski stiki tudi geometrijsko precej veliki, zato je bil "steber" strjene injekcijske mase, zaradi številnih veznih delov drugih pramen v neposredni bližini znotraj rebraste PE cevi, lokalno močno oslabljen. Zaradi kombinacije lokalno slabšega objetja in manjšega deleža strjene injekcijske mase na mestih izolacijskih stikov, je na teh mestih najprej prišlo do pojava razpok že pri relativno nizkih sidrskih silah, pri povečanju sidrskih sil pa je masa močnejše razpokala, zato na teh mestih prenos sile s pramen preko injekcijske mase v tla zaledja lokalno ni bil več mogoč.

V ostalih dveh primerih (sidri SBz-33 in SBz-86) smo v sidro uspeli vnesti preskusno silo $P_{pv} = 1254$ kN, na koncu pa je bila mera lezenja presežena v petih oz. šestih pramenih. Glede na celotno sliko obnašanja sidra, predvsem pa istega velikostnega reda trajnih izvlečkov pramen ter nizke izmerjene vrednosti izolacijske upornosti po preskusu ($R_I = 0,020$ M Ω), ki kaže na poškodbo zaščitnega PE ovoja sidra, domnevamo, da je pri sidru SBz-33 prišlo do popustitve kabla sidra kot celote, medtem ko je bil mehanizem porušitve sidra SBz-86 kombiniran (opazni so znaki izvlečenja pramen podsindra C, prav tako pa so bile tudi pri ostalih pramenih izmerjene visoke vrednosti trajnih izvlečkov). Rezultati torej kažejo, da bi odpornost sider na izvlek tipa RCP/D-I lahko povečali s kakšnim od možnih ukrepov, s katerim bi mehansko razmaknili žice pramen veznega dela sidra, zaradi česar bi se izboljšala sprijemnost med injekcijsko maso in žicami pramen v notranjosti PE rebraste cevi sidra. V manjši meri pa bi odpornost na izvlek lahko povečali tudi že samo s podaljšanjem dolžine veznega dela pramen podsindra C.

V kolikor na pramenih sider RCP/D-I niso bili opazni znaki očitnih zdrsov ali dejanskega izvlečenja pramen, so bile učinkovite proste dolžine pramen $l_f(R_a)$ bodisi znotraj dovoljenega območja učinkovitih prostih dolžin, kot jih določa SIA 267/1, ali tik pod spodnjo mejo, vedno pa so bile znotraj območja, kot ga določa EN 1537.

Na podlagi povprečnih vrednosti odčitkov izvlečkov pramen med PS in VPN vsakega od sider tipa RCP/D-I smo za vsak časovni interval določili povprečno mero lezenja sidra (k_{1-6}). Na vsaki stopnji sile P_i smo na podlagi teh povprečnih vrednosti k_{1-6} po metodi IP določili merodajne intervalne mere lezenja $k_{int}(IP)$. Na sliki 3.26 je za vsak izveden preskus (PS oz. VPN) modificiranega sidra tipa RCP/D-I, podana po ena krivulja, ki ponazarja intervalne mere lezenja $k_{int}(IP)$ tega sidra na različnih ravneh sile P_i . Diagram potrjuje manjše dosežene odpornosti na izvlek modificiranih sider tipa RCP/D-I, glede na modificirana sidra RCP/D-K in referenčna sidra RCP/D, medtem ko so na drugi strani opazne večje odpornosti na izvlek $R_a(IP)$ od modificiranih sider RCP/D-Z. Na podlagi teh krivulj intervalnih mer lezenja $k_{int}(IP)$ sider RCP/D-I smo iz vrednotili presečišča teh krivulj s kritično mero lezenja $k_{krit} = 2$ mm, ki opredeljujejo odpornost sider na izvlek $R_a(IP)$ in smo jih za vsa sidra tipa RCP/D-I zbrali v preglednici 3.9.



Slika 3.26: Intervalne mere lezenja določene po metodi IP za sidra RCP/D-I, vgrajena v oporni zid OZ-05.

Figure 3.26: Interval creep displacement rates defined after the IP method for RCP/I anchors installed in the retaining wall OZ-05.

Preglednica 3.9: Rezultati preskušanj nosilnosti modificiranih prednapetih geotehničnih sider tipa RCP/D-I (s spremenljivo togostjo vzdolž veznega dela sidra) vgrajenih na testnem polju.

Table 3.9: Results of load bearing capacity testing of modified prestressed ground anchors of type RCP/D-I (variable stiffness along anchor bond length) installed in the testing field.

Oznaka sidra	Tip sidra	Datum preskusa	Vrsta preskusa	Starost IM	ŠP	P_{pv} [kN]	Zadnja stopnja sile	$P_{i,max}$ [kN]	R_a (IP) [kN]	$R_{a,povp}^{RCP/D-I}$ (IP) [kN]
SBz-86	RCP/D-I	09.05.08	PS	18	6	1254	8 / 8	1254	1144	925
SBz-12	RCP/D-I	21.05.08	VPN	50	6	1254	4 / 8	702	604	
SBz-33	RCP/D-I	21.05.08	VPN	15	6	1254	8 / 8	1254	1248	
SBz-60	RCP/D-I	14.05.08	VPN	19	6	1254	5 / 8	840	789	
SBz-78	RCP/D-I	13.05.08	VPN	21	6	1254	5 / 8	840	840	

Opombe: PS / VPN..... preiskava sidra / večstopenjski preskus napenjanja,
 IM..... cementna injekcijska masa,
 ŠP..... število pramen sidra,
 R_a (IP)..... odpornost na izvlek izrednotena (na podlagi povprečne mere lezenja vseh pramen sidra) po metodi inženirske presoje (IP).

Kot je razvidno iz preglednice 3.9 je do popuščanj veznih delov sider RCP/D-I v splošnem prihajalo pri bistveno manjših silah kot pri tipih sider RCP/D in RCP/D-K, na drugi strani pa pri večjih silah kot pri sidrih RCP/D-Z: vrednosti R_a (IP) sider SBz-33 in SBz-86, pri katerih domnevamo, da je popustil kabel sidra kot celota, so primerljive z vrednostmi doseženimi pri sidrih RCP/D in RCP/D-K (za natančnejšo opredelitev med temi tremi tipi sider bi potrebovali statistično bistveno večji vzorec opravljenih preskusov nosilnosti sider), medtem ko so na drugi strani dosežene vrednosti R_a (IP) sider SBz-12, SBz-60 in SBz-78 (pri katerih je v podsidru C vedno prišlo do izrazite popustitve enega pramena podsidra), še vedno višje kot pri sidrih RCP/D-Z.

3.5.3.5 *Mehanizmi popuščanja veznih delov sider*

Potencialnih možnosti popuščanja veznih delov sider je več, pri čemer bo po principu najšibkejšega člena verige prevladal tisti mehanizem, ki se pojavi pri najmanjši sili. Vrste in pojavnost posameznih mehanizmov so odvisne tako od zasnove veznega dela sider in pramen, morebitne kontaminacije golih pramen v veznem delu, dimenzij sestavnih komponent sider, njihovega oblikovanja in razporeditve kot tudi od globine vgradnje veznih delov sider, detajlov izvedbe in čiščenja vrtine ter predvsem faze injektiranja. Na podlagi analize in medsebojne primerjave rezultatov PS in VPN, opravljenih na sidrih RCP/D, RCP/D-K, RCP/D-Z in RCP/D-I, smo dobili osnovni vpogled v obnašanje veznih delov ter aktiviranju rušenega mehanizma različnih tipov trajnih prednapetih električno izoliranih pramenskih sider. Ugotovili smo, da pri tipih sider, obravnavanih v tej disertaciji, pri katerih so vsa pramena kabla sidra vgrajena v skupni PE ovoj in so bila hkrati napeta s hidravlično sinhroniziranimi napenjalkami, obstajajo naslednje možnosti popustitve veznega dela prednapetega pramenskega geotehničnega sidra:

a. Porušitev v notranjosti rebraste PE cevi

Pri sidrih s kratkimi veznimi deli pramen tipa RCP/D-Z in RCP/D-I, še posebej pa v primerih kontaminacije površine pramen (sliki 3.15 in 3.16), je prevladoval mehanizem **izpuljenja posameznih pramen iz injekcijske mase v notranjosti rebraste PE cevi**: tak mehanizem zlahka prepoznamo, saj mere lezenja k pramena, katerega vezni del popušča, na ravni sile P_i v nekem časovnem trenutku hipoma narastejo in od takrat naprej ostanejo visoke, medtem ko vrednosti k ostalih pramen ostanejo medsebojno primerljive in istega velikostnega reda kot prej. Po razbremenitvi z zadnje dosežene stopnje sile na raven začetne sile P_a so vrednosti trajnih izvlečkov Δs_{bl} pramen s popuščenim veznim delom vsaj za nekaj 10 % višje od Δs_{bl} ostalih pramen. V primerih, ko vezni del porušenega pramena povsem popusti in se začne tudi fizično izvlačiti, se to odraža v efektivni prosti dolžini krajši od predpisanega območja ($l_f < l_{f,min}$).

Pri sidrih, katerih vezni deli pramen so enako dolgi in katerih pramena kabla sidra so z vseh strani dobro oblitna s slojem injekcijske mase, je pričakovati mehanizem **hkratnega izpuljenja vseh pramen kabla sidra iz notranjosti rebraste PE cevi**: v tem primeru hipen porast mer lezenja k nastopi pri vseh pramenih kabla sidra hkrati, vrednosti trajnih izvlečkov Δs_{bl} vseh pramen so visoke, a vse istega velikostnega reda. Da bi se tak mehanizem lahko pojavil, morajo biti vezi vseh pramen kabla z injekcijsko maso dovolj močne, kar zagotovi oblitost prostorov med posameznimi prameni (5 mm po Littlejohn, 1993) kot tudi med prameni in zaščitno rebrasto PE cevjo z dovolj debelim slojem injekcijske mase (5 mm po EN 1537). Čeprav bi tak mehanizem zaradi zasnove veznih delov pramen pričakovali pri sidrih tipov RCP/D in RCP/D-K, je bila zaradi naleganja kabla veznega dela sidra na rebrasto PE cev (prerez 4-4 na sliki 3.6) oblitost spodnjih pramen nezadostna, da bi se lahko tak mehanizem razvil v celoti, zato je prej prišlo do izpuljenja spodnjih pramen iz injekcijske mase. Ocenjujemo, da je do razvoja tega mehanizma prišlo pri sidru SBz-23, ki je bilo zainjektirano šele dva dni po vstavitvi v vrtino, zaradi česar je v tleh okoli vrtine že prišlo do konsolidacije napetostnega stanja. Posledično je bilo objetje veznega dela sidra v radialni smeri nezadostno, da bi preprečilo pojav cepilnih sil, zaradi česar je prišlo do hipne popustitve vezi pramen z injekcijsko maso (porušitev veznega dela sidra s pokom).

b. Porušitev rebraste PE cevi

Porušitev po plastiki rebraste PE cevi je teoretično možna, vendar dokazov, da bi pri nas do take porušitve v praksi res kdaj prišlo, še nismo našli. V primeru take porušitve bodo izmerjene vrednosti izolacijske upornosti R_f zaradi popolnega pretrga PE cevi enake nič oz. izredno nizke (velikostnega reda nekaj k Ω), pričakovati pa bi bilo tudi zelo podobne vrednosti Δs_{bl} in l_f vseh pramen. Glede na to, da je kakovost vsake šarže rebrastih PE cevi sistematično kontrolirana, ter da je izbrana oblika vala cevi takšna, da je stena cevi pretežno tlačno stisnjena med valoviti površini notranje in zunanje strjene cementne injekcijske mase, ocenjujemo, da je verjetnost pojava takega mehanizma precej majhna.

c. Porušitev izven rebraste PE cevi

V veznem delu sider se sila iz pramen kabla sidra preko injekcijske mase prenaša v tla zaledja, zato se z večanjem razdalje v radialni smeri (od pramen navzven) zmanjšuje velikost adhezijskih napetosti v vezeh in strižnih napetosti v materialih. Iz tega razloga do porušitev izven telesa sidra (t.j. izven rebraste PE cevi veznega dela) običajno prihaja le v primerih, ko je nosilnost posamezne plasti tega območja omejena. Prvi potencialni šibki sloj predstavlja cementna injekcijska masa, katere trdnost je podobnega velikostnega razreda kot je trdnost injekcijske mase v notranjosti PE cevi. Zaradi tega do porušitve **porušitve injekcijske mase v prstanastem prostoru med rebrasto PE cevjo in steno vrtine** prihaja v primerih slabo izvedenega zainjektiranja, kot je npr. odtekanje injekcijske mase v razpokah in kavernoznih tleh, redčenje in izpiranje injekcijske mase v tleh z intenzivnim dotokom zaledne vode, ali pa nezadostna zapolnjenost vrtin sider vgrajenih pod minimalnim kotom (slika 3.27).



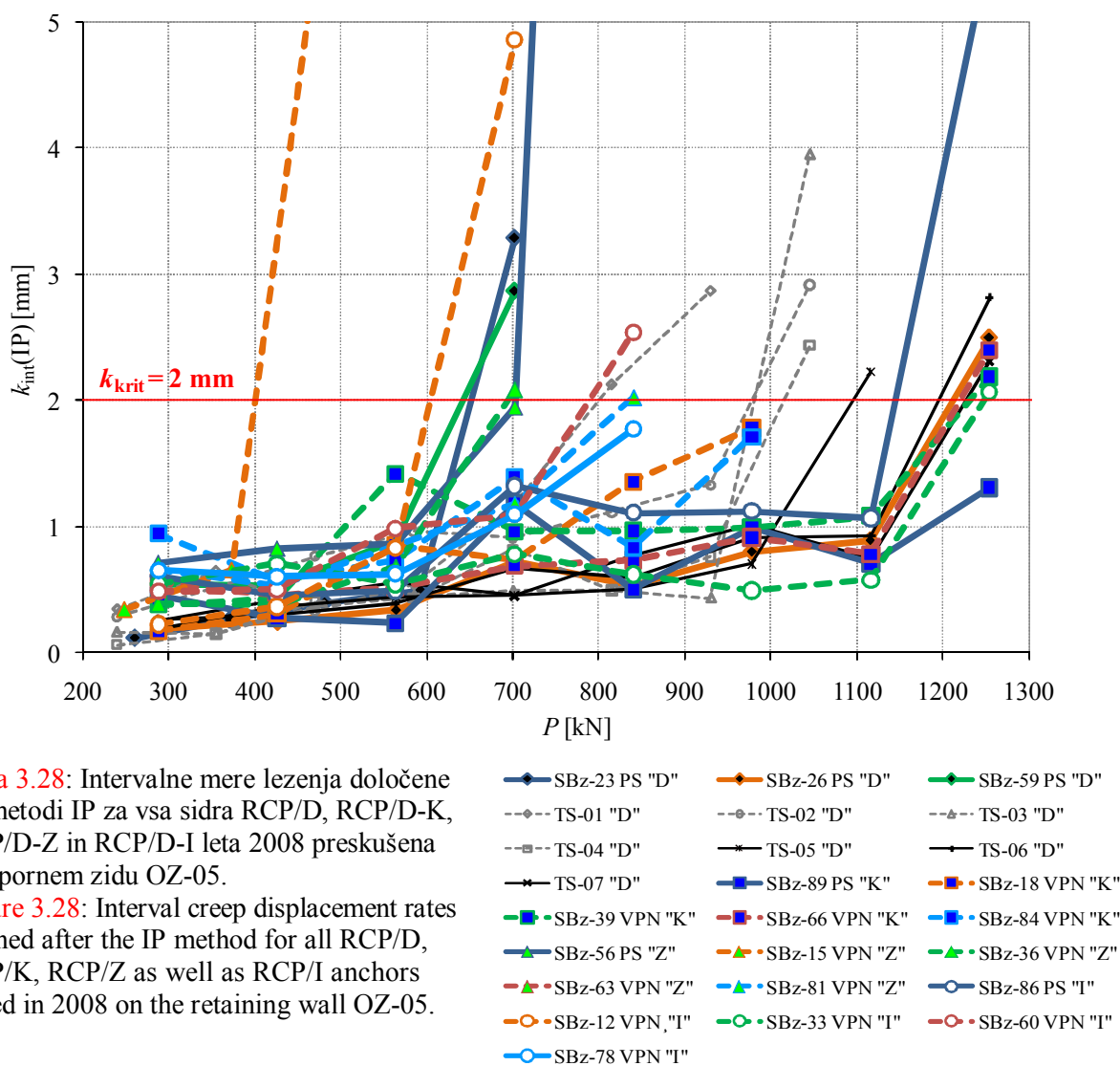
Slika 3.27: Izvlečeno slabo zainjektirano trajno prednapeto geotehnično sidro, vgrajeno pod kotom 5°.
Figure 3.27: Pulled-out permanent prestressed ground anchor poorly grouted under angle of 5°.

Zadnje potencialno šibko plast predstavlja stena vrtine ali pa plast tal neposredno ob steni vrtine. Do porušitev tal ob steni vrtine prihaja v primerih, ko zaradi ne dovolj izpihane notranjosti vrtine in dovolj očiščene stene vrtine, izpiranja izvrtanin z vodo med vrtanjem v tleh občutljivih na vodo ali vrtanja v trdnih vezivnih tleh s cevljenjem (zagladitev vrtine) pride do **zdrsa strjene injekcijske mase ob steni vrtine**. V primerih enakomerno granuliranih ali rahlih nevezljivih tal predstavlja najšibkejši člen veznega dela sidra sloj tal neposredno ob vrtini, kar še posebej velja v primerih, ko ni bilo izvedeno učinkovito poinjektiranje veznega dela sidra. Ocenjujemo, da v nobenem od sider, vgrajenih na objektu OZ-05, ni prišlo do porušitve izven rebraste PE cevi.

Čeprav končno porušitev veznega dela sidra običajno pripisujemo enemu mehanizmu, se moramo zavedati, da pri obravnavanih prednapetih pramenskih sidrih zaradi same zasnove sider in različnih modulov elastičnosti pramen in injekcijske mase, kot tudi nizke natezne trdnosti injekcijske mase, v njej vedno prihaja do pojava razpok. V začetni fazi PS se torej lahko vzporedno pojavlja več mehanizmov, na kar v primerih uporabe sider s kratkimi veznimi deli opozarja tudi Barley (1997c).

3.5.3.6 Primerjava rezultatov preskusov nosilnosti sider RCP/D in različnih tipov modificiranih sider RCP/D-K, RCP/D-Z in RCP/D-I, dobljenih po metodi IP

Za potrditev ugotovitev podanih na podlagi rezultatov PS in VPN referenčnih sider RCP/D, kot tudi modificiranih sider RCP/D-K, RCP/D-Z in RCP/D-I, preskušanih leta 2008 na testnem polju objekta OZ-05, smo intervalne mere lezenja $k_{int}(IP)$ vseh sider, dobljene na podlagi povprečnih izvlečkov vseh pramen kabela sidra, prikazali v istem diagramu (slika 3.28). Da bi bila preglednost najpomembnejšega spodnjega dela diagrama večja, smo ordinato odrezali nad območjem $k_{int}(IP) = 5$ mm, saj je na ta način spodnje (za našo oceno pomembno) območje pod mejo k_{krit} bolj pregledno, medtem ko natančna lega zadnjih točk odrezanih krivulj ni bistvena (vezni deli teh sider so nedvomno že popolnoma popustili).



Slika 3.28: Intervalne mere lezenja določene po metodi IP za vsa sidra RCP/D, RCP/D-K, RCP/D-Z in RCP/D-I leta 2008 preskušena na opornem zidu OZ-05.

Figure 3.28: Interval creep displacement rates defined after the IP method for all RCP/D, RCP/K, RCP/Z as well as RCP/I anchors tested in 2008 on the retaining wall OZ-05.

Na sliki 3.28 so prikazani rezultati za vsa preskušena sidra, zaradi česar je spodnji del diagrama zelo zapolnjen s prekrivajočimi se krivuljami. Z veliko pozornosti lahko iz diagrama dobimo splošni vtis v razmerja odpornosti na izvlek med posameznimi tipi sider. Generalno gledano so bile najboljše karakteristike odpornosti veznih delov sider (torej največje dosežene sile P ob čim nižjih vrednostih merodajnih mer lezenja k_{int}) dosežene pri modificiranih sidrih tipa RCP/D-K s povečano togostjo veznega dela sider (krivulje z modrimi točkami), ki so nekoliko presegle karakteristike odpornosti na izvlek veznih delov

referenčnih sider RCP/D. Kot nenavadno lahko ocenimo relativno hitro odpoved referenčnih sider RCP/D testnega polja pri PS (sidri SBz-23 in SBz-59), katerih vezna dela sta odpovedala že pri sili $P_4 = 700$ kN, torej je bilo njuno obnašanje slabše tako od vseh sedem preskusnih sider RCP/D objekta, kot tudi od večine sider tipa RCP/D-I (SBz-33, SBz-60, SBz-78 in SBz-86) ter celo od sidra SBz-81 tipa RCP/D-Z. Na drugi strani so večkratna sidra z zamaknjenimi veznimi deli tipa RCP/D-Z izkazovala najslabše karakteristike veznih delov sider, saj so že pri nizkih preskusnih silah na vezi z injekcijsko maso popustili vezni deli posameznih pramen, kar se izraža v visokih vrednostih merodajnih mer lezenja k .

Na podlagi vseh izvedenih PS in VPN lahko zaključimo, da je povečanje togosti veznega dela trajnih prednapetih električno izoliranih pramenskih geotehničnih sider koristno in se je odražalo v povečanju odpornosti na izvlek sider R_a celo v relativno dobrih pogojih sidranja testnega polja opornega zidu OZ-05. Obenem se pojavlja vprašanje, zakaj so odpornosti na izvlek modificiranih sider RCP/D-K le nekoliko presegle odpornosti na izvlek referenčnih sider RCP/D? Odgovor na to vprašanje se skriva v osni togosti kabla sidra c_A , ki jo izračunamo po izrazu:

$$c_A = \frac{A_t \cdot E_p}{l}, \quad (3.7)$$

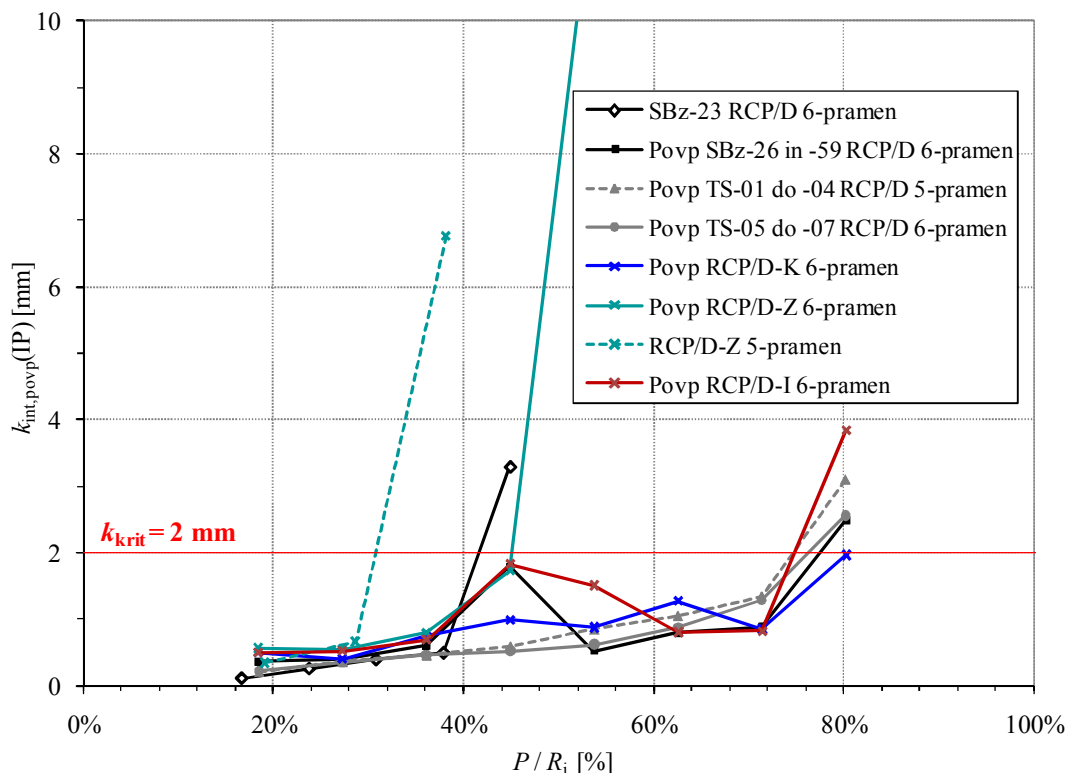
kjer predstavljajo: A_t površino prečnega prereza pramen kabla sidra, E_p modul elastičnosti pramen in l dolžino kabla sidra. Iz izraza (3.7) je jasno razvidno, da v kolikor povečamo le prečni prezek kabla sidra A_t se to odraža v linearnem povečanju osne togosti kabla sidra. V primeru 6-pramenskih sider RCP/D-K z nazivno površino prečnega prereza kabla sidra 840 mm^2 , smo zaradi omejenega nezasedenega votlega prostora med prameni in zaščitno rebrasto PE cevjo lahko dodali le šest jeklenih žic premera 5 mm približne površine prečnega prereza 119 mm^2 , s čimer se je površina kabla sidra povečala le za dobrih 14 %, za kolikor se je tudi povečala osna togost veznega dela sidra.

Na podlagi vrednosti $R_a(\text{IP})$ navedenih v preglednici 3.6 za sidra RCP/D in preglednici 3.7 za sidra RCP/D-K lahko izračunamo povprečne vrednosti $R_a(\text{IP})$ za oba tipa sider: v kolikor upoštevamo vseh deset rezultatov sider RCP/D, dobimo povprečno vrednost $R_a(\text{IP})_{\text{D,povp}} = 980$ kN, medtem ko pri sidrih RCP/D-K dobimo povprečno vrednost $R_a(\text{IP})_{\text{K,povp}} = 1132$ kN. Povprečna dosežena odpornost na izvlek $R_a(\text{IP})_{\text{K,povp}}$ sider s povečano togostjo veznega dela RCP/D-K v danem primeru presega povprečno doseženo odpornost na izvlek $R_a(\text{IP})_{\text{D,povp}}$ referenčnih sider RCP/D za 16 %.

Razlog za bistveno boljše obnašanje veznih delov sider RCP/D-K od obnašanja sider RCP/D-Z pri PS in VPN na testnem polju se po naši oceni skriva tudi v poteku pramen v veznem delu sider: pri sidrih tipa RCP/D-K so bila vsa pramena na istih ekvidistantnih razdaljah večkrat nekoliko stisnjena in razširjena, s čimer je bil v veznem delu sider dosežen minimalen žagast potek pramen, medtem ko pri sidrih RCP/D-Z zaradi kratkega veznega dela podsida brez posebnih distančnikov takega žagastega poteka ni bilo možno zagotoviti (iz slike 3.12(c) je razvidno, da sta bila pramena v veznem delu le enkrat stisnjena na sredini in razširjena na sami konici podsida). Zaradi tega so se znaki popuščanja posameznih pramen v obliki izvlačanja iz injekcijske mase v notranjosti rebraste PE cevi pojavili že pri bistveno manjših silah, kot v primeru pramen sider RCP/D-K. Do podobnih ugotovitev sta prišla tudi Adams in Littlejohn (1997), ki sta največjo izvlečno odpornost na izvlek veznih delov sider dosegla prav v primerih, ko je bil potek vseh pramen enakomerno žagast vzdolž celotne dolžine veznega dela sidra.

Za končno primerjavo smo na sliki 3.29 pripravili diagram, v katerega smo za preskušanja, opravljena leta 2008 na opornem zidu OZ-05, vnesli povprečne intervalne mere lezenja vseh sider istega tipa, števila

pramen in dolžin, določene po metodi IP $k_{int,povp}(IP)$ za referenčna sidra, kot tudi modificirana sidra RCP/D-K, RCP/D-Z in RCP/D-I. V diagram smo jih vrisali v odvisnosti od stopnje sile normalizirane s porušno silo po pramenih kabla sidra $R_i = A_t \cdot R_m$ (A_t je površina prečnega prereza pramen kabla sidra, R_m pa nazivna natezna trdnost jekla pramen). Za razliko od [slike 3.28](#) [slika 3.29](#) podaja jasnejšo sliko vpogleda v obnašanje posameznega tipa sider, vendar pa še vedno vidno izstopa prikaz rezultatov PS sidra SBz-23. PS tega sidra je bila zaradi pričakovane predčasne popustitve sidra izvedena z drugačno razdelitvijo stopenj sil (deset namesto šest), do česar je nato v praksi žal tudi prišlo (prezgodnja hipna porušitev veznega dela tega sidra s pokom zaradi porušitve vezi na stiku z injekcijsko maso).



Slika 3.29: Povprečne intervalne mere lezenja določene po metodi IP za referenčna sidra in modificirana sidra v odvisnosti od stopnje sile, normalizirane z odpornostjo po jeklu sider (preskušanja na opornem zidu OZ-05 opravljena leta 2008).

Figure 3.29: Average interval creep displacement rates defined after the IP method for reference and modified anchors in relation to the load level, normalised with the internal anchor resistance (testings performed on the OZ-05 retaining wall in 2008).

Iz diagrama na [sliki 3.29](#) je opaziti porast intervalnih mer lezenja v območju okoli 40 % dosežene notranje odpornosti sider po pramenih, kar bi lahko bila tudi posledica lokalne kontaminiranosti pramen s protikorozijskim sredstvom ([poglavje 3.3.5](#)). Sidra RCP/D-Z s kratkimi veznimi deli pramen so ob tem popustila, medtem ko so daljši vezni deli vseh pramen (sidra RCP/D in RCP/D-K) ali večjega dela pramen sider RCP/D-I omogočali tudi prenos obremenitev v nižje območje veznih delov pramen, kjer je bila nosilnost vezi sidra s tlemi boljša, kar se izkazuje v nižjih vrednostih intervalnih mer lezenja. Končna raven dosežene sile v pramenih potrjuje, da je bila dosežena odpornost na izvlek veznih delov sider RCP/D-Z najmanjša, medtem ko so bile odpornosti na izvlek ostalih treh tipov sider opazno večje, pri čemer naj bi bile nosilnostne karakteristike sider RCP/D-I nekoliko slabše, sider RCP/D-K pa nekoliko boljše od referenčnih sider RCP/D.

Za potrditev te ugotovitve bomo za rezultate PS in VPN, dobljene leta 2008 na testnem polju, z uporabo statističnih metod preverili, ali izračunane povprečne vrednosti odpornosti na izvlek, dobljene po metodi IP posameznih tipov sider, podane v preglednicah 3.6 do 3.9, statistično značilno odstopajo med seboj. Vedno bomo medsebojno primerjali po dva tipa sider, pri čemer za vsak vzorec i (tipa sidra) poznamo srednjo vrednost vzorca \bar{X}_i , varianco vzorca $S_{X_i}^2$ ter velikost vzorca n_i .

Postavimo:

- ničelno domnevo H_0 – pričakovani vrednosti populacij, iz katerih sta odvzeta vzorca, sta enaki:
 $m_{X_1} = m_{X_2}$,
- alternativno domnevo H_1 – pričakovani vrednosti populacij nista enaki: $m_{X_1} \neq m_{X_2}$.

Tveganje, da storimo napako I. vrste in zavrremo ničelno domnevo, čeprav ta velja, naj bo največ $\alpha = 0,05$.

V primerih, ko so slučajne spremenljivke X_i porazdeljene normalno $N(m_{X_i}, \sigma_{X_i})$, z neznanima in neenakima standardnima deviacijama σ_{X_i} , se statistika

$$T = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{S_{X_1}^{*2}}{n_1} + \frac{S_{X_2}^{*2}}{n_2}}} \quad (3.8)$$

porazdeljuje približno po porazdelitvi t z ν prostostnimi stopnjami, ki jih v tem primeru izračunamo z enačbo:

$$\nu = \frac{\left(\frac{S_{X_1}^{*2}}{n_1} + \frac{S_{X_2}^{*2}}{n_2}\right)^2}{\frac{(S_{X_1}^{*2}/n_1)^2}{n_1-1} + \frac{(S_{X_2}^{*2}/n_2)^2}{n_2-1}} \quad (3.9)$$

Kritično območje (območje zavrnitve ničelne domneve) je v tem primeru $(-\infty, -t_{1-\alpha/2}] \cup [t_{1-\alpha/2}, \infty)$. Če je vrednost statistike T bodisi manjša od $-t_{1-\alpha/2}$ ali večja od $t_{1-\alpha/2}$, ničelno domnevo H_0 zavrremo in s stopnjo značilnosti α trdimo, da sta pričakovani vrednosti statistično značilno različni.

Iz preglednice 3.10 je razvidno, da se variance posameznih vzorcev med seboj precej razlikujejo. Za povprečne vrednosti odpornosti na izvlek dobljene po metodi IP posameznih tipov sider smo za različne kombinacije tipov sider iz vrednotili vrednosti statistik T in prostostnih stopenj ν kot tudi mejne vrednosti $t_{0,975,\nu}$, ki za vsak primer posebej določajo meji kritičnega območja. V skrajno desnem stolpcu preglednice 3.10 smo zapisali, ali se vrednosti statistike T nahajajo v kritičnem območju (t.j. območju zavrnitve ničelne domneve). V večini primerov kombinacij posameznih tipov sider lahko ugotovimo, da statistika T ne leži v območju zavrnitve ničelne domneve, torej domneve H_0 s tveganjem $\alpha = 0,05$ ne moremo zavrniti, zaradi česar ne moremo trditi, da povprečni vrednosti odpornosti na izvlek dobljeni po metodi IP nista enaki. Na drugi strani pa smo ugotovili, da sta povprečni vrednosti odpornosti na izvlek, dobljeni po metodi IP, sider tipov:

- RCP/D-K in RCP/D-Z statistično različni;
- RCP/D in RCP/D-Z statistično različni, kar velja tako v primerih, ko v vzorca obeh tipov sider zajamemo vsa sidra (5-pramenska in 6-pramenska) ali pa se omejimo le na 6-pramenska sidra. Statistične značilne različnosti nismo ugotovili pri sidrih RCP/D_{RRN} v primerjavi s sidri RCP/D-Z oz. RCP/D-Z₆, kar pripisujemo velikemu raztrosu doseženih odpornosti na izvlek treh sider RCP/D, ki je posledica nepričakovano hitre odpovedi sider SBz-23 in SBz-59.

Preglednica 3.10: Preskušanje domnev o razlikah pričakovanih vrednosti v primerih neznanih in različnih varianc za tipe sider, preskušene na testnem polju.

Table 3.10: Hypotheses testing of the difference between means when the variances are unknown and unequal for the different anchor types, tested on the testing field.

1. vzorec				2. vzorec				Statistika T	Prostostne stopnje ν	Meja KO $t_{0,975,\nu}$	$ T > t_{0,975,\nu}$
Tip sidra	\bar{X}_1	$S_{X_1}^{*2}$	n_1	Tip sidra	\bar{X}_2	$S_{X_2}^{*2}$	n_2				
RCP/D _{vsi}	980	47770	10	RCP/D-K	1132	19965	5	-1,629	11,794	2,201	NE
RCP/D _{vsi}	980	47770	10	RCP/D-Z	620	32622	5	3,379	9,692	2,262	DA
RCP/D _{vsi}	980	47770	10	RCP/D-Z ₆	676	23256	4	2,955	8,126	2,306	DA
RCP/D _{vsi}	980	47770	10	RCP/D-I	925	70263	5	0,398	6,831	2,447	NE
RCP/D ₆	1004	78598	6	RCP/D-K	1132	19965	5	-0,984	7,627	2,365	NE
RCP/D ₆	1004	78598	6	RCP/D-Z	620	32622	5	2,735	8,565	2,306	DA
RCP/D ₆	1004	78598	6	RCP/D-Z ₆	676	23256	4	2,385	7,847	2,365	DA
RCP/D ₆	1004	78598	6	RCP/D-I	925	70263	5	0,476	8,809	2,306	NE
RCP/D _{RRN}	835	106240	3	RCP/D-K	1132	19965	5	-1,499	2,461	4,303	NE
RCP/D _{RRN}	835	106240	3	RCP/D-Z	620	32622	5	1,046	2,758	4,303	NE
RCP/D _{RRN}	835	106240	3	RCP/D-Z ₆	676	23256	4	0,784	2,663	4,303	NE
RCP/D _{RRN}	835	106240	3	RCP/D-I	925	70263	5	-0,406	3,617	3,182	NE
RCP/D-K	1132	19965	5	RCP/D-Z	620	32622	5	4,990	7,562	2,365	DA
RCP/D-K	1132	19965	5	RCP/D-Z ₆	676	23256	5	4,612	6,305	2,447	DA
RCP/D-K	1132	19965	5	RCP/D-I	925	70263	5	1,542	6,103	2,447	NE
RCP/D-Z	620	32622	5	RCP/D-I	925	70263	5	-2,123	7,056	2,365	NE
RCP/D-Z ₆	676	23256	4	RCP/D-I	925	70263	5	-1,770	6,509	2,447	NE

Opombe: RCP/D_{vsi}..... v vzorec je zajetih vseh deset sider tipa RCP/D (sedem na objektu in tri v sklopu RRN),
 RCP/D₆..... v vzorec so zajeta le 6-pramenska sidra tipa RCP/D,
 RCP/D_{RRN}... v vzorec so zajeta le tri sidra, izvedena v sklopu RRN,
 RCP/D-Z₆... v vzorec so zajeta le 6-pramenska sidra tipa RCP/D-Z,
 Meja KO meja kritičnega območja, t.j. območja zavrnitve ničelne domneve.

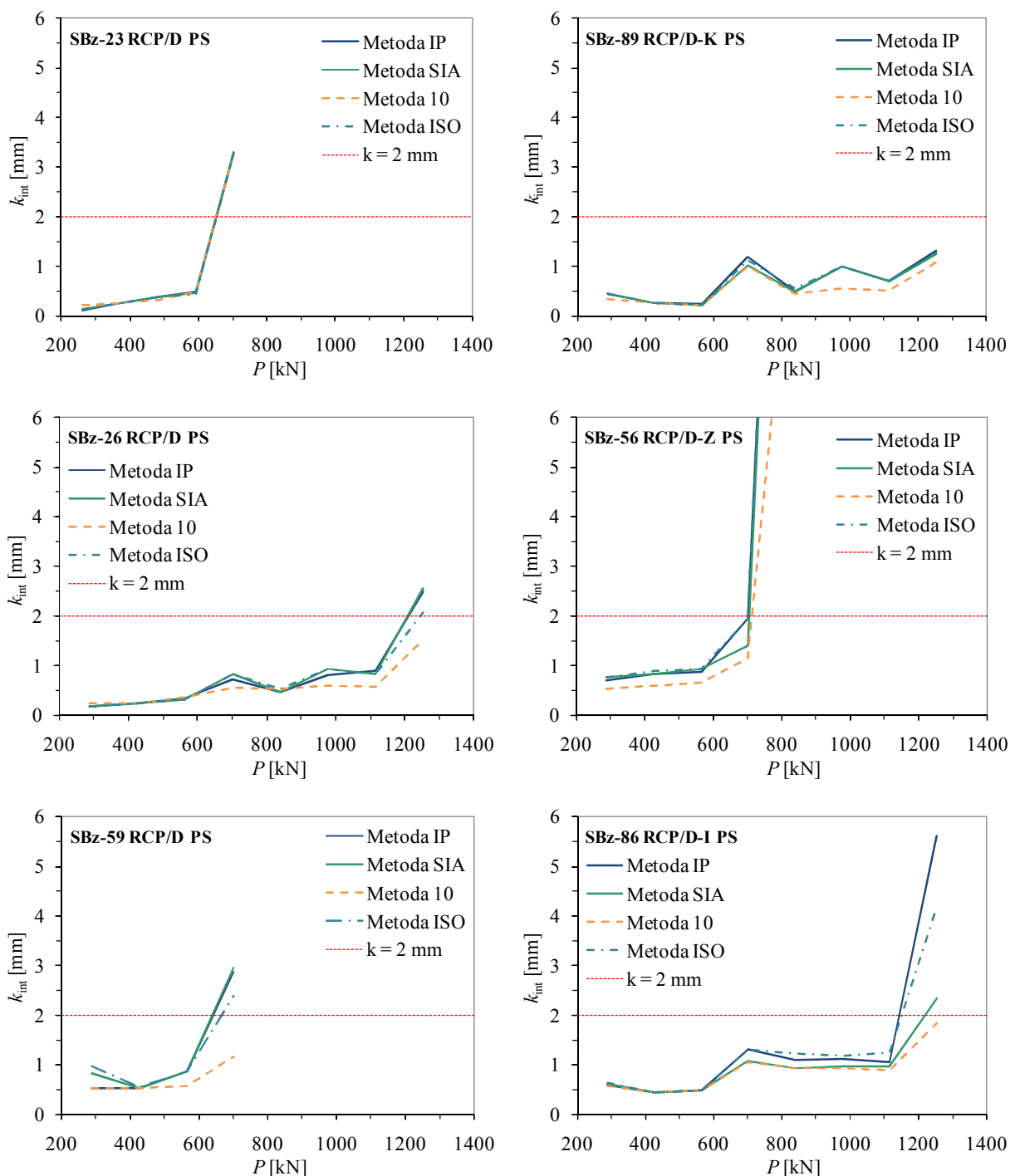
Primerjava rezultatov preskušanja domneve o pričakovani vrednosti z diagramoma na slikah 3.28 in 3.29 torej kaže, da je povprečna odpornost na izvlek sider RCP/D-Z statistično značilno manjša od povprečne odpornosti na izvlek referenčnih sider RCP/D, kot tudi sider s povečano togostjo veznega dela RCP/D-K. Nekoliko presenetljivo pa z uporabo statističnih metod nismo uspeli potrditi statistično značilne razliknosti povprečne odpornosti na izvlek sider RCP/D-I v primerjavi s sidri tipa RCP/D-Z, kot bi sicer lahko sklepali na podlagi vizualne primerjave krivulj v diagramih na slikah 3.28 in 3.29. Zato smo izračunali dejansko tveganje za zavrnitev ničelne domneve (pričakovani vrednosti populacij, iz katerih sta odvzeta vzorca, sta enaki), čeprav ta velja: za srednje vrednosti vzorcev sider tipov RCP/D-I in RCP/D-Z znaša tveganje 7,1 %, medtem ko za srednje vrednosti vzorcev sider tipov RCP/D-I in RCP/D-Z₆ znaša tveganje 12,3 %. V obeh primerih dobljeno tveganje res presega prag izbranega 5 % tveganja, kot smo ga določili pri postavitvi ničelne in alternativne domneve.

3.5.4 Vpliv metode določitve merodajnih mer lezenja na odpornosti na izvlek sider z različnimi koncepti veznih delov za preiskave sider opravljene leta 2008

Vse dosedanje ugotovitve so bile dobljene na podlagi vrednotenja posameznih mer lezenja pramen v vseh fazah PS in VPN po metodi inženirske presoje (IP), pri kateri smo merodajno intervalno vrednost lezenja k_{int} na posamezni stopnji sile P_i določili na podlagi inženirske izkustvene ocene, kolikšno število zadnjih odčitkov prirastkov izvlečkov pramena sidra odraža obnašanje njegovega veznega dela na tej stopnji sile P_i . Pri tej metodi strokovnjak, ki obdeluje rezultate PS in VPN, na podlagi izkušenj določi dolžino končnega intervala, na podlagi katere se izvede vrednost merodajne mere lezenja na tej stopnji sile $k_{\text{int}}(P_i)$. Do sedaj se je ta metoda v praksi izkazala kot operativno učinkovita, čeprav v literaturi še nismo zasledili primerjave, koliko na končno vrednost odpornosti na izvlek posameznega sidra R_a (seveda pri istih odčitkih izvlečkov pramen) vpliva število izbranih zadnjih odčitkov izvlečkov, na podlagi katerih se izvede vrednost merodajna intervalna vrednost lezenja posamezne stopnje sile $k_{\text{int}}(P_i)$. Te točke namreč v diagramu $k_{\text{int}} - P_i$ tvorijo odsekoma ravno krivuljo, katere presečišče z vodoravnico $k_{\text{krit}} = 2$ mm opredeljuje vrednost odpornosti sidra na izvlek R_a . Glede tega vprašanja so sedaj veljavni predpisi (z izjemo osnutka standarda *oSIST prEN ISO 22477-5*) precej nejasni, zato smo primerjali rezultate dobljene po nam znanih metodah (od najstarejše metode zadnjih desetih odčitkov – metoda 10, podane že v *DIN 4125* (1976), do najnovejših zahtev osnutka standarda *oSIST prEN ISO 22477-5*), pri čemer je natančnejši opis metod podan v poglavju C.4 dodatka C:

- **Metoda IP:** pri vsakem pramenu na vsaki stopnji sile glede na odčitane izvlečke pramena izberemo tiste zadnje intervale v diagramu $\Delta s - \log t$, ki se nahajajo na daljici med prvo in zadnjo točko intervala, katere naklon določa vrednost $k_{\text{int,IP}}(P_i)$.
- **Metoda SIA:** v kolikor je zadnji odčitek na stopnji sile P_i opravljen v 15', potem vrednost $k_{\text{int,SIA}}(P_i)$ določa časovni interval 5'-15', kasneje pa za vrednosti $k_{\text{int,SIA}}(P_i)$ do 1,0 mm upoštevamo zadnje štiri točke, nad to vrednostjo pa zadnjih osem točk, če se nahajajo na daljici med prvo in zadnjo točko intervala; v kolikor pa sidro popusti (mere lezenja višje od k_{krit}), potem v tem primeru vzamemo samo tistih nekaj zadnjih točk, ki ponazarjajo popustitev veznega dela sidra.
- **Metoda 10:** pri tej metodi vedno vzamemo merodajni časovni interval za določitev $k_{\text{int,10}}(P_i)$ tako, da je druga točka intervala za faktor deset večja od prve točke ($t_2 = 10 \cdot t_1$); v primerih, ko zaradi prekratkega opazovanja na posamezni stopnji sile P_i to ni bilo možno, smo to zahtevo upoštevali v največji možni meri (vzeli smo prvo in zadnjo točko opazovanega intervala).
- **Metoda ISO:** za določitev $k_{\text{int,ISO}}(P_i)$ merodajni interval vedno določajo zadnji trije odčitki na posamezni stopnji sile P_i , pri čemer pa so časovni trenutki, v katerih se izvajajo odčitki (1'-2'-3'-4'-5'-7'-10'-15'-20'-30'-45'-60'), drugačni kot po *SIA 267/I*, po kateri smo izvajali preskušanja na testnem polju (odčitki v 1'-2'-5'-10'-15'-20'... vsak nadaljnji odčitek na 5'); tudi v tem primeru nismo mogli v popolnosti upoštevati zahteve zadnjih treh točk po *oSIST prEN ISO 22477-5*, saj zaradi različnih zahtevanih trenutkov odčitkov nismo imeli vseh vrednosti (nismo imeli odčitkov v 3', 4' in 7'), smo se pa tej zahtevi v največji možni meri približali.

Na [sliki 3.30](#) za vsa sidra testnega polja opornega zidu OZ-05, na katerih so bile izvedene PS do porušitve veznih delov sider, podajamo diagrame z vrisanimi merodajnimi intervalnimi merami lezenja k_{int} , določenimi po vseh štirih zgoraj naštetih metodah. Primerjavo smo omejili le na PS, saj so bila le v teh primerih vsa sidra preskušena res do dosežene porušitve njihovega veznega dela, zato so dobljeni rezultati medsebojno primerljivi. Na ostalih sidrih testnega polja so bili izvedeni le VPN, a ne do dosežene popolne popustitve veznega dela, pač pa le do prvih znakov porušitve, zato vrednosti R_a ne moremo natančno določiti, pač pa jih lahko le ocenimo, zato sider z izvedenimi VPN nismo vključili v primerjavo.



Slika 3.30: Intervalne mere lezenja določene po metodi inženirske presoje (IP), po *SIA 267/1* (SIA), po *DIN 4125* (10) in po *oSIST prEN ISO 22477-5* (ISO) za vsa preskusna sidra testnega polja RCP/D, RCP/D-K, RCP/D-Z in RCP/D-I, na katerih so bile leta 2008 izvedene preiskave sidra do porušitve njihovih veznih delov.

Figure 3.30: Interval creep displacement rates defined after the engineering judgement method (IP), after the *SIA 267/1* (SIA), after the *DIN 4125* (10) and after the *oSIST prEN ISO 22477-5* (ISO) for all RCP/D, RCP/D-K, RCP/D-Z and RCP/D-I anchors of the testing field, on which investigation tests (up to the rupture of the anchors' bond lengths) have been performed in 2008.

V **preglednici 3.11** smo zbrali odpornosti sider na izvlek R_a , iz vrednotene pri PS kot presečišča odsekoma ravnih krivulj merodajnih mer lezenja dobljenih na podlagi povprečja vseh pramen z vodoravnico k_{krit} . Na osnovi primerov izvedenih PS do porušitve veznega dela – treh referenčnih sider RCP/D in po enega modificiranega sidra tipa RCP/D-K, RCP/D-Z in RCP/D-I – lahko podamo naslednje zaključke:

- Pri sidru SBz-23 tipa RCP/D smo praktično v vseh fazah PS opazovanje zaključili v minimalnem opazovalnem času, medtem ko je na zadnji stopnji sile P_5 sidro hipno popustilo takoj, ko je bila iz vrednotena prva mera lezenja (časovni interval 1'-2'). Pri takšnem obnašanju sidra so bili rezultati dobljeni po vseh metodah vrednotenja merodajnih intervalnih mer lezenja k_{int} praktično enaki.
- Rezultati preostalih petih PS kažejo, da vrednosti $k_{int,10}$ predstavljajo spodnjo ovojnico dobljenih krivulj, kar je pričakovan rezultat, saj z upoštevanjem dolgega časovnega intervala ($t_2 = 10 \cdot t_1$), na posamezni stopnji sile P_i , visoke končne vrednosti mer lezenja povprečimo z nižjimi vrednostmi na začetku opazovanja. Iz tega razloga vrednost $k_{int,10}$ na zadnji stopnji sile PS ni presegla kritične mere lezenja k_{krit} kar pri dveh sidrih ($1/3$ opazovanega vzorca): po metodi 10 sidri SBz-59 in SBz-86 teoretično gledano nista bili porušeni, čeprav je v obeh primerih evidentno prišlo do izvlečenja dveh pramen iz injekcijske mase v notranjosti rebrastih PE cevi. Rečemo lahko, da rezultati po metodi 10 v določenih primerih dajejo precenjene odpornosti sider na izvlek, in to celo v obliki neizkazane porušitve sidra, zato so na nevarni strani, metoda 10 pa iz tega razloga ni priporočljiva za uporabo v praksi.
- Pri PS sider SBz-23, SBz-89 in SBz-56 so bili opazovalni časi in obnašanje sider takšni, da so merodajni časovni intervali po metodi ISO sovpadali z intervali po metodah IP in SIA, zato smo v teh treh primerih dobili praktično identične vrednosti merodajnih intervalnih mer lezenja k_{int} . Iz preostalih treh PS (po eno sidro tipa RCP/D, RCP/D-Z in RCP/D-I) je razvidno, da je v rezultatih $k_{int,ISO}$ na nek način vsebovan vpliv povprečenja, sicer bistveno manj izrazit, kot pri metodi 10. Iz **preglednice 3.10** je razvidno, da je iz tega razloga pri sidru SBz-59 odpornost na izvlek po metodi ISO $R_{a,ISO}$ za 3,9 % večja od odpornosti na izvlek po metodi IP $R_{a,IP}$.
- Rezultati po metodi SIA so v splošnem zelo blizu rezultatom po metodi IP, izjema je le sidro SBz-86, pri katerem so rezultati po metodi SIA glede na rezultate po metodi IP na nevarni strani, saj so bile vrednosti odpornosti na izvlek večje za 6,6 %, za 5,9 % pa so bile odpornosti na izvlek večje tudi od rezultatov po metodi ISO.

Preglednica 3.11: Odpornosti sider na izvlek dobljene pri preiskavah sider leta 2008 kot presečišča odsekoma ravne krivulje merodajnih mer lezenja na podlagi povprečja vseh pramen s k_{krit} .

Table 3.11: Anchors pull-out resistances received in 2008 at investigation tests as the cross-sections of sectionally straight competent creep displacement curves (based on all strands average) with k_{krit} .

Metoda	$R_{a,SBz-23}$ RCP/D [kN]	$R_{a,SBz-26}$ RCP/D [kN]	$R_{a,SBz-59}$ RCP/D [kN]	$R_{a,SBz-89}$ RCP/D-K [kN]	$R_{a,SBz-56}$ RCP/D-Z [kN]	$R_{a,SBz-86}$ RCP/D-I [kN]
IP	651	1211	642	–	702	1144
SIA	652	1210	639	–	706	1219
10	651	–	–	–	714	–
ISO	652	1246	667	–	702	1151

Opomba: – krivulja merodajnih mer lezenja ne seka vodoravnice $k_{krit} = 2$ mm.

Kot kažejo rezultati z izbiro metode vrednotenja pri istih odčitkih izvlečkov pramen sidra vplivamo na končno vrednost odpornosti posameznega sidra na izvlek R_a . Vpliv je velik pri metodi 10, ki izvira iz starega *DIN 4125* (1976), kjer je interval zajema merodajne mere lezenja tako velik, da se končne visoke vrednosti k povprečijo z relativno nizkimi k začetnih odčitkov na posamezni stopnji sile, kar je še posebej nevarno pri tistih sidrih, pri katerih do porušitve veznega dela sidra pride hipoma pri daljših opazovalnih časih. V teh primerih bo lahko intervalna vrednost $k_{int,10}$ celo nižja od kriterija porušitve k_{krit} , čeprav vezni del sidra evidentno popusti, kar je zavajajoče in nevarno, zato te metode v praksi naj ne bi uporabljali. Rezultati ostalih treh metod (IP, SIA in ISO) so relativno blizu, na našem vzorcu opravljenih PS so se razlikovali do 7 %, kar je glede na majhen delež opravljenih PS na posameznem objektu, natančnost uravnavanja sil v sidrih in odčitavanja izvlečkov pramen ter spreminjajoče se pogoje tal na lokaciji sidranega objekta znotraj pričakovanega območja raztrosa doseženih odpornosti na izvlek R_a . V kolikor bo rezultate obdeloval strokovnjak z dolgoletnimi izkušnjami na tem področju, bodo rezultati najbolj točno opisovali dogajanje pri preskusu ob uporabi metode IP, saj bo lahko od primera do primera izkustveno opredelil in strokovno utemeljeno določil merodajno območje za določitev vrednosti k_{int} . Po drugi strani pa ta metoda pušča popolnoma odprte možnosti obdelave tudi manj izkušenemu strokovnjaku, ki bi ob uporabi te metode lahko dobil tudi zavajajoče rezultate – v takih primerih uporaba metode SIA ali metode ISO zagotavlja zanesljivejše vrednotenje rezultatov PS in manjše možnosti napačne presoje pri določitvi odpornosti na izvlek R_a .

3.6 PONOVI TEV PRESKUSOV NOSILNOSTI SIDER TESTNEGA POLJA LETA 2009

3.6.1 Opis izvedbe ponovljenih preskusov nosilnosti sider testnega polja leta 2009

Po končanih preskušanjih sider v sklopu RRN leta 2008 so bila tako referenčna sidra RCP/D kot tudi vsa modificirana sidra tipov RCP/D-K, RCP/D-Z in RCP/D-I zaklinjena na silo zaklinjenja P_0 , kot jo je za vsako sidro posebej na podlagi rezultatov PS in VPN določil projektant (vrednosti $P_{0,2008}$ v preglednici 3.12). Približno leto dni po opravljenih preskušanjih sider v sklopu RRN maja 2008, smo se odločili preskušanja ponoviti. Pri obdelavi in analizi rezultatov PS in VPN, kot tudi v sklopu priprave in izvedbe laboratorijskega preskušanja izotermne relaksacije pramen (glej dodatek F disertacije), so se namreč pojavila naslednja odprta vprašanja, na katera smo želeli poiskati odgovore:

- Pri sidrih tipa RCP/D-Z, v manj izraziti obliki pa tudi pri sidrih RCP/D-I, je v notranjosti PE rebraste cevi prihajalo do popuščanja vezi veznih delov pramen s cementno injekcijsko maso. Na eni strani smo želeli preveriti stanje veznega dela pramen, ki so pri preskušanjih leta 2008 kazala znake izvlačanja iz injekcijske mase, po drugi strani pa je zaradi izvlačanja enega pramena v skupnem hidravličnem sistemu (zaradi izvlačanja bata mononapenjalke tega pramena) prišlo do padca tlaka olja, s tem pa se je zmanjšala sila tudi v ostalih pramenih sidra. Predpostavljali smo, da v kolikor bi pramen s popuščenim veznim delom lahko izločili iz skupnega hidravličnega sistema, potem bi na ostalih pramenih lahko nadaljevali s preskusom nosilnosti.
- Pri laboratorijskih preskusih izotermne relaksacije smo vzorce pramen obremenjevali po enakem postopku, kot smo izvajali PS in VPN na testnem polju. Da bi se pri laboratorijskih preskusih čimbolj približali dejanskemu stanju na terenu, smo želeli ugotoviti, kolikšni so potrebni časi za vnose sile na posameznih stopnjah sile P_i PS in VPN.
- V iskanju odgovora, ali je popravljanje sile na posameznih stopnjah PS in VPN pred izvedbo odčitka izvlečkov pramen v posameznih časovnih trenutkih, res potrebno ali ne (švicarski standard *SIA 267/1* to zahteva, medtem ko *EN 1537* tega ne predvideva), smo želeli zabeležiti, kolikšni so

bili padci sile, preden smo jih pred izvedbo odčitka dvignili nazaj na predpisano raven stopnje sile P_i . Dodatno smo želeli preveriti opažanja dosedanje prakse, ali so velikosti padcev sil v posameznih časovnih intervalih res tudi eden od pokazateljev popuščanja veznega dela sidra.

- Glede na prvi pogled nelogične visoke vrednosti merodajnih intervalnih mer lezenja v prvih fazah PS in VPN, smo želeli preveriti, ali takšno obnašanje ni morda povezano z velikostjo trenja v preskuševalnem sistemu. Zaradi tega smo pri vseh ponovljenih preskusih nosilnosti sider testnega polja, izvedenih leta 2009, zasledovali razvoj trenja pri obremenjevanju in razbremenjevanju, pri čemer smo pri razbremenjevanju silo spuščali korakoma, tako da smo dobili tudi obliko poteka krivulj pri razbremenjevanju.
- Pogosto se v praksi pojavlja vprašanje, ali sidro po preseženi meri lezenja $k_{krit} = 2$ mm, ki jo je že standard *DIN 4125 – 2. del (1976)* vpeljal kot tisto kritično mero lezenja, ki opredeljuje porušitev veznega dela sidra, res lahko smatramo kot porušeno. S ponovljenimi preskusi nosilnosti sider smo torej želeli ugotoviti, kolikšno odpornost na izvlek je na porušenih sidrih (kjer je intervalna mera lezenja v zadnji doseženi stopnji sile že prekoračila k_{krit}) še možno doseči oz. do kakšne sile bi taka sidra še lahko zaklinili.
- S ponovljenimi preskusi nosilnosti smo želeli preveriti tudi naše ocene o načinu porušitve oz. mehanizmu popuščanja veznih delov sider, preskušanih leta 2008. V kolikor je do porušitve posameznega sidra prišlo po zunanjem stiku (torej po vezi sidra z vrtino) smo pričakovali, da bi lahko v teh primerih pri ponovljenih PS oz. VPN morebiti morda celo dosegli večje odpornosti na izvlek takega sidra, saj bi v roku enega leta od preskušanj, opravljenih leta 2008, v območju tal ob veznem delu zaklinjenega sidra lahko prišlo do konsolidacije napetostno-deformacijskega stanja. Po drugi strani smo predvidevali, da v kolikor je pri posameznem sidru prišlo do porušitve po notranjem stiku sidra (po vezi pramen z injekcijsko maso v notranjosti rebraste PE cevi), zaradi česar je prišlo do znakov izvlečenja posameznih pramen sidra, bi bile dosežene odpornosti na izvlek veznega dela sider pri ponovljenih PS oz. VPN lahko največ enake nosilnostim, doseženim leta 2008. Sklepali smo, da so rezidualne nosilnosti vezi pramena z injekcijsko maso, ki je bila načeta ali pa celo porušena pri preskusu leta 2008, nižje od adhezijske trdnosti pred PS oz. VPN.

Pred izvedbo ponovljenega preskusa nosilnosti posameznega sidra smo morali vsako zaklinjeno sidro najprej razkliniti. Postopek razklinjenja se izvede tako, da se na pramena sidra preko posebnih podložnih kotev namesti mononapenjalka, s katerimi se v pramena najprej vnese silo velikosti dejanske natezne sile v pramenih sidra (t.j. ocenjena velikost sile v sidru), nato pa moramo silo z napenjalkami povečati še za toliko, da se izvede zadosten izvleček pramen, ki sprosti zagozde iz kotev in omogoči njihovo odstranitev (velikostni razred minimalne potrebne sile za 5 mm premik pramen v območju zagozd 6-pramenskega sidra, s prostim delom dolžine 28,0 m, znaša približno 30 kN). Vrednosti sile v sidru pri razklinjanju iz skale analognega manometra hidravlične črpalke ni mogoče natančno odčitati, poleg tega pa je treba v sidro vnesti toliko večjo silo, da se pramena kabla sidra fizično izvlečejo za tisto razdaljo, ki omogoča izvlek zagozd iz konusnih odprtih kotev. Na podlagi dosedanjih izkušenj izvajalca sidrskih del smo presežne vrednosti tlaka v hidravličnem sistemu, potrebnega za izvlek zagozd in razklinjanje sidra, odšteli ter tako dobili grobo ocenjene vrednosti dejanskih sil v sidrih testnega polja $P_{dej,2009}$, ki jih podajamo v preglednici 3.12. Vrednosti $P_{dej,2009}$ smo primerjali z vrednostmi sil zaklinjenja, kot jih je podal projektant in na katere so bila pramena, po končanih preskusih leta 2008, predvidoma zaklinjena ($P_{0,2008}$). V skrajno desnem stolpcu te preglednice so tako zbrani koeficienti povečanja sil v sidrih v roku enega leta: ugotovimo lahko, da je (z izjemo sidra SBz-39, katerega sidrna sila je ostala praktično na isti ravni) v sidrih prišlo do zelo velikega povečanja sidrskih sil in sicer v območju od 15 % pa kar do 50 %. Pri razklinjanju posameznih sider se je izkazalo, da so sidrne sile, potrebne za razklinjanje,

tako visoke, da je zaradi tega pri dveh sidrih prišlo do poškodb veznih delov in izvlačanja posameznih pramen: pri sidru SBz-56 tipa RCP/D-Z je tako popustil en pramen, pri sidru SBz-63 istega tipa pa sta popustila kar dva pramena. Tako izrazito povečanje ocenjenih vrednosti sil v sidrih v kratkem času (glede na pričakovano življenjsko dobo sidranja) nas je presenetilo, zato smo preverili, kakšen je bil potek izmerjenih sil v merilnih sidrih objekta, ki so bila vgrajena v območju testnega polja.

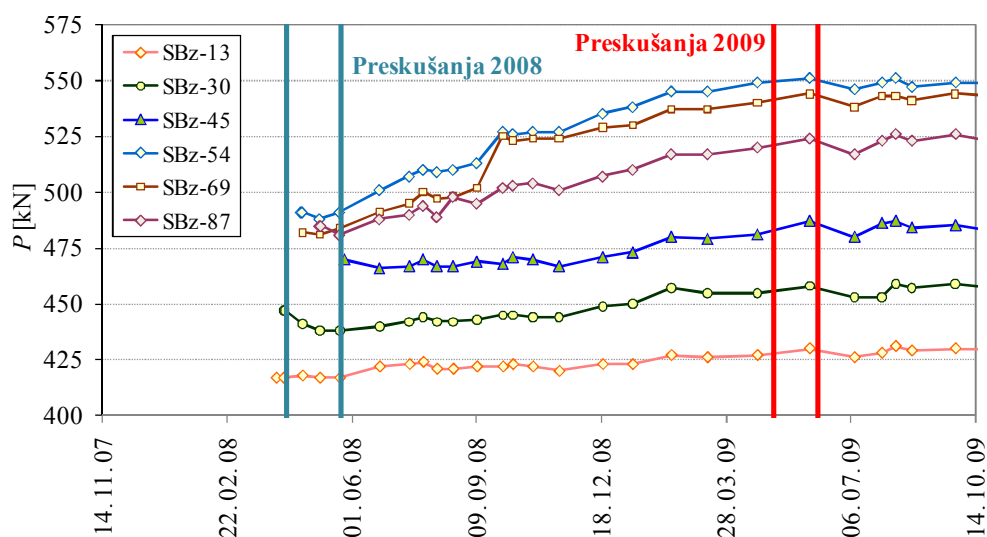
Preglednica 3.12: Vrednosti sil zaklinjenja po končanih preskušanjih leta 2008 in ocenjene vrednosti sidrskih sil v sidrih testnega polja pred začetkom preskušanj leta 2009.

Table 3.12: Values of lock-off forces after finished testings in 2008 and estimated values of anchor forces in the anchors of testing field before beginning of testings in 2009.

Zap. št.	Del OZ-05	Oznaka sidra	Tip sidra	Preskus 2008	Datum zaklinjenja	$P_{0,2008}$ [kN]	Datum razklinjanja	$P_{dej,2009}$ [kN]	$\frac{P_{dej,2009}}{P_{0,2008}}$
1	Leva stran testnega polja	SBz-12	RCP/D-I	VPN	01.08.08	450	08.05.09	517	1,15
2		SBz-15	RCP/D-Z	VPN	01.08.08	250	porezana pramena na sidru		
3		SBz-18	RCP/D-K	VPN	01.08.08	450	07.05.09	517	1,15
16		SBz-23	RCP/D	PS	01.08.08	450	06.05.09	ni podatka	
17		SBz-26	RCP/D	PS	01.08.08	450	06.05.09	611	1,36
4		SBz-33	RCP/D-I	VPN	01.08.08	450	05.05.09	674	1,50
5		SBz-36	RCP/D-Z	VPN	01.08.08	360	05.05.09	n.p.	n.p.
6		SBz-39	RCP/D-K	VPN	01.08.08	450	05.05.09	454	1,01
7	Desna stran testnega polja	SBz-56	RCP/D-Z	PS	31.07.08	420	11.05.09	548	1,30
18		SBz-59	RCP/D	PS	30.07.08	390	11.05.09	580	1,49
8		SBz-60	RCP/D-I	VPN	31.07.08	450	12.05.09	580	1,29
9		SBz-63	RCP/D-Z	VPN	30.07.08	250	12.05.09	297	1,19
10		SBz-66	RCP/D-K	VPN	31.07.08	450	12.05.09	580	1,29
11		SBz-78	RCP/D-I	VPN	31.07.08	450	20.05.09	674	1,50
12		SBz-81	RCP/D-Z	VPN	30.07.08	450	21.05.09	674	1,50
13		SBz-84	RCP/D-K	VPN	30.07.08	450	21.05.09	674	1,50
14		SBz-86	RCP/D-I	PS	30.07.08	450	22.05.09	674	1,50
15	SBz-89	RCP/D-K	PS	31.07.08	450	10.06.09	674	1,50	

Opombe: PS / VPN .. preiskava sidra / večstopenjski preskus napenjanja,
 $P_{0,2008}$ sila zaklinjenja po končanem preskusu nosilnosti leta 2008,
 $P_{dej,2009}$ grobo ocenjena sila v sidru pri razklinjanju leta 2009.

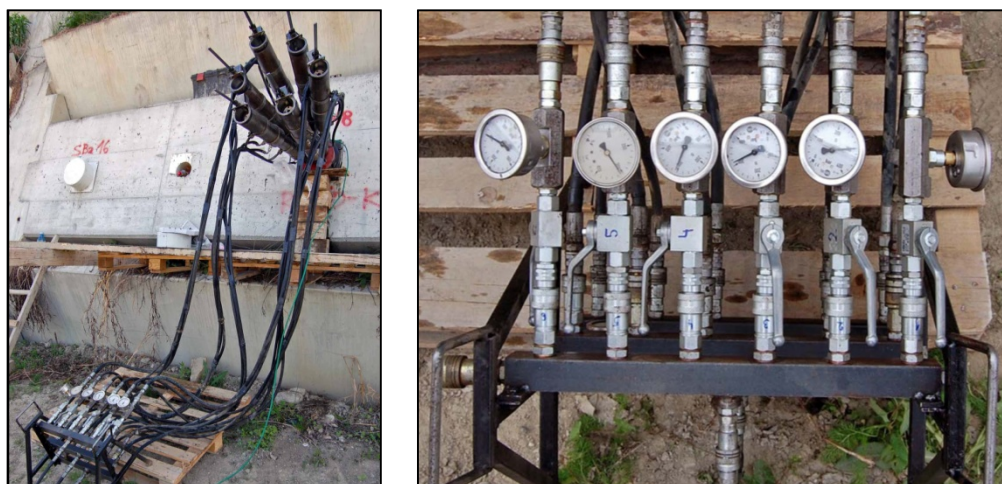
V območju testnega polja je v opornem zidu OZ-05 vgrajenih šest merilnih sider, katerih izmerjene vrednosti sil smo vnesli v diagram na [sliki 3.31](#). Krivulje diagrama merilnih sider lahko razdelimo na dve skupini: v merilnih sidrih vgrajenih v levem delu opornega zidu OZ-05 (SBz-13, SBz-30 in SBz-45) je v času med preskušnji leta 2008 in leta 2009 prišlo do porasta sidrskih sil za približno 2,7 do 3,0 %, medtem ko je bil porast sil v merilnih sidrih vgrajenih v desnem delu opornega zidu OZ-05 (SBz-54, SBz-69 in SBz-87) v istem časovnem obdobju med približno 7,9 % in 12,2 %. Ugotovimo lahko, da je porast sidrskih sil na desnem delu objekta večji tako pri sidrih testnega polja kot tudi pri merilnih sidrih objekta, vendar pa je porast pri sidrih testnega polja nekajkrat višji. Na podlagi tega lahko zaključimo, da so bile ocene vrednosti sil v sidrih testnega polja, kot jih je na podlagi odčitka manometra podal izvajalec sidrskih del, zelo grobe, in v nekaterih primerih najverjetneje precenjene.



Slika 3.31: Spreminjanje sil s časom izmerjenih v merilnih sidrih z vgrajenim dinamometrom v vrsti SBz sidranega objekta, v obdobju izvajanj preskušanj na testnem polju.

Figure 3.31: Variations of forces in the time period of the testing field investigations, measured in measuring anchors (equipped with load cell), installed at the SBz level of the anchored structure.

Ponovitve PS in VPN referenčnih sider RCP/D in modificiranih sider RCP/D-K, RCP/D-Z in RCP/D-I smo izvedli po sistemu napenjanja pramen sidra z mononapenjalkami po postopku in na način opisan v poglavju 3.5.2. Kot smo že omenili, je bil eden od ciljev pri ponovitvi preskusov nosilnosti sider testnega polja tudi preveriti izvedljivost PS in VPN na način, da bi lahko v primerih znakov popuščanja vezi pramena z injekcijsko maso v notranjosti rebraste PE cevi tak pramen izločili iz skupnega hidravličnega sistema, s čimer bi omogočili nadaljevanje preskusa z ostalimi prameni sidra. V ta namen je izvajalec sidrskih del na priklonih mestih cevi posameznih mononapenjalk na razdelilno postajo vgradil dodatne manometre in ventile (slika 3.32), s čimer sta bila omogočena tako izločitev manj nosilnega pramena iz sistema kot tudi opazovanje morebitnega nadaljnega popuščanja tega pramena.



Slika 3.32: Modificirano sidro RCP/D-K z nameščenimi mononapenjalkami med preskusom nosilnosti (levo), detajlni pogled na razdelilno postajo hidravličnega sistema (desno).

Figure 3.32: Modified anchor of type RCP/D-K with placed monostrand jacks during the testing of load-bearing capacity (left), detail view of the central manifold of hydraulic system (right).

Pri zapiranju ventilov posameznih mononapenjalk in njihovem izločanju iz skupnega hidravličnega sistema je potrebna določena previdnost – zaradi zaprtega ventila mononapenjalk pri manjši sili v pramenu, morajo biti namreč sile v ostalih pramenih sidra zato večje, da lahko dosežemo predpisano raven stopnje sile P_i . Zaradi tega je pri PS in VPN treba paziti, do katere stopnje sile P_i se sidro še lahko napne, da ne pride do preobremenitev preostalih (neizločenih) nosilnih pramen sidra, vsekakor pa to ni več načrtovana preskusna sila $P_{pv} = 1254$ kN, pač pa neka manjša sila.

V **preglednici 3.13** so zbrane vrednosti sil ob konservativni predpostavki, da je v enem ali več zaprtih pramenih samo še začetna sila $P_{a,pramena} = 25$ kN. V tem primeru se pri prehajanju na naslednje stopnje sile PS oz. VPN obremenitve preostalih (še ne izločenih) pramen hitro povečujejo. Zaradi predpostavke, da izločena pramena vseeno prevzemajo silo 25 kN, se delež povečevanja sile v preostalih (še ne izločenih) pramenih ne povečuje povsem enakomerno. Hitro naraščanje obremenitev (še ne izločenih) pramen je opazno v primerih, ko iz skupnega hidravličnega sistema izločimo dva ali tri pramena, saj lahko v tem primeru s preostalimi štirimi prameni izvedemo le še fazo preskusa $P_5 = 840$ kN, v primeru preostalih treh pramen pa le še fazo $P_4 = 702$ kN. V praksi je to pomenilo, da smo se za izločanje pramen in podaljšanje preskusov praviloma odločali v primerih, ko je očitno popuščal en pramen. V posameznih primerih smo se za zapiranje dodatnega pramena odločili tudi, če je, glede na preostala polno nosilna pramena, popuščal le še en pramen, pa še to le v primeru začetnih faz PS oz. VPN. Zaradi nevarnosti preobremenitve ostalih polno nosilnih pramen nismo v nobenem primeru iz hidravličnega sistema izločali več kot dva pramena.

Preglednica 3.13: Ravni sil v preostalih pramenih sidra ob predpostavki, da v enem ali več pramenih (izločenih iz skupnega hidravličnega sistema) preostala sila znaša samo še 25 kN.

Table 3.13: Force levels in the remaining strands of an anchor considering that one or more strands, separated from the joint hydraulic system, sustain the force of only 25 kN.

Stopnja sile	Skupna P_{sidra} [kN]	Sila na posamezni pramen sidra						
		P_6 pramen [kN]	P_5 pramen [kN]	$\frac{P_5 \text{ pramen}}{P_6 \text{ pramen}}$ [%]	P_4 pramen [kN]	$\frac{P_4 \text{ pramena}}{P_6 \text{ pramen}}$ [%]	P_3 pramen [kN]	$\frac{P_3 \text{ pramena}}{P_6 \text{ pramen}}$ [%]
P_a	150	25	25	100	25	100	25	100
P_1	288	48	53	110	60	124	71	148
P_2	426	71	80	113	94	132	117	165
P_3	564	94	108	115	129	137	163	173
P_4	702	117	135	116	163	139	209	179
P_5	840	140	163	116	198	141	255*	182
P_6	978	163	191	117	232*	142	301**	185
P_7	1116	186	218	117	267**	143	347**	187
P_{pv}	1254	209	246*	118	301**	144	393**	188

Opombi: * sila v pramenu je višja od še dovoljene obremenitve pri PS ($P_i > 0,95 \cdot A_p \cdot f_{p0,1k}$),
 ** sila je že tako visoka, da bi se pramen pretrgal.

Preskuse nosilnosti sider v obliki PS in VPN smo izvedli po stopnjah sile P_i navedene v stolpcu **b** **preglednice 3.3** **poglavja 3.5.2**, pri čemer smo na tistih sidrih, ki so bila v postopku razklinjanja poškodovana oz. katerih vezni deli so tekom ponovljene PS ali VPN popustili, izvedli dokazni CPN, s katerim smo ocenili sposobnost sidra za prevzem sile zaklinjenja $P_{0,2008}$, kot so bile po končanih preskušanjih

leta 2008 vnesene v sidra testnega polja. V splošnem smo na sidrih ponovili isti tip preskusa, kot je bil izveden leta 2008. Sistem izvajanja preskusov smo nekoliko dopolnili, tako da smo na nekaterih sidrih poleg osnovnega preskusa (PS oz. VPN) takoj na istem sidru ponovili še en preskus, ki je bil bodisi ponovljen osnovni preskus, bodisi je bil izveden preskus v obliki CPN (preglednica 3.14).

Preglednica 3.14: Vrste ponovljenih preskusov nosilnosti na referenčnih preskusnih sidrih RCP/D in modificiranih tipih sider RCP/D-K, RCP/D-Z in RCP/D-I opornega zidu OZ-05 leta 2009.

Table 3.14: Types in 2009 repeated load-bearing capacity tests on comparative testing anchors RCP/D and modified anchor types RCP/D-K, RCP/D-Z and RCP/D-I of the retaining wall OZ-05.

Št.	Oznaka sidra	Tip sidra	Vrsta preskusa	ŠNP	Datum preskusa leta 2009	Starost sidra leta 2009	$R_{7 \text{ dni po}}^{2008}$ [M Ω]	$R_{I, \text{ pred}}^{2009}$ [M Ω]	$R_{I, \text{ po}}^{2009}$ [M Ω]
16	SBz-23	RCP/D	PS	6	06.05.09	401	0,008	0,004	n.p.
17	SBz-26	RCP/D	CPN	6	06.05.09	364	5,94	n.p.	19,89
			PS						
18	SBz-59	RCP/D	PS	6	11.05.09	382	0,144	n.p.	0,098
			CPN		12.05.09				
15	SBz-89	RCP/D-K	CPN	6	10.06.09	415	0,342	n.p.	1,561
		PS							
3	SBz-18	RCP/D-K	VPN1	6	07.05.09	402	0,376	0,268	n.p.
			VPN2						
			CPN						
6	SBz-39	RCP/D-K	VPN	6	05.05.09	363	0,923	0,713	0,679
10	SBz-66	RCP/D-K	VPN	6	20.05.09	392	0,014	0,051	0,022
13	SBz-84	RCP/D-K	VPN	6	21.05.09	394	0,091	0,140	n.p.
7	SBz-56	RCP/D-Z	CPN	5	11.05.09	382	0,085	0,576	2,47
			PS						
2	SBz-15	RCP/D-Z	–	odrezana pramena (napenjanje ni možno)			0,456	n.p.	n.p.
5	SBz-36	RCP/D-Z	VPN	6	05.05.09	399	0,046	n.p.	0,160
9	SBz-63	RCP/D-Z	VPN	4	12.05.09	384	1,40	n.p.	1,16
12	SBz-81	RCP/D-Z	VPN	6	21.05.09	394	26,80	0,047	0,046
14	SBz-86	RCP/D-I	CPN	6	22.05.09	396	0,283	0,140	n.p.
			VPN						
1	SBz-12	RCP/D-I	VPN1	6	08.05.09	402	0,877	n.p.	n.p.
			VPN2						
4	SBz-33	RCP/D-I	VPN	6	05.05.09	364	0,033	0,271	0,151
8	SBz-60	RCP/D-I	VPN	6	12.05.09	382	7,61	n.p.	105,2
11	SBz-78	RCP/D-I	VPN	6	20.05.09	393	0,010	n.p.	0,013
			CPN		21.05.09				

Opombe: ŠNP..... število pramen, na katera smo med preskušnji leta 2009 namestili mononapenjalke,
 $R_{7 \text{ dni po}}^{2008}$... prevzemna vrednost izolacijske upornosti R_I 7 dni po zaklinjenju sidra leta 2008,
 $R_{I, \text{ pred}}^{2009}$ vrednost izolacijske upornosti R_I pred razklinjanjem sidra leta 2009,
 $R_{I, \text{ po}}^{2009}$ vrednost izolacijske upornosti R_I razklinjenega sidra leta 2009,
n.p. ni podatka.

Za pojasnitev vrednosti v [preglednici 3.14](#) so potrebni naslednji komentarji:

- Pri sidrih SBz-26, SBz-89 in SBz-56 smo pred izvedbo PS izvedli CPN, s katerim smo preverili karakteristike odpornosti sidra na izvlek za prevzem s projektom predvidenih sidrskih sil, pri čemer smo v vseh primerih najprej izvedli CPN, nato smo sidro razbremenili na raven začetne sile P_a , ponastavili merilne urice za merjenje izvlečkov pramen, ter nato takoj nadaljevali z izvedbo PS. Pri sidru SBz-86 smo na enak način po končanem CPN izvedli VPN.
- Pri sidru SBz-59 smo po predvidenem postopku najprej izvedli PS, nato smo sidro razbremenili na raven začetne sile P_a , ponastavili merilne urice za merjenje izvlečkov pramen, ter nato takoj nadaljevali z izvedbo dokaznega CPN, s katerim smo preverili sposobnost sidra za prevzem s projektom predvidene sile zaklinjenja. Na sidru SBz-78 smo na enak način najprej izvedli VPN, nato pa še dokazni CPN.
- Pri sidru SBz-18 smo po zgoraj navedenem postopku zaporedoma izvedli dva VPN z vmesno razbremenitvijo na začetno silo P_a . Glede na to, da je pri drugem VPN na stopnji sile $P_7 = 1116$ kN v sidru počilo, sila pa je začela padati, smo to sidro takoj razbremenili na začetno silo P_a , nato smo na njem izvedli dokazni CPN, s katerim smo preverili sposobnost sidra za prevzem s projektom predvidene sile zaklinjenja.
- VPN sidra SBz-66 tipa RCP/D-K smo morali zaradi izredno neugodnih vremenskih razmer prekiniti in ga zato nismo mogli do konca izvesti v enem delu, kot pri ostalih sidrih. V primeru tega sidra so bile zaradi nevihte padavine tako intenzivne, da nismo uspeli dovolj zaščititi merilnih uric za odčitovanje izvlečkov pramen sider, zaradi česar je v notranjost elektronskega dela uric vdrla voda, ki je povzročila kratek stik in odpoved merilnih uric.
- Na sidru SBz-15 so bile dolžine pramen, potrebne za namestitev mononapenjalk že odrezane, na glavi sidra pa je že bil pritrjen zaščitni pokrov, zato na tem sidru ni bilo možno ponoviti preskusa nosilnosti sidra.

3.6.2 Rezultati leta 2009 ponovljenih preskušanj nosilnosti sider

Pri izvedbi preskušanj leta 2009 smo uporabili isto opremo, kot smo jo že opisali v [poglavju 3.5.1](#), ki smo jo nadgradili z dodatnimi ventili in manometri skladno z opisom podanim v predhodnem [poglavju 3.6.1](#). Pred izvedbo preskušanj leta 2009 smo nadgradili računalniško orodje tako, da smo lahko beležili in spremljali vrednosti v zvezi z odprtimi vprašanji navedenimi in opisanimi v predhodnem poglavju. Nadgrajeno računalniško orodje smo uspešno uporabili pri izvedbi preskušanj tistih sider, pri katerih smo, zaradi izvlečenja veznega dela pramen iz cementne injekcijske mase v notranjosti PE ovoja sider, bili prisiljeni zapreti ventile posameznih mononapenjalk in jih s tem v določeni fazi PS oz. VPN izločiti iz skupnega hidravličnega sistema. Tak ukrep se je v praksi izkazal kot možen in uporaben, v bistveno večji meri pa bi ga lahko izkoristili v primerih, ko vezni deli sider ne bi bili že tako poškodovani, kot so bili poškodovani vezni deli sider po preskušanjih opravljenih leta 2008, pri nekaterih sidrih pa je, do dodatnih poškodb veznih delov pramen, prišlo tudi v fazi razklinjanja sider. Uporaba orodja v teh primerih je zahtevala poleg skrbnega vnosa odčitanih vrednosti tudi natančno porazdelitev obremenitev na posamezne mononapenjalk pramen sidra, v odvisnosti od tega, na kateri ravni sile je bil ventil mononapenjalk zaprt: glede na silo, ki jo prevzema pramen z zaprtim ventilom mononapenjalk, smo ustrezno povečali vrednosti sil v ostalih pramenih.

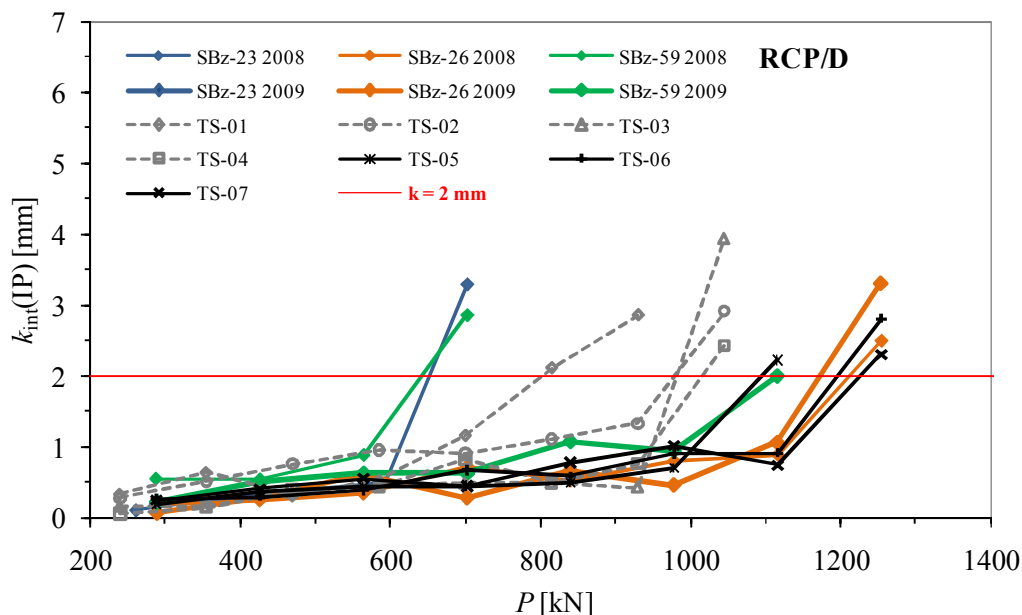
Preskušanja smo izvedli po postopku (t.j. po istih stopnjah sile in opazovalnih časih) opisanem v [poglavju 3.5.2](#), pri čemer smo na vsakem sidru izvedli isti tip preskusa, kot leta 2008 (PS ali VPN). V sklopu analize rezultatov referenčnih sider RCP/D in modificiranih tipov (RCP/D-K, RCP/D-Z in RCP/D-I),

preskušanih na testnem polju leta 2009, smo za določitev merodajnih intervalnih mer lezenja k_{int} , ki reprezentativno opisujejo obnašanje pramen, podsider kot tudi sidra kot celote na vsaki stopnji sile P_i , uporabili metodo inženirske presoje (metoda IP), opisano v poglavju C.4 dodatka C. Podrobnejši opis rezultatov preskušanj nosilnosti sider testnega polja, doseženih leta 2009, podajamo v dodatku B disertacije in sicer: v podpoglavju B.2.1 za sidra tipa RCP/D, B.2.2 za sidra tipa RCP/D-K, B.2.3 za sidra tipa RCP/D-Z in B.2.4 za sidra tipa RCP/D-I. V nadaljevanju podajamo najpomembnejše ugotovitve in zaključke o obnašanju po posameznih tipih sider.

3.6.2.1 Sidra RCP/D

V sklopu izvedbe RRN so bila na testnem polju vgrajena tri 6-pramenska referenčna sidra tipa RCP/D, ki so bila v letu 2008 s PS preskušena do porušitve. V letu 2009 smo PS na teh sidrih ponovili, pri čemer je podrobnejši opis rezultatov podan v poglavju B.2.1.

Tudi pri ponovljenih PS referenčnih sider tipa RCP/D, opravljenih leta 2009, smo na podlagi povprečja odčitkov izvlečkov pramen med PS vsakega sidra, za vsak časovni interval določili povprečno mero lezenja vseh pramen sidra (k_{1-6}). Na vsaki stopnji sile P_i smo na podlagi vrednosti k_{1-6} po metodi IP določili merodajne intervalne mere lezenja k_{int} (IP). Na sliki 3.33 so za sidra tipa RCP/D primerjalno prikazani rezultati PS iz leta 2008 in leta 2009 v obliki intervalnih mer lezenja k_{int} (IP) v odvisnosti od stopnje sile P_i . Rezultati ponovljene PS sidra SBz-23 zaradi hipne porušitve po vnosu sile P_2 v diagramu niso vidni, pri čemer se je iz injekcijske mase izvleklo celotno sidro (ponovitev mehanizma PS iz leta 2008 pri nižji sili). Je pa zato iz diagrama jasno razvidno bistveno večja izkazana odpornost na izvlek veznega dela sidra SBz-59 pri PS leta 2009, čeprav je pri tem sidru prišlo do popuščanja veznih delov posameznih pramen, a je na koncu po notranjem stiku popustil kabel sidra kot celota. Obnašanje sidra SBz-26 pri ponovljeni PS leta 2009 kaže podobno sliko, kot pri PS opravljeni leta 2008.



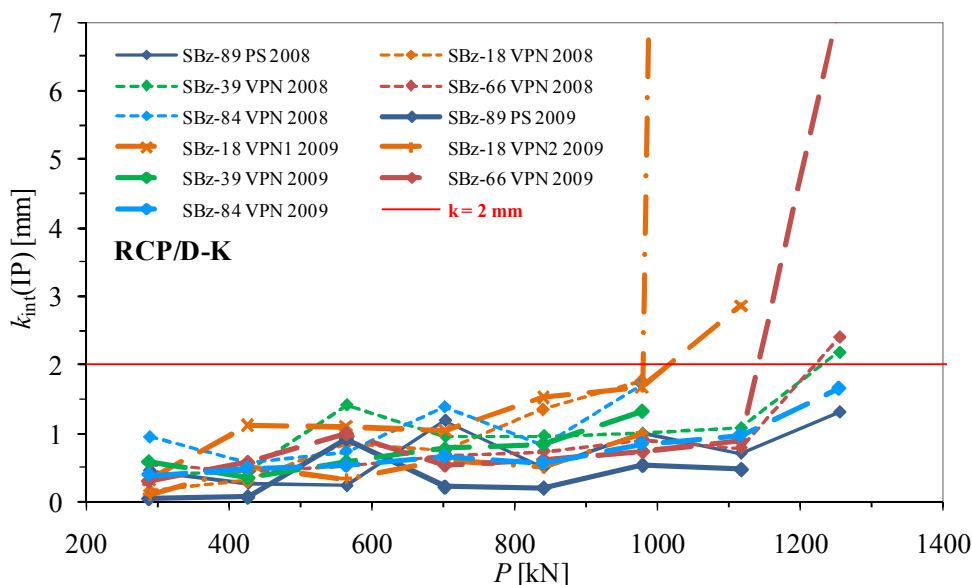
Slika 3.33: Primerjava intervalnih mer lezenja določenih leta 2008 in leta 2009 po metodi IP za sidra RCP/D, vgrajena v opornem zidu OZ-05.

Figure 3.33: Comparison of interval creep displacement rates calculated in 2008 and 2009 after the IP method for RCP/D anchors, installed in the retaining wall OZ-05.

3.6.2.2 Sidra RCP/D-K

V območju testnega polja RRN je bilo vgrajenih pet modificiranih 6-pramenskih sider RCP/D-K s povečano togostjo veznega dela sidra. Generalno gledano smo pri preskusih nosilnosti (ena PS in štiri VPN), opravljenih leta 2008, opazili povečane prirastke izvlečkov takoj po vnosu stopnje sile P_i , kar smo pripisali povečanemu trenju na stiku prostega in veznega dela sidra v povezavi s prezapolnjenostjo notranjosti rebraste PE cevi. Na vseh petih sidrih tipa RCP/D-K smo izvedli enake tipe preskusov, kot leta 2008, le da smo pri nekaterih sidrih VPN ponovili, pri nekaterih sidrih pa smo še dodatno izvedli CPN. Podrobnejši opis rezultatov PS, VPN in CPN v letu 2009 ponovljenih preskušanj je podan v poglavju B.2.2 dodatka.

Na podlagi povprečja odčitkov izvlečkov pramen, opravljenih med ponovitvami preskusov vsakega sidra tipa RCP/D-K, smo za vsak časovni interval določili povprečno mero lezenja sidra k_{1-6} . Na vsaki stopnji sile P_i smo na podlagi vrednosti k_{1-6} po metodi IP določili merodajne intervalne mere lezenja $k_{int}(IP)$, ki smo jih vnesli v diagram na [sliki 3.34](#), v katerem je za vsak izveden preskus sidra modificiranega tipa RCP/D-K podana krivulja, ki ponazarja intervalne mere lezenja $k_{int}(IP)$ tega sidra pri različnih stopnjah sile P_i . V isti diagram smo za primerjavo za vsako preskušeno sidro tipa RCP/D-K testnega polja vrisali končni krivulji dobljeni pri preskušanjih leta 2008 in 2009. V splošnem lahko rečemo, da čeprav so bile sile razklinjenja pri večini sider precej višje od sil zaklinjenja pred letom dni, bistvenih razlik v smislu doseženih stopenj sil pravzaprav ni: slabši rezultat v letu 2009 izvedene PS sidra SBz-89 glede na leto 2008 je posledica pretrga dveh žic pramena, pri sidru SBz-39 smo slabši rezultat VPN pripisali poškodbi veznega dela enega pramena pri razklinjanju (VPN smo morali predčasno zaključiti, saj smo ga izvajali le s petimi prameni, morda pa bi sidro z vsemi šestimi prameni prevzelo enako ali pa celo višjo silo), medtem ko ima svoj doprinos k manjši odpornosti na izvlek sidra SBz-66 tudi popustitev tesnila ene mononapenjalke. Sidri SBz-18 in SBz-84 sta izkazovali večjo odpornost na izvlek veznega dela kot pred letom dni.



Slika 3.34: Primerjava intervalnih mer lezenja določenih leta 2008 in leta 2009 po metodi IP za sidra RCP/D-K, vgrajena v opornem zidu OZ-05.

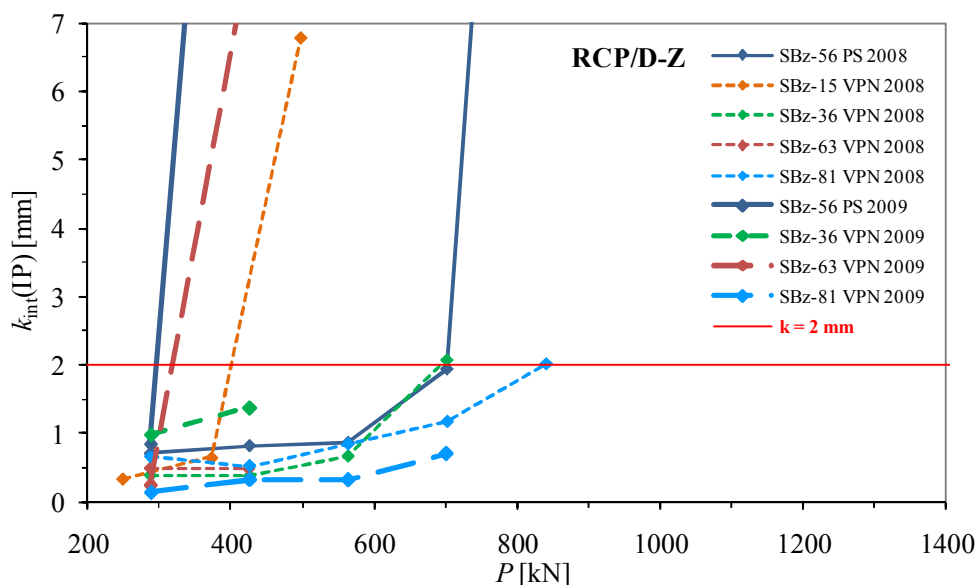
Figure 3.34: Comparison of interval creep displacement rates calculated in 2008 and 2009 after the IP method for RCP/D-K anchors, installed in the retaining wall OZ-05.

Ponovljena preskušanja so potrdila obnašanje sider tipa RCP/D-K, opisano v poglavju 3.5.3.2. Še večjo odpornost na izvlek vezi pramen s cementno injekcijsko maso bi lahko dosegli, v kolikor bi bil premer rebraste PE cevi večji in bi v veznem delu zagotovili debelejši sloj injekcijske mase okoli vseh jeklenih žic in pramen, s čimer bi preprečili drobljenje injekcijske mase, ki se pojavlja v območjih zgoščenih žic in pramen (Hutchinson in Diederichs, 1996), obenem pa bi lahko izvedli izrazitejši žagasti potek pramen v veznem delu sider (izmenično pahljačasto prostorsko razširjanje in stiskanje pramen).

3.6.2.3 Sidra RCP/D-Z

V testno polje RRN je bilo vgrajenih pet modificiranih večkratnih 6-pramenskih sider RCP/D-Z, ki po osnovnem konceptu oblikovanja veznega dela temeljijo na Barlayevem patentu. Preskušanja izvedena leta 2008 (ena PS in štiri VPN) so pokazala, da so bile pri sidrih tipa RCP/D-Z dosežene najmanjše odpornosti na izvlek veznih delov sider, pri čemer je prišlo do popuščanja vezi pramen z injekcijsko maso v notranjosti rebraste PE cevi, v nekaterih primerih pa so bila posamezna pramena tudi fizično izvlečena. Na vseh petih sidrih tipa RCP/D-Z smo pri ponovitvi preskušanj leta 2009 izvedli enake tipe preskusov, kot leta 2008, le da smo pri nekaterih sidrih VPN ponovili, pri nekaterih sidrih pa smo dodatno izvedli še CPN. Podrobnejši opis rezultatov v letu 2009 ponovljenih preskušanj podajamo v poglavju B.2.3 dodatka.

Na podlagi povprečnih odčitkov izvlečkov pramen, opravljenih med ponovitvami preskusa (PS oz. VPN) vsakega sidra RCP/D-Z smo določili povprečno mero lezenja sidra k_{1-6} za vsak časovni interval, na osnovi katerih smo določili merodajne intervalne mere lezenja k_{int} (IP). V diagram na sliki 3.35 smo za vsak izvedeni preskus PS oz. VPN sidra modificiranega tipa RCP/D-Z podali krivuljo, ki ponazarja intervalne mere lezenja k_{int} (IP) sidra pri različnih stopnjah sile P_i . Na enak način kot pri sidrih tipa RCP/D in RCP/D-K smo v isti diagram za primerjavo za vsako preskušeno sidro tipa RCP/D-Z testnega polja vrisali končno krivuljo, dobljeno pri preskušanju leta 2008 in 2009.



Slika 3.35: Primerjava intervalnih mer lezenja določenih leta 2008 in leta 2009 po metodi IP za sidra RCP/D-Z, vgrajena v opornem zidu OZ-05.

Figure 3.35: Comparison of interval creep displacement rates calculated in 2008 and 2009 after the IP method for RCP/D-Z anchors, installed in the retaining wall OZ-05.

Že pri razklinjenju sider pred PS oz. VPN je prišlo do popustitve enega pramena sidra SBz-56 oz. obeh pramen najkrajšega podsidera A sidra SBz-63, medtem ko so bila na sidru SBz-15 že porezana pramena, tako da VPN nismo mogli izvesti. Pri vseh sidrih tipa RCP/D-Z so bili v letu 2009 pri ponovljenih PS in VPN dobljeni slabši rezultati (višje vrednosti mer lezenja k oz. so vezni deli sider popustili na nižjih stopnjah sile P_i), pri čemer v letu 2009 opravljena preskušanja potrjujejo mehanizem obnašanja veznih delov sider RCP/D-Z, kot smo ga za preskušanja opravljena leta 2008 opisali v [poglavju 3.5.3.3](#) (popuščanje vezi pramen s cementno injekcijsko maso znotraj rebraste PE cevi).

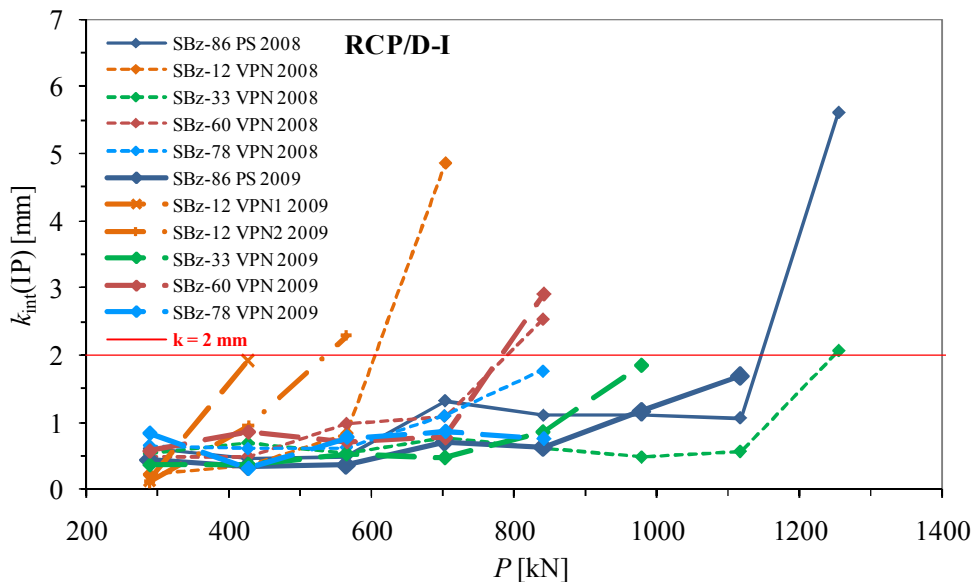
Glede na pridobljene izkušnje se nam zdi smiselni predlog tehnološke modifikacije izvedbe samih stikov prostih in veznih delov pramen, da bi bili krajši in da bi v manjši meri zmanjšali objetje injekcijske mase v notranjosti rebraste PE cevi v radialni smeri. Boljši izkoristek veznega dela pramen bi najverjetneje lahko dosegli tudi s kombinacijo žagastega poteka pramen v veznem delu podsidera (izmenično pahljačasto prostorsko razširjanje in stiskanje pramen podsidera) s kakšno od poznanih metod lokalne razširitve žic veznega dela pramen (npr. Hutchinson in Diederichs, 1996). Dodatno izboljšanje mehanizma prenosa sidrskih sil s pramen na injekcijsko maso bi najbrž lahko dosegli tudi z mikroarmaturo (vlakni) v injekcijski masi, v primeru uporabe nekoliko večjih rebrastih PE cevi pa bi lahko v veznih delih podsider uporabili tudi obvijanje pramen z mikro stremensko armaturo. Ob dovolj gostem obvijanju pramen veznega dela sidra z npr. spiralno oblikovano žico bi lahko izboljšali objetje injekcijske mase v okolici golih pramen veznega dela, hkrati pa bi omejevali radialno razmikanje strjene injekcijske mase, kar bi se moralo odražati v povečanih odpornostnih karakteristikah veznega dela podsider na izvlek. Pri preskusih teh sider smo uspešno uporabili metodo zapiranja ventila posameznih mononapenjalk, s katero smo iz skupnega hidravličnega sistema izločali posamezna porušena pramena, vendar pa so bili vezni deli posameznih pramen že tako poškodovani od preskušanj, opravljenih leta 2008, oz. od samega razklinjanja, da tudi z zapiranjem ventilov nismo uspeli doseči opaznega povečanja odpornosti veznih delov teh sider na izvlek.

3.6.2.4 Sidra RCP/D-I

V testno polje RRN smo vgradili pet modificiranih 6-pramenskih sider RCP/D-I, zasnovanih na podlagi patenta Škrabla. Po rezultatih preskusov nosilnosti (ena PS in štiri VPN) opravljenih v letu 2008, so bile odpornosti na izvlek veznih delov sider RCP/D-I sicer manjše od doseženih pri referenčnih sidrih RCP/D in pri modificiranih sidrih RCP/D-K, a so bile na drugi strani vseeno večje kot pri modificiranih večkratnih sidrih tipa RCP/D-Z. V sklopu analize rezultatov preskušanj sider RCP/D-I iz leta 2008 smo ugotovili, da je do izrazite popustitve enega pramena podsidera vedno prišlo v podsidru C z najkrajšim veznim delom (sidra SBz-12, SBz-60 in SBz-78), pri čemer pa je bil mehanizem popuščanja veznega dela sider enak kot pri sidrih RCP/D-Z (popuščanje po notranjem stiku sidra). Pri sidrih SBz-33 in SBz-86 smo v sidro uspeli vnesti preskusno silo $P_{pv} = 1254$ kN, a sta sidri na koncu popustili – pri sidru SBz-33 je prišlo do popustitve kabla sidra kot celote, medtem ko je bil mehanizem porušitve sidra SBz-86 kombiniran (pri vseh pramenih je bila presežena k_{krit} , pri čemer je bilo popuščanje enega pramena izrazitejše). Na vseh petih sidrih tipa RCP/D-I smo pri ponovitvi preskušanj leta 2009 izvedli enake tipe preskusov, kot leta 2008, le da smo pri nekaterih sidrih VPN ponovili, pri nekaterih sidrih pa smo še dodatno izvedli CPN. Podrobnejši opis rezultatov v letu 2009 ponovljenih preskušanj smo podali v [poglavju B.2.4](#) dodatka.

Na enak način, kot pri ponovljenih preskusih nosilnosti ostalih sider testnega polja, izvedenih leta 2009, smo na podlagi povprečnih odčitkov izvlečkov pramen pri PS oz. VPN vsakega sidra RCP/D-I, določili povprečno mero lezenja sidra za vsak časovni interval k_{1-6} , na osnovi katerih smo določili merodajne

intervalne mere lezenja $k_{int}(IP)$. V diagram na [sliki 3.36](#) je za vsak izveden preskus PS oz. VPN sidra modificiranega tipa RCP/D-I, podana po ena krivulja, ki ponazarja intervalne mere lezenja $k_{int}(IP)$ tega sidra pri različnih stopnjah sile P_i tako za leto 2008 kot tudi za leto 2009. V splošnem so bile pri večini sider tipa RCP/D-I v letu 2009 dosežene odpornosti na izvlek istega velikostnega reda (oz. nekoliko manjše) kot leta 2008, izjema je bilo le sidro SBz-78, katerega odpornostne karakteristike na izvlek so bile malenkost boljše, čeprav je vezni del sidra vseeno popustil pri isti sili, kot leta 2008.



Slika 3.36: Primerjava intervalnih mer lezenja določenih leta 2008 in leta 2009 po metodi IP za sidra RCP/D-I, vgrajena v opornem zidu OZ-05.

Figure 3.36: Comparison of interval creep displacement rates calculated in 2008 and 2009 after the IP method for RCP/D-I anchors, installed in the retaining wall OZ-05.

Podobno kot pri preskušanjih opravljenih leta 2008, katerih mehanizem delovanja veznih delov je podrobneje opisan v [poglavju 3.5.3.4](#), lahko ugotovitve ponovljenih preskušanj strnemo v isti zaključek: tudi pri preskusih nosilnosti leta 2009 se modificirana sidra tipa RCP/D-I po doseženih karakteristikah odpornosti na izvlek veznega dela sidra, uvrščajo med sidra RCP/D in RCP/D-K na eni strani, ter večkratna sidra RCP/D-Z (z najmanjšimi doseženimi odpornostmi) na drugi strani. To nenazadnje potrjuje tudi dejstvo, da navkljub dejstvu, da so bile približne velikosti sil razklinjanja glede na prvotno silo zaklinjenja iz leta 2008 vsaj take, kot pri sidrih RCP/D-Z, pri sidrih RCP/D-I, noben pramen pri razklinjanju ni bil opazno poškodovan oz. izvlečen. Glede na to, da je končno popustitev veznega dela sidra kar v 60 % primerov (sidra SBz-12, SBz-78 in SBz-86) povzročilo izrazito popuščenje oz. izvlačenje veznega dela enega pramena kabla sidra, bi se lahko doseženim odpornostim sider RCP/D zagotovo lahko vsaj približali, morda bi jih dosegli (v skrajnem primeru pa celo presegli), če bi vezne dele posameznih pramen oz. njihov potek v veznem delu tehnološko izvedli tako, da bi bilo preprečeno njihovo izvlačenje iz cementne injekcijske mase v notranjosti rebraste PE cevi. Za to bi lahko uporabili isti pristop, kot smo ga za sidra tipa RCP/D-Z že opisali v predhodnem [poglavju 3.6.2.3](#). Podobno kot pri sidrih RCP/D-Z smo tudi pri sidrih RCP/D-I uspešno uporabili metodo zapiranja ventila posameznih mononapenjalk, s katero smo iz skupnega hidravličnega sistema izločili posamezna porušena pramena, vendar pa so bile vezi golih pramen z injekcijsko maso posameznih pramen pri preskušanjih leta 2008 že tako poškodovane, da tudi z zapiranjem ventilov porušeni pramen nismo uspeli doseči opaznega povečanja odpornosti na izvlek veznega dela sider.

3.6.2.5 Ocena trenja v območju glav sider pri PS in VPN leta 2009

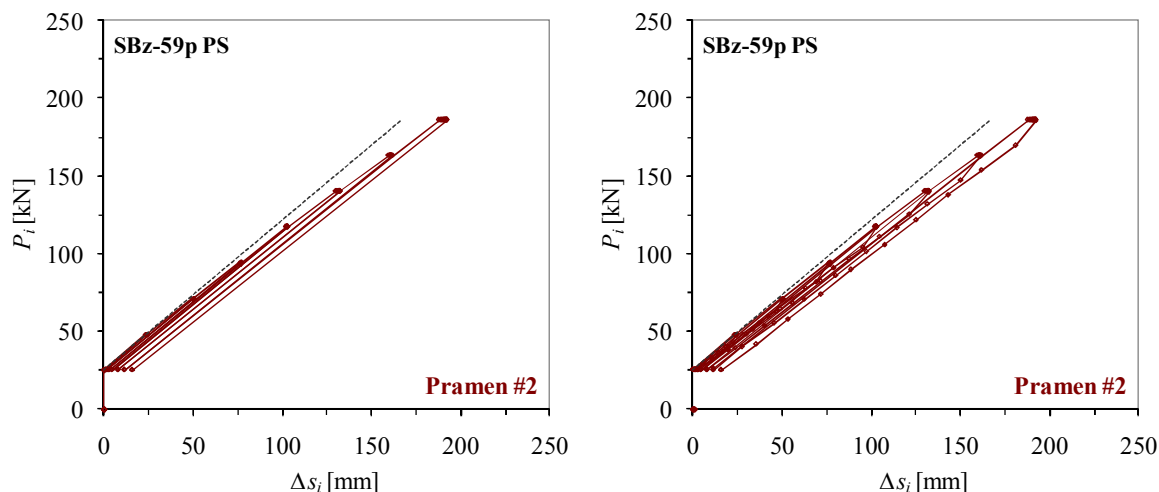
S pojavom prednapetih sider z gibljivom prostim delom sidra pred več kot tremi desetletji (glej poglavje A.3 dodatka A) je bilo omogočeno raztegovanje kabla sidra v prostem delu med izvedbo preskusa nosilnosti, zaklinjanjem kot tudi med življenjsko dobo sidra (Martak, 1979). Zaradi omejenega izbora materialov, opreme, izkušenj in nedodelanih tehnoloških rešitev oblikovanja in izdelave sider je pri vnosu sile v kabel sidra prihajalo do pojava trenja vzdolž kabla v prostem delu sidra, deloma pa tudi v sami napenjalki. Največja sila v sidru je tako delovala v območju glave sidra, nato pa se je velikost sile vzdolž prostega dela sidra manjšala. Pri današnjih sidrih je vsak jekleni pramen v prostem delu sidra oplaščen v svoji PE cevi, votli prostor med pramenom in PE cevjo pa je zapolnjen s trajnoplastičnim protikorozijskim sredstvom (mastjo, vazelinom ipd.). Glede na to, da v prostem delu današnjih sider proizvajalci ne nameščajo zunanjih distančnikov (centrirnikov), se kabel sidra v območju prostega dela sidra uleže na dno vrtine, medtem ko je v veznem delu zaradi zunanjih distančnikov dvignjen od dna vrtine, v območju glave sidra pa je kabel v centrični legi glede na os vrtine; linija kabla vzdolž sidra tako ni povsem ravna, pač pa se dvakrat "zlomi" (na prehodu veznega v prosti del in v območju glave sidra). Možnosti pojava trenja vzdolž namaščenih pramen v prostem delu sidra tako ne moremo povsem izključiti, prav tako pa ni moč v celoti izključiti pojava trenja v mononapenjalkah.

V sklopu celovitega obravnavanja PS trajnih prednapetih sider s celovito protikorozijsko zaščito smo med ponovitvijo PS in VPN leta 2009 spremljali pojav trenja med vnosom, kot tudi med spuščanjem posamezne stopnje sile P_i . Glede na to, da smo sile v sidru vedno spremljali z dinamometrom nameščenim pod mononapenjalkami, smo na ta način lahko opazovali pojav trenja pri razširitvi pramen v območju glav, kot tudi v prostih delih sider. Pred izvedbo preskušanj leta 2009 smo morali za spremljanje pojava trenja in razbremenilnega dela krivulj sila-izvleček ustrezno nadgraditi računalniško orodje za spremljanje PS in VPN (poglavje C dodatka), tako da smo lahko beležili tako začetno silo pri vnosu sile kot tudi končno silo pri razbremenitvi, ki sta bili potrebni, da je prišlo do premika merilnih uric pramen sider. Med razbremenitvijo sider smo vrednosti sila-izvleček odčitavali v več vmesnih korakih, tako da smo dobili obliko diagramov pri razbremenjevanju sile s stopnje sile P_i .

Na [sliki 3.37](#) za primer PS sidra SBz-59 tipa RCP/D leta 2009 podajamo primerjavo diagramov sila-izvleček, pri čemer levi diagram podaja sliko dogajanja v pramenu #2 z običajnim prikazom (torej brez trenja in oblik razbremenilnih delov krivulj), medtem ko desni diagram prikazuje dogajanje v istem pramenu, le da so v tem primeru vključene tako izmerjene vrednosti trenja kot tudi oblika krivulj sila-izvleček pri razbremenjevanju sidra. Iz primerjave diagramov na [sliki 3.37](#) lahko dobimo indikativen vpogled v trenje, kot se je pojavljalo v prostih delih sider med ponovljenimi preskušnji leta 2009. Velikostni red izmerjenih vrednosti kot tudi vzporedna lega obremenjevalnega in razbremenjevalnega dela krivulj kažeta, da so vrednosti trenja nizke, sam pojav pa se izraža v obliki začetne (oz. končne) sile, ki je potrebna za premik pramena v PE cevi prostega dela. Povprečne izmerjene vrednosti trenja v sidru v fazah PS in VPN od P_1 do P_{pv} so se pri vnosu sile v sidro gibale med 2 in 4 kN, pri razbremenjevanju pa so v povprečju znašale med 3 in 5 kN. Izmerjene sile trenja so bile tako bistveno manjše od 5 % preskusne sile (5 % od sile zadnje stopnje sile $P_7 = 1116$ kN v konkretnem primeru znaša 55,8 kN), ki jo EN 1537 postavlja kot mejnik, da moramo, pri določitvi preskusne sile P_p in sile zaklinjenja P_0 za sidra objekta, upoštevati vpliv trenja.

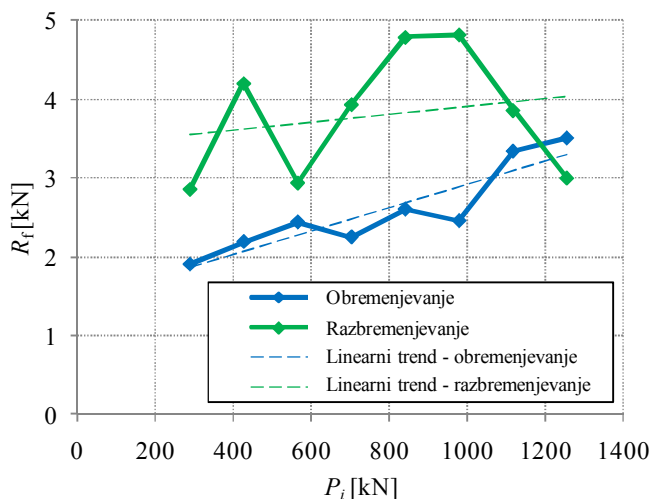
Povprečne vrednosti sil trenja R_f v odvisnosti od stopnje sile P_i po posameznih fazah PS in VPN med ponovljenimi preskušnji leta 2009 so prikazane na [sliki 3.38](#). Iz diagrama je razvidno, da so vrednosti sil trenja R_f pri razbremenjevanju z izjemo zadnje stopnje sile večje od vrednosti sil trenja pri

obremenjevanju, prav tako pa je potek vrednosti sil trenja pri razbremenjevanju s povečevanjem sil P_i pri PS in VPN precej bolj neenakomeren, kot pri obremenjevanju, kar pripisujemo vplivu človeškega faktorja pri odpiranju ventila hidravličnega sistema. Tako krivulja obremenjevanja kot razbremenjevanja izkazujeta rahel trend naraščanja s povečevanjem stopnje sile P_i PS oz. VPN, ki je nekoliko izrazitejši pri obremenjevanju sidra.



Slika 3.37: Diagram $P_i - \Delta s_i$ pramena #2 sidra SBz-59 tipa RCP/D med ponovitvijo preiskave sidra leta 2009: običajen diagram (levo), nadgrajeni diagram z dodanim trenjem pri obremenjevanju in razbremenjevanju ter podanimi vmesnimi odčitki pri razbremenjevanju sidra (desno).

Figure 3.37: Diagram $P_i - \Delta s_i$ for the strand #2 (anchor SBz-59 of type RCP/D) during investigation test, repeated in 2009: usual diagram (left), upgraded diagram supplemented with friction at loading and unloading as well as with intermediate read-offs, taken during unloading of the anchor (right).



Slika 3.38: Izmerjene vrednosti sil trenja pri obremenjevanju in razbremenjevanju sidra pri ponovljenih preskušanjih leta 2009.

Figure 3.38: Measured friction forces during loading and unloading phases of anchor testing, repeated in 2009.

3.6.2.6 Analiza padcev sil pred korekcijo na predpisano raven stopnje sile pri PS in VPN

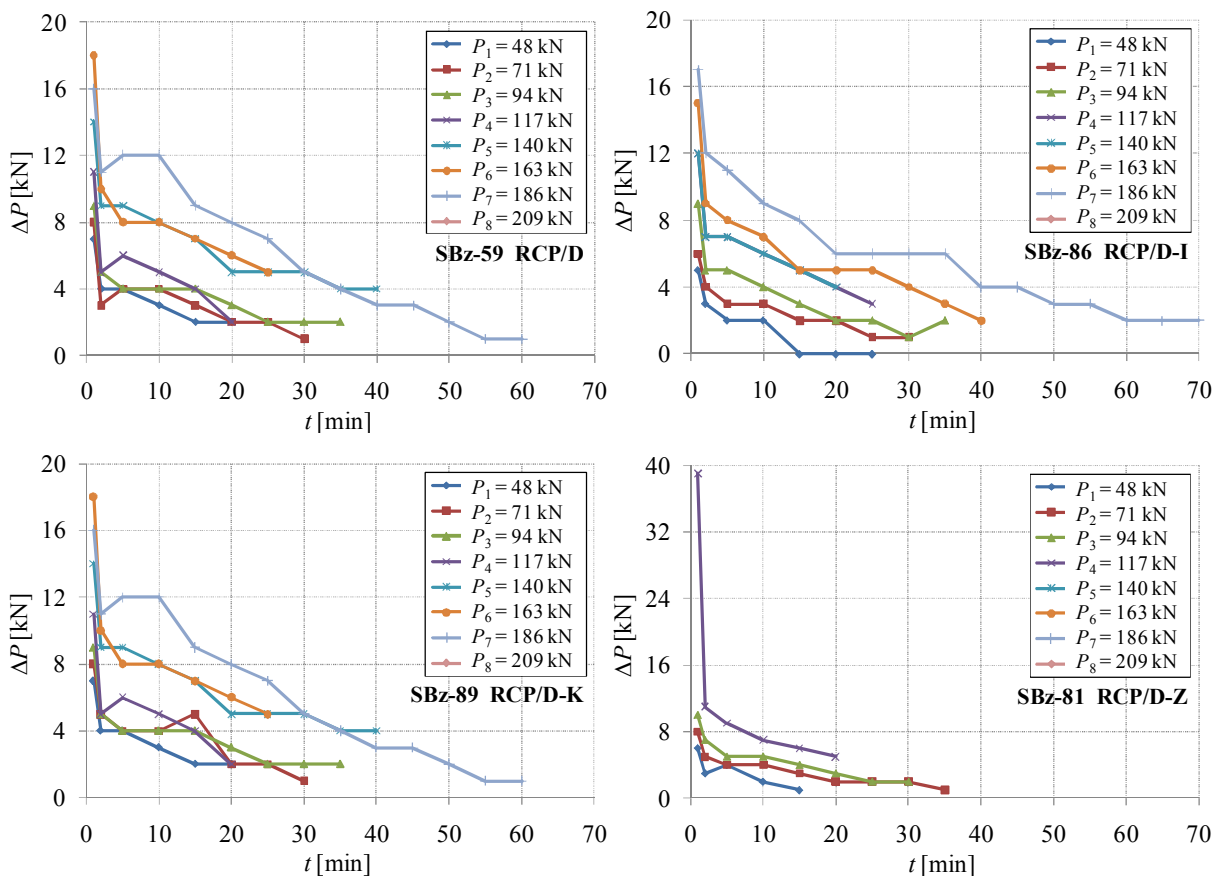
Švicarski standard *SIA 267/1* nalaga, da moramo pri izvedbi PS na vsaki stopnji P_i silo znotraj natančnosti meritve ohranjati konstantno, zaradi česar moramo pred izvedbo odčitka prirastka izvlečka pramena na glavi sidra, silo v sidru nastaviti na predpisano raven. Na ta način zagotovimo, da so vsi prirastki izvlečkov (v okviru natančnosti meritev) izvedeni pri isti sili P_i , hkrati pa ni nujno, da imajo ti popravki

sil, ki so potrebni zaradi vpliva naslednjih faktorjev, ugoden vpliv pri vrednotenju mer lezenja k veznega dela sidra (glej tudi zaključke [dodatka F](#)):

- Vpliv upada sil v sidru, ki je na nižjih ravneh sile P_i posledica prenosa sile z mononapenjalke v jeklena pramena, ki je zagotovljen le preko mehanskega stika (trenja) med zobmi čeljusti mononapenjalke in žicami pramena. Na začetnih ravneh sile P_i so normalne napetosti na os pramena, ki nastanejo zaradi konusno oblikovane notranje površine kotev, nizke, zato ni pričakovati, da bi se zobje čeljusti že lahko zajedli v površino zunanjih žic pramena, zaradi česar lahko na tem mestu prihaja do določenih zdrsov. Iz istega razloga, kot tudi morebitnih ostankov maziva še iz proizvodnje pramena, v tem lokalnem območju pramen prihaja tudi do zdrsa na stiku osrednje žice s šestimi zunanjimi, spiralno zavitimi žicami pramena, zaradi česar so napetosti v osrednji žici nižje kot v ostalih zunanjih žicah pramena.
- Na višjih ravneh sile P_i , ko natezne napetosti v pramenih presežejo približno 60 % nazivne natezne trdnosti jekla pramen R_m , se v pramenih začne pojavljati relaksacija pramen, kot jo poznamo iz prednapenjanja ostalih konstrukcij (prednapetih mostov, prekladnih konstrukcij, silosov ipd.).
- Pri terenskih preskušanjih sider z vnosom sile P_i v sidro pride do stisnjenja in medsebojnega uleganja elementov glave sidra in dinamometra, v primeru ne povsem ravnega podložnega obroča dinamometra, pa tudi do ravnjanja le-tega, dodatno pa lahko pride tudi do pomikov skupine mononapenjalk na stiku s podložno ploščo. V kolikor sidro ni vgrajeno povsem pravokotno na naležno površino sidranega objekta, je vpliv medsebojnega usedanja elementov še izrazitejši.
- Med izvedbo PS se pojavijo še ostali moteči vplivi, posledica katerih je manjša dejanska sila v pramenih veznega dela sidra od teoretične: izgube zaradi trenja pramen v ovojnih PE ceveh prostega dela, sila za premagovanje trenja v pramenih na mestih tesnitve stikov vezni-prosti del, sila trenja zaradi spremembe kota pramen v območju pod glavo sidra, neraven potek pramen kabla sidra v začetnem in v končnem delu prostega dela sidra, trenje v mononapenjalkah ipd..
- V primerih izdelave manjšega samostojnega sidrnega bloka za izvedbo PS na objektu na ne dovolj utrjeni površini tal zaledja, med izvedbo preskusa lahko pride do vtiskanja sidrnega bloka v tla, kar se odraža tudi v padcu natezne sile v kablu sidra.
- Stanje čeljusti mononapenjalk se zaradi obrabljenosti z izvedbo preskusov nosilnosti sider ves čas poslabšuje, pri čemer vse do popolne izrabljenosti, ko pride do zdrsa pramena v mononapenjalki, vpliva stanja čeljusti na izmerjene vrednosti izvlečkov pramena ni možno oceniti. V hidravličnem sistemu od črpalke preko cevi razdelilne postaje do posameznih mononapenjalk, kot tudi v samem batu mononapenjalk, zaradi izrabljenosti tesnil lahko prihaja do manjših netesnosti in spuščanja olja iz sistema, zaradi česar posledično prihaja do padca tlaka v sistemu, s tem pa tudi do zmanjšanja natezne sile, ki med PS deluje na pramena.

Na podlagi velikosti upadlih sil ΔP v sidru, kot tudi primerjave vrednosti ΔP z ostalimi parametri obnašanja sidra pri PS (predvsem efektivnimi prostimi dolžinami pramen in trajnimi izvlečki), lahko med izvedbo PS sproti spremljamo in ocenjujemo obnašanje veznega dela sidra. Z namenom ugotoviti in zabeležiti upade sil na posameznih stopnjah sil P_i smo med ponovitvijo PS in VPN leta 2009 na sidrih testnega polja RRN ves čas preskusov spremljali tudi padce sil pred izvedbo korekcij na predpisane ravni sile P_i . Na [sliki 3.39](#) podajamo tipične rezultate upadlih sil v sidru ΔP , kot smo jih na posameznih stopnjah sil P_i izmerili pri PS tako pri enem od referenčnih sider RCP/D, kot tudi pri modificiranih tipih sider RCP/D-K, RCP/D-Z in RCP/D-I. Diagrami kažejo, da so bili upadi sil ΔP pri ponovitvah PS in VPN leta 2009 pri sidrih tipov RCP/D in RCP/D-K skoraj identični, precej podobno pa je bilo upadanje sil tudi pri sidru tipa RCP/D-I. Skladno s pričakovanji so bili upadi sil ΔP pri teh

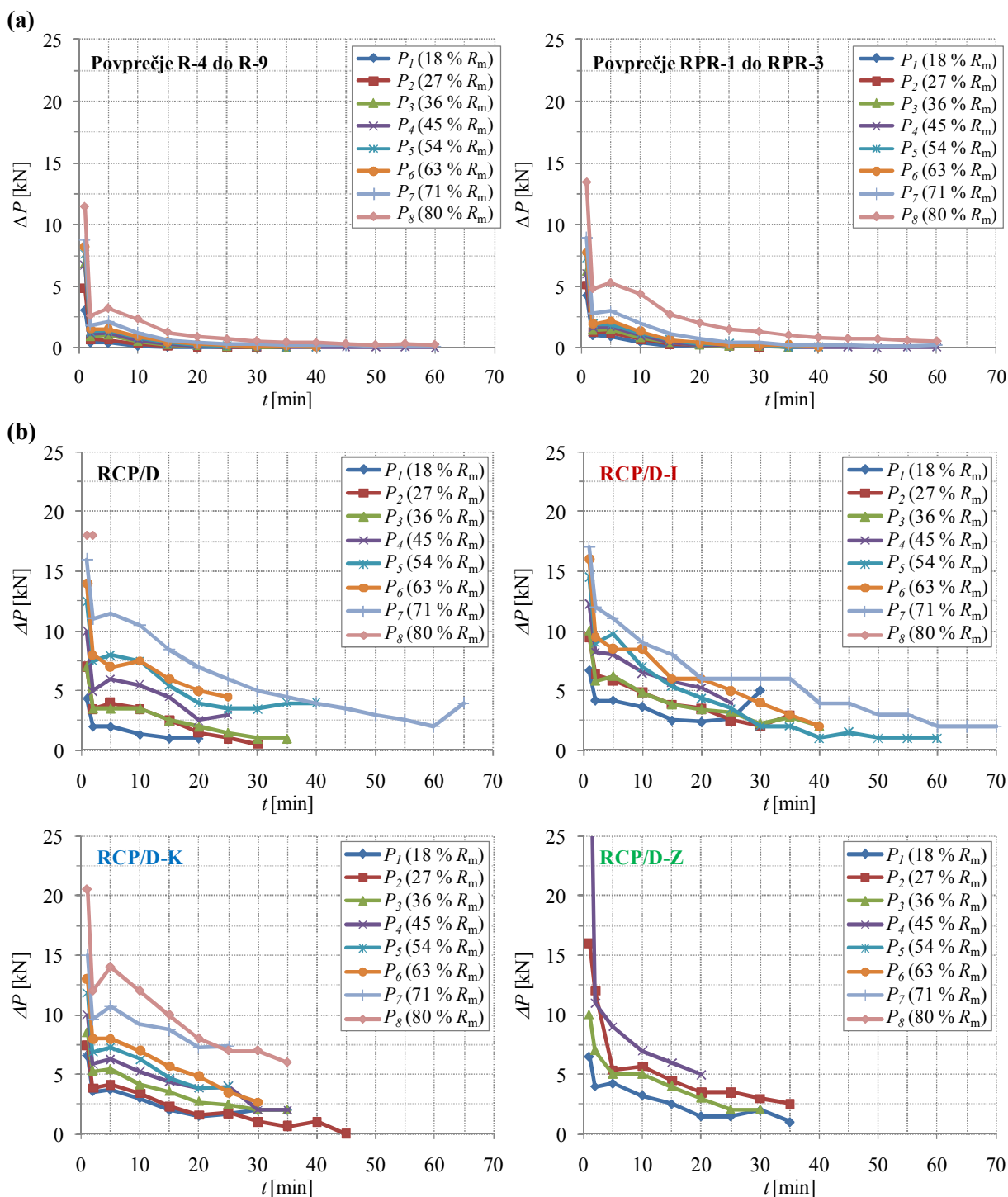
sidrih pri višjih stopnjah sile P_i večji, pri čemer je bil največji upad vedno izmerjen v 1', v 2' je bil pogosto nekoliko nižji, nato pa je od 5' naprej upadal. Krivulje sidra tipa RCP/D-Z so bile sicer podobne, vendar pa je sidro popustilo že na ravni sile P_4 , kar je "napovedala" že prva visoka vrednost ΔP .



Slika 3.39: Vrednosti upadlih sil v sidru ΔP pred popravkom na stopnjah sile P_i med preiskavami sider tipov RCP/D, RCP/D-I, RCP/D-K in RCP/D-Z na testnem polju maja 2009.

Figure 3.39: Values of decreased forces ΔP before correction on force levels P_i during investigation tests of anchor types RCP/D, RCP/D-I, RCP/D-K and RCP/D-Z (testing field, May 2009).

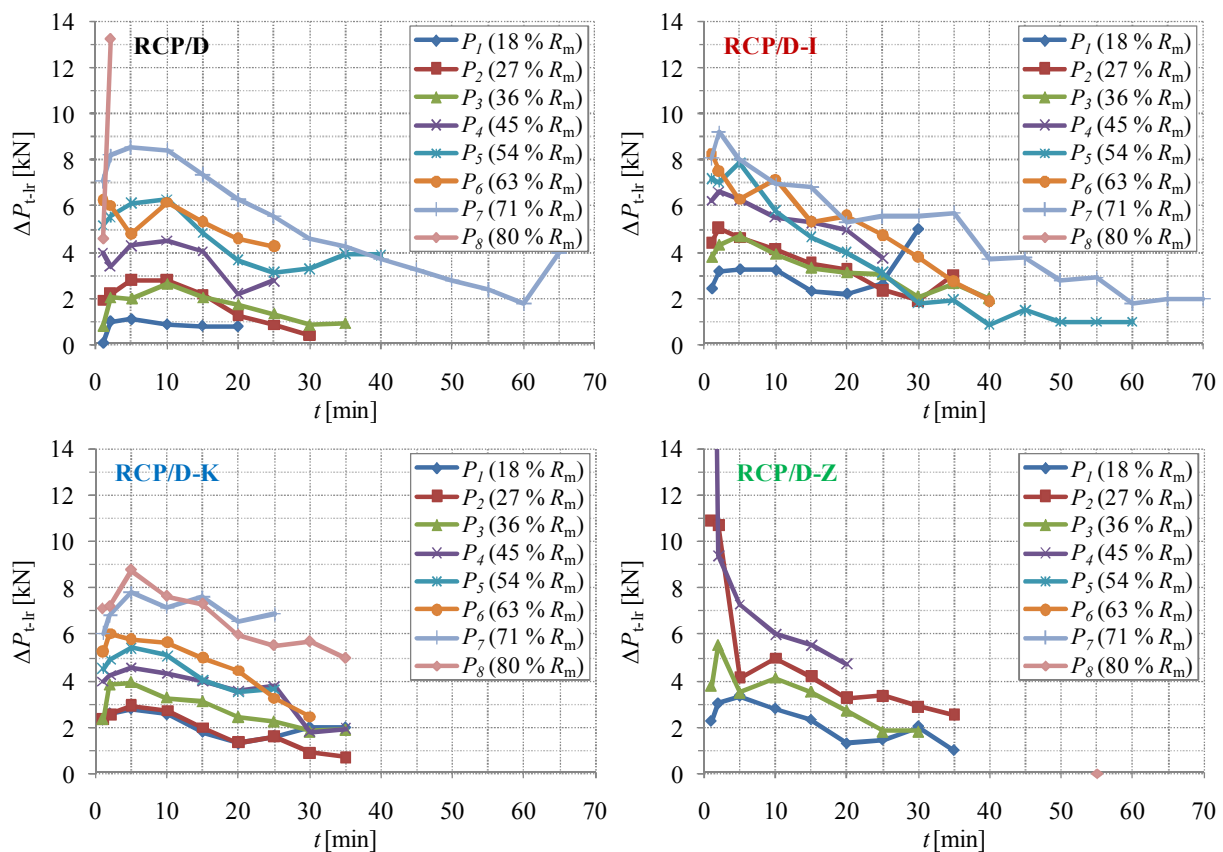
Oblike krivulj na [sliki 3.39](#) so podobne tistim, ki smo jih dobili pri laboratorijskih preskušanjih izotermne relaksacije pramen po postopku za PS (glej [dodatek F](#)), zato smo pripravili tudi primerjavo rezultatov laboratorijskih preskušanj s preskušnji sider na testnem polju leta 2009. Laboratorijska preskušanja izotermne relaksacije pramen po postopku za PS smo opravili na različna načina: pri vzorcih tipa R smo odčitke upadlih sil izvedli, ne da bi silo v vzorcu predhodno popravili na izhodiščno vrednost, medtem ko smo pri vzorcih tipa RPR, pred izvedbo odčitka sile v vzorcu pramena, silo popravili na izhodiščno vrednost, tako kot to pri izvedbi PS zahteva *SIA 267/1*. Na levi strani [slike 3.40\(a\)](#) podajamo časovni potek povprečnih izmerjenih vrednosti upadlih sil, dobljene pri laboratorijskih preskušanjih izotermne relaksacije vzorcev pramen R-4 do R-9, preračunanih na 6-pramensko sidro, na desnem delu [slike 3.40\(a\)](#) pa podajamo časovni potek povprečne kumulativne vrednosti upadlih sil za vzorce RPR-1 do RPR-3, prav tako preračunane za 6-pramensko sidro. Ugotovimo lahko, da so si diagrami obeh tipov preskušanj vzorcev pramena po obliki zelo podobni, pri čemer pa je vpliv stalnih dodajanj sile (vzorci RPR) v smislu bistveno povečanih vrednosti upadlih sil glede na vzorce R (brez popraviljanja upadlih sil) opazen na vseh ravneh obremenitve pramen.



Slika 3.40: Povprečni popravki upadle sile v sidru ΔP pred odčitkom na posamezni stopnji sile P_i PS / VPN 6-pramenskega sidra: (a) simulacija na podlagi povprečja laboratorijskih rezultatov izotermne relaksacije vzorcev R-4 do R-9 in vzorcev RPR, (b) dejansko povprečne izmerjene vrednosti po tipih sider RCP/D, RCP/D-I, RCP/D-K in RCP/D-Z (testno polje, maj 2009).

Figure 3.40: Average supplements of decreased forces ΔP before reading on individual level of force P_i of PS / VPN of an 6-strand anchor: (a) simulation based on average laboratory results of isothermal relaxation tests of samples R-4 to R-9 as well as samples RPR, (b) actual average values measured on anchor types RCP/D, RCP/D-I, RCP/D-K and RCP/D-Z (testing field, May 2009).

Na [sliki 3.40\(b\)](#) so zbrane povprečne vrednosti upadlih sil izmerjene maja 2009 pri preskušanjih na sidrih tipov RCP/D, RCP/D-K, RCP/D-Z in RCP/D-I na testnem polju RRN. Diagrami vseh štirih tipov sider so si med seboj v principu precej podobni, pri čemer pa je na same vrednosti tako vzdolž abscise kot tudi ordinate opazno vplivala zasnova veznega dela sidra. Od zasnove veznega dela je bilo odvisno do katere ravni preskusne sile je vezni del sidra še lahko prevzemal obtežbo, pri čemer so bile največje odpornosti na izvlek veznega dela sidra dosežene pri sidrih tipa RCP/D in RCP/D-K, nekoliko manjše vrednosti smo ugotovili pri sidrih RCP/D-I, medtem ko so bile odpornosti na izvlek najmanjše pri sidrih tipa RCP/D-Z. Najbližje realnemu stanju je primerjava diagramov na [sliki 3.40\(b\)](#) z diagramom vzorcev RPR [slike 3.40\(a\)](#), saj so bila pramena v vseh primerih obremenjena na identičen način (t.j. z dodajanjem upadlih sil). Iz diagramov je razvidno, da so bile oblike krivulj sicer podobne, vendar pa so bile povprečne upadle vrednosti sil ΔP pri preskušanjih na testnem polju precej višje od povprečnih upadlih vrednosti sil vzorcev RPR pri laboratorijskem preskušanju izotermne relaksacije. Z namenom izločiti vplive širšega vidika relaksacije na upadanje sil med PS ter dobiti jasnejšo sliko o obnašanju veznih delov posameznega tipa sidra med preskušnji na testnem polju, na [sliki 3.41](#) podajamo razlike povprečnih popravkov upadle sidrne sile ΔP pred odčitkom na posamezni stopnji sile PS/VPN leta 2009 in povprečnih izmerjenih upadlih sil vzorcev RPR pri laboratorijskih preskusih izotermne relaksacije za 6-pramensko sidro.



Slika 3.41: Razlike povprečnih popravkov upadle sidrne sile ΔP pred odčitkom na posamezni stopnji sile PS/VPN leta 2009 in povprečnih izmerjenih upadlih sil vzorcev RPR pri laboratorijskih preskusih izotermne relaksacije za 6-pramensko sidro.

Figure 3.41: Subtractions of average supplements of decreased forces ΔP before reading on individual level of force of PS/VPN in 2009 and average values of decreased forces measured on samples RPR at laboratory isothermal relaxation tests for an 6-strand anchor.

Na [sliki 3.41](#) za vse tipe sider testnega polja podajamo vrednosti upadlih sil ΔP_{t-1r} pred izvedbo odčitkov na posamezni stopnji sile PS / VPN na testnem polju leta 2009, pri katerih so torej izloženi širši vidiki relaksacije na upadanje sil. Rezultati na [sliki 3.41](#) potrjujejo, da dejanskih padcev sile ΔP v sidru med PS in VPN ne moremo povezovati izključno samo z mehanizmom prenosa sile iz mononapenjalk na pramena (pri manjših silah P_i) in s pojavom prave relaksacije, kot jo pri večjih nateznih silah poznamo pri prednapenjanju konstrukcij.

Na prvi stopnji sile PS/VPN so bile vrednosti upadlih sil ΔP_{t-1r} najmanjše pri referenčnih sidrih RCP/D, medtem ko so se na ravni sile P_2 vrednosti ΔP_{t-1r} sider RCP/D-K zelo približale vrednostim sider RCP/D. Tudi v nadaljevanju PS/VPN je bilo obnašanje sider tipa RCP/D in RCP/D-K zelo podobno, kar je skladno s podobno zasnovo veznih delov obeh tipov sider: oblike krivulj so zelo podobne, razlike v vrednostih pa lahko pripišemo predvsem vplivom razlik v osni togosti na napetostno-deformacijsko stanje veznega dela, različnim mikrolokacijam sider ter ostalih manjšim razlikam izvedbenih detajlov. Nekoliko slabše obnašanje sider RCP/D v zadnji fazi PS/VPN je razvidno iz večjih vrednosti ΔP_{t-1r} v primerjavi z vrednostmi sider RCP/D-K na isti stopnji sile.

Na drugi strani so pri sidrih RCP/D-Z od stopnje sile P_2 PS/VPN naprej vidne večje vrednosti ΔP_{t-1r} , kot pri ostalih tipih sider, kar je še posebej opazno ob začetku izvlačanja veznega dela sider, ko vrednosti ΔP_{t-1r} že od samega začetka opazovanja naprej močno naraščajo. Veliki padci sile na samem začetku opazovanja po vnosu posamezne stopnje sile so eden od pokazateljev popuščenja veznega dela sidra – takšno obnašanje sider RCP/D-Z povezujemo z manjšimi odpornostmi veznih delov sider tega tipa, ki so bile posledica izvlačanja pramen iz cementne injekcijske mase. Vzrok za to lahko najdemo v oblikovanju veznega dela sider, pri katerih so vezni deli pramen relativno kratki, vezna dela podsider s krajšima prostima deloma pa se nahajata ob oplaščenih prostih delih pramen z daljšimi prostimi deli, zaradi česar je objetje injekcijske mase ob veznih delih pramen manj učinkovito, poleg tega pa obstaja verjetnost kontaminacije golih pramen veznega dela z vazelinom (glej [sliki 3.15](#) in [3.16](#)).

Diagrami upadlih sil ΔP_{t-1r} sider RCP/D-I predstavljajo "kombinacijo" obnašanja sider RCP/D in RCP/D-K na eni strani in sider RCP/D-Z na drugi strani. Kratki vezni deli pramen dolžin, kot pri sidrih RCP/D-Z, se pri sidrih RCP/D-I pojavljajo le pri podsidru C z najdaljšim prostim delom, medtem ko vezni deli pramen ostalih dveh podsider z daljšimi veznimi deli pramen potekajo ob prostih delih in tesnilnih stikih pramen z daljšimi prostimi deli. V teh območjih je bila zaradi načina tehnološke izvedbe tesnilnega stika prostega in veznega dela podsider (glej [sliko 3.15](#)) radialna togost ob veznih delih pramen manjša, zato so se prej pojavile prve razpoke v injekcijski masi, ki jim je sledilo razmikanje razpokane cementne injekcijske mase, zato je do izvlačanja veznih delov pramen prišlo pri manjših silah kot pri sidrih RCP/D in RCP/D-K. Dodatno so se v teh območjih (zaradi razrivanja injekcijske mase v radialni smeri prečno na os pramen) povečale normalne napetosti na oplaščena pramena z daljšimi prostimi deli, posledica česar so bile večje vrednosti trenja v teh območjih prostega dela pramen.

4 ANALIZA IN-SITU PRESKUSOV NOSILNOSTI SIDER Z DOLOČITVIJO ODPORNOSTI NA IZVLEK

4.1 PRIMERJAVA ODPORNOSTI NA IZVLEK ZA SIDRA KOT CELOTO DOSEŽENIH PRI PREISKAVAH SIDER NA TESTNEM POLJU

V poglavju 3.5.4 smo za vse tipe sider, vgrajenih v sklopu testnega polja na opornem zidu OZ-05 in na katerih je bila v letu 2008 izvedena PS do porušitve, podali primerjalne diagrame z vrisanimi merodajnimi intervalnimi merami lezenja k_{int} povprečja vseh pramen, določenimi po vseh štirih metodah (IP, SIA, 10 in ISO). Prav tako smo v istem poglavju za PS, opravljene leta 2008, primerjali vpliv metode določitve merodajnih mer lezenja na odpornosti na izvlek R_a sider z različnimi koncepti veznih delov, določenih kot presečišča odsekoma ravnih krivulj merodajnih mer lezenja k_{int} povprečja vseh pramen, z vodoravnico $k_{krit} = 2$ mm. Po enaki metodologiji smo obdelali tudi rezultate leta 2009 ponovljenih PS do porušitve treh referenčnih sider RCP/D in po enega modificiranega sidra RCP/D-K, RCP/D-Z in RCP/D-I, pri čemer smo v preglednici 4.1 za primerjavo zbrali vrednosti R_a PS izvedenih leta 2008, kot tudi v letu 2009 ponovljenih PS.

Preglednica 4.1: Odpornosti sider na izvlek dobljene pri preiskavah sider leta 2008 in 2009 kot presečišča odsekoma ravne krivulje merodajnih mer lezenja povprečja vseh pramen s k_{krit} .

Table 4.1: Anchor pull-out resistances obtained at investigation tests in 2008 and 2009 as the crossings of sectionally straight competent creep displacement curves (as average of all strands) with k_{krit} .

Leto preskusa	Metoda	$R_{a,SBz-23}$ tip RCP/D [kN]	$R_{a,SBz-26}$ tip RCP/D [kN]	$R_{a,SBz-59}$ tip RCP/D [kN]	$R_{a,SBz-89}$ tip RCP/D-K [kN]	$R_{a,SBz-56}$ tip RCP/D-Z [kN]	$R_{a,SBz-86}$ tip RCP/D-I [kN]
2008	IP	651	1211	642	1254*	702	1144
	SIA	652	1210	639	–	706	1219
	10	651	–	–	–	714	–
	ISO	652	1246	667	–	702	1151
2009	IP	410	1173	1115	1127**	297	1099
	SIA	410	1174	1116	1127**	297	–
	10	410	1181	–	1127**	300	–
	ISO	410	1173	1110	1127**	297	–
$\frac{R_{a,2009}}{R_{a,2008}}$	IP	63 %	97 %	174 %	≈ 90 %	42 %	96 %
	SIA	63 %	97 %	175 %	–	42 %	–
	10	63 %	–	–	–	42 %	–
	ISO	63 %	94 %	166 %	–	42 %	–

Opombe: – krivulja merodajnih mer lezenja ne seka k_{krit} ,
 * ocenjena odpornost sidra na izvlek (presečišče krivulje k_{int} s k_{krit} ne obstaja),
 ** vrednost sidrne sile ob hipnem pretrgu žic enega pramena sidra.

Medsebojna primerjava rezultatov PS do porušitve opravljenih leta 2008 in 2009 pri obravnavanih sidrih je otežena, saj so bili mehanizmi popuščanja veznih delov različnih tipov sider različni, pri čemer pa so dosežene odpornosti na izvlek ponovljenih PS odvisne ravno od načina popustitve sidra pri PS leta 2008:

- Najmanjšo vrednost $R_{a,2009}$ pri ponovljeni PS smo dosegli na sidru SBz-56 tipa RCP/D-Z (le 42 % vrednosti $R_{a,2008}$), pri katerem sta leta 2008 popustila oba pramena podsidra A. Pri PS leta 2009 sta ponovno popustila ista pramena, le v izrazitejši obliki (ni bila samo presežena k_{krit} , pač pa sta bila pramena fizično izvlečena), hkrati pa je bila k_{krit} močno presežena tudi pri ostalih pramenih sidra. Le nekoliko boljši rezultat smo dosegli pri ponovitvi PS sidra SBz-23 tipa RCP/D (vrednost $R_{a,2009}$ je dosegla 63 % vrednosti $R_{a,2008}$): v letu 2008 je pri PS prišlo do hipne porušitve s pokom (izvlačenje pramen sidra iz cementne injekcijske mase) pri čemer se je pri PS leta 2009 isti porušni mehanizem ponovil, le da tokrat pri manjši sili.
- Primerljive vrednosti odpornosti na izvlek R_a pri PS leta 2008 in 2009 smo dosegli pri sidrih SBz-26 tipa RCP/D in SBz-86 tipa RCP/D-I. Pri sidru SBz-26 je pri PS leta 2008 verjetno prišlo do izvlečenja kabla sidra iz rebraste PE cevi (čeprav ni možno izključiti niti porušitve po zunanjem stiku sidra), medtem ko sta pri PS leta 2009 sprva popustila dva pramena, na naslednji stopnji sile pa še tri pramena, vendar pa končne vrednosti trajnih izvlečkov Δs_{bl} kažejo približno enake končne izvlečke pramen sidra (manjši sta bili le vrednosti Δs_{bl} izločenega para pramen). Glede na takšne ugotovitve in razmerje med $R_{a,2009}/R_{a,2008}$ sklepamo, da je leta 2008 pri tem sidru prišlo do izvlečenja kabla sidra iz rebraste PE cevi. Pri PS sidra SBz-86 sta leta 2008 popustila pramena podsidra C, medtem ko so pri PS leta 2009 popustili vezni deli pretežnega dela pramen po notranjem stiku sidra.
- Pri sidru SBz-59 tipa RCP/D sta pri PS leta 2008 popustila vezna dela dveh pramen, medtem ko je bila pri ponovljeni PS leta 2009 dosežena porušitev po notranjem stiku večine pramen, zato je bila končna dosežena vrednost odpornosti na izvlek R_a posledično bistveno večja. Največjo vrednost pri ponovitvi PS smo torej dosegli v primeru, ko je prišlo do določene spremembe porušnega mehanizma, torej ko sta pri PS sidra leta 2008 popustili dve prameni, pri ponovljenem preskusu leta 2009 pa je po notranjem stiku popustila večina pramen sidra.
- Vrednosti odpornosti na izvlek za sidro SBz-89 tipa RCP/D-K iz leta 2008 in 2009 zaradi povsem različnih mehanizmov porušitve ni možno neposredno primerjati, saj pri PS leta 2008 do dokončne porušitve veznega dela sidra ni prišlo, saj so bili po pretečenem minimalnem času opazovanja znaki popuščanja opazni le pri dveh pramenih, zato smo v tem primeru za vrednost $R_{a,2008}$ ocenili, da je enaka preskusni sili P_{pv} , saj smo pričakovali, da bi v primeru kakršnegakoli povečanja sile prišlo do porušitve veznega dela sidra v celoti. Pri PS, opravljeni na istem sidru leta 2009, je sidro popustilo po pramenih (nenaden pretrg dveh predhodno mehansko poškodovanih žic pramena), čeprav vezni del sidra še ni kazal znakov popuščanja.

Iz rezultatov PS testnega polja do porušitve, prvotno izvedenih v sklopu RRN leta 2008 in nato ponovljenih leta 2009, lahko izluščimo naslednje zaključke:

- Izkušnje do sedaj izvedenih PS prednapetih pramenskih sider, preskušanih po sistemu napenjanja posamičnih pramen sidra z mononapenjalkami, kažejo, da se pred začetkom porušitve veznega dela sidra kot celote vedno pojavi popuščanje veznih delov posamičnih pramen, ki je posledica koncepta oblikovanja veznega dela sider. Kot je razvidno iz prereza 4-4 sidra RCP/D na [sliki 3.6](#) so pramena v veznem delu sidra speta v snop z distančnikom, pri čemer pa snop spetih pramen nalega na notranjo površino rebrastih PE cevi, zato vezni deli pramen, ki so v neposredni bližini ali pa so celo v stiku z rebrasto PE cevjo, začnejo popuščati prej, predno popusti vezni del sidra po zunanjem stiku sidra. Takšen mehanizem obnašanja pramen je opaziti tudi pri sidrih RCP/D in RCP/D-K, ki so na koncu popustila po kablju sidra. Tehnološka rešitev, ki bi zagotavljala odmik vseh pramen kabla sidra od rebraste PE cevi vsaj za 5 mm, bi prispevala vsaj h kasnejšem pojavu

znakov popuščenja vezi pramen z injekcijsko maso, če ne bi celo povzročila spremembo mehanizma (popustitev veznega dela sidra po zunanjem stiku).

- Na drugi strani rezultati PS in VPN sider kažejo izrazito popuščenje veznih delov pramen sider RCP/D-Z, v obliki izvlečenja veznega dela pramen iz notranjosti rebraste PE cevi. Katero podsidro bo pri sidru RCP/D-Z popustilo zavisi tudi od stanja površine golih pramen v veznem delu (morebitna kontaminacija z vazelinom ali drugimi snovmi). V kolikor je stanje površine veznega dela pramen brezhibno, potem šibki člen sidra predstavlja objetost injekcijske mase ob veznem delu pramen podsida v kombinaciji z nosilnostjo tal v območju veznih delov podsider: mimo veznega dela podsida A z najkrajšim prostim delom potekata oplaščena prosta dela podsider B in C, zaradi česar je objetje veznega dela najkrajšega podsida A najšibkejše, poleg tega pa so normalne napetosti σ_z v tleh v tem območju navzdol odklonjenih sider najmanjše. Posledično so v tem delu najmanjše tudi radialne tlačne napetosti na injekcijsko maso, v katero so zalita pramena, zaradi česar pri teh pramenih pričakujemo najmanjšo odpornost na izvlek. V homogenih tleh in pri sidrih z brezhibno čistimi golimi prameni veznega dela sidra torej pričakujemo, da bo kot prvo popustil vezni del podsida A. V primeru lokalno kontaminiranih (nečistih) veznih delov golih pramen je kot prvo pričakovati popustitev veznega dela tistega podsida, katerega sestavni del je tak pramen (Hyett in sod., 1995). Poleg že navedenih vplivov je stopnja objetosti injekcijske mase znotraj rebraste PE cevi odvisna tudi od lastnosti tal neposredno ob steni vrtine veznega dela podsida, saj je v primeru plastovitih ali lokalno razpokanih tal pričakovati, da bo popustil vezni del tistega podsida, ki se nahaja v območju najšibkejših tal.
- Pri sidrih, pri katerih je pri PS oz. VPN leta 2008 prišlo do izrazitega izvlečenja veznih delov posameznih pramen iz injekcijske mase v notranjosti rebraste PE cevi (sidri SBz-66 in SBz-89 tipa RCP/D-K, sidra SBz-36, SBz-56, SBz-63 in SBz-81 tipa RCP/D-Z, sidra SBz-12, SBz-60 in SBz-78 tipa RCP/D-I), so pri ponovljenem preskusu leta 2009 popustila po istem mehanizmu, pri čemer nismo ugotovili večje odpornosti na izvlek R_a . Večjo odpornost na izvlek R_a smo dobili le pri sidru SBz-59, pri katerem pa je prišlo do določene spremembe porušnega mehanizma – obnašanje veznih delov pramen pri PS leta 2009 je bilo bolj enakomerno (torej ni prišlo do izrazitega izvlečenja posameznih pramen ampak kabla sidra kot celote). Takšno obnašanje sider z izrazitim izvlečenjem posameznih pramen je pričakovano, saj se stanje razpokane injekcijske mase ob pramenih veznih delov in morebitne kontaminiranosti površine pramen z vazelinom v obdobju 2008 do 2009 ni moglo izboljšati.

4.2 PRIMERJAVA ODPORNOSTI NA IZVLEK DOBLJENIH S SEŠTEVANJEM ODPORNOSTI POSAMEZNIH PRAMEN Z VREDNOSTMI ZA SIDRO KOT CELOTO

Pri vrednotenju rezultatov PS sider z enakimi dolžinami prostih in veznih delov pramen, ki jih napenjamo z mononapenjalkami in katerih izvlečke spremljamo ločeno po posameznih pramenih, v praksi iz povprečnih odčitkov izvlečkov vseh pramen kabla sidra določimo odpornost veznega dela sider na izvlek $R_{a,s(k-povp)}$. Poleg takega pristopa imamo pri sidrih napetih z mononapenjalkami še drugo možnost, pri kateri preko odčitanih izvlečkov ločeno spremljamo odpornostne karakteristike posameznih pramen kabla sidra. Glede na to, da je ob uporabi skupnega hidravličnega sistema vseh mononapenjalk vsak pramen samostojno zaklinjen na isto silo, obstaja tudi možnost, da dosežene odpornosti na izvlek posameznih pramen enostavno seštejemo, s čimer za sidro dobimo odpornost $R_{a,s(\Sigma pramen)}$. Po prvem pristopu lahko obravnavamo vse tipe sider testnega polja (RCP/D, RCP/D-K, RCP/D-Z in RCP/D-I), medtem ko se zdi drugi pristop bolj uporaben pri sidrih tipa RCP/D-Z in RCP/D-I.

Iz tega razloga smo se odločili, da bomo na sidrih testnega polja opornega zidu OZ-05 preverili pristopa povprečnih odčitkov izvlečkov vseh pramen, kot tudi seštevanja odpornosti posameznih pramen. Ob tem je potrebna previdna ocena odpornosti posameznega pramena:

- v kolikor odsekoma ravne krivulje merodajnih mer lezenja k_{int} sekajo vodoravnico $k_{\text{krit}} = 2$ mm, potem seštete odpornosti R_a posameznih pramen (t.j. $R_{a,s(\Sigma\text{pramen})}$) ne bi smele bistveno odstopati od vrednosti $R_{a,s(k\text{-povp})}$;
- v kolikor presečišče pri nekaterih pramenih ni (torej so $k_{\text{int}} < k_{\text{krit}}$), potem smo tudi na ravni pramen uporabili pristop, za sidra kot celoto opisan v poglavju 3.5.3: v primeru ugodne kombinacije poteka linearnega trenda, $k_{\text{max}} < k_{\text{krit}}$ in $k_{\text{int}} < 1,35$ mm smo kot oceno odpornosti na izvlek posameznega pramena upoštevali delež preskusne sile, ki jo je ta pramen na zadnji doseženi stopnji PS oz. VPN prevzemal, povečan za 10 %. V nasprotnem primeru smo upoštevali, da je odpornost na izvlek tega pramena enaka ravni preskusne sile zadnje dosežene stopnje.

Za primerjavo smo v preglednici 4.2 za vsa sidra testnega polja opornega zidu OZ-05, preskušena v letih 2008 in 2009, zbrali odpornosti sider na izvlek R_a iz vrednotene tako na podlagi povprečja izvlečkov pramen $R_{a,s(k\text{-povp})}$ kot tudi odpornosti sider na izvlek, izračunane kot vsote odpornosti posameznih pramen na izvlek $R_{a,s(\Sigma\text{pramen})}$. Za obe seriji PS in VPN, opravljenih v letih 2008 in 2009, smo izračunali tudi količnik $R_{a,s(\Sigma\text{pramen})}/R_{a,s(k\text{-povp})}$. Ob tem velja opozoriti, da so vrednosti odpornosti na izvlek iz vrednotene pri PS zanesljivejše od vrednosti dobljenih pri VPN, saj smo pri PS postopek preskusa izvajali dovolj časa do povsem jasne in nedvoumne porušitve veznih delov sider. Maksimalne vrednosti mer lezenja pri popustitvi veznega dela sidra smo tako dobili na daljšem časovnem intervalu, zato je njihova vrednost zanesljivejša, s tem pa je točneje določena tudi vrednost odpornosti na izvlek R_a . Na drugi strani smo morali VPN, s ciljem preprečiti uničenje veznih delov sider, prekiniti ob prvih znakih popuščanja veznih delov sider, saj bi s podaljševanjem opazovanja mere lezenja še naraščale, poškodbe veznih delov pa bi se še povečevale. Vrednosti R_a , dobljene pri VPN, so torej le približna ocena razpoložljive odpornosti sidra na izvlek.

Pri referenčnih sidrih RCP/D so vrednosti R_a preskušanj, opravljenih leta 2008 in 2009, dobljene po obeh metodah, zelo podobne: pri sidru SBz-23 so identične, medtem ko so vrednosti vsote odpornosti na izvlek po pramenih $R_{a,s(\Sigma\text{pramen})}$ na preostalih dveh sidrih tipa RCP/D pri vseh opravljenih preskusih do 3 % nižje od vrednosti povprečja pramen za sidro kot celoto $R_{a,s(k\text{-povp})}$. Največje odstopanje (9 %) smo ugotovili pri PS sidra SBz-59 leta 2008, pri katerem sta, v primerjavi z ostalimi prameni z nizkimi k (na zadnji stopnji sile so bili k nižji od 0,8 mm), popustila dva pramena (največja k_{int} sta bila 9,6 in 7,0 mm). Vrednosti k_{int} pri ostalih štirih pramenih so bile nizke, trend pa ugoden, tako da smo pri določitvi odpornosti na izvlek R_a teh pramen lahko upoštevali ekstrapolacijo sile zadnje dosežene stopnje sile za 10 %, kar se odraža v večji vrednosti $R_{a,s(\Sigma\text{pramen})}$. Na drugi strani so bili izvlečki najslabših dveh pramen tako veliki, da je bila vrednost k_{int} za sidro kot celoto na zadnji stopnji velika in je bilo presečišče odsekoma ravne krivulje k_{int} s k_{krit} doseženo pri nizki vrednosti sile, zaradi česar je bila $R_{a,\text{sidra}(k\text{-povp})}$ od $R_{a,s(\Sigma\text{pramen})}$ nižja za 9 %. Zanimivo je, da je bila pri dokaznem CPN leta 2009 situacija ravno obratna: pri močno poškodovanih dveh pramenih sta bili vrednosti k_{int} tako visoki, da pri vrednotenju njunih R_a ekstrapolacija ni bila možna, a smo to lahko storili pri ostalih štirih pramenih. Pri vrednotenju povprečnih vrednosti za sidro so se slabše vrednosti teh dveh pramen povprečile z ostalimi štirimi prameni, zato je bil k_{int} za sidro za 40 % nižji, zaradi česar je bila možna ekstrapolacija dosežene preskusne sile P_p pri CPN za 10 %. Primer sidra SBz-59 kaže, da s pristopom seštevanja odpornosti pramen, v primerih, ko je obnašanje veznih delov pramen kabla sidra močno različno (določena pramena popolnoma popustijo, medtem ko je odpornost veznih delov ostalih pramen še neokrnjena), pri določitvi končne vrednosti $R_{a,s(\Sigma\text{pramen})}$ natančneje zajamemo mehanizem obnašanja takega sidra.

Preglednica 4.2: Vrednosti odpornosti sider testnega polja na izvlek določene po metodi IP – primerjava vrednosti R_a določenih na podlagi povprečij lezenja vseh pramen $R_{a,s(k-povp)}$ in vrednosti izračunane kot vsote odpornosti vseh pramen na izvlek $R_{a,s(\Sigma pramen)}$.

Table 4.2: Values of anchor pull-out resistances for testing field anchors defined after the method IP – comparison of R_a values defined on the basis of average creeps of all strands $R_{a,s(k-povp)}$ and values calculated as sums of pull-out resistances of all strands $R_{a,s(\Sigma pramen)}$.

Št.	Oznaka sidra	Tip sidra	ŠNP	Preskus 2008	$R_{a,s(k-povp)}$ [kN]	$R_{a,s(\Sigma pramen)}$ [kN]	$\frac{R_{a,s(\Sigma pramen)}}{R_{a,s(k-povp)}}$	Preskus 2009	$R_{a,s(k-povp)}$ [kN]	$R_{a,s(\Sigma pramen)}$ [kN]	$\frac{R_{a,s(\Sigma pramen)}}{R_{a,s(k-povp)}}$
16	SBz-23	RCP/D	6	PS	651	652	1,00	PS	410	410	1,00
17	SBz-26	RCP/D	6	PS	1211	1222	1,01	CPN	698	690	0,99
								PS	1173	1153	0,98
18	SBz-59	RCP/D	6	PS	642	701	1,09	PS	1115	1114	1,00
								CPN	757	734	0,97
15	SBz-89	RCP/D-K	6	PS	1254*	1241*	0,99	CPN	948	934	0,99
								PS	1228	1196	0,97
3	SBz-18	RCP/D-K	6	VPN	978	950	0,97	VPN1	1015	1019	1,00
								VPN2	980	978	1,00
								CPN	619	618	1,00
6	SBz-39	RCP/D-K	6	VPN	1231	1193	0,97	VPN	978	1002	1,02
10	SBz-66	RCP/D-K	6	VPN	1220	1277	1,05	VPN	1140	1153	1,01
13	SBz-84	RCP/D-K	6	VPN	978	969	0,99	VPN	1254	1268	1,01
7	SBz-56	RCP/D-Z	5	PS	702	769	1,10	CPN	356	361	1,01
								PS	297	299	1,01
2	SBz-15	RCP/D-Z	6	VPN	400	482	1,21	odrezana pramena (napenjanje ni možno)			
5	SBz-36	RCP/D-Z	6	VPN	694	742	1,07	VPN	426	408	0,96
9	SBz-63	RCP/D-Z	4	VPN	469	468	1,00	VPN	319	376	1,18
12	SBz-81	RCP/D-Z	6	VPN	837	832	0,99	VPN	772	762	0,99
14	SBz-86	RCP/D-I	6	PS	1144	1171	1,02	CPN	790	755	0,96
								VPN	1116	1129	1,01
1	SBz-12	RCP/D-I	6	VPN	604	706	1,17	VPN1	426	382	0,90
								VPN2	534	544	1,02
4	SBz-33	RCP/D-I	6	VPN	1248	1237	0,99	VPN	978	876	0,90
8	SBz-60	RCP/D-I	6	VPN	789	790	1,00	VPN	781	770	0,99
11	SBz-78	RCP/D-I	6	VPN	840	876	1,04	VPN	924	980	1,06
								CPN	630	663	1,05

Opombe: * ocenjena vrednost R_a , saj porušitev v smislu presečišč krivulj s k_{krit} med PS ni bila dosežena,
 ŠNP število napetih pramen sidra,
 $R_{a,s(k-povp)}$ odpornost sidra kot celote na izvlek izračunana iz povprečnih vrednosti vseh izvlečkov pramen sidra,
 $R_{a,s(\Sigma pramen)}$ odpornost sidra na izvlek izračunana kot vsota odpornosti na izvlek posameznih pramen kabla sidra.

Podobno so se obnašala tudi sidra tipa RCP/D-K: večinoma so bile vrednosti $R_{a,s(\Sigma pramen)}$ primerljive z vrednostmi $R_{a,s(k-povp)}$, odstopanja so bila največ do 3 %, pri čemer je večja bodisi vrednost $R_{a,s(\Sigma pramen)}$ bodisi $R_{a,s(k-povp)}$. Nekoliko večje odstopanje je bilo pri sidru SBz-66 preskušnem leta 2008, pri

katerem je na ravni preskusne sile P_{pv} v 30' močno popustil pramen #6 ($k_{25'-30'} = 6,4$ mm), k_{krit} pa je bila presežena tudi pri pramenu #2, medtem ko pri ostalih pramenih znakov popuščenja ni bilo opaziti. Zaradi tega je bil vpliv obeh porušanih pramen na povprečno vrednost sidra kot celote tako velik, da je bila vrednost $R_{a,s(\Sigma pramen)}$ za 5 % večja od $R_{a,s(k-povp)}$. Pri sidru SBz-89, preskušenem leta 2009, je bila situacija ravno obratna: vrednost $R_{a,s(\Sigma pramen)}$ je bila za 3 % manjša od $R_{a,s(k-povp)}$. Pri tem sidru je bilo obnašanje vseh pramen precej podobno (v nobenem primeru ni bila dosežena ali presežena k_{krit}), pri čemer je popustil celoten vezni del kabla sidra naenkrat. Zaradi neugodnega trenda pri pramenih #3 in #4 pri oceni njihove odpornosti nismo mogli upoštevati ekstrapolacije dosežene sile za 10 %, medtem ko je bil trend sidra kot povprečja vseh pramen ugoden (torej smo lahko upoštevali ekstrapolacijo 10 %), kar se na koncu odraža kot 3 % razlika v odpornosti na izvlek.

Pri sidrih tipa RCP/D-Z je bil raztros vrednosti $R_{a,s(\Sigma pramen)}$ in $R_{a,s(k-povp)}$ v splošnem nekoliko večji kot pri tipih RCP/D in RCP/D-K. Razlog za takšno obnašanje je v obnašanju veznih delov podsider, kjer sta pramena enega podsidera popolnoma popustila glede na pramena ostalih dveh podsider. Pri sidru SBz-56, preskušenem leta 2008, pri katerem je bila $R_{a,s(\Sigma pramen)}$ za 10 % večja od $R_{a,s(k-povp)}$, je k_{int} pramen podsidera A znašal 83,4 oz. 47,5 mm, medtem ko so bile pri ostalih pramenih dosežene vrednosti k_{int} od 0,28 do 1,28 mm. Še večja razlika je opazna pri sidru SBz-15, preskušenem istega leta: v tem primeru je bila $R_{a,s(\Sigma pramen)}$ kar za 21 % večja od $R_{a,s(k-povp)}$, razlog pa je bil tudi v tem primeru popolna popustitev pramen podsidera A (k_{int} 7,9 oz. 24,6 mm), medtem ko so bile pri ostalih pramenih dosežene vrednosti k_{int} od 0,40 do 0,77 mm, zato smo pri njih zaradi ugodnega trenda upoštevali tudi ekstrapolacijo dosežene sile v sidru za 10 %. Popolnoma enaka situacija je bila pri VPN sidra SBz-63 leta 2009: pri razklinjanju sidra sta povsem popustila pramena podsidera A, zato sta pri VPN popustila pramena naslednjega podsidera B (ocenjena k_{int} 15,0 mm), pri čemer pa pramena podsidera C še nista kazala znakov popuščenja (k_{int} 0,73 oz. 0,33 mm). V vseh treh primerih smo lahko pri seštevanju odpornosti po pramenih upoštevali ugodne razmere pri pramenih ostalih podsider vključno z upoštevanjem ekstrapolacije doseženih sil, zaradi česar so vrednosti $R_{a,s(\Sigma pramen)}$ precej presegle vrednosti $R_{a,s(k-povp)}$.

Pri sidrih tipa RCP/D-I, preskušenih leta 2008, je bilo največje odstopanje med vrednostmi R_a opazno pri sidru SBz-12, pri katerem je popolnoma popustilo podsidero C, medtem ko je bilo stanje veznega dela pramen podsider A in B takšno, da smo lahko upoštevali ekstrapolacijo dosežene sile za 10 %. Posledično je bila vrednost $R_{a,s(\Sigma pramen)}$ za 17 % višja od vrednosti $R_{a,s(k-povp)}$, saj je vrednost povprečja vseh pramen k_{int} dosegla kar 4,9 mm, torej smo odpornost sidra kot celote dobili iz presečišča odsekoma ravne krivulje k_{int} s k_{krit} . Isto sidro se je pri prvem VPN opravljenem v letu 2009 obnašalo povsem drugače, saj do porušitve ni prišlo le v pramenih podsidera C, pač pa so bili znaki porušitve opazni tudi v pramenih ostalih podsider A in B. Zaradi tega smo odpornost na izvlek sidra kot celote ocenili kot zadnjo doseženo stopnjo sile, medtem ko so bile na drugi strani kar pri štirih pramenih dosežene porušitve pri nižji sili (odpornosti dobljene iz presečišča odsekoma ravne krivulje k_{int} s k_{krit}). Na enak način so se obnašali vezni deli pramen kabla sidra SBz-33, pri katerem je iz istega razloga vrednost $R_{a,s(k-povp)}$ prav tako za 12 % preseгла vrednost $R_{a,s(\Sigma pramen)}$. Na drugi strani je bilo obnašanje pramen podsidera SBz-78 bolj podobno: do porušitve je že na stopnji sile P_3 prišlo edino pri pramenu #6, pri čemer se je vrednost k_{int} gibala v območju med 0,34 in 1,18 mm, trend gibanja mer lezenja pa je bil ugoden, tako da smo lahko pri vseh petih, še neporušenih pramenih, upoštevali ekstrapolacijo dosežene sile za 10 %, zraven pa smo prišteli še R_a pramena #6. Na drugi strani smo sicer lahko ekstrapolirali tudi povprečne vrednosti za sidro kot celoto, v katere je bilo zajetih pet neporušenih pramen, vendar pa je bila na koncu vrednost $R_{a,s(\Sigma pramen)}$ za približno 5 % večja od $R_{a,s(k-povp)}$.

Zanima nas, ali lahko na podlagi vseh izvedenih preskušanj podamo odgovor, katera od metod določanja odpornosti sidra na izvlek (seštevanje odpornosti pramen na izvlek $R_{a,s(\Sigma\text{pramen})}$ ali določanje odpornosti veznega dela sidra na izvlek na podlagi povprečnih izvlečkov vseh pramen $R_{a,s(k\text{-povp})}$), pri pramenskih prednapetih sidrih napetih z mononapenjalkami, je ustrežnejša? V primerih "klasično" zasnovanih sider, katerih dolžine veznih delov vseh pramen so enake, ob pogoju ustreznega oblikovanja sidra v notranjosti rebraste PE cevi in učinkovitega izvajanja kontrole proizvodnega procesa, ki omogoča pravočasno detekcijo kontaminacije golih pramen v veznem delu, lahko pričakujemo enako obnašanje vseh pramen sidra, pri čemer bo popustil kabel sidra kot celota. V tem primeru z obema pristopoma dobimo praktično enaka rezultata ($R_{a,s(k\text{-povp})} \approx R_{a,s(\Sigma\text{pramen})}$), odstopanja za nekaj odstotkov pa so na ravni merilne negotovosti, ki je predvsem posledica omejene ločljivosti merilnega sistema in pogojev pri izvedbi preskusov.

Na drugi strani imamo primere obnašanja veznih delov sider, pri katerih so izrazito popustila posamezna pramena, medtem ko odpornost veznih delov ostalih pramen še ni bila močnejše okrnjena. Takšen mehanizem obnašanja se je izrazito pojavljal pri sidrih tipa RCP/D-Z, v nekoliko manjši meri pa tudi pri sidrih RCP/D-I; v primeru obeh tipov sider je vezni del sidra sestavljen iz pramen različnih dolžin prostih delov, zato vezni deli nekaterih pramen potekajo ob oplaščenih pramenih drugih pramen (slabši pogoji objetja), vezni deli pramen delujejo v različnih območjih tal (kjer so lahko različni geološko-geomehanski pogoji vključno s prisotnostjo talne vode), v različnih globinah tal zaledja (različne normalne napetosti objetja), povrh vsega pa niti ni nujno, da so vse dolžine veznih delov pramen podsider enako dolge. V takem primeru se zdi boljši pristop s seštevanjem odpornosti posameznih pramen, saj na ta način točneje povzamemo mehanizem obnašanja veznih delov pramen, napetih z ločenimi mononapenjalkami, pri čemer je takšen pristop primeren v primerih popuščanja vezi pramen-injekcijska masa v notranjosti rebraste PE cevi. Seveda moramo pri določanju $R_{a,s(\Sigma\text{pramen})}$ uporabiti previden pristop, kar še posebej velja za primere, pri katerih pri oceni odpornosti na izvlek posameznega pramena upoštevamo ekstrapolacijo zadnje stopnje sile za 10 %, ali pa se vrednosti k_{int} z naraščanjem stopnje sile PS izmenično spreminjajo navzgor in navzdol. Seštevanje odpornosti posameznih podsider pri sidrih tipa RCP/D-Z in RCP/D-I se nam ne zdi sporno; drugače je pri obravnavanju odpornosti veznih delov pramen, ki se nahajajo drug ob drugem v istem podsidru (sidra tipa RCP/D-Z in RCP/D-I) ali sidru (tipa RCP/D in RCP/D-K). Ob predpostavki čistega golega pramena z brezhibno vezjo pramen-injekcijska masa, ob popuščanju veznega dela enega pramena pride do poškodb in razpok v strjeni injekcijski masi, zaradi česa je okrnjena tudi vez pramen-injekcijska masa drugih pramen v soseščini. V kolikor je površina enega pramena kontaminirana, potem je pri popuščanju in izvlačenju tega pramena iz injekcijske mase obseg poškodb ostalih pramen precej manjši, zato je ob izkazani zadostni odpornosti ostalih pramen (omejene vrednosti k_{int} in ugoden trend k) ekstrapolacija odpornosti posameznih pramen za 10 % bolj opravičljiva. Za uporabo v praksi predlagamo konservativnejši pristop, po katerem v primeru porušitve enega pramena podsidra v ostalih pramenih istega podsidra privzamemo, da je že na tej stopnji sile dosežena odpornost pramen na izvlek. Vsekakor pa naj se pri vsakem sidru določita obe vrednosti ($R_{a,s(k\text{-povp})}$ in $R_{a,s(\Sigma\text{pramen})}$), pri čemer razlika med njunima vrednostima opozarja na različno obnašanje veznih delov posameznih pramen, ki terja posebno pozornost in skrbno analizo. Ob tem moramo zagotoviti, da v primerih popuščanja in izvlačenja veznega sidra kot celote po vezi s tlemi zaledja vrednost vsote po pramenih $R_{a,s(\Sigma\text{pramen})}$ ne preseže vrednosti sidra kot celote $R_{a,s(k\text{-povp})}$.

Na podlagi rezultatov v [preglednici 4.2](#) lahko na kratko komentiramo vpliv takojšnje ponovitve preskusa nosilnosti sidra, kar v praksi, v primerih neuspešnega prvega preskusa, včasih izvedejo tudi izvajalci sidrskih del. Ob tem velja opozoriti, da lahko kot ponovitev preskusa nosilnosti smatramo že izvedbo preskusa na predhodno zaklinjenem sidru, ki je tik pred izvedbo preskusa nosilnosti razklinjeno.

Iz rezultatov ponovljenih preskusov nosilnosti sider leta 2009 na testnem polju smo ugotovili, da smo pri nekaterih takoj ponovljenih preskusih na istem sidru (ne da bi iz sidra vmes odstranili mononapenjalko) dosegli nižje mere lezenja, v posameznih primerih pa je sidro presegló tudi fazo prvega preskusa, v kateri je bila presežena kritična mera lezenja $k_{krit} = 2$ mm. V primerjavi z rezultati preskušanj na testnem polju leta 2008 smo opazili, da so pri vnosu naslednje stopnje sile P_{i+1} na ravni prejšnje stopnje sile P_i pri predhodno zaklinjenih sidrih, kot tudi sidrih na katerih je bil pravkar izveden preskus napenjanja, izmerjene vrednosti izvlečkov nižje. Manjše odčitane vrednosti izvlečkov na glavah sider se odražajo v nižjih izvedenih merah lezenja, kar vodi v oceno boljših karakteristik veznega dela (s tem pa v dosežene večje odpornosti na izvlek).

Na prvi pogled je nenavadno, da so izvlečki pri vrnitvi na raven prejšnje stopnje sile P_i manjši, saj so pri prvem preskusu nosilnosti vgrajenega sidra praviloma malenkost večji. Takšno obnašanje sider lahko pojasnimo z napetostno-deformacijskim stanjem predhodno obremenjenega sidra v tleh zaledja: v splošnem je injekcijska masa v prostem delu sidra tlačena, v veznem delu sidra pa tegnjena, vendar pa Kim (2003) in Kim in sod. (2007) ugotavljajo, da je injekcijska masa v tlačnem stanju tudi na začetku veznega dela sidra (v katerem pri vnosu sile v sidro injekcijska masa sicer razpoka), torej se po sprostitvi sile v sidru vpliv tlačene cementne injekcijske mase prav v začetnem delu veznega dela sidra preko trenja vnaša v pramena prostega dela sidra in jih potiska v smeri proti veznemu delu sidra. Zaradi vnosa natezne sile v pramena veznega dela sidra se v tleh zaledja ustvari polje glavnih tlačnih napetosti (Casanovas, 1989), ki preprečuje zdrs veznega dela sidra iz vrtine; po sprostitvi sile v sidru se vpliv glavnih tlačnih napetosti v tleh preko zunanje cementne injekcijske mase, rebraste PE cevi ter notranje cementne injekcijske mase prenaša do jeklenih pramen in jih potiska proti konici veznega dela sidra. Na drugi strani v primerih, ko so bila pramena sidra predhodno obremenjena z dovolj visoko natezno silo (napetosti večje od 60 % R_m) rezultati laboratorijskih preskusov pramen izotermne relaksacije kažejo, da po razbremenitvi pramen, zunanje spiralne žice, ki so med obremenitvijo zdrsnile vzdolž osrednje žice pramena, začno prehajati v začetno stanje (torej se zunanje spiralne žice poskušajo vrniti v osnovno lego, zaradi česar sila v pramenu malenkost narašča). Zaradi vseh naštetih vplivov po razbremenitvi zaklinjenega (ali pravkar preskušene) sidra pride do premikanja zgornje točke prostega dela pramen, v kateri merimo izvlečke pramen, v smeri proti veznemu delu sidra, zaradi česar prihaja do zmanjševanja izvlečkov, ki so posledica lezenja veznega dela sidra, torej so izvedene mere lezenja k zaradi teh vplivov manjše. Podobno smo ugotovili tudi pri primerjavi trajnih izvlečkov Δs_{bl} , pri katerih so bile v splošnem vrednosti Δs_{bl} nižje kot pri prvem preskusu (v nekaterih primerih so bile celo negativne), izjema so bila le pramena, katerih vezni deli so bili že porušeni.

Po prvem preskusu sidra se pojavljajo določeni ugodni vplivi preskusa oz. zaklinjenosti sidra (sidrani objekt se že vtisne v zaledje, lezenje cementne injekcijske mase se vsaj deloma že izvrši, pramena v prostem delu sidra se že poravnajo, aktivna cona napetosti se premakne proti konici veznega dela sidra ipd.), so pa na drugi strani prisotni tudi neugodni vplivi ponovljenega preskusa (uleganje elementov v območju glave sider, zdrs čeljusti mononapenjalk, zdrs spiralnih žic glede na osrednjo žico v območju oprijema čeljusti mononapenjalk, vremenski vpliv v smislu pojava vode v območju veznega dela sider v razpokanih tleh zaledja kot tudi vpliva osončenosti na meritve pri preskusu nosilnosti). Posledica vseh navedenih ugotovitev je lahko tudi razmišljanje v smeri, da so ugodnejši rezultati (v smislu nižjih mer lezenja oz. večjih odpornosti na izvlek) na takoj ponovljenih preskusih nosilnosti, ali pri preskusih opravljenih na pravkar razklinjenem sidru, le navidezni in bi bili v primeru popolne vzpostavitve začetnega napetostno-deformacijskega stanja v sidru in njegovi okolici slabši. Do istih ugotovitev so prišli Briaud in sod. (1998), ki na podlagi omejenih izkušenj pri preskušanjih sider indikativno ugotavljajo, da je vpliv nižjih mer lezenja na enak način ponovljenih preskusov zgolj začasne narave.

Napetostno-deformacijsko stanje v okolici pramen veznega dela sidra je zaradi številnih slojev materialov, nameščenih v zelo omejenem prostoru, ter zapletenega delovanja vezi pramen-injekcijska masa preko stika z rebrasto PE cevjo do vezi injekcijska masa-tla zaledja zelo kompleksno. Poleg tega smo se že pri PS in VPN sider, opravljenih leta 2008, približali poružitvi veznega dela sidra, oslabiljene vezne dele sider pa smo spet močno obremenili pri ponovljenih preskusih leta 2009. Šele nato smo lahko izvedli tretji ponovljeni preskus nosilnosti, pri čemer je bil vezni del takšnega sidra zaradi obeh predhodnih preskusov že močno poškodovan, zato bi domneve po navidezno boljšem obnašanju sidra pri ponovljenem preskusu nosilnosti, takoj po razbremenitvi sidra, lahko dokončno ovrgli ali potrdili le z zadostnim obsegom preskusov instrumentiranih sider.

4.3 DOLOČITEV SKUPNE ODPORNOSTI NA IZVLEK VSEH PREISKAV SIDER OBJEKTA TER OPREDELITEV KRITERIJEV ZA NAPENJANJE SIDER

Po končanem vrednotenju PS in VPN za vsako preskusno sidro poznamo njegovo odpornost na izvlek $R_{a,i}$. Na podlagi teh vrednosti želimo za sidra objekta določiti projektno odpornost, zato moramo v naslednjem koraku analize rezultatov PS in VPN na ustrezen način določiti skupno reprezentativno odpornost na izvlek R_{ak} za sidrani objekt kot celoto, na osnovi katere se za izvedbo sider objekta določita tako preskusna sila P_p za EPN in CPN, kot tudi sila zaklinjenja P_0 . Naloga ni enolično rešljiva, saj je možnih pristopov več, zato bomo v nadaljevanju tega poglavja vrednosti odpornosti na izvlek R_{ak} , kot tudi projektne odpornosti R_{ad} , izvrednotili po več metodah, katerih rezultate bomo medsebojno primerjali.

4.3.1 Določitev merodajne odpornosti na izvlek vseh v letu 2008 opravljenih preskušanj – PS in VPN – sider testnega polja objekta OZ-05

Na podlagi vseh opravljenih preskušanj (PS in VPN) na testnem polju želimo za sidra objekta določiti merodajno odpornost na izvlek R_{ak} . Glede na to, da so vezni deli sider testnega polja različni, bomo vrednotenje R_{ak} opravili za vsak tip sidra (RCP/D, RCP/D-K, RCP/D-Z in RCP/D-I) posebej. Vrednotenja smo izvedli le za preskušanja opravljena leta 2008, saj se nam vrednotenje v letu 2009 ponovljenih preskušanj ni zdelo smiselno, saj so bili: (1) vezni deli sider do različnih stopenj poškodovani že pri preskušanjih leta 2008, (2) porast sil zaklinjenja P_0 v obdobju med preskušnji 2008 do 2009 je bil v različnih območjih testnega polja različen in (3) vezni deli nekaterih sider so bili dodatno poškodovani še pri razklinjanju. Pri končnem vrednotenju izvednih preskusov smo uporabili pet različnih pristopov, opisanih v nadaljnjih [podpoglavjih 4.3.1.1 do 4.3.1.5](#).

4.3.1.1 Pristop vrednotenja preiskav sider po TSC 07.202

Tehnična specifikacija za ceste (TSC 07.202) iz leta 1998 na podlagi priporočila SIA V 191 in takratnega osnutka standarda *prEN 1997-1* določa minimalno potrebno število PS (2 % sider objekta, a ne manj kot tri) obenem pa podaja tudi postopek za njihovo vrednotenje. Karakteristično odpornost sidra na izvlek R_{ak} se določi kot manjša od povprečne $R_{ak,povp}$ in minimalne $R_{ak,min}$ dosežene karakteristične odpornosti na izvlek pri PS, ki se izvrednotita iz dejansko doseženih vrednosti R_a , reduciranih s korelacijskim faktorjem ξ , katerega vrednost je bila odvisna od števila izvedenih PS:

$$R_{ak} = \min(R_{ak,povp}, R_{ak,min}), \text{ kjer sta:} \quad (4.1)$$

$$R_{ak,povp} = \frac{(\sum_i R_{a,i})/n}{\xi_{povp}}, \quad i = 1, \dots, n, \quad (4.2)$$

$$R_{ak,min} = \frac{\min(R_{a,i})}{\xi_{min}}, \quad i = 1, \dots, n, \quad (4.3)$$

pri čemer so: n število opravljenih PS,
 ξ_{povp} ... vrednosti 1,50 ($n = 1$), 1,35 ($n = 2$) in 1,30 ($n > 2$) ter
 ξ_{min} vrednosti 1,50 ($n = 1$), 1,25 ($n = 2$) in 1,10 ($n > 2$).

Projektno odpornost sidra na izvlek R_{ad} dobimo po izrazu:

$$R_{ad} = \frac{R_{ak}}{\gamma_m}, \text{ kjer za trajna sidra velja faktor } \gamma_m = 1,5. \quad (4.4)$$

V **preglednici 4.3** podajamo povprečne ($R_{ak,povp}$), minimalne ($R_{ak,min}$) in merodajne (R_{ak}) karakteristične odpornosti kot tudi projektne odpornosti (R_{ad}) sider na izvlek, ki smo jih iz vrednotili iz dejansko doseženih vrednosti R_a (IP) pri PS in VPN na vseh štirih tipih sider na testnem polju objekta OZ-05. Vrednosti R_a (IP) predstavljajo dejansko in-situ dosežene odpornosti sider na izvlek določene po metodi IP, ki smo jih iz vrednotili na podlagi povprečnih odčitkov izvlečkov vseh pramen kabla sidra in so po posameznih tipih sider testnega polja zbrane v **preglednicah 3.6** do **3.9**. Iz teh vrednosti smo po izrazih (4.2) in (4.3) določili povprečne $R_{ak,povp}$ in minimalne $R_{ak,min}$ vrednosti karakteristične odpornosti na izvlek, na podlagi katerih smo iz vrednotili merodajne karakteristične (R_{ak}) in projektne (R_{ad}) odpornosti.

Preglednica 4.3: Rezultati vrednotenja PS in VPN sider testnega polja po *TSC 07.202*.

Table 4.3: Results of evaluation of PS and VPN tests performed on the testing field anchors, determined according to *TSC 07.202*.

Oznaka sidra	Tip sidra	ŠNP	Preskus 2008	R_a (IP) [kN]	$R_{a,povp}$ [kN]	$R_{ak,povp}^{(4.2)}$ [kN] $\xi_{povp} = 1,30$	$R_{ak,min}^{(4.3)}$ [kN] $\xi_{min} = 1,10$	$R_{ak}^{(4.1)}$ [kN]	$R_{ad}^{(4.4)}$ [kN]
SBz-23	RCP/D	6	PS	651	834,7	642,1	583,6	584	389
SBz-26		6	PS	1211					
SBz-59		6	PS	642					
SBz-89	RCP/D-K	6	PS	1254*	1132,2	870,9	889,1	871	581
SBz-18		6	VPN	978					
SBz-39		6	VPN	1231					
SBz-66		6	VPN	1220					
SBz-84	6	VPN	978						
SBz-56	RCP/D-Z	5	PS	702	620,4	477,2	363,6	364	242
SBz-15		6	VPN	400					
SBz-36		6	VPN	694					
SBz-63		6	VPN	469					
SBz-81		6	VPN	837					
SBz-86	RCP/D-I	6	PS	1144	925,0	711,5	549,1	549	366
SBz-12		6	VPN	604					
SBz-33		6	VPN	1248					
SBz-60		6	VPN	789					
SBz-78		6	VPN	840					

Opomba: * ocenjena vrednost R_a (porušitev v smislu presečišč krivulj med PS ni bila dosežena), (4.2) pri vrednotenju je bila uporabljena enačba (4.2).

4.3.1.2 Vrednotenje preiskav sider z določitvijo karakteristične vrednosti odpornosti na izvlek ob uporabi standarda EN 1997-1 in statističnih metod

Standard EN 1997-1 predvideva, da se pri sidrih karakteristično vrednost odpornosti na izvlek R_{ak} praviloma določi na podlagi izvedenih najmanj treh ustreznostnih preskusov za vsako vrsto tal in konstrukcije, možna pa je tudi ocena na podlagi primerljivih izkušenj. Karakteristična vrednost R_{ak} je podlaga za določitev projektne vrednosti odpornosti sidra na izvlek R_{ad} :

$$R_{ad} = \frac{R_{ak}}{\gamma_a}, \quad (4.5)$$

pri čemer delni faktor γ_a zajema neugodne odklone sidra na izvlek; njegova vrednost pri projektnih pristopih 1 in 2 znaša 1,1, medtem ko pri projektne pristopu 3 znaša 1,0. Karakteristična vrednost se po EN 1997-1 določi po izrazih (4.1) do (4.3) upoštevajoč korelacijski faktor ξ_a (Pogačnik in Beg, 2009), le da so vrednosti faktorja ξ_a v tem primeru, v primerjavi z vrednostmi po TSC 07.202, bistveno nižje:

- ξ_{povp} vrednosti 1,20 ($n = 1$), 1,15 ($n = 2$) in 1,10 ($n \geq 3$) ter
- ξ_{min} vrednosti 1,20 ($n = 1$), 1,10 ($n = 2$) in 1,05 ($n \geq 3$).

Preglednica 4.4: Rezultati vrednotenja PS in VPN sider testnega polja po EN 1997-1.

Table 4.4: Results of evaluation of PS and VPN tests performed on the testing field anchors, determined according to the standard EN 1997-1.

Oznaka sidra	Tip sidra	R_a (IP) [kN]	$R_{a,povp}$ [kN]	$R_{ak,povp}$ [kN] $\xi_{povp}=1,10$	$R_{ak,min}$ [kN] $\xi_{min}=1,05$	$R_{ak}^{(4.1)}$ [kN]	$R_{ad}^{(4.5)}$ [kN]
SBz-23	RCP/D	651	834,7	758,8	611,4	611	556
SBz-26		1211					
SBz-59		642					
SBz-89	RCP/D-K	1254*	1132,2	1029,3	931,4	931	847
SBz-18		978					
SBz-39		1231					
SBz-66		1220					
SBz-84		978					
SBz-56	RCP/D-Z	702	620,4	564,0	381,0	381	346
SBz-15		400					
SBz-36		694					
SBz-63		469					
SBz-81		837					
SBz-86	RCP/D-I	1144	925,0	840,9	575,2	575	523
SBz-12		604					
SBz-33		1248					
SBz-60		789					
SBz-78		840					

Opombi: *..... ocenjena vrednost R_a (porušitev v smislu presečišč krivulj med PS ni bila dosežena),

$R_d^{(4.5)}$ projektna odpornost sidra izvrednotena za projektne pristop 2 (PP2) izvrednotena po enačbi (4.5) z upoštevanjem vrednosti delnega faktorja $\gamma_a=1,1$.

Za PS in VPN vseh tipov sider testnega polja OZ-05 smo z uporabo korelacijskih faktorjev $\xi_{povp} = 1,10$ in $\xi_{min} = 1,05$ v preglednici 4.4 po izrazih (4.1) do (4.3) določili karakteristične vrednosti odpornosti na izvlek R_{ak} , po izrazu (4.5) pa tudi projektne vrednosti odpornosti sider na izvlek R_{ad} .

Projektiranje prednapetih geotehničnih sider se opira na izvedbo PS do porušitve, izvedene na lokaciji sidranega objekta, ki jih obravnavamo kot statistično reprezentativen vzorec razpoložljivih odpornosti na izvlek. Na podlagi vseh vrednosti $R_{a,i}$, dobljenih na enem objektu, moramo določiti tako nepristransko karakteristično vrednost R_{ak} , ki bo predstavljala previdno oceno odpornosti veznih delov preskusnih sider obravnavanega objekta. V kolikor želimo rezultate PS v sklopu izbire karakteristične vrednosti R_{ak} vrednotiti po statističnih metodah, moramo zadostiti pogojema: vrednosti R_a morajo izvirati iz dovolj homogenih populacij, obenem pa mora biti na voljo zadostno število rezultatov PS, saj na podlagi le nekaj izvedenih PS (kot se izvedejo na posameznem sidranem objektu) statistično podajanje rezultatov ni mogoče. V primeru zadostnega števila izvedenih PS je uporaba statističnih metod možna, pri čemer moramo pri določanju karakteristične odpornosti sider na izvlek R_{ak} upoštevati razpršenost rezultatov preskusov, statistično negotovost (kot posledico omejenega števila izvedenih PS) kot tudi predhodno poznavanje statističnih zakonitosti PS izvedenih v podobnih pogojih (EN 1990).

S statističnega vidika je odpornost sidra na izvlek R_a slučajna spremenljivka, ki jo lahko opišemo z njeno porazdelitveno funkcijo F_{R_a} , ki jo definirajmo kot verjetnost, da je slučajna spremenljivka manjša od neke določene vrednosti x_R :

$$F_{R_a}(x_R) = P[R_a < x_R]. \quad (4.6)$$

S probabilističnega stališča lahko karakteristično vrednost odpornosti na izvlek R_{ak} določimo kot centil značilne porazdelitve verjetnosti, torej je v tem primeru vrednost x_R enaka vrednosti R_{ak} . Vrednost R_{ak} lahko relativno enostavno določimo, v kolikor poleg porazdelitvenega zakona poznamo tudi srednjo vrednost in varianco spremenljivke. Žal v praksi teh dveh vrednosti ne poznamo, zato lahko v takem primeru iz vzorca določimo le oceni srednje vrednosti in variance, za kar uporabimo rezultate in-situ izvedenih PS. Standard EN 1990 v sklopu projektiranja, oprtega na preskušanja, podaja usmeritve za statistično določitev posameznih vrednosti, ki jih v našem primeru lahko uporabimo za določitev karakteristične vrednosti odpornosti na izvlek R_{ak} , pri čemer veljata predpostavki:

- da je spremenljivka R_a normalno porazdeljena, kot tudi,
- da o srednji vrednosti ni predhodnih podatkov.

Čeprav so v vsakem konkretnem primeru sidranega objekta in uporabljenih sider glede na številne parametre (tip tal, tehnologija vrtanja in vgradnje sider, število pramen, dolžini prostega l_{fr} in veznega dela l_v sider ipd.) dosežene odpornosti sider na izvlek R_a različne, lahko pri določitvi karakteristične vrednosti R_{ak} izkoristimo podatke o raztrosu rezultatov v obliki koeficienta variacije (Gulvanessian in sod., 2002, Frank in sod., 2004). V primerih, ko so pogoji tal relativno homogeni, odpornost na izvlek pa ne izkazuje pomembnega sistematičnega trenda glede na mikrolokacijo mesta vgradnje ali globine vgradnje veznega dela sider, lahko oceno karakteristične vrednosti R_{ak} izračunamo po enostavnem izrazu (Frank in sod., 2004):

$$R_{ak} = R_{a,povp}(1 - k_n \cdot V_{R_a}), \quad (4.7)$$

kjer so: $R_{a,povp}$ povprečna vrednost doseženih odpornosti na izvlek izvedena na vzorcu (t.j. iz odpornosti na izvlek $R_{a,i}$ preskusnih sider obravnavanega objekta),
 k_n statistični koeficient,

V_{Ra}koeficient variacije izvedenih PS (bodisi kot koeficient $V_{Ra,neznan}$, katerega vrednost vnaprej ni znana in se določi na podlagi ocene standardne deviacije vzorca PS s_{Ra} , opravljenih na objektu, bodisi kot koeficient $V_{Ra,znan}$, določen na številnih v preteklosti dobljenih odpornosti na izvlek PS).

Statistični koeficient k_n zajema vpliv velikosti vzorca (t.j. števila opravljenih PS), razsežnosti zajetega območja tal v povezavi z raztrosom doseženih vrednosti $R_{a,i}$, tip vzorca populacije (samo lokalni vzorec PS na lokaciji sidranega objekta ali lokalni vzorec PS na lokaciji sidranega objekta skupaj z relevantnimi izkušnjami PS, opravljenih v podobnih območjih tal), zmožnost prerazporeditve sidrskih sil med sidri objekta ter raven statističnega zaupanja pri oceni karakteristične vrednosti. Glede na to, da je pri prednapetih geotehničnih sidrih vplivno območje tal v bližini veznega dela posameznega sidra, ki je vključeno v pojav mejnega stanja, zelo majhno v primerjavi z območjem tal za sidranim objektom (lokalno vzorčenje), hkrati pa je možnost prerazporeditve sidrskih sil med sidri objekta omejena, karakteristično vrednost odpornosti sidra na izvlek R_{ak} določimo kot 5. centil, torej naj bo le 5 % verjetnosti, da bo odpornost posameznega sidra na izvlek manjša od karakteristične vrednosti R_{ak} (Frank in sod., 2004):

$$P[R_a < R_{ak}] = F_{R_a}(R_{ak}) = 0,05 \rightarrow R_{ak} = F_{R_a}^{-1}(0,05). \quad (4.8)$$

Kot je razvidno iz enačbe (4.8) je vrednost, pri kateri bo dosežen 5. centil, odvisna od porazdelitvene funkcije F_{R_a} slučajne spremenljivke.

S koeficientom variacije V_{Ra} izvedenih PS zajamemo raztros ugotovljenih vrednosti odpornosti na izvlek posameznih preskusnih sider $R_{a,i}$ sidranega objekta, ki je posledica naslednjih vzrokov:

- odstopanj pri izvedbi PS bodisi v obliki nenatančnih popravkov upadlih sil pred izvedbo odčitkov bodisi v obliki nenatančnosti pri odčitovanju izvlečkov pramen (premiki ali zatikanje merilnih uric, premik stojala merilne urice ipd.);
- dolžine prostega l_{fr} in veznega dela l_v preskusnih sider istega objekta so različne;
- nedoslednosti pri tehnologiji vrtnanja, odstranjevanja izvrtanine in čiščenja vrtine;
- število pramen kabla preskusnih sider istega objekta je različno, s tem pa so različne tudi osne togosti sider, kar pa vpliva tudi na napetostno-deformacijsko stanje vzdolž veznega dela sider (Barley, 1997, Barley in Windsor, 2000, Limelette, 2008); število pramen je tudi izhodišče za določitev ravni preskusne sile P_{pv} , ki v dobro nosilnih tleh neposredno vpliva tudi na dosegljivo odpornost sidra na izvlek $R_{a,i}$, v praksi pogosto ocenjeni kot sila P_{pv} ekstrapolirana za 10 %;
- preskusna sidra so vgrajena pod različnim kotom;
- pogosto med morebitne vzroke štejemo tudi cementno injekcijsko maso: v sklopu istega sidrnega objekta so vgrajena preskusna sidra, pri katerih je količina vgrajene injekcijske mase zelo različna (pri nekaterih sidrih precej povečana zaradi razpokanosti oz. votlavosti tal), prav tako pa se PS izvajajo pri različni starosti (s tem pa tudi trdnosti) injekcijske mase;
- v kolikor je odpornost sider na izvlek na dani lokaciji podcenjena oz. so izbrane dolžine veznega dela preskusnih sider (pre)dolge glede na izbrano število pramen kabla preskusnih sider, je izbrana preskusna sila P_{pv} posledično premajhna: pri tej sili je odpornosti sider po jeklu pramen že izkoriščena, vendar pa pri tej sili še ne pride do popuščanja veznega dela preskusnih sider, kar vodi v podcenjene vrednosti R_a , ki se v takih primerih oceni kot sila P_{pv} ekstrapolirana za 10 %;
- do podobnega pojava pride tudi v primerih, če projektanti, za preskusna sidra istega objekta z enakim številom pramen, določijo različne preskusne sile;

- na območju istega objekta se lahko v območju veznih delov sider pojavljajo različni pogoji tal v smislu same sestave tal (plasti različnih lastnosti, lokalni vložki bistveno močnejšega ali šibkejšega materiala), razpokanosti (v kraških območjih tudi v obliki lokalne votlavosti), različne pojavnosti in intenzitete dotoka zaledne vode;
- pri izvedbi PS na posebej izdelanih sidrskih blokih majhnih dimenzij pogosto prihaja do vtiskanja bloka v ne dovolj utrjena tla zaledja, zaradi česar tudi med opazovanjem lezenja pramen sidra na posamezni stopnji sile prihaja do naraščanja vtisnjenja sidrnega bloka; v kolikor se odčitki izvlečkov pramen izvajajo na samih napenjalkeh, potem moramo vtisnjenje bloka sproti odšteti, kar pa se zaradi manjše natančnosti meritev vtisnjenja bloka odraža v izrednotenih merah lezenja, preko njih pa tudi v odpornosti preskusnega sidra na izvlek R_a ;
- PS se pri večjih sidranih objektih, grajenih po tehnologiji od zgoraj navzdol, v pretežni meri izvajajo deloma pred začetkom gradnje (običajno v zgornjem območju objekta), kasneje pa se med gradnjo v nižjih območjih objektov izvedejo še dodatne (potrditvene) PS, kjer so napetostno-deformacijski pogoji (včasih pa tudi sama sestava tal) drugačni;
- pri večjih sidranih objektih prihaja tudi do primerov, ko se na istem objektu pojavljajo različni izvajalci vrtanja in vgrajevanja sider, katerih izvedbeni tehnološki detajli niso identični, kar se na koncu odraža v različnih doseženih odpornostih preskusnih sider na izvlek R_a ;
- v izjemnih primerih zaradi popustitve tesnila napenjalke na visokih ravneh sile pride do padca tlaka v hidravličnem sistemu, zaradi česar moramo predčasno zaključiti PS, čeprav na veznem delu preskusnega sidra še ni opaziti znakov popuščanja;
- podobno lahko v izjemnih primerih pride do izkoriščenosti hoda bata napenjalke tudi v primerih izrazitega vtiskanja sidranega bloka v ne dovolj utrjena tla zaledja, kar lahko v določeni meri premostimo s preprijemanjem napenjalke, v kolikor pa to ni možno, moramo PS zaključiti še pred pojavom očitnih znakov popuščanja veznega dela preskusnega sidra;
- nenazadnje so lahko vzroki za nižje dosežene vrednosti R_a skrivajo tudi v nedoslednostih oz. napakah pri proizvodnji sider (npr. kontaminacija golih pramen veznega dela sider s protikorozijskim sredstvom).

Kot smo že omenili, sta v zvezi z obravnavo koeficienta variacije V_{Ra} možni dve varianti:

- Vrednost koeficienta variacije V_{Ra} vnaprej ni znana ($V_{Ra,neznan}$), zato jo moramo oceniti izključno na podlagi ocene standardne deviacije s_{Ra} , izrednotene iz vzorca n PS, opravljenih na lokaciji sidranega objekta:

$$s_{Ra} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (R_{a,i} - R_{a,povp}), \quad (4.9)$$

$$V_{Ra} = \frac{s_{Ra}}{R_{a,povp}}. \quad (4.10)$$

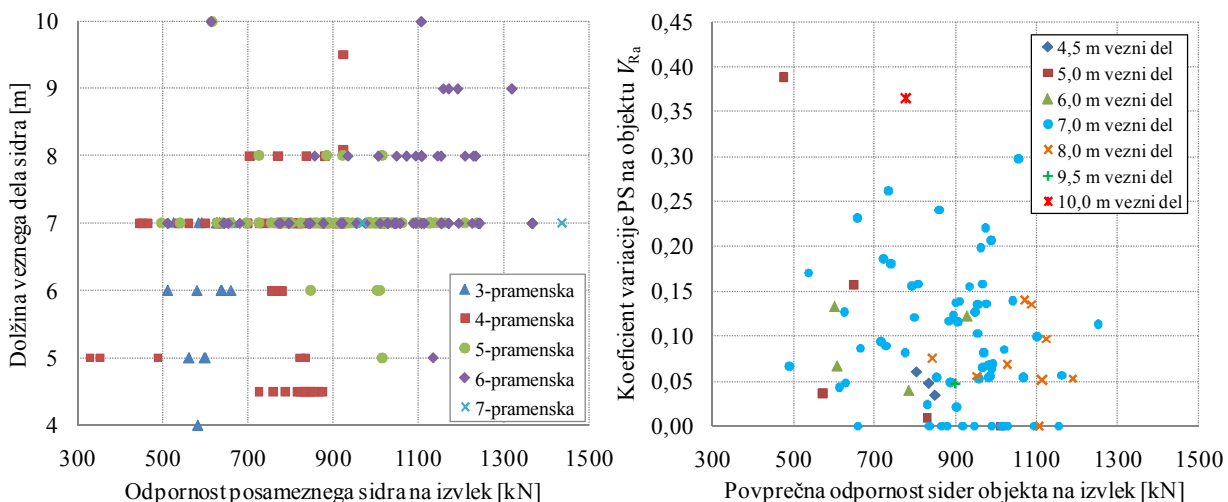
- Vrednost koeficienta variacije V_{Ra} je znana vnaprej ($V_{Ra,znan}$), torej v tem primeru obstaja obsežen nabor odpornosti na izvlek, dobljenih iz preteklih PS, za katere po inženirski presoji ocenimo, da so bile dobljene v podobnih razmerah. Vrednost V_{Ra} tudi v tem primeru izračunamo po izrazu (4.10), le da namesto ocene standardne deviacije s_{Ra} , izrednotene iz vzorca, upoštevamo standardno deviacijo populacije (t.j. vseh v preteklosti dobljenih odpornosti na izvlek R_a) σ_{Ra} .

Za praktično uporabo standard *EN 1990* daje prednost drugi varianti, pri čemer se zgornja vrednost V_{Ra} določi konservativno; v praksi namreč praviloma obstaja vsaj omejeno poznavanje koeficienta variacije iz podobnih primerov, ki ga zaradi omejenega števila izvedenih PS na posameznem objektu poskušamo uporabiti pri oceni karakteristične vrednosti R_{ak} .

Zaradi majhnega števila izvedenih PS na posameznem objektu v deležu 2 % predvidenega števila sider objekta (a ne manj kot tri PS na objekt), ločeno statistično podajanje rezultatov PS po posameznih objektih po *EN 1990* ni mogoče. Po drugi strani pa je bilo v zadnjih 15 letih izvedeno veliko število sidranih objektov s prednapetimi geotehničnimi sidri, zato je skupno število vseh opravljenih PS že tako, da bi lahko te podatke uporabili tudi pri vrednotenju rezultatov PS novo izvedenih sidranih objektov: uspeli smo zbrati vrednosti odpornosti sider na izvlek R_a dobljene pri 335 PS, ki so bile izvedene na 83 sidranih objektih, izvedenih v sklopu izgradnje slovenskega AC omrežja, pri čemer smo vzorec preskusnih sider izbrali tako, da smo v njem zajeli tudi večino prej naštetih vzrokov za raztros vrednosti R_a . Vzorec PS sider za nadaljnjo analizo tako zajema:

- sedem različnih geografskih področij,
- sedem izvajalcev sidrskih del, ki je vgrajevalo štiri tipe trajnih prednapetih geotehničnih sider,
- sidra, katerih kabel je sestavljalo tri do sedem pramen,
- sidra z dolžinami veznih delov l_v med 4 in 10 m ter dolžinami prostih delov l_{fr} med 7 in 44 m,
- kote vgradnje sider med 5° in 35° .

Na štirih objektih so se prednapeta geotehnična sidra izvajala v dveh ločenih serijah, za katere so se tudi PS izvajale in vrednotile ločeno, zato smo take objekte obravnavali ločeno (torej ne kot enega, pač pa kot dva objekta), torej za potrebe naše analize smatramo, da imamo v populaciji zajetih 87 sidranih objektov. Rezultate vseh PS smo zaradi boljše primerljivosti ponovno obdelali po metodi IP, tako da so posamezne odpornosti R_a dobljene po enotni metodologiji. Za vsak sidrani objekt smo izračunali povprečno vrednost $R_{a,povp}$, kot tudi koeficient variacije odpornosti na izvlek vseh preskusnih sider tega objekta V_{Ra} . Na levem diagramu [slike 4.1](#) za vseh 335 PS podajamo vrednosti odpornosti na izvlek v odvisnosti od dolžine veznega dela sidra, v desnem diagramu pa povprečne odpornosti sider na izvlek 87 objektov glede na koeficient variacije V_{Ra} dosežen na posameznem sidranem objektu.



Slika 4.1: Rezultati dosedanjih preiskav sider: odpornosti 335 posameznih sider na izvlek glede na dolžino veznega dela (levo), povprečna odpornost sider na izvlek 87 objektov glede na koeficient variacije dosežen na posameznem sidranem objektu (desno).

Figure 4.1: Previous investigation test results: external resistances of 335 individual anchors in relation to the bond length (left), average anchors external resistance for 87 anchored structures in relation to the coefficient of variation attained on individual anchored structure (right).

Glede na to, da so v standardu *EN 1990* in *Designers' Guide to EN 1990* (Gulvanessian in sod., 2002) podane smernice za statistično vrednotenje rezultatov preskusov za spremenljivke, ki so porazdeljene normalno oz. logaritemsko normalno, bomo za izbrani vzorec rezultatov PS najprej preverili, ali povprečne dosežene vrednosti odpornosti na izvlek na 87 izbranih sidranih objektih izpolnjujejo zahteve za normalno porazdelitev, obenem pa bomo poiskali tudi tisto porazdelitev, ki se ji povprečne odpornosti na izvlek, dosežene na 87 sidranih objektih, čimbolje prilagajo.

V prvi fazi smo povprečne vrednosti odpornosti na izvlek za vse izbrane sidrane objekte ($n = 87$) po Sturgesovem pravilu (Sturges, 1926):

$$m = 1 + 3,32 \cdot \log n, \quad (4.11)$$

razdelili v 7 razredov. Odpornosti na izvlek 87 sidranih objektov smo vnesli v računalniški program EasyFit (MathWave Technologies, <http://mathwave.com/>), s katerim smo preverili, ali je porazdelitev odpornosti na izvlek normalna, ali pa lahko te vrednosti bolje opišemo s katero od drugih znanih porazdelitev. Kot je razvidno iz [slike 4.2](#) se tako razdeljeni podatki v razrede zelo dobro prilagajo gostoti Gumbelove porazdelitve minimuma, za primerjavo pa smo v diagram za iste vhodne podatke vrisali tudi gostoto verjetnosti normalne porazdelitve. Takšen prikaz podatkov v obliki histograma frekvenc podaja osnovni vpogled v porazdelitev podatkov, na podlagi katerega lahko približno ocenimo prilaganje histograma empiričnih podatkov na gostote verjetnosti normalne porazdelitve in Gumbelove porazdelitve minimuma, vendar pa ta ocena ni zadostna za potrditev, ali lahko te podatke z obema predlaganima porazdelitvama tudi v resnici opišemo. V ta namen smo empirično dobljene podatke $R_{a,j}$ ($j = 1, \dots, n$) razvrstili po velikosti od najmanjše dosežene povprečne odpornosti na izvlek proti največji vrednosti in oblikovali empirično porazdelitveno funkcijo:

$$F_{R_a}^*(x_j) = \frac{j}{n}, \quad (4.12)$$

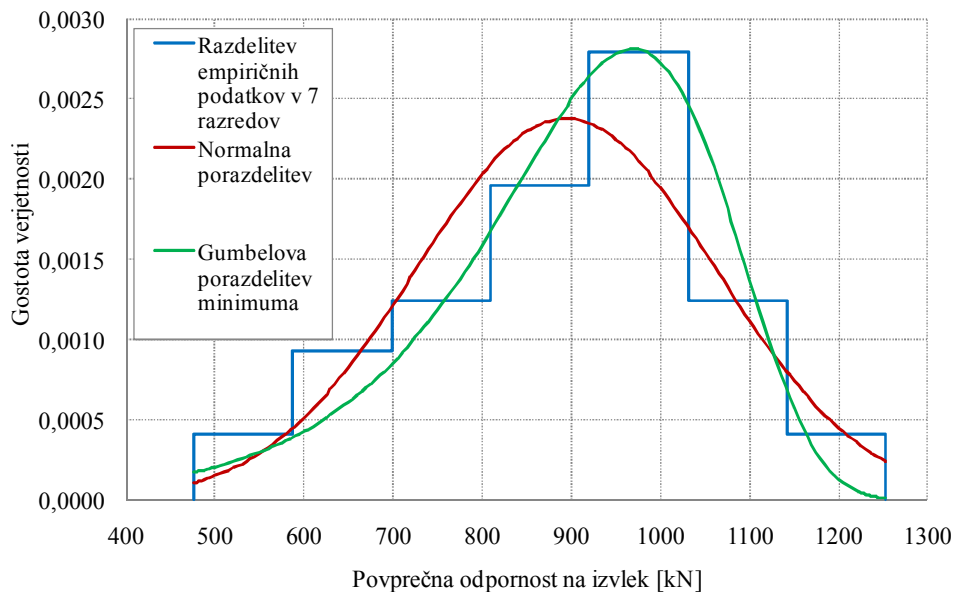
kjer je j zaporedna številka elementa v po velikosti razvrščenem vzorcu. Vrednosti empirične porazdelitvene funkcije podajajo kumulativne frekvence odpornosti sider na izvlek, ki smo jih v diagramu na [sliki 4.3](#) prikazali s posameznimi modrimi točkami. V isti diagram smo vrisali tudi porazdelitveni funkciji normalne porazdelitve in Gumbelove porazdelitve minimuma, pri vrednotenju katerih smo upoštevali pričakovano vrednost (894 kN) in standardno deviacijo (168 kN) povprečnih doseženih vrednosti odpornosti na izvlek 87 sidranih objektov.

Pričakovano je raztros povprečnih odpornosti na izvlek 87 sidranih objektov velik (koeficient variacije povprečnih vrednosti odpornosti znaša $168/894 = 0,188$), saj so bile povprečne odpornosti na izvlek dobljene na sidranih objektih, pri katerih so bila preskusna sidra vgrajena v tla različnih mehanskih in ostalih lastnosti, kabel preskusnih sider je bil sestavljen iz različnega števila pramen, dolžine njihovih prostih l_{fr} in veznih l_v delov so bile različne, sidra so bila preskušena z različnimi preskusnimi silami, tlačna trdnost injekcijske mase je bila različna ipd. Ne glede na to pa želimo preveriti kateri porazdelitvi ustrezajo povprečne odpornosti na izvlek, zato na vzorcu povprečnih odpornosti na izvlek 87 sidranih objektov s preskusom Kolmogorov-Smirnov preverimo, ali lahko zavrnamo ničelno domnevo o normalni porazdelitvi populacije. Predpostavimo:

- ničelno domnevo H_0 : slučajna spremenljivka je porazdeljena po normalni porazdelitvi ter
- alternativno domnevo H_1 : slučajna spremenljivka ni porazdeljena normalno.

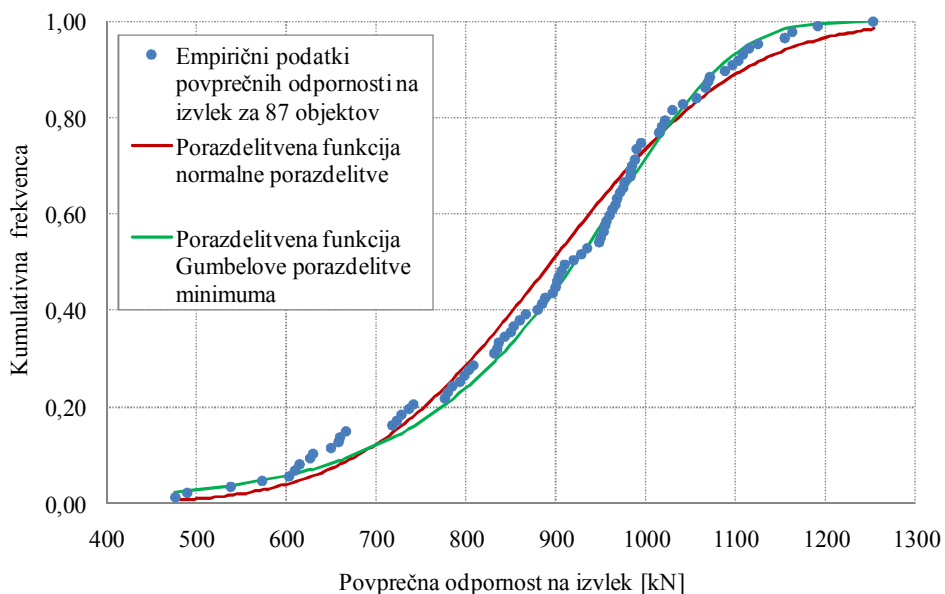
Tveganje, da storimo napako I. vrste in zavrnamo ničelno domnevo, čeprav ta velja, naj bo $\alpha = 0,05$.

Za vsako od točk empirične porazdelitvene funkcije na [sliki 4.3](#) poiščemo absolutno razliko med točko empirične porazdelitvene funkcije $F_{R_a}^*(x_j)$ in porazdelitvene funkcije normalne porazdelitve $F_{R_a}^{np}$.



Slika 4.2: Histogram frekvenc povprečnih odpornosti na izvlek za vseh 87 objektov v primerjavi z gostotama verjetnosti normalne porazdelitve in Gumbelove porazdelitve minimuma.

Figure 4.2: Frequency histogram of average external anchor resistances for all 87 structures in comparison with normal density distribution and Gumbel distribution of the minimum.



Slika 4.3: Kumulativna frekvenca odpornosti na izvlek R_a vseh 87 objektov v primerjavi s porazdelitvenima funkcijama normalne porazdelitve in Gumbelove porazdelitve minimuma.

Figure 4.3: Cumulative frequency of external anchor resistance R_a for all 87 structures in comparison with cumulative distribution functions of normal distribution and Gumbel distribution of the minimum.

V preskusu Kolmogorov-Smirnov moramo določiti statistiko D , ki predstavlja največjo od vseh razlik in je v našem primeru preverjanja normalne porazdelitve enaka:

$$D_{87}^{np} = \max_j \left| F_{R_a}^{np}(x_j) - F_{R_a}^*(x_j) \right| = 0,084. \quad (4.13)$$

V naslednjem koraku moramo določiti kritično območje oz. območje zavrnitve ničelne domneve, ki ga opredeljuje mejna vrednost statistike D , ki se za vzorce $n > 40$ izvednosti kot (Miller, 1956):

$$D_{n=87, \alpha=0,05} = \frac{1,36}{\sqrt{87}} = 0,146. \quad (4.14)$$

Območje zavrnitve ničelne domneve je v našem primeru $[0,146, 1]$. Ker statistika $D_{87}^{np} = 0,084$ ne leži v območju zavrnitve ničelne domneve, domneve H_0 s tveganjem $\alpha = 0,05$ ne moremo zavrniti, torej ne moremo trditi, da povprečne odpornosti sider na izvlek za 87 objektov niso porazdeljene po normalni porazdelitvi s pričakovano vrednostjo 894 kN in standardno deviacijo 168 kN. Za vrednotenje rezultatov PS torej lahko uporabimo smernice standarda *EN 1990* in *Designers' Guide to EN 1990* (Gulvanessian in sod., 2002).

Na enak način s preskusom Kolmogorov-Smirnov preverimo, ali lahko za povprečne odpornosti na izvlek 87 sidranih objektov zavrnemo ničelno domnevo o porazdelitvi populacije po Gumbelovi porazdelitvi minimuma. Predpostavimo:

- ničelno domnevo H_0 : slučajna spremenljivka je porazdeljena po Gumbelovi porazdelitvi minimuma,
- alternativno domnevo H_1 : porazdelitev slučajne spremenljivke ni taka.

Tudi v tem primeru naj bo tveganje zavrnitve ničelne domneve, čeprav ta velja, enako $\alpha = 0,05$.

Na enak način kot prej določimo statistiko D , ki predstavlja največjo od vseh izvednotenih absolutnih razlik med točkami empirične porazdelitvene funkcije $F_{R_a}^*(x_j)$ in porazdelitvene funkcije po Gumbelovi porazdelitvi minimuma $F_{R_a}^{gpm}(x_j)$:

$$D_{87}^{gpm} = \max_j |F_{R_a}^{gpm}(x_j) - F_{R_a}^*(x_j)| = 0,055. \quad (4.15)$$

Glede na to, da je mejna vrednost statistike $D_{n=87, \alpha=0,05}$ enaka kot pri preverjanju normalne porazdelitve, je enako tudi območje zavrnitve ničelne domneve $[0,146, 1]$. Ker statistika $D_{87}^{gpm} = 0,055$ ne leži v območju zavrnitve ničelne domneve, je s tveganjem $\alpha = 0,05$ ne moremo zavrniti, torej ne moremo trditi, da povprečne odpornosti sider na izvlek za 87 objektov niso porazdeljene po Gumbelovi porazdelitvi minimuma s pričakovano vrednostjo 894 kN in standardno deviacijo 168 kN. Dejansko tveganje za zavrnitev ničelne domneve H_0 normalne porazdelitve znaša 0,55, pri Gumbelovi porazdelitvi minimuma pa znaša kar 0,95, iz česar je razvidno, da je prileganje empiričnih vrednosti na porazdelitveno funkcijo Gumbelove porazdelitve minimuma bistveno boljše kot v primeru normalne porazdelitvene funkcije.

Kot je razvidno iz enačbe (4.7) moramo pri vrednotenju karakteristične vrednosti odpornosti na izvlek R_{ak} za sidra konkretnega objekta poleg ocene srednje vrednosti poznati tudi raztros doseženih odpornosti na izvlek, ki so zajete preko statističnega koeficienta k_n in koeficienta variacije V_{R_a} . Glede na to, da je na vsakem posameznem sidranem objektu število izvedenih PS s statističnega vidika izredno majhno, poleg tega pa je raztros vrednosti R_a posameznih PS sider objekta relativno velik, na podlagi nekaj vrednosti R_a posledično ni možno z zadostno zanesljivostjo določiti porazdelitve odpornosti na izvlek. Zato je v primerih, ko vrednost koeficienta variacije vnaprej ni znana ($V_{R_a, neznan}$) in vrednost R_{ak} ocenimo izključno na podlagi ocene standardne deviacije s_{R_a} PS, opravljenih na lokaciji sidranega objekta, varna ocena R_{ak} zagotovljena preko konservativnih (visokih) vrednosti statističnega koeficienta k_n . Posledično je ocena karakteristične vrednosti odpornosti na izvlek R_{ak} tako nizka, da za prakso nima praktične vrednosti (glej vrednosti v preglednici 4.5).

Precej boljša izbira je druga možnost, pri kateri zberemo in **analiziramo raztros rezultatov v preteklosti opravljenih primerljivih PS**, iz katerih na velikem vzorcu rezultatov PS ovrednotimo raztrose doseženih odpornosti na izvlek po posameznih objektih, ki jih potem, ob predpostavki enake porazdelitve, uporabimo pri oceni karakteristične vrednosti R_{ak} konkretno obravnavanega objekta. Kot smo že zapisali, zaradi številnih razlogov vrednosti doseženih odpornosti med posameznimi sidranimi objekti ne moremo neposredno primerjati, lahko pa medsebojno neposredno primerjamo raztrose doseženih odpornosti na izvlek preskusnih sider. Na podlagi analize PS na 87 sidranih objektih tako dobimo 87 koeficientov variacije odpornosti preskusnih sider na izvlek V_{Ra} , ki jih bomo analizirali v nadaljevanju. Ob tem velja opozoriti, da smo pri vrednotenju koeficienta variacije posameznega sidranega objekta iz nabora razpoložljivih rezultatov za vrednotenje povprečne vrednosti in standardne deviacije posameznega sidranega objekta zavrgli rezultate tistih PS, pri katerih:

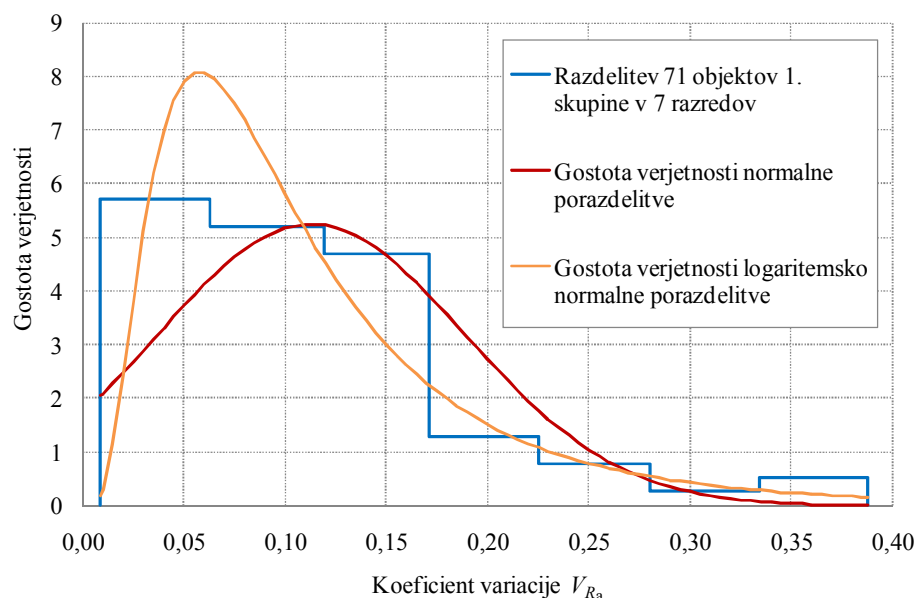
- so bili rezultati posameznih preskusnih sider očitno neverodostojni zaradi napak in odstopanj od predpisanih postopkov pri vgradnji ali pa je prišlo do okvare ali nepravilnega delovanja opreme (napenjalk, dinamometra ali uric za odčitovanje izvlečkov pramen) med izvedbo PS in so bili že v sklopu programa napenjanja sider objekta zavrženi ter nadomeščeni z novimi PS;
- med PS pri vseh preskusnih sidrih objekta ni bilo moč doseči porušitve veznega dela preskusnega sidra, saj je šibki člen teh sider predstavljala odpornost po jeklu kabla sidra, zato ti primeri niso kazalnik dejanske možne dosegljive vrednosti R_a na dani lokaciji (odpornost po kablu preskusnih sider je bila premajhna, zato bi prišlo do poškodb oz. pretrga kabla sidra še predno bi bila poškodovana vez sidra s tlemi). V teh primerih je bila ocenjena le spodnja vrednost odpornosti na izvlek R_a , obenem pa so v teh primerih vrednosti koeficienta variacije V_{Ra} v večini primerov enake nič, torej pristransko vplivajo na statistično obdelavo doseženih vrednosti koeficienta variacije vrednosti R_a pri PS na 87 objektih.

Vrednosti koeficienta variacije V_{Ra} po posameznih objektih se gibljejo v območju med nič in 0,39, pri čemer povprečna (srednja) vrednost koeficienta V_{Ra} celotne skupine 87 objektov znaša 0,094.

Pri številnih objektih iz prakse smo pogosto zasledili pojav, da so bili število pramen in dolžina veznega dela preskusnih sider izbrane tako, da tudi pri preskusni sili P_{pv} vezni deli sider niso popustili, saj so napetosti v pramenih dosegle zgornjo raven dopustnih vrednosti, zato so posledično vrednosti odpornosti na izvlek R_a ocenjene kot preskusne sile P_{pv} , povečane za 10 %. V teh primerih so bile ocene vrednosti odpornosti na izvlek R_a (zaradi varnosti) najverjetneje premajhne, vendar pa je pojavnost teh primerov velika, zato jih v analizi ne moremo enostavno zavreči. Zato smo se odločili, da bomo analizo koeficientov V_{Ra} preskusnih sider 87 objektov ponovili dvakrat – v prvo skupino smo vključili podatke objektov, pri katerih je prišlo med PS do porušitve veznega dela vsaj enega sidra, medtem ko smo v drugo skupino vključili podatke samo tistih objektov, pri katerih je pri vseh PS prišlo do porušitve veznega dela preskusnega sidra:

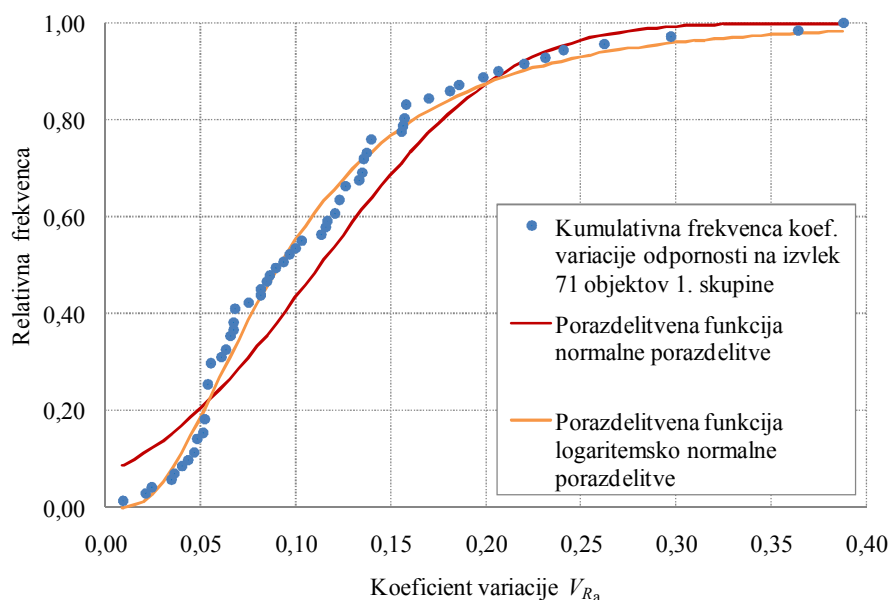
- **Pri sidranih objektih prve skupine** so bili vezni deli sider med PS bodisi porušeni bodisi so bile vrednosti R_a posameznih preskusnih sider ocenjene (kot vrednosti P_{pv} , ekstrapolirane za 10 %), vendar pa je moralo vsaj pri enem sidru objekta med PS priti do porušitve veznega dela sidra. V to skupino smo lahko od skupno 87 izbranih objektov uvrstili 71 sidranih objektov (86 % izbrane skupine objektov), na katerih je bilo opravljeno skupno 284 PS. Vrednosti koeficientov variacije odpornosti na izvlek $V_{Ra,i}$ po posameznih sidranih objektih se nahajajo v območju med 0,009 in 0,388, medtem ko povprečni koeficient variacije $V_{Ra,znan}$ za 71 sidranih objektov znaša 0,113. Vrednosti 71 koeficientov variacije $V_{Ra,i}$ smo po Sturgesovem pravilu - enačba (4.11) - razdelili v 7 razredov, nato pa smo pripravili histogram frekvenčne porazdelitve (slika 4.4). Koeficiente $V_{Ra,i}$

te skupine objektov smo vnesli v računalniški program EasyFit, s katerim smo preverili, ali je porazdelitev koeficientov variacije $V_{Ra,i}$ normalna, ali pa lahko te podatke bolje opišemo s katero od drugih znanih porazdelitev.



Slika 4.4: Histogram frekvenc koeficientov variacije V_{Ra} za prvo skupino (71 objektov) v primerjavi z gostotama verjetnosti normalne in logaritemsko normalne porazdelitve.

Figure 4.4: Frequency histogram of coefficients of variation V_{Ra} for group No. 1 (71 structures) in comparison with normal density and log-normal density distribution.



Slika 4.5: Kumulativna frekvenca koeficientov variacije V_{Ra} za prvo skupino (71 objektov) v primerjavi s porazdelitvenima funkcijama normalne in logaritemsko normalne porazdelitve.

Figure 4.5: Cumulative frequency of coefficients of variation V_{Ra} for group No. 1 (71 structures) in comparison with cumulative distribution functions of normal and log-normal distribution.

Kot je razvidno iz [slike 4.4](#) se histogram frekvenčne porazdelitve podatkov 71 objektov v 7 razredov le približno ujema z gostoto verjetnosti normalne porazdelitve, pri čemer bistveno boljše ujemanje dobimo z uporabo logaritemsko normalne porazdelitve. Za potrditev domnev porazdelitve smo na [sliki 4.5](#) za 71 objektov prve skupine podali kumulativni frekvenčni diagram vrednosti V_{Ra} v primerjavi s porazdelitvenima funkcijama normalne, kot tudi logaritemsko normalne porazdelitve. Iz diagrama je jasno razvidno, da z normalno porazdelitvijo ne moremo najbolje opisati koeficientov $V_{Ra,i}$, dobljenih pri PS na objektih prve skupine, medtem ko na drugi strani točke V_{Ra} v celotnem obravnavanem območju zelo dobro ustrezajo porazdelitveni funkciji logaritemsko normalne porazdelitve.

S preskusom Kolmogorov-Smirnov preverimo, ali lahko za koeficiente variacije odpornosti sider na izvlek $V_{Ra,i}$ 71 sidranih objektov zavrnamo ničelno domnevo o porazdelitvi populacije po normalni porazdelitvi. Postavimo:

- ničelno domnevo H_0 : slučajna spremenljivka je porazdeljena po normalni porazdelitvi,
- alternativno domnevo H_1 : porazdelitev slučajne spremenljivke ni taka.

Tudi v tem primeru naj bo tveganje zavrnitve ničelne domneve, čeprav ta velja, enako $\alpha = 0,05$.

Na enak način kot prej določimo statistiko D , ki predstavlja največjo od vseh izvednotenih absolutnih razlik med točkami empirične porazdelitvene funkcije $F_{Ra}^*(x_j)$ in porazdelitvene funkcije po normalni porazdelitvi $F_{Ra}^{np}(x_j)$:

$$D_{71}^{np} = \max_j \left| F_{Ra}^{np}(x_j) - F_{Ra}^*(x_j) \right| = 0,129. \quad (4.16)$$

Mejno vrednost statistike D , ki določa kritično območje oz. območje zavrnitve ničelne domneve, se v konkretnem primeru ($n > 40$) izvednoti kot (Miller, 1956):

$$D_{n=71, \alpha=0,05} = \frac{1,36}{\sqrt{71}} = 0,161. \quad (4.17)$$

Območje zavrnitve ničelne domneve v našem primeru je $[0,161, 1]$. Ker statistika $D_{71}^{np} = 0,129$ ne leži v tem območju, domneve H_0 s tveganjem $\alpha = 0,05$ ne moremo zavrniti, torej ne moremo trditi, da koeficienti variacije $V_{Ra,i}$ 71 sidranih objektov niso porazdeljeni po normalni porazdelitvi s pričakovano vrednostjo 0,113 in standardno deviacijo 0,076.

Iz diagrama na [sliki 4.5](#) je razvidno, da je prileganje krivulje logaritemsko normalne porazdelitve na empirično dobljene vrednosti bistveno boljše, kot pri krivulji normalne porazdelitve. S preskusom Kolmogorov-Smirnov preverimo, ali lahko za koeficiente variacije odpornosti preskusnih sider na izvlek V_{Ra} 71 sidranih objektov zavrnamo ničelno domnevo o porazdelitvi populacije po logaritemsko normalni porazdelitvi. Postavimo:

- ničelno domnevo H_0 : slučajna spremenljivka je porazdeljena logaritemsko normalno,
- alternativno domnevo H_1 : porazdelitev slučajne spremenljivke ni taka.

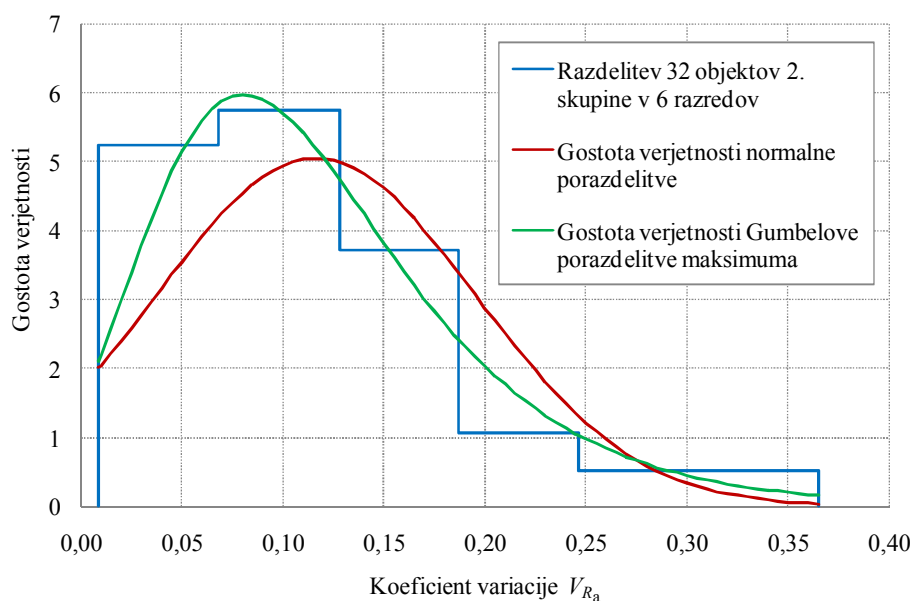
Tveganje, da zavrnamo ničelno domnevo, čeprav ta velja, naj bo tudi v tem primeru $\alpha = 0,05$.

Izvednotimo vrednost statistike D , ki predstavlja največjo od vseh izvednotenih absolutnih razlik med točkami empirične porazdelitvene funkcije $F_{Ra}^*(x_j)$ in porazdelitvene funkcije po logaritemsko normalni porazdelitvi $F_{Ra}^{lnp}(x_j)$:

$$D_{71}^{lnp} = \max_j \left| F_{Ra}^{lnp}(x_j) - F_{Ra}^*(x_j) \right| = 0,073. \quad (4.18)$$

Območje zavrnitve ničelne domneve je isto kot pri normalni porazdelitvi $[0,161, 1]$, zato statistika $D_{71}^{\text{lnp}} = 0,073$ ne leži v območju zavrnitve ničelne domneve; domneve H_0 s tveganjem $\alpha = 0,05$ torej ne moremo zavrni, saj ne moremo trditi, da koeficienti variacije $V_{Ra,i}$ 71 sidranih objektov niso porazdeljeni po logaritemsko normalni porazdelitvi s pričakovano vrednostjo 0,113 in standardno deviacijo 0,076. Dejansko tveganje za zavrnitev ničelne domneve H_0 normalne porazdelitve znaša 0,17, logaritemsko normalne porazdelitve pa znaša kar 0,83 iz česar je jasno razvidno, da je prilaganje empiričnih vrednosti na logaritemsko normalno porazdelitveno funkcijo bistveno boljše kot v primeru normalne porazdelitvene funkcije.

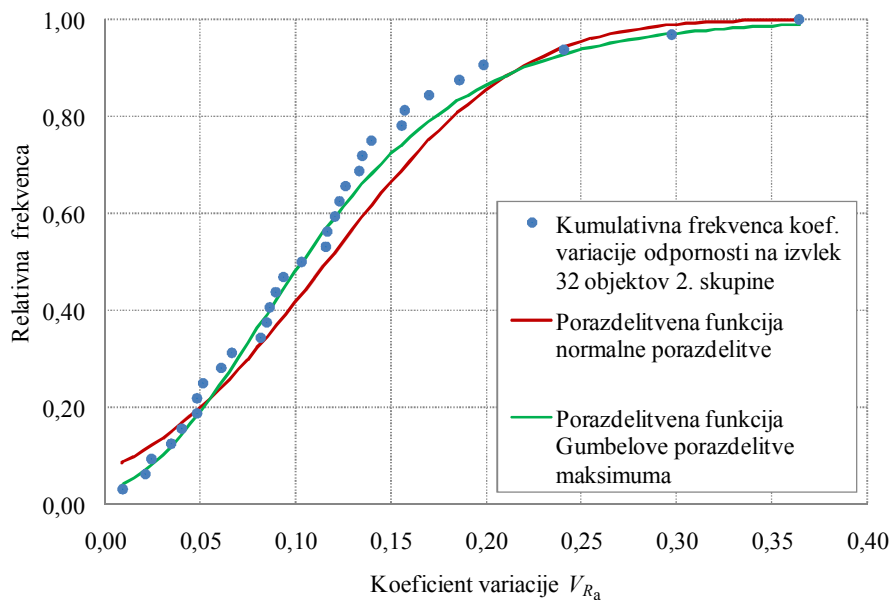
- **Med sidrane objekte druge skupine** so zajeti samo tisti, pri katerih je pri vseh preskusnih sidrih med izvedbo PS prišlo do popustitve veznega dela sidra (torej ni bila pri nobeni PS odpornost R_a ocenjena z ekstrapolacijo). V to skupino smo od skupno 87 izbranih objektov lahko uvrstili le 32 sidranih objektov (39 % skupno izbranih objektov), na katerih je bilo opravljeno 117 PS. Vrednosti koeficienta variacije $V_{Ra,i}$ po posameznih sidranih objektih se nahajajo v območju med 0,009 in 0,365, medtem ko povprečni koeficient variacije $V_{Ra,\text{znan}}$ za 32 sidranih objektov znaša 0,116. Koeficiente $V_{Ra,i}$ smo po Sturgesovem pravilu - enačba (4.11) - razdelili na 6 razredov, nato smo s programom EasyFit preverili, ali je porazdelitev 32 vrednosti V_{Ra} normalna ali pa lahko vrednosti $V_{Ra,i}$ bolje opišemo s kako drugo znano porazdelitvijo. Na [sliki 4.6](#) podajamo histogram frekvenčne porazdelitve za podatke druge skupine 32 objektov, iz katerega je razvidno, da se porazdelitev tudi pri tej skupini le v grobem ujema z gostoto verjetnosti normalne porazdelitve, medtem ko bistveno boljše ujemanje dobimo z uporabo Gumbelove porazdelitve maksimuma.



Slika 4.6: Histogram frekvenc koeficientov variacije V_{Ra} za drugo skupino (32 objektov) v primerjavi z gostotama verjetnosti normalne in Gumbelove porazdelitve maksimuma.

Figure 4.6: Frequency histogram of coefficients of variation V_{Ra} for group No. 2 (32 structures) in comparison with normal density and density of the Gumbel distribution of maximum.

Tudi pri tej skupini smo za potrditev domnev porazdelitev pripravili kumulativni frekvenčni diagram vrednosti V_{Ra} v primerjavi s porazdelitvenima funkcijama normalne porazdelitve kot tudi Gumbelove porazdelitve maksimuma ([sliki 4.7](#)).



Slika 4.7: Kumulativna frekvenca koeficientov variacije V_{Ra} za drugo skupino (32 objektov) v primerjavi s porazdelitvenima funkcijama normalne porazdelitve in Gumbelove porazdelitve maksimuma.

Figure 4.7: Cumulative frequency of coefficients of variation V_{Ra} for group No. 2 (32 structures) in comparison with cumulative distribution functions of normal distribution and the Gumbel distribution of maximum.

Že hitra vizualna ocena prileganja krivulj na empirične podatke pokaže, da pri objektih druge skupine z normalno porazdelitvijo relativno slabo opišemo koeficiente $V_{Ra,i}$, dobljene pri PS, medtem ko na drugi strani točke $V_{Ra,i}$ tudi v robnih območjih zelo dobro ustrezajo Gumbelovi porazdelitvi maksimuma, le v območju vrednosti $V_{Ra,i}$ med 0,14 in 0,20 je ujemanje nekoliko slabše. Vizualno oceno moramo potrditi s preskusom Kolmogorov-Smirnov, pri čemer najprej preverimo, ali lahko za koeficiente variacije odpornosti preskusnih sider na izvlek $V_{Ra,i}$ 32 sidranih objektov zavrnilo ničelno domnevo porazdelitvi populacije po normalni porazdelitvi. Postavimo:

- ničelno domnevo H_0 : slučajna spremenljivka je porazdeljena po normalni porazdelitvi,
- alternativno domnevo H_1 : porazdelitev slučajne spremenljivke ni taka.

Tudi v tem primeru naj bo tveganje zavrnilne domneve H_0 , čeprav ta velja, enako $\alpha = 0,05$.

Na enak način kot prej določimo največjo od vseh izvednotenih absolutnih razlik med točkami empirične porazdelitvene funkcije $F_{Ra}^*(x_j)$ in normalne porazdelitvene funkcije $F_{Ra}^{np}(x_j)$:

$$D_{32}^{np} = \max_j \left| F_{Ra}^{np}(x_j) - F_{Ra}^*(x_j) \right| = 0,133. \tag{4.19}$$

Mejno vrednost statistike D , ki določa kritično območje (območje zavrnilne ničelne domneve H_0) za vrednosti $n = 32$ in $\alpha = 0,05$, odčitamo iz preglednice (npr. Kottegoda in Rosso, 1998): $D_{n=32,\alpha=0,05} = 0,234$. Območje zavrnilne ničelne domneve je torej $[0,234, 1]$. Glede na to, da statistika $D_{32}^{np} = 0,133$ ne leži v območju zavrnilne ničelne domneve, domneve H_0 s tveganjem $\alpha = 0,05$ ne moremo zavrnilo, torej ne moremo trditi, da koeficienti variacije odpornosti preskusnih sider na izvlek $V_{Ra,i}$ 32 sidranih objektov niso porazdeljeni po normalni porazdelitvi s pričakovano vrednostjo 0,116 in standardno deviacijo 0,079.

Iz [slike 4.7](#) je razvidno, da je prileganje krivulje Gumbelove porazdelitve maksimuma na empirične vrednosti boljše kot pri krivulji normalne porazdelitve. Kljub temu s preskusom Kolmogorov-Smirnov preverimo, ali lahko za koeficiente variacije odpornosti preskusnih sider na izvlek $V_{Ra,i}$ 32 sidranih objektov zavrnemo ničelno domnevo o porazdelitvi populacije po Gumbelovi porazdelitvi maksimuma. Postavimo:

- ničelno domnevo H_0 : slučajna spremenljivka je porazdeljena po Gumbelovi porazdelitvi maksimuma,
- alternativno domnevo H_1 : porazdelitev slučajne spremenljivke ni taka.

Tveganje, da zavrnemo ničelno domnevo, čeprav ta velja, naj bo spet enako $\alpha = 0,05$.

Izvednotimo vrednost statistike D , ki predstavlja največjo od vseh izvednotenih absolutnih razlik med točkami empirične porazdelitvene funkcije $F_{Ra}^*(x_j)$ in porazdelitvene funkcije po Gumbelovi porazdelitvi maksimuma $F_{Ra}^{gpm}(x_j)$:

$$D_{32}^{gpm} = \max_j \left| F_{Ra}^{gpm}(x_j) - F_{Ra}^*(x_j) \right| = 0,069. \quad (4.20)$$

Območje zavrnitve ničelne domneve je isto kot pri normalni porazdelitvi $[0,234, 1]$, zato statistika $D_{32}^{gpm} = 0,069$ ne leži v območju zavrnitve ničelne domneve, torej s tveganjem $\alpha = 0,05$ ničelne domneve ne moremo zavrniti (torej ne moremo trditi, da koeficienti variacije odpornosti preskusnih sider na izvlek V_{Ra} 32 sidranih objektov niso porazdeljeni po normalni porazdelitvi s pričakovano vrednostjo 0,116 in standardno deviacijo 0,079). Dejansko tveganje za zavrnitev ničelne domneve H_0 v primeru, ko je slučajna spremenljivka porazdeljena po normalni porazdelitvi, znaša 0,592, pri Gumbelovi porazdelitvi maksimuma pa znaša kar 0,997 iz česar je jasno razvidno, da je prileganje empiričnih vrednosti na porazdelitveno funkcijo Gumbelove porazdelitve maksimuma bistveno boljše kot v primeru normalne porazdelitvene funkcije.

Na podlagi analize raztrosa koeficientov variacije odpornosti sider na izvlek $V_{Ra,i}$ obeh obravnavanih skupin sidranih objektov (prve skupine 71 objektov in druge skupine 32 objektov) smo ugotovili, da:

- lahko privzamemo normalno porazdelitev koeficientov variacije V_{Ra} , čeprav je bilo ujemanje empirično dobljenih vrednosti na porazdelitveno funkcijo v obeh primerih slabše od logaritemsko normalne porazdelitve oz. Gumbelove porazdelitve maksimuma, vendar je še tako dobro, da so bile vrednosti statistike D pri preskusu Kolmogorov-Smirnov manjše od kritičnega območja, torej s tveganjem $\alpha = 0,05$ nismo mogli zavrniti domneve, da koeficienti variacije odpornosti preskusnih sider na izvlek $V_{Ra,i}$ niso porazdeljeni po normalni porazdelitvi,
- v primeru obeh skupin objektov z normalno porazdelitvijo nismo uspeli dobro pokriti območja nizkih vrednosti koeficientov V_{Ra} (pri prvi skupini vrednosti v območju do $V_{Ra} = 0,10$, pri drugi skupini pa v območju do $V_{Ra} = 0,12$) – v tem delu so vrednosti V_{Ra} podcenjene (na nevarni strani), vendar pa v obeh primerih pri relativno nizkih vrednostih V_{Ra} to nima pomembnega vpliva na varnost ocene odpornosti veznih delov sider objekta; v kolikor želimo tudi v tem območju natančnejšo oceno raztrosa odpornosti na izvlek R_a , moramo pri iskanju centilov izbrati logaritemsko normalno porazdelitev (prva skupina objektov, pri katerih je možna ekstrapolacija preskusne sile P_{pv} za 10 %) ali Gumbelovo porazdelitev maksimuma (druga skupina objektov, pri kateri je bila med PS do ravni preskusne sile P_{pv} pri vseh sidrih dosežena porušitev veznega dela).

S koeficienti variacije odpornosti preskusnih sider na izvlek $V_{R_{a,i}}$ zajamemo raztros vrednosti odpornosti preskusnih sider na izvlek $R_{a,i}$ po posameznih sidranih objektih, zato je v tem primeru neugodna visoka vrednost koeficienta V_{R_a} . Glede na to, da nas zanima zgornja mejna vrednost, se upošteva 95. centil – iščemo torej tisto zgornjo vrednost koeficienta $V_{R_{a,95}}$, da bo 95 % vrednosti koeficientov variacije rezultatov PS, do sedaj izvedenih na sidranih objektih, manjša ali enaka vrednosti $V_{R_{a,95}}$. Na podlagi analiziranih razpoložljivih historičnih rezultatov, do sedaj izvedenih PS na AC omrežju, iz krivulj kumulativne frekvence odčitane vrednosti $V_{R_{a,95}}$ znašajo:

- 0,24 (normalna porazdelitev) oz. 0,28 (logaritemsko normalna porazdelitev) za primere, ko vsaj pri enem preskusnem sidru med obremenjevanjem do preskusne sile P_{pv} pri PS vezni del sidra ni popustil, torej je bila odpornost veznega dela tega sidra na izvlek R_a ocenjena kot preskusna sila P_{pv} , povečana za 10 % (prva skupina 71 objektov),
- 0,25 (normalna porazdelitev) oz. 0,26 (Gumbelova porazdelitev maksimuma) za primere, ko je bila popolnoma pri vseh preskusnih sidrih objekta med PS do ravni preskusne sile P_{pv} dosežena porušitev veznega dela sidra (druga skupina 32 objektov).

Glede na to, da so vrednosti zelo blizu, ne naredimo velike napake, če za prakso za mejno vrednost koeficienta variacije odpornosti preskusnih sider na izvlek privzamemo $V_{R_{a,95}} = 0,25$; v primerih ko je na posameznem sidranem objektu koeficient variacije doseženih odpornosti na izvlek večji od te mejne vrednosti, potem je raztros rezultatov PS (pre)velik, saj presega 95. centil rezultatov PS, opravljenih v preteklosti, zato moramo rezultate PS tega sidranega objekta podrobno analizirati in poiskati tiste primere, pri katerih:

- je dobljena odpornost na izvlek R_a posameznega sidra zaradi nepojasnjenih razlogov bistveno manjša kot pri ostalih sidrih istega objekta in jih na podlagi razpoložljivih podatkov v zvezi s sestavo in razpokanostjo tal, pojavom zaledne vode, vgradnjo ter sestavnimi materiali sidra ne moremo pojasniti – v praksi naj se takšen rezultat kot neverodostojen zavrže, namesto njega pa se izvede nadomestna PS,
- analiza rezultatov PS pokaže, da se dosežene vrednosti R_a po posameznih mikrolokacijah razlikujejo v tolikšni meri, da jih moramo obravnavati ločeno ter za vsako lokalno območje posebej določiti tako dosegljivo odpornost sider kot tudi kriterije za napenjanje sider objekta.

Kot smo že zapisali, moramo za določitev nepristranske ocene karakteristične vrednosti odpornosti sider na izvlek R_{ak} poleg ocen srednje vrednosti in variance (standardne deviacije), poznati tudi porazdelitveni zakon odpornosti na izvlek. Ugotovili smo, da ne moremo trditi, da odpornosti na izvlek niso porazdeljene po normalni porazdelitveni funkciji, zato lahko za oceno karakteristične vrednosti R_{ak} normalno porazdeljenih odpornosti na izvlek $R_{a,i}$ uporabimo eno od naslednjih metod (*EN 1990*, Gulvanessian in sod., 2002):

- **Metoda napovedi** (angl. prediction method), po kateri lahko prav tako obravnavamo oba primera poznavanja koeficienta variacije ($V_{R_{a,znan}}$ in $V_{R_{a,neznan}}$). Pri tej metodi se spodnji centil x_p oceni z limito $x_{p,pred}$, ki se določi tako, da bo z verjetnostjo p naslednja naključna vrednost populacije x_{n+1} manjša od mejne vrednosti $x_{p,pred}$.
- Pri **Bayesovi metodi** (angl. Bayesian method) številni predhodni podatki in domneva o povezavi teh podatkov z rezultati preskusa omogočajo podajanje takih rezultatov kot statističnih (*ISO 12491*). Ključno pri tej metodi je poznavanje tako srednje vrednosti m , standardne deviacije s in velikosti vzorca n kot tudi poznavanje istih vrednosti predhodnih vzorcev (m' in s'), medtem ko vrednost n' ni vedno znana, pri čemer velja predpostavka, da so vsi vzorci odvzeti iz iste populacije s povprečno

vrednostjo μ in standardno deviacijo σ . Tudi po tej metodi lahko obravnavamo tako primere z znano, kot tudi neznano standardno deviacijo. Zaradi nepoznavanja predhodnih podatkov za sidra tipov RCP/D-K, RCP/D-Z in RCP/D-I Bayesove metode v teh primerih nismo uporabili, smo pa jo uporabili v primeru referenčnih sider RCP/D, tako v varianti z znano kot tudi neznano standardno deviacijo.

Pri Bayesovi metodi za določitev karakteristične vrednosti izkoriščamo prednost, da je dolgoročna variabilnost karakterističnih vrednosti običajno precej omejena oz. stabilna. Tako je negotovost pri določitvi σ relativno majhna, zaradi česar je vrednost centila t'_b Studentove porazdelitve manjša, kar vodi v povečanje karakteristične vrednosti (Gulvanessian in sod., 2002).

Oceno karakteristične vrednosti odpornosti na izvlek R_{ak} za sidra testnega polja po **metodi napovedi** izvednotimo po enačbi (4.7), pri čemer vrednosti statističnega koeficienta k_n , za primer PS izvedenih na testnem polju OZ-05 (tri oz. pet PS posameznega tipa sidra), ob upoštevanju normalne porazdelitvene funkcije in 5. centila, znašajo (preglednica 2.7 *Designers' Guide to EN 1997-1*, Frank in sod., 2004):

- $V_{Ra,znan}$ (povprečna vrednost koeficienta variacije odpornosti na izvlek sidranih objektov, na katerih so bile v preteklosti izvedne PS):

$$k_n = 1,89 \ (n = 3), \ k_n = 1,80 \ (n = 5).$$

V tem primeru bomo upoštevali znani koeficient variacije, ki smo ga dobili iz raztrosa odpornosti na izvlek na vzorcu sidranih objektov, na katerih so bile na sidrih tipa RCP/D v preteklosti izvedene PS: povprečni skupni koeficient variacije za prvo skupino 71 objektov je znašal 0,113, medtem ko je povprečni skupni koeficient variacije za drugo skupino 32 objektov znašal 0,116, torej ne naredimo velike napake, če privzamemo: $V_{Ra,znan} = 0,12$.

- $V_{Ra,neznan}$ (V_{Ra} ocenjen le na podlagi dejansko opravljenih PS sider posameznega tipa na testnem polju OZ-05):

$$k_n = 3,37 \ (n = 3), \ k_n = 2,33 \ (n = 5).$$

V tem primeru bomo upoštevali izvednotene koeficiente variacije, kot so bili pri sidrih posameznega tipa (RCP/D, RCP/D-K, RCP/D-Z in RCP/D-I) dejansko doseženi pri PS in VPN na testnem polju.

Na podlagi teh vrednosti koeficienta k_n in koeficientov variacije ($V_{Ra,znan}$ in $V_{Ra,neznan}$) smo z izrazom (4.7) v preglednici 4.5 izvednotili karakteristične odpornosti na izvlek R_{ak} referenčnih sider testnega polja. Za sidra modificiranih tipov (RCP/D-K, RCP/D-Z in RCP/D-I) podatkov o raztrosu odpornosti na izvlek iz preteklosti nimamo, zato smo v preglednici 4.5 le informativno prikazali, kakšne vrednosti karakterističnih odpornosti na izvlek modificiranih vrednosti sider bi dobili, če bi hipotetično predpostavili, da lahko tudi pri modificiranih tipih sider privzamemo porazdelitev odpornosti R_a po normalni porazdelitveni funkciji, vrednost koeficienta variacije $V_{Ra,znan}$ pa bi bila enaka kot pri sidrih tipa RCP/D (vrednosti v oklepajih).

Napoved karakteristične vrednosti po **Bayesovi metodi** ($R_{ak,Bayes}$) smo izvednotili po postopku opisanem v dodatku C *Designers' Guide to EN 1990* (Gulvanessian in sod., 2002), pri čemer smo privzeli:

- za vzorec PS na testnem polju: $n = 3$, $m = 834,67$, $s = 325,95$ ter
- za preteklo (historične) vrednosti 87 objektov: $n' = 87$, $m' = 893,95$, $s' = 167,80$,

pri čemer smo vrednotenje izvedli tako za primer znane kot tudi neznanne standardne deviacije.

Preglednica 4.5: Rezultati vrednotenja PS in VPN sider testnega polja OZ-05 z uporabo statističnih metod.

Table 4.5: Results of evaluation of PS and VPN tests performed on the OZ-05 testing field anchors, obtained using statistical methods.

Oznaka sidra	Tip sidra	R_a (IP) [kN]	$R_{a,povp}$ [kN]	k_n V_{Ra}	$R_{ak}^{(4.7)}$ [kN] $V_{Ra,neznan}$	$R_{ad}^{(4.5)}$ [kN]	k_n V_{Ra}	$R_{ak}^{(4.7)}$ [kN] $V_{Ra,znan}$	$R_{ad}^{(4.5)}$ [kN]	$R_{ak,Bayes}$ [kN]	$R_{ad,Bayes}^{(4.5)}$ [kN]
SBz-23	RCP/D	651	834,7	3,37 0,39	-264**	-240**	1,89 0,12	645	623	601 ^{nsd} 752 ^{zsd}	546 ^{nsd} 684 ^{zsd}
SBz-26		1211									
SBz-59		642									
SBz-89	RCP/D-K	1254*	1132,2	2,33 0,12	803	730	1,80 (0,12)	(888)	854	-	-
SBz-18		978									
SBz-39		1231									
SBz-66		1220									
SBz-84		978									
SBz-56	RCP/D-Z	702	620,4	2,33 0,29	200	181	1,80 (0,12)	(486)	468	-	-
SBz-15		400									
SBz-36		694									
SBz-63		469									
SBz-81		837									
SBz-86	RCP/D-I	1144	925,0	2,33 0,29	307	279	1,80 (0,12)	(725)	698	-	-
SBz-12		604									
SBz-33		1248									
SBz-60		789									
SBz-78		840									

Opombe: *ocenjena vrednost R_a (porušitev v smislu presečišč krivulj med PS ni bila dosežena),
 **vrednost s fizikalnega stališča ni smiselna (glej tudi komentar na str. 144),
 nsdstandardna deviacija populacije ni znana,
 zsdstandardna deviacija populacije je znana,
 $R_{ad}^{(4.5)}$ projektna odpornost sidra iz vrednotenja za projektni pristop 2 (PP2) po enačbi (4.5)
 z upoštevanjem vrednosti delnega faktorja $\gamma_a=1,1$.

4.3.1.3 Vrednotenje preiskav sider po EN 1537 in SIA 267

Po standardu EN 1537, kot tudi švicarskem standardu SIA 267, naj bi bila karakteristična odpornost sidra na izvlek R_{ak} , določena kot najmanjši od treh in-situ doseženih rezultatov PS: $R_{ak} = \min(R_{a,i})$, pri čemer naj bo večja od notranje odpornosti sidra po pramenih kabla sidra R_{ik} , a je dopuščena tudi možnost, da se odpornost sider po jeklu pramen kabla sidra glede na nosilnost tal zaledja ne izkoristi v celoti, saj karakteristično odpornost sidra R_k določa kot manjšo od obeh vrednosti:

$$R_k = \min(R_{ik}, R_{ak}). \quad (4.21)$$

Projektna vrednost odpornosti sidranja je odvisna od načina obremenitve sidra pri popustitvi sidrane konstrukcije, pri čemer se projektna odpornost R_d natezno obremenjenih sider določi po izrazu:

$$R_d = \frac{R_k}{\gamma_M}. \quad (4.22)$$

Delni faktor odpornosti sidranja γ_M , ki zajema odstopanja lastnosti temeljnih tal, odstopanja mehanskih lastnosti in dimenzij sestavnih komponent sider ter nenatančnosti računskega modela in izvedbe, se določi tako, da bo izpolnjen pogoj $\gamma_M \geq 1,35$.

V **preglednici 4.6** za vsa sidra testnega polja OZ-05 podajamo dosežene vrednosti odpornosti sider na izvlek R_a (IP), ki smo jih izvrednotili na podlagi povprečnih odčitkov izvlečkov vseh pramen kabla sidra iz **preglednic 3.6** do **3.9**. Za vsak tip sider smo najprej določili minimalne vrednosti odpornosti na izvlek, ki predstavljajo karakteristične odpornosti sider na izvlek R_{ak} , na podlagi katerih smo po enačbi (4.22) izvrednotili še projektne odpornosti R_d , pri čemer smo za delni faktor odpornosti sidranja privzeli $\gamma_M = 1,35$.

Preglednica 4.6: Rezultati vrednotenja PS in VPN sider testnega polja OZ-05 izvrednotene po postopku EN 1537 in SIA 267.

Table 4.6: Results of evaluation of PS and VPN tests performed on the OZ-05 testing field anchors, obtained according to EN 1537 and SIA 267 procedure.

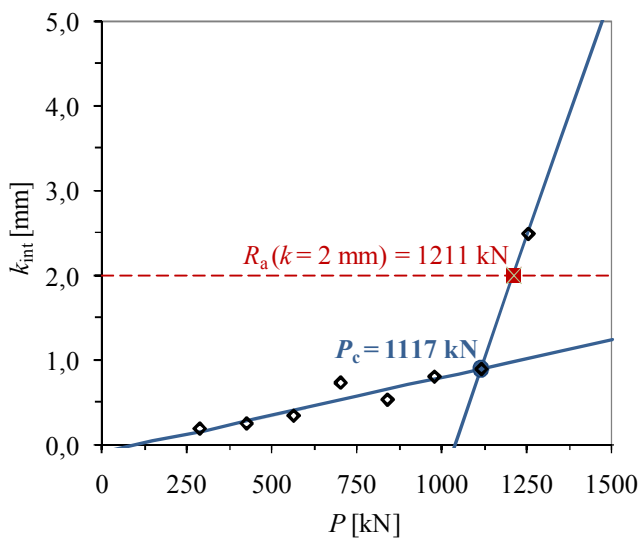
Oznaka sidra	Tip sidra	ŠNP	Preskus 2008	R_a (IP) [kN]	$R_k^{(4.21)}$ [kN]	$R_d^{(4.22)}$ [kN]
SBz-23	RCP/D	6	PS	651	642	476
SBz-26		6	PS	1211		
SBz-59		6	PS	642		
SBz-89	RCP/D-K	6	PS	1254*	978	724
SBz-18		6	VPN	978		
SBz-39		6	VPN	1231		
SBz-66		6	VPN	1220		
SBz-84		6	VPN	978		
SBz-56	RCP/D-Z	5	PS	702	400	296
SBz-15		6	VPN	400		
SBz-36		6	VPN	694		
SBz-63		4	VPN	469		
SBz-81		6	VPN	837		
SBz-86	RCP/D-I	6	PS	1144	604	447
SBz-12		6	VPN	604		
SBz-33		6	VPN	1248		
SBz-60		6	VPN	789		
SBz-78		6	VPN	840		

Opomba: * ocenjena vrednost R_a (porušitev v smislu presečišč krivulj s k_{krit} med PS ni bila dosežena).

4.3.1.4 Vrednotenje preiskav sider na podlagi sile kritičnega lezenja sidra določene iz bilinearnega diagrama po osnutku standarda prEN ISO 22477-5

Odpornost sider testnega polja OZ-05 na izvlek R_a smo poskusili določiti še po alternativni metodi, pri čemer smo kot osnovo vzeli določitev sile kritičnega lezenja sidra P_c , kot jo določa osnutek standarda prEN ISO 22477-5. Po tem postopku se bomo oprli na značilnost obnašanja veznega dela prednapetega

sidra, ko se vrednosti intervalnih mer lezenja k_{int} v območju nizkih stopenj sil P_i PS in VPN relativno nizke in se s povečevanjem P_i postopoma povečujejo, nato pa v nekem trenutku (z začetkom popuščanja veznega dela sidra) začno vrednosti k_{int} intenzivno naraščati. Takšno obnašanje sidra lahko ponazorimo z bilinearnim diagramom, pri čemer začetno območje nizkih vrednosti k_{int} po metodi najmanjših kvadratov opišemo z eno aproksimacijsko premico, medtem ko območje intenzivnega naraščanja visokih k_{int} ponazorimo drugo premico. Na ta način v diagramu $k_{int}-P$ dobimo dve premici, katerih presečišče določa silo kritičnega lezenja P_c , ki predstavlja začetno točko pospešenega naraščanja vrednosti k_{int} , ki na koncu rezultira v izvleku veznega dela sidra. Sila P_c torej določa začetek popuščanja veznega dela, a je vseeno ne moremo neposredno enačiti z odpornostjo sidra na izvlek R_a (slika 4.8).



Slika 4.8: Določitev sile kritičnega lezenja P_c za primer sidra SBz-26 tipa RCP/D na podlagi rezultatov preiskave sidra.
Figure 4.8: Determination of the critical creep load P_c on the basis of investigation test results for the case of anchor SBz-26 (type RCP/D).

Po drugi strani lahko ob poznavanju sile P_c poskušamo oceniti odpornost sidra na izvlek R_a . Če izhajamo iz določil standarda *EN 1537* in obenem upoštevamo značilnost obnašanja sider testnega polja OZ-05, torej da so se njihovi vezni deli pramen izvlačili še predno je bila odpornost pramen po jeklu dokončno izkoriščena ($R_a < R_i$), lahko za natezno obremenjeno sidro zapišemo:

$$R_d \geq \frac{R_k}{\gamma_R} = \frac{R_{ak}}{1,35} \Rightarrow R_{ak} \leq 1,35 \cdot R_d \quad (4.23)$$

Neposredna primerjava velikosti sile P_p , na ravni katere se izvajajo preskusi nosilnosti sider objekta, po standardu *EN 1537*

$$P_p \geq 1,25 \cdot P_0 \quad (4.24)$$

s pogojem, da naj delovna sila sidra P znaša največ 80 % sile kritičnega lezenja sidra P_c (Habib, 1989)

$$P = 0,8 \cdot P_c \Rightarrow P_c = 1,25 \cdot P \quad (4.25)$$

pokaže, da za sidra objekta sila kritičnega lezenja sidra P_c pravzaprav predstavlja spodnjo mejo preskusne sile P_p . Če upoštevamo zvezo, da delovna sila v sidru P ustreza projektni odpornosti sidra R_d , iz enačb (4.23) in (4.25) dobimo izraz za oceno izvlečne sile sidra R_a v odvisnosti od sile kritičnega lezenja sidra P_c :

$$R_a(P_c) \leq 1,35 \cdot R_d = 1,35 \cdot 0,8 \cdot P_c = 1,08 \cdot P_c \quad (4.26)$$

V preglednici 4.7 podajamo vrednosti sil kritičnega lezenja sidra P_c kot tudi zgornje meje odpornosti na izvlek $R_a(P_c)$ sider testnega polja OZ-05 iz vrednotene po enačbi (4.26), na podlagi katerih smo iz vrednotili tudi povprečne vrednosti odpornosti $R_{a,povp}(P_c)$ po posameznih tipih sider RCP/D, RCP/D-K,

RCP/D-Z in RCP/D-I, pri čemer smo upoštevali vrednosti k_{int} , dobljene po metodi IP. Osnutek standarda *prEN ISO 22477-5* je usmerjen le v izvedbo, ne pa tudi vrednotenje PS, zato se uporablja skupaj z *EN 1997-1* in *EN 1537*. Skladno s tem smo projektne vrednosti odpornosti R_d v **preglednici 4.7** izračunali po izrazu (4.22) iz standarda *EN 1537*, pri čemer smo uporabili vrednosti odpornosti sider na izvlek $R_a(P_c)$ in za delni faktor odpornosti sidranja privzeli vrednost $\gamma_M = 1,35$.

Preglednica 4.7: Vrednosti sil kritičnega lezenja P_c za sidra testnega polja OZ-05 iz vrednotene na podlagi intervalnih mer lezenja k_{int} dobljenih po metodi IP.

Table 4.7: Values of the critical creep load P_c for the OZ-05 testing field anchors calculated on the basis of interval creep displacement rates k_{int} , obtained after the IP method.

Oznaka sidra	Tip sidra	ŠNP	Preskus 2008	P_c [kN]	$k(P_c)$ [mm]	$R_a(P_c)^{(4.26)}$ [kN]	$R_d^{(4.22)}$ [kN]	Presečišča odsekoma ravne krivulje k_{int} s k_{krit} [kN]	Razmerje
SBz-23	RCP/D	6	PS	592	0,509	639	473	$R_{a,povp}^{RCP/D}$ (IP) (preglednica 3.6)	$\frac{R_{a,povp}^{RCP/D} (IP)}{R_{a,povp}(P_c)}$
SBz-26		6	PS	1117	0,897	1206	894		
SBz-59		6	PS	560	0,816	605	448		
Povprečje RCP/D						817	605	835	1,02
SBz-89	RCP/D-K	6	PS	NMD	NMD	–	–	$R_{a,povp}^{RCP/D-K}$ (IP) (preglednica 3.7)	$\frac{R_{a,povp}^{RCP/D-K} (IP)}{R_{a,povp}(P_c)}$
SBz-18		6	VPN	NMD	NMD	–	–		
SBz-39		6	VPN	1130	1,195	1220	904		
SBz-66		6	VPN	1123	0,859	1213	898		
SBz-84		6	VPN	NMD	NMD	–	–		
Povprečje RCP/D-K						1217	901	1132	0,93
SBz-56	RCP/D-Z	5	PS	700	1,640	756	560	$R_{a,povp}^{RCP/D-Z}$ (IP) (preglednica 3.8)	$\frac{R_{a,povp}^{RCP/D-Z} (IP)}{R_{a,povp}(P_c)}$
SBz-15		6	VPN	373	0,658	403	298		
SBz-36		6	VPN	558	0,621	603	446		
SBz-63		4	VPN	NMD	NMD	–	–		
SBz-81		6	VPN	682	1,052	737	546		
Povprečje RCP/D-Z						625	463	620	0,99
SBz-86	RCP/D-I	6	PS	1121	1,241	1211	897	$R_{a,povp}^{RCP/D-I}$ (IP) (preglednica 3.9)	$\frac{R_{a,povp}^{RCP/D-I} (IP)}{R_{a,povp}(P_c)}$
SBz-12		6	VPN	562	0,772	607	450		
SBz-33		6	VPN	1117	0,581	1206	894		
SBz-60		6	VPN	704	1,116	760	563		
SBz-78		6	VPN	664	0,909	717	531		
Povprečje RCP/D-I						900	667	925	1,03

Opombe: ŠNP..... število napetih pramenov kabla sidra,
 NMD..... ni možno določiti – možno je potegniti le prvo premico, zato presečišče (s tem pa tudi vrednost P_c) ne obstaja,
 $R_d^{(4.22)}$ projektna odpornost sidra iz vrednotena po enačbi (4.22), upoštevan delni faktor $\gamma_M = 1,35$.

V desnem delu **preglednice 4.7** smo za primerjavo za vse štiri tipe sider testnega polja OZ-05 zbrali povprečne vrednosti odpornosti vseh sider istega tipa na izvlek, ki smo jih v **poglavjih 3.5.3.1 do 3.5.3.4** za vsako sidro posebej določili iz presečišča krivulje intervalnih mer lezenja iz vrednotenih po

metodi inženirske presoje $k_{\text{int}}(\text{IP})$ s kritično mero lezenja $k_{\text{krit}} = 2 \text{ mm}$, ki opredeljujejo odpornost sider na izvlek R_a . Primerjava povprečnih zgornjih mej odpornosti sider na izvlek, dobljenih iz vrednosti sil kritičnega lezenja sidra $R_{a,\text{povp}}(P_c)$, glede na povprečne vrednosti iz presečišč odsekoma ravnih krivulj intervalnih mer lezenja s kritično mero lezenja $k_{\text{krit}}(R_{a,\text{povp}}(\text{IP}))$, kaže dobro ujemanje vrednosti $R_{a,\text{povp}}(\text{IP})$ z vrednostmi $R_{a,\text{povp}}(P_c)$, saj med obema tipoma vrednotenja odpornosti na izvlek:

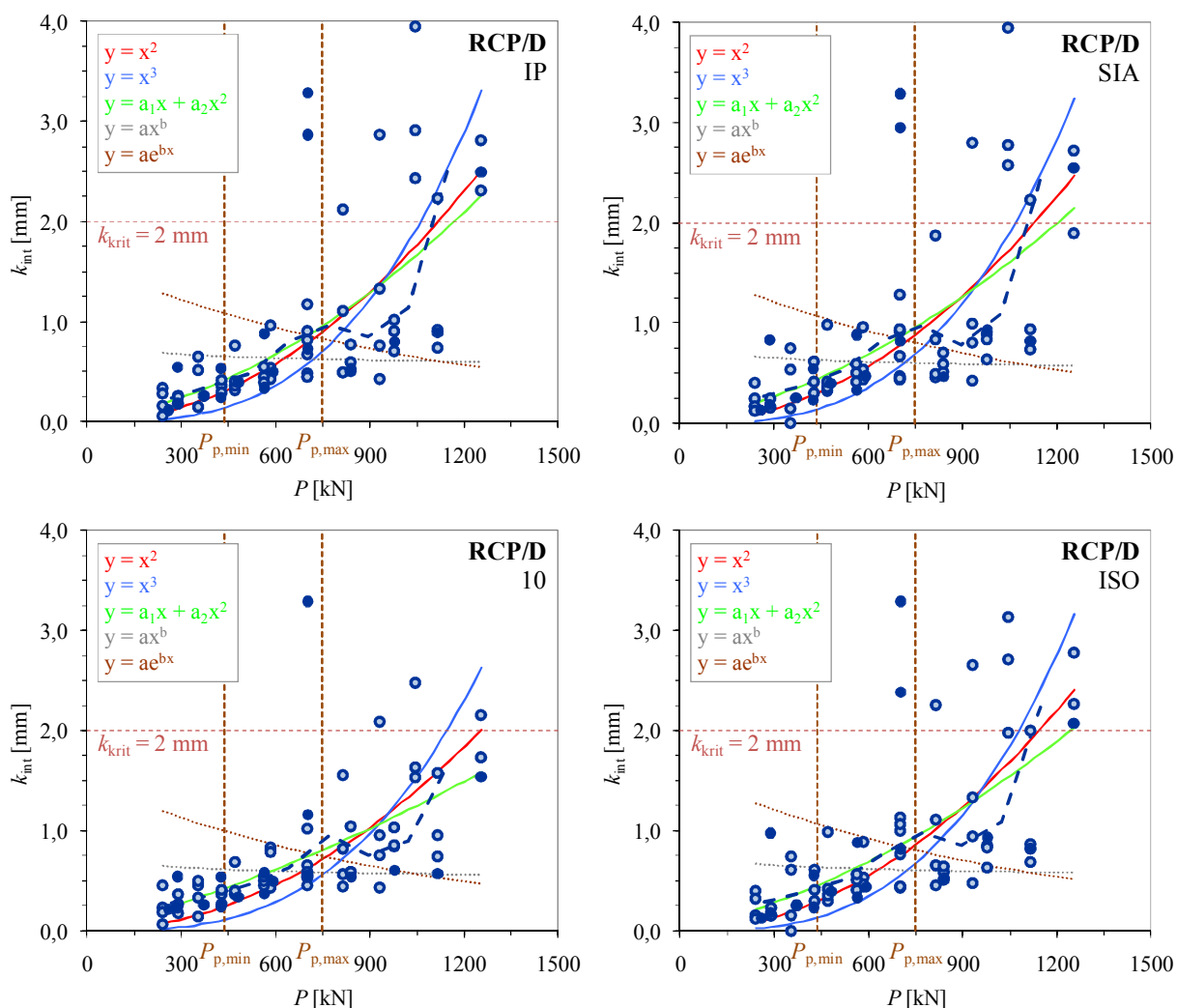
- pri sidrih tipa RCP/D, RCP/D-Z in RCP/D-I količniki dosegajo vrednosti med 0,99 in 1,03, torej po obeh metodah ob upoštevanju natančnosti eksperimentalno dobljenih vrednosti dobimo praktično identične rezultate,
- pri sidrih tipa RCP/D-K količnik dosega vrednost 0,93, kar pa je posledica dejstva, da kar pri treh sidrih tega tipa ni bilo izrazitega popuščanja veznega dela sidra, ki bi se izražalo v obliki velikega prirasta intervalnih mer lezenja v zadnji stopnji PS in VPN, zato smo pri teh sidrih lahko določili le prvo premico; vrednosti sile kritičnega lezenja P_c smo tako lahko določili le pri dveh sidrih, na podlagi katerih smo iz vrednotili $R_{a,\text{povp}}(P_c)$.

Na podlagi opravljene primerjave lahko podamo sklepno ugotovitev, da je tudi metoda vrednotenja PS na podlagi sile kritičnega lezenja sidra P_c , določene iz bilinearnega diagrama po osnutku standarda *prEN ISO 22477-5*, sicer uporabna v praksi, vendar pa je njena uporabna vrednost omejena le na tiste primere, ko vezni del sidra v zadnjem delu PS izkazuje izrazito popuščanje v obliki hitro naraščajočih vrednosti intervalnih mer lezenja, na podlagi katerih je možno iz vrednotiti tudi drugo premico, ki v presečišču s prvo premico določa vrednost sile P_c .

4.3.1.5 Določitev najustreznejše skupne aproksimacijske funkcije za vsak tip sidra testnega polja in vse pristope vrednotenja PS in VPN

S skupnim vrednotenjem vseh na objektu izvedenih PS in VPN želimo omejiti vpliv različnih motečih faktorjev, ki so se pri tem pojavljali (človeški faktor pri korekcijah sile pri PS in VPN, spreminjajoče se pogoje tal med sidri, trdnost injekcijske mase sider, nenatančno namestitvev dinamometra in glave sidra glede na os sidra, omejeno natančnost korekcije sil pred odčitki, vremenske pogoje ipd). Ideja je, da vse merodajne mere lezenja, določene po izbrani metodi vrednotenja rezultatov, za vse PS in VPN sider istega tipa, opravljene na posameznem objektu, vnesemo v skupni diagram $k_{\text{int}} - P$, v katerem za vse točke po metodi najmanjših kvadratov poiščemo najugodnejšo aproksimacijsko funkcijo.

V tem podpoglavju smo iz vrednotili aproksimacijske funkcije za vse PS in VPN na referenčnih sidrih RCP/D, kot tudi na modificiranih tipih sider (RCP/D-K, RCP/D-Z in RCP/D-I), opravljene leta 2008. Pri tem smo upoštevali intervalne mere lezenja k_{int} , iz vrednotene na podlagi povprečja vseh izvlečkov pramen kabla sidra, pri čemer smo pri tem upoštevali vse obravnavane metode določitve k_{int} (metode IP, SIA, 10 in ISO). Najustreznejšo skupno aproksimacijsko funkcijo za vsak tip sidra in vsako metodo obdelave smo poiskali po metodi najmanjših kvadratov, opisani v [dodatku D](#), pri čemer smo iz aproksimacijskih funkcij najprej odčitali odpornosti na izvlek R_a , v nadaljevanju pa smo iz istih funkcij odčitali še vrednosti dopustne mere lezenja k_{adm} za napenjanje sider objekta. Na [sliki 4.9](#) so za primer referenčnih sider RCP/D, za obdelave odčitkov izvlečkov po metodah IP, SIA, 10 in ISO, vnesene eksperimentalno dobljene vrednosti vseh PS in VPN sider tega tipa podane s točkami $(P_i, k_{\text{int},i})$, za katere smo po metodi najmanjših kvadratov iz vrednotili aproksimacijske funkcije.



Slika 4.9: Aproksimacijske funkcije referenčnih sider RCP/D za rezultate preskusov PS in VPN, kot tudi za različne metode določanja k_{int} (IP, SIA, 10 in ISO), določene po metodi najmanjših kvadratov.

Figure 4.9: Model functions for VPN and PS tests performed on reference anchors RCP/D, defined after least square method, where different methods (IP, SIA, 10 and ISO) were used for calculation of k_{int} .

Rezultate PS preskusnih sider izvedenih v sklopu RRN (sidra SBz-23, SBz-26 in SBz-59) smo označili s polnimi pikami, medtem ko smo rezultate PS sider objekta (TS-01 do TS-07) ponazorili z dvobarvnimi pikami. V istih diagramih s črtkanimi odebeljenimi modrimi črtami podajamo povprečja vseh $k_{int,i}$ na posameznih stopnjah sil P_i ; glede na to, da vse PS niso bile izvedene pri istih silah P_i (nekatera sidra so bila 5-pramenska, druga pa 6-pramenska, poleg tega je bila večina PS izvedena v osmih stopnjah, PS sidra SBz-23 pa v desetih stopnjah) smo točke iz vrednotili tako, da smo tako pri silah kot tudi merah lezenja izračunali ponderirane povprečne vrednosti.

Medsebojna primerjava diagramov vrednotenja PS in VPN po vseh štirih metodah na **sliki 4.9** kaže, da so v splošnem vrednosti mer lezenja $k_{int,i}$, dobljene pri istih silah P_i , po metodi 10 nižje kot pri metodah IP, SIA in ISO, ki na drugi strani vse dajejo na pogled zelo podobne rezultate. Potek potenčne funkcije $k = aP^b$ in eksponentne funkcije $k = ae^{bP}$ (na sliki pikčasto označene krivulje) kaže, da z njima v praksi ne moremo zadovoljivo opisati mehanizma obnašanja veznih delov vseh sider, saj funkciji ne posnemata osnovnega pravila, da so pri nižjih silah P_i vrednosti $k_{int,i}$ nižje, pri višjih pa višje, čeprav

sta se obe funkciji na ravni posameznega sidra izkazali kot primerni (glej [dodatek D](#) disertacije). Ker podrobnejša analiza na podlagi prikazanih diagramov ni možna, smo v [preglednici 4.8](#) za vsa sidra istega tipa zbrali vrednosti skupne odpornosti na izvlek $R_{a,s(k-povp)}$, dosežene na testnem polju leta 2008, določene po različnih metodah (IP, SIA, 10 in ISO): za vsako metodo in aproksimacijsko funkcijo smo določili presečišča teh funkcij s kritično mero lezenja $k_{krit} = 2$ mm, ki določajo vrednosti $R_{a,s(k-povp)}$. Za izbor najboljšega ujemanja aproksimacijskih funkcij na tabelirane vrednosti, za vse aproksimacijske funkcije podajamo tudi vsote kvadratov odstopanj F reducirane s številom neodvisnih podatkov ν , ki smo jih uporabili pri izbiri aproksimacijske funkcije. V [preglednici 4.8](#) so rezultati najustreznejših aproksimacijskih funkcij, za vsako metodo obdelave rezultatov PS in tip sidra, obarvani modro.

Vrednosti iz [preglednice 4.8](#) potrjujejo ugotovitve iz [slike 4.9](#), da z uporabo linearizirane potenčne oz. eksponentne funkcije v nobenem primeru nismo mogli uspešno ponazoriti eksperimentalno dobljenih vrednosti. V večini primerov smo vrednosti terenskih preskusov najbolje aproksimirali s funkcijo druge stopnje, bodisi v obliki parabole $k = aP^2$ bodisi v obliki dvoparametričnega polinoma druge stopnje $k = a_1P + a_2P^2$. Edino v primeru sider tipa RCP/D-Z je pri vseh metodah najboljšo aproksimacijsko funkcijo predstavljala enoparametrična funkcija tretje stopnje $k = aP^3$, kar je posledica specifičnega obnašanja veznih delov podsider (izrazita hipna popustitev veznih delov posameznih pramen). Odpornosti na izvlek $R_{a,s(k-povp)}$, dobljene po posameznih tipih sidra, smo primerjali, pri čemer smo kot izhodišče vedno vzeli vrednost dobljeno po metodi IP:

- pri referenčni sidrih **RCP/D** najnižjo vrednost $R_{a,s(k-povp)} = 1168$ kN (100 %) dobimo z uporabo metode IP, po metodi SIA dobimo 1202 kN (102,9 %), po metodi ISO dobimo 1243 kN (106,4 %), medtem ko (pričakovano) največjo vrednost kar 1484 kN (127,1 %) dobimo po metodi 10;
- pri sidrih s povečano togostjo veznega dela tipa **RCP/D-K** po metodah IP in ISO dobimo največjo vrednost 1623 kN (100 %), medtem ko najnižjo vrednost 1320 kN (81,3 %) dobimo po metodi SIA, le nekoliko višjo vrednost 1406 (86,6 %) pa daje metoda 10;
- pri večkratnih sidrih tipa **RCP/D-Z** z zamaknjenimi veznimi deli podsider po metodi IP dobimo 530 kN (100 %), kar je praktično identično rezultatu metode ISO 529 kN (99,8 %), po metodi SIA dobimo malenkost višjo vrednost $R_{a,s(k-povp)} = 533$ kN (100,6 %), medtem ko tudi v tem primeru največjo vrednost 625 kN (117,9 %) dobimo po metodi 10;
- pri sidrih spremenljive togosti tipa **RCP/D-I** po metodi IP dobimo najnižjo vrednost 1047 kN (100 %), nekoliko višjo vrednost – $R_{a,s(k-povp)} = 1111$ kN (106,1 %) – daje metoda SIA, še višjo vrednost $R_{a,s(k-povp)} = 1169$ kN (111,7 %) dobimo po metodi ISO, najvišjo vrednost $R_{a,s(k-povp)} = 1234$ kN (117,9 %) pa tudi v tem primeru daje metoda 10.

Ugotovimo lahko, da so po različnih metodah dobljene odpornosti na izvlek precej nekonsistentne, saj se največje vrednosti odpornosti na izvlek pojavljajo pri različnih metodah. Na podlagi primerjave metod na vseh tipih sider testnega polja opornega zidu OZ-05 lahko ponovno potrdimo, da metoda 10, navkljub enostavnosti, ni priporočljiva za uporabo v praksi, saj pogosto daje precenjene odpornosti sider na izvlek R_a . Metoda IP, ki pravzaprav povzema izhodišča metode SIA, zaradi prilagodljivosti dejanskemu obnašanju preskusnega sidra med PS, izkušenem strokovnjaku omogoča najbolj natančen izkoristek nosilnosti glede na dejansko obnašanje posameznih pramen oz. sidra kot celote, a na drugi strani, ob nezadostnem prepoznavanju specifičnosti obnašanja veznega dela sidra, ne preprečuje napačnih ocen odpornosti sidra na izvlek. To pomanjkljivost odpravlja metoda ISO po osnutku standarda *oSIST prEN ISO 22477-5*, ki podaja vnaprej jasno opredeljen postopek vrednotenja rezultatov, vendar je v tem primeru treba že v fazi izvedbe PS oz. VPN prilagoditi čase odčitkov; poleg predvidenih v *SIA 267/I* moramo opraviti še dodatne odčitke v 3', 4' in 7'.

Preglednica 4.8: Vrednosti skupne odpornosti na izvlek $R_{a,s(k-povp)}$ za vsa sidra istega tipa, dosežene na testnem polju leta 2008, določene po različnih metodah (IP, SIA, 10 in ISO).

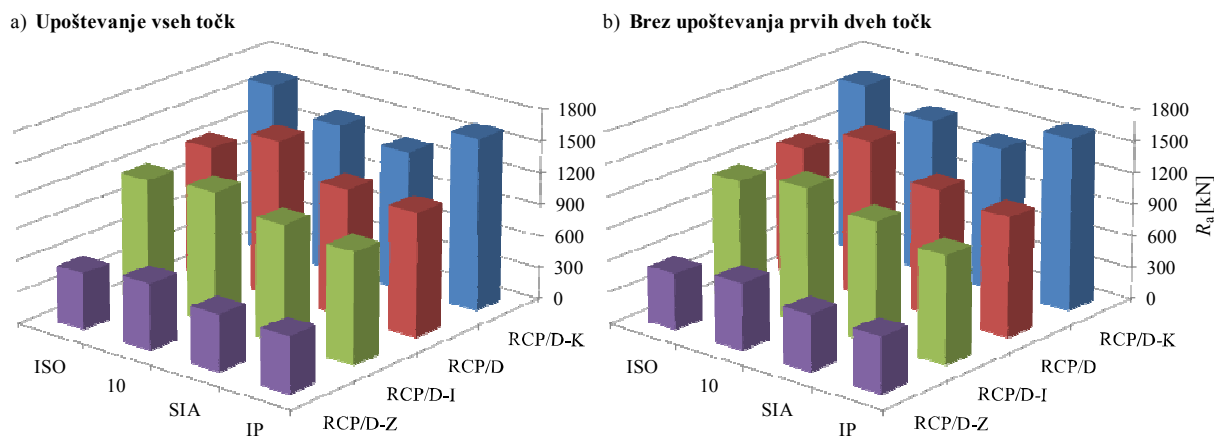
Table 4.8: Values of external anchor resistance $R_{a,s(k-povp)}$ for all testing field anchors of the same type, obtained by different methods (IP, SIA, 10 and ISO), on the testing field in 2008.

Tip sidra	Metoda	Aproksimacijska funkcija					
		$y = ax^2$	$y = ax^3$	$y = a_1x + a_2x^2$	$y = ax^b$	$y = ae^{bx}$	
Referenčna sidra tip RCP/D	IP	F/v	0,4491	0,5426	0,4449	0,8584	1,0580
		$R_{a,s(k-povp)}$ [kN]	1118	1062	1168	①	①
	SIA	F/v	0,4679	0,5691	0,4576	0,8374	1,0261
		$R_{a,s(k-povp)}$ [kN]	1129	1069	1202	①	①
	10	F/v	0,2296	0,3192	0,2045	0,3864	0,5650
		$R_{a,s(k-povp)}$ [kN]	1253	1145	1484	①	①
ISO	F/v	0,3833	0,4898	0,3660	0,6995	0,8826	
	$R_{a,s(k-povp)}$ [kN]	1143	1078	1243	①	①	
Sidra s povečano togostjo veznega dela tip RCP/D-K	IP	F/v	0,1811	0,2724	0,1427	0,3075	0,4467
		$R_{a,s(k-povp)}$ [kN]	1313	1213	1623	①	①
	SIA	F/v	0,1661	0,2818	0,0923	0,1773	0,2783
		$R_{a,s(k-povp)}$ [kN]	1320	1207	②	①	①
	10	F/v	0,1508	0,2585	0,0627	0,1075	0,1948
		$R_{a,s(k-povp)}$ [kN]	1406	1259	②	①	①
ISO	F/v	0,2229	0,3753	0,1153	0,2083	0,2960	
	$R_{a,s(k-povp)}$ [kN]	1280	1182	1623	①	①	
Večkratna sidra tip RCP/D-Z	IP	F/v	18,250	16,519	17,835	28,407	28,520
		$R_{a,s(k-povp)}$ [kN]	469	530	535	①	①
	SIA	F/v	18,523	16,824	18,181	28,349	28,455
		$R_{a,s(k-povp)}$ [kN]	473	533	538	①	①
	10	F/v	4,0834	3,7643	4,1578	6,8218	7,1063
		$R_{a,s(k-povp)}$ [kN]	601	625	608	①	①
ISO	F/v	18,196	16,484	17,827	28,307	28,358	
	$R_{a,s(k-povp)}$ [kN]	467	529	534	①	①	
Sidra spremenljive togosti veznega dela tip RCP/D-I	IP	F/v	1,1718	1,3903	1,1462	1,6507	1,7413
		$R_{a,s(k-povp)}$ [kN]	998	991	1047	①	①
	SIA	F/v	0,8180	1,0828	0,6710	0,8490	0,9318
		$R_{a,s(k-povp)}$ [kN]	1111	1065	②	①	①
	10	F/v	0,2332	0,4128	0,1139	0,2049	0,3251
		$R_{a,s(k-povp)}$ [kN]	1234	1142	②	①	①
ISO	F/v	0,4908	0,6776	0,4386	0,7530	0,8651	
	$R_{a,s(k-povp)}$ [kN]	1064	1035	1169	①	①	

Opombi: ① linearizirana aproksimacijska funkcija se ne prilega točkam, za katere iščemo analitično funkcijo, ② obrnjena krivulja, ki ne ustreza mehanizmu obnašanja veznega dela sidra.

Glede na zaključke laboratorijskih preskušanj vpliva ekscentrične lege obročastega dinamometra na izmerjene vrednosti sil (omejena natančnost na ravni sile P_1 , pa deloma tudi sile P_2) in preskusov izotermne relaksacije vzorcev pramen po postopku za preiskavo sider (problemi z zdrsi med žicami pramen v območjih vnosa sile, kot tudi na mestih oprijema čeljusti mononapenjalk na površini pramen, usedanje sistema na prvih stopnjah sile PS in VPN) smo celoten postopek iskanja najugodnejših aproksimacijskih funkcij ponovili tudi za nabor eksperimentalnih vrednosti ($P_i, k_{int,i}$), le da tokrat pri vrednotenju aproksimacijskih funkcij po metodi najmanjših kvadratov nismo upoštevali vrednosti dobljenih na prvih dveh stopnjah PS in VPN (t.j. na ravni sil P_1 in P_2). Takšen pristop na nek način sovпада tako z določili EN 1537 kot tudi DIN 4125 (1990), po katerem je prva stopnja obremenitve sidra (s tem pa tudi prva točka v diagramu mer lezenja v odvisnosti od stopnje sile) določena kot 50 % varne delovne sile. V kolikor to določilo prevedemo na naš primer 6-pramenskih sider testnega polja, ob upoštevanju zahteve EN 1537, da mora veljati $P_0 \leq 0,60 \cdot P_{pk}$ in ob predpostavki, da je varna delovna sila kar enaka sili zaklinjenja P_0 , bi za prvo stopnjo obremenitve dobili silo 471 kN, ki je višja od stopenj sil P_1 in P_2 pri naših PS in VPN. Zelo podoben rezultat dobimo, če upoštevamo določilo EN 1537, da se ustreznostni preskus (ki je ekvivalent VPN, pa tudi PS) izvede po stopnjah sile za PS, le da se izpusti prvo stopnjo sile, ki je določena kot 25 % P_p in se preskus začne šele z drugo stopnjo sile (40 % P_p): glede na to, da mora veljati $P_p \geq 1,25 \cdot P_0 = 0,75 \cdot P_{pk}$, potem to pomeni, da se ustreznostni preskus začne s silo velikosti vsaj $0,40 \cdot 0,75 \cdot 1570 = 471$ kN.

Na **sliki 4.10** smo zbrali odpornosti na izvlek R_a , ki so na levem diagramu (a) dobljene na podlagi upoštevanja vseh točk ($P_i, k_{int,i}$) PS in VPN, medtem ko smo na desnem diagramu (b) prvi dve fazi PS in VPN izpustili (t.j. vrednosti $k_{int,i}$ izvrednotene za stopnji sil P_1 in P_2), tako da smo pri vrednotenju aproksimacijskih funkcij upoštevali eksperimentalno dobljene vrednosti od vključno tretje stopnje sile (P_3) naprej.



Slika 4.10: Primerjava odpornosti na izvlek R_a , doseženih pri preskušanjih leta 2008 na testnem polju: (a) pri določanju aproksimacijskih funkcij so bile upoštewane vse točke ($P_i, k_{int,i}$), (b) pri določanju aproksimacijskih funkcij niso bile upoštewane točke na stopnjah sile P_1 in P_2 .

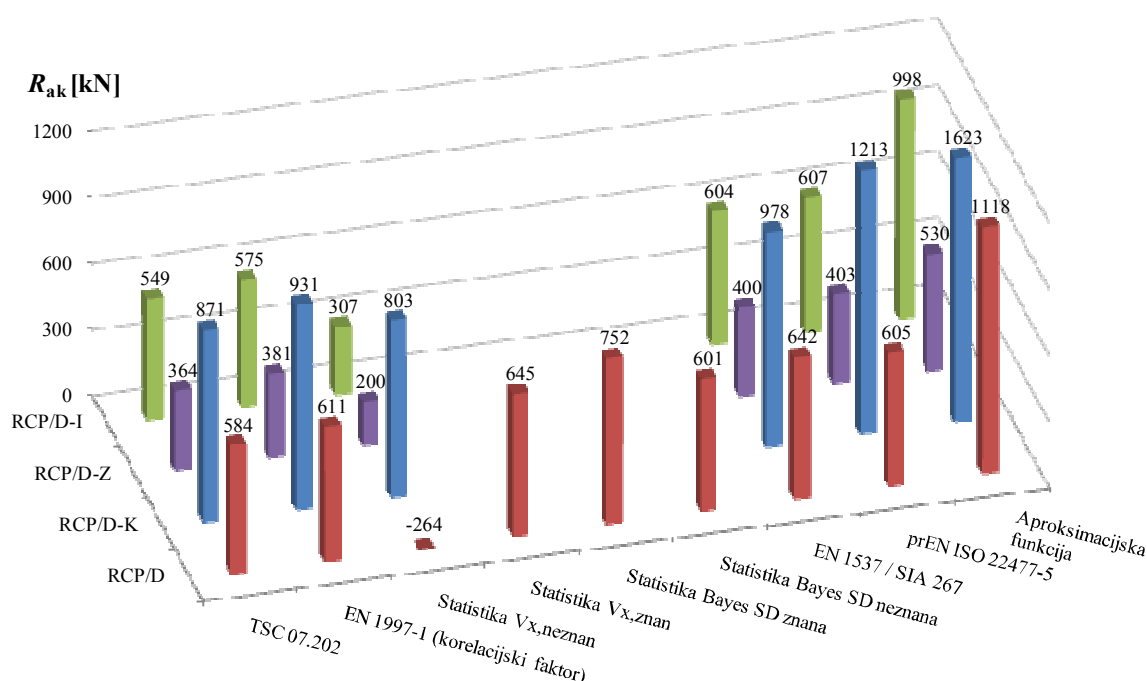
Figure 4.10: Comparison of external anchor resistance R_a obtained on field testing in 2008: (a) model functions obtained by considering of all points ($P_i, k_{int,i}$), (b) points obtained on the force levels P_1 and P_2 has not been considered at the determination of model functions.

Iz primerjave obeh diagramov na **sliki 4.10** lahko razberemo, da so razlike v vrednostih dobljenih odpornosti na izvlek R_a pri vseh uporabljenih metodah vrednotenja (IP, SIA, 10 in ISO), glede na to

ali pri določanju aproksimacijskih funkcij upoštevamo vse točke ($P_i, k_{int,i}$) ali pa ne upoštevamo točk na stopnjah sile P_1 in P_2 , v nasprotju s pričakovanji, minimalne. Pri referenčnih sidrih RCP/D razlike znašajo največ do +4 %, pri modificiranih sidrih RCP/D-K so do največ -3 %, pri sidrih RCP/D-Z so med -1 % in +1 %, medtem ko so pri sidrih RCP/D-I največje – med -3 % in +3%.

4.3.1.6 Primerjava rezultatov PS in VPN izvedenih leta 2008 ter vrednotenih po različnih predpisih in metodah

Za primerjavo rezultatov PS in VPN, izvedenih leta 2008 na testnem polju opornega zidu OZ-05, smo v diagram na [sliki 4.11](#) vnesli karakteristične odpornosti sider na izvlek R_{ak} , dobljene po različnih metodah. Na podlagi povprečnih odčitkov izvlečkov vseh pramen kabla sider smo po metodi inženirske presoje (metoda IP) določili intervalne mere lezenja k_{int} , s katerimi smo v predhodnih petih podpoglavjih po različnih metodah izvednotili karakteristične odpornosti sider na izvlek R_{ak} .



Slika 4.11: Primerjava karakterističnih odpornosti sider na izvlek R_{ak} , dobljenih iz rezultatov preskušanj sider na testnem polju leta 2008, izvednotenih po različnih metodah.

Figure 4.11: Comparison of the characteristic external anchors resistances R_{ak} calculated after different methods from testing results obtained on the testing field in 2008.

Na [sliki 4.11](#) smo v skupnem diagramu povzeli karakteristične odpornosti sider na izvlek R_{ak} , dobljene z:

- vrednotenjem po *TSC 07.202* ([preglednica 4.3](#)),
- vrednotenjem po standardu *EN 1997-1* ([preglednica 4.4](#)),
- vrednotenjem po statističnih metodah – metoda napovedi in Bayesova metoda (v obeh primerih pristopa z znano in neznano standardno deviacijo oz. koeficientom variacije) ([preglednica 4.5](#)),
- vrednotenjem po standardih *EN 1537* in *SIA 267* ([preglednica 4.6](#)),
- vrednotenjem na podlagi vrednosti sil kritičnega lezenja P_c po osnutku standarda *prEN ISO 22477-5* ([preglednica 4.7](#)),

- vrednotenjem na podlagi vseh točk ($P_i, k_{int,i}$) sider istega tipa dobljenih pri PS in VPN, na podlagi katerih so bile v poglavju 4.3.1.5 za različne metode obdelave rezultatov določene najustreznejše aproksimacijske funkcije (preglednica 4.8).

Na osnovi primerjave karakterističnih vrednosti odpornosti na izvlek R_{ak} , podanih na sliki 4.11, lahko ugotovimo naslednje:

- Očitno je, da od večine rezultatov navzgor odstopajo vrednosti dobljene na podlagi točk ($P_i, k_{int,i}$) vseh sider istega tipa, dobljenih pri PS in VPN, na osnovi katerih je bila za vsak tip sidra izvrednotena **najustreznejša aproksimacijska funkcija**. V primeru sider tipa RCP/D-K vrednost R_{ak} celo presega pretržno silo pramen, pri sidrih tipa RCP/D za skoraj 50 % presega drugo največjo vrednost R_{ak} , preseganje druge največje vrednosti pri sidrih tipa RCP/D-I znaša več kot 60 %, pri sidrih tipa RCP/D-Z pa okoli 30 %. Ocenjujemo, da pristop z vrednotenjem najustreznejše aproksimacijske funkcije na podlagi točk ($P_i, k_{int,i}$) ne daje zanesljivih rezultatov, saj pri tem pristopu vse točke obravnavamo kot povsem enakovredne, ne glede na doseženo stopnjo sile, s čimer se vpliv posameznih točk povsem izgubi, kar še posebej velja za primere, ko nekatera preskusna sidra odpovejo bistveno pred ostalimi preskusnimi sidri istega objekta.
- Vrednotenje rezultatov po **metodi osnutka standarda prEN ISO 22477-5** temelji na določitvi bilinearnega diagrama pri vsaki PS in VPN posebej. Ta pristop se izkazuje kot nezanesljiv v vseh primerih, ko iz točk ($P_i, k_{int,i}$) posameznega preskusa ni moč razbrati jasne ločnice, od katere sile naprej se je intervalna mera lezenja tako povečala, da je vezni del sidra pričel popuščati (torej na podlagi katerih točk lahko določimo drugo premico). Kot je razvidno iz slike 4.11, je bila pri sidrih tipa RCP/D-K dosežena zelo visoka vrednost v primerjavi z ostalimi tipi sider, kar je posledica dejstva, da kar pri treh sidrih druge premice, ki v presečišču s prvo premico določa silo kritičnega lezenja P_c , nismo mogli določiti, zato se tudi ta metoda izkazuje kot manj zanesljiva in jo za uporabo v praksi ne priporočamo.
- Na drugi strani zelo majhne vrednosti karakteristične odpornosti sider na izvlek R_{ak} zaradi velikih (konservativnih) vrednosti korelacijskega faktorja ξ in faktorja γ_m dobimo v primeru uporabe stare **metode TSC 07.202**, ki se v praksi več ne uporablja.
- Primerjava karakterističnih odpornosti sidra na izvlek R_{ak} določenih po statističnih metodah kaže pričakovano sliko: pri **statistični metodi napovedi za primer neznanega koeficienta variacije** ($V_{Ra,neznan}$) smo poskušali karakteristično vrednost R_{ak} oceniti izključno na podlagi treh oz. petih vrednosti R_a . To je s statističnega vidika izredno majhen vzorec, zato zaradi visoke vrednosti statističnega koeficienta k_n pri vseh tipih sider posledično dobimo zelo konservativne ocene odpornosti na izvlek R_{ak} , ki je v primeru sider RCP/D celo negativna, kar fizikalno gledano seveda ni smiselno. Pristop z vnaprej neznanjo vrednostjo koeficienta variacije $V_{Ra,neznan}$ daje precej nizke vrednosti karakterističnih odpornosti sider na izvlek, ki za prakso nimajo praktične uporabne vrednosti.
- Za sidra tipa RCP/D imamo na voljo številne predhodne rezultate PS, pridobljene v sklopu izvedbe NPIA, zato jih lahko uporabimo za določitev koeficienta variacije karakteristične odpornosti na izvlek: na podlagi primerljivih izkušenj PS, opravljenih v zadnjih 10 letih na 87 sidranih objektih (pričakovana vrednost 894 kN, standardna deviacija 168 kN), smo izvrednotili povprečni skupni koeficient variacije $V_{Ra,znan} = 0,12$, medtem ko smo 95. centil koeficientov variacije odpornosti na izvlek določili kot $V_{Ra,95} = 0,25$. Poznavanje raztrosa smo uporabili pri določanju karakteristične odpornosti na izvlek z uporabo **statistične metode napovedi za primer znanega koeficienta variacije** in **Bayesove metode z znano standardno deviacijo**, pri čemer dobimo nekoliko višje vrednosti R_{ak} ,

kot v primeru metod *EN 1997-1* z uporabo korelacijskega faktorja ξ , kot tudi *EN 1537* oz. *SIA 267*. Zaradi poznavanja raztrosa rezultatov so karakteristične vrednosti R_{ak} seveda višje kot v primerih, ko vrednost R_{ak} določamo le na podlagi nekaj posamičnih PS, opravljenih na posameznem sidranem objektu, s čimer izkoristimo ugoden vpliv statistično večjega vzorca in poznanega raztrosa rezultatov v preteklosti opravljenih PS na sidrih tipa RCP/D. Vendar pa je pri uporabi statističnih metod z znanim raztrosom rezultatov potrebna določena previdnost, saj je lahko raztros rezultatov zaradi različnih faktorjev, povezanih z mikrolokacijo, tlemi zaledja, samo operativno izvedbo preskusov, oblikovanjem sidra in tehnologijo vgradnje na konkretnem objektu, lahko večji, zaradi česar bi bila s statističnimi metodami določena vrednost R_{ak} lahko preveč optimistična. To še posebej velja v primerih, ko bi bil raztros odpornosti na izvlek, dobljenih na preskusnih sidrih posameznega sidranega objekta velik oz. bi prekoračil 95. centil historičnih vrednosti $V_{R_{a,95}} = 0,25$. V takih primerih je potrebna podrobna analiza dobljenih rezultatov PS, v sklopu katere se bo izkazala potreba po dodatnih PS oz. se bo izkazalo, da moramo posamezne rezultate utemeljeno zavreči in izvesti nadomestne PS.

- Presoja vrednosti R_{ak} sider RCP/D dobljenih po metodah ***EN 1997-1*** z uporabo korelacijskega faktorja ξ in ***EN 1537*** oz. ***SIA 267*** (upoštevanje najmanjše dosežene odpornosti na izvlek R_a kot karakteristične vrednosti R_{ak}) pokaže, da v obeh primerih dobimo precej podobne vrednosti, ki se po velikosti umeščajo med nizke vrednosti R_{ak} (metoda TSC 07.202 in statistične metode z nepoznavanjem raztrosa R_{ak} populacije) in visoke vrednosti statističnih metod z vnaprejšnjim poznavanjem raztrosa vrednosti R_{ak} . Po inženirski presoji se takšna umestitev vrednosti R_{ak} , dobljenih po metodah *EN 1997-1* in *EN 1537* oz. *SIA 267* zdi smiselna, kar potrjuje splošno primerčnost uporabe evropskih standardov pri analiziranju vrednosti rezultatov PS in določanju karakteristične vrednosti. Vrednosti dobljene po *SIA 267* oz. *EN 1537* so za približno 5 % višje od vrednosti, dobljenih po *EN 1997-1*, kar pripisujemo dejstvu, da ocena *SIA 267*, da za karakteristično vrednost privzamemo kar najnižjo vrednost R_a , doseženo na posameznem objektu, nima statistične podlage, saj je povsem možno, da bi na istem objektu pri naslednji PS dosegli še nižjo vrednost.

Po drugi strani so vrednosti R_{ak} pri sidrih RCP/D, dobljene po *EN 1997-1* (vrednotenje po enačbah (4.1) do (4.3) ob upoštevanju korelacijskih faktorjev $\xi_{povp} = 1,10$ oz. $\xi_{min} = 1,05$), do 22 % nižje glede na rezultate R_{ak} , ko smo vrednost koeficienta variacije izvrednotili na podlagi PS opravljenih v zadnjih 10 letih ($V_{R_{a,znan}} = 0,12$). Tak rezultat se nam zdi smiseln, saj je v primeru vrednotenja R_{ak} , s poznavanjem koeficienta $V_{R_{a,znan}}$ oz. standardne deviacije, v vrednotenje R_{ak} vključeno poznavanje dejanskega raztrosa velikega vzorca do sedaj izvedenih PS. Vrednosti R_{ak} , dobljene po *EN 1997-1*, *EN 1537* in *SIA 267* so pričakovano nižje od vrednosti, ki jih dobimo po statističnih metodah z znanim raztrosom rezultatov, torej jih v splošnem lahko upoštevamo kot rezultate na varni strani pri vseh tistih objektih, pri katerih so raztrosi odpornosti na izvlek R_a posameznih preskusnih sider veliki in zaradi tega ne moremo izkoristiti ugodnega vpliva znane standardne deviacije oz. koeficienta variacije v preteklosti opravljenih PS.

4.3.2 Določitev kriterijev za napenjanje sider objekta OZ-05

Iz najustreznejših aproksimacijskih funkcij podanih na [sliki 4.9](#) poglavja 4.3.1.5 lahko na ravni preskusne sile P_p direktno odčitamo vrednosti dopustne mere lezenja $k_{adm}(P_p)$, ki jih lahko pričakujemo pri izvedbi CPN in EPN sider objekta. Glede na to, da so se preskusi nosilnosti sider na objektu OZ-05 izvajali pri različnih preskusnih silah P_p v območju med 438 in 750 kN, v [preglednici 4.9](#) podajamo odčitane vrednosti merodajne aproksimacijske funkcije merodajnih mer lezenja pri vseh preskusnih silah $k_{adm}(P_p)$, ki so se pojavljale pri CPN in EPN na sidrih objekta OZ-05.

Preglednica 4.9: Vrednosti dopustnih mer lezenja na ravni preskusnih sil $k_{adm}(P_p)$, neposredno odčitane iz najustrežnejših aproksimacijskih funkcij sider tipa RCP/D.

Table 4.9: Allowable creep limit values at testing force levels $k_{adm}(P_p)$, directly readed from the best fitted model functions for anchor type RCP/D.

Metoda	$k_{adm}(438 \text{ kN})$	$k_{adm}(450 \text{ kN})$	$k_{adm}(500 \text{ kN})$	$k_{adm}(550 \text{ kN})$	$k_{adm}(570 \text{ kN})$	$k_{adm}(750 \text{ kN})$
IP	Merodajna aproksimacijska funkcija je polinom $y = a_1x + a_2x^2$					
	0,417	0,434	0,508	0,588	0,621	0,957
SIA	Merodajna aproksimacijska funkcija je polinom $y = a_1x + a_2x^2$					
	0,439	0,456	0,528	0,605	0,637	0,955
10	Merodajna aproksimacijska funkcija je polinom $y = a_1x + a_2x^2$					
	0,423	0,437	0,494	0,554	0,578	0,810
ISO	Merodajna aproksimacijska funkcija je polinom $y = a_1x + a_2x^2$					
	0,454	0,470	0,540	0,614	0,644	0,944

Iz **preglednice 4.9** lahko ugotovimo, da pri sidrih tipa RCP/D v primeru obdelave po vseh metodah (IP, SIA, 10 in ISO) najboljše ujemanje aproksimacijske funkcije dobimo z dvoparametričnim polinomom druge stopnje. Na ta način lahko medsebojno primerjamo vrednosti $k_{adm}(P_p)$ vseh metod (IP, SIA, 10 in ISO), ki v smislu medsebojnih razmerij med posameznimi tipi sider v glavnem sovpadajo z rezultati odpornosti na izvlek R_a .

Čeprav smo v prejšnjih poglavjih ugotovili, da z uporabo metode 10 dobimo največje izkazane odpornosti, s tem pa tudi najnižje merodane mere lezenja, pa so vrednosti dopustnih mer lezenja k_{adm} , iz iste aproksimacijske funkcije odčitane na istih ravneh preskusne sile P_p , le malenkost nižje od vrednosti $k_{adm}(P_p)$ iz aproksimacijskih funkcij ostalih metod (IP, SIA in ISO). Če kot osnovo za primerjavo vrednosti k_{adm} med posameznimi metodami vzamemo rezultate metode IP ($k_{adm,IP}$), lahko ugotovimo, da so vse vrednosti k_{adm} precej blizu skupaj:

- pri sili $P_p = 438 \text{ kN}$ so odstopanja k_{adm} ostalih metod med 1,4 do 8,9 % glede na $k_{adm,IP}$,
- pri sili $P_p = 450 \text{ kN}$ so odstopanja k_{adm} ostalih metod, glede na $k_{adm,IP}$, med 0,7 in 8,3 %,
- pri sili $P_p = 500 \text{ kN}$ so odstopanja k_{adm} ostalih metod, glede na $k_{adm,IP}$, med -2,8 in 6,3 %,
- pri sili $P_p = 550 \text{ kN}$ so odstopanja k_{adm} ostalih metod, glede na $k_{adm,IP}$, med -5,7 in 4,4 %,
- pri sili $P_p = 570 \text{ kN}$ so odstopanja k_{adm} ostalih metod, glede na $k_{adm,IP}$, med -6,9 in 3,7 % ter
- pri sili $P_p = 750 \text{ kN}$ so odstopanja k_{adm} ostalih metod, glede na $k_{adm,IP}$, med -15,4 in -0,2 %.

Če zanemarimo metodo 10, so odstopanja med vrednostmi $k_{adm}(P_p)$ ostalih metod za nekaj odstotkov tako majhna, da so praktično na ravni merilne negotovosti, ki je predvsem posledica omejene ločljivosti merilnega sistema in pogojev pri izvedbi preskusov.

4.3.3 Primerjava merodajnih mer lezenja po predlaganem postopku z dejansko doseženimi vrednostmi pri EPN in CPN sider opornega zidu OZ-05

Skladno s predpisi so bili na vseh sidrih, vgrajenih v objekt OZ-05, izvedeni preskusi nosilnosti: na manjšem delu sider (10 %) so bili najprej opravljeni tristopenjski celoviti preskusi napenjanja (CPN), nato pa so bili na preostalih sidrih objekta izvedeni enostopenjski enostavni preskusi napenjanja (EPN). Pri vseh preskusih napenjanja je izvajalec sidrskih del na ravni preskusne sile P_p odčital izvlečke

pramen sider. Na podlagi teh odčitkov smo najprej iz vrednotili mere lezenja k v vseh opazovanih časovnih intervalih, nato pa smo za sidra, katerih vezni deli med preskusi niso popustili in so ostala v funkciji kot sidra objekta, po metodi IP (glej [poglavje 3.5.4](#) in [poglavje C.4 dodatka](#)) določili mero-dajne mere lezenja k_{int} . Vrednosti k_{int} smo uredili po velikosti ter jih prikazali v diagramu kumulativne frekvence ([slika 4.12](#)):

- Na zgornjem diagramu prikazujemo podatke CPN in EPN za vsa sidra objekta, iz katerega je razvidno, da se vrednosti k_{int} lepo prilegajo krivulji normalne porazdelitve, iz vrednotene iz srednje vrednosti in standardne deviacije vseh uporabljenih vrednosti k_{int} CPN in EPN.
- Na spodnjem diagramu smo za ista sidra objekta pripravili ločen prikaz po preskusnih silah. V primerjavi z zgornjim diagramom je prileganje podatkov krivuljam normalne porazdelitve slabše, kar še posebej velja za preskuse opravljene pri preskusnih silah 438 kN, 500 kN in 750 kN. Kot je razvidno iz [preglednice 4.10](#) je bilo pri teh preskusnih silah opravljeno majhno število preskusov (le med 4 in 19), kar je bistveno manj kot pri ostalih preskusnih silah (število opravljenih preskusov med 110 in 514), različne pa so bile tudi dolžine veznega in prostega dela sider ter število pramen kabla sidra, kar v teh primerih pojasnjuje slabše ujemanje vrednosti k_{int} krivuljam normalne porazdelitve.

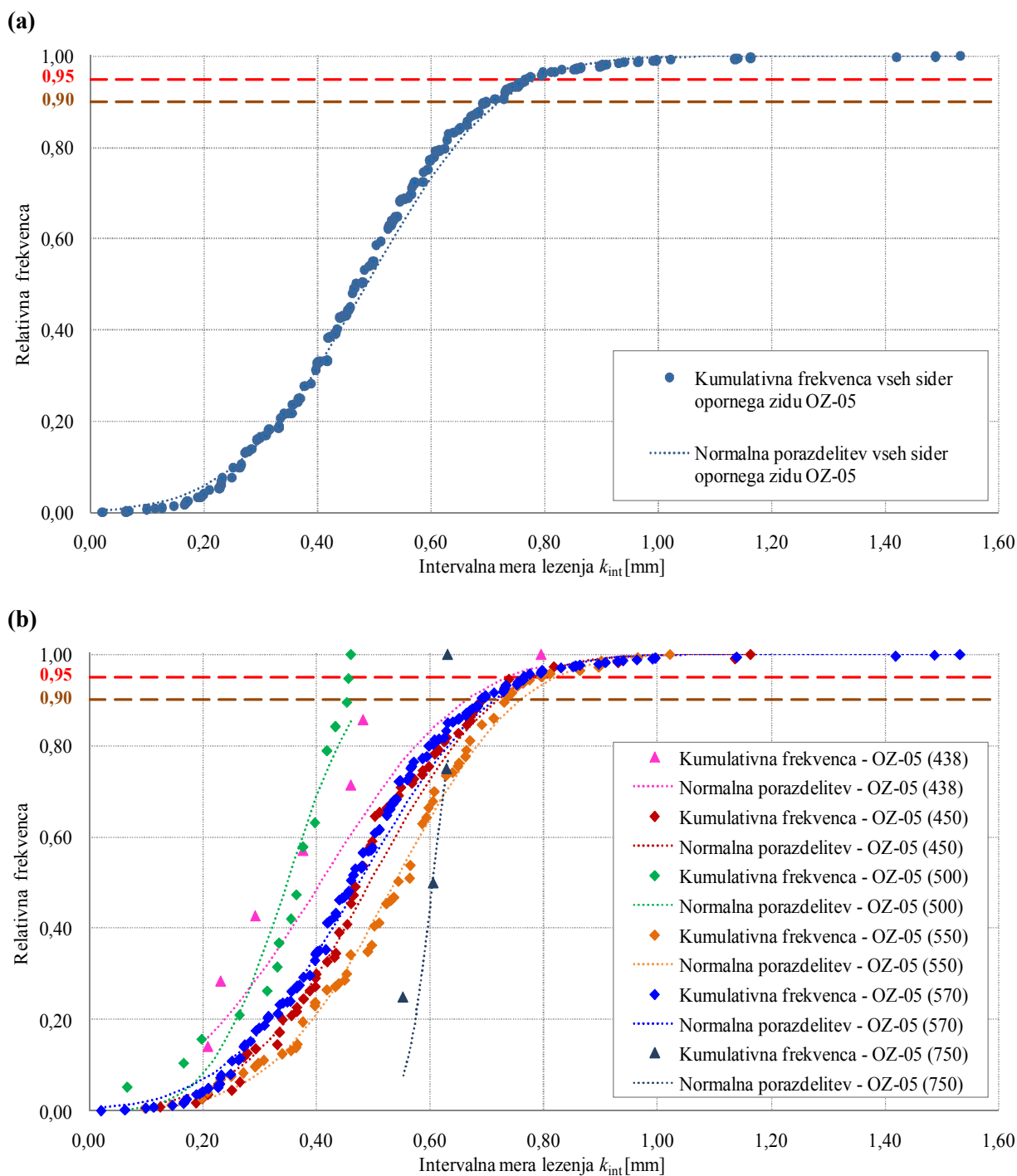
V nadaljevanju želimo preveriti, v kolikšni meri se vrednosti intervalnih mer lezenja k_{int} sider objekta ujemajo z vrednostmi dopustnih mer lezenja, kot jih lahko na ravni preskusnih sil P_p določimo iz rezultatov PS in VPN referenčnih sider RCP/D, opravljenih na opornem zidu OZ-05 ([slika 4.9 poglavja 4.3.1.5](#)).

V [preglednici 4.10](#) za sidra, vgrajena v oporni zid OZ-05, podajamo osnovne podatke o sidrih in dejansko doseženih k_{int} (določenih po metodi IP) na zadnji stopnji sile CPN in EPN. Iz podatkov sider objekta smo poiskali najmanjšo in največjo vrednost ($k_{\text{int,min}}$ oz. $k_{\text{int,max}}$) intervalne mere lezenja, srednjo vrednost \bar{k}_{int} in standardno deviacijo $S_{k_{\text{int}}}$, na podlagi katerih smo iz vrednotili tudi koeficient variacije $V_{k_{\text{int}}}$. Iz spodnjega diagrama na [sliki 4.12](#) smo z linearno interpolacijo iz dejanskih vrednosti k_{int} za vsako raven preskusne sile P_p določili 90. in 95. centil intervalne mere lezenja ($k_{\text{int},90}$ in $k_{\text{int},95}$).

V spodnjem delu [preglednice 4.10](#) za vsako metodo vrednotenja k_{int} pri PS in VPN (IP, SIA, 10 in ISO) podajamo iz diagramov na [sliki 4.9](#) odčitane vrednosti dopustnih mer lezenja, ki smo jih pri vseh preskusnih silah P_p odčitali dvakrat:

- iz **odsekoma ravne krivulje** povprečnih intervalnih mer lezenja k_{int} vseh opravljenih PS oz. VPN na objektu na mestu presečišča s preskusno silo $P_p - k_{\text{adm}}^{\text{OR}}(P_p)$ ter
- iz **najustreznejše aproksimacijske funkcije** vseh intervalnih mer lezenja vseh opravljenih PS oz. VPN na objektu na mestu presečišča s preskusno silo $P_p - k_{\text{adm}}^{\text{AF}}(P_p)$, zbrane v [preglednici 4.9](#).

V nadaljevanju smo za vsako dopustno vrednost $k_{\text{adm}}^{\text{OR}}(P_p)$ oz. $k_{\text{adm}}^{\text{AF}}(P_p)$ zapisali število sider objekta, pri katerih so dejansko dosežene vrednosti k_{int} , določene po metodi IP, presegle dopustno vrednost $k_{\text{adm}}^{\text{OR}}(P_p)$ oz. $k_{\text{adm}}^{\text{AF}}(P_p)$, pri čemer v [preglednici 4.10](#) za vsak primer najprej podajamo število takih sider, v oklepaju pa tudi delež glede na vsa sidra objekta istega tipa: za primer sedmih sider, preskušanih s silo $P_p = 438$ kN, pri katerih so bili rezultati PS in VPN iz vrednoteni po metodi IP (zeleno označeni polji), to pomeni, da je bil pri treh sidrih $k_{\text{int}} > k_{\text{adm}}$, kar pomeni 43 % sider, preskušanih pri tej sili.



Slika 4.12: Kumulativna frekvenca intervalnih mer lezenja pri CPN in EPN, opravljenih na sidrih opornega zidu OZ-05: (a) skupen prikaz za vsa sidra objekta, (b) prikaz sider objekta ločeno po preskusnih silah.

Figure 4.12: Cumulative frequency of interval creep displacement rates at CPN and EPN performed on the anchors of the retaining wall OZ-05: (a) joint presentation for all production anchors, (b) separated presentation after proof loads for production anchors.

Preglednica 4.10: Podatki o dejansko doseženih intervalnih merah lezenja k_{int} na zadnji stopnji sile CPN in EPN sider opornega zidu OZ-05, ter primerjava k_{int} z dopustnimi vrednostmi k_{adm} iz analiz PS.

Table 4.10: Data about interval creep displacement rates k_{int} actually obtained on the attained last load level at CPN and EPN of OZ-05 retaining wall anchors; comparison of k_{int} with admissible values k_{adm} obtained from analysis of investigation tests PS and VPN.

Preskusna sila	$P_p = 438$ kN	$P_p = 450$ kN	$P_p = 500$ kN	$P_p = 550$ kN	$P_p = 570$ kN	$P_p = 750$ kN	
Število sider	7	110	19	143	514	4	
Število pramen	3	3 / 4	4 / 5	4	5	6	
Sidrna vrsta objekta	S7	S1, S2, S3, S4	S8	S3, S4	S5, S6, SBv, SBz, SDs, S	S2	
Prosti del [m]	9, 12	13, 14, 15, 16 / 14	8 / 40	13, 19	8, 9, 13, 14, 19, 26, 28, 33	27	
Vezni del [m]	6	5	7	6	7	8	
$k_{int,min}$ [mm]	0,210	0,126	0,068	0,100	0,021	0,553	
$k_{int,max}$ [mm]	0,795	1,163	0,461	1,022	1,533	0,631	
\bar{k}_{int} [mm]	0,407	0,495	0,349	0,538	0,476	0,605	
$S_{k_{int}}$ [mm]	0,201	0,176	0,107	0,172	0,186	0,036	
$V_{k_{int}}$	0,493	0,355	0,306	0,322	0,391	0,060	
$k_{int,90}$ [mm]	0,58	0,69	0,46	0,73	0,69	0,63	
$k_{int,95}$ [mm]	0,69	0,76	0,46	0,79	0,77	0,63	
Metoda IP	$k_{adm,IP}^{OR}(P_p)$ [mm]	0,40	0,41	0,47	0,57	0,62	0,94
	Preseganje $k_{adm,IP}^{OR}$	3 (43 %)*	77 (70 %)	–	66 (46 %)	95 (18 %)	–
	$k_{adm,IP}^{AF}(P_p)$ [mm]	0,42	0,43	0,51	0,59	0,62	0,96
	Preseganje $k_{adm,IP}^{AF}$	3 (43 %)*	74 (67 %)	–	53 (37 %)	95 (18 %)	–
Metoda SIA	$k_{adm,SIA}^{OR}(P_p)$ [mm]	0,43	0,44	0,50	0,60	0,64	0,95
	Preseganje $k_{adm,SIA}^{OR}$	3 (43 %)	72 (65 %)	–	48 (34 %)	76 (15 %)	–
	$k_{adm,SIA}^{AF}(P_p)$ [mm]	0,44	0,46	0,53	0,61	0,64	0,96
	Preseganje $k_{adm,SIA}^{AF}$	3 (43 %)	65 (59 %)	–	43 (30 %)	76 (15 %)	–
Metoda I0	$k_{adm,I0}^{OR}(P_p)$ [mm]	0,39	0,40	0,45	0,51	0,53	0,90
	Preseganje $k_{adm,I0}^{OR}$	3 (43 %)	77 (70 %)	3 (16 %)	85 (59 %)	175 (34 %)	–
	$k_{adm,I0}^{AF}(P_p)$ [mm]	0,42	0,44	0,49	0,55	0,58	0,81
	Preseganje $k_{adm,I0}^{AF}$	3 (43 %)	72 (65 %)	–	71 (50 %)	121 (24 %)	–
Metoda ISO	$k_{adm,ISO}^{OR}(P_p)$ [mm]	0,43	0,45	0,50	0,58	0,62	0,94
	Preseganje $k_{adm,ISO}^{OR}$	3 (43 %)	67 (61 %)	–	66 (46 %)	95 (18 %)	–
	$k_{adm,ISO}^{AF}(P_p)$ [mm]	0,45	0,47	0,54	0,61	0,64	0,94
	Preseganje $k_{adm,ISO}^{AF}$	3 (43 %)	56 (51 %)	–	43 (30 %)	76 (15 %)	–

Opomba: *..... pri 3 sidrih, preskušanih pri $P_p = 438$ kN, je bil $k_{int} > k_{adm}$ (delež 43 % sider preskušanih pri tej sili).

Primerjava dejansko doseženih vrednosti intervalnih mer lezenja sider objekta z dopustnimi vrednostmi iz **preglednice 4.10** pokaže:

- Če najprej primerjamo vpliv načina določitve dopustne vrednosti – določitev iz odsekoma ravne krivulje povprečnih intervalnih mer lezenja $k_{adm}^{OR}(P_p)$, v primerjavi z določitvijo iz najustreznejše aproksimacijske funkcije vseh intervalnih mer lezenja $k_{adm}^{AF}(P_p)$, lahko ugotovimo, da so v veliko primerih, ne glede na metodo določanja k_{int} (IP, SIA, 10 in ISO), v obeh primerih odstopanja istega velikostnega reda: število sider, ki presega dopustno mero lezenja po pristopu "OR" se v teh primerih le za nekaj sider razlikuje od sider, ki presega dopustno mero lezenja po pristopu "AF", le v posameznih primerih je število takšnih sider večje – v teh primerih je opaznejše večje preseganje po pristopu "OR", saj v splošnem velja, da je $k_{adm}^{OR}(P_p) \leq k_{adm}^{AF}(P_p)$. Ob popustitvi preskusnih sider (t.j. ko začne popuščati njihov vezni del) mere lezenja običajno močno narastejo, kar z aproksimacijskimi funkcijami težko natančno zajamemo, zato v takih primerih dopustno mero lezenja k_{adm} bolj točno določimo iz odsekoma ravne krivulje povprečnih intervalnih mer lezenja.
- Pri sidrih z daljšo dolžino veznega dela ($l_v = 7$ oz. 8 m) in s pet do šest prameni v kablu sidra so pri preskusnih silah $P_p = 500$ oz. 750 kN pri vseh metodah določitve k_{int} (IP, SIA, 10 in ISO) vrednosti k_{int} vseh sider nižje od dopustnih vrednosti k_{adm} (izjema je le preseganje $k_{adm,10}^{OR}$ pri $P_p = 500$ kN).
- Pri sidrih s krajšo dolžino veznega dela ($l_v = 5$ oz. 6 m) in s tremi do štirimi prameni v kablu sidra, vgrajenih v zgornjih štirih vrstah (S1 do S4) in v dodatno izvedenem delu S7 skrajno desnega dela objekta, ki so bila preskušena pri preskusnih silah $P_p = 438$ in 450 kN, je pri 43 do 70 % sider prišlo do preseganja tako $k_{adm}^{OR}(P_p)$ kot tudi k_{adm}^{AF} . Obseg preseganja dopustnih mer lezenja pri sidrih z dolžino veznega dela $l_v = 6$ m s štirimi prameni v kablu sidra, vgrajenih v vrstah S3 in S4 ter preskušeni pri sili $P_p = 550$ kN, je manjši in se nahaja v območju med 30 in 59 %, medtem ko je preseganje pri sidrih z dolžino veznega dela $l_v = 7$ m in petimi prameni v kablu sidra, vgrajenih v vrstah S5, S6, SBv, SBz, SDs in S ter preskušeni pri sili $P_p = 570$ kN, še manjše (15 do 34 %).

Iz navedenega je razvidno, da se preseganje dopustnih mer lezenja k_{adm} pri vseh metodah (IP, SIA, 10 in ISO) pojavlja pri krajših veznih delih sider objekta z manjšim številom pramen v kablu sidra na določenih delih objekta, poleg tega obstaja možnost, da so sestava in karakteristike tal na teh območjih manj ugodne. Gre namreč za enega od večjih opornih zidov, izvedenih pri nas (dolžina objekta znaša 472 m, višina pa do 35 m), ki nalega na veliko področje tal in je sidran s trajnimi prednapetimi geotehničnimi sidri. Prav tako je bilo med izkopavanjem na levem delu objekta, kasneje pa tudi v spodnjem območju opornega zidu, opaziti pojav lokalnih zdrsov oz. nestabilnosti terena, za katere ne poznamo, do kolikšne globine tal zaledja je bil prisoten vpliv teh nestabilnosti (v kolikor bi segal v območje veznih delov sider, bi bile mere lezenja sider v tistem območju zagotovo višje).

Ne glede na izbrani centil vrednosti $k_{int,90}$ in $k_{int,95}$ lahko ugotovimo, da so v večini primerov (z izjemo dodatno vgrajenih 6-pramenskih sider vgrajenih v vrsti S2 in preskušeni na silo $P_p = 750$ kN) dopustne vrednosti k_{adm} presežene. Glede na specifične dejavnike, ki so se pojavljali med gradnjo sider (predvsem naraščanje sil v sidrih tekom gradnje objekta in pojavoma lokalne nestabilnosti tal na delu objekta) je pri opornem zidu OZ-05 težko natančneje pojasniti neposredni vpliv teh dejavnikov na prekoračitve dopustnih mer lezenja, zato bomo v naslednjem poglavju primerjavo dopustnih in dejansko doseženih vrednosti mer lezenja izvedli za nekaj vzorčnih primerov sidranih objektov, zgrajenih v sklopu izvedbe NPIA v Republiki Sloveniji.

4.3.4 Določitev kriterijev za napenjanje sider objekta s primerjavo merodajnih mer lezenja z dejansko doseženimi vrednostmi pri EPN in CPN sider tipa RCP/D izbranih sidranih objektov AC programa

Celotni postopek določitve kriterijev za napenjanje sider objekta, vključno s primerjavo merodajnih mer lezenja k z dejansko doseženimi vrednostmi pri EPN in CPN sider objektov, smo ponovili na vzorcu izbranih sidranih objektov, izvedenih v sklopu izgradnje NPIA. Sidrane objekte smo izbrali tako, da smo zajeli:

- različne pogoje temeljnih tal zaledja (kjer so vezni deli med PS popustili ali pa tudi ne),
- različne pristope pri PS (izvedenih bodisi na posebej izdelanih AB blokih bodisi v sklopu sidranega objekta),
- različne operative izvedbe preskušanj odpornosti sider (s spremljanjem in upoštevanjem vtiskanja glav sider pri vrednotenju k kot tudi brez spremljanja vtiskanja glav sider),
- poleg tega smo zajeli tudi različna obdobja izvajanja sider,
- sidra z različnim številom pramen v kablju sidra in
- sidra vgrajena pod različnimi koti (od 5° do 25°),

vendar pa smo zaradi boljše primerjave vse objekte izbrali tako, da vezni deli vseh sider znašajo 7 m.

Povzetek osnovnih podatkov o preskusnih sidrih RCP/D in njihovi vgradnji za vse štiri obravnavane objekte so podani v [preglednici 4.11](#). Najpomembnejše značilnosti obravnavanih objektov so:

- **objekt A** – sidrana brežina na AC Kozina – Klanec je primer enega od prvih objektov NPIA, sidranih s sidri RCP/D, kjer so se PS izvajale po *SIA V 191*. S sidranim objektom je zagotovljeno varovanje brežine med traso AC in železniško progo Kozina – Prešnica, ki je bilo izvedeno z medsebojno nepovezanimi AB slopi, sidranimi s skupno 40 sidri tipa RCP/D, pri čemer sta bili le na dveh sidrih (namesto na treh kot zahteva *SIA V 191*) izvedeni PS do porušitve. Osnovni podatki o sidranju tega objekta, ki po številu vgrajenih sider spada med manjše objekte, so naslednji:
 - Obe preskusni sidri sta bili izvedeni v sklopu sidranega objekta, nahajali sta se povsem na zgornjem robu slopov objekta, pri čemer sta bila njuna vezna dela vgrajena v kompakten oz. mestoma razpokan / kompakten plastovit apnenec, pri obeh je bila zabeležena povečana količina vgrajene cementne injekcijske mase, kar kaže na porabo mase za zapolnjevanje razpok ob vrtni.
 - Med izvedbo PS izvajalec ni vedno dosledno upošteval predpisanega postopka (zaključek opazovanja lezenja sidra šele potem, ko se mere lezenja k sidra umirijo oz. začno padati), pač pa je v prvih treh fazah PS, takoj po preteku predpisanega minimalnega opazovalnega časa t_{\min} , preskusno sidro razbremenil in prešel na naslednjo stopnjo sile. Med PS se pri nobenem sidru niso pokazali znaki popuščenja veznega dela sidra oz. ni bila dosežena k_{krit} , dosežene mere lezenja k so bile zelo nizke, zato je bila odpornost sidra na izvlek R_a ocenjena kot vrednost preskusne sile P_{pv} , povečana za 10 %. V elaboratu napenjanja za sidra objekta je projektant na podlagi rezultatov PS določil silo zaklinjenja $P_0 = 450$ kN, preskusno silo za CPN in EPN $P_p = 600$ kN, mere lezenja k sider objekta pa morajo biti manjše od priporočene vrednosti 0,4 mm (zgornjo mejo je postavil kot 0,9 mm).
- **objekt B** – oporni zid OZ-13 v območju od km 86+011,73 do km 86+249,57 na AC Vransko – Blagovica zagotavlja varovanje brežin vkopa nad traso AC. Objekt je izveden kot AB branasta konstrukcija sidrana s 171 sidri RCP/D, s čimer je ta objekt, glede na število vgrajenih sider RCP/D, največji od vzorčnih sidranih objektov. Dodatno so bile v območju objekta izvedene še tri PS do

porušitve, čeprav bi bilo treba skladno s predpisi glede na velikost objekta izvesti vsaj štiri PS. Ostali pomembni podatki o sidranju objekta so naslednji:

- Vse tri PS niso bile izvedene v sidranem objektu, pač pa na posebej izdelanih manjših AB blokih v neposredni bližini objekta. Vezni deli preskusnih sider so bili vgrajeni v meljevec oz. preperel meljevec s prehodi v drobnozrnati kremenov peščenjak, ki je bil v območju enega preskusnega sidra tudi delno tektonsko pretrt, pri dveh sidrih je bil med vrtnanjem v spodnjem območju prostega dela sidra zabeležen manjši dotok vode.
- Tudi na tem objektu izvajalec med izvedbo PS ni dosledno upošteval predpisanega postopka (zaključek opazovanja lezenja sidra šele potem, ko se mere lezenja k sidra umirijo oz. začno padati), v primeru dveh PS celo na višjih stopnjah sile, pač pa je takoj po preteku predpisanega t_{\min} preskusno sidro razbremenil in prešel na naslednjo stopnjo sile. Med PS sidro TS-2 ni izkazovalo znakov popuščenja veznega dela sidra (k_{krit} ni bila dosežena), zaradi nizkih doseženih mer lezenja k je bila odpornost sidra na izvlek R_a ocenjena kot vrednost preskusne sile P_{pv} , povečana za 10 %. Pri preostalih dveh preskusnih sidrih so na ravni preskusne sile P_{pv} približno enakomerno popustila vsa pramena sidra (t.j. dosežene vrednosti k vseh pramen so bile zelo podobne), vrednost k_{krit} pa je bila presežena. V elaboratu napenjanja za sidra objekta je projektant na podlagi rezultatov PS določil sili zaklinjenja P_0 (450 in 500 kN), preskusni sili za CPN in EPN P_p (562 in 625 kN) ter dopustni meri lezenja k_{adm} (1,1 in 1,2 mm).
- **objekt C** – podporni zid PZ-23 v območju od km 86,1+17,823 do km 86,2+60,481, na prehodu trase AC Trojane – Blagovica iz nasipa na most 5-10, zagotavlja varovanje brežin. Objekt je izveden kot pilotna stena, ki je vzdolž povezovalne grede nad piloti v eni vrsti sidrana s 70 sidri RCP/D, pri čemer so bile na treh sidrih izvedene PS do porušitve. Za potrebe naše primerjave so pomembne naslednje značilnosti sidranja tega objekta:
 - Po številu vgrajenih sider podporni zid spada med srednje velike sidrane objekte, pri čemer je bil med vrtnanjem vrtin za sidra v tleh zaledja prisoten dotok vode. Vezni deli preskusnih sider so bili vgrajeni v meljevec z glinovcem ter drobnozrnatim kremenovim peščenjakom z vložki meljevca in podrejenega glinovca, pri vseh treh sidrih je bil med vrtnanjem v prostem in veznem delu (izjema sidro TS-2 brez vode v veznem delu) zabeležen manjši in srednji dotok vode, v veznem delu sidra TS-1 celo zelo močan dotok vode.
 - Med PS se meritve pomikov glav sider niso izvajale, saj so se PS izvedle na že dokončno izvedeni pilotni steni z vezno gredo, zato je bilo vtiskanje glav sider minimalno in ni bilo pričakovati vpliva na mere lezenja k .
 - Podobno kot pri predhodnjih objektih izvajalec sidrskih del med izvedbo PS ni vedno dosledno upošteval predpisanega postopka v smislu dovolj dolgega opazovanja na posamezni stopnji sile v prvi fazi (TS-2 in TS-3), drugi in četrti fazi (TS-3) ter peti fazi (TS-1), pač pa je takoj po preteku predpisanega t_{\min} preskusno sidro razbremenil in prešel na naslednjo stopnjo sile. Pri vseh treh preskusnih sidrih je bila vrednost k_{krit} presežena še predno je bila dosežena preskusna sila P_{pv} . Za preskusna sidra tega objekta je značilno, da niso popustila vsa pramena sidra hkrati in v isti meri, pač pa so mere lezenja k treh do štirih pramen presegle k_{krit} , medtem ko so bili k ostalih pramen nižji. Zanimivo je, da sidro z največjim dotokom vode v veznem delu (TS-1) ni imelo najmanjše dosežene odpornosti na izvlek, je pa bila pri tem sidru zabeležena precej povečana količina vgrajene cementne injekcijske mase, kar kaže na to, da je izvajalec korektno zainjektiral votli prostor med sidrom in steno vrtine v veznem delu sidra. V elaboratu napenjanja za sidra objekta je projektant na podlagi rezultatov PS določil silo zaklinjenja $P_0 = 450$ kN, preskusno silo za CPN in EPN $P_p = 563$ kN in dopustno mero lezenja $k_{\text{adm}} = 0,8$ mm.

Preglednica 4.11: Osnovni podatki o preskusnih sidrih RCP/D in njihovi vgradnji.
Table 4.11: Basic data about testing anchors RCP/D and theirs installation.

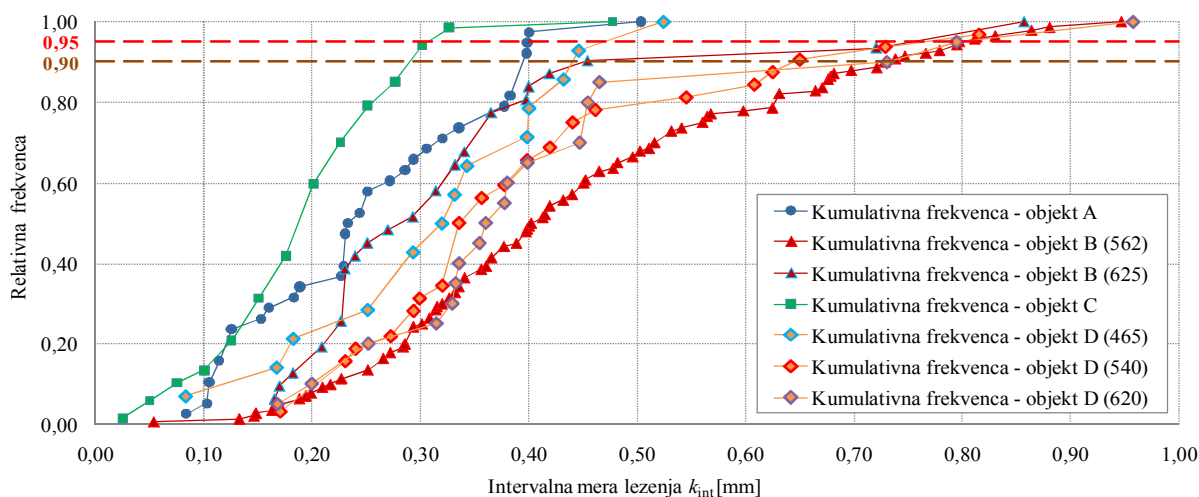
Objekt	Oznaka sidra	Število pramen*	l_{fr} [m]	l_v [m]	Popis sestave vrtine v veznem delu sidra globina [m] opis tal	Globina pojava vode [m]	β [°]	\varnothing_{vrtine} [mm]	Vgrajen cement [kg]
Objekt A	S-1	4	11,6	7	10-14 apnenec, trden, kompakten 13-14 apnenec, razpokan 14-18,6 apnenec, kompakten, plastovit	-	18	131	3100
	S-39	4	11,6	7	11-18,6 apnenec, kompakten, plastovit	-	18	131	1500
Objekt B	TS-1	5	15	7	15,2-22 meljevec s prehodi v dz. Q peščenjak, siv, trden	14,4 manjši dotok	25	146	600
	TS-2	5	15	7	14,8-22 meljevec s prehodi v dz. Q pešč., siv, delno tekt. pretrt do 14,8 m	13,6 manjši dotok	25	146	600
	TS-3	5	15	7	6,9-16,2 preperel meljevec s prehodi v dz. Q peščenjak, sivorjav 16,2-22 meljevec s prehodi v glinovec, siv, trden	-	25	146	600
Objekt C	TS-1	6	20	7	13,2-27 dz. Q peščenjak z vložki meljevca in podrejenega glinovca, lokalno in delno preperel, delno pretrt, siv in sivorjav	23,5 zelo močan dotok	25	146	2500
	TS-2	6	20	7	2,2-23,1 meljevec z vložki dz. Q peščenjaka, delno pretrt med 12,2 do 18,1 m, siv 23,1-27 meljevec z glinovcem, siv, delno tektonsko pretrt	12,2 manjši dotok 19,1 srednji dotok	25	146	950
	TS-3	6	20	7	19,2-23,6 meljevec z glinovcem, siv 23,6-27 dz. Q peščenjak z vložki meljevca in podrejenega glinovca, siv	21,5 in 26,1 srednji dotok	25	146	1050
Objekt D	TS-1	5	15	7	10,8-22 meljevec in glinovec z vložki dz. Q pešč., delno pretrt do 17,9 m, siv, lokalno sivorjav (limonitiziran)	17,4 srednji dotok 21,5 močan dotok	5	143	750
	TS-2	5	15	7	10,1-22 meljevec in glinovec s posam. vložki dz. Q pešč., pretežno siv, do 13,6 m sivorjav (limonitiziran)	17,1 srednji dotok	5	143	900
	TS-3	5	15	7	15,2-22 meljevec in glinovec z vložki Q pešč., siv, lokalno limonitiziran, delno pretrt do 16,1 m, mestoma razpokan	16,1 zelo močan dotok	5	143	1300

Opombi: *..... podatki o pramenu: $A_{1,p} = 140 \text{ mm}^2$, $f_{p0,1k}/f_{pk} = 1670/1860 \text{ MPa}$, $E_p = 195 \text{ GPa}$, dz. Q peščenjak drobnozrnat kremenov peščenjak.

- **objekt D** predstavlja sidrana stena severnega portala predora Šentvid na AC Šentvid – Koseze, ki v območju obvoza Celovške ceste zagotavlja varovanje strmega pobočja Šentviškega hriba. Objekt je bil izveden kot oporni zid v treh kampadah, sestavljen iz montažnih AB plošč, ki so bile sidrane s 67 sidri RCP/D, od katerih je eno sidro pri EPN popustilo. Dodatno so bile v objektu izvedene še tri PS do porušitve. Za našo primerjavo so pomembni naslednji podatki o sidranju tega objekta:
 - Po številu vgrajenih sider spada med srednje velike sidrane objekte, pri čemer so bila sidra v objekt vgrajena pod minimalnim kotom 5° . V tleh zaledja je bil med vrtnjem vrtin za vsa tri preskusna sidra prisoten srednji, lokalno celo zelo močan dotok vode (sidro TS-3). Vezni deli

- preskusnih sider so bili vgrajeni v meljevec in glinovec s posamičnimi vložki drobnozrnatega kremenovega peščenjaka, ki je bil tudi delno pretrt in mestoma razpokan.
- PS so bile izvedene direktno v sidrani steni iz skupaj zalitih in povezanih prefabriciranih AB plošč. V času preskušanj je bila izgrajena že cela etaža sidrane stene. Pri PS je izvajalec meril vtiskanja glav preskusnih sider, pri čemer v nobenem časovnem intervalu ni izvedel negativnih prirastkov izvlečkov.
 - Med izvedbo PS izvajalec le v prvi fazi PS TS-1 in TS-3 ni dosledno upošteval predpisanega postopka v smislu dovolj dolgega opazovanja na posamezni stopnji sile, pač pa je takoj po preteku predpisanega t_{\min} preskusni sidri razbremenil in prešel na naslednjo stopnjo sile. Vezni del sidra TS-1 je na ravni preskusne sile P_{pv} popustil v 15', tako da je bila PS predčasno zaključena, pri čemer so hkrati popustili vezni deli vseh pramen (pri vseh so bile dosežene podobne vrednosti k). Vezna dela preostalih dveh preskusnih sider tudi na ravni sile P_{pv} nista popustila, čeprav so bile dosežene vrednosti k že visoke, a še vedno nižje od k_{krit} . Tudi v primeru tega objekta sidro z največjim dotokom vode v veznem delu (TS-3) ni imelo najnižje dosežene odpornosti na izvek R_a , je pa bila pri tem sidru zabeležena nekoliko povečana količina vgrajene cementne injekcijske mase glede na ostali dve preskusni sidri, ki je bila po EN 1537 še vedno znotraj normalne pričakovane porabe. Projektant je v elaboratu napenjanja za sidra objekta na podlagi rezultatov PS določil sile zaklinjenja P_0 po etažah (zgoraj 370 kN, v sredini 430 kN in spodaj 493 kN), preskusne sile P_p za CPN in EPN 465 kN, 540 kN in 620 kN ter dopustne mere lezenja k_{adm} 1,0 mm, 1,1 mm in 1,2 mm.

V diagramu kumulativne frekvence na [sliki 4.13](#) so zbrani vsi rezultati preskusov nosilnosti – CPN in EPN – sider objektov A, B, C in D: za intervalne mere lezenja k_{int} , dobljene po metodi IP, smo za vsako raven preskusne sile P_p posameznega sidranega objekta, na podlagi po velikosti razvrščenih vrednosti intervalnih mer lezenja k_{int} izračunali frekvence, ki smo jih kumulativno seštevali. V diagram smo vrisali tudi 95. in 90. centil, torej tisto mejo, pod katero se nahaja 95 % oz. 90 % vseh intervalnih mer lezenja k_{int} sider objekta, za preostalih (zgornjih) 5 % oz. 10 % sider pa smo predpostavili, da so mere lezenja povečane zaradi kombinacije odstopanj pri vgradnji sider, pogojev pri izvedbi preskušanj in merilne negotovosti izvajanja meritev.



Slika 4.13: Kumulativna frekvenca intervalnih mer lezenja pri CPN in EPN opravljenih na sidrih objektov A, B, C in D.

Figure 4.13: Cumulative frequency of interval creep displacement rates at CPN and EPN performed on the anchors of structures A, B, C and D.

V preglednici 4.12 podajamo osnovne podatke o intervalnih merah lezenja sider objektov A, B, C in D: število sider objekta, najmanjšo ($k_{int,min}$) in največjo ($k_{int,max}$) doseženo vrednost intervalne mere lezenja, povprečno vrednost (\bar{k}_{int}), standardno deviacijo ($S_{k_{int}}$) ter koeficient variacije ($V_{k_{int}}$). Za sidra vseh objektov smo iz odsekom ravni krivulj diagrama kumulativnih frekvenc na sliki 4.13 iz vrednotili 90. in 95. centil intervalnih mer lezenja, ki smo jih v preglednico vnesli kot $k_{int,90}$ in $k_{int,95}$.

Preglednica 4.12: Primerjava doseženih intervalnih mer lezenja k_{int} z dopustnimi vrednostmi mer lezenja projektantov $k_{adm,proj}$ in z vrednostmi iz analiz PS po metodah IP, SIA in ISO.

Table 4.12: Comparison between interval creep displacement rates k_{int} with admissible design creep displacement rates $k_{adm,proj}$ as well as with values, obtained from analysis of investigation tests after IP, SIA and ISO method.

		Objekt A	Objekt B		Objekt C	Objekt D		
Število sider		38	140	31	67	14	32	20
P_p [kN]		600	562	625	563	465	540	620
Sidra objekta	Število sider	38	140	31	67	14	32	20
	Število pramen	4	4		5	5		
	$k_{int,min}$ [mm]	0,084	0,054	0,166	0,025	0,084	0,170	0,168
	$k_{int,max}$ [mm]	0,503	0,947	0,856	0,477	0,524	0,815	0,958
	\bar{k}_{int} [mm]	0,254	0,446	0,335	0,200	0,319	0,391	0,418
	$S_{k_{int}}$ [mm]	0,112	0,193	0,178	0,082	0,120	0,154	0,198
	$V_{k_{int}}$	0,44	0,43	0,53	0,41	0,38	0,39	0,47
	$k_{int,90}$ [mm]	0,39	0,73	0,45	0,29	0,44	0,64	0,73
	$k_{int,95}$ [mm]	0,40	0,80	0,75	0,31	0,47	0,76	0,80
Projekt	$k_{adm,proj}$ [mm]	0,40	1,10	1,20	0,80	1,00	1,10	1,20
	Preseganje $k_{adm,proj}$	1 (3 %)	–	–	–	–	–	1 (5 %)
Metoda IP	$k_{adm,IP}^{OR}(P_p)$ [mm]	0,20	0,57	0,51	0,48	0,52	0,61	0,71
	Preseganje $k_{adm,IP}^{OR}$	25 (66 %)	32 (23 %)	3 (10 %)	–	1 (7 %)	4 (13 %)	4 (19 %)
	$k_{adm,IP}^{AF}$ [mm]	0,25	0,42	0,58	0,31	0,30	0,47	0,71
	Preseganje $k_{adm,IP}^{AF}$	16 (42 %)	64 (46 %)	3 (10 %)	4 (6 %)	8 (57 %)	6 (19 %)	4 (19 %)
Metoda SIA	$k_{adm,SIA}^{OR}(P_p)$ [mm]	0,20	0,56	0,47	0,46	0,36	0,44	0,61
	Preseganje $k_{adm,SIA}^{OR}$	25 (66 %)	37 (26 %)	3 (10 %)	1 (2 %)	5 (36 %)	9 (28 %)	4 (19 %)
	$k_{adm,SIA}^{AF}$ [mm]	0,21	0,36	0,49	0,29	0,27	0,43	0,65
	Preseganje $k_{adm,SIA}^{AF}$	25 (66 %)	89 (64 %)	3 (10 %)	10 (15 %)	10 (71 %)	9 (28 %)	4 (19 %)
Metoda ISO	$k_{adm,ISO}^{OR}(P_p)$ [mm]	0,20	0,56	0,43	0,46	0,52	0,61	0,71
	Preseganje $k_{adm,ISO}^{OR}$	25 (66 %)	37 (26 %)	4 (13 %)	1 (2 %)	1 (7 %)	4 (13 %)	4 (19 %)
	$k_{adm,ISO}^{AF}$ [mm]	0,22	0,34	0,47	0,28	0,40	0,54	0,71
	Preseganje $k_{adm,ISO}^{AF}$	25 (66 %)	89 (64 %)	3 (10 %)	10 (15 %)	4 (29 %)	6 (19 %)	4 (19 %)

Opombi: OR vrednost mere lezenja **odsekom ravne krivulje** povprečnih intervalnih mer lezenja k_{int} vseh opravljenih PS na objektu na mestu presečišča s preskusno silo P_p ,
 AF vrednost mere lezenja najustreznejše **aproksimacijske funkcije** vseh intervalnih mer lezenja vseh opravljenih PS na objektu na mestu presečišča s preskusno silo P_p .

V **preglednici 4.12** se nahajajo tudi vrednosti dopustnih mer lezenja, kot jih je podal projektant ($k_{adm,proj}$), pri čemer lahko ugotovimo, da so bile vse vrednosti intervalnih mer lezenja k_{int} sider objektov nižje od $k_{adm,proj}$, izjema je le po eno sidro objektov A (2,6 % sider tega objekta) in D (1,5 % sider tega objekta). V preglednici smo prav tako zbrali dopustne mere lezenja za vrednosti k_{int} določene po metodah IP, SIA in ISO (metodo 10 smo izpustili, saj se je v **poglavju 3.5.4** zaradi preocenjenih odpornosti na izvlek izkazala kot manj primerna za uporabo v praksi). Za vsako metodo smo vedno iz vrednotili po dve vrednosti:

- k_{adm}^{OR} – vrednost mere lezenja **odsekoma ravne krivulje** povprečnih intervalnih mer lezenja vseh opravljenih PS na objektu na mestu presečišča s preskusno silo P_p ,
- k_{adm}^{AF} – vrednost mere lezenja **najustreznejše aproksimacijske funkcije** vseh intervalnih mer lezenja vseh PS, opravljenih na posameznem objektu, na mestu presečišča s preskusno silo P_p .

Najprej primerjajmo vrednosti k_{adm}^{OR} z vrednostmi sider objekta $k_{int,95}$: morda nekoliko presenetljivo lahko ugotovimo, da so, v večini primerov, dejansko dosežene vrednosti $k_{int,95}$ pri vseh metodah obdelave večje od k_{adm}^{OR} . Primerjalna analiza protokolov PS, CPN in EPN je pokazala, da lahko tak rezultat pripišemo načinu izvedbe preskusov in odčitovanja meritev kot tudi vrednotenja izmerjenih vrednosti. Izkaže se, da so vrednosti $k_{int,95}$ vedno manjše od k_{adm}^{OR} pri vseh metodah (torej pri IP, SIA in ISO) le pri objektu C, izvedenem kot pilotna stena, v kateri so vzdolž povezovalne AB grede nad piloti vgrajena 5-pramenska sidra RCP/D. V primeru tega objekta so zaradi v pilote vpete AB grede premiki sidranega objekta med izvajanjem preskusov zanemarljivo majhni, zaradi česar tudi ni premikov (vtiskanja) glav sider, zato se odčitane vrednosti izvlečkov pramen neposredno nanašajo le na obnašanje veznih delov vgrajenih sider.

Primerjava k_{adm}^{OR} z vrednostmi sider objekta $k_{int,90}$ je pričakovano ugodnejša, saj v tem primeru dopuščamo, da 10 % vrednosti k_{int} presega vrednost $k_{int,90}$, vendar pa je tudi v tem primeru 90 % vrednosti k_{int} manjših od dopustne vrednosti k_{adm}^{OR} le pri objektu C, le deloma pa tudi pri objektih B in D.

Pri objektu A so bila sidra vgrajena na obeh krajih AB slopov. Izvajalec vtiskanja glav sider med PS ni spremljal, saj je obe PS izvajal s pomožnega odra na zgornjem robu slopov, zato stojala za meritev vtiskanja glav sider ni mogel postaviti na nepomično podlago. Pri CPN in EPN sider objekta je izvajalec vtiskanje glav sider spremljal optično z nivelirjem iz daljave, vendar pa je bila zaradi uporabe takšne metode ločljivost odčitkov zelo groba (le približna ocena na 0,1 mm), torej je bila merilna negotovost pomikov glav najmanj za en razred slabša od merilne negotovosti izmerjenih izvlečkov pramen, kar se izkazuje tudi v manjši zanesljivosti iz vrednotenih mer lezenja. Na drugi strani je izvajalec med PS, izvedenimi na objektu B, sprotno odčitoval in vrednotil vtiskanja glav sider, ki so bile vgrajene na manjše AB bloke. Zaradi majhne naležne površine blokov na tla zaledja so se bloki opazno vtiskovali v tla zaledja. Med PS je izvajalec spremljal pomike bloka v smeri osi sidra, vendar pa ni bila zagotovljena zadostna točnost meritev, saj so bili pri vseh preskusnih sidrih v posameznih časovnih intervalih iz vrednoteni tudi negativni prirastki izvlečkov, ki so posledica večjih odčitanih pomikov glave sidra v primerjavi z odčitanimi izvlečki pramen. Med CPN in EPN na sidrih objekta na branasti konstrukciji izvajalec vtiskanja glav sider ni spremljal. Posledično se je delež izvlečkov pramen, ki je izhajal iz vtiskanja glav sider brez korekcije upošteval pri vrednotenju mer lezenja, ki so bile zato višje kot bi bile, če bi odšteval vtiskanja glav sider, zato tudi ni tako presenetljiv rezultat, da sta vrednosti $k_{int,95}$ višji od dopustnih (k_{adm}^{OR}). Tudi pri objektu D je izvajalec med PS spremljal vtiskanja glav sider in jih je upošteval tudi pri vrednotenju mer lezenja. Med izvedbo sidranega objekta izvajalec zaradi razmer na gradbišču meritev vtiskanja glav sider ni izvajal, zato je tudi v primeru tega objekta med CPN in

EPN sider očitno prihajalo do določenih vtiskanj glav sider, ki so vračunani v $k_{\text{int},95}$ oz. $k_{\text{int},90}$ in zaradi tega presegajo dopustne $k_{\text{adm}}^{\text{OR}}$.

Pri presoji izpolnjevanja kriterija mere lezenja $k_{\text{adm}}^{\text{OR}}$ je očitno ključnega pomena upoštevanje vtiskanja glav sider pri vrednotenju mer lezenja kot tudi enak pristop pri izvedbi sidranja, meritev in vrednotenja rezultatov tako pri PS kot tudi pri CPN in EPN, saj so le v tem primeru vrednosti $k_{\text{int},90}$ oz. $k_{\text{int},95}$ in $k_{\text{adm}}^{\text{OR}}$ neposredno primerljive. Po drugi strani pa moramo poudariti, da varnost sidranih konstrukcij zaradi preseganja mer lezenja ($k_{\text{int},95}$ oz. $k_{\text{int},90} > k_{\text{adm}}^{\text{OR}}$) ni ogrožena, saj je bil pristop pri izvedbi CPN in EPN takšen, da se je preskus nosilnosti vedno zaključil šele potem, ko se je mera lezenja na ravni preskusne sile umirila. Neupoštevanje vtiskanja glav sider pri vrednotenju mer lezenja sidra daje rezultate na "varni strani", saj so zaradi vtiskanja glav sider proti zaledju izvlečki pramen večji in se neposredno vračunajo v mere lezenja, zato so dejanske mere lezenja veznega dela sidra seveda manjše. Posledično v teh primerih zaradi nekonsistentnosti rezultatov ni možno zagotoviti, da bo pri 95 % oz. 90 % sider merodajna mera lezenja k_{int} manjša oz. kvečjemu enaka dopustni meri $k_{\text{adm}}^{\text{OR}}$.

VARIANTNO smo poskusili dopustne vrednosti mer lezenja določiti ne iz povprečenja vrednosti $k_{\text{int},i}$ vseh PS, opravljenih pri sili P_i na enem objektu, pač pa iz vseh točk ($P_i, k_{\text{int},i}$), dobljenih pri vseh PS enega objekta, za katere smo poiskali najustreznejšo aproksimacijsko funkcijo, pri čemer smo na mestu presečišča te funkcije s preskusno silo P_p odčitali vrednost $k_{\text{adm}}^{\text{AF}}$. Pri vrednotenju aproksimacijskih funkcij je prisoten vpliv raztrosa vrednosti $k_{\text{int},i}$, kar se odraža tudi v spremenljivosti vrednosti $k_{\text{adm}}^{\text{AF}}$ v primerjavi z vrednostmi $k_{\text{adm}}^{\text{OR}}$. Kot je razvidno iz **preglednice 4.12** so raztrosi precejšnji, saj se vrednosti $k_{\text{adm}}^{\text{AF}}$ nahajajo v območju med 58 % in 125 % $k_{\text{adm}}^{\text{OR}}$.

Obstaja tudi možnost, da bi vrednost k_{adm} na ravni preskusne sile P_p odčitali iz najslabšega rezultata, torej tistega preskusnega sidra, pri katerem so bile pri vseh vrednostih sile P_i mere lezenja $k_{\text{int},i}$ najvišje. Možnost se je izkazala kot nerealna, saj je primerjava krivulj ($P_i, k_{\text{int},i}$), dobljenih pri PS preskusnih sider posameznega objekta, pokazala, da v splošnem prihaja do "prepletanja" krivulj (t.j. preskusno sidro z najvišjo stopnjo $k_{\text{int},i}$ na stopnji sile P_i , v naslednji stopnji sile P_{i+1} PS pogosto nima več najvišje vrednosti $k_{\text{int},i+1}$), zato na ta način ne bi nujno dobili merodajne vrednosti k_{adm} . Kot zadnjo možnost smo razmišljali tudi o pristopu, po katerem bi poskusili določiti ovojnico najvišjih doseženih vrednosti k_{int} vseh preskusnih sider objekta. V tem primeru bi bilo v različnem območju sil P_i merodajno drugo preskusno sidro objekta, zato smo ta pristop ocenili kot slabši od pristopa, pri katerem s povprečenjem mer lezenja vseh preskusnih sider na vsaki posamezni stopnji sile zajamemo vpliv vseh izvedenih PS.

Dopustne mere lezenja $k_{\text{adm}}^{\text{OR}}$, izvrednotene kot presečišča odsekoma ravne krivulje povprečnih intervalnih mer lezenja vseh preskusnih sider objekta, lahko v splošnem štejemo kot sprejemljive za primerjavo z intervalnimi merami lezenja sider objekta $k_{\text{int},95}$ oz. $k_{\text{int},90}$. Vendar pa se je ob primerjavi vrednosti $k_{\text{int},95}$ oz. $k_{\text{int},90}$ s $k_{\text{adm}}^{\text{OR}}$ treba zavedati dejstva, da ne samo, da je v kablu sider različno število pramen, pač pa tudi, da so meritve vtiskanja glav sider praviloma izvedene z večjo merilno negotovostjo, saj stojalo merilne urice pogosto stoji na slabo utrjeni (lahko tudi razmočeni) podlagi, pri čemer na sistem moteče vpliva tudi izvajanje gradbenih del v bližini mesta PS. Zato se izvajalci tem meritvam poskušajo izogniti, s čimer so zavestno na "nevarni strani" – zaradi vtiskanja glav sider so izvrednotene višje mere lezenja k_{int} (slabše karakteristike odpornosti na izvlek), čeprav vzrok za to ne leži v popuščanju veznega dela sidra, vendar so še vedno nižje od dopustnih vrednosti, kot jih v elaboratih napenjanja podajajo projektanti.

V zaključnem komentarju primerjave intervalnih mer lezenja k_{int} doseženih pri preskusnih sidrih (PS) in pri sidrih objekta (EPN in CPN) želimo opozoriti na potencialne vzroke za razhajanje vrednosti k_{int} , dobljenih pri CPN in EPN na sidrih objekta, v primerjavi z vrednostmi k_{int} , dobljenimi na preskusnih sidrih (torej pri PS):

- Za sistem napenjanja pramen sidra z mononapenjalkami smo ugotovili, da na vrednosti k_{int} neposredno vpliva opuščanje meritev pomikov (vtiskanja) glav sider, v najboljšem primeru pa so meritve pomikov glav sider za en razred manj natančne od meritev izvlečkov pramen kabla sidra. Posledica so večje iz vrednotene intervalne mere lezenja k_{int} sider objekta v primerjavi z vrednostmi k_{int} dobljenimi pri PS, ki niso neposredni odraz obnašanja veznega dela sider.
- Praviloma se PS izvedejo pred začetkom gradnje ali pa povsem na začetku gradnje sidranega objekta na relativno majhnem področju tal zaledja v zgornjem delu sidranega objekta, včasih celo ne na sidranem objektu, pač pa na majhnem AB bloku v njegovi bližini. Predvsem pri velikih sidranih objektih, katerih gradnja se izvaja na velikem področju tal in v katere je v daljšem obdobju vgrajenih veliko trajnih prednapetih geotehničnih sider, lahko med gradnjo zaradi izkopov, vrtanja vrtin za sidra in ostalih ukrepov, potrebnih za gradnjo, pride do določenih sprememb v tleh izraženih v obliki sprememb napetostno-deformacijskega stanja, sprememb toka talne vode, v skrajnih primerih lahko pride tudi lokalnih nestabilnosti tal zaledja. Vezni deli sider v spodnjem delu objekta so torej lahko vgrajeni tudi v drugačna tla v primerjavi s tlemi, kjer so se izvajale PS; glede na to, da podlage za popise vrtine sider objekta pogosto pripravljajo vrtalci na koncu delovnega dne (včasih pa celo na koncu delovnega tedna), lahko domnevamo, da popisi vrtin niso dovolj natančni, da bi lahko zadovoljivo zajeli takšne vplive. Torej je povsem realna možnost, da se vrednosti k_{int} pri CPN in EPN razlikujejo od k_{int} pri PS, saj so dobljene po celotnem sidranem objektu, ki zajema bistveno večje področje tal, katerih nosilnostne karakteristike so lahko drugačne od karakteristik tal, v katerih so bile izvedne PS.
- Analiza rezultatov v preteklosti opravljenih PS je pokazala, da so izvajalci pri nižjih stopnjah sile prekmalu zaključili opazovanje lezenja na posameznih vmesnih stopnjah sile P_i . S stališča končne odpornosti na izvlek zaradi tega vrednosti R_a sicer niso bile prevelike, vendar pa so na drugi strani intervalne mere lezenja k_{int} na vmesnih stopnjah sile P_i zaradi tega verjetno podcenjene. Prav višje vmesne stopnje sil P_i PS pa so ekvivalent preskusne sile P_p pri CPN in EPN, pri katerih se izvaja opazovanje in presoja nosilnostnih karakteristik sider objekta.
- V praksi so preskusna sidra praviloma vedno opremljena vsaj z enim pramenom več kot sidra objekta, v primeru opornega zidu OZ-05 se je pokazalo, da so bile PS izvedene na 6-pramenskih sidrih, pri čemer se je dopustna mera lezenja k_{adm} uporabila pri presoji odpornosti na izvlek 3- do 6-pramenskih sider objekta. Rezultati analiz v literaturi (Logar in sod., 2004) kažejo na vpliv števila pramen kabla sidra (t.j. osne togosti veznega dela sidra) na mere lezenja k : raziskovalci so z analizo obnašanja sider večjega števila sidranih objektov ugotovili, da sidra preskušena pri nižji sili P_p izkazujejo nižje mere lezenja. Kot je razbrati iz vira, pri analizi obnašanja sider niso upoštevali intervalne mere lezenja k_{int} , kar bi bila po naši oceni nadgradnja omenjene analize, saj bi v tem primeru omilili vpliv omejene točnosti izvajanja korekcij sile pred izvajanjem odčitkov izvlečkov, s tem pa tudi raztrosa iz vrednotenih mer lezenja k .
- V praksi se proste in vezne dolžine sider objekta pogosto razlikujejo od prostih in veznih dolžin preskusnih sider. Zaradi povečanja prostih dolžin se vezni deli sider lahko nahajajo v boljših tleh (ob pravilni zasnovi sidrane konstrukcije se s povečevanjem globine nosilnost tal namreč povečuje), podatki iz literature kažejo, da s podaljšanjem prostega dela sidra v splošnem lahko pričakujemo nižje vrednosti mer lezenja (Logar in sod., 2004). Na drugi strani zaradi spremembe

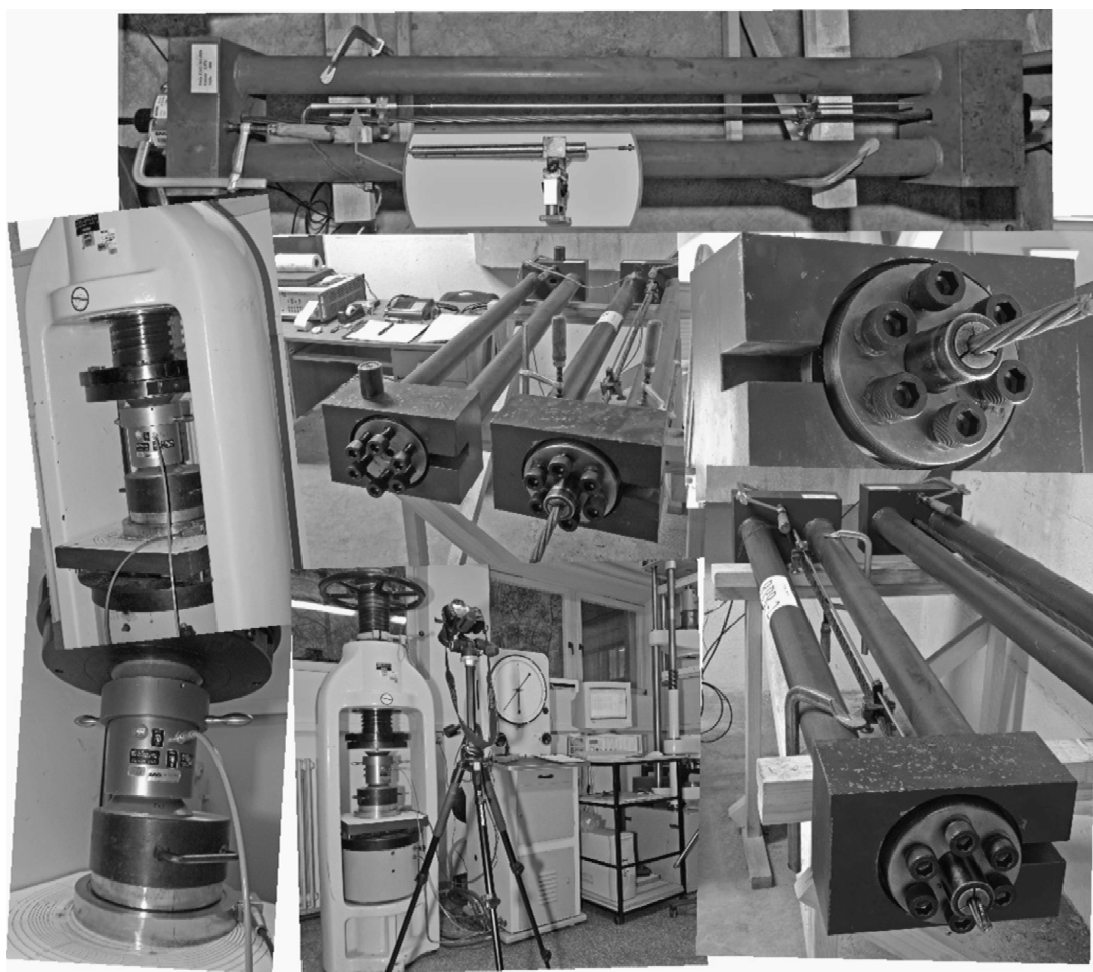
dolžine veznega dela sidra pride do spremembe togosti veznega dela sidra, s tem pa tudi do pre-razporeditve oblike poteka kontaktnih napetosti vezi sidra s tlemi, kar pa se praviloma odraža tudi v merah lezenja k . Rezultati analiz kažejo, da s povečevanjem števila pramen (povečevanje togosti veznega dela sidra) mera lezenja pada, obratno pa z naraščanjem dolžine veznega dela sidra (manjšanje togosti veznega dela sidra) mera lezenja narašča (Logar in sod., 2004).

- Zaradi stalnih pritiskov izvajalcev gradbenih del po nadaljevanju gradnje sidranega objekta, s tem pa tudi krajšega razpoložljivega časa za izvedbo EPN vgrajenih sider, kot tudi manjšega obsega neposredne kontrole pri EPN, se pomiki glav sider v praksi redko izvajajo, obstaja pa tudi verjetnost manj natančnih korekcij sidrnih sil pred odčitki izvlečkov pramen sider objekta. Iz istega razloga se CPN in EPN sider objekta izvajajo v najkrajšem možnem času, ki še zagotavlja minimalno potrebno trdnost injekcijske mase (sedem oz. deset dni), medtem ko ni redkost, da se PS izvajajo šele dva do tri tedne po vgradnji preskusnih sider.
- PS se v praksi izvedejo v šest do deset cikličnih korakov stopnjema naraščajoče sile v sidru, medtem ko se pri CPN sila vnese v treh cikličnih korakov stopnjema naraščajoče sile, pri EPN pa le še v enem koraku. Čeprav je preskusna sila pri CPN in EPN vsaj za 15 % nižja od sile pri PS, je do ravni preskusne sile CPN in EPN vnesena bolj enakomerno oz. se vnos sile izvede v več korakih, posledica česar bi lahko bile nižje vrednosti intervalnih mer lezenja k_{int} pri PS glede na vrednosti k_{int} dosežene pri CPN in EPN. Analiza vpliva število stopenj obremenitve do preskusne sile na dosežene vrednosti mer lezenja bi bila obsežna, zahtevala bi zbiranje in ponovno obdelavo podatkov do sedaj izvedenih CPN in EPN v praksi sidranih objektov, zato bi njena izdelava dogotrajna (s tem pa tudi draga), a bi z njenimi rezultati domnevo lahko potrdili (oz. ovrgli).

(prazna stran)

Sklop C

LABORATORIJSKA PRESKUŠANJA



5 LABORATORIJSKI PRESKUS VPLIVA EKSCENTRIČNE LEGE OBROČASTEGA DINAMOMETRA NA IZMERJENE VREDNOSTI SIL

Za korektno izvedbo postopkov preskušanja nosilnosti prednapetih geotehničnih sider, kot tudi za kasnejše spremljanje stanja sil v sidranih objektih, je pomembno točno poznavanje sil v trajnih prednapetih geotehničnih sidrih. Izkušnje iz prakse kažejo, da kljub pozornosti izvajalcev sidrskih del pri nameščanju mononapenjalk, podložne in sidrne plošče, kot tudi obročastega dinamometra, predvsem v primeru težavnih pogojev in oviranega dostopa prihaja do zdrsa dinamometra in mononapenjalk zaradi njihove lastne teže (slika 5.1), zaradi česar dinamometer ni enakomerno obremenjen po celotni površini, posledično pa je možen tudi vpliv na prikazane vrednosti izmerjenih sil v sidru. Problematika vpliva ekscentrične lege dinamometra na odčitke sil pri preskusih sider na terenu je že dolgo znana, o njej sta poročala že MacLeod in Hoadley (1974). Prav zaradi tega in glede na to, da je eden od pomembnejših parametrov, ki vpliva na samo izvedbo in končne rezultate PS in preskusov nosilnosti sider, prav točno uravnavanje ravni preskusne sile med preskušanjem nosilnosti prednapetih geotehničnih sider, smo v okviru preskušanj, izvedenih v sklopu te disertacije, želeli preveriti oz. oceniti, kolikšen je neposredni vpliv ekscentrične lege obročastega dinamometra, kot ga uporabljamo danes, glede na vzdolžno os kabla sidra, na izmerjene vrednosti sil. Ta tematika je še posebej aktualna v primerih napenjanja prednapetih pramenskih sider z mononapenjalkami, pri katerih se zaradi velikega potrebnega prostora za namestitev mononapenjalk uporabljajo obročasti dinamometri večjih premerov. Poleg tega so dinamometri, ki se na terenu uporabljajo za izvedbo PS in preskusov nosilnosti sider, v rabi dlje časa, pogosto so izpostavljeni grobem ravnanju, med uporabo pa so podvrženi tudi različnim škodljivim vplivom (naleganje na ne povsem čiste in ravne površine, vnos sile, ki ni povsem pravokotna na podlago, ekscentrična lega glede na os sidra ipd.).



Slika 5.1: Primera iz prakse – ekscentrični legi obročastega dinamometra SISGEO med preskušanjem nosilnosti sidra.

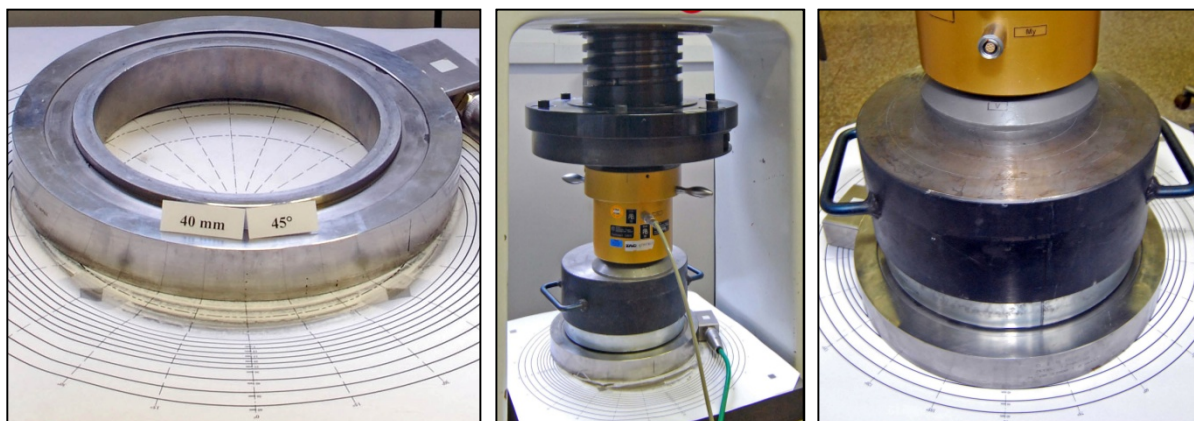
Figure 5.1: Practical examples of eccentric positions of ring load cell SISGEO taken during load-bearing testing of anchors.

V **dodatku E** disertacije podajamo podrobnejši opis izvedbe laboratorijskega preskušanja vpliva ekscentrične lege obročastega elektronskega dinamometra SISGEO L216V150, nazivne kapacitete 1500 kN, na izmerjene vrednosti sil. Preskušanja smo namerno izvedli na dinamometru, ki je bil že dlje časa v uporabi (med drugim ga je izvajalec sidrskih del uporabljal tudi pri ponovitvi preskušanj na testnem polju opornega zidu OZ-05 leta 2009). V uvodnem delu dodatka podajamo splošne okvire za namen,

zahteve, izbiro in vgradnjo dinamometrov, medtem ko smo osrednji del poglavja posvetili pripravi in izvedbi laboratorijskega preskusa. V začetnem delu najprej opisujemo obročasti in referenčni dinamometer, nato pa še ostalo merilno in preskusno opremo. Sledi podrobnejši opis izvedbe laboratorijskega preskusa dinamometra SISGEO L216V150 v hidravlični stiskalnici Amsler v kontroliranih pogojih Metrološkega laboratorija Zavoda za gradbeništvo Slovenije, pri čemer smo preskusni sistem zasnovali tako, da smo na obročasti dinamometer namestili togo podložno ploščo, na katero smo postavili referenčni dinamometer, ki se je vedno nahajal v osi hidravlične stiskalnice (slika 5.2). Med preskušanjem smo torej zamikali le spodnji obročasti dinamometer s togo ploščo (slika 5.3).



Slika 5.2: Obročasti dinamometer SISGEO L216V150 in referenčni dinamometer KTN-DZY v hidravlični stiskalnici Amsler med preskušanjem vpliva ekscentrične lege na velikost izmerjenih sil.
Figure 5.2: Ring load cell SISGEO L216V150 and reference load cell KTN-DZY in the hydraulic press Amsler during the testing of influence of eccentrical positions on measured forces.



Slika 5.3: Pogled na namestitev obročastega dinamometrom SISGEO in zamik med osema obročastega in referenčnega dinamometra KTN-DZY pri ekscentričnosti 40 mm.
Figure 5.3: View of setting up of ring load cell SISGEO and spacing between axes of ring load cell and reference load cell KTN-DZY at the eccentricity of 40 mm.

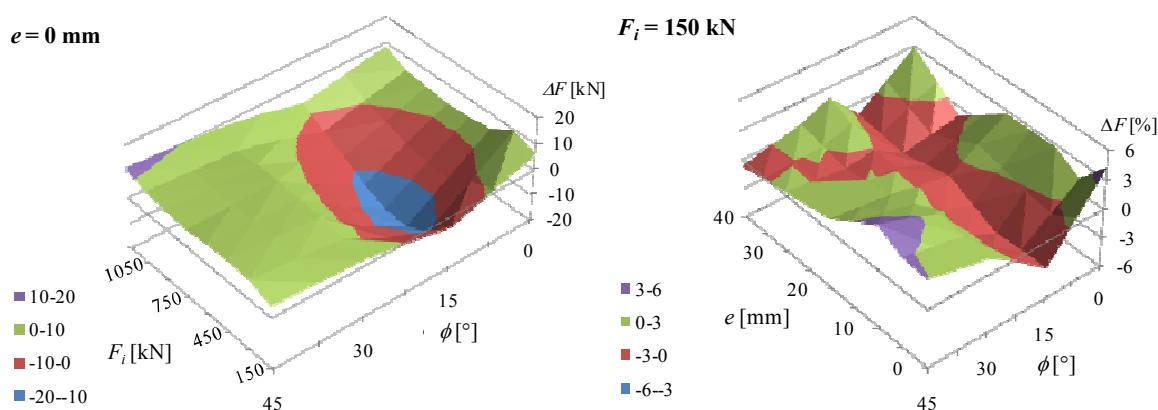
Laboratorijskega preskušanja nismo izvedli po postopkih predvidenih v standardu *SIST EN ISO 376:2005 Kovinski materiali – Kalibracija merilnikov sile, ki se uporabljajo za preverjanje preskusnih strojev z enosno obremenitvijo*, na podlagi katerega se sicer izvajajo kalibracije merilnikov sile za preverjanje

strojev z enoosno obremenitvijo, pač pa smo se želeli čimbolj približati postopku terenskega preskušanja nosilnosti sider v praksi, ob upoštevanju zmogljivosti in specifičnosti preskusne opreme. Za oceno pogreškov dejanskih sil pri preskušanju sider v praksi smo pri izvedbi laboratorijskega preskusa obročastega dinamometra smernice in navodila standarda *EN ISO 376* smiselno prilagodili dejanskim pogojem v praksi pri izvedbi PS, obenem pa smo poskušali čimbolj realno oceniti in upoštevati vse vplivne parametre: zmanjšali smo število predobremenitev in razbremenitev sistema do maksimalne preskusne sile (le enkrat namesto dvakrat), prav tako pa pri vsaki seriji izvedenih meritev obročastega dinamometra nismo obračali po postopku, kot to predvideva standard *EN ISO 376*. Preskuse smo izvajali do maksimalne preskusne sile 1200 kN z vmesnimi odčitki v osmih intervalih (torej pri silah 150, 300, 450, 600, 750, 900, 1050 in 1200 kN). Pred začetkom obremenjevanja smo dinamometer zavrteli za vnaprej izbrani kot (začetna rotacija ϕ , ki smo jo nastavili na 0° , 15° , $22,5^\circ$, 30° oz. 45°) in ga centrično namestili v hidravlično stiskalnico ($e = 0$ mm). Nato smo izvedli dve obremenitvi in razbremenitvi sistema do preskusne sile 1200 kN, s katerima smo želeli povprečiti specifično zasnovano preskuševalnega sistema v smislu medsebojnega uleganja komponent na končni rezultat. V nadaljevanju smo isti način obremenjevanja ponavljali pri isti začetni rotaciji, vendar pri različnih zamikih iz osi hidravlične stiskalnice (pri ekscentričnostih $e = 5, 10, 20, 30$ in 40 mm). Po zaključku serije obremenitev pri začetni rotaciji $\phi = 0^\circ$ smo serije ponovili še pri rotacijah dinamometra 15° , $22,5^\circ$, 30° in 45° . Pretežni del [dodatka E](#) smo namenili prikazu rezultatov meritev, pri čemer smo najprej preverili ponovljivost rezultatov meritev (torej ali sta dve seriji izvajanja meritev zadostni), nato pa smo dobljene rezultate medsebojno primerjali in prikazali na različne načine v obliki tridimenzionalnih diagramov.

Podrobni opis izvedbe programa preskušanj in dobljenih rezultatov je podan v [dodatku E](#). Na tem mestu podajamo samo bistvene povzetke rezultatov opravljenega laboratorijskega preskusa vpliva ekscentrične lege obročastega dinamometra na izmerjene vrednosti sil:

- Med preskušnji smo, z izjemo prve faze preskusa pri 150 kN, v manjši meri pa tudi druge faze preskusa pri 300 kN (kjer so bile nekatere vrednosti relativnega pogreška ponovljivosti brez rotacije b' višje), dosegli dovolj dobro ponovljivost laboratorijskega preskušanja vpliva ekscentrične lege obročastega dinamometra na izmerjene vrednosti sil. Le z enkratno predobremenitvijo in razbremenitvijo sistema do maksimalne preskusne sile se je celoten preskusni sistem obročastega in referenčnega dinamometra ter vmesne toge jeklene plošče prilagodil na zgornjo in spodnjo ploščo hidravlične stiskalnice. Večja odstopanja (torej višje vrednosti relativnega pogreška ponovljivosti brez rotacije b') smo delno pripisali rahlo zvitemu togemu porazdelitvenemu jeklenemu obroču dinamometra, delno pa slabši natančnosti obročastega dinamometra na skrajnem spodnjem delu merilnega območja, vendar pa takšno obnašanje dinamometra nima pomembnega vpliva na končne rezultate PS oz. preskusa nosilnosti sidra, res pa je, da je ravno visoke vrednosti mer lezenja k v prvih fazah PS težko nedvoumno pojasniti, saj ne morejo biti posledica popuščanja veznega dela sidra in jih deloma lahko pripišemo tudi težavam povezanim z omejeno ločljivostjo dinamometra oz. z omejeno točnostjo odčitovanja sidrne sile v spodnjem območju sile.
- V splošnem rezultati laboratorijskega preskušanja potrjujejo navedbe proizvajalca, da je obročasti dinamometer SISGEO L216V150 zasnovan in izdelan z namenom zmanjšanja vpliva ekscentrične lege na izmerjene vrednosti sil. Primerjava razlik sil ΔF , izmerjenih na referenčnem dinamometru in obročastem dinamometru, kaže na podobnost diagramov razlik sil ΔF v odvisnosti od stopnje sile F_i , dobljenih pri začetnih rotacijah 0° in 30° ter 15° in 45° , kar je lahko posledica razporeditve merilnih lističev po obroču dinamometra oz. koncepta zajemanja vrednosti z namenom zmanjšanja vplivov ekscentrične lege dinamometra na izmerjene sile, take rezultate pa lahko v določeni meri pripišemo tudi ne povsem idealno ravni površini obročastega dinamometra.

- Največje razlike sil ΔF med referenčnim in obročastim dinamometrom pri konstantni rotaciji smo zabeležili pri centrični namestitvi ($e = 0$ mm) obročastega dinamometra v hidravlični stiskalnici pri rotaciji 15° (slika 5.4 levo), če upoštevamo, da se obročasti dinamometer na glavo sidra namesti pod začetno rotacijo, ki se nato več ne spreminja, vendar lahko kasneje pride do zdrsa dinamometra navzdol. Po absolutni velikosti je bila največja razlika $+18,85$ kN dosežena pri $e = 10$ mm in $\phi = 45^\circ$, najmanjša pa $-16,78$ kN pa pri $e = 0$ mm in $\phi = 15^\circ$, kar je precej več od deklariranega pogoška kazanja proizvajalca (do 0,5 % nazivnega območja sile dinamometra, torej do $\pm 7,5$ kN), vendar sta bili obe skrajni vrednosti izmerjeni pri različni ekscentričnosti in rotaciji dinamometra, torej se v praksi (zaradi pogoja istega kota namestitve dinamometra) ne moreta pojaviti sočasno. Med laboratorijskem preskušanjem smo največje območje odstopanj $18,90$ kN (od $-16,78$ do $2,12$ kN) izmerili pri stalni centrični legi dinamometra ($e = 0$ mm) in rotaciji 15° . Če opazujemo razlike sil ΔF v odstotnem deležu stopnje vnesene sile F_i , so bili rezultati najbolj raztreseni pri najnižji stopnji sile 150 kN, takrat je bila namreč največja absolutna razlika med najmanjšo in največji vrednostjo ΔF , ploskev diagrama pa je bila najbolj razčlenjena (slika 5.4 desno). Takšen rezultat ni presenečenje, saj je na najnižji stopnji sile (pri isti absolutni vrednosti ΔF) odstotni delež sile največji. Razloge za takšno obnašanje dinamometra smo podali že v prejšnji alineji.



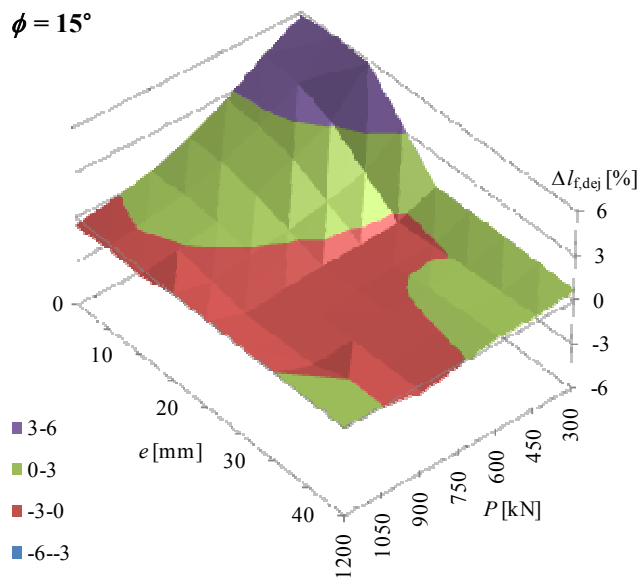
Slika 5.4: Razlike vrednosti med referenčnim in obročastim dinamometrom: pri ekscentričnosti 0 mm (levo) in pri tlačni sili 150 kN v odstotku izbrane sile F_i (desno).

Figure 5.4: Subtracted values of measured forces on reference load cell and ring load cell: at eccentricity of 0 mm (left) and at compressive force 150 kN, represented as a percentage of selected force F_i (right).

- Ocenili smo, da vpliv zamika med osjo sidra in osjo obročastega dinamometra v kombinaciji z rotacijo nedvomno vpliva na prikazano vrednost sile, kot jo podaja digitalni prikazovalnik sile, vendar pa so odstopanja sile tako majhna, da ne vplivajo na vrednosti upadlih sil, ki jih moramo dodajati pred izvedbo odčitkov izvlečkov pramen sidra na posamezni stopnji sile, zato smo ta vpliv pri vrednotenju mer lezenja k ocenili kot manj pomemben, čeprav tega s tipom laboratorijskega preskusa, na način kot smo ga izvedli, nismo eksplicitno dokazali. Vpliv odstopanj izmerjenih sil z obročastim dinamometrom med preskušanjem nosilnosti sider pa je opazen pri vrednotenju efektivnih prostih dolžin sider l_f med PS na terenu, ki se vrednotijo po vsaki stopnji sile PS. Simulacijo vpliva netočne vrednosti sile v sidru na vrednosti efektivnih prostih dolžin med izvedbo PS smo izvedli za primer 6-pramenskega sidra z računsko prosto dolžino $l_{fr} = 28$ m: ob upoštevanju Hookovega zakona smo za vse stopnje sile F_i , ekscentričnosti e in rotacije ϕ dinamometra laboratorijskega preskusa, na podlagi znanega prečnega prereza A_p , elastičnega modula E_p , teoretičnega raztezka kabla sidra Δs ter razlike sil ΔP (pri kateri smo upoštevali v laboratoriju ugotovljena

odstopanja prikazanih sil obročastega dinamometra od dejanskih), izračunali dejanske efektivne proste dolžine sider l_f . Na **sliki 5.5** je podan grafični prikaz z največjimi odstopanji efektivnih prostih dolžin 6-pramenskega sidra računske proste dolžine 28 m za rotacijo dinamometra 15° , pri katerem smo za vse ekscentričnosti in rotacije laboratorijskih preskusov izvednotili razlike efektivnih prostih dolžin $\Delta l_{f,dej}$, izračunane med dejansko izvednotenimi prostimi dolžinami kabla sidra (ob upoštevanju netočno izmerjenih sil) in začetno (proizvodno) prosto dolžino kabla sidra. Iz diagrama je razvidno, da se lahko v skrajnem primeru odstopanja prikazane sile obročastega dinamometra, od dejanske, odražajo kot odstopanja efektivne proste dolžine sidra velikostnega reda do 6 %.

$\phi = 15^\circ$



Slika 5.5: Razlike med začetno prosto dolžino 28 m in (na podlagi netočno izmerjenih sil) izračunanimi efektivnimi prostimi dolžinami za 6-pramensko sidro pri rotaciji dinamometra 15° .

Figure 5.5: Differences between original tendon free length of 28 m for 6-strand anchor and actual apparent free lengths calculated with the consideration of inexact measured forces at 15° rotation of load cell.

- Po obstoječih postopkih PS in preskusov nosilnosti sider se takoj po namestitvi dinamometra na glavo sidra pristopi k izvedbi PS, ne da bi bil sistem predhodno obremenjen, torej se medsebojna prilagoditev jeklenih elementov in dinamometra ne more izvesti. Na podlagi izkušenj opravljenega laboratorijskega preskusa ocenjujemo, da bi bilo za zagotovitev korektnjših vrednosti odčitkov izvlečkov, posledično pa tudi izvednotenih mer lezenja k , smiselno sidro vsaj enkrat počasi predhodno obremeniti s počasi naraščajočo silo nekje v deležu 30 % nazivne natezne trdnosti jekla pramen R_m , pri čemer pa ta sila v nobenem primeru ne sme preseči 50 % (vnaprej ocenjene) odpornosti preskusnega sidra na izvlek. Ocenjujemo, da na tej ravni sile še ne bi smelo priti do poškodb veznega dela sidra, velikost sile pa bi bila že dovolj velika, da bo prišlo do medsebojne prilagoditve elementov v območju glave sidra, da se bo aktiviral prosti del sidra ter da bo izničeno trenje v območju prostega dela, območja pod glavo sidra ter v samih mononapenjalkah.
- Zaradi vpliva morebitnih poškodb dinamometra na izmerjene vrednosti sil, ocenjujemo, da je potreben razmislek v smeri skrajšanja kalibracijskih intervalov obročastih dinamometrov, s katerimi se v praksi izvajajo terenske preiskave in preskusi nosilnosti sider.
- Dobljene rezultate laboratorijskega preskušanja lahko v prakso prenašamo le pod pogojem, ko so obročasti dinamometri na sidra nameščeni skladno z navodili proizvajalca, torej da se obročasti dinamometer namesti med dovolj ravni podložno in sidrno ploščo, hkrati pa morata biti obe plošči zadostne debeline in premera, da je zagotovljena dovolj velika togost obeh nalezljivih površin (torej da je obročasti dinamometer najmanj tog del sistema v območju glave sidra).

6 LABORATORIJSKA PRESKUŠANJA IZOTERMNE RELAKSACIJE JEKLENIH PRAMEN PRI PREISKAVAH SIDER

Kot smo že zapisali v poglavju A.1 dodatka so raziskovalci že v fazi razvoja sistemov prednapenjanja ugotovili upadanje sil prednapetja s časom, pri čemer je bilo nekaj desetletij kasneje, ko so se bolj množično začela uporabljati pletena jeklena pramena, ugotovljeno, da je vzrok za ta pojav relaksacija jeklenih pramen, ki se odraža kot zmanjšanje napetosti oz. padec sile v prednapetem pramenu konstantne dolžine, obremenjenem z visoko natezno silo (Gilbert in Mickleborough, 2004, Zilch in Weiher, 2008). Sistemi prednapenjanja se pretežno uporabljajo v obliki naknadnega napenjanja konstrukcij na način, da se za prevzem nateznih sil v konstrukcijo preko pramen trajno vnesejo sile prednapenjanja (npr. pri prednapenjanju premostitvenih objektov), pri čemer so bile v praksi razvite metode za oceno upadlih sil s časom, ki so posledica relaksacije. Znano je, da na stopnjo relaksacije natezno obremenjenega pramena neposredno vplivajo tip jekla pramena, raven začetnih nateznih napetosti, temperatura okolja, v katerem se proces relaksacije odvija ter čas trajanja obremenitve. Za izvedbo PS z izbranim tipom jekla pramen in v pretežni meri kontroliranih pogojih temperature okolja (telo sidra vgrajeno v tleh zaledja s stalno temperaturo) je še posebej pomembna lastnost, da relaksacija močno zavisi od ravni nateznih napetosti v jeklu, pri čemer njena intenzivnost s povečevanjem napetosti narašča, medtem ko pojav relaksacije postane opazen pri napetostih višjih od 50 % natezne trdnosti jekla (Podolny, 1967, Ghali in sod., 2002). Za relaksacijo pramen med samo izvedbo PS je pomemben še en parameter – hitrost vnosa sile (čas potreben za vnos sile z začetne stopnje P_a na raven trenutne stopnje sile P_i), pri čemer pri dolgotrajnejšem (t.j. počasnejšem) vnašanju sile že med samim vnosom sile pride do določenega upada sile (oz. razvoja določenega deleža relaksacije), medtem ko je pri hitrejšem vnosu sile stopnja začetne relaksacije (med vnosom sile) manjša.

Izotermna relaksacija pramen je dobro poznana v tolikšni meri, da so postopki in kriteriji za preskušanje pramen standardizirani, vendar pa je celoten vidik preskušanja in ocene rezultatov izotermne relaksacije prednapetih pramen prilagojen in primeren za obravnavanje prednapenjanja konstrukcij, pri katerih se pramena v enem koraku napnejo na končno raven sile, nato pa se pramena zaklinijo, tako da se začetna sila prednapetja v pramenih sčasoma spreminja le še zaradi relaksacije in ostalih reoloških pojavov. Preskušanja izotermne relaksacije pramen v današnjem času izvajamo v kontroliranih laboratorijskih pogojih pri konstantni temperaturi; na vzorcih pramen po standardiziranem postopku izvajamo natezne preskuse na vnaprej predpisano raven sile, pri katerih merimo dejanske sile, kot tudi raztezke vzorca pramena, pri čemer je jasno določen kriterij za oceno rezultatov. Iz izmerjenih sil lahko izvrednotimo t.i. upadlo silo ΔP , t.j. tisto vrednost zmanjšanja sile, za katero se je v opazovanem časovnem intervalu zmanjšala začetna natezna sila v vzorcu pramena.

Prednapenjanje jeklenih pramen se izvaja tudi pri preskusih nosilnosti prednapetih sider, pri čemer je raven napetosti, ki se vnašajo v pramena sider, odvisna od tipa preskusa, ki se izvaja – pri PS posebej vgrajenih preskusnih sider do porušitve je zaradi obremenjevanja pramen na višjo preskusno silo večja, medtem ko je pri preskusih nosilnosti (CPN in EPN) na sidrih objekta, katerih veznih delov se med preskusi ne sme poškodovati, manjša. Čeprav za prednapenjanje konstrukcij, kot tudi pri prednapetih geotehničnih sidrih, uporabljamo ista pletena pramena iz visokovrednega jekla, se s stališča relaksacije med obema sistemoma uporabe prednapenjanja pojavljata razliki, ki sta še posebej izraziti in pomembni pri PS prednapetih sider:

- **Način obremenjevanja pramen:** Med preskušanjem nosilnosti se v pramena kabla prednapetih geotehničnih sider v enakomerno povečujočih se stopnjah, vnaša natezna sila, ki se po opazovanju

mere lezenja k na vsaki stopnji sile spusti na raven začetne sile P_a (ciklično obremenjevanje pramen s stalno naraščajočimi silami). V pramena prednapetih konstrukcij se v enem koraku, do končne ravni sile, vnese monotono naraščajoča natezna sila, nakar se pramena zaklinijo.

- **Raven nateznih napetosti:** med PS napetosti v pramenih kabla sidra lahko dosežejo do 85 % nazivne natezne trdnosti pramen R_m , medtem ko je za zaklinjenje sidra postavljena zgornja meja nateznih napetosti na 60 % R_m , pri čemer je dopustno, da se natezne napetosti, med življenjsko dobo sidranja, zaradi premikov sidranega objekta, dvignejo do 70 % R_m . Pri prednapetih konstrukcijah je začetna napetost prednapetja po standardu *EN 1992-1-1* omejena na 75 % R_m , vendar pa se ta vrednost zaradi izgube vsled trenutne deformacije betonske konstrukcije, izgube trenja in izgube v sidrišču, zmanjša že po opravljenem zaklinjenju pramen. Zmanjšanje začetne napetosti v pramenih je torej odvisno od same prednapete konstrukcije, poteka pramen, kot tudi izvedbe sidrišča, pri čemer so napetosti v pramenih praviloma manjše kot pri PS.

Zaradi različnega načina obremenjevanja pramen, kot tudi končne dosežene sile, relaksacije pramen pri prednapetih geotehničnih sidrih torej ne moremo obravnavati in ocenjevati po metodah, ki se uporabljajo pri prednapenjanju konstrukcij. Poseben problem pri napenjanju pramen predstavlja oprijem zagozd čeljusti napenjalk oz. zagozd v glavi preskuševalne naprave, ki je v obeh primerih izključno mehanski in se izvaja preko minimalnega vtisnjenja narebrane površine zagozd v zunanje žice pramen, radialnega stiskanja v konusnih utorih kotev ter trenja, ki se pri tem pojavlja, pri čemer raziskovalci (Pritchard in sod., 2006, Hill, 2006) navajajo problem oprijema oz. zdrsa vzorca pramena v glavi preskuševalne naprave na ravni visoke natezne sile prednapetja konstrukcij. Pri izvedbi PS na terenu dodatno težavo predstavlja še stanje čeljusti napenjalk, ki se v praksi običajno uporabljajo do izrabljenosti oz. dokler ne začno zdrsovati, ko jih izvajalci sidrskih del zamenjajo. Dejansko dobljeni rezultati PS kažejo visoke vrednosti mer lezenja k na začetnih stopnjah sile, ki jih nedvomno ne moremo povezovati s popuščanjem veznih delov sider, lahko pa bi jih med drugim povezovali z oprijemom čeljusti napenjalk, saj zaradi načina merjenja izvlečkov, ki se izvajajo na batih mononapenjalk (*slika 3.32 levo*), ob morebitnem zdrsovanju čeljusti pramen ob vnosu predpisane ravni sile, izmerimo večje izvlečke (s tem pa tudi izvrednotimo višje mere lezenja k), kot če do zdrsa čeljusti ne bi prišlo. Prav tako bi s pojavom relaksacije pramen lahko povezovali opažanja iz prakse, da pri istem sidru s takojšnjim, zaporednim ponavljanjem preskusov nosilnosti, dosegamo vedno boljše rezultate v obliki vedno nižjih mer lezenja k . Ob tem ne gre samo za vprašanje razloga za vedno boljše rezultate, pač pa je še bolj pomembno vprašanje, ali so boljši rezultati le kratkoročne narave (navidezno izkazovanje večje odpornosti na izvlek veznega dela sidra), ali pa gre pri tem za dolgoročno ugodne vplive.

V *dodatku F disertacije* podajamo podrobnejši opis ozadja in izvedbe laboratorijskih preskušanj izotermne relaksacije jeklenih pramen $\varnothing 15,2$ mm spletenih iz sedmih žic z nizko relaksacijo trdnostnega razreda 1860 MPa, ki so bila izvedena po postopkih, s katerimi smo poskušali simulirati obnašanje vzorca jeklenega pramena (kot se sicer vgrajuje v prednapeta sidra) med izvedbo PS. V uvodnem delu dodatka podajamo predstavitev tematike in pregled literature v zvezi z relaksacijo jeklenih pramen prednapetih konstrukcij. V nadaljevanju podajamo osnove preskušanja izotermne relaksacije pramen ρ [%] po standardu *EN ISO 15630-3*, ki smo jih vzeli kot podlago za izvajanje laboratorijskih preskušanj vzorcev pramen pri PS. Tem preskušanjem smo namenili osrednji del *dodatka F*, pri čemer izvedena preskušanja podajamo po kronološkem redosledu, kot smo jih izvajali:

- na podlagi *predhodnih preskušanj* relaksacije na vzorcih R-1 do R-3 smo preverili, ali lahko pri preskušanjih relaksacije po postopku za PS pričakujemo smiselne rezultate, predvsem pa smo želeli preveriti, kateri so ključni parametri za uspešno izvedbo takih preskušanj;

- nadaljnja preskušanja izotermne relaksacije smo nato opravili na enakih pramenih proizvajalca, kot so bila vgrajena v sidra testnega polja na objektu OZ-05, pri čemer smo izvedli:
 - preskušanja po fazah PS s spremljanjem časa vnosa sile na posameznih stopnjah sile, a brez dodajanja upadlih sil (analogija s standardiziranim preskusom),
 - preskušanja po stopnjah sil faz PS z dodajanjem upadlih sil s spremljanjem časa vnosa sile (analogija s postopkom dejanske izvedbe PS v praksi),
 - na enem vzorcu pa smo še dodatno preverili vpliv ponovitve postopka preskušanja po fazah PS s spremljanjem časa vnosa sile na posameznih stopnjah sile, a brez dodajanja upadlih sil.

Vpliv spremembe sile zaradi pojava relaksacije, na deformacijo pramena, je zanemarljiv le, če sta preskusni okvir in dinamometer v osni smeri vzorca dovolj toga, pri čemer po Pritchard in sod. (2006) osne tlačne napetosti v okviru ne smejo preseči 10 % napetosti v pramenu. Za zmanjšanje vpliva zasidravanja vzorca pramena v preskuševalni napravi na rezultate (zdrs in usedanje čeljusti v obeh kotvah) je priporočena dolžina vzorca pramena določena kot 9-kratnik koraka ovitja pramena (angl. lay length), obenem pa naj bi se temperatura v laboratoriju gibala znotraj območja $\pm 0,5$ °C.

Preskušanja smo izvedli na namensko zasnovanem in izdelanem preskuševalnem okvirju (slika 6.1), ki se uporablja za izvajanje preskušanj izotermne relaksacije po standardu *EN ISO 15630-3*, pri katerem je vzorec pramena dejansko obremenjen na dolžini približno 1795 mm, kar pri koraku ovitja 215 mm znaša 8,3 korakov ovitja. Togi okvir sestavljata dve polni jekleni palici \varnothing 80 mm dolžine 1500 mm, ki sta na obeh koncih privarjeni na jeklena bloka dimenzij 140×200×300 mm, v sredini katerih sta izvrtni \varnothing 30 mm skozi kateri poteka vzorec pramena. Na ravni preskusne sile 209 kN so tlačne napetosti v palicah preskusnega okvira dosegale 1,4 % nateznih napetosti v vzorcu pramena.



Slika 6.1: Elementi merilnega sistema za izvedbo preskušanj izotermne relaksacije po postopku izvedbe preiskav prednapetih geotehničnih sider.

Figure 6.1: Elements of the instrumentation system used for isothermal relaxation tests according to the procedure of investigation test of prestressed ground anchors.

Po zahtevah *EN ISO 15630-3* se za meritev sil pri standardiziranih preskušanjih izotermne relaksacije uporabijo kalibrirani dinamometri (točnost ± 1 % v območju do 1000 kN), obenem pa se na vzorcu

pramena izvaja merjenje sprememb dolžine (priporočljiva dolžina merilne baze $L_0 = 1000$ mm; točnost merilnika pomikov ± 1 %). V našem primeru smo vrednosti sil in raztezkov pramena odčitovali s sistemom zajemanja podatkov, v katerem smo z univerzalnim večkanalnim ojačevalnikom UPM 60 v predvidenih časovnih intervalih pretvorili analogne signale iz elektronskega pretvornika sile KAF 200 kN (dinamometra razreda točnosti 0,2 %) in induktivnega pretvornika pomikov IW12/50 (linearno območje pomikov ± 25 mm) v digitalno obliko, ter jih avtomatsko odčitavali. Z dinamometrom KAF 200 kN je bilo treba glede na zahteve *EN ISO 15630-3* na vseh ravneh sile zagotoviti ločljivost odčitovanja sile $5 \cdot 10^{-4} \cdot F_0$, torej smo morali na ravni sile P_1 zagotoviti ločljivost 0,024 kN, pri čemer je dejanska ločljivost odčitavanja sil znašala 0,020 kN. Meritve pomikov smo izvajali na dolžini merilne baze L_0 900 oz. 1000 mm, pri čemer je ločljivost pretvornika znašala 1 μm , medtem ko bi morala po omenjenem standardu znašati vsaj $5 \cdot 10^{-6} \cdot L_0$ (kar pri bazi dolžine 900 mm znaša 0,0045 mm = 4,5 μm , kar pa je več od 1 μm). Po omenjenem standardu se raztezek vzorca $\Delta L_0 / L_0$ med dvema zaporednima odčitkoma pri bazi 900 mm ne sme spremeniti za več kot 45 μm , kar pa je bilo tekom naših meritev izpolnjeno, zato dodatna korekcija sile za ohranjanje dolžine vzorca ni bila potrebna.

Do relaksacije jeklenih pramen v smislu padca sile v prednapetih geotehničnih sidrih prihaja že med preskušanjem njihove nosilnosti, kar še posebej velja za PS, pri katerih so pramena kabla sidra lahko obremenjena celo do 85 % natezne trdnosti jekla pramen R_m . Po veljavnih predpisih se PS izvedejo s stalno ciklično naraščajočimi silami od ravni začetne sile P_a , nazaj na raven predhodne sile P_{i-1} in takoj nato na raven nove stopnje sile P_i , na katerem se izvaja opazovanje lezenja. Na stopnji sile P_i , kjer bodo natezne napetosti dovolj visoke, da bo prišlo do pojava relaksacije, je pričakovati, da se bo proces relaksacije najintenzivneje odvijal na začetku (torej neposredno po vnosu sile). Zaradi tega pojava bi med PS zaporedne odčitke izvlečkov pramen kabla sidra, med opazovanjem na posamezni stopnji sile P_i , dejansko izvajali pri vedno nižji sili v kablju sidra, razen seveda v primerih, ko upadle sile, pred izvedbo odčitkov, vedno znova popravljamo na izhodiščno raven.

S stališča PS nas ne zanima, kolikšne so končne vrednosti padca sile v sidru zaradi relaksacije na posamezni stopnji sile P_i , pač pa želimo ugotoviti vpliv upadanja natezne sile na samo izvedbo PS, na podlagi česar bi lahko ocenili, ali je popravljanje sil v sidrih pred izvedbo posameznih odčitkov izvlečkov pramen kabla sidra res potrebno ali ne. V ta namen smo v jeklenem preskusnem okviru preskušali relaksacijo vzorcev pramen, ki smo jih obremenjavali po postopku za PS do 80 % nazivne trdnosti pramena R_m nazivnega prečnega prereza 140 mm². Pri takšnem postopku je konstantna dolžina vzorca pramena zagotovljena le na ravni posamezne sile P_i , saj se vzorec med posameznimi stopnjami sile zaradi cikličnega spreminjanja sile elastično razteguje oz. krči. To pomeni, da smo na vsakem vzorcu pramena pravzaprav zaporedoma izvedli osem preskusov relaksacije na ravneh sil od $P_1 = 48$ kN (18 % R_m) do preskusne sile $P_{pv} = 209$ kN (80 % R_m), pri čemer smo na vsaki stopnji sile P_i v istih časovnih intervalih, kot pri PS, odčitovali upadanje sile. Opazovanja na vsaki stopnji sile P_i smo zaključili po tolikšnem času, kot so znašali značilni časi terenskega opazovanja pri tej sili.

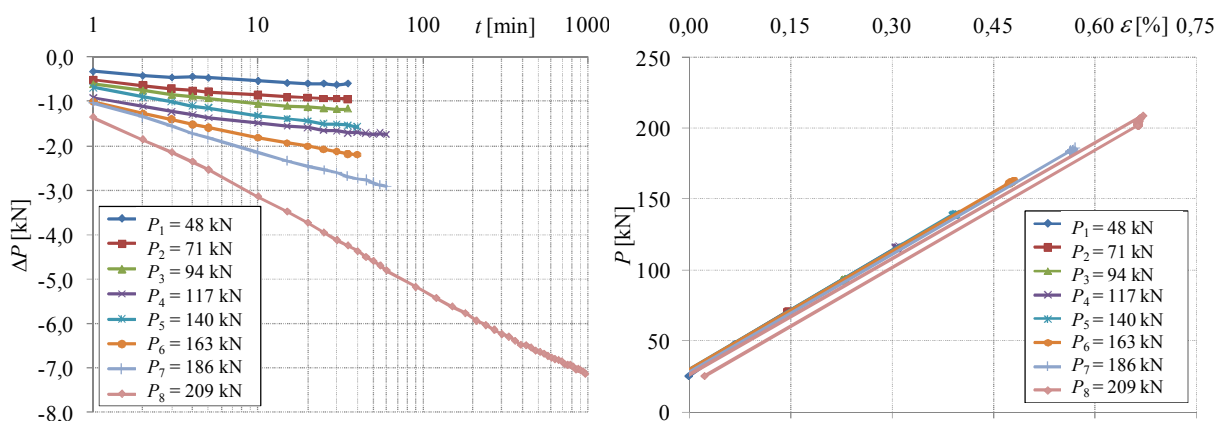
6.1 PREDHODNA PRESKUŠANJA IZOTERMNE RELAKSACIJE PO STOPNJAH SIL PREISKAV SIDER BREZ SPREMLJANJA ČASA VNOSA SILE

Po razpoložljivih virih je bilo pričakovati, da bo izvedba preskušanj izotermne relaksacije po postopku za izvedbo PS precej zahtevna, zato smo pred začetkom sistematičnega preskušanja vzorcev pramen izvedli predhodna preskušanja, v sklopu katerih smo poskušali ugotoviti morebitne specifičnosti in težave izvedbe ter instrumentiranja vzorcev, ki bi lahko vplivale na končni rezultat – velikosti upadanja sile v

pramenu, izraženi kot ρ_i na ravni posamezne stopnje sile P_i . Pojavljalo se je vprašanje izvedljivosti preskusa relaksacije pramena pri nižjih stopnjah sile (P_1 do P_4), pri katerih so natezne napetosti nižje od 50 % natezne trdnosti jekla pramen R_m , možne so bile težave v zvezi z vnašanjem in spuščanjem sile po postopku za PS, obenem pa smo želeli tudi preveriti, kolikšen bo raztros izmerjenih vrednosti pri preskušanjih relaksacije po postopku za izvedbo PS, pri katerem je čas opazovanja padcev sile zaradi relaksacije bistveno krajši (nekje med 15' in 60') v primerjavi s časom opazovanja pri standardiziranem postopku (1000 ur).

V praksi pri PS do padcev sile prihaja že od prve stopnje sile naprej, pri čemer pa padca sile ne moremo povezovati s popuščanjem veznega dela sidra pri tako nizkih silah, prav tako pa na tej ravni sile ne moremo govoriti o tipični relaksaciji (padec napetosti oz. sile pri ohranjanju konstantne deformacije pramena), ki bi bila posledica obnašanja pramena iz visokovrednega jekla kot takega (Koretsky in Pritchard, 1982). V praksi se torej očitno pojavljajo še drugi vplivni faktorji, ki pri PS prispevajo k padcem sile v napetem pramenu kabla sidra konstantne dolžine, med katere lahko uvrstimo: slabši mehanski oprijem čeljusti napenjalke, saj npr. na prvi stopnji PS sile napetosti v pramenih praviloma dosežejo le nekje do 20 % R_m , medtem ko je po *SLA 267* za učinkovit oprijem zagozd potrebna raven napetosti vsaj 30 % R_m pramena. Iz istega razloga so napetosti v radialni smeri, ki zagotavljajo medsebojno stiskanje žic pramena, še precej omejene, kar se izraža kot nizko razpoložljivo trenje, zato prihaja do zdrsa osrednje žice glede na zunanje spiralno oblikovane žice pramena, prav tako pa se na začetku preskušanja komponente v območju glave sidra (zagozde v kotvah, stik kotev-dinamometer-jekleni okvir, stik kotev-napenjalna glava-jekleni okvir) oz. komponente preskusne naprave medsebojno usedajo in prilagajajo. Za uspeh in čim manjši raztros rezultatov laboratorijskih preskušanj je bilo torej ključnega pomena čimbolj omejiti zdrs pramena v obeh kotvah, hkrati pa smo želeli čimbolj natančno posnemati delovanje čeljusti, kot se v naši praksi uporabljajo v mononapenjalakah, zato smo oprijem kotev na obeh straneh vzorca pramena zagotavljali preko rahlo vtisnjenih trikrakih zagozd.

Pri prvih treh vzorcih (R-1 do R-3), odvzetih iz istega koluta (a ne od istega proizvajalca, ki je dobavil pramena za sidra testnega polja), še nismo posebej pazili na hitrost vnašanja sile na posamezni stopnji sile, pač pa smo se osredotočili na ostale vidike izvedbe preskusov relaksacije po postopkih za PS. Na [sliki 6.2](#) je podan prikaz tipičnih rezultatov preskusa izotermne relaksacije vzorca R-2, pri čemer levi diagram podaja meritve padcev sil ΔP na ravni posamezne sile P_i , medtem ko je iz desnega diagrama razvidna podobnost obremenitve vzorca pramena z načinom obremenjevanja pri PS. Na prvi pogled je potek krivulj na levem diagramu v določeni meri nenavaden: skladno s pričakovanji smo s povečevanjem stopnje sile P_i izmerili vedno večje padce sil ΔP , vendar le do stopnje sile $P_4 = 117$ kN (45 % nazivne natezne trdnosti jekla pramen R_m), nato so v naslednji stopnji $P_5 = 140$ kN (54 % R_m) padci sile ΔP nekoliko upadli, a so se v nadaljevanju preskusa s povečevanjem sile ΔP spet povečali. Kot možni vzrok za takšno obnašanje vzorca pri nizkih silah v začetnem območju preskusa smo identificirali slabši oprijem zagozd na zunanje žice pramena, zaradi nizkih napetosti objetja v radialni smeri (s tem pa tudi omejenega razpoložljivega trenja) pa prihaja tudi do zdrsa osrednje žice pramena glede na zunanje spiralne žice v območju obeh kotev. Do ravni obremenitve pramen 54 % R_m po tej razlagi pri padcih sile ni prevladujoč pojav relaksacije pramen, pač pa mehanizem oprijema pramena s čeljustmi napenjalke in vnosa sile v žice pramena, medtem ko od te ravni napetosti dalje lahko govorimo o pojavu tipične relaksacije, kot se pojavlja v jeklenih pramenih iz jekla visokih trdnosti. Takšen zaključek potrjujejo ugotovitve tujih raziskovalcev (Podolny, 1967, Ghali in sod., 2002 ter Sengupta in sod., 2009), da se vrednosti prave izotermne relaksacije (angl. intrinsic relaxation) začno pojavljati šele pri napetostih pramen višjih od 50 % R_m , pri čemer se izgube zaradi relaksacije s povečevanjem napetosti v jeklu nad 70 % R_m začnejo izraziteje povečevati.



Slika 6.2: Izmerjene vrednosti upadlih sil ΔP (levo) in odvisnosti $P - \varepsilon$ (desno) vzorca pramena na vseh ravneh sil P_1 do P_8 preskusa relaksacije vzorca pramen R-2 po postopku za preiskavo sidra s kontrolirano hitrostjo vnosa sile na posameznih stopnjah sile P_i .

Figure 6.2: Measured values of decreased forces ΔP (left) and relation $P - \varepsilon$ (right) of a strand sample on all force levels P_1 to P_8 of relaxation test for sample R-2, performed by the anchors' investigation test procedure with controlled speed of loading at individual force level P_i .

Iz rezultatov vseh treh predhodno preskušanih vzorcev (glej [sliko F.12 dodatka F](#)) je razviden opazen raztros izvednotenih relaksacij ρ , kar še posebej velja za ravni nižjih preskusnih sil, medtem ko so vrednosti od vključno šeste stopnje naprej (torej od $P_6 = 163$ kN do $P_8 = 209$ kN) že precej bolj podobne. Na [sliki F.13](#) podajamo primerjavo rezultatov predhodnih preskušanj relaksacije za vzorce R-1 do R-3, dobljene po metodi za izvedbo PS (rezultati sedme stopnje sile), z rezultati standardiziranih preskušanj relaksacije pramen, kjer so natezne obremenitve pramen istega velikostnega reda. Če upoštevamo različni metodi preskušanja (zahteva *EN ISO 15630-3*, da moramo po vnosu sile v vzorec pramena raven sile 2' ohranjati na konstantni ravni pred izvedbo prvega odčitka, medtem ko pri PS z odčitovanjem prično tako po vnosu sile), je ujemanje rezultatov izredno dobro, pri čemer rezultati vzorcev R-1 do R-3 ob upoštevanju specifičnosti metod praktično padejo v območje rezultatov dobljenih po standardizirani metodi. Taki rezultati torej potrjujejo, da je z uporabljenimi opremo in načinom preskušanja možno izvesti preskušanja izotermne relaksacije po stopnjah sil faz PS, ter da je delovanje sistema vnosa sile v vzorce pramena z izmeničnim ročnim zategovanjem vijakov zadovoljivo in omogoča še dovolj hitro in natančno vnašanje sil na posameznih stopnjah P_i .

6.2 PRESKUŠANJA IZOTERMNE RELAKSACIJE PO STOPNJAH SIL PREISKAV SIDER S SPREMLJANJEM ČASA VNOSA SILE

Pri nadaljnjih preskusih izotermne relaksacije smo ohranili isti postopek preskušanja, kot smo ga za predhodna preskušanja vzorcev R-1 do R-3 opisali v [poglavju 6.1](#). Za zagotovitev neposredne primerljivosti s PS smo vsa nadaljnja preskušanja izvedli na vzorcih pramen $\varnothing 15,2$ mm trdnostnega razreda 1860 kN, odvzetih iz različnih kolutov in šarž istega tipa in istega proizvajalca pramen, kot so vgrajena v sidrih testnega polja. Prav tako smo postopek preskušanja nadgradili z izvajanjem meritev časov, potrebnih za vnos sil P_i , z namenom v največji možni meri omejiti oz. obvladovati raztros laboratorijskih rezultatov preskušanja izotermne relaksacije na vzorcih pramen po postopku, kot se v praksi izvajajo PS, obenem pa smo želeli tudi preveriti, ali so pogoji obremenjevanja pri laboratorijskem preskušanju relaksacije na vzorcih pramen neposredno primerljivi s pogoji pri PS na testnem polju, zabeleženem v

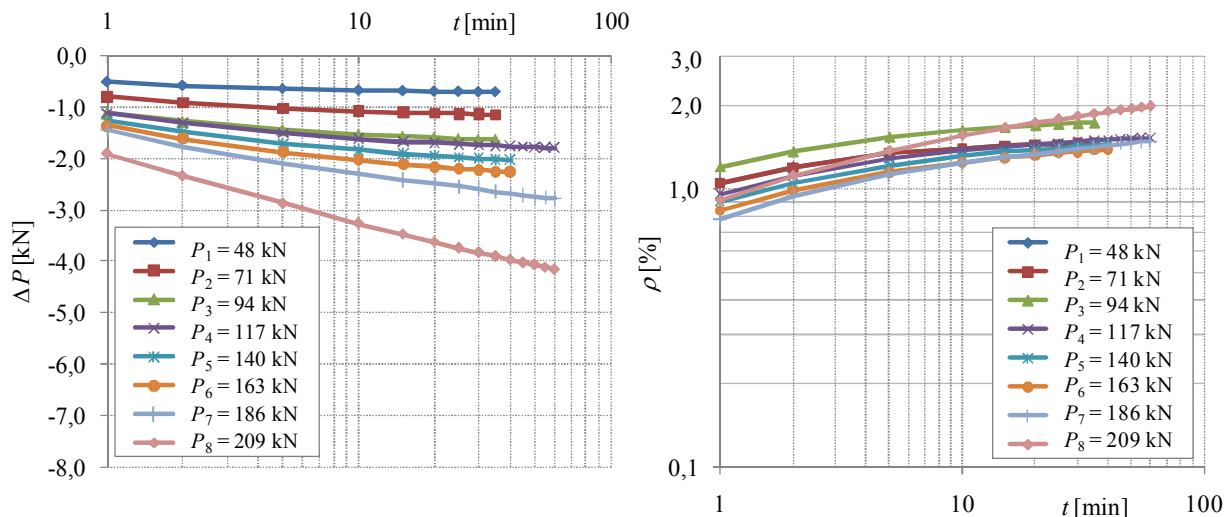
sklopu ponovitev preskušanj maja 2009. Podrobnejši prikaz in komentar primerjave potrebnih časov za vnos sile pri laboratorijskih preskušanjih izotermne relaksacije in preskusih sider na testnem polju so podani v [preglednici F.2 dodatka F](#). Na tem mestu povzemimo le, da so bile na vseh stopnjah PS hitrosti vnosa sile v sidra pri terenskih preskusih nosilnosti sider znotraj dovoljenega območja. Na drugi strani smo bili pri izvedbi laboratorijskih preskusov na stopnjah sile od P_3 naprej nekoliko počasnejši od časov, kot smo jih izmerili pri terenskem preskušanju. Pri visokih nateznih silah smo morali namreč skrbno paziti, da se je plošča napenjalne glave enakomerno (t.j. vzporedno) odmikala od bloka okvira, s čimer smo preprečevali morebitne poškodbe in zarezne učinke na mestih oprijema zagozd na zunanjih žicah vzorcev pramen. Ne glede na to ocenjujemo, da smo v sklopu laboratorijskega preskušanja zadovoljivo ponazorili hitrosti vnosa sile pri obremenjevanju pramen pri PS na terenu. Daljši časi vnosa sil pri laboratorijskih preskušanjih pravzaprav pomenijo, da se je, v primerjavi s PS na terenu, del padca sile izvršil že med vnosom sile, kar posledično pomeni, da so laboratorijski rezultati (tako v smislu padca sile ΔP kot tudi relaksacije ρ) v območju višjih stopenj sil P_i malenkost podcenjeni.

6.2.1 Postopek preskušanja izotermne relaksacije po fazah preiskav sider brez dodajanja upadlih sil

Laboratorijsko preskušanje izotermne relaksacije šestih vzorcev pramen (R-4 do R-9) po postopku za PS, opisanem v predhodnem poglavju, smo izvedli s spremljanjem časa vnosa sile na posameznih stopnjah sile P_i , pri čemer smo v prvi fazi postopek ohranili podoben standardiziranemu, zato upadlih sil pred izvedbo odčitkov sil nismo popravljali na izhodiščno vrednost. Podrobnejši prikaz rezultatov preskušanj podajamo v [poglavju F.3.3.1](#), pri čemer na [sliki F.16](#) podajamo izmerjene vrednosti upadlih sil ΔP med preskusi izotermne relaksacije vzorcev pramen R-4 do R-9 po postopku za PS s kontrolirano hitrostjo vnosa sile na stopnjah sile P_2 , P_4 , P_6 in P_8 , medtem ko na [sliki F.17](#) za iste vzorce na istih stopnjah sile podajamo še izvrednotene vrednosti relaksacije ρ . Rezultati kažejo dobro ujemanje, saj so vse krivulje medsebojno praktično vzporedne, prav tako pa se nahajajo na ozkem območju. Vzrok za raztros krivulj diagramov različnih vzorcev pri istih silah se skriva v različnih hitrostih vnosa sile: pri prvih vzorcih (predvsem vzorca R-4 in R-5) še nismo bili dovolj spretni in hitri pri privijanju vijakov napenjalne glave, zato se je lahko, zaradi počasnejšega vnosa sile, določen upad sile izvršil še predno smo lahko izvedli prvi odčitek. Pri vzorcih R-4 in R-5 smo zagozdi v kotev le namestili (ne pa tudi ročno vtisnili), prav tako pa je v prizadevanjih, da bi silo vnesli v čim krajšem času, med vnašanjem sile nekajkrat prišlo do hipnega privzdiga in nato padca togega jeklenega okvira, zaradi česar je lahko prišlo do določenih pomikov na preskuševalni napravi z vzorcem. Zaradi tega smo pri preskušanjih naslednjih vzorcev togi jekleni okvir dodatno pritrdili, prav tako pa smo modificirali namestitev zagozd v kotvah tako, da smo jih ročno vtisnili v konusni odprtini obeh kotev. Ukrepa sta se izkazala kot uspešna, kar potrjuje večja skladnost rezultatov vzorcev R-6 do R-9.

Na [sliki 6.3](#) so prikazane povprečne vrednosti izmerjenih padcev sil in izvrednotenih vrednosti relaksacije za vzorce R-4 do R-9: vidimo lahko, da vrednosti relaksacije naraščajo do stopnje P_3 , nato pa kljub naraščanju stopenj sil P_i padajo do vključno faze $P_7 = 186 \text{ kN}$ (71 % R_m), največje prirastke pa dosežejo na zadnji stopnji sile $P_8 = 209 \text{ kN}$ (80 % R_m). Ob tem velja ponovno opozoriti, da se pojav izotermne relaksacije, kot je poznan pri pramenih prednapetih konstrukcij, v tem primeru pravzaprav v izraziti obliki pojavlja le v zadnjih dveh fazah preskusov. Čeprav v predhodnih fazah ne moremo govoriti o izotermni relaksaciji, pač pa le o padcih sile, ki so posledica mehanizma oprijema čeljusti in raznosa sil med žicami vzorca pramena, pa na nižjih ravneh sile pojav s stališča izvedbe PS ni nič manj pomemben – nasprotno, prav ti padci sile pojasnjujejo pretežni del upadlih sil, ki jih moramo zaradi zahtev *SIA 267/I* stalno popravljati, zaradi česar pride do pojava dodatnih izvlečkov pramen kabla sidra, ki

jih po znani metodologiji preračunamo v mere lezenja k . Visoke vrednosti mer lezenja k v prvih fazah PS torej (pričakovano) ne odražajo manjše odpornosti na izvlek veznih delov sider, pač pa so v pretežni meri posledica slabšega mehanskega oprijema čeljusti napenjalk pri nižjih stopnjah sile PS.



Slika 6.3: Izmerjene povprečne vrednosti upadlih sil ΔP (levo) in izvrednotene vrednosti relaksacije ρ (desno) med preskusi relaksacije vzorcev R-4 do R-9 po postopku za preiskavo sidra s spremljanjem časa vnosa sile (brez dodajanja upadlih sil).

Figure 6.3: Values of decreased forces ΔP (left) and values of relaxation ρ (right) obtained during the relaxation tests of samples R-4 to R-9 by the anchors investigation test procedure with time registration for loading (without supplements of decreased forces).

6.2.2 Vpliv ponovitve postopka preskušanja izotermne relaksacije po fazah preiskav sider brez dodajanja upadlih sil

V praksi se pogosto dogaja, da so v primeru takojšnjega zaporednega izvajanja preskusov nosilnosti sider (CPN ali EPN) drugega za drugim, pri ponovitvi preskusa nosilnosti padci sil v posameznih časovnih intervalih manjši, prav tako pa so ugodnejši rezultati v smislu manjših izvlečkov oz. nižjih vrednosti mer lezenj k . Postavlja se vprašanje, ali na pramenih sider do padca sile zaradi relaksacije pride le pri prvem obremenjevanju, nato pa padca sile ni več oz. je minimalen, ali pa se v pramenih pri popolni razbremenitvi kmalu vzpostavi začetno stanje in se bodo pri ponovni obremenitvi pojavili padci sile zaradi relaksacije podobnega velikostnega reda kot pri prvi obremenitvi.

V iskanju odgovora na odprto vprašanje smo na vzorcu R-9 izvedli ponovitvi postopka preskušanja izotermne relaksacije po fazah PS s spremljanjem časa vnosa sile, a brez dodajanja upadlih sil. Preskuse smo izvedli tako, da smo vzorec pramena le razbremenili, ne pa tudi odstranili iz preskuševalne naprave, s čimer smo ohranili dober oprijem zarez zagozd na žice vzorca pramena v območju obeh kotev tudi v prvih fazah preskušanja pri nizkih stopnjah sil. Po prvem preskusu relaksacije do preskusne sile $P_8 = 209$ kN (čas opazovanja na zadnji stopnji sile 15 ur), smo vzorec pramena razbremenili na začetno silo $P_a = 25$ kN, nato izvedli odčitek, nakar smo pramen popustili vse do minimalne sile 4,8 kN, ki je še zagotavljala oprijem zagozd na žice pramena v kotvah. V roku 5' je sila na razbremenjenem vzorcu narastla za 2,0 kN, zato smo silo ponovno spustili na 3,5 kN, pri čemer je sila v 90' ponovno narastla na 4,7 kN. Silo smo spet spustili na 2,5 kN, pri čemer se je sila na razbremenjenem vzorcu v 30' ponovno dvignila na 2,8 kN. Na istem vzorcu smo nato ponovili celoten preskus relaksacije po postopku za PS,

pri čemer smo vzorec označili kot R-9p1. Po zadnjem odčitku (t.j. po 60' na zadnji stopnji pri sili $P_8 = 209$ kN) smo vzorec razbremenili na minimalno silo 3,5 kN in ga tako razbremenjenega pustili v preskuševalnem okviru za 14 ur. Pred začetkom novega cikla preskušanj smo izmerili silo v razbremenjenem vzorcu, ki se je v tem času dvignila iz 3,5 kN na 5,0 kN. Na vzorcu, ki smo ga označili kot R-9p2 smo nato ponovili celoten preskus relaksacije po postopku za PS. Diagrami z izmerjenimi vrednostmi upadlih sil ΔP za ravni sil $P_2 = 71$ kN, $P_4 = 117$ kN, $P_6 = 163$ kN in $P_8 = 209$ kN so prikazani na diagramih na [sliki F.18](#), iz katerih je razvidno, da so bili skladno s pričakovanji največji padci sile izmerjeni pri prvem preskusu. V prvem delu prvega ponovljenega preskušanja so bili padci sile na stopnji sile P_2 20 do 24 %, na stopnji sile P_4 pa 25 do 28 % padcev sile pri prvem preskusu; s povečevanjem obremenitev vzorca pramena so se povečevali tudi padci sile v drugem delu prvega ponovljenega preskušanja, tako da so pri sili P_6 znašali med 36 in 38 %, pri sili P_8 pa že med 43 in 46 % padca sile pri prvem preskusu. Pri drugi ponovitvi v prvem delu preskušanja so bile ravni padcev sile praktično istega velikostnega reda, kot pri prvi ponovitvi preskušanja, medtem ko so bili v drugem delu preskušanja padci sile še nižji in so pri sili P_6 znašali med 24 in 27 %, pri sili P_8 pa že med 28 in 32 % padca sile pri prvem preskusu.

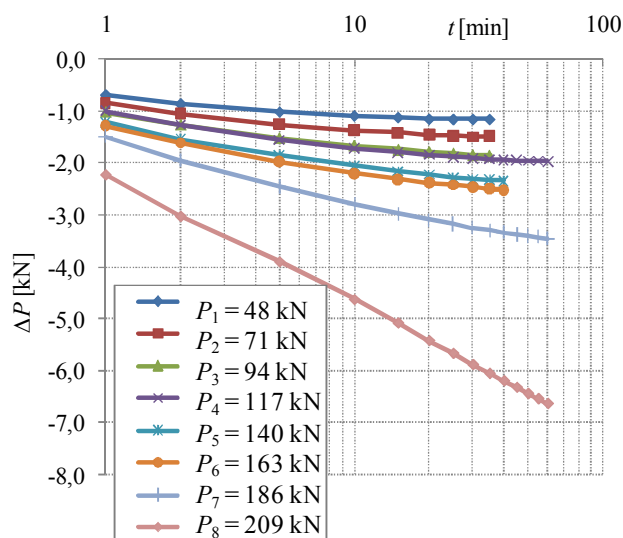
Rezultati ponovitev preskusov izotermne relaksacije na vzorcu R-9 kažejo:

- Mehanizem delovanja natezno obremenjenega vzorca pramena pri nižjih silah (vpliv mehanizma oprijema čeljusti in raznosa sile po žicah pramena) je drugačen od mehanizma pri višjih silah (vpliv tipične relaksacije pramena). Glede na to, da vzorca pramena med preskusi nismo odstranjevali iz naprave, v prvem delu ni moglo priti do zdrsa na stiku zagozd in zunanjih (spiralnih) žic pramena, saj so se nabrazdane površine zagozd v te zunanje žice dobro vtisnile že pri predhodnem preskusu relaksacije, pač pa je očitno prišlo do prevladujočega vpliva mehanizma prenosa sile z zunanjih žic na notranjo (osrednjo) žico pramena, ki je v celoti odvisen samo od trenja, ki pa na ravneh nizkih sil očitno ni zadostno, da bi preprečilo zdrs na stiku zunanjih spiralnih žic z ravno osrednjo žico.
- Rezultati zaporedno ponovljenih preskušanj vzorca R-9 nakazujejo, da lahko z vsakim zaporedno ponovljenim preskusom relaksacije, izvedenim na enak način, pričakujemo, da bodo izgube zaradi relaksacije upadale in bodo vedno manjše, vendar pa bodo še vedno prisotne. Torej lahko ugotovimo, da pojav relaksacije ni samo posledica dislokacij kristalov, saj se kristali niso mogli obnoviti, ker za to ni bilo ustreznih pogojev (povišane temperature), pač pa lahko ta del izgub zaradi relaksacije pripišemo medsebojnemu delovanju žic pramena, ki se pri visokih natezih obremenitvah medsebojno ulegajo, zunanje spiralne žice pa se poskušajo poravnati, s čimer na stiku žic prihaja do pojava trenja. Zaključek zaporedno izvedenih ponovitev torej nakazuje, da pri dovolj visokih natezih obremenitvah pramena (nekje nad 60 % natezne trdnosti pramena R_m) do določenega deleža izgub zaradi relaksacije pride le enkrat (torej pri prvi obremenitvi vzorca) in bi ga lahko povezovali z dislokacijo kristalov jekla, medtem ko do deleža izgub, ki se navezujejo na ravnanje spiralnih žic pramena, prihaja pri vsaki ponovni obremenitvi pramena. Podobno smo ugotovili tudi pri ponovitvi preskusa izotermne relaksacije na vzorcu RV-1388, ki je bil najprej preskušen po standardu *EN ISO 15630-3* v trajanju 1000 ur pri sili 196,84 kN, nakar je bil vzorec odstranjen iz preskuševalne naprave. Po enajstih dneh smo ga ponovno namestili v preskuševalno napravo in na njem izvedli preskus izotermne relaksacije po postopku za PS. Na ravneh sile P_7 , kot tudi sile P_8 , pri preskušanju relaksacije po postopku za PS je bil naklon krivulje lezenja nekoliko manjši od naklona krivulje, dobljene po standardiziranem postopku, tako da lahko na podlagi enega ponovljenega preskusa le indikativno ugotovimo, da so rezultati pri ponovljenem preskusu relaksacije na isti ravni natezne sile pri ponovljenem preskusu nekoliko nižji, vendar pa bi bilo za natančnejšo oceno dolgoročnega vpliva na zmanjšanje vrednosti ρ potrebno izvesti še dodatna preskušanja.

6.2.3 Postopek preskušanja izotermne relaksacije po stopnjah sil faz preiskav sider z dodajanjem upadlih sil s spremljanjem časa vnosa sile

Za najbolj verno ponazoritev dogajanja v pramenih kabla sidra med izvedbo PS, kot se dejansko izvaja v praksi, moramo pred vsakim odčitkom izvlečka pramen sidra najprej dodati delež upadle sile ΔP do ravni izhodiščne vrednosti sile P_i , s čimer se vzorcu pramena s temi dodajnji upadlih sil neprestano vsiljujejo motnje napetostnega stanja. Zaradi tega je pričakovati, da bo takšno stalno dodajanje upadlih sil na nek način povečalo intenziteto procesa relaksacije, torej bodo izmerjene vrednosti padlih sil ΔP oz. izvrednotene vrednosti relaksacije ρ na ravni posameznih sil P_i višje kot v primerih preskušanj, kjer sil nismo dodajali. S takim postopkom preskusa izotermne relaksacije natančno ponazorimo dogajanje v pramenih, a se na drugi strani odmikamo od postopka preskušanja izotermne relaksacije po standardu *EN ISO 15630-3*.

Modificirane preskuse izotermne relaksacije po postopku za PS s stalnim dodajanjem upadle sile na začetno vrednost P_i posamezne faze smo izvedli na vzorcih RPR-1 do RPR-3, pri čemer smo preskušanja izvedli po popolnoma enakem postopku kot pri vzorcih R-4 do R-9 (postopek za PS s kontrolirano hitrostjo vnosa sile na posameznih stopnjah sile) z edino razliko, da smo pred izvedbo odčitka v vsakem časovnem intervalu silo popravili na začetno raven sile P_i te faze. Način izvedbe in časovno dinamiko popravkov sile smo izvedli na identičen način, kot se to v praksi izvaja pri izvedbi PS. Vrednosti upadlih sil smo v vsaki fazi kumulativno seštevali, pri čemer so povprečne vrednosti vseh treh sider RPR po posameznih stopnjah sile prikazane na [sliki 6.4](#).



Slika 6.4: Izmerjene povprečne vrednosti upadlih sil ΔP pri preskusih relaksacije vzorcev pramen RPR po postopku za preiskavo sidra s stalnim dodajanjem upadlih sil s spremljanjem časa vnosa sile.

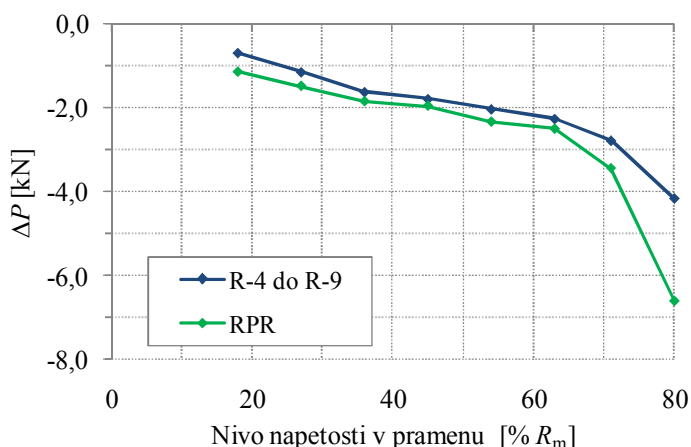
Figure 6.4: Average values of decreased forces ΔP measured at the relaxation tests of strand samples RPR performed by the anchors' investigation test procedure with permanent supplement of decreased forces and with time registration for loading.

Primerjava [slike 6.4](#) z diagramom na [sliki 6.3](#) (levo), kjer so prikazane krivulje vzorcev R-4 do R-9 preskušanih na enak način (a brez dodajanja upadlih sil ΔP) pričakovano pokaže, da so deleži upadlih sil ΔP z neprestanim dodajanjem upadlih sil na vseh stopnjah sil P_i večji: na prvih dveh stopnjah sile so ves čas večji za 5 do 66 %, medtem ko so na stopnjah sile P_3 do P_6 pri prvih dveh odčitkih sicer nekoliko manjši, a z opazovanjem upadle povprečne sile vzorcev RPR presežejo povprečne sile vzorcev R-4 do R-9 za do 16 %, medtem ko na zadnjih dveh stopnjah povprečne sile vzorcev RPR ves čas do 59 % presegajo povprečne sile vzorcev R-4 do R-9.

Za boljši vpogled v rezultate izotermne relaksacije brez dodajanja upadlih sil (vzorci R-4 do R-9) ter z dodajanjem upadlih sil (vzorci RPR-1 do RPR-3) smo na [sliki F.22](#) primerjali končne povprečne vrednosti

relaksacij obeh tipov preskusov. Iz prikaza je razvidno, da je vpliv stalnih dodajanj sile pri vzorcih RPR največji na samem začetku preskušanj, kjer so padci sile predvsem posledica mehanizma vnosa sile v žice pramena, nato pa se s povečevanjem nateznih obremenitev vzorcev pramen zmanjšuje. Po stopnji $P_6 = 163 \text{ kN}$ ($63 \% R_m$), kjer je upad sile očitno posledica relaksacije, kot se pojavlja pri prednapenjanju konstrukcij, pa upadi sil s povečevanjem sile začnejo hitreje naraščati, kar še posebej velja za vzorce tipa RPR, pri katerih smo upadle delež sil stalno popravljali na začetno raven.

Na [sliki 6.5](#) smo iste podatke prikazali še v obliki upada sil, pri čemer so na diagramu prikazane končne povprečne vrednosti upadlih sil na posamezni stopnji sile (vzorci R-4 do R-9) oz. kumulativne končne povprečne vrednosti upadlih sil na posamezni stopnji sile (vzorci RPR-1 do RPR-3), prikazane glede na raven napetosti v vzorcu pramena. Iz diagrama je jasno razvidno, da so na vseh ravneh sile P_i končne povprečne vrednosti upadlih sil v primerih, ko smo upadle sile stalno dodajali oz. popravljali na začetno raven sile, višje kot v primerih, ko upadlih sil nismo popravljali. Iz obeh diagramov je tudi opaziti, da se začne upad sil v primerih, ko natezne napetosti prekoračijo $60 \% R_m$, povečevati, kar še posebej velja za primere stalnega popravljanja sil. To pomeni, da k povečanim vrednostim mer lezenja k na zadnji stopnji PS ne prispeva samo popuščanje veznega dela sidra, pač pa tudi relaksacija pramen prostega dela kabla sidra, ki se v notranjosti vrtine zaledja v pretežni meri odvija v izotermnih pogojih.



Slika 6.5: Končne povprečne vrednosti upadlih sil ΔP vzorcev pramen $\varnothing 15,2 \text{ mm}$ trdnostnega razreda 1860 MPa istega proizvajalca glede na raven napetosti v vzorcih pramena.

Figure 6.5: Final average values of decreased forces ΔP for strand samples $\varnothing 15,2 \text{ mm}$ of grade 1860 MPa (all made by the same manufacturer) as regards the stress level in the strand samples.

6.3 ZAKLJUČKI LABORATORIJSKEGA PRESKUŠANJA IZOTERMNE RELAKSACIJE JEKLENIH PRAMEN ZA POTREBE PRESKUŠANJA SIDER

Pri oceni padcev sile v zaklinjenih sidrih objektov lahko uporabimo pristop in metodo standardiziranega preskušanja jeklenih pramen za prednapenjanje konstrukcij, čeprav je ob tem še vedno treba dodatno upoštevati značilnosti sidranja objektov z vgrajenimi trajnimi prednapetimi geotehničnimi sidri, ki so posledica dolgoročnih vplivov sprememb v smislu premikov zaledja, sprememb hidroloških razmer v tleh zaledja kot tudi sprememb v okolici sidranega objekta, na velikosti sidrnih sil. Vendar pa s tako metodo ne moremo zajeti vplivov, kot se pojavljajo med preskušanjem nosilnosti prednapetih geotehničnih sider, zato smo od standardizirane metode privzeli le osnovne zahteve za preskuševalni sistem, natančnost zajemanja podatkov in pogoje okolja preskušanja. Po drugi strani smo na vzorcih pramen

Ø 15,2 mm trdnostnega razreda 1860 kN, kot so vgrajena tudi v sidrih testnega polja opornega zidu OZ-05, sam postopek, glede na dostopne vire, kot prvi na svetu izvedli po obremenilnih stopnjah in konceptu cikličnega stopnjema povečujoče se ravni sile, kot smo ga izvajali pri PS in VPN na testnem polju. Cilj naših preskušanj je bil ugotoviti, kako se med različnimi stopnjami PS razvija upad sile ΔP , do katerega sicer prihaja že od prve stopnje sile PS naprej, a ga ne moremo povezovati niti s pojavom tipične relaksacije pramen, kot jo poznamo pri prednapenjanju konstrukcij, niti z mehanizmom delovanja veznega dela sidra. Po drugi strani je bil cilj preskušanja vplivov padcev sile zaradi relaksacije po postopku za PS ugotoviti velikostni red upadlih sil pred izvedbo odčitka na posamezni stopnji sile P_i med PS, na podlagi katerega bi lahko presojali o upravičenosti zahteve po popravljanju upadlih sil pred izvedbo odčitka na posamezni stopnji sile P_i med PS, kar eksplicitno predpisuje le švicarski standard *SIA 267/1*, medtem ko v veljavnem izvedbenem standardu *EN 1537*, kot tudi osnutku standarda *oSIST prEN ISO 22477-5*, to ni predvideno.

Rezultati opravljenih laboratorijskih preskusov izotermne relaksacije so pokazali, da do padca sile ΔP pride na vseh ravneh sil P_i PS, pri čemer se vpliv padcev sile v natezno obremenjenih pramenih z naraščanjem stopnje sile, pa tudi s podaljševanjem opazovalnih časov, opazno povečuje. Edino odstopanje od te trditve smo zaznali le pri prehodu med mehanizmoma, ki sta vzrok za padce sile ΔP : na začetnih stopnjah sil P_i smo padce sile povezovali z vplivom oprijemanja čeljusti v zunanje spiralne žice pramena ter vplivom zdrsra med zunanjimi spiralnimi in osrednjo ravno žico pramena, medtem ko se na višjih ravneh sil P_i začne pojavljati tipična relaksacija pramen, kot jo poznamo pri prednapenjanju konstrukcij.

Pri opravljenih preskušanjih so se potrdile ugotovitve tujih raziskovalcev, da je za uspešno izvedbo preskusov izotermne relaksacije zelo pomemben detajl vnosa sile v žice pramena, pri čemer je pri presoji rezultatov laboratorijskih preskušanj izotermne relaksacije glede na in-situ PS treba upoštevati še dve značilnosti: (1) pri laboratorijskih preskušanjih je za vnos sile pomemben oprijem zagozd na obeh konceh vzorca pramena, medtem ko so v praksi pramena v veznem delu sider zalita v cementni injekcijski masi in se vnos sile v sidro preko zagozd oz. čeljusti skupne napenjalke oz. mononapenjalk izvaja le v območju glave sidra ter (2) pričakovati je, da je stanje površine čeljusti skupne napenjalke (oz. mononapenjalk) slabše od stanja zagozd uporabljenih pri naših laboratorijskih preskušanjih, posledično bodo upadi sil ΔP na začetnih stopnjah sil P_i PS intenzivnejši. Na [sliki 3.40](#) podajamo primerjavo rezultatov opravljenih laboratorijskih preskušanj izotermne relaksacije pramen po postopku za PS z dejansko izmerjenimi vrednostmi dejansko upadlih sil, izmerjenih med ponovljenimi preskušnji na testnem polju maja 2009, iz katerih lahko ugotovimo, da so si diagrami vseh tipov sider (RCP/D, RCP/D-I, RCP/D-K in RCP/D-Z) v principu po obliki precej podobni, pri čemer pa je na izmerjene vrednosti opazno vplivala zasnova in delovanje veznega dela sidra, od katerih je bilo odvisno do katere ravni sile P_i je vezni del sidra še lahko prevzemal obtežbo.

Podrobneje je prispevek opravljenega eksperimentalnega dela v sklopu opravljenih laboratorijskih preskušanj izotermne relaksacije jeklenih pramen Ø 15,2 mm trdnostnega razreda 1860 kN, po postopku za PS, podan v [dodatku F](#). Na tem mestu povzemamo le najpomembnejše zaključke:

- Čeprav so opazovalni časi spremljanja upada sil ΔP pri PS (običajno do ene ure) bistveno krajši od opazovalnih časov pri standardiziranem preskusu relaksacije (1000 ur), je preskušanje izotermne relaksacije pramen po stopnjah sil PS z razpoložljivo opremo izvedljivo in daje konsistentne rezultate, kar potrjujejo tako smiselna primerjava med rezultati dobljenimi po standardizirani metodi in po stopnjah sile PS, kot tudi medsebojna primerjava rezultatov preskusov izotermne relaksacije

dobljenih po različnih variantah (dodajanje upadlih sil, ponovitev preskušanj, namestitve vzorca v preskuševalno napravo).

- Tako in-situ PS kot tudi laboratorijski preskusi izotermne relaksacije kažejo, da med izvedbo PS na vseh ravneh sil P_i prihaja do padcev sile ΔP , kar povezujemo z dvema mehanizmoma: (1) na začetnih stopnjah (nizke stopnje sile P_i) imata na padec sile ΔP prevladujoč vpliv oprijem čeljusti oz. zagozd v zunanje spiralne žice pramena ter zdrs med zunanjimi spiralnimi in osrednjo ravno žico pramena, medtem ko se (2) na višjih stopnjah sile P_i (napetosti v območju nad 60 % R_m) začne pojavljati tipična relaksacija pramen, kot jo poznamo pri prednapenjanju konstrukcij.
- Na dejansko vrednost sile v natezno obremenjenih pramenih kabla sidra med PS vplivajo naslednji faktorji:
 - Prvi pomemben parameter na začetnih ravneh sil P_i PS je kakovost stika med narebreno površino zagozd oz. čeljusti ter površino zunanjih spiralno zavitih žic pramen, na kar vpliva predvsem kakovost narebrene površine kot tudi raven natezne sile. Čeprav je površina kotev konusno oblikovana so normalne napetosti, ki delujejo v radialni smeri glede na os pramena, zaradi nizke natezne sile v pramenu relativno nizke, zato ni pričakovati, da bi se zagozde že lahko zajedle v površino zunanjih spiralnih žic pramena, tako lahko na tem mestu prihaja do določenih zdrsov.
Čeljusti skupne napenjalke oz. mononapenjalk pri izvedbi preskusov nosilnosti v praksi so v uporabi dlje časa, z vsako nadaljnjo uporabo napenjalke se njihovo stanje slabša, pri čemer pa je pred pojavom opaznega zdrsovanja težko oceniti, kolikšni so med preskusom nosilnosti upadi sil, ki so posledica izrabljenosti čeljusti napenjalke. Vpliv obrabljenih čeljusti je največji v območju nižjih sil, kjer so sile še tako nizke, da (obrabljena) narebrana površina čeljusti ne more zarezati v površino žic pramena, kar se posledično izkazuje v večjih izvlečkih, preko njih pa tudi večjih vrednostih mer lezenja k , čeprav le-te niso posledica popuščanja sidra v veznem delu v vezi s tlemi zaledja.
 - Drugi pomemben parameter na začetnih ravneh sil PS je zdrs med zunanjimi in osrednjo žico pramena. Zaradi nizke natezne sile so nizke tudi tlačne napetosti v radialni smeri, zato v lokalnem območju pramen (tudi zaradi morebitnih ostankov maziva še iz proizvodnje pramena) prihaja do zdrsa na stiku osrednje žice z ostalimi šestimi zunanjimi spiralno zaviti žicami pramena, zaradi česar so napetosti v osrednji žici nižje kot v ostalih zunanjih žicah pramena.
 - Tako pri terenskih preskusih sider kot tudi laboratorijskih preskusih pramen pri začetnem vnosu sile pride do usedanja preskusnega sistema v območju vnosa sile: pri laboratorijskih preskušanjih sta to območji obeh zaklinjenj (stik kotve, dinamometra in bloka jeklenega okvira ter napenjalna glava s kotvo in odprtina v bloku jeklenega okvira), pri terenskih preskušanjih sider pa z vnosom sile v sidro pride do stisnjenja oz. pomikov sistema jeklenih delov glave sidra z dinamometrom ter premikov na stiku skupne napenjalke (oz. mononapenjalk) na stiku s podložno ploščo. V primeru, da sidro ni vgrajeno povsem centrično in/ali pravokotno na naležno površino sidranega objekta, je vpliv medsebojnega usedanja elementov še izrazitejši.
- Pri laboratorijskih preskušanjih je bil največji vpliv stalnega dodajanja upadlih sil ΔP (pred izvedbo odčitkov v posameznih časovnih intervalih) opazen na samem začetku preskušanj, kjer so padci sile predvsem posledica mehanizma vnosa sile v žice pramena, in se s povečevanjem nateznih obremenitev vzorcev pramen zmanjšuje. V srednjem območju obremenitev pramena (napetosti nekje med 35 in 60 % R_m) je bil vpliv stalnega dodajanja upadlih sil praktično zanemarljiv, vendar pa spet pride do izraza pri višjih obremenitvah ($\sigma > 60$ % R_m), kjer je prisotna tipična relaksacija poznana iz prednapenjanja konstrukcij (angl. intrinsic relaxation), kjer so upadi sile zaradi stalnega

dodajanja upadlih sil bistveno bolj izraziti. Ocenjujemo, da je na podlagi ugotovljenih dejstev, kot tudi precejšnje občutljivosti preskusa izotermne relaksacije na hitrost vnašanja upadlih sil na začetno raven, priporočljivo, da laboratorijske preskuse izotermne relaksacije po postopku za PS izvedemo brez dodajanja upadlih sil.

- Na ravneh prvih stopenj sile PS, izvedenih in-situ, so izmerjeni izvlečki in iz vrednotene mere lezenja k v pretežni meri posledica delovanja najrazličnejših motečih faktorjev in neposredno ne odražajo obnašanja veznega dela sidra, zato v tem območju sil s stalnim popravljanjem upadlih sil vpliv teh motečih dejavnikov še povečujemo. Na višjih stopnjah sile P_i je prisoten stalen upad sile v pramenu, ki pa pod pogojem brezhibnega stanja in delovanja opreme za napenjanje (hidravlične črpalke, hidravličnega razvoda in mononapenjalk) ostaja v omejenem obsegu vse do pojava prave relaksacije ($\sigma > 60 \% R_m$), nato pa se glede na rezultate opravljenih laboratorijskih preskusov upad sil začne opazno povečevati, tako da na zadnji stopnji sile PS v roku ene ure kumulativna vrednost upadlih sil znaša do 3,3 %: v praksi pri 6-pramenskem sidru to pomeni, da v roku ene ure iz naslova relaksacije pramen, na ravni preskusne sile ($80 \% R_m$), preskusna sila v sidru upade za približno 40 kN. Upadle sile bi pred izvedbo odčitkov lahko popravili na predpisano raven, vendar bi bilo treba za zagotovitev potrebne natančnosti postaviti višje zahteve za ločljivost dinamometrov, v primerjavi z dinamometri, ki se sedaj uporabljajo pri PS in preskusih nosilnosti prednapetih geotehničnih sider. V takem primeru je ocena odpornosti preskusnega sidra na izvlek na varni strani, saj zaradi stalnega dodajanja upadlih sil sidro preskušamo pri ostrejših pogojih, kot če upadlih sil ne bi stalno dodajali, zaradi česar so pričakovani večji izvlečki pramen, višje mere lezenja k , s tem pa tudi manjša vrednost odpornosti preskusnega sidra na izvlek.
- V sklopu izvedenih preskušanj smo iskali tudi načelni odgovor na vprašanje, pomembno tudi za izvajanje zaporedno ponavljajočih preskusov nosilnosti sider v praksi, torej kolikšen je vpliv zaporednega ponavljanja preskušanj prednapetih geotehničnih sider na velikosti upadlih sil. Zanimalo nas je, ali na pramenih do padcev sile pride le pri prvem obremenjevanju, nato pa teh padcev ni več oz. so minimalni, ali pa se v pramenih pri popolni razbremenitvi vzpostavi začetno stanje in se bodo pri ponovni obremenitvi pojavili padci v povezavi s širšim vidikom relaksacije podobnega velikostnega reda kot pri prvi obremenitvi. Ugotovili smo, da so bili največji padci sile prisotni pri prvem preskusu, pri takojšnji drugi ponovitvi preskusa so bili manjši, pri takojšnji tretji zaporedni ponovitvi preskusa pa so bili še manjši. V vmesnih časih razbremenitve med posameznimi zaporednimi preskusi izotermne relaksacije smo opazili pojav obratne relaksacije, ko se stanje med žicami minimalno napetega pramena umirja, pramen pa sprošča silo in prehaja v začetno stanje. Zanimivo bi bilo izvesti potrditveni preskus na instrumentiranem sidru, vgrajenem v tla zaledja, pri katerem bi lahko beležili stanje v sidru in morebiti tudi v injekcijski masi tako pri prvem, kot tudi pri ponovljenem preskusu.

Sklop D

ZAKLJUČKI



7 POVZETEK IN ZAKLJUČKI

Osrednji cilj disertacije – v praksi izvesti in preskusiti prednapeta pramenska geotehnična sidra s skupnim zaščitnim polietilenskim ovojem s tremi različnimi koncepti modificiranih veznih delov – smo uspešno dosegli. Pripravili smo tehnološke detajle za izvedbo modificiranih tipov sider, pri čemer so bila sestavljena in preskušena sidra naslednjih modificiranih tipov:

- sidra s povečano togostjo veznega dela, z dodatnimi žicami v veznem delu sidra (tip RCP/D-K),
- večkratna sidra po konceptu Barleya, le da podsidera v isto vrtino niso bila vgrajena kot samostojni sklopi, pač pa smo tri podsidera, z dolžinami veznega dela po 2,2 m, medsebojno zamaknjeno namestili v skupno rebrasto polietilensko cev (tip RCP/D-Z),
- sidra spremenljive togosti po patentu Škrabla, katerih kabel sidra je bil prav tako razdeljen v tri podsidera, pri čemer so dolžine veznega dela podsider znašale 7,0 m, 4,6 m in 2,2 m, prostega dela pa 28,0 m, 30,4 m in 32,8 m (tip RCP/D-I).

V testno polje so bila vgrajena tri referenčna sidra RCP/D in po pet modificiranih sider vsakega tipa. Preiskave sider in večstopenjske preskuse nosilnosti sider smo izvedli s pomočjo izvajalca sidrskih del GEOT, d.o.o.. Zasnovali in pripravili smo računalniško orodje s katerim smo zabeležili vse odčitke in med preskusi uspešno nadzirali dogajanje v preskusnih sidrih. Potrdimo lahko, da so modificirana sidra v praksi izvedljiva, postopki preskušanja modificiranih tipov sider in izločanja porušeni pramen sidra so preverjeni, razvito računalniško orodje in oprema izvajalca pa zagotavljata pogoje za izvedbo takšnih sider v praksi v prihodnje.

Rezultati opravljenih preskušanj, dobljeni po metodi IP, so pokazali, da smo največje odpornosti na izvlek dosegli z modificiranimi sidri RCP/D-K s povečano togostjo veznega dela sidra, katerih povprečna odpornost na izvlek je za 16 % preseгла povprečno odpornost referenčnih sider RCP/D. Dobra odpornost sider RCP/D-K je bila dosežena kljub temu, da je bila notranjost rebraste polietilenske cevi veznega dela sider RCP/D-K močno zapolnjena in za povečanje togosti nismo mogli namestiti v osnovi predvidenih pramen \varnothing 12,5 mm, pač pa le žice \varnothing 5 mm. Pri sidrih RCP/D-Z in RCP/D-I sta na obnašanje sider ključno vplivala kontaminacija površine pramen in potek pramen v veznem delu, dodatno pa so razmere v notranjosti rebraste PE cevi poslabšali mehki in relativno veliki tesnilni stiki prostega in veznega dela pramen podsider. Na testnem polju so se najslabše obnesla sidra RCP/D-Z, katerih vezni deli sider so popustili pri nižjih stopnjah sile preiskav sider in večstopenjskih preskusov napenjanja, v vseh primerih je prišlo do popuščanja vezi pramen s cementno injekcijsko maso. V kolikor s primernimi ukrepi oblikovanja veznega dela pramen uspemo preprečiti izvlačanje pramen iz injekcijske mase v notranjosti rebraste polietilenske cevi, potem bi morali s sidri tipa RCP/D-Z po izkušnjah Barleya doseči najmanj takšne odpornosti sider na izvlek, kot pri referenčnih sidrih RCP/D.

S preskušanjem domneve o pričakovani vrednosti smo s 5 % tveganjem ugotovili, da je povprečna odpornost na izvlek sider RCP/D-Z statistično značilno manjša od povprečne odpornosti na izvlek referenčnih sider RCP/D in sider RCP/D-K, medtem ko se odpornosti na izvlek sider RCP/D-I nahajajo med vrednostmi sider RCP/D-K in RCP/D ter sider RCP/D-Z. Dosežene odpornosti na izvlek sider RCP/D, RCP/D-K, RCP/D-Z in RCP/D-I podajajo razmerja med nosilnostmi veznih delov sider in so posledica zasnove, oblikovanja, izdelave in vgradnje konkretnih sider testnega polja; v primeru izboljšanja določenih tehnoloških detajlov modificiranih sider pričakujemo, da bi z njimi dosegli večje odpornosti na izvlek, možno pa je tudi, da bi se kot najboljši tip modificiranega sidra namesto tipa RCP/D-K morda lahko pojavil kakšen drug tip sidra.

Splošne značilnosti posebnosti obnašanja sider testnega polja lahko strnemo v naslednje točke:

- Ukrep izločanja posameznih porušenih pramen iz skupnega hidravličnega sistema pri preiskavah sider oz. večstopenjskih preskusih napenjanja se je v praksi izkazal kot možen in uporaben, v bistveno večji meri pa bi ga lahko izkoristili v primeru, ko se vezni deli pramen sider pri preskušanjih leta 2008 oz. pri razklinjanju leta 2009 ne bi bili poškodovani. V primeru izločanja porušenih pramen moramo skrbno preverjati, da pri prenosu sidrne sile na ostala, še polno nosilna pramena sidra, ne pride do preobremenitve jekla pramen.
- Pri preiskavah sider, pri katerih vsak pramen napenjamo s svojo mononapenjalko, povezano v skupen hidravlično sinhroniziran sistem, o obnašanju veznih delov sider sklepamo le na podlagi vrednosti izvlečkov pramen, odčitanih na merilnikih pomikov pritrjenih na mononapenjalkah. Obseg razpoložljivih podatkov je zato omejen, prav tako v območju veznega dela sidra (globoko v tleh zaledja) nimamo fizičnega vpogleda v dejansko dogajanje, zato se pri končni presoji obnašanja prednapetega sidra pri preiskavi sidra ne moremo opirati le na mere lezenja k . Le-te so nedvomno ključni kazalniki obnašanja veznega dela sidra med preiskavo sidra, vendar pa ni nujno, da je vsak izvleček pramen, izmerjen na glavi sidra, tudi dejansko posledica popuščanja veznega dela sidra. Zato moramo pri analizi rezultatov preiskav sider vrednosti mer lezenja k pramena, iz vrednotene na posamezni stopnji sile P_i , vedno primerjati z rezultati mer lezenja k ostalih pramen, kot tudi z neposredno izmerjenimi vrednostmi trajnih izvlečkov Δs_{bl} in efektivnih prostih dolžin l_f . Ugotovimo lahko, da je dosežena $k_{krit} = 2$ mm posameznih pramen sicer znak popustitve njihovega veznega dela, a to obenem še ne pomeni, da je popolnoma uničen vezni del sidra kot celote; seveda to velja pod pogojem, da sidro ob nastopu k_{krit} v pramenu takoj razbremenimo in ne pride do popolne porušitve veznega dela kabla sidra.
- Pri sidrih RCP/D-Z se prirastki izvlečkov niso tako hitro umirili kot pri sidrih RCP/D in RCP/D-K.
- Pri ponovitvi preskušanj na testnem polju leta 2009 se je ocena dejanskih sidrskih sil pri razklinjanjih sider izkazala kot precej groba in nezanesljiva.
- Ocenjene povprečne vrednosti sil trenja pri vnosu oz. spuščanju sile s posamezne stopnje sile P_i z mononapenjalkami so nizke (do 5 kN), opazen je splošen trend naraščanja trenja s stopnjo sile P_i , pri čemer so vrednosti pri razbremenjevanju praviloma višje od vrednosti pri obremenjevanju.
- Upadi sil pred izvedbo odčitkov v posameznem časovnem intervalu so velikostnega reda do 20 kN, odvisni so od stopnje sile (pri višjih stopnjah sile so večji), s podaljševanjem opazovanja na isti stopnji sile se manjšajo, malo pa so odvisni tudi od tipa sidra (višji so bili pri sidrih RCP/D-Z).
- Za korektne rezultate preiskav sider je ključnega pomena brezhibno stanje in delovanje celotnega hidravličnega sistema s črpalko in mononapenjalkami.
- Zaradi odstopanj od predpisanih postopkov in težav pri vgradnji sidra SBz-23 tipa RCP/D (zaradi okvare injektorja je bilo sidro zainjektirano šele dva dni po izdelavi vrtine) je bila odpornost na izvlek pri preiskavi sidra majhna, saj je prišlo do nezaželene krhke porušitve vezi pramen z injekcijsko maso.
- Pri preiskavi sidra SBz-59 leta 2009 je bila prekoračena kritična mera lezenja k_{krit} , na sidru so bile preko noči puščene napenjalko, ki so v sidru vzdrževale minimalno silo (napetosti v pramenih $8 \% R_m$). Naslednji dan je bil na sidru izveden CPN na preskusno silo $P_p = 1,25 \cdot 0,50 \cdot R_a$, ki ga je sidro uspešno opravilo, s čimer smo dokazali, da je bilo to sidro navkljub preseženi k_{krit} pri preiskavi sidra, nato sposobno prevzeti silo zaklinjenja velikostnega reda 50% odpornosti sidra na izvlek R_a , dosežene pri preiskavi sidra.
- S primerjavo rezultatov takoj (zaporedno) ponovljenih preskusov na istem sidru (ne da bi iz sidra vmes odstranili mononapenjalko), smo ugotovili, da so bile na istih stopnjah sile pri ponovitvi

preskusa v splošnem izmerjene manjše vrednosti izvlečkov, ki se odražajo v nižjih izvedenih merah lezenja, kar vodi v oceno boljših karakteristik veznega dela (s tem pa v dosežene večje odpornosti na izvlek). V naslednjih primerih smo pri zaporedno ponovljenem preskusu celo presegli stopnjo sile popustitve prvega preskusa (torej fazo, v kateri je bila presežena $k_{krit} = 2$ mm): pri sidru SBz-26 tipa RCP/D (najprej izveden celoviti preskus napenjanja, nato preiskava sidra), sidru SBz-86 tipa RCP/D-I (najprej izveden celoviti preskus napenjanja, nato preiskava sidra) in sidru SBz-12 tipa RCP/D-I (zaporedoma izvedena dva večstopenjska preskusa nosilnosti). Pri sidrih tipa RCP/D-Z so vezni deli pramen popolnoma odpovedali (fizični izvlek pramen iz injekcijske mase v notranjosti rebraste polietilenske cevi), zato pri ponovljenih preskusih ni bilo možno doseči večje odpornosti sidra (primer sidra SBz-56 tipa RCP/D-Z, na ostalih sidrih preskusa niti nismo ponavljali).

Razmišljanja o vzrokih za takšno obnašanje sider so podana v poglavju 4.2, pri čemer so pri ponovitvi preskusov prisotni tako ugodni vplivi predhodnega preskusa oz. zaklinjenosti sidra kot tudi neugodni vplivi ponovljenega preskusa. Napetostno-deformacijsko stanje v okolici pramen veznega dela sidra je zaradi številnih slojev materialov, nameščenih v zelo omejenem prostoru, ter zapletenega delovanja vezi pramen-injekcijska masa preko stika z rebrasto polietilensko cevjo do vezi injekcijska masa-tla zaledja zelo kompleksno, zato bi lahko domneve po navidezno boljšem obnašanju sidra pri ponovljenem preskusu nosilnosti, takoj po razbremenitvi sidra, dokončno ovrgli ali potrdili le z zadostnim obsegom laboratorijskih preskusov instrumentiranih sider.

Pomembna prednost konceptov sider tipov RCP/D-Z in RCP/D-I, katerih vezni deli pramen podsider so porazdeljeni vzdolž veznega dela sidra, je v tem, da ob popustitvi enega pramena ali podsidera (bodisi zaradi lokalno bistveno slabših tal ali oslabiljene vezi pramena z injekcijsko maso bodisi zaradi pretrga pramena) to še ne pomeni porušitve sidra kot takega, saj preostala pramena drugih podsider pogosto še vedno prevzemajo svoj delež sidrne sile (torej sidro ne popusti, pač pa se sidrna sila v sidru le zmanjša na račun popustitve pramena oz. pramen podsidera).

Na podlagi primerjave dopustnih mer lezenja k_{adm} (dobljenih pri preiskavah sider) in merodajnih mer lezenja k_{int} (dobljenih pri celovitih preskusih napenjanja in enostavnih preskusov napenjanja sider objekta) smo za objekt testnega polja in še štiri objekte iz prakse ugotovili, da k_{int} niso vedno manjše od k_{adm} . Razlogi za to so opuščanje in manjša natančnost meritev pomikov vtiskanja glav sider med preiskavami sider in celovitimi/enostavnimi preskusi napenjanja sider objekta, spreminjajočih pogojev na lokaciji objekta (preiskave sider pokrivajo le majhen del površine objekta), ne dovolj dolga opazovanja na posamezni stopnji sile, dolžine veznega in prostega dela sider po objektu se spreminjajo, trdnost injekcijske mase sider pri celovitih in enostavnih preskusih napenjanja sider je zaradi čim krajšega časa gradnje praviloma manjša kot pri preiskavah sider, verjetno pa vplivajo tudi različne osne togosti veznega dela sider (preskusna sidra so praviloma opremljena z enim pramenom več), kot tudi različno število stopenj obremenitve pri preskusu (pri preiskavah sider šest do deset stopenj sile, pri celovitih preskusih napenjanja tri stopnje sile in pri enostavnih preskusih napenjanja le ena stopnja sile).

Opravljenе analize so torej potrdila naša opažanja iz prakse, da je izvajanje preiskav sider na manjših samostojnih armiranobetonskih blokih problematično, saj je nemogoče preprečiti vtiskanje bloka v zaledje (ki se običajno ne odvija le v smeri pravokotno na os sidra, pač pa tudi vstran), hkrati pa je natančnost spremljanja teh pomikov v praksi zelo omejena in praviloma za en razred slabša od natančnosti meritev izvlečkov pramen, pri čemer pa moramo oba tipa vrednosti pri vrednotenju mer lezenja k medsebojno odšteti.

Računalniško orodje, ki smo ga pripravili v sklopu disertacije, omogoča podrobno analizo podatkov, zajetih pri preiskavah sider. Zasnova orodja je odprta in omogoča spremljanje preskušanj in analizo rezultatov preiskav sider, katerih dolžine veznega in prostega dela pramen so različne. Z orodjem je možno analizo obnašanja sider izvesti po štirih metodah določitve intervalnih mer lezenja k_{int} (metode IP, SIA, 10 in ISO), kot smo jih obravnavali v disertaciji, prav tako se odpornost sidra na izvlek določa na podlagi povprečnih izvlečkov vseh pramen $R_{a,s(k-povp)}$ (za sidro kot celoto) kot tudi v obliki vsote odpornosti na izvlek posameznih pramen $R_{a,s(\Sigma pramen)}$.

Pri laboratorijskih preskušanjih smo ugotovili določene moteče faktorje, do katerih prihaja pri terenskih preiskavah sider, katerih posledice se odražajo v povečanih izvlečkih pramen (s tem pa tudi povečanih merah lezenja k) v začetnih fazah preiskav sider in niso odraz dogajanj v veznem delu sidra. Na podlagi rezultatov laboratorijskih preskušanj smo prišli do zaključka, da bi bilo treba sidro pred preiskavo sidra obremeniti s počasi naraščajočo silo, ki seveda ne bi smela povzročiti pomembnih poškodb veznega dela sidra, s čimer bi se lahko komponente glave sidra in dinamometer medsebojno usedli, pramena v prostem delu sidra pa bi se poravnala in aktivirala, hkrati pa bi se samostojni sidrni bloki vsaj v določeni meri vtisnili v tla zaledja.

Na osnovi opravljenih laboratorijskih preskušanj vpliva ekscentrične lege obročastega dinamometra proizvajalca SISGEO lahko ugotovimo, da zamik med osjo kabla sidra in osjo obročastega dinamometra le malo vpliva na vrednost prikazane sile. Predvsem na prvi stopnji sile preiskave sidra je bila dosežena manjša ponovljivost, zaradi česar je bil raztros sil večji (pogreški sil so bistveno prekoračili deklarirane), kar smo pretežno pripisali slabši natančnosti obročastega dinamometra na spodnjem delu merilnega območja, v manjši meri pa tudi rahlo zvitemu togemu porazdelitvenemu jeklenemu obroču dinamometra. Ugotovili smo, da odstopanja sil vplivajo tudi na efektivne proste dolžine l_f , pri čemer je ta vpliv sicer izrazitejši na začetnih stopnjah sile preiskave sidra, na višjih stopnjah sile pa se ta vpliv zmanjšuje.

Na podlagi opravljenih raziskav ne moremo potrditi navedb raziskovalcev (Barley in McBarron, 1997 ter Barley in Windsor, 2000) o slabi zanesljivosti dinamometrov pri obremenjevanju v terenskih pogojih. V dosedANJI praksi smo sicer že opazili razlike med odčitanimi vrednostmi sil na obročastem dinamometru in sil izvrednotenih na podlagi posebej natančnega sistema za merjenje tlaka v hidravličnem sistemu, vendar v tem primeru izvajalec dinamometra ni namestil skladno z navodilom za uporabo, določena razlika pa je bila deloma posledica trenja v skupni napenjalki. Glede na veliko občutljivost mer lezenja pri visokih časih opazovanja na posamezni stopnji sile – glej enačbo (2.1) – in majhno ločljivost dinamometrov (1 kN) je z obstoječimi dinamometri operativno zelo težko natančno popravljati upadle sile na predpisano raven stopnje sile P_i .

Navkljub določenim začetnim pomislekom o uspešnosti izvedbe zahtevnih preskušanj izotermne relaksacije pramen po postopku za preiskavo sidra, smo po razpoložljivih virih takšna preskušanja opravili kot prvi na svetu. Ugotovili smo, da do padcev sile v natezno obremenjenih pramenih sidra prihaja že od prve stopnje sile PS naprej, kar je v tem območju posledica nizkih tlačnih napetosti v kotvah v radialni smeri, mehanizma vnosa sile preko čeljusti v zunanje žice pramena, kakovosti stičnih površin (predvsem čeljusti napenjalk) kot tudi trenja med žicami pramen. Na višjih stopnjah sile (nad 60 % R_m) se pojavlja relaksacija, tipična za prednapenjanje konstrukcij, ki se s povečevanjem nateznih obremenitev pramen intenzivno povečuje, pričakovano so upadi sil največji pri prvi izvedbi preskusa, nato pa se s ponavljanjem preskusov zmanjšujejo. Med zaporedno ponavljajočimi se preskusi izotermne relaksacije na istem pramenu smo indikativno ugotovili, da se v vmesnih fazah med preskusi sila v pramenu počasi sprošča, kar smo poimenovali kot *pojav obratne relaksacije*.

7.1 PREDLOG ZA PRAKSO UPORABNIH KONCEPTOV MODIFICIRANIH SIDER

Opravljene raziskave so pokazale, da so vsi obravnavani tipi modificiranih trajnih prednapetih pramenskih geotehničnih sider (RCP/D-K, RCP/D-Z in RCP/D-I) v praksi izvedljivi, vendar pa za doseganje večje učinkovitosti predlagamo naslednje dopolnitve:

- Opravljeni preskusi sider na testnem polju so ponovno potrdili dejstvo, poznano že iz druge polovice 1970-ih, da moramo za učinkovito delovanje veznih delov prednapetih geotehničnih sider (ne glede na zasnov njihovega veznega dela) vedno zagotoviti popolno oblitost golih veznih delov pramen s slojem cementne injekcijske mase v debelini najmanj 5 mm (Littlejohn, 1993, Hanna, 1982).
- Učinkovitost veznega dela sider bi lahko izboljšali s povečanjem premera rebraste polietilenske cevi, saj bi lahko v tem primeru območja okoli golih pramen znotraj rebraste polietilenske cevi armirali (spiralna mikro armatura, cementna injekcijska masa armirana z vlakni ipd.) obenem pa bi dobili prostor za možnost lokalnega preoblikovanja pramen oz. žagastega poteka pramen. Pri sidrih tipa RCP/D-K bi v tem primeru namesto ravnih žic \varnothing 5 mm za povečanje togosti veznega dela sidra vgradili pramena \varnothing 12,5 ali celo \varnothing 15,2 oz. \varnothing 15,7 mm.
- Za povečanje učinkovitosti sider RCP/D-Z in RCP/D-I moramo modificirati oblikovanje zatesnitve prehoda iz veznega v prosti del posameznih pramen podsider, namesto oplaščanja pramen v prostem delu pa bi bil tudi zaželen v radialni smeri manj gibek ločilni in zaščitni sloj prostega dela pramen.
- V literaturi so kot minimalne dolžine, potrebne za prenos sile s pramena v injekcijsko maso, navedene različne dolžine l_v . Za sam prenos sile iz pramena v injekcijsko maso sicer lahko zadostuje že dolžina golega pramena 1,0 do 1,5 m, vendar se za praktično uporabo priporoča l_v med 2,0 in 3,0 m (Barley, 1997a), Bruce in sod. (2007) predlagajo dolžine veznega dela podsider med 1,5 in 3,5 m, medtem ko proizvajalec sider Dywidag predlaga dolžine l_v med 2,0 in 4,5 m. V kolikor so pramena v veznem delu "deformirana" (lokalno razmaknjene žice pramen, potek pramena v žagastem vzorcu ipd.), je prenos sidrne sile s pramena na injekcijsko maso zagotovljen že na dolžini 2,0 m, vendar naj bo najkrajša efektivna dolžina veznega dela med 2,0 in 2,5 m (Barley in Bruce, 2005).

Opravljene preiskave sider in večstopenjski preskusi nosilnosti sider tipov RCP/D-Z in RCP/D-I so pokazali, da je treba za učinkovito delovanje in izrabo nosilnosti veznih delov sider preprečiti izvlačanje pramen podsider iz notranjosti rebraste polietilenske cevi. Glede na specifičnost oblikovanja sider tipov RCP/D-Z in RCP/D-I predlagamo kombinacijo žagastega poteka pramen podsidera (izmeničnega pahljačastega prostorskega razširjanja in stiskanja pramen podsidera) z lokalnimi razširitvami žic pramen. Kot minimalno dolžino veznega dela pramen podsider predlagamo vezne dele pramen dolžine 2,5 m (v primeru povečanja premera rebraste polietilenske cevi) oz. 3 m (v kolikor premer rebraste polietilenske cevi ostane nespremenjen). Ključnega pomena je zagotoviti **brezhibno čistost golih pramen** v polietilenskem ovoju sidra!

- Pramena različnih dolžin prostih l_{fr} oz. veznih l_v delov sider (večkratna sidra tipa RCP/D-Z in sidra spremenljive togosti tipa RCP/D-I) naj se že v proizvodnji označijo, da pri napenjanju sider že vnaprej poznamo dolžine prostega in veznega dela posameznih pramen.
- Zaradi bolj preglednega obnašanja prostega dela sidra in bolj jasnih rezultatov veznega dela pramen sidra se nam zdi smiselno, da se tudi v prostem delu sider namestijo distančniki za centriranje sidra v vrtini.

7.2 PREDLOG ZA DOPOLNITEV POSTOPKOV IZVEDBE PREISKAV SIDER

Določbe o postopkih izvedbe preiskav sider so v evropskih predpisih (*EN 1997-1*, *EN 1537* in *prEN ISO 22477-5*) precej nedorečene, zato se v praksi uporablja švicarski standard *SIA 267/1*, katerega določbe so skoraj identične določbam priporočila *SIA V 191*, leta 1997 vpeljanega v našo prakso, s katerim so postopki izvedbe in vrednotenja preiskav sider natančno opredeljeni. Na ta način je izvedba preiskav sider dobro pokrita, vendar na podlagi naših raziskav predlagamo naslednje dopolnitve postopka in načina izvedbe preiskav sider v naši praksi:

- Merjenje pomika bata s čeljustmi glede na ohišje mononapenjalk je sicer priročna ocena izvlečka pramena, a ni tako zanesljivo kot merjenje izvlečkov direktno na pramenih, saj so v izmerjene vrednosti pomikov bata vključeni tudi vplivi zdrsa pramena v čeljustih mononapenjalk (Hanna, 1982). Zdrse pramena v čeljustih v takih primerih upoštevamo kot izvlečke veznega dela pramena in jih preračunamo v mere lezenja k pramena, kar pa ne ustreza dejanskemu obnašanju veznega dela pramena. Na tej osnovi, kot tudi na podlagi naših ugotovitev pri laboratorijskih preskušanjih izotermne relaksacije pramen po postopku za preiskavo sidra, predlagamo, da se pri praktični izvedbi preskusov nosilnosti prednapetih pramenskih sider zagotovi meritve izvlečkov bodisi glede na zunanjo nepomično točko (s čimer bo v pretežni meri zmanjšan vpliv vtiskanja sidranega elementa oz. konstrukcije v zaledje) bodisi se izvaja dodatne meritve zdrsov pramen glede na čeljusti mononapenjalk, ki se jih nato upošteva pri vrednotenju mer lezenja.
- Na podlagi analize obnašanja preskusnih sistemov pri laboratorijskih preskušanjih smo ugotovili, da bi jasnejšo sliko obnašanja veznega dela sidra pri preiskavi sidra dobili, v kolikor bi sidro predhodno obremenili s počasi naraščajočo silo. Na podlagi opravljenih raziskav je težko brez dodatnih preskušanj natančno opredeliti raven sile predobremenitve; predhodno na podlagi preskušanj vpliva ekscentričnosti dinamometra in izotermne relaksacije kot primerno izhodišče za silo predobremenitve ocenjujemo obremenitev pramen sidra v deležu 30 % nazivne natezne trdnosti jekla pramen R_m , pri čemer pa ta sila v nobenem primeru ne sme preseči 50 % (vnaprej ocenjene) odpornosti preskusnega sidra na izvlek. Po predvidevanjih bi takšna sila zadostovala za izvedbo medsebojne prilagoditve jeklenih elementov in dinamometra v območju glave sidra, aktiviranje prostega dela sidra ter za zmanjševanje trenja v območju prostega dela, pod glavo sidra ter v samih mononapenjalkah.
- Obremenjevanje in razbremenjevanje sidra v vmesnih stopnjah sile naj poteka z enakomernim vnosom sile, v obeh primerih z isto hitrostjo, a ne višjo kot 10 kN/s, kot to določa *prEN ISO 22477-5*.
- V zvezi z uporabo dinamometra vidimo možnost za izboljšave v dveh smereh:
 - predlagamo, da se pri preiskavi sidra namesto dinamometrov z ločljivostjo 1,0 kN uporabljajo dinamometri z ločljivostjo 0,1 kN, s čimer bo omogočeno bistveno natančnejše dopolnjevanje upadlih sil v sidrih pred izvedbo odčitkov izvlečkov pramen, zaradi česar bo raztros izmerjenih vrednosti izvlečkov manjši, izvrednotene mere lezenja pa stabilnejše;
 - zaradi vpliva morebitnih poškodb dinamometra na izmerjene vrednosti sil predlagamo skrajšanje intervala kalibracije dinamometrov, s katerimi se izvajajo preiskave in preskusi nosilnosti sider, iz 12 na 6 mesecev.
- Za korektne rezultate preiskav sider je potrebna zelo natančna namestitvev dinamometra in vseh jeklenih elementov glave sidra (obeh podložnih plošče pod in nad dinamometrom zadostnih dimenzij in togosti, centrična postavitev celotnega sistema na os sidra), pri čemer moramo slediti zahtevam proizvajalca dinamometra! Analiza rezultatov v preteklosti opravljenih preiskav sider je pokazala,

da najboljše ujemanje intervalnih mer lezenja k_{int} in dopustnih mer lezenja k_{adm} dosežemo v primerih, ko je bila pripravljena dobro utrjena podlaga za postavitev sistema merjenja pomikov glave sidra. Izvajanje meritev vtiskanja glav sider naj bo nujno pri preiskavah sider na majhnih armiranobetonskih blokih in na podajnih sidranih konstrukcijah (npr. montažni armiranobetonski slopi).

- Popravljanje upadlih sil do predpisane stopnje sile trenutne faze preiskave sidra je smiselno le na višjih stopnjah sil, ko se v pramenih pojavljajo upadi sil, ki so posledica delovanja prave relaksacije, pri čemer naj se uporabi dinamometer ločljivosti 0,1 kN. Evropski izvedbeni predpisi popravljanja upadlih sil ne predpisujejo, kar je sprejemljivo le pod pogojem brezhibno tesnega delovanja opreme za napenjanje (cevi hidravličnega sistema in tesnil mononapenjalk ter hidravlične črpalke z razdelilno postajo).
- Pri napenjanju modificiranih tipov sider z različnimi dolžinami prostih delov sider je pomembno, da so mononapenjalkke posameznih pramen na hidravlično razdelilno postajo priklopljene preko ventila in manometra, tako da je v primeru odpovedi veznega dela posameznega pramena ali podsidra možno zapreti ventile posameznih pramen in jih izločiti iz sistema, obenem pa nam manometri na razdelilni postaji omogočajo spremljanje tlaka v mononapenjalkah izločenih pramen. Na ta način lahko na ostalih pramenih sidra nadaljujemo s preskusom odpornosti sidra tudi na višjih stopnjah sile, torej zaradi odpovedi posameznega pramena nismo prisiljeni zaključiti preiskave sidra.
- Pri izvedbi preiskave sidra naj se odčitki izvlečkov pramen izvedejo v časovnih intervalih, ki bodo ustrezali različnim izvedbenim predpisom, tako da je kasneje možna obdelava po različnih metodah. Predlagamo, da se med izvedbo preiskave sidra odčitki izvlečkov pramen in vtiskanja glav sider izvajajo v naslednjih časovnih intervalih: 1', 2', 3', 4', 5', 7', 10', 15', 20', 25', 30', 35', 40', 45', 50', 55', 60', 75' in nato na 15' pri čemer se lezenje sidra opazuje toliko časa, dokler se mera lezenja k sidra ne umiri (a ne manj kot 15' na vmesnih stopnjah sile, 30' na ravni predvidene sile zaklinjenja sider objekta ter na ravni preskusne sile 60' v kamninah oz. 180' v zemljinah) oz. dokler vezni del sidra ne popusti.
- Čeprav je v evropskih izvedbenih standardih (*EN 1537* oz. *prEN ISO 22477-5*) predvideno, da se preiskava sidra izvaja v šestih stopnjah sile, se nam zdi primernejši pristop švicarskega standarda *SIA 267/1*, po katerem se PS izvede v šestih do desetih stopnjah sile – v tem primeru imamo možnost, da glede na pogoje tal in tip vgrajenega sidra lahko sami izberemo število stopenj sile (v slabih pogojih tal izberemo večje število stopenj sile, saj imamo tako v primeru odpovedi sidra pri nižjih stopnjah sile več podatkov, na podlagi katerih lahko analiziramo obnašanje veznega dela sidra).
- Glede na pridobljene izkušnje opravljenih preskušanj (glej poglavje 4.2) in podatkov iz literature (Briaud in sod., 1998), v zvezi z doseganjem nižjih mer lezenja zaporedno ponovljenih preskušanj nosilnosti na istem sidru (ali na predhodno zaklinjenem sidru), za prakso predlagamo, da se takšno sidro najprej razbremeni, nato pa se ga v neobremenjenem (ali minimalno obremenjenem) stanju pusti vsaj 24 ur. Šele nato naj se preskus nosilnosti na sidru ponovi.

7.3 PREDLOG ZA ZAPOLNITEV VRZELI IN OPREDELITEV NEJASNOSTI PRI OBDELAVI IZMERJENIH VREDNOSTI PRI PREISKAVAH PREDNAPETIH PRAMENSKIH SIDER

Ključni koraki analize odčitanih vrednosti izvlečkov pramen sidra napetega z mononapenjalkami, povezanimi v skupen hidravlično sinhroniziran sistem, so:

1. za vsako stopnjo sile P_i se določijo vrednosti intervalnih mer lezenja k_{int} za vsak pramen posebej in sidro kot celoto, lahko pa tudi za podsidro (smiselno le pri sidrih z različnimi dolžinami prostih in/ali veznih delov pramen),
2. na podlagi vrednosti k_{int} se na dva načina določi odpornost preskusnega sidra na izvlek R_a : iz povprečnih izvlečkov vseh pramen za sidro kot celoto se določi $R_{a,s(k\text{-povp})}$, z vsoto odpornosti na izvlek posameznih pramen kabla sidra pa se izračuna odpornost $R_{a,s(\Sigma\text{pramen})}$,
3. iz odpornosti R_a vseh preskusnih sider se na koncu za sidrani objekt kot celoto izvede skupna karakteristična odpornost na izvlek R_{ak} .

Rezultati primerjave vrednosti k_{int} , določenih po metodah IP, SIA, 10 in ISO, za preiskave sider opravljene na testnem polju kažejo, da po metodi 10 dobimo rezultate na nevarni strani (kar še posebej velja za primere hipnih porušitev veznega dela sidra pri daljših opazovalnih časih), zato po naši oceni ta metoda ni primerna za uporabo v praksi. Ostale tri metode (IP, SIA in ISO) dajejo podobne rezultate, ki se gibljejo v okviru območja pričakovanega raztrosa rezultatov, vendar, v kolikor rezultate preiskave sidra obdeluje izkušeni strokovnjak, lahko z metodo IP za vsak primer posebej najbolj natančno posname dejansko obnašanje pramen veznega dela sidra. Na drugi strani ta metoda manj izkušenemu strokovnjaku ne preprečuje napačnega oz. zavajajočega vrednotenja rezultatov. V takih primerih uporaba metode ISO ali metode SIA zagotavlja zanesljivejše vrednotenje rezultatov preiskave sidra in manjše možnosti napačne presoje pri določitvi odpornosti na izvlek R_a .

V kolikor je izbrana preskusna sila P_{pv} prenizka oz. je kabel sidra prešibek glede na odpornost veznega dela sidra na izvlek, potem pri preiskavi sidra ne pride do porušitve sidra (vrednosti k_{int} so nižje od k_{krit}). V tem primeru odpornosti preskusnega sidra na izvlek R_a ne moremo določiti, vemo le, da je večja od preskusne sile P_{pv} . Standard *SIA 267/1* dopušča možnost, da v takem primeru vrednost R_a lahko *ocenimo* kot za 10 % povečano silo P_{pv} . Na podlagi študije vplivnih dejavnikov na odpornost veznega dela sidra ugotovljamo, da je takšna ekstrapolacija preskusne sile P_{pv} možna, a je pri tem potrebna previdna ocena obnašanja sidra pri preiskavi sidra, pri čemer mora *izkušeni strokovnjak* upoštevati kombinacijo vplivov aproksimacije linearnega trenda mer lezenja pri sili P_{pv} (vseh pramen in sidra kot celote), največje dosežene mere k_{max} po posameznih stopnjah sile P_i v vseh pramenih sidra ter intervalne mere lezenja k_{int} vseh pramen in povprečja sidra kot celote na zadnji stopnji sile P_{pv} (na podlagi naših analiz naj ne bo višji od 1,35). Edina in merodajna podlaga za ekstrapolacijo P_{pv} za 10 % mora biti utemeljena ocena strokovnjaka, da bi bilo sidro sposobno prevzeti silo $1,10 \cdot P_{i,\text{max}}$, kjer je $P_{i,\text{max}}$ sila na zadnji doseženi stopnji preiskave sidra. Pavšalna določitev R_a kot 10 % povečana sila P_{pv} je lahko napačna in kot taka močno zavajajoča, isto velja, tudi če pri odločitvi o ekstrapolaciji upoštevamo samo vrednosti $k_{\text{int}}(P_{pv})!$

Kot smo že omenili, smo za določitev vrednosti intervalnih mer lezenja k_{int} uporabili več metod (IP, SIA, 10 in ISO), katerih različni rezultati se na koncu odražajo v različnih vrednostih odpornosti na izvlek ($R_{a,s(k\text{-povp})}$ in $R_{a,s(\Sigma\text{pramen})}$). Primerjava odpornosti na izvlek $R_{a,s(k\text{-povp})}$, določene na osnovi povprečnih izvlečkov vseh pramen za sidro kot celoto, z vsoto odpornosti na izvlek posameznih pramen kabla sidra $R_{a,s(\Sigma\text{pramen})}$, pokaže da sta obe vrednosti pri "klasičnih" sidrih (z enako dolžino veznega dela vseh pramen), pod pogojem, da popusti kabel sidra kot celota, približno enake. Pri sidrih, pri katerih pride do popuščanja vezi pramen-injekcijska masa v notranjosti rebraste polietilenske cevi oz., kjer izrazito popuščajo posamezna pramena (v našem primeru sidra RCP/D-Z, pa tudi RCP/D-I), se nam zdi boljši pristop s seštevanjem odpornosti posameznih enot sidra, pri čemer je potrebna posebna previdnost pri upoštevanju ekstrapolacije zadnje stopnje sile za 10 % posameznih enot. Drugače je pri

obravnavanju odpornosti veznih delov pramen, ki se nahajajo drug ob drugem v istem podsidru (sidra tipa RCP/D-Z in RCP/D-I) ali sidru (tipa RCP/D in RCP/D-K); za prakso predlagamo, da v primeru porušitve enega pramena podsidra v ostalih pramenih istega podsidra privzamemo, da je že na tej stopnji sile dosežena odpornost pramen na izvlek (torej da pri njih ne upoštevamo ekstrapolacije). Pri vsakem sidru naj se določita tako $R_{a,s(k-povp)}$ kot tudi $R_{a,s(\Sigma pramen)}$, pri čemer razlika med njima opozarja na različno obnašanje veznih delov posameznih pramen, ki terja posebno pozornost in skrbno analizo. Ob tem moramo zagotoviti, da v primerih popuščanja in izvlačanja veznega sidra kot celote po vezi s tlemi zaledja vrednost vsote po pramenih $R_{a,s(\Sigma pramen)}$ ne preseže vrednosti sidra kot celote $R_{a,s(k-povp)}$.

Za preiskave sider, opravljene v zadnjih desetih letih, smo izvedli statistično analizo raztrosa vrednosti odpornosti preskusnih sider na izvlek R_a . Določili smo 95. centil koeficienta variacije rezultatov preiskav sider na posameznem objektu $V_{R_a,95} = 0,25$. V primerih, ko koeficient variacije vrednosti R_a na posameznem objektu preseže $V_{R_a,95}$, potem lahko takšen raztros rezultatov preiskav sider ocenimo kot (pre)velik, pri čemer moramo analizirati obnašanje sider, poiskati razloge za velika odstopanja oz. izluščiti morebitne neverodostojne rezultate preiskav sider ter po potrebi izvesti nadomestne preiskave sider. V kolikor razlogov za odstopanja ne moremo utemeljiti, potem je ena od možnosti tudi ta, da so pogoji tal v območju sidranega objekta tako spremenljivi, da moramo posamezna območja sidranega objekta obravnavati ločeno po posameznih mikrolokacijah.

Pri preverjanju skupne karakteristične odpornost na izvlek vseh preiskav sider objekta R_{ak} smo uporabili številne metode. Preverili smo ničelno domnevo o porazdelitvi populacije tako povprečnih odpornosti na izvlek, kot tudi koeficientov variacije odpornosti na izvlek za vrednosti odpornosti na izvlek preiskav sider, v zadnjem desetletju dobljene v praksi. Ugotovili smo, da ob izbranem tveganju (5 %) ne moremo trditi, da povprečne odpornosti sider na izvlek niso porazdeljene po normalni porazdelitvi. Na podlagi tega dejstva smo lahko uporabili statistične metode za vrednotenje posameznih preiskav sider po Evrokodih, pri čemer smo uporabili metodo napovedi in Bayesovo metodo, pri katerih smo izvedli varianto, ko je raztros vrednosti odpornosti na izvlek, določen na podlagi vrednosti iz preteklosti, kot tudi varianto, ko je raztros določen le na podlagi nekaj vrednosti odpornosti na izvlek, dobljenih na posameznem objektu. Vrednost R_{ak} smo poskusili določiti tudi na osnovi vseh točk k_{int} vseh preskusnih sider istega tipa tako, da smo po metodi najmanjših kvadratov iskali najustreznejšo aproksimacijsko funkcijo. Ob tem smo ugotovili, da izključevanje vrednosti k_{int} prvih dveh stopenj PS bistveno ne vpliva na vrednost odpornosti na izvlek. Primerjava R_{ak} dobljenih po različnih metodah pokaže, da:

- z upoštevanjem vseh točk in najboljše aproksimacijske funkcije, bilinearnim diagramom po *prEN ISO 22477-5*, metodo *TSC 07.202* kot tudi po statistični metodi napovedi za primer neznanega koeficienta variacije *ne dobimo uporabnih oz. zanesljivih vrednosti R_{ak}* ,
- z uporabo statistične metode napovedi za primer znanega koeficienta variacije in Bayesove metode z znano standardno deviacijo lahko izkoristimo ugoden vpliv statistično bistveno večjega vzorca in poznanega raztrosa rezultatov v preteklosti opravljenih preiskav sider, le nekoliko manjše vrednosti pa dobimo po metodah *EN 1997-1* z uporabo korelacijskega faktorja ξ in *EN 1537* oz. *SIA 267* (upoštevanje najmanjše dosežene odpornosti R_a kot karakteristične vrednosti R_{ak}).

Takšen rezultat potrjuje splošno primernost uporabe evropskih standardov pri analizi rezultatov preiskav sider in določanju karakteristične vrednosti. Vrednosti dobljene po *SIA 267* oz. *EN 1537* so za približno 5 % višje od vrednosti, dobljenih po *EN 1997-1*, kar pripisujemo dejstvu, da ocena *SIA 267*, da za karakteristično vrednost privzamemo kar najnižjo vrednost R_a , doseženo na posameznem objektu, nima statistične podlage (možno je, da bi na istem objektu pri naslednji preiskavi sidra dosegli nižjo vrednost R_a).

7.4 PRIPOROČILA ZA NADALJNJE DELO

Na osnovi dognanj in izkušenj, pridobljenih pri izvedbi in analizi rezultatov raziskav, nastalih v okviru disertacije, so se odpirala nova vprašanja kot tudi pojavile mnoge nove ideje s katerimi bi lahko nadgradili ugotovitve in zaključke opravljenih raziskav. Glede na način in pristop že opravljenega dela smo priporočila za nadaljnje delo razdelili v naslednje sklope:

- ***in-situ preskušanja modificiranih trajnih prednapetih električno izoliranih sider:***
 - izvesti preskušanja za določitev potrebne ravni sile pri predobremenitvi sidra pred izvedbo preiskave sidra,
 - na sidrih objekta v homogenih tleh izvesti primerjalno preskušanje vpliva različno dolgih intervalov razbremenjenega stanja med posameznimi ponovitvami celovitih preskusov napenjanja na ključne parametre obnašanja sidra; za boljši vpogled v obnašanje veznega dela sidra bi pramena opremili z merilnimi lističi,
 - v homogenih pogojih tal preveriti vpliv števila stopenj obremenitve sidra na vrednosti mer lezenja in doseženo odpornost na izvlek;
- ***laboratorijska preskušanja modelov veznih delov modificiranih trajnih prednapetih pramenskih sider:***
 - s preskušanjem vzorcev pramen zalitih v rebrasti polietilenski cevi, nameščeni in zainjektirani v jekleno cev, ugotoviti minimalno potrebno debelino oblitja pramen (t.j. votle valjaste cevi med prameni in rebrasto polietilensko cevjo), kar bi lahko povezali s študijo različnih možnosti za zmanjšanje razpok v cementni injekcijski masi v notranjosti rebraste polietilenske cevi (armiranje z vlakni, oblikovanje mikro spiralne armature ipd.) in najučinkovitejšo kombinacijo žagastega poteka pramen sidra in lokalnih razširitev žic pramen v veznem delu sider,
 - pripraviti tehnološko izpopolnjeno zasnovo veznih delov modificiranih sider tipov RCP/D-K (pramena vgrajena v večji rebrasti polietilenski cevi, kjer bo možno izvesti ukrepe za povečevanje togosti večjih premerov), RCP/D-Z in RCP/D-I (oblikovati ustrežnejši tehnološki detajl stika prostega in veznega dela posameznega pramena na način, da bodo ti stiki v čim manjši možni meri zmanjševali objetje veznih delov pramen, ki potekajo mimo teh stikov); sledi izdelava modelov sider RCP/D, RCP/D-K, RCP/D-I in RCP/D-Z, vgrajenih v jekleno cev, kjer bodo izločena tla zaledja (nehomogenost sestave tal in prisotnosti vode), obenem pa bodo možne meritve deformacij jeklenih pramen, injekcijske mase ter jeklene cevi, ki predstavlja okolico sidra; na tako instrumentiranih modelih veznih delov se nato izvedejo laboratorijske raziskave in primerjalne študije posameznega tipa sidra;
- ***laboratorijska preskušanja ekscentričnosti dinamometra:***
 - študija vpliva kotnega odklona med naležno ploskvijo obročastega dinamometra in pravokotnico na os kabla sidra na izmerjene vrednosti sil,
 - preskušanja ekscentričnosti rabljenega obročastega dinamometra, opisanega v disertaciji, ponoviti z novim (nerabljenim) dinamometrom istega tipa;
- ***laboratorijska preskušanja izotermne relaksacije pramen:***
 - ponoviti preskušanja izotermne relaksacije pramena po postopku za preiskavo sidra, pri čemer bi med preskusom merili pomike zunanjih (spiralnih) žic glede na osrednjo žico pramena (spremljanje zdrsa po stiku zunanjih žic z osrednjo žico pramena),

- ponoviti preskušanja izotermne relaksacije pramena po postopku za preiskavo sidra na novih vzorcih pramen, pri katerih bi preprečili zdrs pramena v zagozdah obeh kotev kot tudi zdrsa med zunanjimi žicami in osrednjo žico pramena tako, da bi robne dele pramen za en dan namočili v slano vodo,
- iz stališča pojava relaksacije bi bilo zanimivo v univerzalnem preskuševalnem stroju ZWICK Z2500Y po postopku za preiskavo sidra obremenjevati samo osrednjo žico pramena, nato pa še cel pramen, ter primerjati rezultata.

SUMMARY

Practical realization and testing of three different concepts of bond lengths of prestressed strand ground anchors with joint polyethylene cover have been successfully attained. Technological details for implementation of modified types of bond lengths have been prepared, whereat following modified types of anchors have been produced and tested:

- anchors with increased stiffness of bond length, equipped with additional wires (type RCP/D-K),
- multiple anchors with staggered anchor units based on Barley's anchors SBMA, only that all anchor units of 2.2 m bond length were not installed into a borehole as independent elements but were placed into the common corrugated polyethylene duct (type RCP/D-Z) as well as
- anchors with variable stiffness of bond lengths after the patent of Škrabl, with the tendon combined of three anchor units with bond lengths of 7.0 m, 4.6 m in 2.2 m and free lengths of 28.0 m, 30.4 m in 32.8 m (type RCP/D-I).

Contractor GEOT, d.o.o. installed three comparative anchors RCP/D and five anchors of each modified type in the testing field of the retaining wall OZ-05 and carried out in-situ investigation tests and comprehensive suitability tests of all anchors.

Testing results showed that maximum values of pull-out resistance were reached at the modified RCP/D-K anchors with increased stiffness of bond length - the average pull-out resistance of RCP/D-K anchors exceeded the average pull-out resistance of RCP/D anchors by 16 %. Although the free space within the corrugated polyethylene duct of bond length of the RCP/D-K anchors has been pretty much restricted so that only \varnothing 5 mm additional steel wires could be installed (instead of originally planned \varnothing 12.5 mm steel strands), high values of pull-out resistances of RCP/D-K anchors have been obtained. The behaviour of RCP/D-Z and RCP/D-I anchors has been significantly influenced by the surface contamination with vaseline as well as configuration of strands in the bond length. Additional impairment of the conditions within the corrugated polyethylene duct has been caused by the use of soft and relatively spacious packing connections in the transition between anchor units bond and free length. The RCP/D-Z anchors demonstrated the poorest performance of all tested anchors. The bond length of RCP/D-Z anchors failed at low force levels of investigation tests and comprehensive suitability tests. In all cases deterioration of bond between strands and cement grout resulted in the pull-out of strands.

Hypothesis testing of the equality of means of two normal populations at the 5 % significance level showed that the mean value of RCP/D-Z anchors pull-out resistance was statistically typically lower than the mean values of pull-out resistance of comparative RCP/D and modified RCP/D-K anchors. The RCP/D-I anchors mean pull-out resistance was lower than the mean pull-out resistance of RCP/D and RCP/D-K anchors but on the other hand it was higher than the mean pull-out resistance of RCP/D-Z anchors. Different aspects of design, formation, production and installation of testing field anchors resulted in different pull-out resistances of the RCP/D, RCP/D-K, RCP/D-Z and RCP/D-I anchors, and indicate the relations among bond length capacities of different anchor types. With improvement of particular technological details of modified anchors, higher values of pull-out resistances can be expected. According to Barley the pull-out resistances of multiple anchors with staggered anchor units (similar to the RCP/D-Z anchors) can at least attain the pull-out resistances of comparative (RCP/D) anchors, provided that the pull-out of strands from cement grout, placed within the corrugated polyethylene duct, is prevented by the appropriate forming of bond length of strands. Moreover, it is also possible

that instead of RCP/D-K anchors the highest values of pull-out resistance could be achieved at one of the other modified anchor types.

General characteristics of the testing field anchors behaviour particularities are as follows:

- Provision of separation of failed strands from the joint hydraulic system at investigation tests and comprehensive suitability tests turned out to be feasible and useful in practice. It could be used in higher extent, provided that the strands bond length would not have been damaged in such extent, as they were at testing carried out in 2008 and at discharge of lock-off load in 2009. However, separation of failed strands should be used cautiously not to overload other, still fully bearing strands.
- At investigation tests where individual strands were tensioned with monostrand jacks, connected to joint hydraulically synchronized system, behaviour characteristics of anchor bond length could be recognized only on the basis of strand extensions, measured on displacement transducers fixed to the monostrand jacks. The quantity of available data is therefore limited, furthermore there is no possibility to have an insight into actual behaviour of different components and interfaces. Therefore, by the final judgement of load-bearing capacity of an anchor we could not rely only on creep displacement rates k , although they are undoubtedly key indicators of anchor bond length behaviour during investigation test or comprehensive suitability test. However it is not necessary that each strand extension, measured on the anchor head, is actually the result of the anchor bond length degradation. For this reason it is necessary to compare values of creep displacement rates k of one strand, calculated at force level P_i , with creep displacement rates k of other strands of the anchor as well as with measured permanent displacements Δs_{bl} and calculated apparent free lengths l_f .
- It is possible to confirm that $k_{krit} = 2$ mm, attained on a single strand, is the sign of a failure of its bond length, nevertheless it does not mean that the anchor bond length as a whole failed. That holds true only under the provision that anchor is immediately unloaded in the moment, when k_{krit} appear in a strand.
- Measured extension increments of anchors RCP/D-Z decreased more slowly in comparison with the RCP/D and RCP/D-K anchors.
- At discharge of lock-off load before the repetition of testing in 2009 the estimation of actual anchor forces turned out to be rather inexact and unreliable.
- Estimated average friction force values in loading and unloading phases of individual force levels P_i using monostrand jacks were low (up to 5 kN).
- General tendency of rising of friction values with increasing force levels P_i has been noticed, whereat the friction unloading values were generally higher as to friction loading values.
- Decreased forces ΔP before carrying out readings at separate time intervals reached up to 20 kN. Values ΔP depend on force level (at higher force levels ΔP they are higher), with prolongation of observation on the same force level ΔP they diminish, to a certain degree they depend upon anchor type (higher values were recorded at RCP/D-Z anchors).
- For correct results it is of the greatest importance impeccable condition and operation of hydraulic system as a whole, hydraulic pump and monostrand jacks.
- Deviations from prescribed procedures and difficulties by installation of SBz-23 RCP/D type anchor (anchor was grouted not until 2 days after the completion of borehole drilling due to troubles with grouting equipment) resulted in a low pull-out resistance at investigation test in combination with abrupt and unwanted failure of strand to cement grout bond.
- In 2009 critical creep displacement rate k_{krit} was exceeded at investigation test of anchor SBz-59, then monostrand jacks, tensioned on a minimal force of 8 % of strand nominal tension steel strength R_m , were left on the anchor overnight. Next day comprehensive acceptance test to a proof load

$P_p = 1.25 \cdot 0.50 \cdot R_a$ has been successfully accomplished ($k < k_{krit}$). It has been proven that although k_{krit} was exceeded at investigation test the load-bearing capacity of the anchor was sufficient to be able to sustain force level of 50 % R_a , attained at the investigation test.

- Comparison of immediately repeated tests on the same anchor (without removal of monostrand jacks) showed, that at repeated testing on the same force level in general lower values of strand extensions were measured. Consequently lower values of creep displacement rates k were calculated, what through higher values of pull-out resistance R_a denote higher load-bearing capacity.
- In the following cases at immediately repeated tests the force level of first testing (where $k > k_{krit} = 2$ mm has been reached) has been exceeded: at SBz-26 anchor of the type RCP/D (first comprehensive acceptance test, then investigation test), at SBz-86 anchor of the type RCP/D-I (first comprehensive acceptance test, then investigation test) and at SBz-12 anchor of the type RCP/D-I (successively accomplished two comprehensive suitability tests). Strand bond lengths of RCP/D-Z anchors have failed completely (actual physical pull-out from the cement grout within the corrugated polyethylene duct), therefore only one attempt of repeated testing has been made (anchor SBz-56), where the value of pull-out resistance R_a from 2008 could not be reached. Deliberations in connection with such behaviour of anchors are given in the [chapter 4.2](#), whereat favourable influences of previous testing or lock-off state of an anchor as well as unfavourable influences of repeated testing has been discussed. Stress-strain condition in the vicinity of strands bond length is very complex due to different interfaces of materials, placed into very confined space and complicated action of strand to cement grout bond over contact with corrugated polyethylene duct to the cement grout to the bearing ground bond. Therefore the assumption of seemingly superior anchor behaviour could be finally rejected or confirmed only with the sufficiently large extent of laboratory testing of instrumented anchors.

Important advantage of RCP/D-Z and RCP/D-I anchors concept with staggered positions of anchor units bond length stand out a case of one strand or anchor unit failure (either due to locally essentially weaker ground or weakened strand to cement grout bond or rupture of a steel strand) that does not necessarily indicate a failure of the complete anchor. Remaining strands of other anchor units are frequently able to sustain their portion of anchor load so that the consequence of failure of individual strands or anchor unit is just the reduction of anchor load.

With intention to increase the efficiency of all modified types of permanent prestressed strand ground anchors (RCP/D-K, RCP/D-Z and RCP/D-I) following improvements are suggested:

- Performed testing field tests confirmed the fact, known for a long time, that for effective performance of bond length the bare strands should be covered with at least 5 mm thick layer of cement grout irrespective of the anchor bond length design (Littlejohn, 1993, Hanna, 1982).
- The efficiency of anchor bond length could be improved with the increase of corrugated polyethylene duct diameter. In that case the region around bare strands within corrugated polyethylene duct could be reinforced (spiral micro reinforcement, cement grout with admixed fibres etc.). Simultaneously the space would be gained for nodding or local deforming of strands. For achieving higher stiffness of the RCP/D-K anchors the placement of strands $\varnothing 12.5$ or even $\varnothing 15.2$ mm ($\varnothing 15.7$ mm) would be possible, instead of straight wires $\varnothing 5$ mm.
- The efficiency of RCP/D-Z and RCP/D-I anchors could be improved with the upgrading of technological detail of anchor units packing connections at the transition between strand bond and free lengths. In the free length greased and sheated strands should be replaced with some other

solution, that offers higher stiffness in radial direction, for separation of the strands from the cement grout and to assure appropriate corrosion protection.

- Different values of minimal lengths required for transition of force from a strand to cement grout could be found in the literature. Although as minimal length for transition of force from the strand to the grout suffice the bare strand length of 1.0 to 1.5 m, it is recommended for practical purposes to use the bond lengths l_v between 2.0 and 3.0 m (Barley, 1997a). Bruce et al. (2007) propose the bond lengths l_v between 1.5 and 3.5 m, whereas Dywidag company suggest the lengths l_v between 2.0 and 4.5 m. Provided strands or tendon nodding the transition of force from the strand to the grout is assured with lengths of l_v 2.0 m, however the shortest effective tendon bond length of unit anchors is proposed in the range of 2.0 to 2.5 m (Barley and Bruce, 2005).

Carried out in-situ investigation tests and comprehensive suitability tests of RCP/D-Z and RCP/D-I anchors proved that efficient performance and utilisation of available resistance of anchor bond lengths is assured only when the pull-out of individual strands, from the cement grout within the corrugated polyethylene duct, is prevented. As for specific design of RCP/D-Z and RCP/D-I anchors the combination of strand and anchor unit nodding is suggested, whereat the minimal anchor unit strands bond length should be 2.5 m (in case of the increased diameter of corrugated polyethylene duct) and 3.0 m (the unchanged diameter of corrugated polyethylene duct) respectively. Of key importance is to provide immaculate condition of bare strands in the bond length within the polyethylene encapsulation!

- Already in the anchor production the strands with different lengths of free and bond lengths (multiple anchors with staggered anchor units RCP/D-Z and anchors with increased stiffness of bond length RCP/D-I) should be properly marked to facilitate the in-situ tests.
- To assure more obvious behaviour of anchor free length and indubitable results of strand bond length it is recommended to apply centralizers also in the anchor free length.

Provisions of European regulation for execution of investigation tests (*EN 1997-1*, *EN 1537* in *prEN ISO 22477-5*) are indeterminate and not precise enough, therefore Swiss standard *SIA 267/1* is mainly used in practice, which procedures for execution and evaluation of investigation tests are identical to the provisions of the Recommendation *SIA V 191*, introduced into our practice in 1997. The execution of the investigation tests is therefore well covered, however, according to our investigations following supplements for the investigation test procedure are suggested:

- Displacement measurements on the piston with regard to the monostrand jack casing provide a simple estimate of strand extensions, however reliability of such measurements (due to possible slip of a strand in the wedge) is not as high as extensions, measured directly on the strand (Hanna, 1982). Slips of strands in such cases are considered as extensions of strand bond length, so they are included into the creep displacement rates k , what is not in complete accordance with actual behaviour of the strand bond length. On the basis of aforementioned finding in combination with the findings of our laboratory investigations of the influence of isothermal relaxation on the behaviour of a strand, performed according to the in-situ investigation test procedure, the suggestion can be made for practical execution of the in-situ bearing capacity tests of prestressed strand anchors: strand extensions should be measured either with respect to an exterior fixed point (reduction of the influence of anchored structure displacements) or supplementary measurements of the strand slips with the respect to the wedge should be provided and considered when evaluating the creep displacement rates k .
- Based on the analysis of laboratory test results, conclusion has been made that each anchor should be loaded with slowly increasing force to a limited level (not to provoke any significant damage

of anchor bond length) before the commencement of an investigation test. Results of accomplished laboratory investigations alone (without additional testing) do not provide exact force level of preloading, however according to the carried out testings appropriate starting-point could be force around the level of 30 % R_m . This force should still not exceed 50 % of in advance estimated pull-out resistance of the anchor. Such force level should be sufficient for the mutual compression and adjustment of anchor head steel components and load cell, the strands in the free length could be straightened and activated as well as it would enable the reduction of friction in the anchor free length, inner anchor head and in the monostrand jacks.

- Anchor loading and unloading during in-situ testing should be carried out equably, in both cases with the rate not higher than 10 kN/s, as stated in the *prEN ISO 22477-5*.
- With the reference to the use of load cell possibilities for the improvements are:
 - instead of load cells with the resolution of 1.0 kN the load cells with higher resolution (presumably 0.1 kN) should be used, so more accurate supplements of decreased forces to the prescribed force level P_i could be assured, consequently the scatter of strand extensions would be lower and evaluated creep displacement rates k would be more stable;
 - with the intention of minimizing the influence of eventual load cell damages on measured forces the calibration interval should be shortened from 12 to 6 months.
- Precise placing of a load cell and all steel components of an anchor head is needed for accurate test results – both bearing plates below and above the load cell should be of sufficient dimensions and stiffness, complete system should be placed centrally as to the anchor tendon axis, whereat all requirements of the load cell manufacturer should be met. Analysis of the investigation test results, obtained during recent years, showed that the best fit of the interval creep displacement rates k_{int} and the allowable creep displacement rates k_{adm} could be reached in cases, where a firm base for setting up a system for anchor head measurements has been prepared.
- Performed analysis confirmed that the execution of investigation tests on smaller independent reinforced concrete (RC) blocks gives unreliable results. In these cases it is almost impossible to prevent displacements of RC blocks towards the bearing ground. Besides, the accuracy of measurements of these displacements in practice is rather limited and usually for an order of magnitude lower than the accuracy of strand extension measurements. In the calculation of creep displacement rates k RC block displacements have to be subtracted from strand extensions, so different accuracy of both measurements has a direct influence on calculated values of the creep displacement rates k .
- Supplements of decreased forces to the prescribed force level P_i of the investigation test current load step are reasonable only on the higher force levels, where the decreasing forces are caused by the phenomenon of intrinsic relaxation. European execution standards do not require the supplements of decreased forces, that is acceptable only on the condition of perfectly impermeable operating of stressing equipment (hydraulic system hoses, monostrand jacks gaskets and hydraulic pump with the central manifold of hydraulic system).
- At the in-situ testing of the modified anchors with different free lengths it is important that the manometer and the valve are installed at the connection of each monostrand jack hose to the central manifold of hydraulic system. If so, it is possible to close the valve of the individual strand or anchor unit in the case of bond lengths failure and to separate them from the joint hydraulic system, while the manometers on the central manifold enable the hydraulic pressure control in the separated monostrand jacks. In this way continuation of pull-out resistance test on other strands of the anchor is enabled on higher force levels and termination of investigation test due to failure of individual strands is not necessary.

- At the investigation test the readings of strand extensions have to be done in time intervals that cover different execution standards, so subsequent processing and analysis of data could be done according to different methods. The following time intervals are suggested: one minute (1'), 2', 3', 4', 5', 7', 10', 15', 20', 25', 30', 35', 40', 45', 50', 55', 60', 75', then after 15', whereat strand extensions should be monitored until creep displacement rate k does not rise anymore. Nevertheless minimal observation time has to be 15', on the level of lock-off load P_0 30' and on the level of proof load P_{pv} 60' and 180' in rocks and soils, respectively, or until bond length failure is attained. Although six cyclic load steps of investigation test are foreseen in the European execution standards (*EN 1537* and *prEN ISO 22477-5*), the approach of Swiss standard *SIA 267/I*, with the range of six to ten cyclic load steps, gives more opportunity to adapt the number of load steps to the ground conditions and to the anchor type (testing in the poor ground require more load steps to obtain enough data at low force levels, on the basis of which bond length behaviour could be analysed).
- With the reference to lower values of creep displacement rates k , obtained at repeated testing of pull-out resistance on the same anchor (or previously locked-off anchor) and taking into account our experiences as well as finding from available literature sources (Briaud et al., 1998) the suggestion can be made to unload the anchor, leave it in an unloaded (or minimally loaded) state for at least 24 hours. Only then the pull-out resistance test on the anchor should be repeated.

After the completion of the in-situ investigation tests and comprehensive suitability tests follows the detailed analysis of measured strand extensions of an anchor, stressed with the monostrand jacks, connected to the hydraulically synchronized system. The most important steps of the analysis of the obtained data are:

4. for each force levels P_i the interval creep displacement rates k_{int} have to be determined separately for each strand and for complete anchor as well, while in the case of the anchors with different free and/or bond lengths it is suitable to determine k_{int} also for anchor units,
5. on the basis of k_{int} values two pull-out resistances R_a of an anchor have to be determined: from the average extensions of all strands value $R_{a,s(k-povp)}$ is evaluated, whereas with the sum of pull-out resistances of individual strands of the anchor values $R_{a,s(\Sigma pramen)}$ is calculated,
6. from pull-out resistances of separate anchors, on which investigation test has been performed, characteristic pull-out resistance R_{ak} , for the anchored structure as a whole, has to be determined.

For the investigation tests, carried out on the testing field anchors, the comparison of the competent interval creep displacement rates k_{int} , determined after four different methods (IP, SIA, 10 and ISO) show, that method 10 gives the results on unsafe side (especially in the cases of sudden bond length failures at long observation times), therefore method 10 is not appropriate for practical applications. The results of other three methods (IP, SIA and ISO) are rather similar and in the range of expected scatter of results. However, in the case that the investigation tests results are analysed by experienced specialist than the best fit of actual behaviour of bond lengths can be achieved with the method IP. On the other hand this method does not prevent incorrect and misleading evaluation of investigation test results, especially when applied by an inexperienced person. In that case the use of the method ISO or the method SIA assure more reliable evaluation of investigation test results and less chance of wrong judgment at the determination of pull-out resistance R_a .

Provided that the chosen proof load P_{pv} is too low and/or the resistance of anchor steel tendon is not sufficient with regard to the anchor pull-out resistance, then the failure of anchor bond length can not be reached (i.e. the values of interval creep displacement rates k_{int} would be lower than the critical creep

displacement rate $k_{krit} = 2$ mm). In this instance it is not possible to determine the anchor pull-out resistance R_a , for sure we can only say, that it is greater than proof load P_{pv} , whereat the Swiss standard *SLA 267/1* gives us possibility to estimate the value of R_a as the value of proof load P_{pv} , increased for 10 %. Based on detailed study of influential factors on the anchor bond length resistance the conclusion can be made, that such extrapolation of proof load P_{pv} is possible, however cautious estimate of anchor behaviour at the investigation test is necessary. In such estimate an experienced specialist has to consider the combination of following influences: (1) the linear trend approximation of the creep displacement rates at the proof load P_{pv} (considering all strands and the anchor as a whole), (2) the maximum reached creep displacement rate at individual force levels P_i of all strands and (3) the interval creep displacement rate k_{int} at proof load P_{pv} of all strands and the anchor as a whole (on the basis of our analysis it should not be greater than 1.35). The only and decisive basis for the extrapolation of proof load P_{pv} for 10 % must be well-founded estimation of the experienced specialist that the anchor is capable of taking over the force of $1.10 \cdot P_{i,max}$, where $P_{i,max}$ is the force at last reached loading step of investigation test. Groundless determination of pull-out resistance R_a as proof load P_{pv} , extrapolated for 10 %, can be wrong and highly misleading, the same is also true when decision about extrapolation is taken considering only the values of $k_{int}(P_{pv})$!

As already mentioned different methods (IP, SIA, 10 and ISO) have been used for the determination of interval creep displacement rates k_{int} . The use of different methods has been reflected in the different values of pull-out resistances $R_{a,s(k-povp)}$ and $R_{a,s(\Sigma pramen)}$. The comparison between pull-out resistance of the anchor as a whole $R_{a,s(k-povp)}$, determined on the basis of average extensions of all anchor strands, and the sum of pull-out resistances of individual strands of the anchor $R_{a,s(\Sigma pramen)}$ shows, that by the standard anchors (with the equal bond lengths of all strands) both values are approximately equal, provided that anchor tendon failed as a whole. In cases of the distinctive failure of the strand to cement grout bond within the corrugated polyethylene duct (in our cases at all RCP/D-Z anchors and majority of the RCP/D-I anchors), we suggest the use of approach with adding of pull-out resistances of individual units of an anchor, whereat special attention is required at consideration of the last load step extrapolation for 10 %. Different approach is needed when dealing with the pull-out resistances of the strand bond lengths, positioned side by side in the same anchor unit (RCP/D-Z and RCP/D-I anchors) or anchor (RCP/D and RCP/D-K anchor): for practical application we suggest that in case of one strand failure we assume that on the same force level the pull-out resistance of all other strands of the same anchor unit is reached (even in the case of low values of creep displacement rates in other strands the extrapolation is left out of consideration). The values $R_{a,s(k-povp)}$ and $R_{a,s(\Sigma pramen)}$ should be determined for each anchor, whereat the difference between both values indicates that the bond length behaviour of individual strands is different, therefore the special attention and careful analysis is needed. In cases of failure and pull-out of the anchor bond length as a whole at the bond with bearing ground it has to be assured, that the sum of pull-out resistances of individual strands of the anchor $R_{a,s(\Sigma pramen)}$ is not greater than the pull-out resistance of the anchor as a whole $R_{a,s(k-povp)}$.

The statistical analysis of scatter of the anchor pull-out resistances R_a has been performed for the investigation tests, carried out in last decade. The 95th percentile of coefficient of variation for the investigation tests results on an anchored structure has been determined as $V_{R_a,95} = 0.25$. In case when the coefficient of variation of R_a values on a particular anchored structure is greater than $V_{R_a,95}$, than the scatter of investigation tests results could be estimated as (too) large so detailed anchor behaviour analysis is needed, reasons for large deviations and eventual doubtful investigation tests results have to be identified and when necessary also substitutional investigation tests have to be carried out. If reasons

for deviations could not be discovered it is possible that the ground conditions in the region of anchored structure are so variable, that the region has to be treated separately.

The requirements for the definition of common characteristic pull-out resistance of the productional anchor R_{ak} are not evidently defined in the valid regulation. Therefore, different approaches were used for the determination of R_{ak} values. Null hypothesis about the population distribution of average investigation tests pull-out resistances, as well as coefficients of variation of investigation tests pull-out resistances, have been tested on the results from the practice obtained in the last decade. At selected significance level 5 % it could not be confirmed that the average investigation tests pull-out resistances do not follow a normal distribution. Based on fact that statistical methods could be used for the evaluation of investigation tests results according to the Eurocodes, the prediction method and the Bayes method have been used. In both methods, two approaches have been considered: scatter of pull-out resistances has been determined on the basis of available historical data of numerous investigation tests, performed in the last decade, as well as consideration of the scatter of sparse investigation tests performed on the particular anchored structure. Attempt was made to determine R_{ak} value on the basis of all values k_{int} , obtained at all performed investigation tests on the anchors of the same type, where the least square method has been used to find the best-fit curve to the values k_{int} . At the same time conclusion has been made that exclusion of k_{int} values of the first two load steps of investigation test does not have a significant effect on the characteristic pull-out resistance R_{ak} . Comparison of R_{ak} values obtained by different methods shows:

- considering all values and the best-fit curve, bilinear diagram according to the *prEN ISO 22477-5*, method *TSC 07.202* as well as the statistical prediction method for the case of unknown coefficient of variation, reliable and so applicable R_{ak} values could not be obtained,
- using the statistical prediction method and the Bayes method in combination with the known coefficient of variation, the advantage of much larger statistical sample (available historical data of numerous investigation tests, performed in the last decade) and known scatter of these investigation tests results, could be taken; method with the correlation factor ξ after standard *EN 1997-1* as well as standards *EN 1537* and *SIA 267* respectively (consideration of the smallest obtained pull-out resistance R_a as characteristic value) give a bit smaller values of R_{ak} .

Aforementioned findings confirm the suitability of European standards for the analysis of investigation tests and for the determination of characteristic value. Values obtained according to *EN 1537* and *SIA 267* respectively are approximately 5 % higher than the values, obtained according to *EN 1997-1*, what can be attributed to the fact that the estimation of the standard *SIA 267* (the smallest obtained pull-out resistance R_a of the particular anchored structure is adopted as characteristic value) does not have statistical basis, i.e. it is possible that at the next investigation test on the same structure lower value of R_a could be attained.

Admissible creep displacement rates k_{adm} (obtained at investigation tests) and interval creep displacement rates k_{int} (obtained at comprehensive and simple acceptance tests) have been compared for the testing field anchored structure OZ-05 and for four other anchored structures. It has been found out that values of k_{int} are not always smaller than k_{adm} . Possible reasons for that could be: (1) measurements of anchor head displacements were not performed, (2) measurements were performed with lower precision during investigation tests and comprehensive/simple acceptance tests, (3) variable ground conditions on the site of an anchored structure (investigation tests cover just small portion of anchored structure area), (4) observations of (too) short durations at individual force levels P_i , (5) different anchor

bond and free lengths, (6) setting time of cement grout at comprehensive and simple acceptance tests is frequently shorter than in the case of investigation tests due to limited construction time. Influences of different axial stiffness of anchor bond length (anchors for investigation tests are as a rule equipped with additional strand), as well as different number of incremental load cycles (at investigation tests six to ten load steps, at comprehensive acceptance tests three load steps and at simple acceptance tests only one load step) are also present.

The prepared software tool of open design enables simultaneous record and evaluation of the most important behaviour parameters of an anchor at in-situ investigation test. The software tool covers strand anchors with different number of strands with arbitrary lengths of free and bond lengths of the strands. In detailed analysis of anchor behaviour on the level of the whole anchor, on the level of anchor units as well as on the level of individual strands is performed. Competent interval creep displacement rates k_{int} are determined, as described in this thesis, according to four different methods (IP, SIA, 10 and ISO). The pull-out resistance R_a of the anchor as a whole has been evaluated with averaging of displacements of all strands $R_{a,s(k\text{-povp})}$, and compared with the sum of pull-out resistances of individual strands of the anchor $R_{a,s(\Sigma\text{pramen})}$.

By means of the two types of laboratory tests, some reasons for high values of the creep displacement rates at low force levels of the investigation tests has been identified. Some detrimental factors have been ascertained at laboratory testing, which appear at in-situ investigation tests and consequence of which are increased values of strand extensions (consequently also increased values of the creep displacement rates k) in the initial force levels P_i which could not be directly related with the behaviour of the anchor bond length. On the basis of the analysis of laboratory test results the conclusion has been made, that each anchor has to be loaded with slowly increasing force of limited level (not to provoke any significant damage of anchor bond length), before the commencement of investigation test. The intention of such preloading is to cause mutual compression and adjustment of anchor head steel components and load cell, strands in the free length could be straightened and activated, at the same time the independent reinforced concrete (RC) blocks could be at least to some extent settled to the bearing grounds.

On the basis of the investigations of eccentricity of a ring load cell of the type L216V150 (manufacturer SISGEO S.r.l.) as for anchor tendon on measured forces it can be concluded that eccentricity of the ring load cell as to the anchor tendon axis has only a little influence on measured values of force. Especially on the first level of force the relative repeatability error without rotation has been relatively large so that the force deflections exceeded the declared value. Such behaviour was attributed to the limited resolution of the ring load cell in the lower part of measuring range, and to some extent also to the slightly twisted steel distribution ring of the load cell. Deviations of measured forces also influence the apparent free lengths l_f . This influence is more distinctive on the initial force levels of an investigation test and decreases at higher force levels.

Laboratory testing results do not coincide with the statements of researchers (Barley and McBarron, 1997 as well as Barley and Windsor, 2000) regarding poor reliability of load cells used in on-site conditions. In current practice there was one case where two different load measuring systems were used simultaneously, where differences between the measured values on a ring load cell in comparison with pressures in hydraulic system, measured on a specially calibrated manometer, have been noticed. The reason for differences was mainly the use of ring load cell in contrast to the requirements of the manual

for use of the ring load cell manufacturer, but to a certain degree it was also a consequence of a multi-strand jack friction. Considering high sensitivity of creep displacement rates at long observation time on individual force levels P_i (equation (2.1)) and limited resolution of load cells (1 kN) it is very delicate in practice to accurately supplement decreased forces to the prescribed force level P_i .

Beside the laboratory investigations of eccentric positions of the ring load cell with respect to anchor tendon on measured forces, the laboratory investigations of the influence of isothermal relaxation on the behaviour of a strand have also been performed. In spite of some initial scruples about successful accomplishment of exacting investigations following the procedure for the in-situ investigation test of prestressed ground anchor, we have been able to get the basic insight into the phenomenon of the decreasing forces in the prestressed strand of an anchor at all force levels of the investigation test. According to the available sources we have been the first, who tried to link the in-situ investigation tests with the broad aspect of isothermal relaxation and to find the explanation for decreasing forces in connection with the increased values of strand extensions in the initial force levels P_i .

Owing to the low radial compressive stresses in a bush, the mechanism of transition of force from the bush over a wedge to the outer spiral wires of a strand, the quality of contact surfaces (particularly of the wedge in a jack) and the friction between the wires of the strand, decreasing forces appear already in the first force levels P_1 of an investigation test. At higher force levels (above 60 % R_m) the intrinsic relaxation well known from prestressed structures (as bridges or viaducts) appears also during the execution of the in-situ investigation test: as tension force in the strand increases, the value of decreasing forces also increases (i.e. the relaxation also increases). Decreased forces have maximum value at first execution of the investigation test, each further repetition of the investigation test causes the reduction of the values of decreased forces. The indicative finding of the successively repeated laboratory tests of isothermal relaxation on the same strand sample was, that after the finished first test during intermediate phases of following test in the strand came to the slow release of force, what we term as reverse relaxation phenomenon.

The software tool of open design for registration of readings and behaviour control during testings as well as for subsequent detailed evaluation of anchor behaviour parameters has been prepared. It has been concluded that anchors with modified types of bond lengths are feasible in practice. Testing procedures of modified types of anchors have been verified, whereat separation of pulled-out strands during testing is possible in practice. All this with developed software tool and contractor's equipment pave the way for implementation of such anchors in the future.

VIRI

Adams, D.A., Littlejohn, G.S. 1997. Anchorage load transfer studies using an instrumented full-scale reusable laboratory apparatus. V: Littlejohn, G.S. (ur.). International conference on ground anchorages and anchored structures in service. ICE London, March 1997. London, Thomas Telford: str. 411-421.

Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-12.3-4. 2009. Spannstahllitzen St 1570/1770 aus sieben kaltgezogenen, glatten Einzeldrähten, Nenn-Durchmesser: 6,9-9,3-11,0-12,5-12,9-15,3 in 15,7 mm. Berlin, Deutsches Institut für Bautechnik: 10 str.

<http://www.kummetat.de/download/spannstahllitze.pdf> (pridobljeno 28.10.2009).

Anchoring slopes in the Himalayas.

<http://www.waterpowermagazine.com/story.asp?sectionCode=46&storyCode=2048373> (pridobljeno 05.11.2009).

AS 1311:1972 – Steel tendons for prestressed concrete.

ASTM A416:2005 – Standard specification for steel strand, Uncoated seven-wire for prestressed concrete.

ASTM E328:2002 – Standard test methods for stress relaxation tests for materials and structures.

AVT Anker + Vorspanntechnik AG, 2005. AVT Boden- und Felsanker Technische Dokumentation.

http://www.stahlton.ch/deutsch/03_bautechnik_ch/01_angebote/pdf/ankerdok-d.pdf (pridobljeno 11.12.2008).

Bajželj, U., Likar, J., Žigman, F. 1995. Some procedures for instalation of anchoring system and the evaluation of capacity. V: Widmann, R. (ur.). Anchors in theory and practice. Salzburg, 9-10 October 1995. Rotterdam, Brookfield, A.A. Balkema: str. 189-196.

Banholzer, B., Brameshuber, W., Jung, W. 2005. Analytical simulation of pull-out test – The direct problem. *Cement & Concrete Composites* 27, 1: 93-101.

Barley, A.D. 1990. Ground anchorage containing a multiple of ground anchorages : patent number EP 0 356 215 A2, date of publication of application 28.02.1990; application number 89308532.4. European Patent Office: 6 str.

Barley, A.D. 1995. Theory and practice of the single bore multiple anchor system. V: Widmann, R. (ur.). Anchors in theory and practice. Salzburg, 9-10 October 1995. Rotterdam, Brookfield, A.A. Balkema: str. 293-301.

<http://www.sbmasystems.com/anchorman/pdfs/SBMATP2.pdf> (pridobljeno 01.10.2008).

Barley, A.D. 1997a. The single bore multiple anchor system. V: Littlejohn, G.S. (ur.). International conference on ground anchorages and anchored structures in service. ICE London, March 1997. London, Thomas Telford: str. 65-75.

<http://www.sbmasystems.com/anchorman/pdfs/SBMATP3.pdf> (pridobljeno 01.10.2008).

Barley, A.D. 1997b. Properties of anchor grouts in a confined state. V: Littlejohn, G.S. (ur.). International conference on ground anchorages and anchored structures in service. ICE London, March 1997. London, Thomas Telford: str. 13-22.

<http://www.sbmasystems.com/anchorman/pdfs/GATP6.pdf> (pridobljeno 01.10.2008).

Barley, A.D. 1997c. Ground anchor tendon protected against corrosion and damage by a double plastic layer. V: Littlejohn, G.S. (ur.). International conference on ground anchorages and anchored structures in service. ICE London, March 1997. London, Thomas Telford: str. 371-383.

Barley, A.D. 1997d. Trial soil nails for tunnel face support in London clay and the detected influence of tendon stiffness and bond length on load transfer. V: Davies, M.C. (ur.), Schlosser, F. (ur.). 3rd international conference on ground improvement geosystems. London, 3-5 June 1997. London, Thomas Telford: 12 str. <http://www.sbmasystems.com/anchorman/pdfs/SNTP6.pdf> (pridobljeno 17.12.2008).

Barley, A.D., McBarron P.L. 1997. Field trials on four high capacity removable multiple anchors founded in marine sand fill and completely decomposed granite. V: Littlejohn, G.S. (ur.). International conference on ground anchorages and anchored structures in service. ICE London, March 1997. London, Thomas Telford: str. 148-157.

Barley, A.D., Windsor, C.R. 2000. Recent advances in ground anchor and reinforcement technology with reference to the development of the art. V: International conference on geotechnical and geotechnical engineering, vol. 1. 19th – 24th November 2000, Melbourne, Australia. Basel, Lancaster: str. 1157-1252. <http://www.sbmashsystems.com/anchorman/pdfs/GATP12.pdf> (pridobljeno 01.10.2008).

Barley, A.D., Bruce, M.E. 2005. Enhancement of ground anchor design based on tests on multiple anchors. V: GEO construction quality assurance / quality control technical conference, Dallas/Fort Worth, Texas, 6 – 9 November 2005. Dallas, Texas, USA, The International Association of Foundation Drilling: 8 str. <http://www.sbmashsystems.com/anchorman/pdfs/SBMATP14.pdf> (pridobljeno 01.10.2008).

Barrage – Cheurfas.

http://encyclopedie-afn.org/index.php/Barrage_-_Cheurfas (pridobljeno 04.11.2009).

Bassett, R.H. 1970. Discussion to paper on soil anchors. V: ICE Conference on ground engineering. London 1970: str. 89-94.

Benmokrane, B., Chennouf, A., Ballivy, G. 1992. Study of bond strength behaviour of steel cables and bars anchored with different cement grouts. V: Kaiser, P.K. (ur.), McCreath, D.R. (ur.). Rock support in mining and underground construction. Proceedings of the international symposium on rock support. Sudbury, Ontario, Canada 16 – 19 June 1992. Rotterdam, Brookfield, A. A. Balkema: str. 293-301.

Benmokrane, B., Chekired, M., Xu, H., Ballivy, G. 1995. Behavior of grouted anchors subjected to repeated loadings in field. Journal of Geotechnical Engineering 121, 5: 413-420.

Berardi, G. 1967. Sul comportamento degli anchoraggi immersi in terreni diversi. University Genoa, Inst. Constr. Sc. Series III, 60: 18 str.

Bohte, Z. 1991. Numerične metode. Ljubljana, FMFA: 159 str.

Breit, K., Martak, L., Suppan, M. 2009. Die Einführung des EC 7, Teil 1, ÖNORM EN 1997-1, ÖNORM B 1997-1-1. Verankerungen. Austrian Standards plus Trainings: 55 str. http://publik.tuwien.ac.at/files/PubDat_175822-pdf (pridobljeno 24.05.2010).

Briaud, J.L., Powers, W.F., Weatherby, D.E. 1998. Should grouted anchors have short tendon bond length. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 124, 2: 110-119.

Bruce, D.A. 1989. Methods of overburden drilling in geotechnical construction – A generic classification. Ground Engineering 22, 7: 25-32. http://www.geosystemsbruce.com/v20/biblio/038_Methods_of_Overburden_Drilling.pdf (pridobljeno 22.12.2008).

Bruce, A.B., Barley, A.D. 2003. Two important recent developments in ground anchor technology = Dos avances importantes recientes en la tecnología de anclajes de tierra. V: Soil and Rock America 2003, 12th Pan-American conference on soil mechanics and geotechnical engineering, 39th U.S. Rock mechanics symposium. Cambridge, MA, Massachusetts Institute of Technology, June 26: 8 str. http://www.geosystemsbruce.com/v20/biblio/z182_2003_twoImportantRecentDev-pdf (pridobljeno 06.01.2009).

Bruce, M.E.C., Gómez, J., Traylor, R.P. 2007. Repeated lift-off testing of single bore multiple anchors for dam retaining wall over a 5-year period. V: Littlejohn, G.S. (ur.). International conference on ground anchorages and anchored structures in service. ICE London, November 2007. London, Thomas Telford: str. 111-119. <http://www.sbmashsystems.com/anchorman/pdfs/Paper34.pdf> (pridobljeno 01.10.2008).

BS 3617:1971 – Standard specification for seven wire strand for prestressed concrete.

BS 8081:1989 – British standard code of practice for ground anchorages.

Casanovas, J.S. 1989. Bond strength and bearing capacity of injected anchors : a new approach. V: 12th International conference on soil mechanics and foundation engineering, vol. 2. Rio de Janeiro, 13-18 August 1989. Rotterdam, Brookfield, A.A. Balkema: str. 1005-1008.

Cavill, B.A. 1997. Very high capacity ground anchors used in strengthening concrete gravity dams. V: Littlejohn, G.S. (ur.). International conference on ground anchorages and anchored structures in service. ICE London, March 1997. London, Thomas Telford: str. 262-271.

Cheney, R.S. 1990. DP-68 – Permanent ground anchors. Vol. 1: Final report. Washington, D.C., US Department of Transportation, FHWA, FHWA-DP-90-068-003, April 1990: 52 str.

<http://isddc.dot.gov/OLPFiles/FHWA/009989.pdf> (pridobljeno 15.12.2008).

Cheney, R.S. 1990. DP-68 – Permanent ground anchors. Vol. 2: Field demonstration project summaries. Washington, D.C., US Department of Transportation, FHWA, FHWA-DP-90-068-003, April 1990: 323 str.

<http://isddc.dot.gov/OLPFiles/FHWA/009988.pdf> (pridobljeno 15.12.2008).

Coates, D.F., Yu, Y.S. 1970. Three dimensional stress distributions around a cylindrical hole and anchor. V: 2nd International Conference on Rock Mechanics, vol. 2. Belgrade, 21-26 September 1970. Beograd, Institute Jaroslav Černi: str. 175-182.

Dabous, S.A. 2000. Relaxation of prestressed steel used in construction of the confederation bridge. Master of science thesis. Montreal, Concordia University: 121 str.

<http://spectrum.library.concordia.ca/1088/1/MQ54363.pdf> (pridobljeno 03.02.2010).

Dausch, G., Kluckert, K.D. 2001. Aktueller Stand der Ankertechnik. Tiefbau TBG 45, 6: 397-404.

http://www.baumaschine.de/Portal/download.php?w=Tbg&p1=2001&p2=heft6&n=a397_404.pdf

(pridobljeno 26.11.2009).

Davison, B. (ur.), Owens, G.W. (ur.). 2003. Steel designers' manual. 6th edition. Steel Construction Institute, Blackwell Publishing: 1321 str.

<http://www.scribd.com/doc/8605440/Steel-Designers-Manual-6th-Edition> (pridobljeno 30.09.2009)

Desai, C.S., Muqtadir, A., Scheele, F. 1986. Interaction analysis of anchor-soil systems. Journal of Geotechnical Engineering 112, 5: 537-553.

Devalapura, R.K., Tadros, M.K. (1992). Stress-strain modeling of 270 ksi low-relaxation prestressing strands. PCI Journal, 37 (2): 100-105.

Dieter, G.E. 1988. Mechanical metallurgy. SI Metric edition. London, McGraw-Hill: 751 str.

DIN 4125-2:1976 – Erd- und Felsanker – Verpressanker für dauernde Verankerungen (Daueranker) im Lockergestein. Bemessung, Ausführung und Prüfung.

DIN 4125:1990 – Verpressanker – Kurzzeitanker und Daueranker. Bemessung, Ausführung und Prüfung.

Dywidag geotechnical product range. Dywidag-Systems International.

http://www.dywidag-systems.com/uploads/media/DSI-DYWIDAG_Geotechnical_Product_Range_en_01.pdf

(pridobljeno 23.11.2009).

Eklund, D. 2003. Penetrability for cementitious injection grouts. Licentiate Thesis. Stockholm, Royal Institute of Technology, Division of Soil and Rock Mechanics: 72 str.

http://www.diva-portal.org/diva/getDocument?urn_nbn_se_kth_diva-1584-2_fulltext.pdf (pridobljeno 08.04.2009).

Empfehlung SIA V 191, 1995. Vorgespannte Boden- und Felsanker. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA), Zürich: 64 str.

Faith, Š. 1985. Priporočila za sidranje v zemljinah in hribinah. Gradbeni vestnik, 34, 3: 51-57.

Fellenius, B.H. 2001. From strain measurements to load in an instrumented pile. Geotechnical News Magazine 19, 1: 35-38.

FIP Recommendations : design and construction of prestressed ground anchorages. 1996. SETO: 29 str.

- Frank, R., Bauduin, C., Driscoll, R., Kavvadas, M., Krebs Ovesen, N., Orr, T., Schuppener, B. 2004. Designers' guide to EN 1997-1 : Eurocode 7 : Geotechnical design – General rules. London, Thomas Telford: 216 str.
- Freyssinet AG 2007. Boden- und Felsanker. Technische Dokumentation. http://www.freyssinet.ch/cd_2_html/chapitre_01/pdf/page_001_de.pdf (pridobljeno 11.12.2008).
- Fuzier, J.P. 2007. Eminent structural engineer : Eugène Freyssinet (1879-1962). Structural Engineering International 17, 3: 264-265.
- GEOSPEC 1 : Model specification for prestressed ground anchors. 1997. Geotechnical Engineering Office, Civil Engineering Department. Hong Kong, Hong Kong Government: 164 str.
- Ghali, A., Favre, R., Eldbadry, M. 2002. Concrete structures – Stresses and deformations. 3rd edition. New York, Spon Press: 610 str.
- Gilbert, R.I., Mickleborough, N.C. 2004. Design of prestressed concrete. London, Spon Press: 505 str.
- Gilkey, H.J., Chamberlin, S.J., Beal, R.W. 1938. The bond between concrete and steel. ACI Journal Proceedings 35, 9: 1-20.
- Giovannardi, F. With Eugène Freyssinet beyond the limits of reinforced concrete. http://www.giovannardierontini.it/Pubblicazioni/Versioni%20Inglese/with_Eugene_Freyssinet_beyond_the_limits_of_reinforced_concrete.pdf (pridobljeno 05.11.2009).
- Grimm, M. 1995. Electrical testing of ground anchors. V: Widmann, R. (ur.). Anchors in theory and practice. Salzburg, 9-10 October 1995. Rotterdam, Brookfield, A.A. Balkema: str. 421-428.
- Gulvanessian, H., Calgaro, J.-A., Holický, M. 2002. Designers' guide to EN 1990 : Eurocode : basis of structural design. London, Thomas Telford: 192 str.
- Haberfield, C.M., Baycan, S. 1997. Field performance of the grout/rock interface in anchors. V: Littlejohn, G.S. (ur.). International conference on ground anchorages and anchored structures in service. ICE London, March 1997. London, Thomas Telford: str. 45-54.
- Hanna, T.H. 1973. Foundation instrumentation. Trans Tech Publications (Series on rock and soil mechanics; Vol.1, No. 3). New York, McGraw Hill Book Co.: 372 str.
- Hanna, T.H. 1982. Foundations in tension : ground anchors. Trans Tech Publications. New York, McGraw Hill Book Co.: 573 str.
- Herbst, T.F., von Matt, U., Martak, L.V. 1995. Die Europäische Norm über Verpreßanker prEN 1537, Harmonisierung durch Vielfalt. V: Widmann, R. (ur.). Anchors in theory and practice. Salzburg, 9-10 October 1995. Rotterdam, Brookfield, A.A. Balkema: str. 437-446.
- Hill, A.T. 2006. Material properties of the grade 300 and grade 270 prestressing strands and their impact on the design of bridges. Master of science thesis. Blackburg, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University: 124 str. <http://scholar.lib.vt.edu/thesis/available/etd-04062006-094819/unrestricted/AaronHillThesis.pdf> (pridobljeno 02.04.2009).
- Houlsby, A.C. 1990. Construction and design of cement grouting : a guide to grouting in rock foundations. New York, John Wiley & Sons: 442 str.
- Hunkeler F., et al. 2005. Spannglieder, Schrägseile und Anker – Beschreibung der Systeme und Erkenntnisse aus Korrosionsschäden. Zürich, Eidgenössisches Department für Umwelt, Energie und Kommunikation, Bundesamt für Strassen: 290 str.
- Hutchinson, D., Diederichs, M. 1996. Cablebolting in underground mines. Richmond, Canada , BiTech Publisher Ltd.: 406 str.

Hyett, A.J., Bawden, W.F., Coulson, A.L. 1992a. Physical and mechanical properties of normal portland cement pertaining to fully grouted cable bolts. V: Kaiser, P.K. (ur.), McCreath, D.R. (ur.). Rock support in mining and underground construction. International symposium on rock support. Sudbury, Ontario, Canada 16 – 19 June 1992. Rotterdam, Brookfield, A. A. Balkema: str. 341-349.

Hyett, A.J., Bawden, W.F., Reichert, R.D. 1992b. The effect of rock mass confinement on the bond strength of fully grouted cable bolts. International Journal for Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts 29, 5: 503-524.

Hyett, A., Bawden, W., MacSporran, G., Moosavi, M. 1995. A constitutive law for bond failure of fully-grouted cable bolts using a modified Hoek cell. International Journal for Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts 32, 1: 11-36.

Hyett, A.J., Moosavi, M., Bawden, W.F. 1996. Load distribution along fully grouted bolts, with emphasis on cable bolt reinforcement. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics 20, 7: 517-544.

ISO 12491:1997 – Statistical methods for quality control of building materials and components.

Jarred, D.J., Haberfield, C.M. 1997- Tendon/grout interface performance in grouted anchors. V: Littlejohn, G.S. (ur.). International conference on ground anchorages and anchored structures in service. ICE London, March 1997. London, Thomas Telford: str. 3-12.

Jirovec, P. 1995. Zusammenhang zwischen Tragverhalten und Ribbildung in der Haftstrecke eines Felsankers. V: Widmann, R. (ur.). Anchors in theory and practice. Salzburg, 9-10 October 1995. Rotterdam, Brookfield, A.A. Balkema: str. 41-47.

Johnston, I.W. (1977). Rock-socketing Down-under. Contract Journal 279: 50-53.

Kaiser, P., Yazici, S., Nosé, J. 1992. Effect of stress change on the bond strength of fully grouted cables. International Journal for Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts 29, 3: 293-306.

Key-to-metals. Pre-stressed steel. Part 1 in Part 2.

<http://www.keytometals.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=ks&NM=230> (pridobljeno 04.11.2009) in <http://www.keytometals.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=ks&NM=241> (pridobljeno 04.11.2009).

Key to Metals AG. Heat-treatment of high carbon steel wire – Patenting.

<http://steel.keytometals.com/default.aspx?ID=CheckArticle&NM=52> (pridobljeno 28.10.2009).

Kim, N.K. 2003. Performance of tension and compression anchors in weathered soil. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering 129, 12: 1138-1150.

Kim, N.K., Park, J.S., Sung, K.K. 2007. Numerical simulation of ground anchors. Computers and geotechnics 34, 6: 498-507.

Klemenc, I. 2008. Pregled razvoja trajnih prednapetih geotehničnih sider in izkušenj opravljenih pregledov sidranih objektov. V: Logar, J. (ur.), Petkovšek, A. (ur.). Razprave 5. posvetovanja slovenskih geoteknikov. Nova Gorica, 12. do 14.06.2008. Ljubljana, Slovensko geotehnično društvo: str. 213-222.

Klemenc, I., Kuhar, V. 2008. Some examples of the poor installation of electrically isolated prestressed ground anchors in Slovenia. V: Littlejohn, G.S. (ur.). International conference on ground anchorages and anchored structures in service. ICE London, November 2007. London, Thomas Telford: str. 43-52.

Klößner, R. 1995. Neuere Entwicklungen in der DYWIDAG Ankertechnik : Der elektrisch isolierte Daueranker und der ausbaubare Temporäranker. V: Widmann, R. (ur.). Anchors in theory and practice. Salzburg, 9-10 October 1995. Rotterdam, Brookfield, A.A. Balkema: str. 345-351.

Koretsky, A.V., Pritchard, R.W. 1982. Assessment of relaxation loss estimates for strands. Journal of the Structural Division 108, 12: 2819-2836.

Kottegoda, N.T. 1998. Statistics, probability, and reliability for civil and environmental engineers. New York, London, Madrid, McGraw-Hill: 735 str.

- Limelette test fields results. 2008. Proceedings of the international symposium ground anchors. 14 May 2008, Brussels, Belgium: 3 zv. (loč. pag.).
- Littlejohn, G.S., Bruce, D.A. 1977. Rock anchors – State of the art. Essex, England, Foundation Publication: 50 str.
- Littlejohn, S. 1993. Overview of rock anchorages. V: Hudson, J.A. (ur.). Comprehensive rock engineering : excavation, support and monitoring, vol. 4. Oxford, Pergamon Press: str. 413-450.
- Littlejohn, G.S., Weerasinghe, R.B. 1997. Instrumented full-scale re-usable laboratory apparatus for rock anchorage testing. V: Littlejohn, G.S. (ur.). International conference on ground anchorages and anchored structures in service. ICE London, March 1997. London, Thomas Telford: str. 422-431.
- Loflin, B.J. 2008. Bond and material properties of the grade 270 and grade 300 prestressing strands. Master of science thesis. Blackburg, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University: 159 str. <http://scholar.lib.vt.edu/thesis/available/etd-06302008-073338/unrestricted/LoflinThesis.pdf> (pridobljeno 02.04.2009).
- Logar, J., Pulko, B., Selan, V., Kuder, S. 2004. Racionalizacija pri uporabi trajnih geotehničnih sider : končno poročilo RRN DARS. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, FGG: 127 str.
- Logar, J., Klemenc, I., Prokop, B., Pulko, B., Isakovič, S., Pagon, E., Konjar, G., Majes, B. 2008. Racionalizacija pri uporabi trajnih geotehničnih sider. 2. del: končno poročilo RRN DARS. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, FGG, ZAG, GEOT: 39 str.
- Maekawa, T., Ichiki, T., Niki, T., Matsubara, Y., Yamada, M., Kawabe, N., Murai, T. 2007. Practical use of ultra-high strength prestressing strand. Sei Technical Review 64: 75-78. http://www.sei.asia/tr_e/pdf/industrial/64-11.pdf (pridobljeno 02.04.2009).
- Martak, L. 1979. The friction calculation in fixing the load of prestressed anchors with free tendon length. V: Design parameters in geotechnical engineering, VII ECSMFE, Brighton, England, 1979. London, British Geotechnical Society: str. 205-214.
- Mastrantuono, C., Tomiolo, A. 1977. First application of a totally protected anchorage. V: IX International conference on soil mechanics and foundation engineering, speciality session, Tokyo, Japan, 1977. Tokyo, ICESMFE: str. 107-112.
- MC-90 – Model Code for Concrete Structures. 1990. CEB-FIP: 437 str.
- MacLeod, J., Hoadley P.J. 1974. Experience with the use of ground anchors. V: Tech. session on Prestressed concrete foundations and ground anchors, 7th FIP Congress, New York, 26 May – 1 June 1974. London, Concrete Society: str. 83-85.
- Mecsi, J. 1995. Analysis of grouted soil anchors. V: Widmann, R. (ur.). Anchors in Theory and Practice. Salzburg, 9-10 October 1995. Rotterdam, Brookfield, A.A. Balkema: str. 77-85.
- Mecsi, J. 1997. Some practical and theoretical aspects of grouted soil anchors. V: Littlejohn, G.S. (ur.). International conference on ground anchorages and anchored structures in service. ICE London, March 1997. London, Thomas Telford: str. 119-130.
- Meiniger, W. 2002. 30 Jahre Erfahrung mit Dauerankern, Bauen in Boden und Fels. V: 3. Kolloquium Bauen in Boden und Fels. Ostfildern, 22. und 23. Januar 2002. Esslingen, Technische Akademie Esslingen: str. 589-599.
- Merrifield, C.M., Barley, A.D., von Matt, U. 1997. The execution of ground anchor works : the European standard prEN1537. V: Littlejohn, G.S. (ur.). International conference on ground anchorages and anchored structures in service. ICE London, March 1997. London, Thomas Telford: str. 492-501.
- Miller, L.H. 1956. Table of percentage points of Kolmogorov statistics. Journal of the American Statistical Association 51: 111-121.
- Moosavi, M., Jafari, A., Khosravi, A. 2005. Bond of cement grouted reinforcing bars under constant radial pressure. Cement & Concrete Composites 27, 1: 103-109.

Multi-stage strand anchor. 2009. Dywidag-Systems International Ltd.

<http://www.dywidag-systems.com/uk/products/multi-stage-strand-anchors/overview.html> (pridobljeno 24.11.2009)

Nierlich, H., Bruce, D.A. 1997. A review of the post-tensioning institute's revised recommendations for prestressed rock and soil anchors. V: Littlejohn, G.S. (ur.). International conference on ground anchorages and anchored structures in service. ICE London, March 1997. London, Thomas Telford: str. 522-530.

oSIST prEN ISO 22477-5:2005 – Geotehnično preiskovanje in preskušanje – Preskušanje geotehničnih konstrukcij. 5. del: Preskušanje sider (ISO/DIS 22477-5:2005) – Geotechnical investigation and testing – Testing of geotechnical structures – Part 5: Testing of anchorages (ISO/DIS 22477-5:2005).

Ostermayer, H. 1975. Construction, carrying behaviour and creep characteristics of ground anchors. V: Conference on Diaphragm Walls and Anchorages. ICE London, September 1974: str. 141-151.

Ostermayer, H., Scheele, F. 1977. Research on ground anchors in non-cohesive soils. *Revue Française de Géotechnique* 3: 92-97.

Ostermayer, H., Barley, T. 2003. Ground anchors. V: Smolczyk, U. (ur.). Geotechnical engineering handbook. Vol. 2: Procedures. Berlin, Ernst & Sohn: str. 169-219.

ÖNORM B 4455:1992 – Erd- und Grundbau - Vorgespannte Anker für Festgestein und Lockergestein.

Pächnatz, R. 2005. Entwicklung von Beton und Eisen zur Brücke aus Spannbeton. *Wissenschaftliche Studie*. Grin: 388 str.

<http://www.hausarbeiten.de/faecher/vorschau/114238.html#> (pridobljeno 05.11.2009).

Podolny, W. Jr. 1967. Understanding the steel in prestressing. *PCI Journal* 37, 3: 54-64.

Pogačnik, A. (ur.), Beg, D. (ur.). 2009. Priročnik za projektiranje gradbenih konstrukcij po Evrokod standardih. Inženirska zbornica Slovenije, Ljubljana: 1077 str.

prEN 10138-1:2000 – Prestressing steels – Part 3: General requirements.

prEN 10138-3:2000 – Prestressing steels – Part 3: Strand.

Preston, H. K. 1985. Testing 7-wire strand for prestressed concrete – The state of the art. *PCI Journal* 30, 3: 134-155.

Priporočila za sidranje v zemljinah in hribinah SIA 191. 1977. Prevod Norm SIA 191, 1977 – Boden- und Felsanker. Ljubljana, Zveza društev gradbenih inženirjev in tehnikov Slovenije, Sekcija gradbenih konstruktorjev: 49 str.

Pritchard, R., McMillan, P., Fenwick, J., Spathonis, J. 2006. Innovation in testing of low relaxation stressing strand. V: Queensland Roads Edition No. 2, September 2006: str. 18-24.

[http://www.mainroads.qld.gov.au/web/AttachStore.nsf/allobjects/Queensland Roads Technical Journal – Sep06 – Innovation Testing/\\$file/OR_Sep06_InnovationTesting.pdf](http://www.mainroads.qld.gov.au/web/AttachStore.nsf/allobjects/Queensland%20Roads%20Technical%20Journal%20-%20Sep06%20-%20Innovation%20Testing/$file/OR_Sep06_InnovationTesting.pdf) (pridobljeno 02.04.2009).

PTI – Recommendations for prestressed rock and soil anchors. Post Tensioning Institute, 1996. Post tensioning manual. 4th edition. Arizona: 41 str.

Raccomandazioni AICAP. 1993. Ancoraggi nei terreni e nelle rocce. Roma, Associazione Italiana Calcestruzzo Armato e Precompresso: 43 str.

Računalniški program EasyFit. 2004-2011. MathWave Technologies.

<http://www.mathwave.com/en/home.html> (pridobljeno 25.11.2010)

Recommendations for the design, calculation, construction and monitoring of ground anchorages, 1989. P. Habib (ur.). Rotterdam, A.A. Balkema: 114 str.

Ross, S.M. 2000. Introduction to probability and statistics for engineers and scientists. San Diego, Harcourt/Academic Press: 578 str.

Sabatini, P.J., Pass, D.G., Bachus, R.C. 1999. Geotechnical engineering circular No. 4: Ground anchors and anchored systems. Washington, D.C., US Department of Transportation, FHWA, FHWA-IF-99-015, June 1999: 304 str.

http://www.fhwa.dot.gov/engineering/geotech/library_sub.cfm?keyword=020 (pridobljeno 25.01.2007).

Satola, I.S. 2007. The axial load-displacement behaviour of steel strands used in rock reinforcement. Doctoral dissertation. Helsinki University of Technology, Department of Civil and Environmental Engineering, Helsinki: 120 str.

Schiolds, D.R., Schnabel, H., Weatherby, D.E. 1978. Load transfer in pressure injected anchors. V: A.S.C.E., 104, GT 9: str. 1183-1197.

Seber, G.A.F., Wild, C.J. 2003. Nonlinear regression. Hoboken (NJ), John Wiley&Sons: 768 str.

Sengupta, A.K., Menon, D. Prestressed concrete structures. Section 1.7 Prestressing Steel.

http://nptel.iitm.ac.in/courses/IIT-MADRAS/Prestressed_Concrete_Structures/pdf/1_Introduction/1.7_Prestressing_Steel.pdf (pridobljeno 02.04.2009).

SIA 267:2003 – Geotechnik.

SIA 267/1:2003 – Geotechnik – Ergänzende Festlegungen.

SISGEO Electric anchor load cells.

http://www.sisgeo.com/pdf/schede/Electric_load_cells_datasheet.pdf (pridobljeno 18.12.2009).

SIST EN ISO 376:2005 – Kovinski materiali – Kalibracija merilnikov sile, ki se uporabljajo za preverjanje preskusnih strojev z enoosno obremenitvijo (ISO 376:2004).

SIST EN 1537:2002/AC:2004 – Izvedba posebnih geotehničnih del – Geotehnična sidra : Execution of special geotechnical work – Ground anchors.

SIST EN 1990:2004 – Evrokod: Osnove projektiranja konstrukcij – Eurocode – Basis of structural design.

SIST EN 1992-1-1:2005 – Evrokod 2: Projektiranje betonskih konstrukcij – 1-1. del: Splošna pravila in pravila za stavbe – Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings.

SIST EN 1997-1:2005 – Evrokod 7: Geotehnično projektiranje – 1. del: Splošna pravila – Eurocode 7 – Geotechnical design – Part 1: General rules.

SIST EN ISO 15630-3:2002 – Jeklo za armiranje in prednapenjanje betona – Metode preskušanja – 3. del: Jeklo za prednapenjanje (ISO 15630-3:2002) – Steel for the reinforcement and prestressing of concrete – Test methods – Part 3: Prestressing steel (ISO 15630-3:2002).

Slovensko tehnično soglasje STS-07/056, 2007. Trajno prednapeto geotehnično sidro CATI – ZRMK tip RCP/D nazivne nosilnosti 300 – 900 kN. Ljubljana, Zavod za gradbeništvo Slovenije: 49 str.

Stahlton. Geotechnik.

http://www.stahlton.ch/deutsch/03_bautechnik_ch/03_dienstleistung/doku/d_4_geotechnik.pdf (pridobljeno 11.12.2008).

Sturges, H.A. 1926. The choice of a class interval. J. Amer. Statist. Assoc., 21: 65-66.

Škrabl, S. 2004. Prednapeto geotehnično sidro spremenljive togosti : patent št. 21320, datum objave prijave 30.04.2004; št. prijave P-200200260. Ljubljana : Urad RS za intelektualno lastnino: 9 str.

Štrucl, V., Gostič, B., Belšak, D. 1983. Temeljne raziskave za razvoj trajnega sidra : raziskovalno poročilo. Ljubljana, RSS: 1 zv. (loč. pag.).

Tiranti Permanenti. Carnica Tiranti CA-TI Permanente.

<http://www.carnicatiranti.it/ENG/pdf/CATI-Tiranti-permanenti.pdf> (pridobljeno 23.11.2009).

Tischler, W. 1995. 30 Jahre Ankertechnik in Österreich – Technologische Entwicklung aufgrund praktischer Erfahrungen. V: Widmann, R. (ur.). Anchors in Theory and Practice. Salzburg, 9-10 October 1995. Rotterdam, A.A. Balkema: str. 387-392.

TSC 07.202:1998 – Geotehnična sidra. Ljubljana, Ministrstvo za promet in zveze: 18 str.

Turk, G. 2008. Verjetnostni račun in statistika: 239 str.

<http://www.km.fgg.uni-lj.si/predmeti/sei/vrs1.pdf> do <http://www.km.fgg.uni-lj.si/predmeti/sei/vrs8.pdf> (pridobljeno 19.11.2008).

Vojvodič-Tuma, J. 2002. Mehanske lastnosti kovin. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 273 str.

VSL soil and rock anchors – Examples from practice. 1992. Bern, Switzerland, VSL International Ltd.: 34 str.
http://www.vsl.net/Portals/0/vsl_techreports/PT_Ground_Anchors.pdf (pridobljeno 11.12.2008).

VSL soil and rock anchors. VSL Systems.

http://www.vsl.net/Portals/0/vsl_techreports/VSL_soil_rock_anchors.pdf (pridobljeno 03.10.2005).

Xanthakos, P.P. 1991. Ground anchors and anchored structures. New York, John Wiley & Sons: 688 str.

Weatherby, D.E. 1982. Tiebacks. Final report. Washington, D.C., US Department of Transportation, FHWA, FHWA/RD-82/047, July 1982: 252 str.

<http://isddc.dot.gov/OLPFiles/FHWA/009770.pdf> (pridobljeno 14.12.2008).

Weerasinghe, R.B., Littlejohn, G.S. 1997. Load transfer and failure of anchorages in weak mudstone. V: Littlejohn, G.S. (ur.). International conference on ground anchorages and anchored structures in service. ICE London, March 1997. London, Thomas Telford: str. 34-44.

Wichter, L., Meiniger, W. 2000. Verankerungen und Vernagelungen im Grundbau. Berlin, Ernst & Sohn: 203 str.

Wilson, H. M. 2008. Manual of irrigation engineering. Hubbard Press: 376 str.

http://books.google.si/books?id=TcSepMP9G3IC&printsec=frontcover&dq=inauthor:%22Herbert+Michael+Wilson%22&source=gbs_book_other_versions_r&cad=9#v=onepage&q=&f=false (pridobljeno 04.11.2009).

Windsor, C.R., Thompson, A.G. 1993. Rock reinforcement – Technology, testing, design and evaluation. V: Hudson, J.A. (ur.). Comprehensive Rock Engineering, vol. 4: Excavation, support and monitoring, Pergamon Press: str. 451-484.

Windsor, C.R. 2004. A review of long, high capacity reinforcing systems in rock engineering. V: Villaescusa, E. (ur.), Potvin, Y. (ur.). Ground support in mining and underground construction. 5th international symposium on ground support. Perth, Western Australia 28 – 30 September 2004. Leiden, London, New York, Philadelphia, Singapore, A. A. Balkema: str. 17-41.

Woods, R.I., Barkhordari, K. 1997. The influence of bond stress distribution on ground anchor design. V: Littlejohn, G.S. (ur.). International conference on ground anchorages and anchored structures in service. ICE London, March 1997. London, Thomas Telford: str. 55-64.

Wymer, P.A., Robinson, R.A., Sharp, D.T. 2003. Ground anchor practice in New Zealand – A review of applications, design and execution. V: NZ Geomechanics society symposium : Geotechnics on the volcanic edge. Tauranga, 27-30 March 2003. Engineers New Zealand: 11 str.

<http://www.contech.co.nz/uploaded/A%20Review%20of%20Ground%20Anchor%20Practice%20in%20New%20Zealand%20-%20March%20.pdf> (pridobljeno 05.12.2008).

Zeren, A., Zeren, M. 2003. Stress relaxation properties of prestress steel wires. Journal of Materials Processing Technology 141: 86-92.

Zilch, K., Weiher, H. 2008. 120 Jahre Spannbetonbau – von Doehring und Jackson bis Heute. Beton- und Stahlbetonbau 103, 6: 422-430.

KAZALO VSEBINE DODATKOV

A. ZGODOVINSKI PREGLED RAZVOJA SISTEMOV PREDNAPENJANJA IN TRAJNIH PREDNAPETIH GEOTEHNIČNIH SIDER.....	A-1
A.1 RAZVOJ SISTEMOV PREDNAPENJANJA	A-2
A.2 POJAV IN ZAČETKI RAZVOJA GEOTEHNIČNIH SIDER.....	A-5
A.3 RAZVOJ SISTEMA PROTIKOROZIJSKE ZAŠČITE TRAJNIH PREDNAPETIH GEOTEHNIČNIH SIDER.....	A-8
A.4 KRATEK PREGLED UVELJAVLJANJA GEOTEHNIČNIH SIDER PO SVETU	A-12
A.4.1 Praksa sidranja v Švici	A-12
A.4.2 Praksa sidranja v Franciji.....	A-12
A.4.3 Praksa sidranja v Nemčiji.....	A-13
A.4.4 Praksa sidranja v Veliki Britaniji.....	A-13
A.4.5 Praksa sidranja v Avstriji	A-13
A.4.6 Praksa sidranja v Združenih državah Amerike	A-14
A.4.7 Praksa sidranja v Avstraliji.....	A-15
A.4.8 Praksa sidranja drugod po svetu	A-15
B. REZULTATI PRESKUSOV NOSILNOSTI SIDER RCP/D, RCP/D-K, RCP/D-Z IN RCP/D-I, OPRAVLJENIH NA TESTNEM POLJU LETA 2008 IN 2009.....	B-1
B.1 REZULTATI PRESKUŠANJ NOSILNOSTI SIDER, OPRAVLJENIH V SKLOPU RRN LETA 2008 NA TESTNEM POLJU OBJEKTA OZ-05.....	B-2
B.1.1 Sidra RCP/D.....	B-2
B.1.2 Sidra RCP/D-K.....	B-7
B.1.3 Sidra RCP/D-Z	B-9
B.1.4 Sidra RCP/D-I	B-13
B.2 REZULTATI PONOVLJENIH PRESKUŠANJ NOSILNOSTI SIDER, OPRAVLJENIH LETA 2009 NA TESTNEM POLJU OBJEKTA OZ-05.....	B-17
B.2.1 Sidra RCP/D.....	B-17
B.2.2 Sidra RCP/D-K.....	B-19
B.2.3 Sidra RCP/D-Z	B-23
B.2.4 Sidra RCP/D-I	B-26
C. RAČUNALNIŠKO ORODJE ZA SPROTNO VREDNOTENJE IN NAKNADNO ANALIZO PARAMETROV OBNAŠANJA MODIFICIRANIH TIPOV PREDNAPETIH SIDER PRI PREISKAVAH SIDER	C-1
C.1 KONCEPT ZASNOVE RAČUNALNIŠKEGA ORODJA ZA IZVEDBO PREISKAV MODIFICIRANIH TIPOV SIDER.....	C-3
C.2 VNOS IN OSNOVNO VREDNOTENJE ODČITANIH VREDNOSTI.....	C-5
C.3 VREDNOTENJE EFEKTIVNIH PROSTIH DOLŽIN IN TRAJNIH IZVLEČKOV	C-9
C.4 DOLOČANJE IN ANALIZA MER LEZENJA PO RAZLIČNIH METODAH IN DOLOČITEV ODPORNOSTI SIDER NA IZVLEK	C-12
D. UPORABA METODE NAJMANJŠIH KVADRATOV PRI ANALIZI REZULTATOV PREISKAV SIDER.....	D-1

E. LABORATORIJSKA PRESKUŠANJA VPLIVA EKSCENTRIČNE LEGE OBROČASTEGA DINAMOMETRA NA IZMERJENE VREDNOSTI SIL.....	E-1
E.1 IZVEDBA LABORATORIJSKEGA PRESKUSA EKSCENTRIČNO OBREMENJENEGA OBROČASTEGA DINAMOMETRA	E-5
E.1.1 Opis elektronskega obročastega dinamometra SIGEO tip L216V150.....	E-5
E.1.2 Opis merilne in preskusne opreme	E-7
E.1.3 Izvedba laboratorijskega preskusa vpliva ekscentrično obremenjenega obročastega dinamometra SIGEO L216V150.....	E-8
E.1.4 Rezultati laboratorijskega preskusa vpliva ekscentrično obremenjenega obročastega dinamometra SIGEO L216V150.....	E-13
E.2 ZAKLJUČKI LABORATORIJSKEGA PRESKUSA VPLIVA EKSCENTRIČNE LEGE OBROČASTEGA DINAMOMETRA NA IZMERJENE VREDNOSTI SIL.....	E-22
F. LABORATORIJSKA PRESKUŠANJA IZOTERMNE RELAKSACIJE JEKLENIH PRAMEN PO POSTOPKU ZA IZVEDBO PREISKAV SIDER.....	F-1
F.1 PREGLED LITERATURE V ZVEZI Z RELAKSACIJO JEKLENIH PRAMEN.....	F-2
F.2 STANDARDIZIRANO PRESKUŠANJE RELAKSACIJE PRAMEN ZA POTREBE PREDNAPENJANJA KONSTRUKCIJ	F-6
F.2.1 Uvod v standardizirano preskušanje relaksacije prednapetih pramen.....	F-6
F.2.2 Preskušanja izotermne relaksacije po standardu SIST EN ISO 15630-3	F-9
F.3 PRESKUŠANJE IZOTERMNE RELAKSACIJE PRAMEN PO POSTOPKU ZA IZVEDBO PREISKAV PREDNAPETIH GEOTEHNIČNIH SIDER	F-12
F.3.1 Merilna oprema za izvedbo laboratorijskih preskusov	F-14
F.3.1.1 Univerzalni večkanalni ojačevalnik UPM 60.....	F-14
F.3.1.2 Elektronski pretvornik sile KAF 200 kN.....	F-15
F.3.1.3 Induktivni pretvornik pomikov IW12/50	F-17
F.3.2 Predhodna preskušanja izotermne relaksacije po stopnjah sil faz preiskav sider brez spremljanja časa vnosa sile	F-18
F.3.3 Postopek preskušanja izotermne relaksacije po stopnjah sil faz preiskav sider s spremljanjem časa vnosa sile	F-22
F.3.3.1 Postopek preskušanja izotermne relaksacije po fazah preiskav sider brez dodajanja upadlih sil	F-24
F.3.3.2 Vpliv ponovitve postopka preskušanja izotermne relaksacije po fazah preiskav sider brez dodajanja upadlih sil.....	F-27
F.3.4 Postopek preskušanja izotermne relaksacije po stopnjah sil faz preiskav sider z dodajanjem upadlih sil s spremljanjem časa vnosa sile	F-30
F.4 ZAKLJUČKI LABORATORIJSKEGA PRESKUŠANJA IZOTERMNE RELAKSACIJE JEKLENIH PRAMEN ZA POTREBE PRESKUŠANJA SIDER.....	F-34

SEZNAM PREGLEDNIC V DODATKIH

Preglednica D.1: Vsote kvadratov odstopanj F reduciranih s številom prostostnih stopenj ν za izbrane aproksimacijske funkcije.....	D-7
Preglednica E.1: Izvedene faze laboratorijskega preskusa vpliva ekscentrično obremenjenega obročastega dinamometra SISGEO L216V150 na izmerjene sile.	E-13
Preglednica E.2: Osnovne statistične veličine relativnega pogreška ponovljivosti brez rotacije b' [%] izvedene pri preskušanju vpliva ekscentrične lege obročastega dinamometra SISGEO L216V150.....	E-15
Preglednica E.3: Najmanjše in največje razlike sil ΔF med obročastim in referenčnim dinamometrom podane v odvisnosti od ekscentričnosti e in rotacije ϕ obročastega dinamometra.....	E-18
Preglednica E.4: Osnovne statistične veličine razlike sil ΔF med obročastim in referenčnim dinamometrom podane za ΔF v absolutni vrednosti [kN] in relativno v [%] glede na raven sile F_t	E-20
Preglednica E.5: Ovojnice minimalnih in maksimalnih razlik efektivnih prostih dolžin $\Delta l_{f,def}$ v [%] glede na računsko prosto dolžino $l_{fr} = 28$ m, ki so posledica netočnih izmerjenih sil, nastalih zaradi ekscentrične lege in rotacije obročastega dinamometra.....	E-24
Preglednica F.1: Stopnje sile in opazovalni časi za preskušanje relaksacije vzorcev jeklenih pramen $\varnothing 15,2$ mm po postopku za izvedbo preiskav prednapetih geotehničnih sider.....	F-13
Preglednica F.2: Čas potreben za vnos sile na posamezni stopnji sile P_t med terenskim preskušanjem sider maja 2009 in med laboratorijskim preskušanjem relaksacije na vzorcih pramen.	F-23

LIST OF TABLES IN APPENDICES

Table D.1:	The sum of squares F divided by the number of degrees of freedom ν for selected model functions.	D-7
Table E.1:	Accomplished phases of the laboratory testing of the influence of eccentrically loaded ring load cell SISGEO L216V150 on measured forces.	E-13
Table E.2:	Basical statistical quantities of relative repeatability error without rotation b' [%] evaluated at the testing of the influence of eccentrical positions of the ring load cell SISGEO L216V150.	E-15
Table E.3:	Minimal and maximal subtracted forces ΔF between the ring and the reference load cell given in dependence on eccentricity e and rotation ϕ of the ring load cell.	E-18
Table E.4:	Basic statistical quantities of subtracted forces ΔF between the ring and the reference load cell given for absolute values of ΔF in [kN] and for values of ΔF relative to the level of force F_i in [%].	E-20
Table E.5:	Envelopes of minimal and maximal subtractions of apparent free lengths $\Delta l_{f,def}$ in [%] with regard to free length $l_{fr} = 28$ m, as a consequence of inexact measured forces due to eccentrical positions and rotations of the ring load cell.	E-24
Table F.1:	Force levels and reading intervals for relaxation testing of steel strand samples $\varnothing 15,2$ mm according to the procedure used for investigation tests of prestressed ground anchors.	F-13
Table F.2:	Time needed for loading with individual force P_i during field testing of anchors (May 2009) and during the laboratory testing of relaxation properties of strand samples.	F-23

SEZNAM SLIK V DODATKIH

Slika A.1:	Prvi patentirani načini prednapenjanja: a) vzdolžni in prečni prerez prednapetega predizdelanega betonskega elementa po patentu P. H. Jacksona, b) vzdolžni prerez in tloris prednapetega predizdelanega betonskega elementa po patentu W. Doehringa, c) vzdolžni prerez prednapete betonske grede E. Freyssineta in J. Séaillesa (Zilch in Weiher, 2008).....	A-3
Slika A.2:	Hidravlična napenjalka, kot jo je razvil Eugène Freyssinet (Giovannardi, 2009).....	A-4
Slika A.3:	Ogromen kompleks pristanišča Le Havre (levo); izvedba prednapetega betonskega nosilca, ki ga je Eugène Freyssinet predvidel v sklopu sanacije (desno) (Giovannardi, 2009).	A-4
Slika A.4:	Pogled na pregrado Cheurfas v Alžiriji zgrajeno leta 1882 (Barrage – Cheurfas, 2009) (levo), prečni prerez skozi masivno pregrado (Wilson, 2008) (desno).	A-6
Slika A.5:	Sidranje podpore pregrade zaježitve Vajont v Italiji (Wichter in Meiniger, 2000). ..	A-7
Slika A.6:	Prednapeto geotehnično sidro s polno povezavo z označenimi šibkimi mesti (Hunkeler in sod., 2005).....	A-8
Slika A.7:	Prednapeto geotehnično sidro z gibljivim prostim delom z označenimi šibkimi mesti (Hunkeler in sod., 2005).	A-9
Slika A.8:	Prednapeto geotehnično sidro z dvojno protikorozijsko zaščito z označenimi šibkimi mesti (Hunkeler in sod., 2005).....	A-10
Slika A.9:	Prednapeto geotehnično sidro s celovito protikorozijsko zaščito z označenim potencialnim šibkim mestom (Hunkeler in sod., 2005).	A-11
Slika B.1:	Efektivne proste dolžine l_f in trajni izvlečki Δs_{bl} pramen sider tipa RCP/D testnega polja.....	B-3
Slika B.2:	Efektivne proste dolžine l_f in trajni izvlečki Δs_{bl} pramen preskusnih 5-pramenskih sider tipa RCP/D opornega zidu OZ-05.	B-5
Slika B.3:	Efektivne proste dolžine l_f in trajni izvlečki Δs_{bl} pramen preskusnih 6-pramenskih sider tipa RCP/D opornega zidu OZ-05.	B-6
Slika B.4:	Efektivne proste dolžine l_f in trajni izvlečki Δs_{bl} pramen sider tipa RCP/D-K testnega polja.	B-8
Slika B.5:	Efektivne proste dolžine l_f in trajni izvlečki Δs_{bl} pramen sider tipa RCP/D-Z testnega polja.	B-11
Slika B.6:	Efektivne proste dolžine l_f in trajni izvlečki Δs_{bl} podsider sider tipa RCP/D-Z testnega polja.	B-12
Slika B.7:	Efektivne proste dolžine l_f in trajni izvlečki Δs_{bl} pramen sider tipa RCP/D-I testnega polja.....	B-15
Slika B.8:	Efektivne proste dolžine l_f in trajni izvlečki Δs_{bl} podsider sider tipa RCP/D-I testnega polja.	B-16

Slika B.9:	Leta 2009 izmerjeni prirastki pomikov pramen pri preskusni sili CPN (levo) in na stopnji sile P_7 PS (desno) sidra SBz-26 tipa RCP/D.	B-18
Slika B.10:	Leta 2009 izmerjeni prirastki pomikov pramen na stopnji sile P_7 PS (levo) in pri preskusni sili P_p CPN (desno) sidra SBz-59 tipa RCP/D.	B-19
Slika B.11:	Leta 2009 izmerjeni prirastki pomikov pramen pri preskusni sili CPN (levo) in na stopnji sile P_7 PS (desno) sidra SBz-89 tipa RCP/D-K.	B-20
Slika B.12:	Leta 2009 izmerjeni prirastki pomikov pramen sidra SBz-18 tipa RCP/D-K na stopnji sile P_7 : prvi izveden VPN (levo), takoj isti dan ponovljeni drugi VPN (desno).	B-21
Slika B.13:	Izmerjeni prirastki pomikov pramen sidra SBz-39 tipa RCP/D-K na stopnji P_6 VPN leta 2009.	B-22
Slika B.14:	Primerjava izmerjenih prirastkov pomikov pramen sidra SBz-66 tipa RCP/D-K pri obeh VPN leta 2009: 1. VPN, zaradi hudega naliva prekinjen na stopnji P_5 (levo), 2. VPN prav tako na stopnji P_5 , čeprav je sidro popustilo šele pri preskusni sili P_{pv} (desno).	B-23
Slika B.15:	Leta 2009 izmerjeni prirastki pomikov pramen pri preskusni sili CPN (levo) in na stopnji sile P_2 PS (desno) sidra SBz-56 tipa RCP/D-Z.	B-24
Slika B.16:	Izmerjeni prirastki pomikov pramen sidra SBz-36 tipa RCP/D-Z na zadnji stopnji VPN leta 2009.	B-25
Slika B.17:	Izmerjeni prirastki pomikov pramen sidra SBz-86 tipa RCP/D-I na zadnji stopnji VPN leta 2009.	B-27
Slika B.18:	Primerjava izmerjenih prirastkov pomikov pramen sidra SBz-12 tipa RCP/D-I na zadnji stopnji pri obeh VPN leta 2009.	B-27
Slika B.19:	Izmerjeni prirastki pomikov pramen sidra SBz-33 tipa RCP/D-I na zadnji stopnji VPN leta 2009.	B-28
Slika B.20:	Leta 2009 izmerjeni prirastki pomikov pramen na stopnji sile P_5 VPN (levo) in pri preskusni sili P_p CPN (desno) sidra SBz-78 tipa RCP/D-I.	B-29
Slika C.1:	<i>List 1</i> računalniškega orodja za vrednotenje in analizo preiskave sidra.	C-6
Slika C.2:	Izsek <i>lista 2</i> računalniškega orodja s podatki o obnašanju pramen in sidra kot celote (a), izsek <i>lista 3</i> s podatki o obnašanju podsider (b).	C-7
Slika C.3:	Krivulje sila-izvleček za pramena (#1 to #6) in podsidra (A, B in C) iz <i>lista 4b</i> računalniškega orodja.	C-8
Slika C.4:	Diagrami s prirastki pomikov Δs izmerjeni na pramenih v območju glave sidra, prikazani za sidro kot celoto, za podsidra (A, B in C) ter pramena (#1 do #6) iz <i>lista 5</i> računalniškega orodja.	C-9
Slika C.5:	Efektivne proste dolžine l_f in trajni izvlečki Δs_{bl} pramen iz <i>lista 6a</i> računalniškega orodja.	C-10
Slika C.6:	Efektivne proste dolžine l_f in trajni izvlečki Δs_{bl} po podsidrih iz <i>lista 6b</i> računalniškega orodja.	C-11

Slika C.7:	Določanje merodajnih mer lezenja k_{int} pramen in sidra po metodah IP (<i>list 7</i>), SIA (<i>list 8</i>), 10 (<i>list 9</i>) in ISO (<i>list 10</i>) za stopnjo sile P_3 VPN SBz-60.....	C-14
Slika C.8:	Preglednice z merodajnimi merami lezenja k_{int} podsider in sidra po metodah IP, SIA, 10 in ISO na <i>listu 16</i> računalniškega orodja.	C-15
Slika C.9:	Diagrami k_{int} v odvisnosti od ravni sile iz <i>lista 17</i> , določene po metodah IP, SIA, 10 in ISO za sidro kot celoto, po podsiderih (A do C) kot tudi po pramenih (#1 do #6).	C-17
Slika C.10:	Izsek iz <i>lista 18</i> računalniškega orodja z zbirno preglednico vseh k_{int} , določenih po <i>metodi IP</i> (zgoraj) in vrednotenjem odpornosti sidra na izvlek R_a (spodaj).	C-18
Slika D.1:	Vzorčna primera uporabe metode najmanjših kvadratov pri analizi rezultatov preiskav sider izvedenih na testnem polju OZ-05.....	D-5
Slika D.2:	Prikaz ujemanja lineariziranih potenčne in eksponentne aproksimacijske funkcije na nabor empirično dobljenih točk preiskave sidra SBz-26.....	D-6
Slika E.1:	Različni tipi elektronskih dinamometrov vgrajenih v prednapeta geotehnična sidra: valjasti dinamometer Bauer za sidro (levo), obročasti dinamometer SISGEO za sidro (sredina), valjasti dinamometer OG150/20 za pramen (desno).	E-3
Slika E.2:	Ekscentrične lege obročastega dinamometra: primera iz naše prakse – med napenjanjem (levo) in zaklinjeno merilno sidro (sredina), med napenjanjem iz prospekta proizvajalca SISGEO (2009).	E-4
Slika E.3:	Obročasti dinamometer SISGEO L216V150 (levo), kalibracijski diagram dobljenim po standardu <i>EN ISO 376</i> (sredina), referenčni dinamometer KTN-DZY nazivne kapacitete 3 MN proizvajalca GTM Gassmann Testing and Metrology GmbH (desno).....	E-7
Slika E.4:	Elementi sistema za preskušanje vpliva ekscentrične lege dinamometra SISGEO L216V150 na velikost izmerjenih sil.	E-8
Slika E.5:	Detajli namestitve obročastega dinamometra SISGEO in referenčnega dinamometra KTN-DZY pri ekscentričnosti 20 mm: med preskusom v hidravlični stiskalnici Amsler (levo), toga podložna plošča referenčnega dinamometra od zadaj (sredina), toga podložna ploščica referenčnega dinamometra od spredaj (desno).	E-11
Slika E.6:	Faze preskusa vpliva ekscentričnosti na izmerjene sile obročastega dinamometra SISGEO L216V150 zavrtenega za 45° – pogled od spredaj (levo), pogled od zadaj (desno).	E-12
Slika E.7:	Relativni pogrešek ponovljivosti brez rotacije b' glede na stopnjo ekscentričnosti in rotacijo obročastega dinamometra SISGEO L216V150 pri silah 150 kN (a), 300 kN (b), 600 kN (c) in 900 kN (d).	E-15
Slika E.8:	Odštete vrednosti med izmerjenimi silami F_p na referenčnem dinamometru KTN-DZY in silami F_i na obročastem dinamometru SISGEO L216V150 pri rotaciji 0° (a), 15° (b), 30° (c) in 45° (d).	E-17
Slika E.9:	Odštete vrednosti med izmerjenimi vrednostmi sile F_p na referenčnem dinamometru KTN-DZY in silami F_i na obročastem dinamometru SISGEO L216V150 pri ekscentričnosti 0 mm (a), 10 mm (b), 20 mm (c) in 40 kN (d).	E-18

Slika E.10:	Centrična lega obročastega dinamometra SISGEO L216V150 na papirnati šabloni.....	E-19
Slika E.11:	Prežagani obročasti dinamometer SISGEO L216V150: mesta namestitve merilnih lističev (levo), detajli obroča s pritrjenimi merilnimi lističi (desno).	E-20
Slika E.12:	Razlike med izmerjenimi vrednostmi sile F_p na referenčnem dinamometru in silami F_i na obročastem dinamometru pri tlačni sili 150 kN (a), 300 kN (b), 600 kN (c) in 900 kN (d): odštete vrednosti $F_p - F_i$ (levi stolpec), prikaz odštetih vrednosti v odstotku izbrane sile F_i (desni stolpec).....	E-21
Slika E.13:	Odstopanja iz vrednotenih efektivnih prostih dolžin $\Delta l_{f,dej}$ v [%] glede na računsko prosto dolžino $l_{fr} = 28$ m, ki so posledica netočnih izmerjenih sil nastalih zaradi ekscentrične lege obročastega dinamometra pri rotacijah 0° (a), 15° (b), $22,5^\circ$ (c) in 45° (d).	E-25
Slika F.1:	Tipične krivulje relaksacije za pomirjena pramena (levo) in pramena z nizko relaksacijo (desno) (prirejeno po Hill, 2006).	F-3
Slika F.2:	Primerjava rezultatov preskusov relaksacije na vzorcih pramena iz istega koluta opravljenih po različnih metodah (prirejeno po Pritchard in sod., 2006).....	F-9
Slika F.3:	Togi jekleni okvir za preskus izotermne relaksacije (leva stran fotografije); vzorec jeklenega pramena med preskusom (desna stran fotografije).	F-10
Slika F.4:	Napenjalna glava s kotvo nameščena na vzorec pramena v jeklenem preskuševalnem okviru (levo), detajlni pogled na napenjalno glavo od strani in od spredaj (desno).....	F-10
Slika F.5:	Dinamometer KAF 200 kN nameščen na vzorec pramena v jeklenem preskuševalnem okviru.	F-11
Slika F.6:	Tipični rezultati meritev preskusov izotermne relaksacije po standardu <i>SIST EN ISO 15630-3</i> za pramena $\varnothing 15,2$ mm in $\varnothing 15,7$ mm iz jekla trdnostnega razreda 1770 in 1860 MPa.....	F-12
Slika F.7:	Elementi merilnega sistema za izvedbo preskušanj izotermne relaksacije po postopku izvedbe preiskav prednapetih geotehničnih sider.	F-14
Slika F.8:	Zajemanje podatkov z univerzalnim večkanalnim ojačevalnik UPN 60 med preskusom izotermne relaksacije na vzorcu jeklenega pramena.	F-15
Slika F.9:	Fotografija in shema s pomembnejšimi dimenzijami pretvornika sile KAF 200 kN.	F-16
Slika F.10:	Vzorec pramena opremljen z induktivnim merilnikom pomikov IW 12/50 med preskusom izotermne relaksacije.	F-17
Slika F.11:	Kotev in sestavljena trikraka zagozda pred preskusom (levo), detajl poškodbe žic pramena (zarezni učinek) na mestih prijema zagozd (desno).	F-19
Slika F.12:	Rezultati predhodnih preskusov relaksacije vzorcev pramen R-1 do R-3 iste šarže po postopku za preiskavo sidra.....	F-20
Slika F.13:	Primerjava rezultatov predhodnih preskusov relaksacije vzorcev pramen R-1 do R-3 na ravni sile $P_7 = 186$ kN postopka za preiskavo sidra in rezultatov vzorcev pramen preskušanih po <i>SIST EN ISO 15630-3</i>	F-21

Slika F.14:	Vzorec pramena med preskušanjem po metodi s kontrolirano hitrostjo vnosa sile. ..	F-22
Slika F.15:	Izmerjene vrednosti upadlih sil ΔP (levo) in izvrednotene vrednosti ρ (desno) na vseh ravneh sil P_1 do P_8 preskusa relaksacije vzorca pramen R-8 po postopku za preiskavo sidra s kontrolirano hitrostjo vnosa sile na posameznih stopnjah sile P_i	F-25
Slika F.16:	Izmerjene vrednosti upadlih sil med preskusi relaksacije vzorcev R-4 do R-9 po postopku za preiskavo sidra s spremljanjem časa vnosa sile na stopnjah sile P_2, P_4, P_6 in P_8	F-26
Slika F.17:	Izmerjene vrednosti relaksacije ρ med preskusi relaksacije vzorcev R-4 do R-9 po postopku za preiskavo sidra s spremljanjem časa vnosa sile na stopnjah sile P_2, P_4, P_6 in P_8	F-26
Slika F.18:	Izmerjene vrednosti upadlih sil pri preskusih relaksacije vzorca pramena R-9 po postopku za preiskavo sidra: osnovni preskus (R-9), prvi ponovljeni preskus relaksacije en dan po osnovnem preskusu (R-9p1), drugi ponovljeni preskus relaksacije dva dni po osnovnem preskusu (R-9p2).	F-28
Slika F.19:	Rezultati preskusov relaksacije vzorca pramena RV-1388 preskušene po standardu <i>oSIST prEN ISO 22477-5</i> in po postopku za preiskavo sidra s kontrolirano hitrostjo vnosa sile.	F-29
Slika F.20:	Izmerjene vrednosti upadlih sil pri preskusih relaksacije vzorcev pramen po postopku za preiskavo sidra s stalnim dodajanjem upadlih sil s kontrolirano hitrostjo vnosa sile na stopnjah sile P_2, P_4, P_6 in P_8	F-31
Slika F.21:	Primerjava rezultatov preskusov relaksacije vzorcev pramen preskušanih po postopku za preiskavo sidra: brez dodajanja upadlih sil (vzorci R) in s stalnim dodajanjem upadlih sil (vzorci RPR).	F-32
Slika F.22:	Končne povprečne vrednosti relaksacije ρ vzorcev pramen $\varnothing 15,2$ mm trdnostnega razreda 1860 MPa istega proizvajalca glede na raven napetosti v vzorcih.	F-33

LIST OF FIGURES IN APPENDICES

Figure A.1:	First patented methods of prestressing: a) longitudinal and cross section of a prestressed prefabricated concrete element according to the patent of P. H. Jackson, b) longitudinal section and ground plan of a prestressed prefabricated concrete element according to the patent of W. Doebling, c) longitudinal section of a prestressed concrete beam according to the patent of E. Freyssinet (Zilch and Weiher, 2008).....	A-3
Figure A.2:	Hydraulic jack developed by Eugène Freyssinet (Giovannardi, 2009).....	A-4
Figure A.3:	The huge complex of the port Le Havre (left); construction of a prestressed concrete beam as a retrofit measure introduced by Eugène Freyssinet (right) (Giovannardi, 2009).....	A-4
Figure A.4:	View of the Cheurfas dam (Algeria) built in 1882 (Barrage – Cheurfas, 2009) (left), cross section of the masonry dam (Wilson, 2008) (right).	A-6
Figure A.5:	Anchorage in the abutment of the barrage dam Vajont in Italy (Wichter and Meiniger, 2000).....	A-7
Figure A.6:	Fully bonded prestressed ground anchor with denoted weak points (Hunkeler et al., 2005).....	A-8
Figure A.7:	Prestressed ground anchor with movable free anchor length with denoted weak points (Hunkeler et al., 2005).....	A-9
Figure A.8:	Prestressed ground anchor with double corrosion protection with denoted weak points (Hunkeler et al., 2005).....	A-10
Figure A.9:	Prestressed ground anchor with comprehensive corrosion protection with denoted potentially weak point (Hunkeler et al., 2005).....	A-11
Figure B.1:	Apparent free lengths l_f and permanent displacements Δs_{bl} of strands for the testing field anchors of type RCP/D.	B-3
Figure B.2:	Apparent free lengths l_f and permanent displacements Δs_{bl} of strands for the RCP/D testing 5-strand anchors of retaining wall OZ-05.....	B-5
Figure B.3:	Apparent free lengths l_f and permanent displacements Δs_{bl} of strands for the RCP/D testing 6-strand anchors of retaining wall OZ-05.....	B-6
Figure B.4:	Apparent free lengths l_f and permanent displacements Δs_{bl} of strands for the testing field anchors of type RCP/D-K.	B-8
Figure B.5:	Apparent free lengths l_f and permanent displacements Δs_{bl} of strands for the testing field anchors of type RCP/D-Z.....	B-11
Figure B.6:	Apparent free lengths l_f and permanent displacements Δs_{bl} of anchor units for the testing field anchors of type RCP/D-Z.....	B-12
Figure B.7:	Apparent free lengths l_f and permanent displacements Δs_{bl} of strands for the testing field anchors of type RCP/D-I.....	B-15

Figure B.8:	Apparent free lengths l_f and permanent displacements Δs_{bl} of anchor units for the testing field anchors of type RCP/D-I.	B-16
Figure B.9:	In 2009 measured increments of displacements of strands at proof load of CPN (left) and at load step P_7 of PS (right) of the RCP/D anchor SBz-26.	B-18
Figure B.10:	In 2009 measured increments of displacements of strands at load step P_7 of PS (left) and at proof load P_p of CPN (right) of the RCP/D anchor SBz-59.	B-19
Figure B.11:	In 2009 measured increments of displacements of strands at proof load of CPN (left) and at load step P_7 of VPN (right) of the RCP/D-K anchor SBz-89.	B-20
Figure B.12:	In 2009 measured increments of displacements of strands (RCP/D-K anchor SBz-18) at load step P_7 : first accomplished VPN (left), on the same day repeated second VPN (right).	B-21
Figure B.13:	Measured increments of displacements of the anchor SBz-39 (type RCP/D-K) at load step P_6 of VPN in 2009.	B-22
Figure B.14:	Comparison of measured increments of displacements at both VPN's of the anchor SBz-66 (type RCP/D-K) in 2009: 1. VPN interrupted due to downpour at load step P_5 (left), 2. VPN likewise at load step P_5 , although load bearing capacity decreased not till proof load P_{pv} (right).	B-23
Figure B.15:	In 2009 measured increments of displacements of strands at proof load of CPN (left) and at load step P_2 of PS (right) of the RCP/D-Z anchor SBz-56.	B-24
Figure B.16:	Measured increments of displacements of the anchor SBz-36 (type RCP/D-Z) at last load step of VPN in 2009.	B-25
Figure B.17:	Measured increments of displacements of the anchor SBz-86 (type RCP/D-I) at last load step of VPN in 2009.	B-27
Figure B.18:	Comparison of measured increments of displacements at last load step of both VPN's of the anchor SBz-12 (type RCP/D-I) in 2009.	B-27
Figure B.19:	Measured increments of displacements of the anchor SBz-33 (type RCP/D-I) at last load step of VPN in 2009.	B-28
Figure B.20:	In 2009 measured increments of displacements of strands at load step P_5 of VPN (left) and at proof load P_p of CPN (right) of the RCP/D-I anchor SBz-78.	B-29
Figure C.1:	<i>Sheet 1</i> of the software tool for evaluation and analysis of an anchor's investigation test.	C-6
Figure C.2:	Section of <i>sheet 2</i> of the software tool with data about behaviour of strands and anchor as a whole (a), section of <i>sheet 3</i> with data about behaviour of anchor units (b).	C-7
Figure C.3:	Load-extension curves for strands (#1 to #6) as well as for anchor units (A, B and C) from <i>sheet 4b</i> of software tool.	C-8
Figure C.4:	Diagrams from <i>sheet 5</i> of the software tool with increments of displacements Δs measured in the region of anchor head on strands, presented for anchor as a whole, for anchor units (A, B and C) as well as for strands (#1 to #6).	C-9
Figure C.5:	Apparent free lengths l_f and permanent displacements Δs_{bl} for strands from <i>sheet 6a</i> of software tool.	C-10

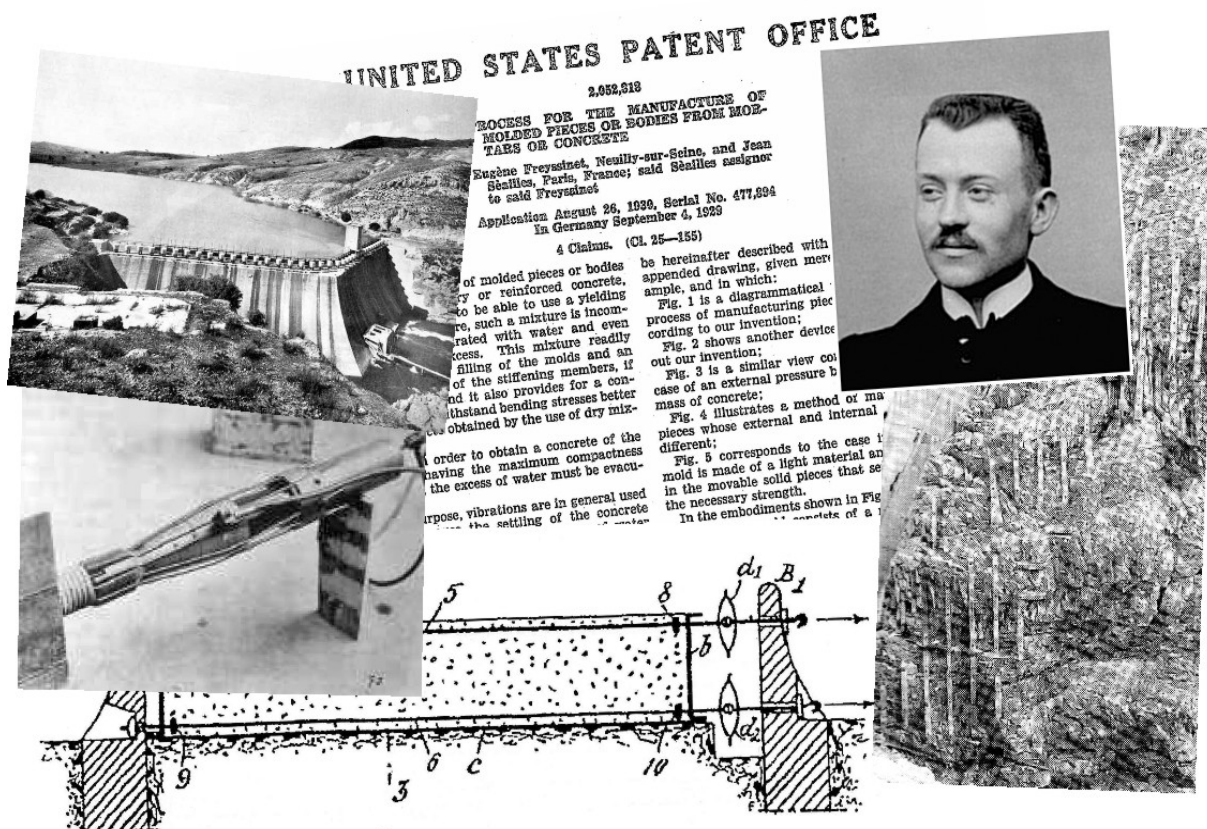
Figure C.6:	Apparent free lengths l_f and permanent displacements Δs_{bl} for anchor units from <i>sheet 6b</i> of software tool.....	C-11
Figure C.7:	Definition of the competent creep coefficients k_{int} for the strands and the anchor SBz-60, at force level P_3 of VPN, after the methods IP (<i>sheet 7</i>), SIA (<i>sheet 8</i>), 10 (<i>sheet 9</i>) and ISO (<i>sheet 10</i>).....	C-14
Figure C.8:	Tables of the competent creep coefficients k_{int} for the anchor units and the anchor after the methods IP, SIA, 10 and ISO from <i>sheet 16</i> of software tool.	C-15
Figure C.9:	Diagrams of k_{int} dependent on load level (<i>sheet 17</i>), defined after the methods IP, SIA, 10 and ISO for the anchor as a whole, for anchor units (A to C) as well as for strands (#1 to #6).....	C-17
Figure C.10:	Section of <i>sheet 18</i> of the software tool with joint table of all k_{int} , defined after the <i>method IP</i> (above) and evaluation of anchor pull-out resistance R_a (below).	C-18
Figure D.1:	Two typical samples of application of least square method in analysis of investigation test results obtained on the testing field OZ-05.	D-5
Figure D.2:	Representation of linearized potential and exponential model functions for the set of empirically obtained points for the SBz-26 anchor investigation test.	D-6
Figure E.1:	Different types of electrical load cells installed with prestressed ground anchors: a cylindrical load cell Bauer for an anchor (left), a ring load cell SISGEO for an anchor (middle), a cylindrical load cell OG150/20 for a strand (right).	E-3
Figure E.2:	Eccentric positions of a ring load cell: examples from our praxis – during tensioning (left) and at locked-off measuring anchor (middle), during tensioning published in the datasheet of SISGEO (2009).....	E-4
Figure E.3:	The ring load cell SISGEO L216V150 (left), the diagram of calibration obtained according to the standard <i>EN ISO 376</i> (middle), the reference load cell KTN-DZY with nominal capacity of 3 MN made by GTM Gassmann Testing and Metrology GmbH (right).....	E-7
Figure E.4:	Elements of the system used for testing of influence of eccentrical lays of the SISGEO L216V150 load cell on measured forces.	E-8
Figure E.5:	Details of positioning of the ring load cell SISGEO and the reference load cell KTN-DZY at eccentricity of 20 mm: during testing in the Amsler hydraulic press (left), rear view (middle) and front view (right) on the stiff bearing plate below reference load cell.	E-11
Figure E.6:	Testing phases for assessment of influence of eccentricity on measured forces of the ring load cell SISGEO L216V150 rotated for 45° – front view (left), rear view (right).....	E-12
Figure E.7:	Relative repeatability error without rotation b' in view of the level of eccentricity and rotation of the ring load cell SISGEO L216V150 at forces 150 kN (a), 300 kN (b), 600 kN (c) and 900 kN (d).....	E-15
Figure E.8:	Subtracted values between measured forces F_p on reference load cell KTN-DZY and forces F_i measured on the ring load cell SISGEO L216V150 at rotation of 0° (a), 15° (b), 30° (c) and 45° (d).	E-17

Figure E.9:	Subtracted values between measured forces F_p on the reference load cell KTN-DZY and forces F_i measured on the ring load cell SISGEO L216V150 at eccentricity of 0 mm (a), 10 mm (b), 20 mm (c) and 40 mm (d).	E-18
Figure E.10:	Central position of the ring load cell SISGEO L216V150 on the paper template.	E-19
Figure E.11:	The sawn trough ring load cell SISGEO L216V150: strain-gauge locations (left), details of the ring with attached strain-gauges (right).	E-20
Figure E.12:	Differences between measured forces F_p on the reference load cell and forces F_i on the ring load cell at compressive force 150 kN (a), 300 kN (b), 600 kN (c) and 900 kN (d): subtracted values $F_p - F_i$ (left column), subtracted values represented as a percentage of selected force F_i (right column).	E-21
Figure E.13:	Deviations of calculated apparent free lengths $\Delta l_{f,dej}$ in [%] with regard to the free length $l_{fr} = 28$ m, as a consequence of inexact measured forces due to eccentric positions of the ring load cell at rotations of 0° (a), 15° (b), $22,5^\circ$ (c) and 45° (d).	E-25
Figure F.1:	Typical relaxation curves for stress-relieved strands (left) and low-relaxation strands (right) (adapted after Hill, 2006).	F-3
Figure F.2:	Comparison of relaxation results on strand samples from the same reel using various test methods (adapted after Pritchard et al., 2006).	F-9
Figure F.3:	The stiff steel frame used for an isothermal stress relaxation test (left part of the photo); testing of a sample of steel strand (right part of the photo).	F-10
Figure F.4:	A strand sample in the steel testing frame equipped with a stressing head with a bush (left), side and front detailed view of stressing head (right).	F-10
Figure F.5:	A strand sample instrumented with a load cell KAF 200 kN installed into the steel testing frame.	F-11
Figure F.6:	Typical results of isothermal stress relaxation tests of strands $\varnothing 15,2$ mm and $\varnothing 15,7$ mm of steel grade 1770 and 1860 MPa performed according to the standard <i>SIST EN ISO 15630-3</i>	F-12
Figure F.7:	Elements of an instrumentation system used for isothermal relaxation tests according to the procedure of an investigation test of prestressed ground anchors.	F-14
Figure F.8:	Data recording on the universal data acquisition system UPM 60 during isothermal stress relaxation test on a sample of steel strand.	F-15
Figure F.9:	A photo and scheme with significant dimensions of the force transducer KAF 200 kN.	F-16
Figure F.10:	A strand sample during the isothermal stress relaxation test instrumented with the inductive displacement transducer IW 12/50.	F-17
Figure F.11:	A bush and a combined three part wedge before the test (left), a detail view of bite marks due to strand notching on the wires of a strand on the wedge grip spots (right).	F-19

Figure F.12:	Preliminary results of relaxation tests for strand samples R-1 to R-3 of the same lot according to the ground anchors' investigation test procedure.	F-20
Figure F.13:	Relaxation tests results for the strand samples R-1 to R-3 tested according to the ground anchors' investigation test procedure at force level $P_7 = 186$ kN in comparison to the strand samples tested according to <i>SIST EN ISO 15630-3</i>	F-21
Figure F.14:	A strand sample during the testing by the method with controlled speed of loading.	F-22
Figure F.15:	Measured values of decreased forces ΔP (left) and calculated values ρ (right) at all force levels P_1 to P_8 of relaxation test for the sample R-8 performed after the anchors' investigation test procedure with controlled speed of loading at individual force level P_i	F-25
Figure F.16:	Measured values of decreased forces during relaxation tests of the samples R-4 to R-9 by the anchors' investigation test procedure with time registration for loading at levels P_2 , P_4 , P_6 and P_8	F-26
Figure F.17:	Measured values of relaxation ρ during relaxation tests of the samples R-4 to R-9 by the anchors' investigation test procedure with time registration for loading at levels P_2 , P_4 , P_6 and P_8	F-26
Figure F.18:	Values of decreased forces for the sample of strand R-9 measured at the relaxation tests performed by the anchors' investigation test procedure: a primary test (R-9), first repetition of the relaxation test one day after the primary test (R-9p1), second repetition of the relaxation test two days after the primary test (R-9p2).....	F-28
Figure F.19:	The relaxation test results for the sample of strand RV-1388 tested according to the standard <i>oSIST prEN ISO 22477-5</i> as well as by the anchors' investigation test procedure with controlled speed of loading.	F-29
Figure F.20:	Values of decreased forces measured at the relaxation tests performed by the anchors' investigation test procedure with permanent supplement of decreased forces and with controlled speed of loading at force levels P_2 , P_4 , P_6 and P_8	F-31
Figure F.21:	Comparison of the relaxation test results for the strand samples tested by the anchors' investigation test procedure: without supplements of decreased forces (samples R) and with continual supplements of decreased forces (samples RPR)....	F-32
Figure F.22:	The final average relaxation values ρ for strand samples $\varnothing 15,2$ mm of grade 1860 MPa (all made by the same manufacturer) as regards the stress level in the samples.	F-33

Dodatek A

Zgodovinski pregled razvoja sistemov prednapenjanja in trajnih prednapetih geotehničnih sider



Do razvoja sistemov prednapenjanja je privedla karakteristika betona, da odlično prevzema tlačne napetosti, na drugi strani pa so njegove sposobnosti za prevzem natezних napetosti zelo omejene. Te napetosti prevzema jeklena armatura, ki se pri tem raztegne, zaradi sprijetosti betona z armaturo pa armatura za seboj potegne tudi beton, kar privede do pojava razpok v betonu. V armiranobetonskih konstrukcijah se pojavu razpok lahko izognemo s predhodnim prednapetjem konstrukcije, pri čemer se, z uvedbo natezних sil v kabel za prednapenjanje, konstrukcija tlačno obremeni že pri gradnji. Med obratovanjem zaradi delovanja obtežbe v konstrukciji nastajajo natezne sile, ki zmanjšujejo na začetku vzpostavljene tlačne napetosti, tako da v taki konstrukciji do natezних napetosti običajno sploh ne pride.

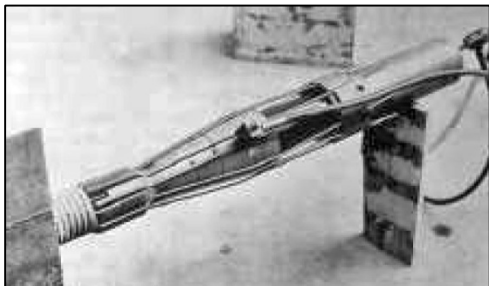
Opisani delovanja prednapetega kabla izkoriščamo tudi pri prednapetih geotehničnih sidrih, le da je v tem primeru osnovni medij, v katerega je kabel vgrajen, drugačen: prednapeta geotehnična sidra z veznim delom vpnejo v nosilna temeljna tla, medtem ko je na drugem koncu sidra preko glave sidra zagotovljen vnos sile na sidrano konstrukcijo, vezni člen med njima pa predstavlja prosti del sidra, ki služi samo za prenos natezne sile. S takimi sidri zagotavljamo, da zaledni tlaki ali pa obremenitve, ki izvirajo od drugod, sidrane konstrukcije ne odrinejo od zaledja oz. ne premaknejo.

A.1 RAZVOJ SISTEMOV PREDNAPENJANJA

Prvi znani primer uporabe principa prednapenjanja je pri gradnji Crystal Palace v Hyde Parku v Londonu uporabil britanski arhitekt in vrtnar Sir Joseph Paxton (1803-1865). Prvotno idejo zasnove masivne zidane zgradbe je Paxton nadomestil z idejo rastlinjaka, ki so jo potem v praksi tudi leta 1851 izvedli v obliki prefabriciranih železnih in steklenih panelov. Po Zilch in Weiher (2008) je prvi opis osnovne ideje prednapenjanja v patentni prijavi januarja 1886 podal Američan P. H. Jackson. Predvidel je prednapenjanje predizdelanih ločno oblikovanih betonskih elementov z mehansko zasidranimi železnimi vezmi, ki naj bi se uporabljali v pločnikih, ploščah in strehah, pri čemer so bile prednapete vezi obojestransko razvrščene v spodnjih delih betonskih elementov (slika A.1a). Ne da bi vedel za patent Američana je oktobra 1888 W. Doehring iz Berlina prijavil patent, ki je predvideval minimiziranje razpok v betonskih elementih z napenjanem žic vstavljenih v plošče, letve in tramiče. V svojem patentu je v nasprotju z Jacksonom kot natezne elemente v betonskem prečnem prerezu namesto palic oz. trakov uporabil žice, ki so bile zasidrane z mehanizmom sprijema z betonom. Kot je razvidno iz slike (slika A.1b) je bila žica preko sistema škripčevja speljana skozi namenske odprtine v opažu, tako da je nastala gosta mreža vzporedno napetih žic. Po napenjanju obeh koncev žice, je bil opaž zalit z betonom, po otrditvi betona so bile vbetonirane napete žice porezane, s čimer se je prednapetje aktiviralo. Leta 1907 je praktični preskus z naknadnim vbetoniranjem vnaprej napetih jeklenih palic na visoki tehniški šoli Stuttgart izvedel Mathias Koenen. Poskus je bil zaradi nizkega prednapetja in prisotnih reoloških pojavov praktično neučinkovit, je pa zato Koenen (po spletu okoliščin) pravzaprav odkril armirani beton.

Vsi dotedanji poskusi so bili izvedeni z elementi, katerih natezna trdnost je bila, v primerjavi z današnjim jeklom za prednapenjanje, zelo nizka, zato jih ni bilo možno napeti na dovolj visoke sile, da bi lahko kompenzirale tako takojšnje izgube (zdrs pri zaklinjanju in elastično stisnjenje betona) kot tudi časovno odvisne izgube (relaksacija jekla, tečenje in krčenje betona). Poleg tega je zaradi časovno odvisnih deformacij betona slabe kakovosti v jeklih nizke trdnosti celotna sila prednapenjanja hitro upadla (Gilbert in Mickleborough, 2004). Kombinacija vseh omenjenih vplivov je pripeljala do tega, da vpliva prednapetja ni bilo mogoče ohranjati, kar je v tistem času preprečevalo uveljavljanje idej dotedanjih patentov. Češki inženir Karl Wettstein je leta 1919 sicer uspešno vbetoniral prednapete klavirske strune iz jekla visoke trdnosti, vendar uspešnosti poskusa ni znal pojasniti. Po Zilch in Weiher (2008) je šele Američan R. E.

ki so posledica delovanja jeklenih kablov vgrajenih v konstrukcijo, med obratovanjem konstrukcije pa se vanjo vnašajo natezne napetosti. V patentu sta predvidela prednapenjanje betonskih konstrukcijskih elementov z okroglimi jeklenimi elementi visoke trdnosti, prednapetimi vsaj na 400 MPa (slika A.1c). Z uporabo visokovrednih materialov in dovolj visokim prednapetjem jima je uspel kvalitativni preskok, s čimer je princip prednapetega betona postal praktično uporaben. Freyssinet je v obdobju med 1928 in 1936 patentiral različne izume v zvezi z napenjalkami za prednapenjanje kablov iz jekla visoke trdnosti (slika A.2) ter razvil tehnologijo zasidranja nateznih elementov, ki je omogočila zadostno fleksibilnost sistema za uporabo na različnih tipih konstrukcij, vključno s prednapetimi geotehničnimi sidri.



Slika A.2: Hidravlična napenjalka, kot jo je razvil Eugène Freyssinet (Giovannardi, 2009).

Figure A.2: Hydraulic jack developed by Eugène Freyssinet (Giovannardi, 2009).



Slika A.3: Ogromen kompleks pristanišča Le Havre (levo); izvedba prednapetega betonskega nosilca, ki ga je Eugène Freyssinet predvidel v sklopu sanacije (desno) (Giovannardi, 2009).

Figure A.3: The huge complex of the port Le Havre (left); construction of a prestressed concrete beam as a retrofit measure introduced by Eugène Freyssinet (right) (Giovannardi, 2009).

Freyssinet je svoj sistem prednapenjanja v praksi prvič uporabil pri sanaciji terminala prekoceanke Normandie v pristanišču Le Havre (slika A.3) leta 1933 (Giovannardi, 2009). Ogromen kompleks dolžine skoraj 600 m in širine 45 m je bil v resni nevarnosti, da se zaradi hitro napredujočega posedanja poruši še predno bo dokončan. Obrežni zid je trdno stal na podlagi, medtem ko je pristaniška zgradba izrivala plast mulja in se ob tem intenzivno posedala. Ključno vlogo v izbranem sistemu sanacije so imeli trije glavni betonski nosilci vstavljeni pod zgradbo, s katerimi je medsebojno prednapel glave obstoječih kolov, v nadaljevanju pa je skozi luknje v teh nosilcih navzdol spustil cevaste betonske kole, ki jih je nato zalil in prednapel v dolžini 2 m. Takoj, ko so prvi koli dosegli globlji sloj gramoza, se je posedanje upočasnilo. Na koncu je zgradbo z napenjalkami s pomočjo prednapetih betonskih nosilcev ponovno dvignil na predvideno raven.

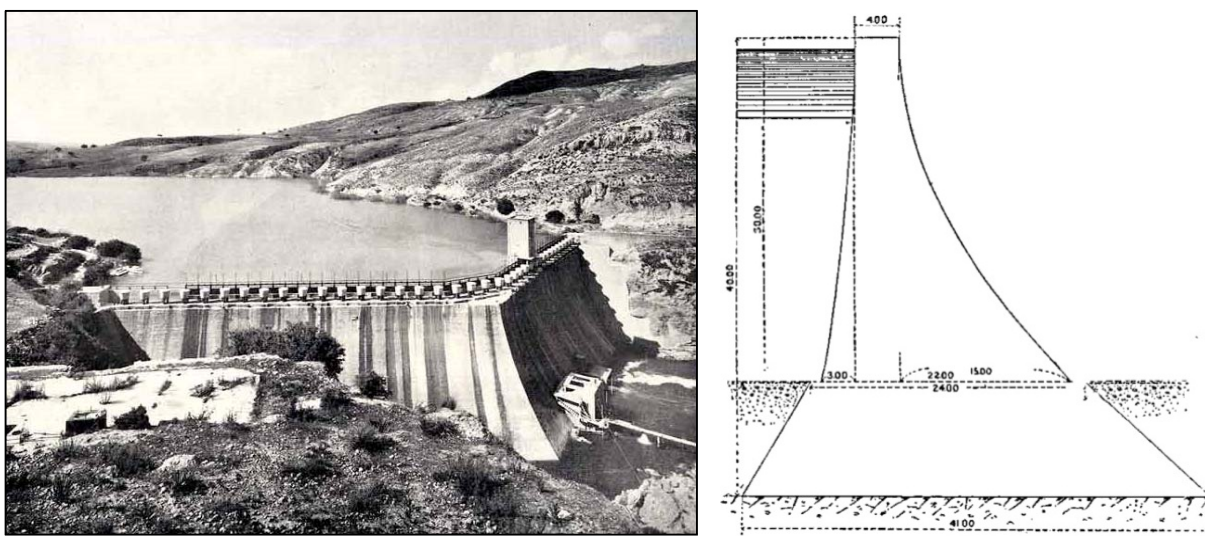
Ta uspešno zaključeni projekt je predstavljal prelomnico v življenju Freyssineta, s katero pa se je tudi začela uporaba sistema prednapenjanja, katere dodatni zagon sta predstavljala njegova patenta stožčastih sidrskih kablov leta 1939 in sistema ponapenjanja leta 1940. Leta 1943 je dokončal gradnjo prvega prednapetega mostu preko reke Longroy Bresle, kar je odprlo pot gradnji številnih prednapetih premostitvenih objektov v povojnem obdobju obnove tako v Franciji kot tudi po svetu (Giovannardi, 2009, Fuzier, 2007). Kasnejši pomembnejši patenti s področja prednapenjanja (Dischinger 1934, Hoyer 1937, Mantscheff 1962, Leonhardt 1964) in nadaljnji razvoj sistemov prednapenjanja so pomembno vplivali predvsem na gradnjo premostitvenih objektov in objektov visokogradnje, vendar pa niso imeli več takega vpliva na tehnološki razvoj sistema prednapenjanja v sklopu zasnove in izvedbe prednapetih geotehničnih sider (Zilch in Weiher, 2008). V 1950-ih in 1960-ih je bilo predvsem v Evropi razvitih in v uporabi preko sto različnih sistemov prednapenjanja. Kasnejši gospodarski razvoj je med temi sistemi povzročil precejšnjo selekcijo, tako da danes med pomembne štejemo manj kot deset sistemov (Hunkeler in sod., 2005). Po istem viru je bila med zadnjimi pomembnimi koraki pri razvoju sistemov prednapenjanja uvedba pletenih pramen, katerih uporaba se je od 1960-ih naprej stalno povečevala.

A.2 POJAV IN ZAČETKI RAZVOJA GEOTEHNIČNIH SIDER

V naravi lahko najdemo različne sisteme sidranja kot so npr. koreninski sistemi dreves in različnih trav. Možno je, da so prav v teh sistemih stare civilizacije našle ideje za izvedbo sidranja svojih zgradb. Dober primer tradicionalne gradnje je Aqar Quf, eden od številnih stopničastih stolpov Babiloncev v južni Mezopotamiji, ki jih lahko še najdemo 30 km vzhodno od današnjega Bagdada (Irak) in ki so bili zgrajeni iz ilovnatih opek, medsebojno povezanih s plastmi trsja. Njihov koncept prevzemanja natezних obremenitev je do neke mere podoben ideji moderne armirane zemljine, ki smo jo začeli uporabljati kakih 3500 let kasneje.

Prvi pojavi začetkov sidranja so v dostopnih zgodovinskih virih dokumentirani konec 19. stoletja. Frazer (1874) je opisal preskuse na sidrih iz kovanega železa, vgrajenih za podpiranje brežine prekopa vzdolž železniške povezave London-Birmingham. Anderson je leta 1900 dokumentiral uporabo uvrtnih kolov v vlogi natezних sider za preprečitev dviga talnih plošč pri poplavih (Xanthakos, 1991). Nekako v istem času so v zgornješlezijskih premogovnikih za varovanje področja temena pri rudarskih izkopih in vnos natezних sil v tla že uporabljali kratka sidra v obliki jeklenih palic. V prvih desetletjih 20. stoletja so bili primeri uporabe sider v gradbeništvu omejeni na posamezne primere podpiranj podzemnih prostorov v kamninah (Wichter in Meiniger, 2000).

Francoski inženir Andre Coyne je vodil izvedbo del na prelomnem primeru ene od prvih in zelo impresivnih uporab sidranja s prednapetimi geotehničnimi sidri pri ojačitvi masivne pregrade Cheurfas v Alžiriji (Barrage des Cheurfas), izgrajene leta 1882 z namenom zadrževanja vode za namakanje. Kot je razvidno iz [slike A.4](#) gre za tiste čase res impozanten objekt, saj skupna višina pregrade znaša 30 m, dolžina 155 m in širina krone na vrhu 4 m, medtem ko širina pregrade ob temelju znaša 22 m. Masivna pregrada je bila zgrajena v dveh delih: v spodnjem delu je trapezno oblikovani temelj iz grušč, na katerem je zgrajena sama pregrada, katere gorvodna in dolvodna površina sta parabolične oblike. Pregrada zadržuje vodo globine 40 m, največji tlak na telo pregrade v notranjosti pa je 0,65 MPa (Wilson, 2008).



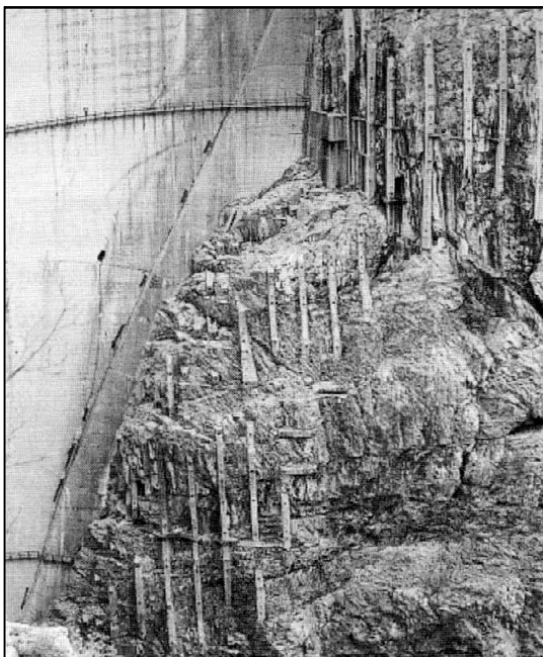
Slika A.4: Pogled na pregrado Cheurfas v Alžiriji zgrajeno leta 1882 (Barrage – Cheurfas, 2009) (levo), prečni prerez skozi masivno pregrado (Wilson, 2008) (desno).
Figure A.4: View of the Cheurfas dam (Algeria) built in 1882 (Barrage – Cheurfas, 2009) (left), cross section of the masonry dam (Wilson, 2008) (right).

Težnostna pregrada, zgrajena iz tradicionalnih (masivnih) materialov, je bila v poplavah leta 1885 delno porušena in nato obnovljena leta 1892. V zgodnjih 30. letih 20. stoletja so bili ugotovljeni znaki nestabilnosti temeljev. V obdobju 1934-1935 je bila v sklopu sanacije v pregrado v rastru 3,5 m vgrajena vrsta navpičnih geotehničnih sider nosilnosti 10 MN, ki so v veznem delu so sider segala približno 15 m globoko v peščenjak pod temelj pregrade. Vgrajena sidra so bila naknadno prednapeta s hidravličnimi napenjalkami. V smislu razvoja zasnove in oblike glav sider so bile v tistem času pri pregradi Cheurfas sestavljene še iz betonskega bloka teže približno 50 kN, medtem ko so pri pregradi Bou-Hanifia že uporabili jeklene konstrukcije glav sider teže približno 15 kN. Po drugi svetovni vojni so bile glave sider sestavljene samo še iz klinastih elementov relativno majhnih premerov, ki so se opirali na sidrne plošče.

Izvedena sanacija s prednapetimi sidri se je izkazala kot ključna prelomnica za razvoj in uporabo prednapetih geotehničnih sider, saj sta se od takrat naprej tehnologija in praksa sidranja razvijali v interdisciplinarno tehniko, ki se danes uporablja praktično v vseh delih sveta. Razvoj sider se je v obdobju med 1934 in 1940 začel v Franciji s konstrukcijami družb Rodio in Sondages, Etanchement, Consolidation (današnji Soletanche Bachy). Za premagovanje težav pri zasidranju nateznega elementa v območju glave sidra v območju zainjektiranja veznega dela sta omenjeni družbi prenesli in uporabili ideje, ki sta jih razvila francoska inženirja Coyne in Freyssinet. Sidra so vgrajevali tako, da so bili njihovi vezni deli nameščeni bodisi v hribini bodisi v masivnem betonu pregrade, pri čemer so v poskusih uspeli doseči sidrne sile do 12 MN, kar so bile za tiste čase izredno visoke sidrne sile, ki so zahtevale povečane dimenzije sidrane konstrukcije za njihov prevzem (Wichter in Meiniger, 2000).

Po drugi svetovni vojni je z začetkom proizvodnje jeklenih žic in pramen visokih trdnosti, kot tudi razvojem metod vrtnanja in injektiranja, v številnih evropskih državah (Francija, Nemčija, Švedska in Švica, kasneje pa tudi v Veliki Britaniji) prišlo do razvoja prednapetih geotehničnih sider (Xanthakos, 1991). Področja in način njihove uporabe so se začela širiti: pri izvedbi sidranja v sklopu pregradnih zidov Castillon v Franciji (1948) in Vajont v Italiji (1960) (slika A.5) so v območju bočnih opor zidov s prednapetimi geotehničnimi sidri ojačali skalno brežino, sidra pa so uporabili tudi pri gradnji kavern

elektrarn v Švici – Maggiawerke, 1954, Grand-Dixence in kaverna Nendaz, 1957 (Wichter in Meiniger, 2000). Isti vir tudi navaja, da so se prednapeta geotehnična sidra v gradbeništvu v večjem obsegu začela uporabljati po letu 1958, ko je bilo uspešno vgrajeno prvo sidro v zemljini.



Slika A.5: Sidranje podpore pregrade zajezitve Vajont v Italiji (Wichter in Meiniger, 2000).

Figure A.5: Anchorages in the abutment of the barrage dam Vajont in Italy (Wichter and Meiniger, 2000).

Zadnji velik tehnološki korak naprej pri prednapetih geotehničnih sidrih je bil opravljen z uveljavitvijo ideje o skrajšanju veznih delov posameznih enot kabla sidra in njihovo zamaknjeno porazdelitvijo vzdolž veznega dela sidra. Prve ideje o zamikanju veznih delov sider so se morda pojavile že prej, vendar je bil Tony Barley tisti, ki je leta 1978 izvedel izvlečne preskuse zelo kratkih veznih delov pramen s končnimi objemkami zalitih v smoli. Preskusi so pokazali, da se je kljub kratkim veznim delom pramen sila v celoti prenesla na smolo, pri čemer lahko preskus treh takih, medsebojno zamaknjenih enot, vgrajenih v 2 m jekleno cev, smatramo kot prvi preskus večkratnega sidra (angl. single bore multiple anchor). Z raziskavami uporabe kratkih dolžin pramen za prenos sile na injekcijsko maso v kratkih zaščitnih ovojih je Barley je nadaljeval v začetku 1980-ih.

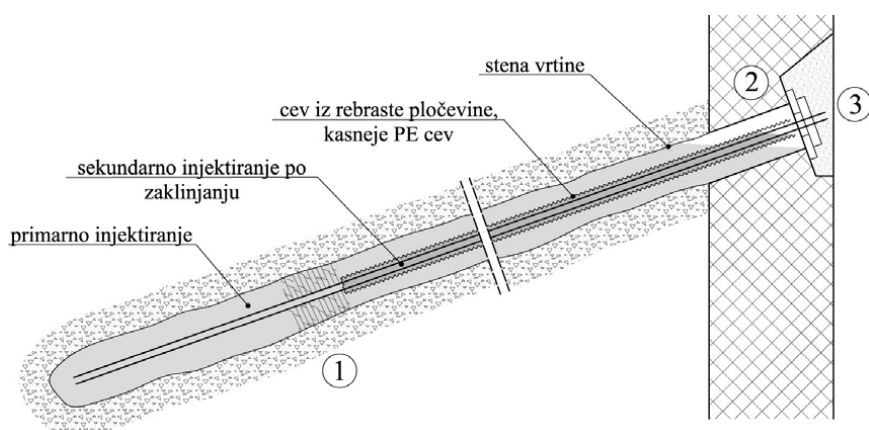
Prva komercialna uporaba pravih večkratnih sider je bila izvedena leta 1988 v Southamptonu (Barley, 1997a): vsaka enota (podsidro) je imela svoj zaščitni ovoj in je bila v veznem delu sidra ločena od ostalih enot, posebne čeljusti pa so v veznih delih enot sidra zagotavljale popoln prenos sidrskih sil. Čeprav so bila sidra napeta s skupno napenjalko, ki ne omogoča različnih izvlečkov posameznih enot sidra, zaradi česar so bile vnesene sile zaradi različnih dolžin prostega dela proti konici sidra vedno manjše, je bila nosilnost teh sider za približno 50 % večja v primerjavi s sidri klasične izvedbe.

Po Barleyu (1997a) so med preskusom sider, sestavljenih iz petih podsider, vgrajenih v glinasta tla v Bracklesham Bedsu, z obročnim dinamometrom izmerili skupno silo 1337 kN. V nadaljnjem 8-letnem obdobju sta se razvoj in tehnološko izpopolnjevanje večkratni sider še nadaljevala, pri čemer je bilo do leta 1997 vgrajenih že 25.000 večkratnih sider. Z večkratnimi sidri je bila premagana tehnološka omejitev dolžine veznih delov klasičnih sider nekje na 8 do 10 m, saj so lahko vezni deli večkratnih sider bistveno daljši – Barley (1995) navaja, da dolžine veznih delov večkratnih sider lahko dosežejo celo do 30 m, pri čemer je možno v glinah doseči porušne sile med 2000 in 3000 kN.

A.3 RAZVOJ SISTEMA PROTIKOROZIJSKE ZAŠČITE TRAJNIH PREDNAPETIH GEOTEHNIČNIH SIDER

Z razvojem in začetkom uporabe prednapetih geotehničnih sider se je kmalu začelo postavljati vprašanje, koliko časa bodo vgrajena in zaklinjena sidra sposobna zagotavljati prenos nateznih sil, kar se neposredno navezuje na problematiko protikorozijske zaščite sider. Nosilci razvoja oblikovanja zaščite prednapetih sider pred propadanjem zaradi delovanja korozijskih procesov v svetovnem merilu so delovali v Evropi, pri čemer je bil z uvedbo tehnološke rešitve v obliki celovite protikorozijske zaščite jeklenih delov prednapetih sider preboj v svetovnem merilu narejen v Švici.

Na osnovi tehnologije sistemov prednapenjanja konstrukcij so bila v sredini prejšnjega stoletja vgrajena prva prednapeta *sidra s polno povezavo*, pri katerih je bila na prosti del sidra dodatno pritrjena cev iz rebraste pločevine, ki je omogočala stopenjsko zainjektiranje jeklenih žic s cementno injekcijsko maso: po vstavitvi sidra v vrtino so sprva zalili vezni del sidra, po doseženi trdnosti injekcijske mase so sidro napeli in zaklinili, nakar so zalili še žice v prostem delu, tako da v uporabnem stanju tako sidro nima več nobenega prosto raztegljivega dela. Povsem na koncu so praviloma obbetonirali še glavo sidra. Taka sidra so po dostopnih podatkih vgrajevali približno do leta 1975.



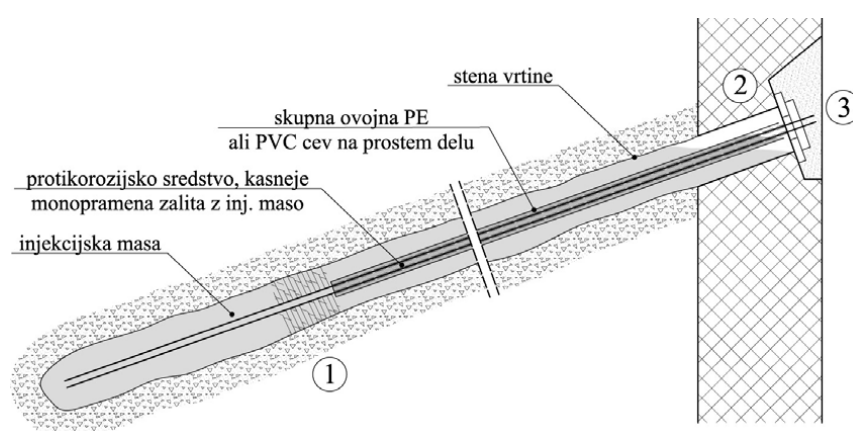
Slika A.6: Prednapeto geotehnično sidro s polno povezavo z označenimi šibkimi mesti (Hunkeler in sod., 2005).

Figure A.6: Fully bonded prestressed ground anchor with denoted weak points (Hunkeler et al., 2005).

Za sidra s polno povezavo je značilno, da edino protikorozijsko zaščito jeklenih žic predstavlja plast injekcijske mase vzdolž celotne dolžine jeklenih žic. Ob skrbni vgradnji in v neagresivnem okolju injekcijska masa v prostem delu sidra ter v območju glave sidra lahko zagotavlja relativno dolgoročno zaščito, vendar je pregledovanje stanja takih sider zaradi nedostopnosti zelo omejeno izključno na vizualni pregled področja vbetoniranih glav sider. Šibka mesta sider s polno povezavo (slika A.6) so začetek veznega dela sidra (območje ① z razpokano cementno injekcijsko maso), področje pod glavo sidra (preostala votla mesta ② po končanem primarnem in sekundarnem injektiranju), kot tudi porozen, razpokan ali slabo oprijet prekrivni beton ③ za obbetoniranje glav sider. V kolikor v življenjski dobi sidra pride do povečanja sidrne sile, so sidra vzdolž prostega dela zaradi nastalih razpok v injekcijski masi korozijsko močno ogrožena. Do krhkih porušitev zaradi napetostne korozije je prihajalo le v izjemnih primerih, pri čemer je o poškodbah tega tipa sider v literaturi zelo malo podatkov, saj porušitev sidra praktično ni opazna vse dokler ne pride do poškodb oz. porušitve sidranega objekta (Hunkeler in sod., 2005).

V sredini 1960-ih je bila dosežena prva stopnja razvoja samostojne tehnike protikorozijske zaščite, ko so se pojavila *sidra z gibljivim prostim delom*, katerih tipična značilnost je bila možnost raztegovanja

jeklenega kabla v prostem delu med življenjsko dobo sidranja. Ključna izboljšava v razvoju je bila uvedba monopramen (zaščita vsakega pramena posebej z namastitvijo in oplášenjem v polietilensko – PE – ovojno cev), vendar pa je na veznem delu edino protikorozijsko zaščito še vedno predstavljala le strjena injekcijska masa. Čeprav se protikorozijska zaščita takih sider še vedno šteje kot nezadostna, so se z uvedbo monopramen poškodbe na prostem delu sider pojavile le še posamično. Šibke točke (slika A.7) so začetek veznega dela sidra, kjer še ni bilo zaščitne plastične cevi (razpokana cementna injekcijska masa ①), nezatesnjen stik in področje pod glavo sidra ② (nepopolna zapolnitev pod sidrno ploščo oz. odtekanje plastičnega polnilnega sredstva) ter pomanjkljiva zaščita glave sidra ③ (brez pokrova sidra, porozen, razpokan ali slabo oprijet prekrivni beton pri obbetoniranih glavah sider) (Hunkeler in sod., 2005). Sidra z gibljivim prostim delom so od leta 1977 naprej v celoti izpodrinila sidra s polno povezavo, v istem letu se je v Švici pojavil tudi prvi standard *SIA* (1977) za geotehnična sidra.



Slika A.7: Prednapeto geotehnično sidro z gibljivim prostim delom z označenimi šibkimi mesti (Hunkeler in sod., 2005). **Figure A.7:** Prestressed ground anchor with movable free anchor length with denoted weak points (Hunkeler et al., 2005).

Z uvedbo tega tipa sider se je razvoj prednapetih geotehničnih sider ločil od sistemov prednapenjanja ostalih konstrukcij: v prednapetem betonu je v času zaklinjenja sila največja, nato pa med življenjsko dobo upada proti neki končni vrednosti, pri čemer se razdalja med obema skrajnima mestoma zaklinjenja skrajša za manj kot 0,5 ‰; na drugi strani se lahko sila v nateznem kablju sidra med življenjsko dobo znatno spremeni (poveča ali zmanjša) tudi za 20 do 50 ‰, pri čemer se lahko razdalja med obema skrajnima točkama vnosa sile v obeh smereh spremeni za 1 do 10 ‰ (Hunkeler in sod., 2005). Zaradi tega se med življenjsko dobo sidranja posledično pojavlja potreba po prilagajanju sidrnih sil.

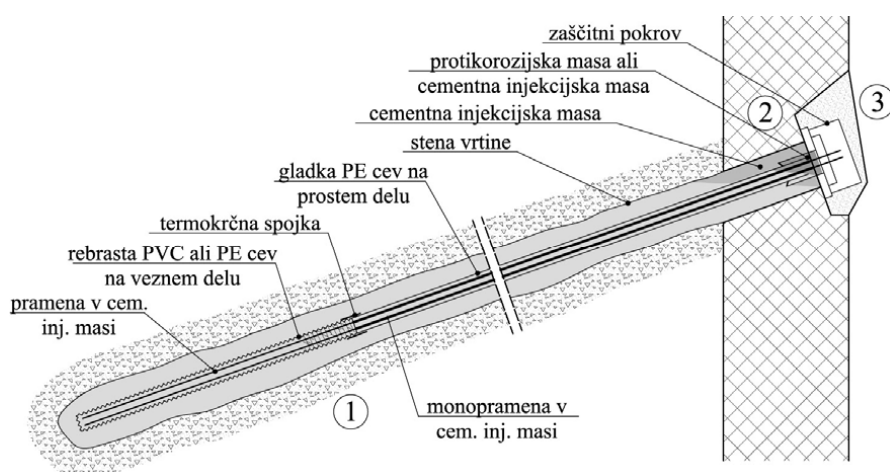
Pri prvih sidrih z gibljivim prostim delom je na prednapetem jeklu prihajalo do krhkih porušitev zaradi napetostne korozije vzbujene z vodikovo krhkostjo, ki se je praviloma razvila na mestih lokalnih korozijskih izjed običajno v globini do 1,5 m pod glavo sidra, v več primerih pa tudi na preostalem prostem delu sidra, še posebej na stiku prostega in veznega dela sider. Redkeje je zaradi enakomerne površinske korozije prihajalo do porušitev pod glavo sidra ali na stiku prostega dela z veznim. Razširjenost korozijskih poškodb je bila precej različna: pri nekaterih objektih kljub sistematičnim pregledom niso bile odkrite nobene poškodbe, pri drugih so bile ugotovljene posamezne porušitve žic pramen praktično nepomembne za varnost objekta, nasprotno pa je pri ostalih objektih prišlo do skoraj sistematičnih porušitev. Podobno velja tudi za bolj ali manj enakomerne korozijske poškodbe na elementih glav sider in zaščitnih pokrovih. Prehod iz sider s polno vezavo na prva sidra z gibljivim prostim delom brez dvojne protikorozijske zaščite je bil s stališča trajnosti in tveganja pojava porušitve pravzaprav korak nazaj pri razvoju sider (Hunkeler in sod., 2005).

Glavni vzrok korozijskih poškodb na prednapetem jeklu sider z gibljivim prostim delom so bili nedodelani tehnološki detajli. Problem predstavlja netesen stik med glavo sidra in zaščitnim ovojem, saj je

bilo pri poševnih sidrih polnjenje zgornjega dela tega prostora z injekcijsko maso vedno nepopolno, poleg tega pa plastično protikorozijsko sredstvo ni v celoti prekrilo površine posameznih pramen prostega dela sider (bodisi so bile v sredstvu praznine bodisi je to sredstvo odteklo s površine pramen); pogosto je bila za sidranim objektom odkrita še (kontaminirana) pronikajoča voda, ki je imela tako prosto pot do jeklenih pramen. Protikorozijska zaščita, izvedena na prostem delu sider v 1960-ih, je bila nezadostna, saj so žice premazali le z bitumnom ali sintetičnimi smolami, palice (izdelane iz jekel še posebno občutljivih na pojav napetostne korozije) pa so ovili le z izolacijskim trakom, uporabljena sredstva pa tudi niso v zadostni meri ščitila prednapetega jekla pred korozijo. Dodatna vzroka za korozijske poškodbe prednapetega jekla sider sta še (Hunkeler in sod., 2005):

- nepopolno primarno zainjektiranje zgornjega območja veznega dela sider, ki je bilo posledica neizvršene ali nezadostne konsolidacije vrtnice oz. poteka veznega dela sidra skozi različna tipa tal zaledja, zaradi česar je pet let po izvedenem sidranju prišlo do edine v literaturi objavljene porušitve sidranega objekta (viseči most preko reke Thur za cevovod tovarne v Dietfurtu, St. Gallen, Švica),
- predhodna poškodba prednapetih palic zaradi nepravilnega skladiščenja (skladiščenje nezaščitene palice na prostem, deloma celo v bližini cest pozimi posipanih s soljo) in na katerih so bile že v času vgradnje prisotne lokalne korozijske poškodbe, na mestu katerih je v kratkem času prišlo do krhke porušitve zaradi napetostne korozije.

Po dostopnih podatkih so bila prva sidra v Švici z rebrasto plastično cevjo opremljena leta 1974, bolj sistematično pa so se rebraste cevi začele uporabljati od leta 1978 naprej. Na prehodu veznega v prosti del so rebrasto in gladko plastično cev stikovali s kosom termokrčne cevi. V začetku 1980-ih so se začela pojavljati tudi sidra, pri katerih je bilo poleg zaščite jeklenega kabla v veznem delu sidra s PVC rebrasto cevjo izvedeno tudi stikovanje in tesnjenje območja prehoda glave sidra v gladko zaščitno cev prostega dela sidra, kar je omogočalo sprva notranje injektiranje, kasneje (od leta 1983) pa tudi zunanje injektiranje tega območja pod glavo sidra. Taka sidra so poimenovali **sidra z dvojno protikorozijsko zaščito** (slika A.8), pri katerih se je z uporabo rebrastih plastičnih cevi zaščita pramen v območju vnosa sile zelo izboljšala, v območju pod glavo sidra je bil zatesnjen prehod s cevi prostega dela na elemente glave sidra, v tem delu je bilo izvedeno zunanje in notranje injektiranje, sistematično pa so se začeli vgrajevati zaščitni pokrovi.



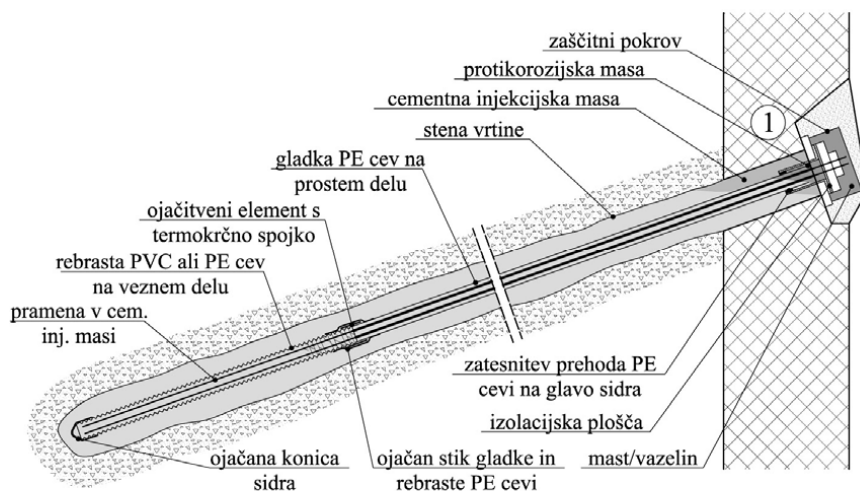
Slika A.8: Prednapeto geotehnično sidro z dvojno protikorozijsko zaščito z označenimi šibkimi mesti (Hunkeler in sod., 2005).
Figure A.8: Prestressed ground anchor with double corrosion protection with denoted weak points (Hunkeler et al., 2005).

Teoretično vodotesen spoj plastičnih cevi na stiku prostega in veznega dela pri pramenskih sidrih se je v praksi pogosto izkazal kot ranljiv ① (pojav poškodb pri transportu, vgradnji ali napenjanju sider), zatesnitev na prehodu z zaščitne cevi na glavo sidra pogosto ni vodotesna ② (bodisi zunanji del ni bil v

celoti zainjektiran bodisi je plastična protikorozijska masa odtekla), prekrivni beton pri obbetoniranih glavah sider ③ je porozen, razpokan oz. slabo oprijet. Med glavo sidra in sidrano konstrukcijo ni električne izolacije, zato se lahko pojavijo poškodbe zaradi blodečih tokov (Hunkeler in sod., 2005).

Sidra z dvojno protikorozijsko zaščito, ki so se v Švici pojavljala od leta 1983 do 1994, v splošnem veljajo kot zadostno protikorozijsko zaščitena, problematična so le na stiku gladke in rebraste zaščitne cevi, pri pojavu zaledne vode pod pritiskom, ter v primeru izpostavljenosti močnim blodečim tokovom. Pri ustrezno projektiranih konstrukcijah so se pri tem tipu sider korozijske poškodbe pojavile le še posamično. V Hunkeler in sod. (2005) je naveden le en primer pri katerem so bila v sidrani objekt vgrajena sidra z dvojno protikorozijsko zaščito, vendar domnevajo, da je bil zaradi dolgega časa gradnje (od 1979 do 1983) le del sider izveden s tako protikorozijsko zaščito, pa še v tem primeru brez injektiranja območja neposredno pod glavo sidra. Pri pregledu dela od 193 vgrajenih sider so bili ugotovljeni dva pretrga žice v pramenih in en pretrg pramena, do katerih je prišlo zaradi krhkega loma, ki je bil posledica pojava napetostne korozije na mestih lokalnih korozijskih izjed.

Leta 1985 so v Švici izvedli obsežnejše sidranje podpornega zidu izvedenega v sklopu elektrificirane železnice na železniški postaji Stadelhofen v Zürichu, kjer so bili prisotni za prednapeta geotehnična sidra potencialno zelo nevarni blodeči tokovi. Z nadgradnjo sider z dvojno protikorozijsko zaščito so oblikovali **sidra s celovito protikorozijsko zaščito** (slika A.9), ki so bila v začetku še precej nezanesljiva, vendar so zboljšavami detajlov in skrbnim ravnanjem s sidri dosegli, da so z meritvami električne upornosti izvedenih v sklopu kontrole tesnosti zaščitnega ovoja uspeli dokazati, da je 90 % sider po preskusu napenjanja izkazovalo zadostno električno upornost ($\geq 0,1 \text{ M}\Omega$). Za možnost dolgoročne kontrole zaklinjenih sider je bilo treba izvesti še električno izoliran kontakt na stiku proste dolžine in glave sidra, kot tudi med glavo sidra in sidrano konstrukcijo. Prvo uspešno električno izolacijo glave sidra so izvedli pri sidranju severnega portala predora Seelisbergtunnels leta 1992. Na podlagi teh izkušenj so bile postavljene zahteve za sistematično preverjanje sider s celovito protikorozijsko zaščito z meritvami izolacijske upornosti. S tem so bile odpravljene vse slabosti prejšnjih sistemov sidranja, istočasno pa je z električno izolacijo sidra od tal in sidrane konstrukcije preprečeno ogrožanje sider zaradi delovanja blodečih tokov in nastanka makroelementa med jeklom sidra in armaturo objekta. Pri sidrih z zadostno upornostjo ni pričakovati bistvenih korozijskih poškodb, vendar pa so pri tem tipu sidra vseeno možne predhodne poškodbe pramen zaradi nepravilnega skladiščenja sider na gradbišču, zaradi nepravilnosti pri vgradnji sider pa lahko pride do poškodb plastičnega zaščitnega ovoja sider.



Slika A.9: Prednapeto geotehnično sidro s celovito protikorozijsko zaščito z označenim potencialnim šibkim mestom (Hunkeler in sod., 2005).

Figure A.9: Prestressed ground anchor with comprehensive corrosion protection with denoted potentially weak point (Hunkeler et al., 2005).

Kritično mesto ostaja območje glave sidra ①, ki se izvede na mestu vgradnje sidra: v času od zainjektiranja sidra v vrtini pa vse do izvedbe končne protikorozijske zaščite obstoja nevarnost vdora padavin ali površinske vode v notranjost monoprarnen ali v območje prijema zagozd, česar pa z meritvami električne upornosti ni možno zaznati. Poleg tega lahko pri izvedbi protikorozijske zaščite pride do nedoslednosti v obliki odstopanj od potrjenih izvedbenih detajlov oz. uporabe nepotrjenih sestavnih komponent sider. Z doslednim upoštevanjem določil podeljnih tehničnih soglasij in poostrenim nadzorom skladiščenja, vgrajevanja in še posebej izvajanja vseh ukrepov protikorozijske zaščite, se je zgoraj navedenim nevarnostim možno izogniti, vendar pa naša praksa žal kaže, da zaradi nedoslednosti in napak pri izvedbi protikorozijske zaščite glav sider tudi pri tem dobro zasnovanem konceptu zaščite še vedno prihaja do netesnih izvedb zaščite in korozijskih poškodb jeklenih nosilnih delov sider (Klemenc in Kuhar, 2008).

A.4 KRATEK PREGLED UVELJAVLJANJA GEOTEHNIČNIH SIDER PO SVETU

A.4.1 Praksa sidranja v Švici

Prva sidra s polno povezavo v kamnini so bila v Švici vgrajena v podzemni kaverni črpalne hidroelektrarne Maggia v letu 1951, leta 1962 so vgradili še prvo sidro takega tipa tudi v zemljini (Hunkeler in sod., 2005). V Švici so se ta sidra v obliki nateznih kablov sestavljenih iz žic (nem. Drahtanker) v 1950-ih in 1960-ih uporabljala pri gradnji hidroelektrarn in pri gradnji državni cest, pri čemer je del priznanih švicarskih izvajalcev sidranja v začetku 1970-ih kable iz žic nadomestili s prameni, medtem ko so nekateri izvajalci s kabli iz žic vztrajali do sredine 1980-ih. V začetku so v Švici pramenska sidra, analogno sidrom s kabli iz žic, v območju glave sider zasidrili s skupno kotvo in eno centralno (skupno) zagozdo oz. so pramena posamično zaklinili v izbočeno (obokano) kotvo, vendar pa so se hitro uveljavile ravne skupne kotve v katerih se vsa pramena sicer zaklinijo istočasno, pri čemer se vsak pramen zaklini s svojo zagozdo.

Koncem 1960-ih je izvajalec VSL razvil svoj tip sidra, pri čemer kot prvi ni razlikoval med zemljinskimi in kamninskimi sidri, pač pa je uvedel razlikovanje med začasnimi in trajnimi sidri, kar je imelo specifične posledice v zvezi z oblikovanjem protikorozijske zaščite sider. Sidra so uporabljali za sidranje kamnin, v katerih so bile prisotne diskontinuitete, pri čemer so v vsakem profilu uporabili po eno sidro, s čimer je bilo podpiranje diskontinuirano, kar je omogočilo prosto raztezanje vsakega sidra brez povzročanja sekundarnih napetosti v sosednjih profilih. Princip samopodpiranja podzemnega objekta s prednapetimi kamninskimi sidri je bil prvič uporabljen leta 1970 na podzemni kaverni črpalno-shranjevalne postaje Hongrin ob Ženevskem jezeru, pri čemer lahko to uporabo štejemo kot predhodnico Nove avstrijske metode vpeljane koncem 1970-ih (Xanthakos, 1991).

A.4.2 Praksa sidranja v Franciji

Razvoj podpornih sistemov tal v Franciji je potekal vzporedno s potrebo po podzemnih prostorih in globokih izkopih v izgrajenem urbanem okolju, kjer se v ta namen od leta 1953 naprej uporabljajo tudi geotehnična sidra z ločenim prostim delom in veznim delom. Tipičen primer uporabe sidranja v pozidanem mestnem okolju je bilo koncem 1970-ih primer izgradnje postaje podzemne železnice v okviru projekta Halles Forum v Parizu, kjer je bil izkop varovan z začasnimi prednapetimi sidri s predvideno življenjsko dobo štiri do pet let (Xanthakos, 1991).

A.4.3 Praksa sidranja v Nemčiji

V Evropi se je razvoj prednapetih sider v zemljinah leta 1958 začel s tehnološkim neuspehom. Do takrat so namreč stene gradbenih jam vedno varovali s podporniki. Gradbena jama za novo radijsko postajo v Muenchnu naj bi bila kot prva v Nemčiji izvedena kot pilotna stena brez opornikov, ki so jo opirali s sidri, sidranimi v sidrne vodnjake ležeče 10 m za pilotno steno (Wichter in Meiniger, 2000). Izkazalo se je, da je bilo s takrat razpoložljivo vrtalno opremo vodnjake težko zadeti, saj so s številnimi vrtinami zgrešili jaške. Pri izvlačenju drogovja iz proda so morali premagovati trenje, ki je bil istega velikostnega reda, kot so bile potrebne sidrne sile, zato so naredili poskus, da bi to trenje s cementno suspenzijo še povečali in izrabili. V ta namen so uporabili žrtvene vrtalne krone z uvrtnim navojem. Po doseženi željeni globini so skozi drogovje v vrtalne krone privijačili natezne palice, nato pa so hkrati z izvlačenjem drogovja s cementno suspenzijo pod povišanim tlakom zainjektirali spodnjih 5 m vrtine. Po nekaj dneh so sidra poskusno obremenili in ugotovili, da se sidra lahko obremenijo s silo na meji tečenja jekla. Ker se je v praksi izkazovalo, da je izvedba sidranja pri globokih gradbenih jamah cenejša od opiranja sten jame, se je razvoj sidranja gradbenih jam nadaljeval. Že leta 1958 je bil razvit sistem Bauer, pri katerem se v vrtino majhnega premera (\varnothing 8 cm do \varnothing 14 cm), izvrtano v tla, vgradi palico iz jekla višjih natezih trdnosti, vmesni prostor pa je zalit s primerno cementno maso. Od sredine do konca 1960-ih so bili v Nemčiji prisotni že trije izvajalci, ki so začeli s sistematičnim sidranjem gradbenih jam (Dausch in Kluckert, 2001). Obseg izvedenega sidranja je hitro naraščal, saj je samo Bauer do leta 1965 vgradil že približno 30.000 sider (Xanthakos, 1991).

A.4.4 Praksa sidranja v Veliki Britaniji

Na britansko tehnologijo sidranja v 1960-ih je vplival razvoj sidrnih sistemov v Nemčiji (konec tlačnega injektiranja skozi obložne cevi) in Franciji (poinjektiranje), medtem ko je imela Velika Britanija vodilno vlogo pri razvoju vrtin z večimi stožčastimi razširitvami (angl. multi underreaming). V Veliki Britaniji so geotehnična sidra sprva vgrajevali kot podporne elemente za preskušanje pilotov in za stabilizacijo povoznih površin v premogovnikih (Xanthakos, 1991). Leta 1961 so v Durbanu (Škotska) v glino izvrtali prve vrtine manjših premerov z večimi stožčastimi razširitvami v veznem delu sider, kamor so vgradili prednapeta sidra. Do konca 1960-ih je bila izvedba vrtin z večimi stožčastimi razširitvami v trdnih glinah že povsem uveljavljena (Weatherby, 1982). Leta 1966 so v sklopu izkopa zidu v Bristolu sistematično vgradili sidra visoke nosilnosti, do leta 1970 pa je bila izvedba tehnike sidranja že uveljavljena praksa, pri čemer je bila pozornost že usmerjena v določene teoretične vidike, kot so prenos obtežbe, lezenje in protikorozijska zaščita, razvita pa so že bila prva semiempirična pravila projektiranja. Sidra so se po dostopnem viru (Xanthakos, 1991) kot osrednja tema prvič pojavila na konferenci leta 1974, ki je bila izvedena v organizaciji ICE (Institution of Civil Engineers).

A.4.5 Praksa sidranja v Avstriji

Zaradi prevladujočih geoloških in topografskih pogojev gradnja modernih prometnic v Avstriji brez razpoložljive primerne tehnologije sidranja ne bi bila možna, pri čemer uporaba prednapetih kamninskih in zemeljskih sider že desetletja predstavlja cenjeno in preskušeno metodo gradnje (Xanthakos, 1991). Leta 1966 so bili zaradi gradnje avtoceste prisiljeni prvič uporabiti metodo sidranja od zgoraj navzdol (angl. top-to-bottom technique) grajskega zidu v Innsbrucku, ki se je nato uveljavila kot metoda gradnje sidranih objektov v nestabilnih kamninah, pri kateri z uvedbo relativno nizkih sidrnih sil preprečujemo zdrse zaledij, s čimer se izognemo tradicionalni tehniki opiranja izkopov.

Podobni problemi temeljenja so se pojavljali tudi pri gradnji železnic, pri umiku hrupnega prometa pod raven terena, kot tudi pri izvedbi globokih gradbenih jam v urbanih okoljih, kjer naraščajoče cene zemljišč vodijo v vedno višje zahteve po gospodarnem izkoristku zemljišč, kar se odraža v vedno večjem številu podzemnih garaž. S povečevanjem globin gradbenih jam so zahteve za učinkovito opiranje sten teh jam vedno večje, zato se uporabi prednapetih geotehničnih sider ni več možno izogniti. V 1970-ih so spoznali vsestranske možnosti uporabe prednapetih sider, povečano povpraševanje na trgu pa je sprožilo začetek naglega tehnološkega razvoja, ki pa ni zajemal le zasnov sider, pač pa tudi uspešno uporabo nujno potrebnih tehnik vrtanja in injektiranja. Ta razvoj je na eni strani vodil v povečanje nosilnosti, dosežene preko razširitev vrtine, razpiranja veznega dela in poinjektiranja, na drugi strani pa tudi v izboljšanje protikorozijske zaščite. Istočasno so bile uvedene pomembne izboljšave tudi na področju vrtalne opreme, ki je tako s tehničnega kot tudi gospodarskega vidika omogočila izvedbo sider dolžin do 100 m. Leta 1976 so na Dunaju prvič vgradili geotehnična sidra, ki so jih kasneje lahko v celoti odstranili.

Spomladi 1978 je bil v Avstriji izdan nacionalni standard *ÖNORM B 4455*, ki je bil prvič predelan leta 1985. Rezultat tega razvojnega obdobja je bilo moderno sidro izdelano iz kakovostnih materialov, ki je bilo zaradi posebnih ukrepov protikorozijske zaščite primerno za uporabo v agresivnem okolju, katerega primernost je bila dokazana v postopku pridobitve nacionalnega tehničnega soglasja (Tischler, 1995).

A.4.6 Praksa sidranja v Združenih državah Amerike

V ZDA so izvajalci v 1950-ih za začasno podpiranje sten globokih izkopov začeli vgrajevati prednapeta sidra z nosilnostmi med 180 in 890 kN. Prednapeta sidra so sprva izvajali v vezljivih zemljinah, pri čemer so vrtine v območjih veznih delov sider vrtali kot ravne vrtine ali pa kot ravne vrtine z enojno stožčasto razširitvijo. V zgodnjih 1960-ih so v ZDA za namene začasnih uporabe začeli vgrajevati sidra skozi votle svedre vrtalne garniture. Prva trajna prednapeta zemljiška sidra so vgradili leta 1961 za varovanje podpornega zidu ob avtocesti v Detroitu (Michigan, ZDA), pri čemer so sidra v zelo trde gline vgradili v ravne vrtine večjega premera z enojno stožčasto razširitvijo (Weatherby, 1982).

Zaradi visokih stroškov dela in tehnoloških problemov (protikorozijska zaščita, dolgoročno leženje, velike obremenitve glav sider in razvoj izvlečne odpornosti v potencialno aktivnih conah) je bila uporaba sidranja v ZDA do začetka 1970-ih precej omejena. Eden od zgodnjih primerov sidranja s 300 sidri je bil uspešno izveden v sklopu izvedbe izkopa gradbene jame za poslovno zgradbo leta 1969 v Los Angelesu. Šele od leta 1970 naprej se je za sidranje začasnih sidrskih sten začela bolj splošna uporaba prednapetih geotehničnih sider. V začetku uporabe je bilo neuspešnih 20 % vseh preskusov nosilnosti na vgrajenih sidrih, sčasoma sta povpraševanje na trgu in povečan obseg dela vplivala na stroške dela in izboljšala kakovost izvedenih sidrskih del. Začetek obdobja širše uporabe sider je zaznamovala gradnja World Trade Centra v New Yorku, pri kateri je bilo za izvedbo izkopa gradbene jame globine 21 m potrebno vgraditi šest vrst geotehničnih sider projektne nosilnosti 2136 kN (Xanthakos, 1991).

Uporaba trajnih prednapetih geotehničnih sider v projektih javnega sektorja se sicer ni uveljavila do konca 1970-ih, je pa začetek uporabe takih sider vzpodbudil zvezne in državne agencije v raziskovanje dolgoročnega obnašanja zainjektiranih sider. Tako je leta 1979 U.S. Department of Transportation (FHWA – Federal Highway Administration) odobril demonstracijski projekt s trajnimi prednapetimi geotehničnimi sidri, v sklopu katerega so preučevali razpoložljive tehnologije sidranja in postopkov vgradnje, iskali tehnološke rešitve za še ne dovolj raziskana in dodelana področja, pripravili pa so tudi

osnutek priročnika za projektiranje. V sklopu tega projekta so bila sidra vgrajena na petih sidranih objektih avtocestnega omrežja, do danes pa se je sidranje uveljavilo kot popolnoma običajen ukrep.

A.4.7 Praksa sidranja v Avstraliji

Trajna prednapeta geotehnična sidra visokih nosilnosti se v Avstraliji že dolgo vrsto let uporabljajo za ojačitev betonskih masivnih pregrad. V obdobju med 1958 in 1974 so s sidri s polno povezavo ojačili vsaj 16 velikih pregrad, pri čemer so sidra zainjektirali v dveh fazah: po vstavitvi sidra v vrtino so najprej zalili vezni del sidra, po doseženi trdnosti injekcijske mase so sidro napeli in zaklinili, nakar so zalili še žice v prostem delu sidra. V sredini 1970-ih so spoznali, da bo večje število pregrad treba ojačiti, saj pri pregradah, zgrajenih do leta 1946, niso upoštevali vpliva vzgonskih sil hidrostatičnega vodnega tlaka pod pregrado, poleg tega pa sodobne metode za oceno meteoroloških vplivov kažejo, da so bile prvotne projektne ravni poplavnih voda precej podcenjene. Istočasno se je pojavljala dvom o zanesljivosti injekcijske mase kot edinega protikorozijskega sredstva, izkazovala pa se je tudi potreba po možnosti preverjanja dejanskih sil v sidrih med njihovo življenjsko dobo.

Prvi objekt, za katerega so razvili zaščitni ovoj vzdolž pramen, možnost spremljanja sil in spreminjanja sil v sidrih, je bil Manly Dam, v katerega so leta 1981 vgradili 46 sider s kablom sestavljenim iz 24 pramen \varnothing 15,2 mm mejne nosilnosti 6000 kN in maksimalne dolžine 43 m. Pri razvoju so uporabili vse razpoložljivo znanje in tehnologijo, pri čemer so upoštevali tudi izkušnje iz Evrope – s pomočjo uveljavljenega evropskega proizvajalca sider so posebno pozornost namenili trenju pramen v prostem delu sider, kar se je izkazalo kot še posebej pomembno pri prostih delih sider daljših od 30 m, ter rebrastim zaščitnim cevem, saj so bile razpoložljive cevi na tržišču zaradi neprimerne profila reber in tanke stene cevi neprimerne, zato so bili prisiljeni izdelati posebne namenske rebraste polietilenske cevi z debelino stene cevi 2,5 mm. Na podlagi izpopolnjenih sider so v nadaljnjih 14 letih s trajnimi prednapetimi sidri ojačili še 14 pregrad, pri čemer so se stalno povečevale zahteve tako glede dolžine kot tudi nosilnosti sider, tako da so v Burrinjuck Dam leta 1994 vgradili 161 sider mejne nosilnosti 16,25 MN dolžin med 76 in 128 m, pri čemer pa je na vseh sidrih možno spremljati in spreminjati silo v sidru. Zanimiva tehnološka podrobnost pri vgradnji teh sider je bilo vstavljanje sider v vrtine: zaradi velikih dimenzij in teže sider so v vrtino \varnothing 310 mm najprej spustili zaščitno rebrasto cev, preverili njeno tesnost in šele nato so v notranjost rebraste cevi spustili telo sidra, nakar so ponovno preverili tesnost zaščitnega ovoja. Za zalivanje sidra so za vezni in prosti del sider uporabili injekcijsko maso različne sestave, pri čemer so postopek injektiranja zaradi izredne dolžine opravili v treh fazah (Cavill, 1997).

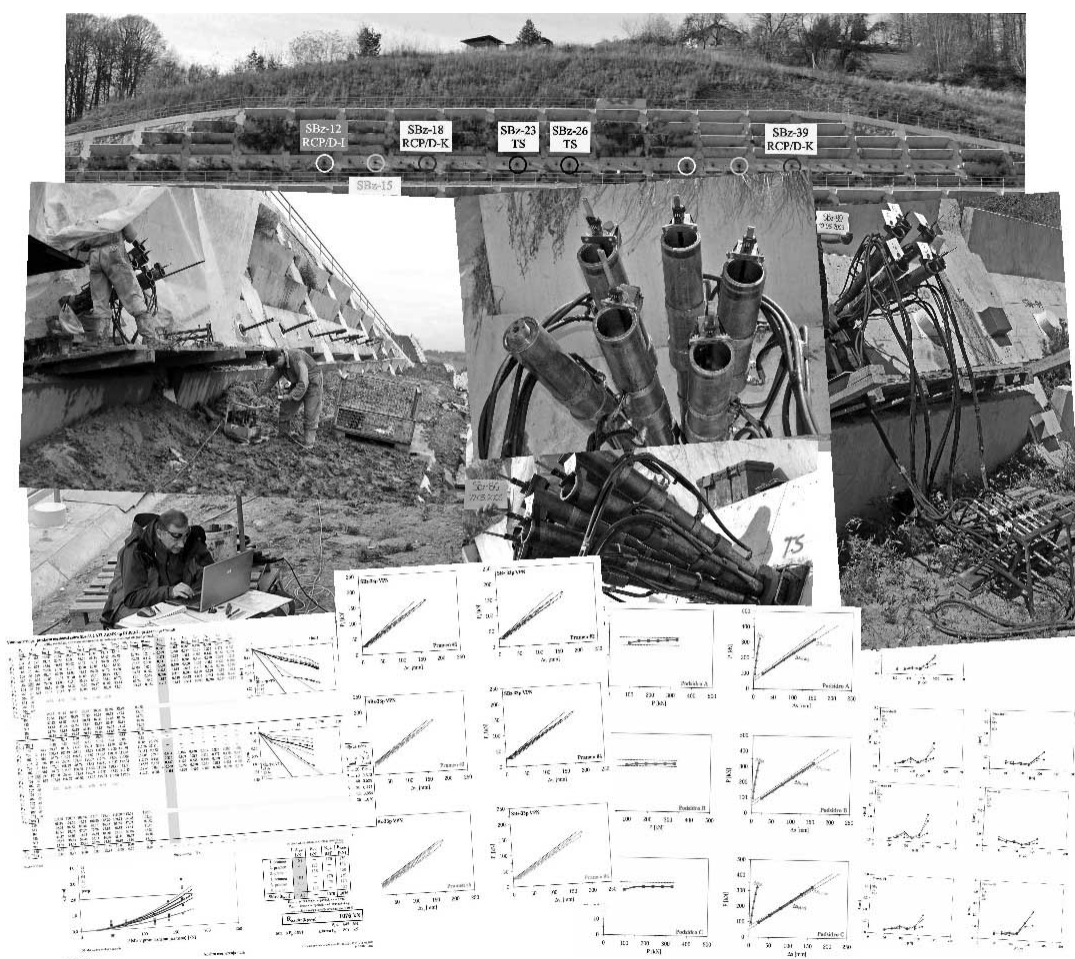
A.4.8 Praksa sidranja drugod po svetu

Od leta 1958 so podporne stene sidrane s trajnimi prednapetimi sidri običajna metoda za varovanje brežin v Braziliji, pri čemer med pomembnejše izvedene projekte sidranj zagotovo lahko uvrstimo program preskušanj sider v zaglinjenih zemljinah, izveden v okviru izgradnje podzemne železnice v Sao Paulu koncem 1960-ih (Weatherby, 1982). Tudi sicer se v splošnem sidranje v Severni in Južni Ameriki uporablja zlasti v pozidanih območjih velemest; tako je bila npr. v Caracasu (Venezuela) večina podzemnih podpornih konstrukcij in podpiranj tal od zgodnjih 1970-ih naprej izvedenih z uporabo trajnih geotehničnih sider. Na Daljnem vzhodu so sidra uporabljali v glavnem pri globokih izkopih objektov visokogradnje, kot tudi pri gradnji objektov nizkogradnje, zato je bilo izvajanje sidranja usmerjeno predvsem v območja velemest Tokio, Osaka in Singapur, pri čemer so bila sidra izvedena kot začasen ukrep, priljubljeni pa so bili tudi tipi odstranljivih sider (Xanthakos, 1991).

(prazna stran)

Dodatek B

Rezultati preskusov nosilnosti sider RCP/D, RCP/D-K, RCP/D-Z in RCP/D-I, opravljenih na testnem polju leta 2008 in 2009



B.1 REZULTATI PRESKUŠANJ NOSILNOSTI SIDER, OPRAVLJENIH V SKLOPU RRN LETA 2008 NA TESTNEM POLJU OBJEKTA OZ-05

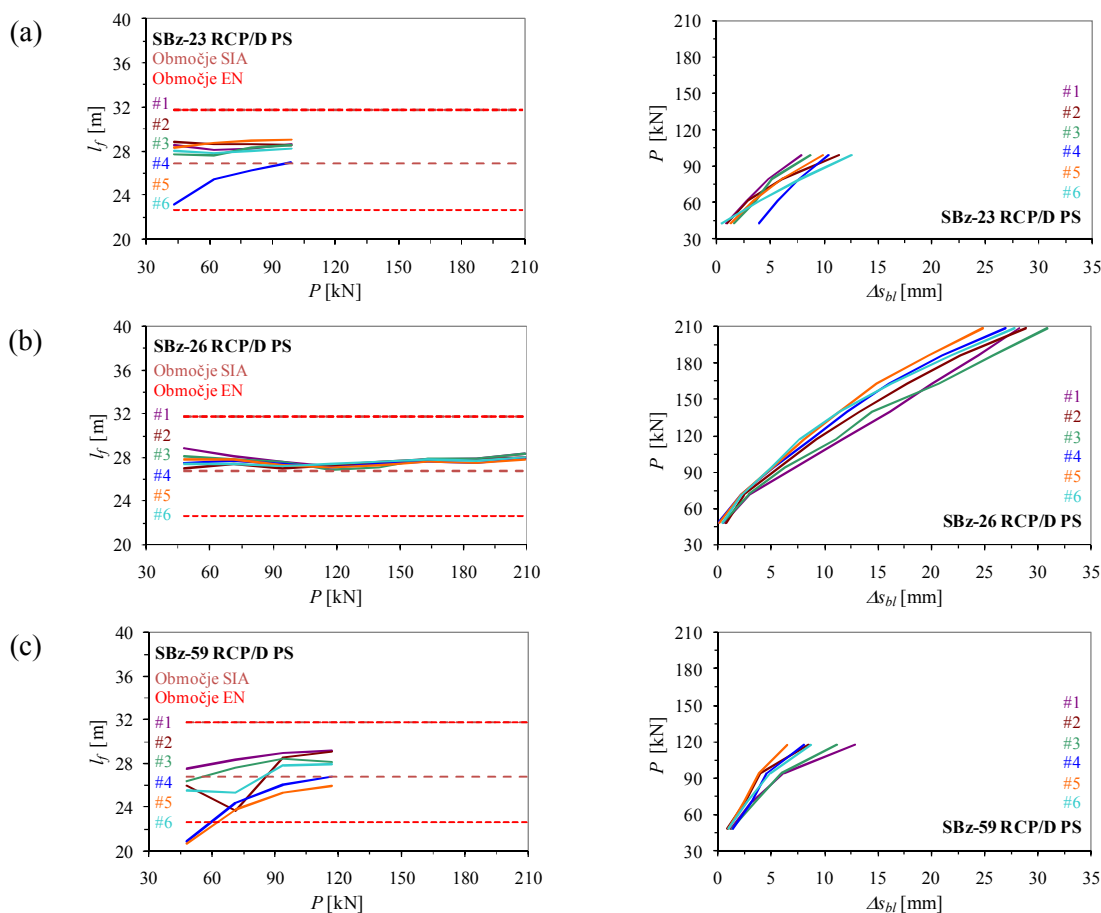
V tem poglavju podajamo kratke opise zbranih in analiziranih rezultatov preiskav sider RCP/D opornega zidu OZ-05 na AC Slivnica-Pesnica, izvedene v sklopu gradnje objekta med junijem 2006 in junijem 2007, kot tudi izvedene preiskave sider (PS) in večstopenjske preskuse nosilnosti (VPN) referenčnih sider RCP/D ter modificiranih tipov RCP/D-K, RCP/D-Z in RCP/D-I, ki smo jih v aprilu in maju 2008 v sklopu raziskovalno-razvojne naloge (RRN) DARS izvedli na testnem polju objekta OZ-05.

B.1.1 Sidra RCP/D

Za potrebe izvedbe RRN so bila vgrajena tri 6-pramenska referenčna sidra tipa RCP/D, ki so bila s preiskavo sidra preskušena do porušitve. Ugotovitve opravljenih preiskav sider so naslednje:

- Preiskava sidra **SBz-23** z veznim delom $l_v = 7$ m in prostim delom $l_{fr} = 28$ m se je izvajala v desetih stopnjah (predvidena preskusna sila $P_{pv} = 1254$ kN). Že od prve stopnje sile (P_1) naprej so bili opazni večji prirastki izvlečkov (s tem pa tudi mere lezenja k) enega pramena (označenega kot #4), kar je razvidno tudi iz krivulj na **sliki B.1a**. Ne glede na to smo lahko opazovanje v fazah P_1 do P_3 zaključili v minimalnem opazovalnem času, medtem ko smo morali v fazi P_4 opazovanje podaljšati za en interval na 20 minut (v nadaljevanju: 20'). Po vnosu sile $P_4 = 702$ kN so izvlečki vseh pramen začeli močno naraščati, tako da so bile v intervalu 1'-2' dosežene mere lezenja k od 2,76 do 4,32 mm (povprečje vseh šestih pramen kabla sidra $k_{1-6} = 3,29$ mm). Nato je sidro s pokom hipno popustilo, sila v sidru pa je padla na 160 kN. Efektivne proste dolžine pramen $l_f(R_a)$ so bile znotraj predvidenega območja tako po *SIA 267/I* kot tudi po *EN 1537* (izjema je bil pramen #4, katerega $l_f(R_a)$ je bila prekratka). Glede na hipno porušitev s pokom ocenjujemo, da je prišlo do porušitve v cementni injekcijski masi, ni pa mogoče z gotovostjo opredeliti, ali je popustila injekcijska masa na notranjem stiku – v notranjosti rebraste polietilenske (PE) cevi ali pa na zunanem stiku sidra – izven rebraste PE cevi.
- Preiskava sidra **SBz-26** z veznim delom $l_v = 7$ m in prostim delom $l_{fr} = 28$ m se je izvajala v osmih stopnjah do preskusne sile $P_{pv} = 1254$ kN. Razen pri P_1 in P_3 smo morali minimalni opazovalni čas t_{min} na ostalih stopnjah sile podaljševati. Na vsaki stopnji sile je bilo opaziti nekoliko večje lezenja enega pramena sidra, vendar so se med izvedbo PS taka pramena menjavala. Pri sili $P_4 = 702$ kN smo v 25' sicer zaznali *občuten zdrs* (s tem pojmom v nadaljevanju opisujemo povečane izvlečke v posameznem časovnem intervalu) pramena #2 ($k > 3$ mm), vendar so se v nadaljevanju PS mere lezenja k tega pramena umirile. Podobno je pri sili $P_6 = 978$ kN zdrsnil pramen #3, a tudi k tega pramena so se v nadaljevanju PS umirile. Ker posledic zdrsov pramen #2 na stopnji sile P_4 in #3 na stopnji sile P_6 ni opaziti na diagramih (**slika B.1b**), povečane vrednosti najverjetneje ne izhajajo iz popuščanja veznega dela sidra. Na ravni preskusne sile P_{pv} je prišlo do prekoračenja kritične mere lezenja $k_{krit} = 2$ mm pri vseh pramenih kabla sidra, pri zadnjem odčitku v 60' je bila iz vrednotena povprečna mera lezenja $k_{1-6} = 2,87$ mm, iz česar sklepamo, da je pri tem sidru verjetno prišlo do izvlačanja kabla sidra (snopa pramen) iz rebraste PE cevi, čeprav ni možno povsem izključiti niti porušitve po zunanem stiku sidra.
- Preiskava sidra **SBz-59** z veznim delom $l_v = 7$ m in prostim delom $l_{fr} = 28$ m se je izvajala v osmih stopnjah (predvidena preskusna sila $P_{pv} = 1254$ kN). Po vnosu sile na stopnji sile P_1 smo izmerili večji prirast izvlečkov pramen #4 in #5, kar smo pripisali oprijemu čeljusti mononapenjalk na žice teh dveh pramen, medtem ko so bili v ostalih časovnih intervalih mere lezenja primerljive z ostalimi prameni sidra. Do prirasta izvlečkov pramen #4, #5 in #6 je prišlo tudi po vnosu sile

$P_2 = 426$ kN. Po drugi strani so bili po vnosu sile P_2 odčitki izvlečkov pramena #2 do 2' nespremenjeni, kar je nenavadno in je najverjetneje posledica delovanja (zatikanja) merilne urice pramena, so pa posledice te anomalije razvidne iz **slike B.1c**. Na stopnji sile P_3 smo opazili stalno povečevanje prirastkov izvlečkov pramena #1, zaradi katerih je bila na koncu opazovanja v 30' pri tem pramenu dosežen $k = 2,91$ mm. Na stopnji sile P_4 se je pramenu #1 pridružil še pramen #2, pri čemer je bilo lezenje teh dveh pramen bistveno večje od lezenja ostalih pramen sidra, tako sta bili pri zadnjem odčitku v 60' izrednoteni meri lezenja 12,17 mm (#1) in 5,82 mm (#2), medtem ko je bila mera lezenja ostalih pramen v zadnjem intervalu manjša od 0,8 mm. Na podlagi teh dejstev smo zaključili, da je pri tem sidru prišlo do izvlačanja pramen #1 in #2 iz injekcijske mase v notranjosti rebraste PE cevi veznega dela sidra.



Slika B.1: Efektivne proste dolžine l_f in trajni izvlečki Δs_{bl} pramen sider tipa RCP/D testnega polja.

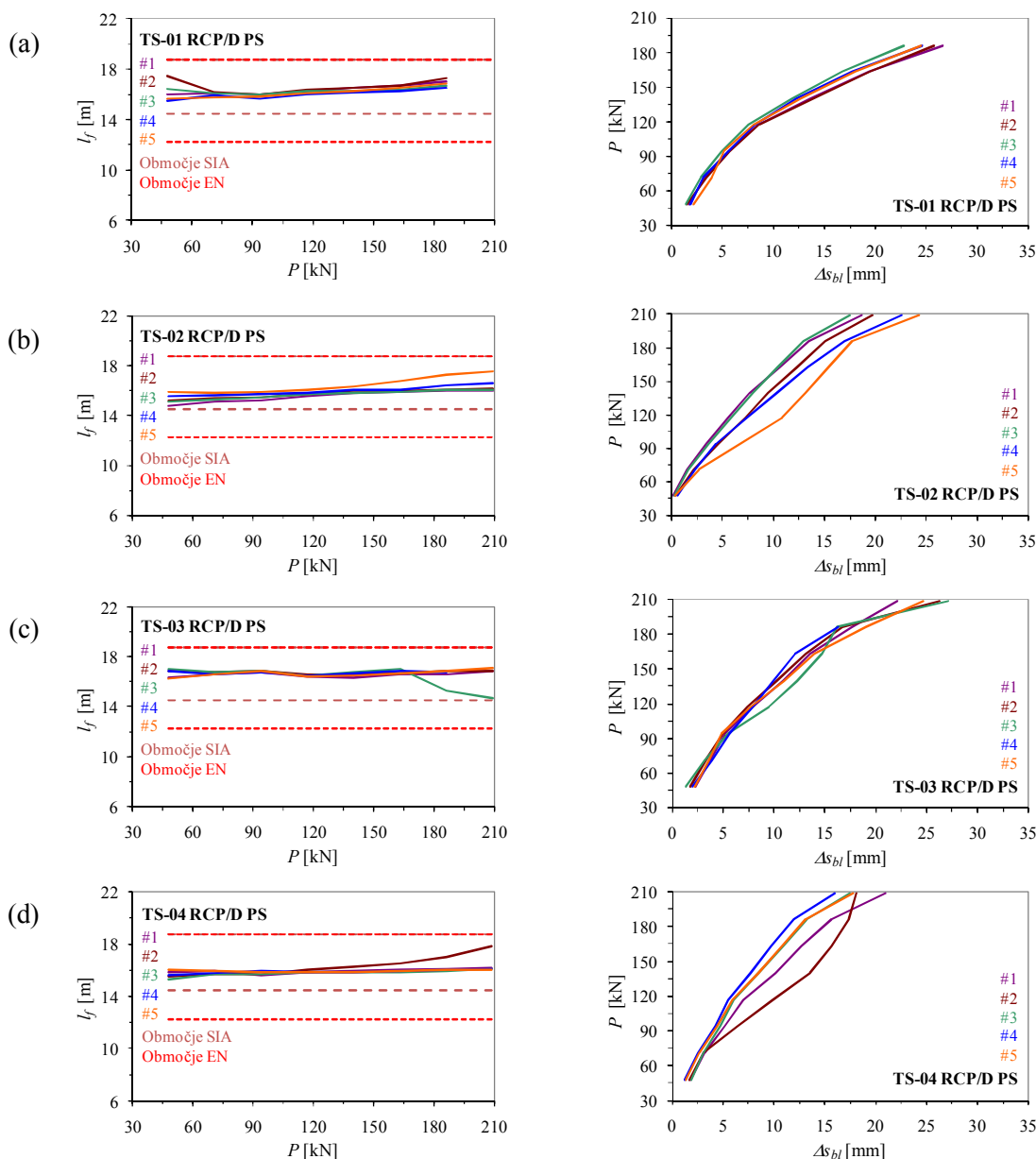
Figure B.1: Apparent free lengths l_f and permanent displacements Δs_{bl} of strands for the testing field anchors of type RCP/D.

Za potrebe določitve odpornosti sider in potrditve tehnologije vgradnje sider RCP/D v sklopu gradnje opornega zidu OZ-05 je bilo izvedenih sedem PS do porušitve, pri čemer so bila sidra TS-01 do TS-04 5-pramenska, sidra TS-05 do TS-07 pa 6-pramenska:

- Preiskava sidra **TS-01** z veznim delom $l_v = 7$ m in prostim delom $l_{fr} = 15$ m se je izvajala v osmih stopnjah do preskusne sile $P_{pv} = 1045$ kN. Že na stopnji sile P_1 je med 2' in 5' prišlo do opaznega zdrsa pramena #2, ki se na **sliki B.2a** odraža v obliki povečane l_f . Glede na to, da je bilo

obnašanje tega pramena v nadaljevanju PS podobno obnašanju ostalih pramen, tega zdrsa ne povežemo z odpornostjo veznega dela sidra, pač pa z delovanjem merilne urice oz. oprijemom čeljusti mononapenjalke pramena #2. Do zdrsa sidra kot celote je prišlo med 1' in 2' pri sili $P_5 = 700$ kN, ko so bile dosežene mere lezenja k pramen med 2,13 in 2,33 mm, vendar se so v nadaljevanju mere lezenja k umirile. Podobno se je zgodilo na naslednji stopnji sile $P_6 = 815$ kN, vendar je bila vrednost $k_{krit} = 2$ mm na tej ravni sile pri vseh pramenih presežena še v intervalih 10'-15' in 20'-25'. Na naslednji stopnji sile $P_7 = 930$ kN je sidro popustilo, v vseh pramenih so bili največji doseženi k med 2,93 in 5,34 mm. Glede na celotno sliko obnašanja sidra predvidevamo, da je pri tem sidru prišlo bodisi do izvlačanja kabla sidra (snopa pramen) iz rebraste PE cevi bodisi do porušitve po zunanjem stiku sidra.

- Tudi preiskava sidra **TS-02** z veznim delom $l_v = 7$ m in prostim delom $l_{fr} = 15$ m se je izvajala v osmih stopnjah do preskusne sile $P_{pv} = 1045$ kN. Pri izvedbi PS je bilo opaziti nekoliko večje prirastke izvlečkov pramena #2. Na stopnji sile $P_3 = 470$ kN je zdrsnil pramen #5, pri katerem je bila v intervalu 15'-25' presežena $k_{krit} = 2$ mm, kar se je na podoben način ponovilo tudi pri sili $P_4 = 585$ kN (interval 5'-15'), $P_6 = 815$ kN (interval 15'-30') in $P_7 = 930$ kN (interval 10'-30'). Na zadnji stopnji sile $P_{pv} = 1045$ kN so popustili vezni deli vseh pramena sidra, pri čemer so bili v intervalu 55'-60' doseženi k med 2,12 in 2,65 mm, edino pri pramenu #5 je bil dosežen $k = 5,29$ mm. Verjetno je pri tem sidru prišlo do izvlačanja kabla sidra iz injekcijske mase v notranjosti rebraste PE cevi, pri čemer je bilo izvlačanje pramena #5 nekoliko intenzivnejše od izvlačanja ostalih pramen.
- Tudi preiskava sidra **TS-03** z veznim delom $l_v = 7$ m in prostim delom $l_{fr} = 15$ m se je izvajala v osmih stopnjah do preskusne sile $P_{pv} = 1045$ kN. Na stopnji sile $P_3 = 470$ kN sta zdrsnila pramena #1 in #3. Glede na to, da je bilo obnašanje pramena #1 v nadaljevanju PS podobno obnašanju ostalih pramen, zdrsa nismo povezovali z odpornostjo njegovega veznega dela. Povečani zdrsi pramena #3 so se nadaljevali tudi na stopnjah sile P_4 in P_5 , medtem ko so bile mere lezenja k tega pramena na stopnjah sile P_6 in P_7 manjše od mer lezenja k ostalih pramen sidra. Na zadnji stopnji sile $P_{pv} = 1045$ kN je mononapenjalka pramena #4 dosegla skrajno lego hoda, torej predpisane ravni sile nismo mogli vzdrževati (sile v tem pramenu ni bilo možno popravljati na izhodiščno raven), zato tega pramena nismo mogli več opazovati. Pri sili P_{pv} so popustila vsa pramena sidra, največje mere lezenja k med posameznima zaporednima odčitkoma so znašale med 2,58 in 6,50 mm. Ocenjujemo, da je tudi pri tem sidru prišlo do izvlačanja kabla sidra iz injekcijske mase v notranjosti rebraste PE cevi, pri čemer je bilo izvlačanje pramena #3 nekoliko intenzivnejše od izvlačanja ostalih pramen.
- Preiskava sidra **TS-04** z veznim delom $l_v = 7$ m in prostim delom $l_{fr} = 15$ m se je izvajala v osmih stopnjah do preskusne sile $P_{pv} = 1045$ kN. Na stopnji sile $P_3 = 470$ kN smo povečane prirastke izvlečkov izmerili pri pramenu #2, v naslednji fazi pa smo večje prirastke izvlečkov izmerili tudi pri pramenu #1. V nadaljevanju PS je bilo obnašanje pramena #1 podobno obnašanju ostalih pramen. Pri sili $P_5 = 700$ kN je bila v pramenu #2 v intervalu 10'-25' že presežena $k_{krit} = 2$ mm. Pri sili P_6 so se prirastki izvlečkov tega pramena zmanjšali, a so bili vseeno večji od prirastkov izvlečkov ostalih pramen. Na zadnji stopnji sile $P_{pv} = 1045$ kN so popustila vsa pramena sidra, v intervalu 55'-60' so bili dosežene mere lezenja k med 2,12 in 3,18 mm, edino pri pramenu #2 je bil dosežen $k = 8,47$ mm. Očitno je tudi pri tem sidru prišlo do izvlačanja kabla sidra iz injekcijske mase v notranjosti rebraste PE cevi, pri čemer je bilo izvlačanje pramena #5 nekoliko intenzivnejše od izvlačanja ostalih pramen.



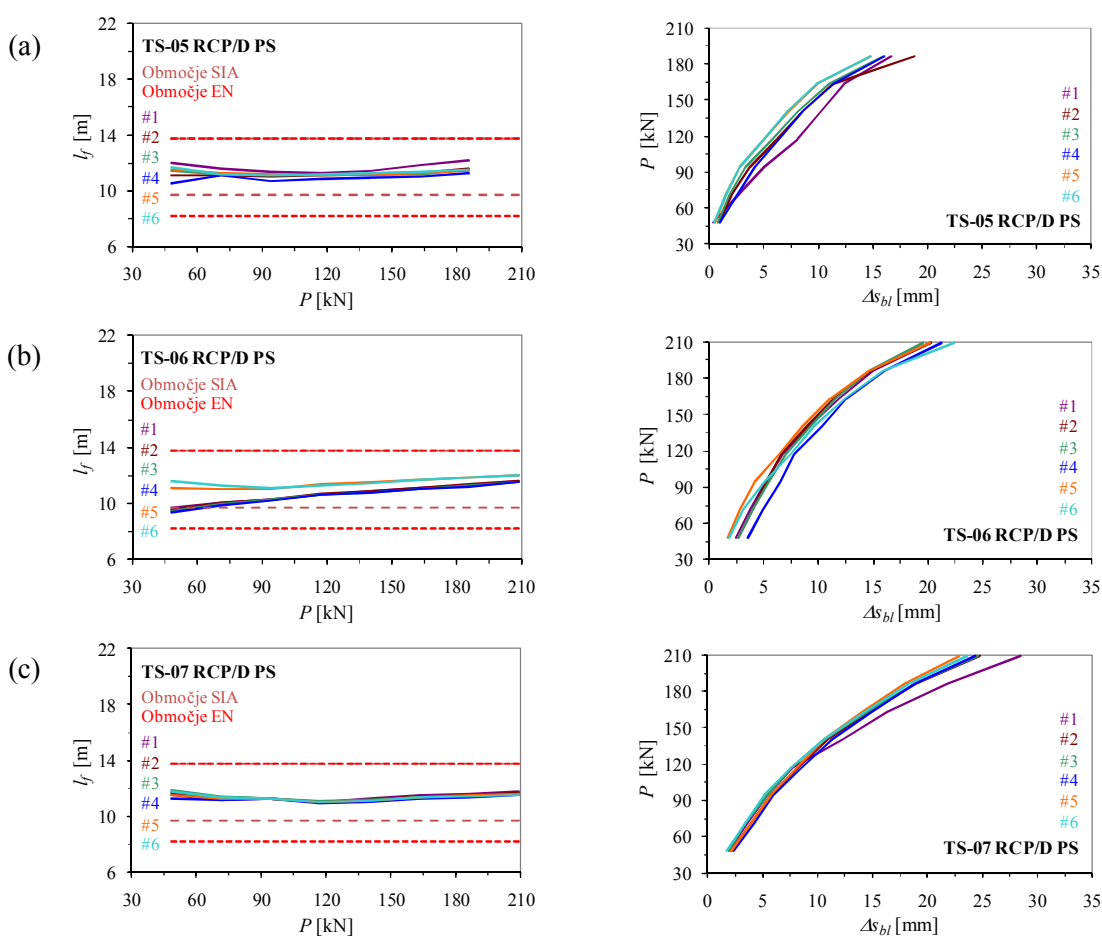
Slika B.2: Efektivne proste dolžine l_f in trajni izvlečki Δs_{bl} pramen preskusnih 5-pramenskih sider tipa RCP/D opornega zidu OZ-05.

Figure B.2: Apparent free lengths l_f and permanent displacements Δs_{bl} of strands for the RCP/D testing 5-strand anchors of retaining wall OZ-05.

- Preiskava sidra **TS-05** z veznim delom $l_v = 7$ m in prostim delom $l_{fr} = 10$ m se je izvajala v osmih stopnjah do preskusne sile $P_{pv} = 1254$ kN. Podobno kot pri prejšnjih sidrih so bili pri tem sidru na drugi stopnji sile $P_2 = 426$ kN opazni povečani prirastki izvlečkov pramena #1, ki so bili prisotni med celotno PS, kar je razvidno tudi iz [slike B.3](#). Na stopnji sile $P_6 = 978$ kN je bil v intervalu 1'-2' dosežen $k = 2,13$ mm, a so se prirastki izvlečkov v nadaljevanju te stopnje umirili. Na zadnji stopnji sile $P_{pv} = 1254$ kN je v vseh pramenih sidra (razen pri pramenu #5) prišlo do prekoračenja k_{krit} , pri čemer so bili v pramenih v različnih časovnih intervalih dosežene največje mere lezenja med 2,19 in 4,09 mm. Čeprav so se tudi pri tem sidru kazali znaki popuščanja pramena #1 na stiku z injekcijsko maso v notranjosti rebraste PE cevi, je bilo to popuščanje manj izrazito kot pri

5-pramenskih preskusnih sidrih, na zadnji stopnji sile pa je verjetno prišlo do izvlečenja kabla sidra iz injekcijske mase v notranjosti rebraste PE cevi.

- Preiskava sidra **TS-06** z veznim delom $l_v = 7$ m in prostim delom $l_{fr} = 10$ m se je izvajala v osmih stopnjah do sile $P_{pv} = 1254$ kN. Mere lezenja k pramen #5 in #6 so bile sicer med celotno PS malenkost večje kot pri ostalih pramenih, vendar so bile razlike manjše, kot bi lahko skleпали iz diagrama efektivnih prostih dolžin na [sliki B.3b](#). Vezni del sidra je izkazoval visoko odpornost vse do zadnje faze PS, ko so v 15' hkrati popustila vsa pramena sidra, kritična mera lezenja pa je bila prekoračena praktično pri vseh odčitkih med 15' in 60'. Na zadnji stopnji sile $P_{pv} = 1254$ kN so bili v intervalu 55'-60' doseženi k med 2,12 in 2,91 mm. Ocenjujemo, da je pri tem sidru prišlo bodisi do izvlečenja kabla sidra iz rebraste PE cevi bodisi do porušitve po zunanjem stiku sidra.



Slika B.3: Efektivne proste dolžine l_f in trajni izvlečki Δs_{bl} pramen preskusnih 6-pramenskih sider tipa RCP/D opornega zidu OZ-05.

Figure B.3: Apparent free lengths l_f and permanent displacements Δs_{bl} of strands for the RCP/D testing 6-strand anchors of retaining wall OZ-05.

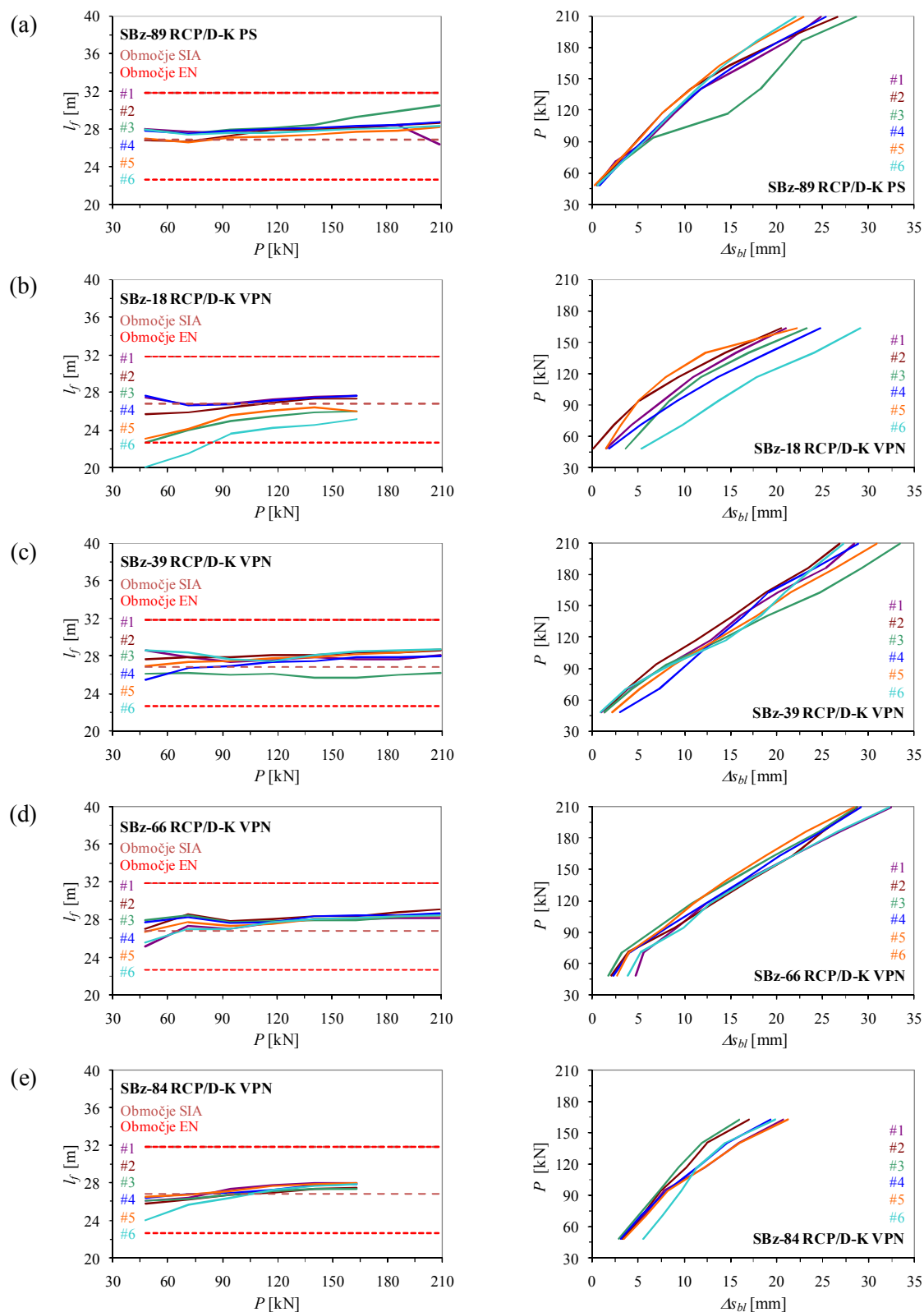
- Tudi preiskava sidra **TS-07** z veznim delom $l_v = 7$ m in prostim delom $l_{fr} = 10$ m se je izvajala v osmih stopnjah do sile $P_{pv} = 1254$ kN. Po vnosu sile $P_5 = 840$ kN je prišlo do zdrsa pramena #1, v intervalu 2'-5' je k dosegel vrednost 4,47 mm, vendar se je nato na isti stopnji sile umiril na vrednost pod 1 mm, na šesti stopnji sile pa je bilo njegovo obnašanje podobno obnašanju ostalih pramen sidra. Povečani prirastek izvlečka pramena #1 smo opazili tudi pri sili $P_7 = 1116$ kN v

intervalu 5'-10' ($k = 2,66$ mm), a se je tudi v tem primeru v nadaljevanju opazovanja umiril na vrednost pod 1 mm. Na zadnji stopnji sile $P_{pv} = 1254$ kN je v vseh pramenih sidra prišlo do preko-račenja k_{krit} , pri čemer so bili v pramenih v različnih časovnih intervalih dosežene največje mere lezenja med 2,62 in 3,88 mm. Čeprav so se tudi pri tem sidru kazali znaki popuščanja pramena #1 na stiku z injekcijsko maso v notranjosti rebraste PE cevi, je bilo to popuščanje manj izrazito kot pri 5-pramenskih preskusnih sidrih, na zadnji stopnji sile pa je verjetno prišlo do izvlečenja kabla sidra iz injekcijske mase v notranjosti rebraste PE cevi.

B.1.2 Sidra RCP/D-K

V testno polje objekta OZ-05 je bilo vgrajenih pet modificiranih 6-pramenskih sider RCP/D-K, ki so po zasnovi najbližje referenčnim sidrom RCP/D, le da je bila z dodatnimi šestimi jeklenimi žicami $\varnothing 5$ mm, vloženi v prazne prostore med pramena veznega dela sidra, povečana osna togost njihovega veznega dela. Na enem od sider tega tipa smo izvedli PS do porušitve, na preostalih štirih pa VPN do prvih znakov popuščanja. Rezultati opravljenih preskušanj, na sidrih RCP/D-K z veznim delom $l_v = 7$ m in prostim delom $l_{fr} = 28$ m, v osmih stopnjah na predvideno preskusno silo $P_{pv} = 1254$ kN, so naslednji:

- Pri preiskavi sidra **SBz-89** so bili prirastki izvlečkov pramena #5 v prvih treh fazah PS sicer nekoliko večji od prirastkov izvlečkov ostalih pramen, vendar pa tega na [sliki B.4a](#) ni opaziti. Po vnosu sile $P_4 = 978$ kN so izvlečki pramena #3 začeli močno naraščati, v intervalu 5'-10' je bil dosežen največji $k = 4,95$ mm, kar kaže na popustitev pramena v veznem delu, saj je od tu naprej v diagramih na [sliki B.4a](#) opazno povečanje tako efektivne proste dolžine l_f kot tudi trajnega izvlečka Δs_{pl} . V naslednji fazi so k tega pramena precej nižji in manjši od k_{krit} . Na stopnji sile $P_6 = 978$ kN k pramena #3 spet začnejo naraščati ($k = 4,54$ mm), isto velja tudi za stopnjo sile $P_7 = 1116$ kN ($k = 3,20$ mm). Na ravni preskusne sile $P_{pv} = 1254$ kN je bil v pramenu #3 spet dosežen $k = 4,96$ mm, od ostalih pramen pa je bil k_{krit} v posameznih časovnih intervalih presežen le še pri pramenu #1. Nikoli med izvedbo PS povprečna vrednost k_{1-6} vseh pramen sidra ni presegla k_{krit} , torej pri tem sidru porušitev kabla sidra kot celote še ni bila dosežena. Ne glede na to smo ocenili, da je odpornost sidra na izvelek R_a zaradi visokih k v posameznih pramenih in neugodnega trenda razvoja k kar enaka preskusni sili P_{pv} .
- Pri večstopenjskem preskusu nosilnosti sidra **SBz-18** smo takoj po vnosu sile P_1 izmerili večji prirastek izvlečka pramen #3 in #6, kar smo v pretežni meri pripisali ravnanju pramen v območju pod glavo sidra, medtem ko so bili k v ostalih časovnih intervalih primerljivi s k ostalih pramen sidra. V manjši meri je bil pri pramenu #6 isti pojav opazen tudi po vnosu sile P_2 , kot tudi po vnosu sile $P_3 = 564$ kN (v intervalu 1'-2' je bila pri pramenu #6 celo nekoliko presežena k_{krit} , vendar pa so se vrednosti k v nadaljevanju te stopnje umirile), kar je razvidno tudi iz [slike B.4b](#). Na stopnji sile $P_5 = 840$ kN so k že nekoliko porastli, v intervalu 15'-25' je bila pri pramenu #2 nekoliko presežena k_{krit} . Takoj po vnosu sile $P_6 = 978$ kN so k pri štirih pramenih presegli k_{krit} (vrednosti od 2,29 do 2,56 mm). Z nadaljevanjem opazovanja so prirastki lezenja pri vseh pramenih sicer upadli, vendar pa smo VPN v 10' prekinili, saj so vrednosti vseh k spet porastle, v pramenu #3 pa je bil dosežen $k = 2,13$ mm.
- Tudi pri večstopenjskem preskusu nosilnosti sidra **SBz-39** smo takoj po vnosu sile P_1 izmerili večji prirastek izvlečka pramena #4, nekoliko manj pa tudi pramena #3. Z opazovanjem pri sili P_1 so se prirastki izvlečkov pramena #4 umirili (velik začetni prirast smo delno pripisali ravnanju pramen v območju pod glavo sidra, delno pa oprijemu čeljusti mononapenjalke), medtem ko so se mere lezenja pramena #3 povečevale, v intervalu 10'-15' je bila že pri P_1 dosežena $k = 2,22$ mm, vendar se je k v naslednjem intervalu znižal pod k_{krit} .



Slika B.4: Efektivne proste dolžine l_f in trajni izvlečki Δs_{bl} pramen sider tipa RCP/D-K testnega polja.
 Figure B.4: Apparent free lengths l_f and permanent displacements Δs_{bl} of strands for the testing field anchors of type RCP/D-K.

V nadaljevanju VPN je bil vedno takoj po vnosu sile stopnje presežen k_{krit} , vendar se je mera lezenja z opazovanjem sprva zniževala, nato pa je spet prestopila k_{krit} . Mere lezenja ostalih pramen so bile na stopnjah sile P_1 do P_7 relativno nizke. Po vnosu sile $P_{pv} = 1254$ kN so k počasi naraščali, v intervalu 10'-15' pa je bila nato pri štirih pramenih prekoračena k_{krit} (vrednosti od 2,22 do 3,07 mm), zato smo VPN takoj prekinili.

- Pri večstopenjskem preskusu nosilnosti sidra **SBz-66** so bili na stopnjah sile P_1 do P_4 nekoliko večji izvlečki pramen sidra #6, podobno velja tudi za pramen #2 na stopnjah sile P_2 in P_5 . Mere lezenja k pramena #2 so bile na ravneh sil P_2 in P_3 opazno večje od k ostalih pramen sidra. Po vnosu sile $P_6 = 978$ kN se je pri prvih dveh odčitkih zataknila urica pramena #6, nadaljnje opazovanje prirastkov izvlečkov tega pramena je pokazalo podobno obnašanje kot pri ostalih pramenih sidra. Po vnosu sile $P_{pv} = 1254$ kN smo v intervalu 1'-2' izvednotili povečan k pramena #2, nato pa so se prirastki izvlečkov tega pramena umirili. V intervalu 25'-30' je hipno narasla mera lezenja pramena #6 ($k = 6,44$ mm), k_{krit} pa sta presešla tudi mera lezenja pramena #2, kot tudi povprečna mera lezenja sidra k_{1-6} , zato smo VPN nemudoma prekinili.
- Na stopnjah sile P_1 in P_2 VPN sidra **SBz-84** sta bili v primerjavi z ostalimi prameni sidra izmerjeni manjši vrednosti trajnega izvlečka Δs_{bl} pramena #6, kar je vplivalo tudi na krajši efektivni prosti dolžini l_f . Glede na to, da so bile v nadaljevanju VPN vrednosti Δs_{bl} pramena #6 podobne vrednostim Δs_{bl} ostalih pramen sidra, manjši vrednosti Δs_{bl} pripisujemo legi tega pramena v območju pod glavo sidra. Na ravni sile $P_3 = 564$ kN so po 20' opazno naraščali prirastki izvlečkov pramena #1, tako da je bil dvakrat nekoliko presežen k_{krit} . Podobno obnašanje pramena #1 smo opazili tudi po vnosu sile $P_4 = 702$ kN, pri čemer je bil enako presežen k_{krit} tudi pri pramenu #5, kar je razvidno iz povečanja Δs_{bl} na [sliki B.4e](#). V nadaljevanju VPN so se k pramen #1 in #5 umirili. Po vnosu sile $P_6 = 978$ kN so k počasi naraščali, pri čemer je bila v intervalu 25'-30' pri treh pramenih prekoračena k_{krit} (vrednosti od 2,40 do 3,41 mm), zato smo VPN takoj prekinili. Glede na podobno obnašanje vseh pramen sidra predvidevamo, da je vezni del sidra popustil kot celota, domnevno po notranjem stiku sidra.

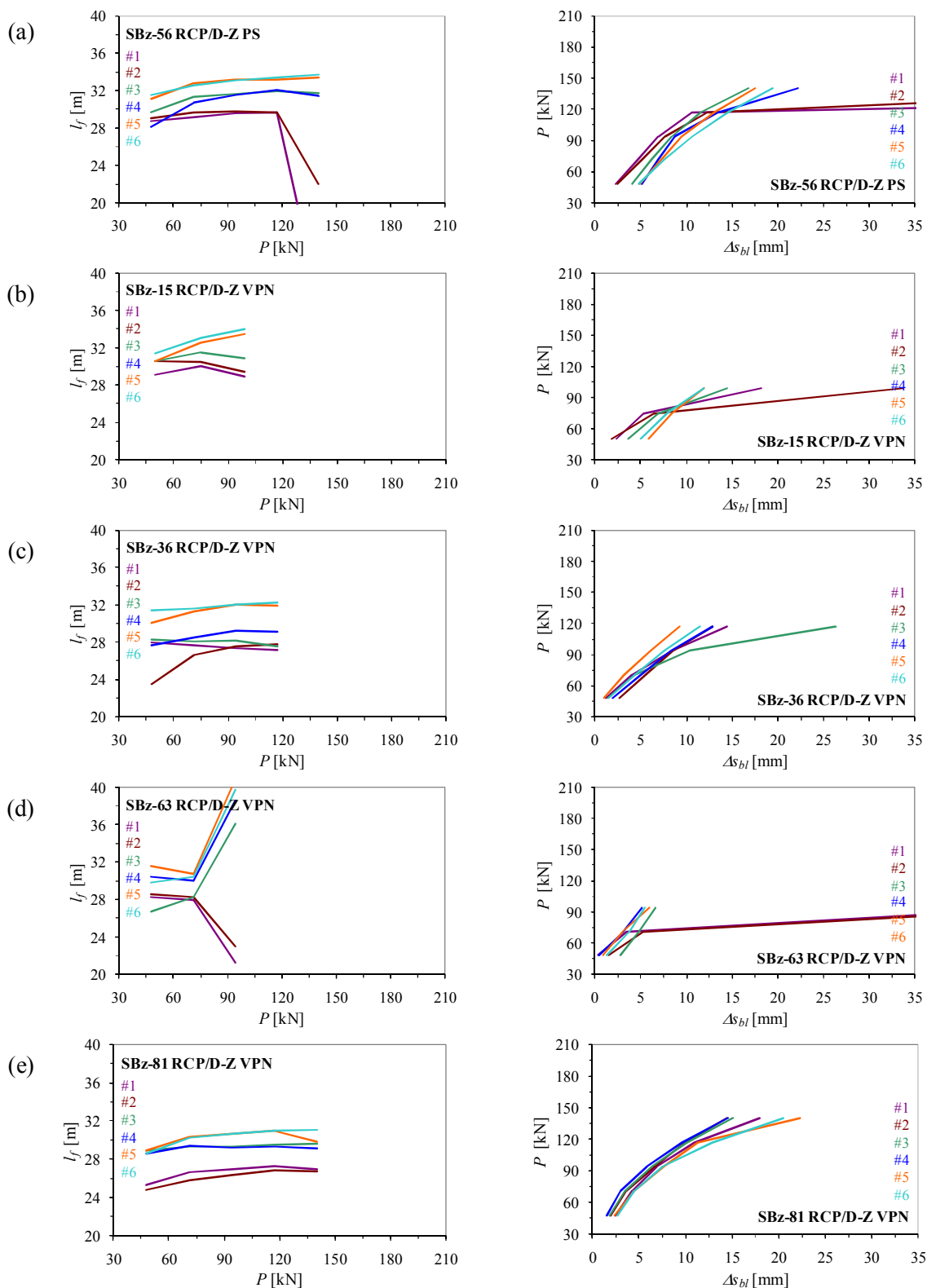
B.1.3 Sidra RCP/D-Z

V testno polje je bilo vgrajenih pet modificiranih 6-pramenskih sider RCP/D-Z, ki po konceptu oblikovanja veznega dela temeljijo na patentu Barleya (glej [poglavje 3.3.3](#)), pri katerem se v isti vrtini nahaja več posameznih podsider z zamaknjenimi veznimi deli. V našem primeru smo sidra oblikovali tako, da so vezni deli pramen vseh podsider zamaknjeni na podoben način, le da se pri sidrih RCP/D-Z vsa podsidera nahajajo v skupnem PE ovoju. Kabel sider smo razdelili na tri podsidera s po dvema pramenoma. Dolžina golih pramen v veznem delu vseh podsider je znašala $l_v = 2,2$ m, medtem ko so dolžine prostih delov podsider l_{fr} znašale 28 m (podsidero A), 30,4 m (podsidero B) oz. 32,8 m (podsidero C). V diagrame na [sliki B.5](#) dovoljenih območij efektivnih prostih dolžin, kot jih določata *SIA 267/1* in *EN 1537*, zaradi preglednosti nismo vrisovali, saj ima vsako podsidero svoji meji dovoljenega območja. Enako kot pri modificiranem tipu RCP/D-K smo na enem od sider tega tipa izvedli PS do porušitve, na preostalih štirih pa VPN do prvih znakov popuščanja veznih delov sider. Izvedena preskušanja v osmih stopnjah na predvideno preskusno silo $P_{pv} = 1254$ kN so pokazala naslednje:

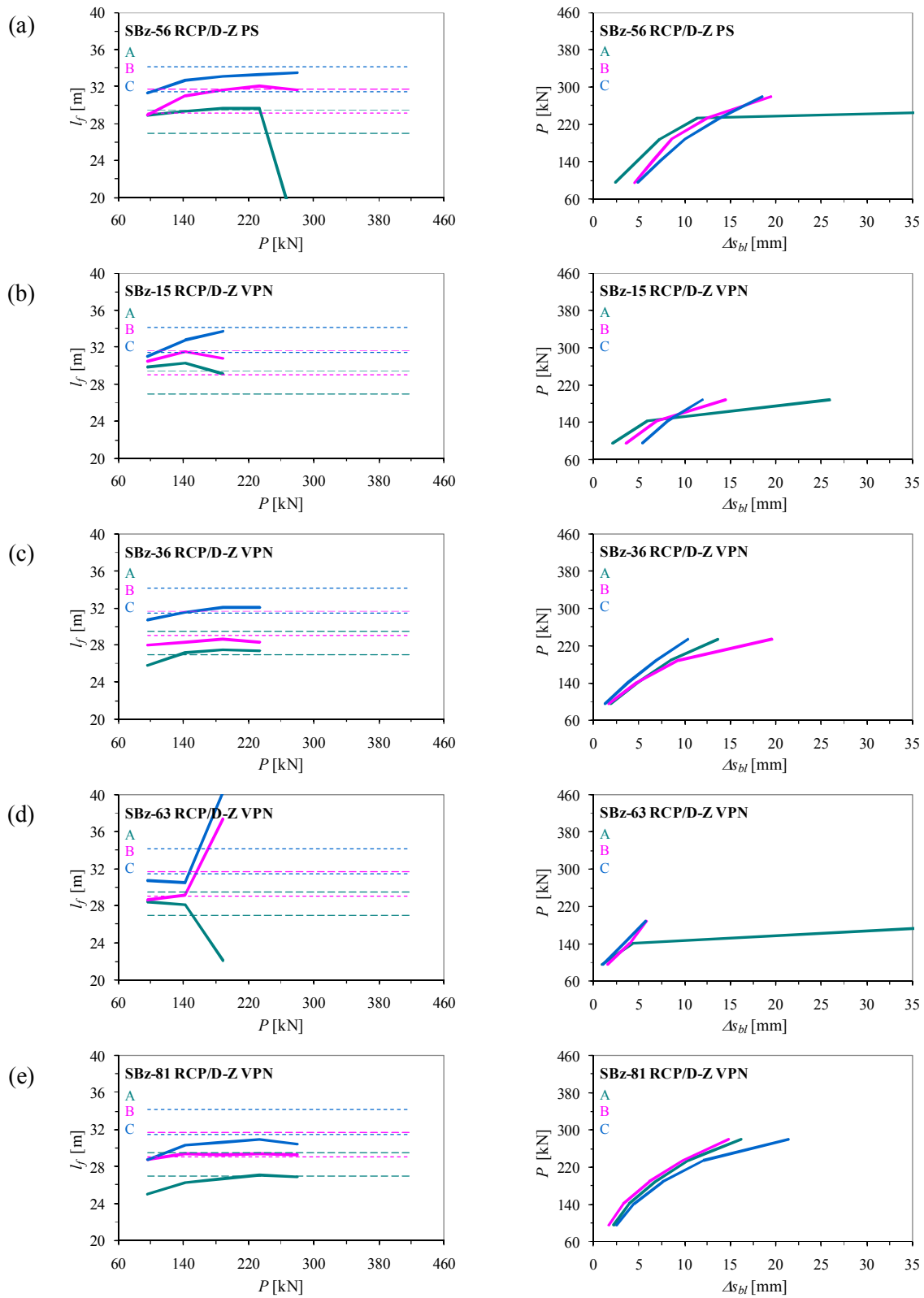
- Pri preiskavi sidra **SBz-56** se prirastki izvlečkov pramen sidra niso umirili tako hitro kot pri sidrih tipov RCP/D in RCP/D-K. Mere lezenja k v prvem intervalu 1'-2' so bili na stopnji sile P_1 nekoliko večje pri pramenih #5 in #6, na stopnji sile P_2 in P_3 pa pri pramenih #2 in #5. Tudi sicer so bili na ravneh sil P_2 in P_3 k pramen #2 in #5 nekoliko večji kot pri ostalih pramenih tega sidra. Po vnosu sile $P_4 = 702$ kN je bila v intervalu 15'-20' prekoračena kritična mera lezenja k_{krit} pramen #4 in #5,

v naslednjem intervalu 20'-25' pa tudi pri pramenih #1 in #3, vendar pa so do zadnjega odčitka na tej stopnji pri 40' vrednosti k (z izjemo pramena #4) močno upadle. Po vnosu sile $P_5 = 840$ kN so zelo intenzivno naraščali izvlečki pramen #1 in #2 podsidra A, tako da sta bila v intervalu 1'-2' že dosežena k 16,51 in 8,60 mm, ki sta v intervalu 5'-10' nato dosegla vrednosti kar 83,41 in 47,47 mm. V diagramih efektivnih prostih dolžin l_f na [sliki B.5a](#) so jasno razvidni pari pramen, ki sestavljajo posamezna podsidra. Iz obeh diagramov te slike je razvidno, da sta bila na stopnji sile P_5 dejansko izvlečena pramena #1 in #2 podsidra A.

- Pri večstopenjskem preskusu nosilnosti sidra **SBz-15** smo lahko napenjali le pet pramen sidra, saj je bil en pramen prekratek za namestitev mononapenjalke, zato smo začetno silo P_a znižali na 125 kN, preskusno silo pa na 1116 kN. Na stopnji sile P_1 so bili nekoliko večji k pramena #5, ki pa na stopnji sile P_2 niso bili več večji od k ostalih pramen. So pa zato na ravni sile P_2 izraziteje naraščali k pramena #2. Po vnosu sile $P_3 = 497$ kN so se prirastki izvlečkov pramena #2 zelo intenzivno povečevali; na intervalu 2'-5' je bil dosežen $k = 24,6$ mm, v istem intervalu pa je bil pri pramenu #1 izrednoten $k = 7,92$ mm, zato je bil VPN takoj prekinjen. Iz diagrama Δs_{bl} na [sliki B.5b](#) je opazen zdrs pramena #2 podsidra A, ki pa še ni bil fizično izvlečen.
- Na stopnjah sile P_1 do P_3 večstopenjskega preskusa nosilnosti sidra **SBz-36** smo takoj po vnosu sile izmerili večji prirast izvlečka pramena #2, katerega k so se z nadaljevanjem opazovanja na vsaki stopnji sile umirili. V tem pramenu se je pojavljala neka oblika "parazitnega trenja", ki je bila opazna v obliki manjših izmerjenih izvlečkov in je bila prisotna tudi pri razbremenitvi na začetno silo P_a , kar se odraža v krajših efektivnih prostih dolžinah l_f ([slika B.5c](#) levo). Takoj po vnosu sile $P_4 = 702$ kN so začeli močno naraščati prirastki izvlečkov pramena #3, ki so se vedno bolj povečevali, tako da je bil v intervalu 5'-10' dosežen že $k = 10,7$ mm, tako da je v tem intervalu povprečna mera lezenja sidra preseгла vrednost k_{krit} , zato smo VPN nemudoma prekinili. Iz diagrama Δs_{bl} na [sliki B.5c](#) je opazen zdrs pramena #3 podsidra B, ki pa še ni bil fizično izvlečen.
- Pri večstopenjskem preskusu nosilnosti sidra **SBz-63** smo na stopnjah sile P_1 in P_2 takoj po vnosu sile izmerili večji prirast izvlečka pramen #2, pri čemer so bile tudi v nadaljevanju opazovanja tega pramena vrednosti k višje kot pri ostalih pramenih. Na ravni P_2 so se povečani k izkazovali tudi pri pramenu #1, na podlagi katerih je bilo slutiti popuščanje podsidra A. Takoj po vnosu sile $P_3 = 564$ kN so izvlečki obeh pramen podsidra A že v prvem intervalu (0'-1') izrazito narastli, istočasno pa smo zaznali upadanje tlaka v hidravličnem sistemu, kar je bil znak fizičnega izvlečenja pramen, zaradi česar smo VPN takoj prekinili (torej še pred intervalom 1'-2', kjer je možno prvič izrednotiti k). Diagrama na [sliki B.5d](#) potrjujeta, da sta bila pramena #1 in #2 podsidra A dejansko izvlečena. V preostalih pramenih smo na podlagi zadnje odčitane vrednosti sile P_3 v 1' približno izrednotili l_f , vendar je bil upad sile tako hiter, da izvlečkov posameznih pramenih fizično nismo mogli tako hitro odčitati in zapisati, zato so izrednotene vrednosti l_f celo višje od skupne dolžine pramena ($l_{fr}+l_v$), kar fizikalno gledano ni smiselno.
- Na stopnjah sile P_1 do P_3 večstopenjskega preskusa nosilnosti sidra **SBz-81** smo takoj po vnosu sile v sidro izmerili nekoliko povečane vrednosti izvlečkov pramen #5 in #6, vendar pa so bili k v nadaljevanju opazovanja tega pramena podobni kot pri ostalih pramenih. Takoj po vnosu sile $P_4 = 702$ kN smo pri pramenu #6 izrednotili $k = 2,49$ mm, pri čemer so se k v nadaljevanju sprva umirili, a so nato še na isti stopnji spet prekoračili k_{krit} . Neposredno po vnosu sile $P_5 = 840$ kN so k obeh pramen podsidra C hitro naraščali in so na intervalu 2'-5' dosegli vrednosti 3,14 in 2,53 mm. Ker smo v istem intervalu tudi na pramenu #1 izrednotili $k = 3,47$ mm, smo VPN takoj prekinili. Na [sliki B.5e](#) so opazni prvi znaki izvlečenja pramena #5 kot tudi popuščanja pramen #6 in #1.



Slika B.5: Efektivne proste dolžine l_f in trajni izvlečki Δs_{bl} pramen sider tipa RCP/D-Z testnega polja.
Figure B.5: Apparent free lengths l_f and permanent displacements Δs_{bl} of strands for the testing field anchors of type RCP/D-Z.



Slika B.6: Efektivne proste dolžine l_f in trajni izvlečki Δs_{b1} podsider sider tipa RCP/D-Z testnega polja.
Figure B.6: Apparent free lengths l_f and permanent displacements Δs_{b1} of anchor units for the testing field anchors of type RCP/D-Z.

Pri tipih sider s po dvema pramenoma združenima v podsidro, lahko izračunane vrednosti efektivnih prostih dolžin l_f in trajnih izvlečkov Δs_{bl} prikažemo tudi po podsidrih (slika B.6), pri čemer smo v diagrame črtkano vrisali tudi obe meji dovoljenega območja l_f vsakega podsidra, izvednoteni po standardu *SIA 267/1*. V vseh primerih podsidri A sestavljata pramena z najkrajšim prostim delom $l_f = 28$ m, medtem ko podsidro C sestavljata pramena z najdaljšim delom $l_f = 32,8$ m. Podatki za konkretne primere sider RCP/D-Z so informativne narave, saj je bil pri PS in VPN prevladujoč mehanizem porušitve v obliki izvlačanja posameznih pramen iz injekcijske mase v notranjosti PE cevi. Pri tem je kar v treh primerih izrazito popustil vezni del le enega pramena podsidra, zaradi česar se vrednosti zaradi povprečenja z drugim pramenom istega podsidra zameglijo. Od sider tipa RCP/D-Z sta le pri sidrih SBz-56 in SBz-63 istočasno popustila oba pramena podsidra.

B.1.4 Sidra RCP/D-I

V testno polje opornega zidu OZ-05 smo vgradili pet modificiranih 6-pramenskih sider RCP/D-I, ki so bila oblikovana na podlagi patenta Škrabla opisana v poglavju 3.3.4, ki vključujejo prednosti obeh predhodno obravnavanih sistemov modificiranih sider RCP/D-K in RCP/D-Z. Tudi kabel teh sider je razdeljen na tri podsidra s po dvema pramenoma, pri čemer pa se dolžine veznih delov podsider spreminjajo: pri podsidru A je znašala dolžina golih pramen $l_{v,A} = 7$ m, dolžina pramen prostega dela je bila $l_{fr,A} = 28$ m, pri podsidru B sta znašali dolžini $l_{v,B} = 4,6$ m in $l_{fr,B} = 30,4$ m in pri podsidru C $l_{v,C} = 2,2$ m in $l_{fr,C} = 32,8$ m. Tudi pri teh sidrih zaradi preglednosti v diagrame na sliki B.7 dovoljenih območij efektivnih prostih dolžin, kot jih določata *SIA 267/1* in *EN 1537*, nismo vrisovali, saj ima vsako podsidro svoji meji dovoljenega območja. Kot pri ostalih tipih modificiranih sider smo na enem sidru tega tipa izvedli PS do porušitve, na preostalih štirih pa VPN do prvih znakov popuščanja veznih delov sider. Preskušanja, predvidena v osmih stopnjah do preskusne sile $P_{pv} = 1254$ kN, so pokazala naslednje:

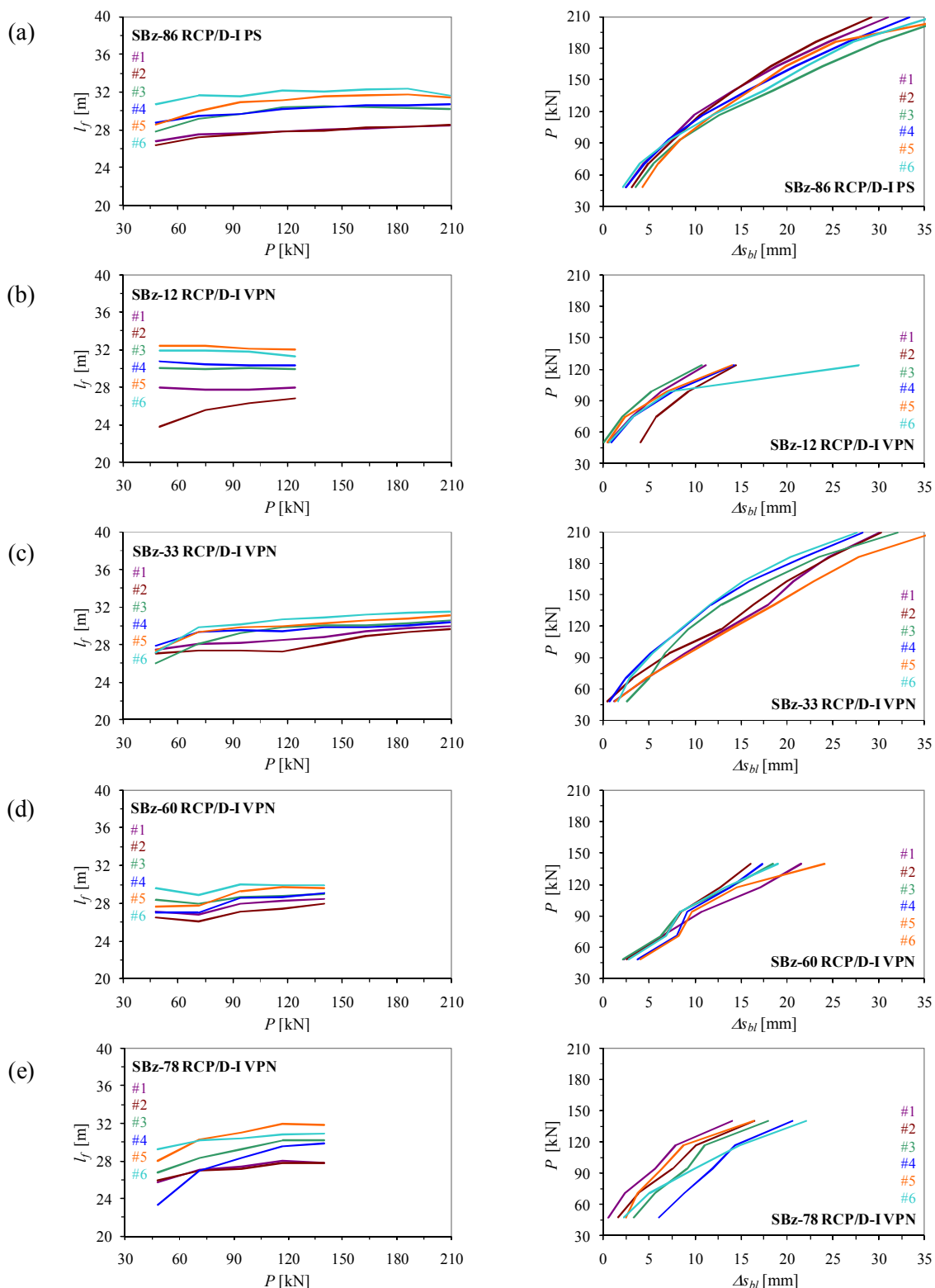
- Pri preiskavi sidra **SBz-86** smo po vnosu sile P_1 v intervalu 1'-2' zaznali nekoliko povečana k pramen #3 in #5, vendar so se vrednosti odčitkov teh pramen v nadaljevanju opazovanja približale ostalim. Po vnosu sile $P_4 = 702$ kN so izvlečki pramena #6 začeli močno naraščati, v intervalu 1'-2' je bil dosežen največji $k = 3,09$ mm, a se je mera lezenja tega pramena v nadaljevanju te stopnje umirila. So pa zato začeli naraščati izvlečki pramena #3, pri katerem je bila (od intervala 10'-15' naprej) prekoračena vrednost k_{krit} . Na naslednji stopnji sile P_5 se je preseganje k_{krit} pramena #3 nadaljevalo, a se je lezenje tega pramena v nadaljevanju PS umirilo. Na ravni sile $P_7 = 1116$ kN je bila v intervalu 10'-15' presežena k_{krit} pramena #1, a se je tudi ta v nadaljevanju umirila. Po vnosu preskusne sile $P_{pv} = 1254$ kN sta pramena #5 in #6 po začetnem zdrsu kazala vedno izrazitejše znake popuščanja (končna k sta znašala 13,97 in 12,59 mm), kar je pokazatelj porušitve veznega dela podsidra C, po 30' pa je bila k_{krit} dvakrat presežena tudi pri pramenih #1 in #3, enkrat pa pri pramenih #2 in #4.
- Pri večstopenjskem preskusu nosilnosti sidra **SBz-12** smo na stopnjah sile P_1 in P_2 zabeležili relativno visoke vrednosti k pramena #2, na ravni sile P_2 pa je bilo takšno obnašanje opazno tudi pri pramenu #3. Na stopnji sile P_2 smo zabeležili nekoliko povečane vrednosti k pramena #4, a so bile manjše od k_{krit} . V nadaljevanju VPN do vnosa preskusne sile ni bilo posebnosti, je pa takoj po vnosu sile $P_{pv} = 1254$ kN v pramenu #6 mera lezenja k presegla k_{krit} , ki se je v nadaljevanju še povečevala, tako da je v zadnjem intervalu 10'-15' dosegla vrednost 21,0 mm, kar kaže na začetek fizičnega izvlečenja tega pramena (slika B.7b). Glede na to, da je v tem intervalu tudi drugi pramen podsidra C presegel k_{krit} , smo VPN takoj prekinili.
- Obnašanje sidra **SBz-33** med večstopenjskim preskusom nosilnosti je bilo nenavadno v tem smislu, da se pari pramen podsider, kot smo jih določili na podlagi absolutnih vrednosti izvlečkov

pramen, le v prvem delu stopnje sile P_1 ujema s krivuljami mer lezenja, nato pa nič več. Diagram efektivnih prostih dolžin (levi diagram [slike B.7c](#)) potrjuje, da so pari pramen, določeni na podlagi absolutnih vrednosti izvlečkov, vseeno pravi. Sidro je izkazovalo dobro odpornost vse do zadnje faze VPN: po vnosu sile $P_{pv} = 1254$ kN so k vseh pramen začeli postopoma naraščati, pri čemer so k pramen (z izjemo pramena #4) v intervalu 15'-20' oz. 20'-25' presegli k_{krit} , zato smo VPN prekinili.

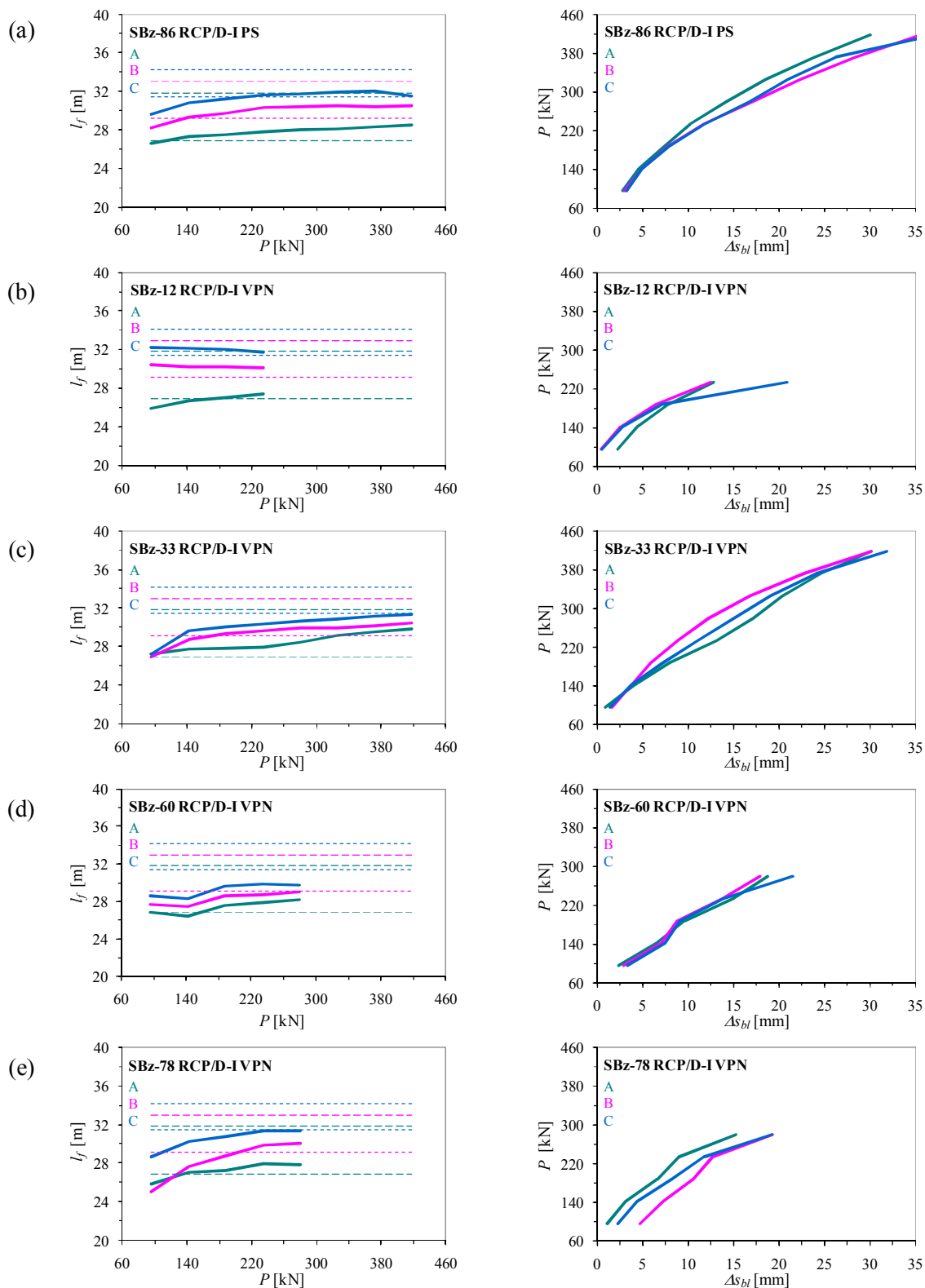
- Na stopnjah sile P_1 do P_3 večstopenjskega preskusa nosilnosti sidra **SBz-60** smo, v primerjavi z ostalimi prameni, izmerili nekoliko večje priraste izvlečkov pramena #5. Po vnosu sile $P_3 = 564$ kN so se veliki začetni izvlečki pramena #5 umirili, so pa zato hitro naraščali k pramena #1, tako da je bila že v intervalu 5'-10' presežena k_{krit} , kar se kaže tudi v povečanju vrednosti Δs_{bl} v desnem diagramu [slike B.7d](#). Podobno se je sidro obnašalo tudi na ravni sile P_4 . Po vnosu sile $P_5 = 840$ kN so k vseh pramen začeli postopoma naraščati. V intervalu 10'-15' se je nenadoma povečal k pramena #5 na 8,63 mm, zaradi česar je povprečna mera lezenja vseh pramen sidra preseгла k_{krit} , zato smo VPN prekinili.
- Na stopnji sile P_1 večstopenjskega preskusa nosilnosti sidra **SBz-78** smo v intervalu 1'-2' opazili zdrs pramena #5, ki smo ga deloma pripisali ravnanju tega pramena v območju pod glavo sidra deloma pa oprijemu čeljusti mononapenjalke. Podoben pojav je bil v istem časovnem intervalu opazen tudi pri pramenu #4, le da se je pojavljal na stopnjah sile P_1 do P_3 . Takoj po vnosu sile $P_5 = 840$ kN smo pri pramenih #3, #4 in #5 že v intervalu 1'-2' iz vrednotili mere lezenja k višje od k_{krit} , ki pa so se v nadaljevanju opazovanja umirile. Na isti stopnji sile so z odčitkom v 20' začeli opazno naraščati prirastki izvlečkov pramena #5, pri čemer smo v intervalu 30'-35' iz vrednotili $k = 8,51$ mm ($k_{1,6} = 2,19$ mm), zato smo VPN prekinili. Zanimivost VPN tega sidra je dejstvo, da smo izmerili velike vrednosti Δs_{bl} pramena #6 (desni diagram [slike B.7e](#)), čeprav pri njem k nikoli niso presegli vrednosti k_{krit} .

Vrednosti efektivnih prostih dolžin l_f in trajnih izvlečkov Δs_{bl} po podsidrih za modificirana sidra RCP/D-I podajamo na [sliki B.8](#), pri čemer smo tudi na teh diagramih s črtkano vrisali obe meji vsakega podsida, iz vrednoteni po standardu *SIA 267/1*. Prikazani diagrami potrjujejo razliko med obnašanjem sider RCP/D-I in RCP/D-Z – pri sidrih RCP/D-I so bili problemi z izvlačenjem pramen podsider iz injekcijske mase v notranjosti rebraste PE cevi manj izraziti in so se pojavljali v treh primerih, medtem ko smo v dveh primerih uspeli doseči tudi popuščanje veznega dela kabla sidra kot celote. Rečemo lahko, da so se pri sidrih RCP/D-I podsida obnašala bolj skladno s pričakovanji (t.j. bolj regularno glede na dolžino prostega dela pramen l_{fr}), kar je spet posledica bolj enakomernega obnašanja obeh pramen posameznega podsida. Pri podsidrih C sider tipa RCP/D-I lahko opazimo značilnost, da je zadnja vrednost efektivne proste dolžine tega podsida tik pod spodnjo mejo, kot jo določa *SIA 267/1*, medtem ko pri ostalih obeh (krajših) podsidrih temu ni tako. Razlog za to lahko iščemo v dveh dejstvih:

- pri temu tipu sider je v podsidru C prišlo do izvlačenja veznih delov posameznih pramen (kar se odraža v kombinaciji upada l_f in povečanja Δs_{bl}),
- po drugi strani potekata prosta dela pramen podsida C mimo veznih delov pramen krajših podsider A in B, kjer pri vnosu sile iz pramen v injekcijsko maso prihaja do razpokanja injekcijske mase, ki se pri tem širi, s tem pa pritiska na PE ovojno cev obeh pramen podsida C, zaradi česar se povečuje tlak v radialni smeri (s tem pa tudi trenje), kar se posledično odraža v manjših elastičnih izvlečkih pri razbremenitvi iz zadnje stopnje sile na začetno silo P_a , zaradi česar sta krajši tudi efektivni prosti dolžini l_f obeh pramen podsida C.



Slika B.7: Efektivne proste dolžine l_f in trajni izvlečki Δs_{bl} pramen sider tipa RCP/D-I testnega polja.
 Figure B.7: Strand apparent free lengths l_f and permanent displacements Δs_{bl} for the testing field anchors of type RCP/D-I.



Slika B.8: Efektivne proste dolžine l_f in trajni izvlečki Δs_{b1} podsider sider tipa RCP/D-I testnega polja.
Figure B.8: Apparent free lengths l_f and permanent displacements Δs_{b1} of anchor units for the testing field anchors of type RCP/D-I.

Enaki vplivi na stikih prosti-vezni del podsider sicer delujejo tudi pri sidrih tipa RCP/D-Z, kjer pa tega zaradi specifične izvlačitve posameznih pramenov iz injekcijske mase nismo mogli razpoznati: pri izvlačitvi posameznega pramena se namreč izvleče tudi njegova mononapenjalka, zaradi česar pada tlak v hidravličnem sistemu, torej so bili odčitki izvlečkov ostalih pramenov tega sidra dejansko izvedeni pri nižji (a neznani sili), ki je zaradi hitrega dogajanja na licu mesta nismo mogli sproti odčitovati in zapisovati. Kolikšna bo dejanska prosta dolžina pramena, ki je popustilo, zavisi od tega, ali je spodnji konec pramena še sprjet z injekcijsko maso v notranjosti rebraste PE cevi (v tem primeru naraščča l_f) ali pa je bil stik po celotni dolžini veznega dela pramena že prekinjen in se pramen v celoti izvleče (v tem primeru močno upade l_f , se pa zato izrazito poveča trajni izvleček tega pramena Δs_{bl}).

B.2 REZULTATI PONOVLJENIH PRESKUŠANJ NOSILNOSTI SIDER, OPRAVLJENIH LETA 2009 NA TESTNEM POLJU OBJEKTA OZ-05

Glede na dosežene rezultate PS in VPN, končanih preskušanj nosilnosti sider v sklopu RRN leta 2008, so bila vsa sidra zaklinjena na silo zaklinjenja P_0 . Približno leto dni po preskušanjih sider opravljenih v aprilu in maju 2008, smo sidra razklinili in ponovno ugotavljali njihove odpornostne karakteristike. Rezultate v letu 2009 ponovljenih preskušanj podajamo v nadaljevanju tega poglavja, pri čemer smo v vse diagrame lezenja ($\Delta s - \log t$) iz izhodišča koordinatnega sistema za primerjavo vrisali mero lezenja $k = 1$ mm (ravna črta zelene barve) in kritično mero lezenja $k_{krit} = 2$ mm (ravna črta rdeče barve).

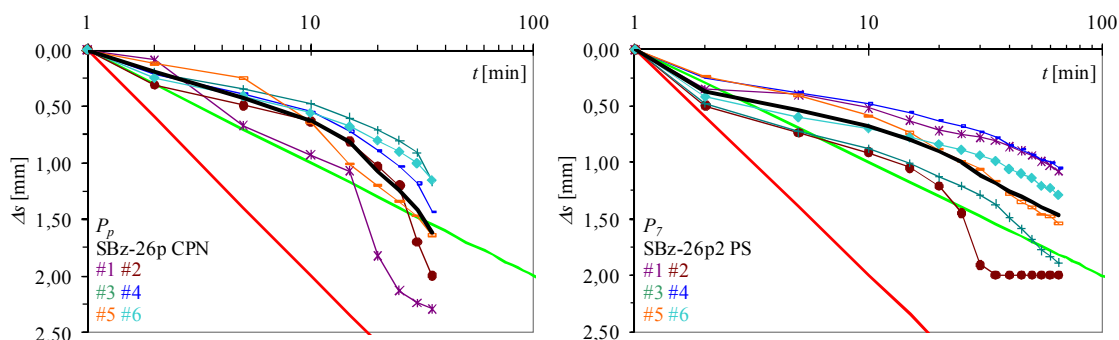
B.2.1 Sidra RCP/D

V letu 2008 so bila v sklopu izvedbe RRN na testnem polju vgrajena in do porušitve preskušena tri 6-pramenska referenčna sidra tipa RCP/D. Sidra smo v letu 2009 razklinili in na njih ponovili preskuse nosilnosti, pri čemer smo ugotovili naslednje:

- Rezultati PS iz leta 2008 so pokazali, da je v sidru **SBz-23** pri sili $P_4 = 702$ kN prišlo do hipne (krhke) porušitve s pokom po injekcijski masi, pri čemer je bilo nato sidro zaklinjeno na silo $P_0 = 450$ kN. Pri razklinjenju sidra leta 2009 izvajalec ni uspel odčitati sile v sidru. Na stopnji sile P_1 v letu 2009 ponovljene **PS** so bili k nizki. Pri vnašanju sile $P_2 = 426$ kN je sidro pri doseženi sili 410 kN hipno popustilo s pokom, sila v sidru pa je vztrajno padala, torej se je ponovil isti mehanizem porušitve po injekcijski masi, kot v letu 2008. Odčitane vrednosti izvlečkov vseh pramenov so bile v trenutku porušitve približno enake, torej se je iz injekcijske mase izvleklo sidro kot celota, pri čemer je verjetno prišlo do izvlačitve pramenov kabla sidra iz rebraste PE cevi, čeprav ni možno povsem izključiti niti porušitve po zunanjem stiku sidra.
- Pri PS sidra **SBz-26** leta 2008 je do porušitve prišlo na ravni preskusne sile $P_{pv} = 1254$ kN, ko je bila pri vseh pramenih sidra prekoračena k_{krit} , iz česar smo sklepali, da je pri tem sidru prišlo bodisi do izvlačitve kabla sidra iz rebraste PE cevi bodisi do porušitve po zunanjem stiku sidra. Tudi to sidro je bilo zaklinjeno na silo 450 kN, pri čemer je leta 2009 približno ocenjena sila razklinjanja znašala 611 kN (porast za 36 % glede na silo P_0 , vneseno leta 2008). Leta 2009 je bil na sidru najprej izveden CPN, takoj nato pa še PS:
 - Namen **CPN** je bil dokazati, da kljub temu, da je sidro (navkljub porušitvi leta 2008) še vedno sposobno trajno prenašati silo zaklinjenja P_0 na ravni 50 % izvrednotene R_a . Preskusno silo P_p za CPN smo določili kot $1,25 \cdot P_0 = 1,25 \cdot 0,50 \cdot R_a = 0,625 \cdot R_a$. Na stopnjah sile P_1 in P_2 je bilo treba opazovanje podaljšati, vendar so bili k relativno nizki. Po vnosu preskusne sile $P_p = 763$ kN so začeli k pramen naraščati (slika B.9 levo), tako da so bili v vseh pramenih do odčitka v 35'

odčitane maksimalne mere lezenja med 2,24 in 6,32 mm, torej lahko smatramo, da je sidro pri CPN popustilo.

- Čeprav je sidro pri CPN popustilo, smo na sidru (ne da bi sneli napenjalke) takoj začeli z izvajanjem PS, s katero smo želeli ugotoviti, ali bomo pri PS uspeli doseči višjo silo kot pri predhodnem CPN. Do sile $P_4 = 702$ kN so bili k pramen relativno nizki, edino pramen #3 je v intervalu 25'-30' zdrsnil ($k > k_{krit}$), vendar se je lezenje tega pramena nato umirilo. Šele na stopnji sile $P_7 = 1116$ kN je v 25' popustil pramen #2, zato smo ga z zapiranjem ventila njegove mononapenjalke izločili iz skupnega hidravličnega sistema (slika B.9 desno). V nadaljevanju opazovanja na tej stopnji PS je bil pri pramenu #3 dvakrat presežen k_{krit} , vendar pa so se k pramen do 65' umirili in niso dosegli porušitve ($k < k_{krit}$). Pri prehodu na silo zadnje faze $P_{pv} = 1254$ kN smo pri sili $P_7 = 1116$ kN izločili pramena #2 in #3. Že v intervalu 1'-2' so bili v treh pramenih doseženi k med 5,15 in 7,04 mm, s čimer se je sidro porušilo. Čeprav se je pri CPN sidro porušilo pri 763 kN, je pri takoj ponovljeni PS do porušitve prišlo šele pri 1116 kN!

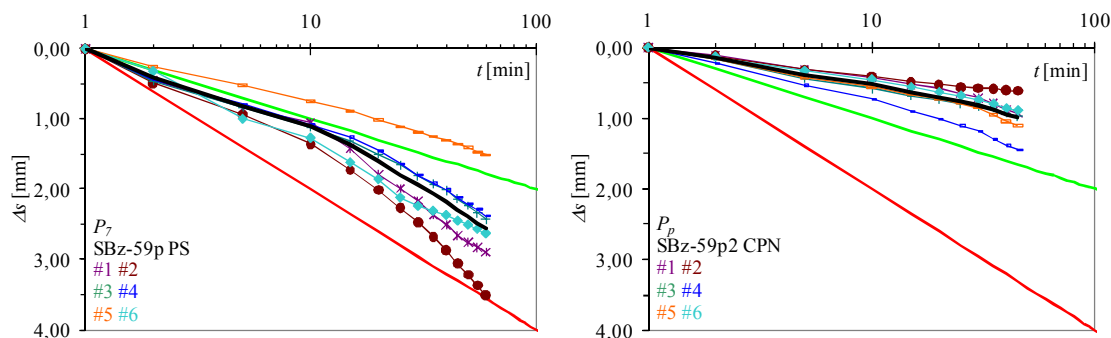


Slika B.9: Leta 2009 izmerjeni prirastki pomikov pramen pri preskusni sili CPN (levo) in na stopnji sile P_7 PS (desno) sidra SBz-26 tipa RCP/D.

Figure B.9: In 2009 measured increments of displacements of strands at proof load of CPN (left) and at load step P_7 of PS (right) of the RCP/D anchor SBz-26.

- Glede na obnašanje sidra **SBz-59** pri PS opravljeni leta 2008, ko sta po vnosu sile $P_4 = 702$ kN izrazito spustila dva pramena sidra, smo sklepali, da je pri tem sidru prišlo do izvlačanja teh dveh pramen iz injekcijske mase v notranjosti rebraste PE cevi. Sidro je bilo leta 2008 zaklinjeno na silo 390 kN, pri čemer je leta 2009 približno ocenjena sila razklinjanja znašala 580 kN (porast za 49 %). Pri tem sidru smo vrstni red preskušanj obrnili – najprej smo izvedli PS, naslednji dan pa še dokazni CPN:
 - Za PS tega sidra je značilno, da je v posameznih časovnih intervalih do stopnje sile $P_6 = 978$ kN pri nekaterih pramenih prišlo do posameznih lokalnih zdrsov ($k > k_{krit}$), vendar se je nato lezenje pramen umirilo. Na stopnji sile P_6 so bili k razmeroma nizki (največji takoj po vnosu sile je bil pri pramenu #4 1,50 mm). Po vnosu sile $P_7 = 1116$ kN so k pramen začeli naraščati, sprva sta popustila pramena #1 in #2, nato pa je bila k_{krit} presežena tudi pri pramenu #3, v posameznih intervalih pa tudi pri pramenih #4 in #5 (slika B.10 levo). Glede na celotno sliko obnašanja sidra pri PS smo ocenili, da so bili med PS opazni znaki popuščanja veznih delov posameznih pramen sidra, vendar je na koncu popustil kabel sidra kot celota, pri čemer je glede na dinamiko popuščanja posameznih pramen prišlo do porušitve v notranjosti rebraste PE cevi.
 - Preko noči smo na sidru pustili napenjalke napete na minimalno silo 125 kN, ki je bila hkrati tudi začetna sila za CPN. Raven preskusne sile za CPN smo ocenili podobno kot pri sidru SBz-26 ($P_p = 1,25 \cdot 0,50 \cdot R_a$). Sidro je obremenitve vseh treh stopenj CPN prevzelo brez

posebnosti, potrebni so bili le malenkost podaljšani opazovalni časi stopenj sile P_1 in P_2 . Na ravni preskusne sile P_p smo opazovanje z minimalnih 30' podaljšali na 45' (slika B.10 desno), pri čemer je v zadnjem intervalu (40'-45') k_{1-6} vseh pramen sidra znašal 0,85 mm. Rezultati CPN torej kažejo, da je bilo sidro kljub temu, da je bilo predhodni dan pri PS porušeno ($k > k_{krit}$), naslednji dan sposobno prevzeti silo zaklinjenja velikostnega reda 50 % odpornosti sidra na izvlek R_a , dosežene pri PS.



Slika B.10: Leta 2009 izmerjeni prirastki pomikov pramen na stopnji sile P_7 PS (levo) in pri preskusni sili P_p CPN (desno) sidra SBz-59 tipa RCP/D.

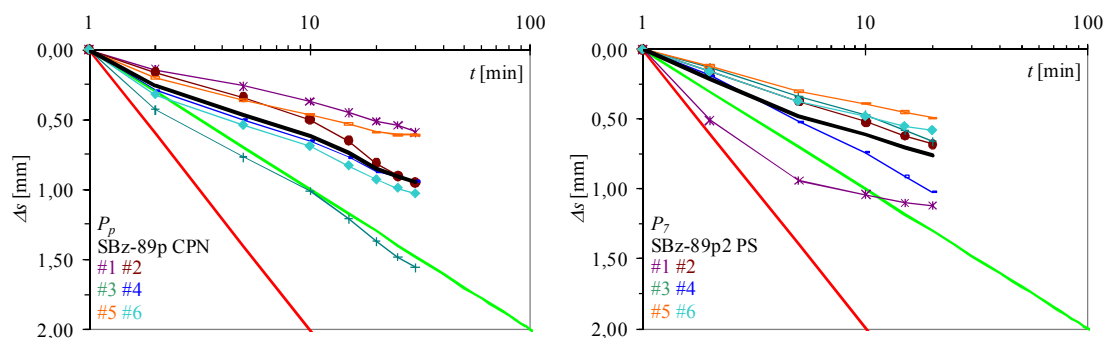
Figure B.10: In 2009 measured increments of displacements of strands at load step P_7 of PS (left) and at proof load P_p of CPN (right) of the RCP/D anchor SBz-59.

B.2.2 Sidra RCP/D-K

Pri preskusih nosilnosti, leta 2008 opravljenih na petih modificiranih 6-pramenskih sider RCP/D-K s povečano togostjo veznega dela sidra, smo opazili povečane priraste izvlečkov takoj po vnosu stopnje sile P_i , kar smo delno pripisali ravnanju pramen v območju pod glavo sidra, delno pa oprijemu čeljusti mononapenjalk na žice pramen. V letu 2009 smo na teh sidrih ponovili preskušanja nosilnosti, pri čemer smo ugotovili naslednje:

- Pri PS sidra **SBz-89**, opravljeni leta 2008, pri tem sidru povprečna vrednost k_{1-6} vseh pramen sidra ni presegla k_{krit} , torej porušitev veznega dela tega sidra ni bila dosežena. Sidro je bilo leta 2008 zaklinjeno na silo 450 kN, v letu 2009 pa je približno ocenjena sila zaklinjenja znašala 674 kN, torej je v letu dni narastla za 50 %. Sidro je bilo leta 2009 pred izvedbo CPN in PS razklinjeno 19 dni, na pramenih pa so bile nameščene mononapenjalk, ki so v sidro vnašale minimalno silo 100 kN. Nato smo drugega za drugim (na isti dan) izvedli najprej CPN, nato pa še PS:
 - Z izvedbo **CPN** smo želeli dokazati, da je sidro sposobno prevzeti 50 % R_a , ki smo jo leta 2008 določili kot za 10 % povečano preskusno silo P_{pv} PS. Preskusno silo za CPN smo določili na podlagi predvidene sile zaklinjenja ($P_0 = 0,5 \cdot R_a$), povečane za 25 %. Na vseh stopnjah CPN so bili doseženi k pramen relativno nizki, v primerjavi z ostalimi prameni so bili opazno povečani k pramena #3 (slika B.11 levo), na vseh stopnjah sile pa je bilo opaziti precej večje trajne izvlečke Δs_{bl} pramena #2 v primerjavi z vrednostmi Δs_{bl} ostalih pramen. Ne glede na to lahko zaključimo, da je bila odpornost sidra za prevzem predvidene sile zaklinjenja zadostna.
 - Ne da bi sneli napenjalk smo takoj vnesli začetno silo P_a **PS** in nadaljevali z vnosom sile P_1 , pri čemer smo zaznali rahlo naraščanje sile v kablju sidra, čeprav tlaka v hidravličnem sistemu nismo dvigovali! Na stopnji sile P_2 so bili k pramen zelo nizki. Pri sili $P_3 = 564$ kN so opazno naraščali k pramena #2, ki so tudi prekorali k_{krit} , vendar se je lezenje tega pramena v nadaljevanju umirilo. Podoben pojav, a v manj izraziti obliki, smo pri istem pramenu opazili tudi pri

sili $P_6 = 978$ kN. Na naslednji stopnji se je lezenje pramena #2 sicer umirilo, je pa zato zdrsnil pramen #1, a pri tem ni prekoračil k_{krit} (slika B.11 desno). Pri vnosu preskusne sile $P_{pv} = 1254$ kN sta se pri približni sili 1190 kN nenadoma pretrgali dve žici pramena #4. Površini odtrganih delov obeh žic sta bili opazno mehansko poškodovani (zarežani), zaradi česar je bila zmanjšana površina njunega prečnega prereza. Na podlagi globine poškodb in sledov površinske spremembe barve jekla smo ocenili, da do poškodb ni prišlo zaradi oprijema čeljusti napenjalke, ampak sta bili žici domnevno zarežani s kotno brusilko.

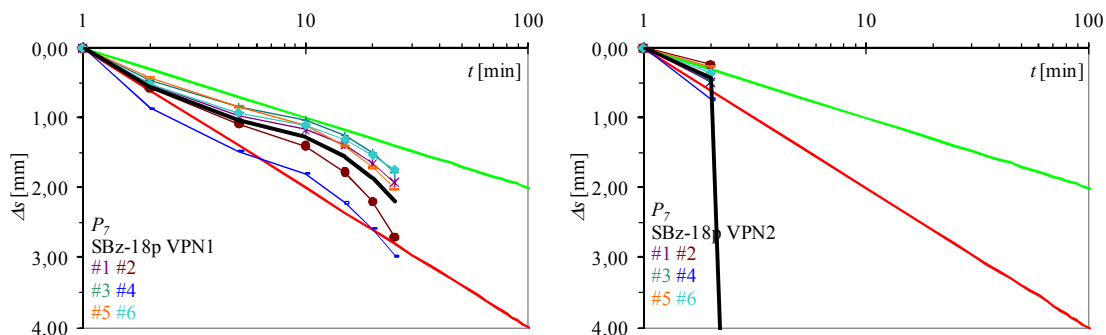


Slika B.11: Leta 2009 izmerjeni prirastki pomikov pramen pri preskusni sili CPN (levo) in na stopnji sile P_7 PS (desno) sidra SBz-89 tipa RCP/D-K.

Figure B.11: In 2009 measured increments of displacements of strands at proof load of CPN (left) and at load step P_7 of VPN (right) of the RCP/D-K anchor SBz-89.

- Rezultati VPN sidra **SBz-18** iz leta 2008 so pokazali, da so na ravni sile $P_6 = 978$ kN k pramen presegle k_{krit} , kar je kazalo na popuščanje kabla sidra kot celote. Leta 2008 je bilo sidro zaklinjeno na 450 kN, približno ocenjena sila razklinjenja leta 2009 pa je znašala 517 kN (porast sile za 15 %). Pri tem sidru smo leta 2009 na isti dan zaporedoma izvedli dva VPN, ker pa je sidro pri drugem VPN hipno popustilo, smo nato izvedli še dokazni CPN, ali je sidro v takšnem stanju še sposobno prevzeti predvideno silo zaklinjenja 450 kN. Ugotovitve preskusov, leta 2009 opravljenih na tem sidru, so naslednje:
 - Pri **prvem VPN** so že na stopnji sile P_2 k pramen #2, #3 in #4 v območju med 30' in 40' presegli k_{krit} , a so se nato umirili. V območju sile $P_3 = 564$ kN je bila pri pramenu #3 v zadnjem delu opazovanja presežena vrednost k_{krit} , na stopnji sile $P_4 = 702$ kN se je podobno obnašal pramen #2, na stopnji sile $P_5 = 840$ kN pa pramen #5. Prvi znaki popuščanja veznega dela sidra so se pokazali pri sili $P_6 = 978$ kN. Čeprav se sidro še ni povsem umirilo smo vnesli silo $P_7 = 1116$ kN, vendar so k vseh pramen hitro naraščali ter presegli k_{krit} , zato smo VPN prekinili (slika B.12 levo).
 - Zaradi nenavadnega obnašanja posameznih pramen sidra v smislu pojavljanj $k > k_{krit}$, ki so nato na isti stopnji sile upadli, smo takoj takoj po prvem VPN še isti dan (ne da bi sneli mononapenjalke) izvedli **drugi VPN**. Na stopnjah sile P_1 do P_3 drugega VPN so bili k pramen nižji kot pri prvem VPN, medtem ko so bili na začetku stopenj sile P_4 do P_5 sicer nekoliko višji, a je bilo nato njihovo umirjanje izrazitejše (položnejši zadnji deli krivulj). Po vnosu sile $P_6 = 978$ kN so bili k pramen, za razliko od prvega VPN, kjer se je že nakazovalo popuščanje veznega dela sidra, opazno nižji. Po vnosu sile $P_7 = 1116$ kN je bil v pramenu #4, ki je sicer že ves prvi VPN izkazoval višje mere lezenja k od ostalih pramen (slika B.12 levo), že v intervalu 1'-2' dosežen $k = 2,43$ mm $> k_{krit}$ (slika B.12 desno). V naslednjem intervalu (2'-5') je v sidru počilo, sidrna sila pa je zelo hitro padala. Pri 5' je bila v sidru le še sila 804 kN, na pramenih pa smo izmerili isti velikostni red izvlečkov (od 33,0 do 37,6 mm), kar kaže na hkratno popustitev vseh pramen

sidra po injekcijski masi v veznem delu sidra, pri čemer pa ni mogoče z gotovostjo zatrditi ali je res prišlo do izvlačanja kabla sidra iz notranjosti rebraste PE cevi ali pa je možna tudi porušitev po zunanem stiku sidra.

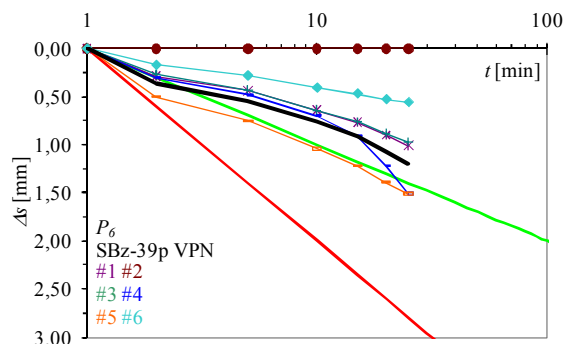


Slika B.12: Leta 2009 izmerjeni prirastki pomikov pramen sidra SBz-18 tipa RCP/D-K na stopnji sile P_7 : prvi izveden VPN (levo), takoj isti dan ponovljeni drugi VPN (desno).

Figure B.12: In 2009 measured increments of displacements of strands (RCP/D-K anchor SBz-18) at load step P_7 : first accomplished VPN (left), on the same day repeated second VPN (right).

- Glede na to, da je med drugim VPN prišlo do nenadne (hipne) porušitve veznega dela sidra, smo izvedli dokazni CPN, s katerim smo želeli ugotoviti, ali je sidro sposobno prevzeti silo $P_0 = 450$ kN, na katero je bilo sidro zaklinjeno leta 2008. Na podlagi sile P_0 smo določili preskusno silo CPN $P_p = 1,25 \cdot 450 = 563$ kN. CPN smo izvedli takoj po končanem drugem VPN, pri čemer mononapenjalk nismo sneli, pač pa smo kar iz začetne sile P_a VPN začeli s CPN. Obnašanje sidra med CPN je bilo dobro, doseženi k so bili nizki: pri sili $P_1 = 288$ kN je bil največji $k_{1,2} = 0,299$ mm pramena #4, pri sili $P_2 = 245$ kN je bil pri istem pramenu dosežen največji $k_{1,2} = 0,498$ mm, medtem ko je pri istem pramenu na ravni preskusne sile $P_p = 563$ kN dosegel največjo vrednost $k_{1,2} = 1,329$ mm, vendar se je v nadaljevanju opazovanja pri sili P_p k povsem umiril. Rezultati kažejo, da je sidro zelo dobro opravilo CPN, vendar je ob interpretaciji doseženih vrednosti mer leženja k potrebna določena previdnost, saj dosežene relativno nizke vrednosti k ne odražajo realnega stanja veznega dela sidra, na kar nas opozarjajo tudi negativne vrednosti Δs_{bl} . V sidru je med CPN očitno še vedno potekal pojav obratne relaksacije, kot smo ga ugotovili pri laboratorijskih preskusih izotermne relaksacije pramen po postopku za PS (dodatek F), vendar pa je bila odpornost veznega dela sidra še vedno dovolj velika, da ni prišlo do fizičnega izvlačanja veznega dela kabla sidra.
- Leta 2008 so pri VPN sidra **SBz-39** po vnosu sile $P_{pv} = 1254$ kN mere leženja k štirih pramen naraščale in v intervalu 10'-15' prekoračile vrednost k_{krit} , kar je kazalo na popuščanje kabla sidra kot celote, zato smo VPN takoj prekinili. Približno ocenjena sila, potrebna za razklinjanje sidra SBz-39, je znašala 454 kN, kar ustreza sili zaklinjenja 450 kN leta 2008. Pri izvedbi VPN leta 2009 so k pramena #2 že pri sili $P_1 = 288$ kN presegle k_{krit} , kar smo pripisali poškodbi veznega dela tega pramena pri razklinjanju, zato smo pramen #2 izločili iz hidravličnega sistema. VPN smo nadaljevali s preostalimi petimi prameni sidra, vendar to pomeni, da so bile obremenitve teh pramen pri istih stopnjah sile P_i , v primerjavi z ostalimi preskusi, zato višje. Pri sili $P_5 = 840$ kN (sila v posameznih pramenih je znašala 163 kN, kar ustreza ravni sile P_6 pri ostalih preskusih) so se pri pramenu #4 pojavili nekoliko večji k , a so bili še vedno manjši od k_{krit} . Popuščanje pramena #4 se je nadaljevalo na ravni sile $P_6 = 978$ kN, pri čemer sta zadnja dva izvrednotena k že preseгла

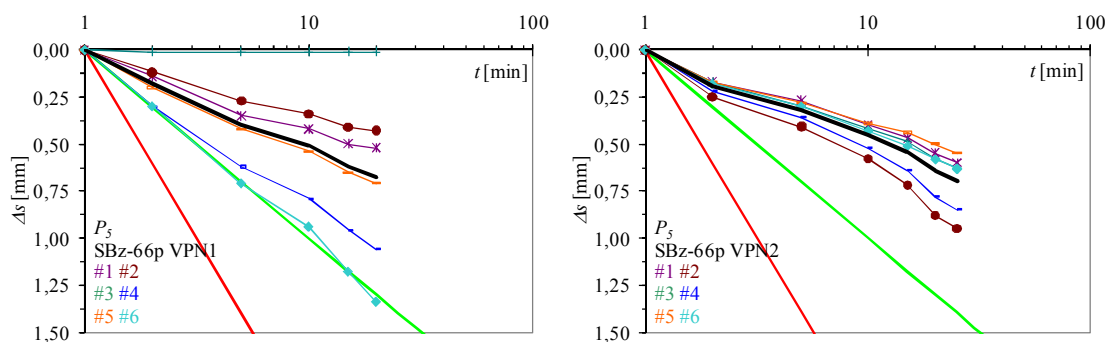
k_{krit} (slika B.13). Ker smo preskus izvajali le s petimi prameni, je bila to zadnja faza, ki smo jo še lahko izvedli, saj bi morali zapreti še ventil pramena #4, a bi sila $P_7 = 1116$ kN povzročila previsoke natezne napetosti v jeklu preostalih štirih pramen.



Slika B.13: Izmerjeni prirastki pomikov pramen sidra SBz-39 tipa RCP/D-K na stopnji P_6 VPN leta 2009.

Figure B.13: Measured increments of displacements of the anchor SBz-39 (type RCP/D-K) at load step P_6 of VPN in 2009.

- VPN sidra **SBz-66**, opravljen leta 2008, je pokazal, da je bil na ravni preskusne sile $P_{pv} = 1254$ kN k_{krit} prekoračen v dveh pramenih, k pa so naraščali tudi v ostalih pramenih, kar je nakazovalo mehanizem popuščanja sidra v obliki izvlečenja pramen iz notranjosti rebraste PE cevi. Izvajalec je sidro leta 2008 zaklinil na silo 450 kN, leta 2009 pa je za razklinjanje istega sidra potreboval približno ocenjeno silo 580 kN (porast sile za 29 %). Pri izvedbi VPN tega sidra leta 2009 smo imeli precej smole z vremenom, saj nas je dvakrat prekinila nevihta s hudim nalivom, tako da je voda v obeh primerih zalila merilne urice za spremljanje izvlečkov pramen, zato smo morali VPN obakrat prekiniti: prve tri stopnje VPN smo tako opravili dne 12.05.2009, dne 13.05.2009 smo opravili še stopnji sile P_4 in P_5 , nato pa smo morali VPN zaradi naliva zaključiti še predno so se pokazali prvi znaki popuščanja veznega dela sidra. Teden dni kasneje smo zato VPN ponovili v celoti.
 - Pri **prvem VPN** so bili doseženi k relativno nizki, omeniti velja le nekoliko povečane vrednosti pri pramenu #3 na ravni sile $P_3 = 564$ kN. V splošnem se je sidro obnašalo bolje (nižji k , krajši opazovalni časi na posameznih stopnjah sile), kot pri VPN leta 2008. Zaradi hudega naliva smo bili prisiljeni VPN prekiniti, pri čemer smo na sidru preko noči pustili mononapenjalke, s katerimi smo ohranjali začetno silo $P_a = 150$ kN. Naslednje jutro smo VPN nadaljevali: na ravni sile $P_4 = 702$ kN smo v primerjavi z ostalimi prameni sidra opazili malenkost večje k pramen #4 in #6, na stopnji sile $P_5 = 840$ kN pa so bili k teh dveh pramen že opazno višji. Na tej stopnji se je zataknila merilna urica pramena #3, zato v nadaljevanju opazovanja nismo mogli več odčitovati izvlečkov tega pramena (slika B.14 levo). Čeprav so bili doseženi k sidra nižji kot pri VPN leta 2008, na veznem delu sidra pa še ni bilo opaziti znakov popuščanja, smo morali VPN zaradi naliva zaključiti. Na sidru smo za teden dni pustili mononapenjalke s katerimi smo v kablju sidra ohranjali začetno silo $P_a = 150$ kN.
 - V prvih fazah **drugega VPN** je bilo obnašanje sidra podobno kot pri prvem VPN, pri čemer pa so bili v primerjavi s k ostalih pramen opazni večji k pramena #4. Proti koncu druge faze je ta pramen zdrsnil, malenkost je bil presežen k_{krit} , vendar pa se je lezenje tega pramena v nadaljevanju umirilo. Mere lezenja k sidra pri sili $P_5 = 840$ kN so bile glede na prvi VPN nekoliko manjše (predvsem pri pramenih #4 in #6). Manjše mere lezenja vseh pramen smo iz vrednotili tudi pri sili $P_6 = 978$ kN, medtem je bilo pri sili $P_7 = 1116$ kN opaziti večje vrednosti k pramen #2 in #6. Po vnosu preskusne sile $P_{pv} = 1254$ kN so pred odčitkom v 1' spustila tesnila mononapenjalke pramena #5, zato smo jo morali izločiti iz skupnega hidravličnega sistema. Vsi k pramen so že v intervalu 1'-2' precej presegali k_{krit} , zato smo VPN takoj prekinili.



Slika B.14: Primerjava izmerjenih prirastkov pomikov pramen sidra SBz-66 tipa RCP/D-K pri obeh VPN leta 2009: 1. VPN, zaradi hudega naliva prekinjen na stopnji P_5 (levo), 2. VPN prav tako na stopnji P_5 , čeprav je sidro popustilo šele pri preskusni sili P_{pv} (desno).

Figure B.14: Comparison of measured increments of displacements at both VPN's of the anchor SBz-66 (type RCP/D-K) in 2009: 1. VPN interrupted by downpour at load step P_5 (left), 2. VPN likewise at load step P_5 , although load bearing capacity decreased not till proof load P_{pv} (right).

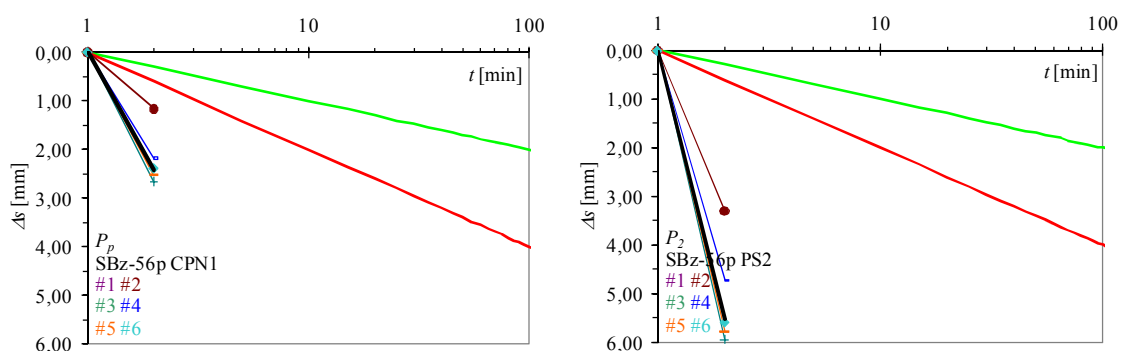
- Za sidro **SBz-84** rezultati VPN, opravljenega leta 2008, kažejo, da so po vnosu sile $P_6 = 978$ kN k naraščali, tako da je bila v intervalu 25'-30' pri treh pramenih prekoračena k_{krit} , k pa so bili relativno visoki tudi v ostalih pramenih, kar kaže na popuščanje kabla sidra kot celote. Leta 2008 je bilo sidro zaklinjeno na silo 450 kN, leta 2009 pa je bila sila za razklinjanje približno ocenjena na 674 kN (porast za 50 %). Pri VPN, opravljenem leta 2009, so bili k generalno gledano nižji kot pri VPN leta 2008. Pri tem so se na stopnjah sile med P_1 in P_5 pojavljala posamezna pramena, v katerih so bili posamezni k višji od k ostalih pramen sidra, vendar se je njihovo lezenje na isti stopnji sile z nadaljevanjem opazovanja umirilo. Na stopnjah sile P_6 do P_{pv} so se vsa pramena sidra obnašala bolj enotno. V zadnji fazi po vnosu preskusne sile $P_{pv} = 1254$ kN so k pramen počasi naraščali, v intervalu 20'-25' je k_{krit} prekoračil le pramen #3. Ker so k ostalih pramen počasi naraščali, mere lezenja k pramena #3 pa se niso umirjale, smo VPN v 35' prekinili, da bi preprečili uničenje veznega dela sidra.

B.2.3 Sidra RCP/D-Z

V testno polje smo vgradili pet modificiranih 6-pramenskih sider RCP/D-Z, ki po konceptu oblikovanja veznega dela (medsebojno zamaknjeni vezni deli podsider) temeljijo na Barlayevem patentu, a so se za razliko od patenta vezni deli vseh podsider nahajali v skupni rebrasti PE cevi. Preskušanja izvedena leta 2008 (ena PS in štiri VPN) so pokazala, da so bile pri sidrih tipa RCP/D-Z dosežene najnižje odporosti veznih delov sider, pri čemer je prišlo do popuščanja vezi pramen s cementno injekcijsko maso v notranjosti rebraste PE cevi, v nekaterih primerih pa so bila posamezna pramena tudi fizično izvlečena. Rezultati v letu 2009 ponovljenih preskusov nosilnosti kažejo naslednje:

- Rezultati PS sidra **SBz-56** iz leta 2008 kažejo, da je pri tem sidru na ravni sile $P_5 = 840$ kN prišlo do izvlečenja obeh pramen z najkrajšim prostim delom (podsidro A) iz injekcijske mase. Po končani PS je bilo sidro zaklinjeno na silo 420 kN, leto kasneje pa je bila približno ocenjena sila razklinjanja 548 kN (povečanje sile za 30 %). Pri razklinjanju sidra je en pramen povsem popustil. Na preostalih pramenih sidra smo leta 2009 najprej izvedli CPN, nato pa smo takoj zatem, ne da bi sneli mononapenjalke, na sidru izvedli še PS:
 - Namen **CPN** je bil dokazati, da je sidro tudi s pramenom manj še vedno sposobno trajno prenašati 50 % v letu 2008 iz vrednotene $R_a = 702$ kN, zato smo preskusno silo P_p določili kot za

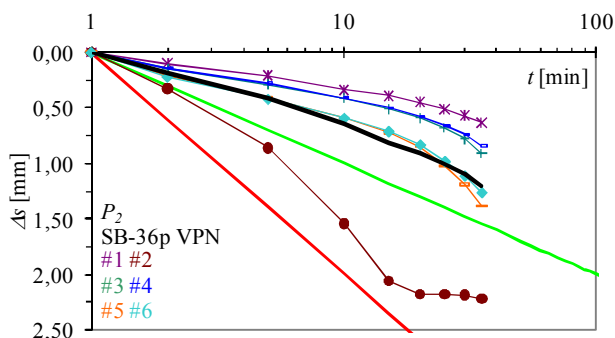
25 % povečano silo zaklinjenja: $P_p = 1,25 \cdot 0,50 \cdot R_a = 439$ kN, medtem ko smo za začetno silo P_a vzeli minimalno silo, ki še zagotavlja stabilno naleganje in oprijem mononapenjalk na glavo sidra (125 kN). Na stopnjah sile P_1 in P_2 CPN so bili glede na ostala pramena nekoliko povečani k pramena #6. Po vnosu preskusne sile $P_p = 439$ kN se je že v intervalu 0'-1' izvlekel vezni del pramena #2, zato smo mononapenjalko tega pramena izločili iz skupnega hidravličnega sistema. Ne glede na to je bili že v intervalu 1'-2' pri vseh pramenih močno preseženi k_{krit} (dosežene vrednosti k med 7,24 in 8,84 mm) (slika B.15 levo). CPN štejemo kot neuspešen, saj nam ni uspelo dokazati zadostne odpornosti sidra, še več – pri vseh pramenih so k presegle k_{krit} , torej sidro lahko smatramo kot porušeno.



Slika B.15: Leta 2009 izmerjeni prirastki pomikov pramen pri preskusni sili CPN (levo) in na stopnji sile P_2 PS (desno) sidra SBz-56 tipa RCP/D-Z.

Figure B.15: In 2009 measured increments of displacements of strands at proof load of CPN (left) and at load step P_2 of PS (right) of the RCP/D-Z anchor SBz-56.

- Na formalno porušenem sidru smo, ne da bi sneli mononapenjalko, najprej popravili začetno silo s 125 na 150 kN, nato pa smo začeli z izvajanjem **PS**. Že na stopnji sile P_1 se k niso hoteli umiriti, zato smo morali opazovanje iz 15' podaljšati na 35'. Po vnosu sile $P_2 = 426$ kN smo morali že pred odčitkom v 1' zapreti vod mononapenjalko pramena #2. Ne glede na to so izvlečki tega pramena do 2' še precej narastli ($k_{1',2'} = 11,0$ mm); kot je razvidno iz **slike B.15 desno** so v istem intervalu 1'-2' povsem popustila tudi ostala pramena (vrednosti k med 15,7 in 19,2 mm). Po snetju mononapenjalk je bil pramen #1 izvlečen za približno 30 cm, pramen #2 pa za približno 15 cm.
- Na sidru **SBz-15** so bila pramena že odrezana, zato preskusa v letu 2009 ni bilo možno izvesti.
- Pri VPN sidra **SBz-36** leta 2008 smo pri sili $P_4 = 702$ kN opazili znake popuščanja vezi pramena #3 z injekcijsko maso v notranjosti rebraste PE cevi, vendar pramen še ni bil fizično izvlečen. Sidro je izvajalec leta 2008 zaklinil na 360 kN, pri razklinjenju sidra leta 2009 sile razklinjanja ni uspel odčitati. Pri **VPN** leta 2009 smo morali že na stopnji sile P_1 opazovalni čas podaljšati s 15' na 25', v intervalu 15'-20' je zdrsnil pramen #6 ($k > k_{krit}$), a so se k tega pramena v nadaljevanju VPN umirili. Po vnosu sile $P_2 = 426$ kN se je pri pramenu #2 v intervalu 5'-10' pojavil $k = 2,26$ mm, ki se je nato v intervalu 10'-15' še povečal na 2,95 mm, zato smo ventil mononapenjalko tega pramena zaprli (kljub temu pa so v nadaljevanju opazovanja izvlečki tega pramena še vedno malenkost naraščali). Kot je razvidno iz **slike B.16** so pri opazovanju na tej stopnji sile k pramen sidra počasi naraščali, v intervalu 25'-30' je k_{krit} najprej presegel pramen #5, v naslednjem intervalu pa še pramen #6, zato smo VPN prekinili.



Slika B.16: Izmerjeni prirastki pomikov pramen sidra SBz-36 tipa RCP/D-Z na zadnji stopnji VPN leta 2009.

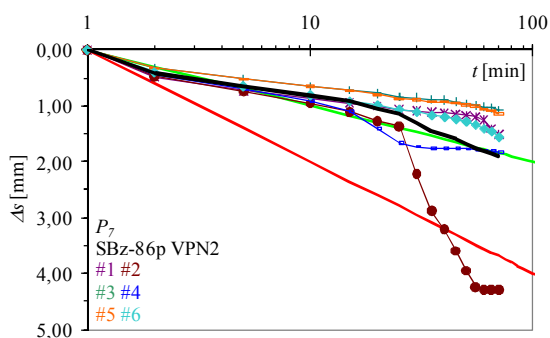
Figure B.16: Measured increments of displacements of the anchor SBz-36 (type RCP/D-Z) at last load step of VPN in 2009.

- Iz rezultatov VPN sidra **SBz-63**, dobljenih leta 2008, je razvidno, da so pri tem sidru takoj po vnosu sile $P_3 = 564$ kN izrazito narastli izvlečki obeh pramen podsidra A z najkrajšim prostim delom, tako da smo morali VPN prekiniti še pred izvedenotjenjem prvih mer lezenja k . Kljub temu je bilo sidro leta 2008 zaklinjeno na silo 256 kN, leta 2009 pa je bila potrebna sila za razklinjanje približno ocenjena na 297 kN (povečanje sile za 19 %), pri čemer sta pri razklinjanju popustila oba pramena podsidra A. Na preostalih štirih pramenih smo nato po istih stopnjah sile, kot pri ostalih sidrih, izvedli VPN; v primeru tega sidra to pomeni, da je bila zato sila v vsakem od preostalih štirih pramen (glede na ostala 6-pramenska sidra) za 50 % višja. Po vnosu sile $P_1 = 288$ kN je tako vsako od štirih pramen prevzemalo silo 72 kN (pri ostalih sidrih, kjer se je sila enakomerno porazdelila na šest pramen, so bila pramena s tako silo obremenjena šele na ravni stopnje sile P_2). Na stopnji sile P_1 je bilo obnašanje sidra celo nekoliko boljše od obnašanja sidra leta 2008 v fazi P_1 (ista skupna raven sile v sidru) oz. pri P_2 (ista raven sile v posameznem pramenu) – tako v smislu nižjih k kot tudi krajših opazovalnih časov. Glede na ostala pramena sidra so bili k pramena #5 nekoliko večji predvsem na račun zdrsa v intervalu 1'-2'. Po vnosu sile $P_2 = 426$ kN (v vsakem od pramen je bila sila 106,5 kN, kar ustreza obremenitvi pramen nekje med $P_3 = 94$ kN in $P_4 = 114$ kN 6-pramenskih sider), je bilo obnašanje pramen podobno kot na stopnji sile P_1 VPN. Pred odčitkom v 15' je bil hipno s pokom najprej iztrgan pramen #3, nato pa še pramen #4, sila v sidru pa je padla na 220 kN; očitno je pri tem sidru prišlo do izvleka para pramen podsidra B, zato smo VPN takoj prekinili.
- Pri VPN sidra **SBz-81** so se prvi znaki popuščenja pramena #6 pokazali že na stopnji sile P_4 , pri čemer so se na naslednji stopnji sile $P_5 = 840$ kN pokazali prvi znaki izvlečenja treh pramen, katerih mere lezenja k so prekoračile k_{krit} . Ne glede na to je bilo sidra leta 2008 zaklinjeno na silo 450 kN, pri čemer je bila leto kasneje potrebna sila za razklinjanje ocenjena na 674 kN (povečanje sile za 50 %). Na stopnji sile P_1 VPN leta 2009 ni bilo posebnosti, pramena sidra so delovala kot celota. Na stopnji sile $P_2 = 426$ kN so bili v primerjavi z ostalimi prameni sidra večji k pramena #6, podobno je bilo tudi na naslednji stopnji sile $P_3 = 564$ kN, le da je bilo na tej stopnji opaziti večje k tudi pri pramenu #5. Po vnosu sile $P_4 = 702$ kN smo morali zaradi zelo hitrega naraščanja izvlečkov že pred odčitkom v 1' zapreti ventil mononapenjalko pramena #5. Že v intervalu 1'-2' so k vseh ostalih pramen prekoračili k_{krit} (vrednosti k so bile med 2,39 in 4,12 mm), vendar pa so te vrednosti v nadaljevanju opazovanja padle pod kritično mejo $k_{krit} = 2$ mm. Ko smo poskušali silo v sidru dvigniti na $P_5 = 840$ kN je približno pri sili 630 kN s pramena #1 strgalo mononapenjalko, zato smo ventil njenega hidravličnega voda zaprli. Pri poskusu dviga sile v preostalih štirih pramenih so se znaki popuščenja pokazali tudi pri njih, zato smo VPN prekinili.

B.2.4 Sidra RCP/D-I

V testno polje opornega zidu OZ-05 smo vgradili pet modificiranih 6-pramenskih sider RCP/D-I, zasnovanih na podlagi patenta Škrabla. Po rezultatih preskusov nosilnosti (ena PS in štiri VPN), opravljenih v letu 2008, so bile odpornosti veznih delov sider RCP/D-I sicer slabše kot pri referenčnih sidrih RCP/D, kot tudi pri modificiranih sidrih RCP/D-K, a so bile na drugi strani boljše kot pri modificiranih sidrih tipa RCP/D-Z. V sklopu analize rezultatov sider RCP/D-I smo ugotovili, da je do izrazite popustitve enega pramena podsidra prišlo v podsidru C (pri sidrih SBz-12, SBz-60 in SBz-78), pri čemer pa je bil mehanizem popuščenja veznega dela sider enak kot pri sidrih RCP/D-Z (popuščenje vezi pramen s cementno injekcijsko maso v notranjosti rebraste PE cevi). V preostalih dveh primerih (sidri SBz-33 in SBz-86) smo v sidro uspeli vnesti preskusno silo $P_{pv} = 1254$ kN, na koncu pa je bila mera lezenja k presežena v petih oz. šestih pramenih, pri čemer smo ocenili, da je pri sidru SBz-33 prišlo do porušitve kabla sidra kot celote, medtem ko je pri sidru SBz-86 verjetno prišlo do popuščenja vezi pramen z injekcijsko maso v notranjosti rebraste PE cevi. Rezultati preskušanj, opravljenih v letu 2009, so pokazali:

- Rezultati v letu 2008 opravljene PS sidra **SBz-86** kažejo, da sta oba pramena podsidra C po vnosu preskusne sile $P_{pv} = 1254$ kN izkazovala vedno izrazitejše znake popuščenja, kar je pokazatelj porušitve veznega dela podsidra C. Sidro je bilo leta 2008 zaklinjeno na silo 450 kN, leto kasneje pa je izvajalec silo, potrebno za razklinjanje tega sidra, približno ocenil na 674 kN (porast sile za 50 %). Na sidru smo leta 2009 zaporedoma najprej izvedli CPN, takoj nato pa še PS:
 - Namen **CPN** je bil dokazati, da je sidro tudi s pramenom manj še vedno sposobno trajno prenašati 50 % v letu 2008 iz vrednotene odpornosti na izvlek R_a , na podlagi katere smo na enak način, kot v ostalih predhodno opisanih primerih, določili preskusno silo za CPN ($P_p = 718$ kN). Opazovanje na stopnji sile P_1 in P_2 CPN smo lahko zaključili v minimalnem času 15', čeprav je bilo na začetku opazovanja pri sili P_2 opaziti zdrsa pramen #3 in #5, vendar so se v nadaljevanju opazovanja k teh dveh pramen umirili. Po vnosu preskusne sile $P_p = 718$ kN so po 10' začeli naraščati k pramen #3 in #4 podsidra B; vrednost k_{krit} je bila najprej presežena pri pramenu #3, v naslednjem intervalu pa še pri pramenu #4, zato smo mononapenjalki obeh pramen podsidra B izločili iz skupnega hidravličnega sistema. V nadaljevanju opazovanja na tej stopnji sile so se k ostalih štirih pramen umirili, kar je kazalo na to, da bi preostala štiri pramena kabla sidra lahko prevzela celotno predvideno silo zaklinjenja (50 % R_a dosežene leta 2008).
 - Takoj po končanem CPN smo na sidru, ne da bi sneli mononapenjalko, izvedli še **VPN**. Na samem začetku stopenj sile P_1 , P_2 in P_3 je bilo opaziti manjši zdrs pramena #5, na stopnji sile P_3 pa se mu je pridružil še pramen #4. Pri daljših opazovalnih časih stopnje sile P_3 je bilo opaziti povečane mere lezenja k pramen #3 in #4, a so se tudi te do 35' umirile. Na samem začetku stopnje sile $P_5 = 840$ kN je zdrsnil pramen #5, a se je lezenja tega pramena v nadaljevanju umirilo. Na ravni sile $P_6 = 978$ kN sta k_{krit} prekoračila pramena #1 in #2, a so se njuni k v nadaljevanju opazovanja na tej stopnji sile nato umirili. Po vnosu sile $P_7 = 1116$ kN so bili do 15' povprečni k vseh pramen primerljivi s povprečnimi k predhodnje stopnje P_6 . Nato je bila k_{krit} prekoračena v pramenu #4, vendar so se k tega pramena po 25' umirili. V 30' je močno popustil vezni del pramena #2 ($k_{25'-30'} = 10,7$ mm), pri čemer se k tega pramena niso hoteli umiriti, zato smo po odčitku v 55' ventil mononapenjalko tega pramena zaprli. Na koncu opazovanja je bila k_{krit} prekoračena še v pramenih #1 in #6, zato smo VPN tega sidra zaključili.

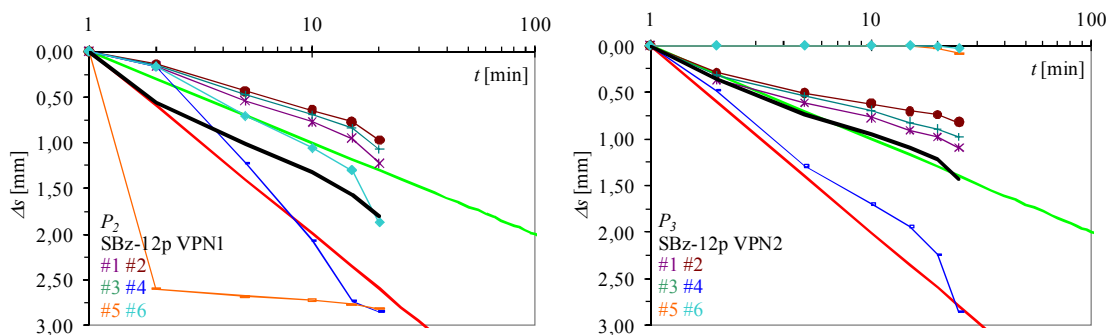


Slika B.17: Izmerjeni prirastki pomikov pramen sidra SBz-86 tipa RCP/D-I na zadnji stopnji VPN leta 2009.

Figure B.17: Measured increments of displacements of the anchor SBz-86 (type RCP/D-I) at last load step of VPN in 2009.

- Pri VPN sidra **SBz-12** leta 2008 smo takoj po vnosu preskusne sile $P_{pv} = 1254$ kN opazili precejšnje naraščanje k pramena #6, kasneje pa je bil tudi v pramenu #5 presežen k_{krit} (porušitev podsindra C). Leta 2008 je bilo sidro zaklinjeno na silo 450 kN, leta 2009 pa je približno ocenjena sila razklinjanja znašala 517 kN (torej je bila od sile, vnesene leta 2008, večja za 15 %). Pri tem sidru smo leta 2009 na isti dan zaporedoma izvedli dva VPN, pri čemer smo ugotovili naslednje:
 - Pri **prvem VPN** smo na stopnji sile P_1 opazovanje lahko zaključili po 15'. Po vnosu sile $P_2 = 426$ kN so že od samega začetka naprej hitro naraščali izvlečki pramena #5, tako da smo že na samem začetku pri tem pramenu iz vrednotili $k_{1-2'} = 8,64$ mm (slika B.18 levo), zato smo ventil mononapenjalka tega pramena takoj zaprli. Podobno se je v intervalu 2'-5' zgodilo tudi pri pramenu #4, zato smo bili v 15' prisiljeni zapreti tudi ventil mononapenjalka tega pramena. Ker je bila v intervalu 15'-20' k_{krit} presežena tudi v pramenih #1 in #6, smo VPN zaključili.
 - Takoj po razbremenitvi na začetno silo P_a smo izvedli **drugi VPN**, pri čemer mononapenjalk pramen nismo odstranili. Na ravni sile $P_1 = 288$ kN smo pri drugem VPN v splošnem dosegli nižje k kot pri prvem VPN. Pri dvigovanju sile na $P_2 = 426$ kN je bil pri pramenu #5 že med 0' in 1' dosežen izvleček 2,44 mm, zato smo ventil mononapenjalka tega pramena zaprli takoj po odčitku v 1'. Pri pramenu #6 je bil k_{krit} presežen že takoj na začetku ($k_{1-2'} = 2,76$ mm), pri čemer so v nadaljevanju opazovanja vrednosti k nihale okoli vrednosti k_{krit} . Po razbremenitvi na silo P_a smo na ravni ponovno dosežene sile P_2 (v sklopu dviga na stopnjo sile $P_3 = 564$ kN) iz skupnega hidravličnega sistema izločili oba pramena podsindra C. Na ravni sile P_3 je bila k_{krit} v pramenu #4 presežena najprej v intervalu 2'-5', nato pa še v intervalih 15'-20' in 20'-25', pri čemer se je k v pramenu #4 dvignil na vrednost 6,29 mm (slika B.18 desno), naraščali pa so tudi k ostalih pramen, zato smo VPN zaključili.

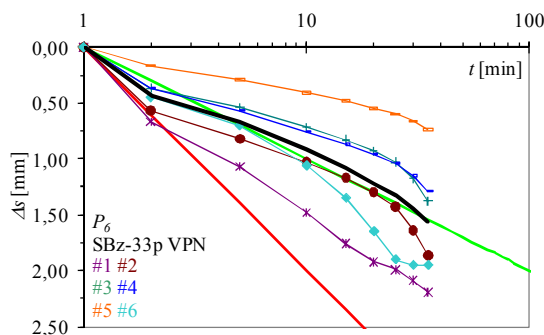
Pri sidru SBz-12 torej pri nobenem od obeh VPN nismo uspeli doseči stopnje sile iz VPN leta 2008.



Slika B.18: Primerjava izmerjenih prirastkov pomikov pramen sidra SBz-12 tipa RCP/D-I na zadnji stopnji pri obeh VPN leta 2009.

Figure B.18: Comparison of measured increments of displacements at last load step of both VPN's of the anchor SBz-12 (type RCP/D-I) in 2009.

- Rezultati VPN sidra **SBz-33** iz leta 2008 kažejo, da je sidro izkazovalo veliko odpornost vse do sile $P_{pv} = 1254$ kN, ko so k vseh pramen začeli postopoma naraščati, pri čemer je bila z izjemo enega pramena v ostalih pramenih presežena k_{krit} , kar kaže na to, da je leta 2008 kabel sidra popustil kot celota. Sila, potrebna za razklinjenje sidra SBz-33, je bila približno ocenjena na 674 kN in je za približno 50 % presežala silo zaklinjenja 450 kN iz leta 2008. Pri obdelavi rezultatov VPN iz leta 2009 smo s težavo porazdelili pramena po posameznih podsidrih, saj se je stanje po različnih stopnjah sile P_i spreminjalo. V splošnem je bil v letu 2009 ponovljeni VPN tega sidra glede odpornosti eden izmed boljših na levi strani zidu, čeprav je bilo treba čase opazovanja na vsaki stopnji sile malce podaljšati, vendar pa so bile mere lezenja k pramen tega sidra do faze $P_5 = 840$ kN manjše od k_{krit} . Na ravni sil P_1 , P_3 in P_4 je bilo na začetku opazovanja opaziti zdrs pramena #1, a so se nato k tega pramena umirili. Na stopnji $P_5 = 840$ kN je v intervalu 1'-2' zdrsnil pramen #6 ($k_{1-2'} = 2,46$ mm), a se je nato lezenje tega sidra umirilo. Pri sili $P_6 = 978$ kN je sprva popustil pramen #1, a so se k tega pramena v nadaljevanju umirili (slika B.19). V intervalu 15'-20' je popustil pramen #6, ki smo ga v nadaljevanju opazovanja na tej stopnji sile izločili iz skupnega hidravličnega sistema, v intervalu 30'-35' pa so k vseh pramen (z izjemo pramena #1) prekoračili k_{krit} , zato smo VPN prekinili.



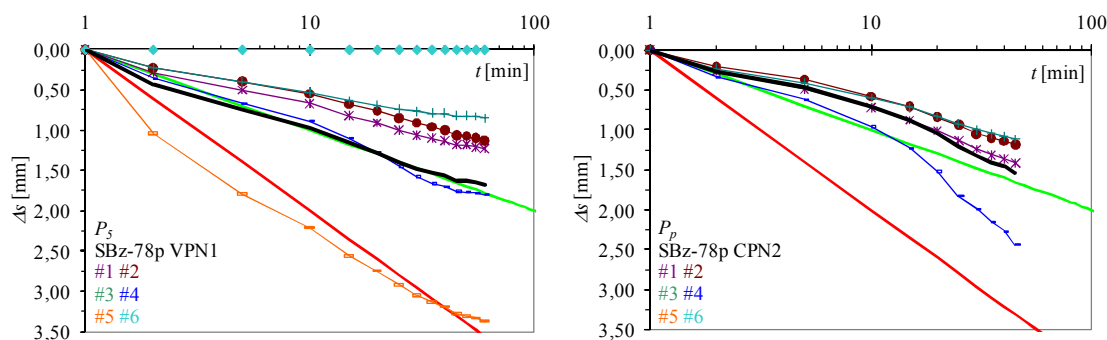
Slika B.19: Izmerjeni prirastki pomikov pramen sidra SBz-33 tipa RCP/D-I na zadnji stopnji VPN leta 2009.

Figure B.19: Measured increments of displacements of the anchor SBz-33 (type RCP/D-I) at last load step of VPN in 2009.

- Tudi pri VPN sidra **SBz-60**, izvedenega leta 2008, smo uspeli v kabel sidra vnesti silo $P_5 = 840$ kN, nakar so k vseh pramen začeli postopoma naraščati, pri čemer se je v intervalu 10'-15' nenadoma povečal k pramena #1, zaradi česar je povprečna mera lezenja vseh pramen sidra presežala k_{krit} . Kljub temu je bilo sidro leta 2008 zaklinjeno na silo 450 kN, leta 2009 pa je bilo pred VPN razklinjeno pri približno ocenjeni sili 580 kN (porast sile za 29 %). Na stopnji sile P_1 VPN, izvedenega leta 2009, je takoj po vnosu sile nekoliko zdrsnil pramen #5, na stopnji sile P_2 pa se je podobno zgodilo tudi pri pramenu #6. Podobno je na začetku stopnje sile $P_4 = 702$ kN zdrsnil pramen #6, vendar pa so se povečani k tega pramena pojavili po 10'. Po vnosu sile $P_5 = 840$ kN so že od samega začetka močno naraščali izvlečki pramena #6 ($k_{1-2'} = 8,64$ mm), zato smo ventil mononapenjalke tega pramena zaprli. Pri naslednjem odčitku v intervalu 2'-5' je bila k_{krit} presežena tudi pri vseh ostalih pramenih, zato smo VPN takoj prekinili. Obnašanje tega sidra pri VPN leta 2009 je bilo torej zelo podobno obnašanju pri VPN leta 2008.
- Rezultati VPN sidra **SBz-78** iz leta 2008 kažejo, da smo takoj po vnosu sile $P_5 = 840$ kN že v intervalu 1'-2' pri pramenih #3, #4 in #5 izvednotili mere lezenja višje od k_{krit} , ki pa so se v nadaljevanju opazovanja umirile. Na isti stopnji sile smo v intervalu 30'-35' opazili izrazite znake popuščanja pramena #5, zato smo VPN prekinili, sidro pa je bilo nato zaklinjeno na 450 kN. Leta 2009 je približno ocenjena sila razklinjanja znašala 674 kN (povečanje sile za 50 %). Nato smo na sidru izvedli VPN, naslednji dan pa še CPN:
 - Na stopnjah sile P_1 in P_2 VPN so se vsa pramena sidra obnašala podobno, k pa so bili nizki. Po vnosu sile $P_3 = 564$ kN je pramen #6 prekoračil k_{krit} ($k_{25'-30'} = 3,16$ mm), pri čemer so

izvlečki tega pramena hitro naraščali, zato smo ventil mononapenjalke tega pramena zaprli. Ventil mononapenjalke pramena #6 je bil zaprt, ko smo v sidro vnesli silo $P_4 = 702$ kN, zato je bila v vsakem od preostalih petih pramen sila višja za slabih 16 % glede na silo, če bi vsa pramena prevzela enak delež sile. Za stopnjo sile P_4 je značilno, da so bili k pramena #4 opazno višji od k ostalih pramen, a niso presegali k_{krit} . Na naslednji stopnji $P_5 = 840$ kN so bili k pramena #4 istega velikostnega reda, kot pri ostalih pramenih, je pa zato že takoj na začetku močno zdrsnil pramen #5 ($k_{1,2'} = 3,46$ mm), a so se tudi k tega pramena v nadaljevanju opazovanja nekoliko zmanjšali (slika B.20 levo). Ocenili smo, da bi lahko na naslednji stopnji $P_6 = 978$ kN popustil pramen #5, s čimer bi bilo porušeno celotno podsidro C, istočasno pa ventila mononapenjalke tega pramena ne bi smeli zapreti (v tem primeru bi bile napetosti v jeklu preostalih štirih pramen previsoke) zato smo VPN prekinili.

- Preko noči smo na sidru pustili mononapenjalke, ki so ohranjale silo 150 kN. Zjutraj smo odstranili mononapenjalke pramen podsidra C, na preostalih štirih pramenih pa smo izvedli CPN, s katerim smo želeli ugotoviti, ali so preostala štiri pramena sposobna trajno prenašati 50 % sile R_a , izvednotene prejšnji dan pri VPN. Na podlagi ocenjene $R_a = 840$ kN smo na enak način, kot v ostalih primerih, določili preskusno silo za CPN ($P_p = 630$ kN), za začetno silo pa smo izbrali silo $P_a = 125$ kN. Na ravni sile $P_1 = 239$ kN so se pramena sidra obnašala podobno, doseženi k pa so bili manjši od 1 mm. Takoj po vnosu sile $P_2 = 462$ kN sta nekoliko zdsnila pramena #1 in #4, vendar so se k do 15' umirili. Po vnosu preskusne sile $P_p = 630$ kN so bili k pramen sprva relativno nizki, vendar pa so po 5' začeli naraščati k pramena #4; v intervalu 15'-20' je bila pri tem pramenu presežena k_{krit} , ki se je do konca opazovanja v 45' gibala v območju med 2,02 in 3,32 mm. Ker se povprečna mera lezenja vseh pramen k_{1-4} ni umirila, smo CPN končali, saj nismo hoteli porušiti veznega dela pramena #4. Zaradi popuščanja pramena #4 z izvedenim CPN nismo uspeli dokazati, da je sidro sposobno prevzemati silo na ravni 50 % sile R_a , dosežene pri VPN.



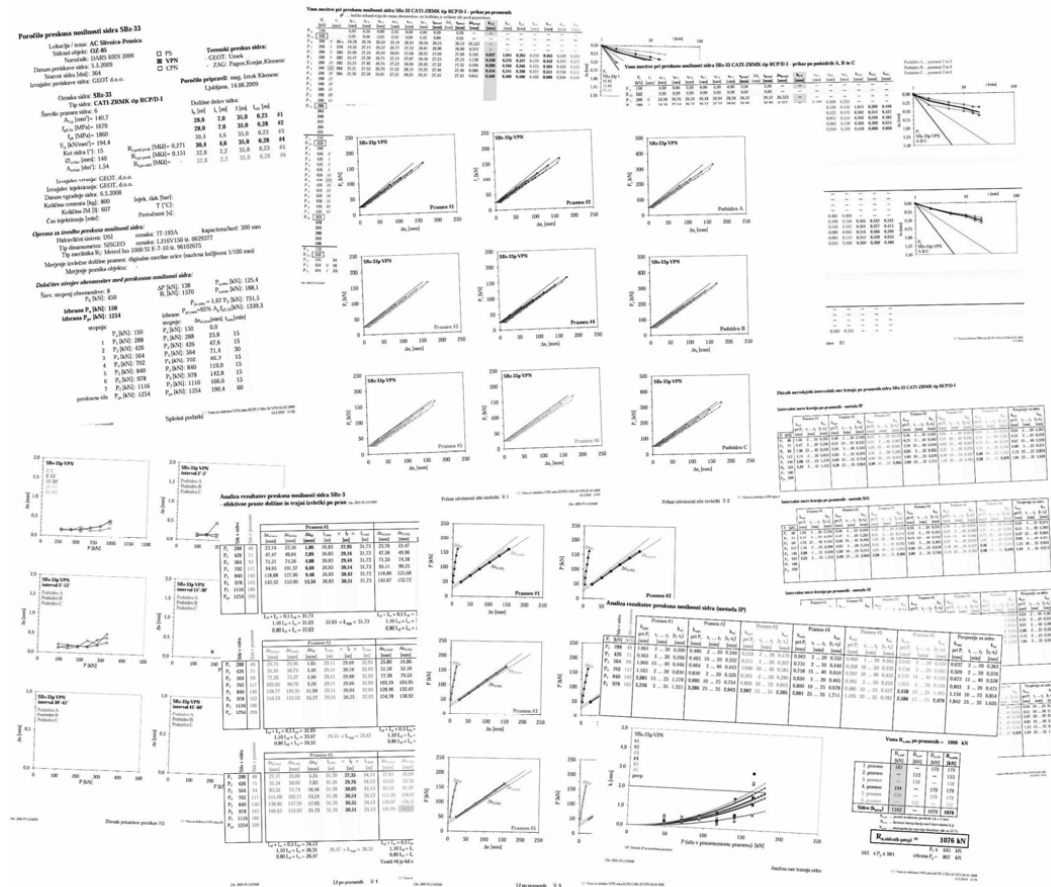
Slika B.20: Leta 2009 izmerjeni prirastki pomikov pramen na stopnji sile P_5 VPN (levo) in pri preskusni sili P_p CPN (desno) sidra SBz-78 tipa RCP/D-I.

Figure B.20: In 2009 measured increments of displacements of strands at at load step P_5 of VPN (left) and at proof load P_p of CPN (right) of the RCP/D-I anchor SBz-78.

(prazna stran)

Dodatek C

Računalniško orodje za sprotno vrednotenje in naknadno analizo parametrov obnašanja modificiranih tipov prednapetih sider pri preiskavah sider



Izvedba preiskav sidra (PS) praktično ni mogoča brez računalniškega orodja, ki nam že med izvajanjem PS podaja vpogled tako v aktiviranje prostega in veznega dela preskusnega sidra, kot tudi v odpornostne karakteristike veznega dela sidra. To še posebej velja za večkratna sidra z različnimi dolžinami veznih in/ali prostih delov pramen, ki se napenjajo z mononapenjalkami, vzporedno vezanimi na skupni hidravlični sistem. Med izvajanjem PS moramo pri odčitku v vsakem časovnem intervalu zabeležiti veliko podatkov – vedno so to izvlečki posameznih pramen sidra in pomiki glave sidra, v posameznih primerih pa nas zanimajo še raven sile pred korekcijo na izhodiščno raven, čas potreben za korekcijo sile, vmesne točke za opredelitev razbremenilnega dela krivulje pri razbremenitvi sidra iz sile P_i na začetno silo P_a , ipd.. Vse te podatke moramo v realnem času zabeležiti, obdelati in izluščiti najpomembnejše parametre, ki nam podajajo vpogled v obnašanje sidra, na podlagi katerih pri PS presojava o podaljševanju opazovanja na posamezni stopnji sile P_i , o prehodu na naslednjo stopnjo sile P_{i+1} , pri večstopenjskih preskusih nosilnosti (VPN) pa moramo ves čas budno spremljati dogajanje v veznem delu sider, da lahko VPN pravočasno zaključimo in preprečimo popolno porušitev (uničenje) veznega dela sidra. Z istim računalniškim orodjem po končanem terenskem delu PS oz. VPN zajete podatke natančno pregledamo, uredimo, podrobno obdelamo in analiziramo.

Že leta 1999 smo na Zavodu za gradbeništvo Slovenije pripravili algoritem poteka PS po določenih takrat veljavnega priporočila *SIA V 191*, na osnovi katerega smo v programskem jeziku Borland Delphi pripravili računalniški program, s katerim smo lahko vodili in spremljali potek PS običajnih tipov prednapetih sider, katerih napenjanje se je izvajalo s skupno napenjalko. S pojavom in uveljavitvijo sistema napenjanja z mononapenjalkami so se pokazale slabosti takšnega programa z vnaprej natančno definiranim algoritmom, saj je bilo treba spremljati ne samo izvlečke sidra kot celote, pač pa izvlečke vseh posameznih pramen, pri čemer je bilo treba pri odločanju o nadaljnjem poteku PS upoštevati tako obnašanje posameznih pramen kot tudi sidra kot celote, samega poteka algoritma v zaključnem delu PS pa ni bilo več mogoče nedvoumno opredeliti vnaprej. Izkušnje pri praktični uporabi programa so pokazale, da je tak pristop pri spremljanju obnašanja sider pri PS na licu mesta preveč tog in strokovnjaku, ki vodi PS, ne omogoča dovolj odprtih možnosti za prilagajanje trenutnemu dogajanju v veznem delu sidra. Zato smo bili prisiljeni programsko orodje v obliki "zaprtega" algoritma klasičnega računalniškega programa zaradi svoje omejenosti in neprilagodljivosti opustiti, ter ga nadomestiti s prilagodljivejšim računalniškim orodjem.

Leta 2001 smo tako na podlagi istih določil priporočila *SIA V 191* pripravili novo računalniško orodje v okolju razširjenega računalniškega programa Microsoft Excel za obdelavo razpredelnic z intuitivnim uporabniškim vmesnikom ter zmogljivimi orodji za različne oblike izračunov in izdelavo grafov, ki omogoča zelo prilagodljiv in odprt pristop pri zasnovi računalniškega orodja. Takšno okolje lahko uporabimo pri različnih kabljih sider, sestavljenih iz različnega števila pramen, tako pri PS sider napenjanih s skupno napenjalko, kot tudi pri PS sider, katerih pramena bomo napenjali z mononapenjalkami. Vse elemente algoritma predhodnega računalniškega programa smo vključili v eno datoteko za vnos, preračun in analizo podatkov PS, ki smo jo že v izhodiščni verziji zasnovali tako, da je orodje, na podlagi vnosa splošnih podatkov in vnesenega števila stopenj PS, samodejno izvrednotilo dovoljeni območji obeh mejnih sil PS (začetne P_a in preskusne sile P_{pv}), iz katerih smo lahko ročno izbrali vrednosti, na podlagi katerih so se nato avtomatsko izvrednotile posamezne stopnje sil P_i ter pripadajoči minimalni opazovalni časi. Te vrednosti so se prenesle na list za vnos meritve, kamor smo med PS vpisovali vrednosti odčitkov izvlečkov pramen in pomikov glave sidra, na podlagi katerih so se ob znanih časovnih intervalih odčitkov preračunavale vrednosti mer lezenja k , odčitane vrednosti pa so se na vsaki stopnji sile P_i tudi sprotno vnašale v pollogaritemske diagrame prirastkov izvlečkov in časa.

Na osnovi teh diagramov smo se na vsaki stopnje sile P_i odločali o nadaljenem postopku PS v smislu podaljševanja opazovanja oz. možnosti prehoda v naslednji cikel obremenjevanja.

V ločenem listu datoteke so se vneseni odčitki izvlečkov pramen in pomikov glave sidra pri PS avtomatsko preračunavali: za vsako stopnjo sile PS smo preverjali dejanske elastične deformacije kabla sidra glede na teoretično iz vrednotene vrednosti pri razbremenjevanju sidra (t.j. iz sile posamezne stopnje P_i na začetno silo P_a), iz vrednotili smo trajni izvleček na posamezni stopnji Δs_{bl} , kot tudi efektivno prosto dolžino sidra l_f , na kateri je bil kabel sidra pri razbremenjevanju prosto raztegnjen. V tem sklopu smo za vsako fazo stopnje sile P_i PS avtomatsko zbrali tudi podatke o povprečni meri lezenja k_{povp} , največje mere lezenja k_{max} , kot tudi mere lezenja na ročno izbranem merodajnem intervalu opazovanja k_{int} . Na istem listu smo na podlagi teh vrednosti za vse navedene tri tipe mer lezenja (k_{povp} , k_{max} in k_{int}) po metodi najmanjših kvadratov tudi iz vrednotili aproksimacijske parabole, katerih vrednosti so se avtomatsko preslikale v diagram, v katerem se je izrisala tudi odpornost sidra na izvlek R_a . V naslednjem listu datoteke so se na podlagi vnesenih in analiziranih vrednosti PS avtomatsko iz vrednotile tudi vrednosti za izvedbo preskusov nosilnosti sider objekta: območje dopustne preskusne sile P_p ter dopustni vrednosti mer lezenja $k_{adm}(P_p)$ in trajnega izvlečka $\Delta s_{bl,adm}(P_p)$. Na podlagi vnesenih in preračunanih vrednosti so se v tej datoteki avtomatsko generirali tudi vsi relevantni diagrami PS, ki so najpomembnejše parametre PS prikazali tudi v grafični obliki.

C.1 KONCEPT ZASNOVE RAČUNALNIŠKEGA ORODJA ZA IZVEDBO PREISKAV MODIFICIRANIH TIPOV SIDER

Podlaga za koncept novega računalniškega orodja za vodenje in analizo rezultatov PS je bilo orodje zasnovano leta 2001. Čeprav je bilo ključno izhodišče pri pripravi tega orodja odprta zasnova in velika prilagodljivost glede na dogajanja med izvedbo PS, smo s tem orodjem lahko spremljali in obdelovali PS običajnih tipov sider (torej sider z enakimi dolžinami prostega in veznega dela vseh pramen kabla sidra). Orodje v tej osnovni verziji ni bilo primerno za vnos in obdelavo PS modificiranih tipov sider RCP/D-Z in RCP/D-I, pri katerih dolžine prostega in veznega dela pramen posameznih podsider niso enake. Osnovno verzijo orodja smo morali celovito predelati in nadgraditi, tako da smo omogočili vnos, obdelavo in analizo prednapetega sidra z do šestimi prameni s povsem poljubnimi dolžinami prostega in veznega dela sidra, pri čemer pa bodo podatki prikazani za vsak pramen posebej, po podsiderih, kot tudi v povprečju vseh pramen za sidro kot celoto.

Glede na izhodišča razvojno-raziskovalne naloge (RRN) DARS smo morali računalniško orodje zasnovati tako, da bo delovalo tako pri PS do porušitve, kot tudi pri VPN. Zavedali smo se, da bo izvedba preskušanj sider na testnem polju objekta OZ-05 zelo zahtevna, saj bomo morali predvsem pri sidrih tipov RCP/D-Z in RCP/D-I med izvedbo PS in VPN ves čas natančno spremljati obnašanje veznih delov posameznih pramen, podsider, kot tudi sidra kot celote, ter glede na ugotovitve in dosežene vrednosti izvlečkov s , mer lezenja k , efektivnih prostih dolžin l_f , kot tudi trajnih izvlečkov Δs_{bl} , v realnem času prilagajati postopek PS (še posebej pa VPN) preskušane sidra. Poleg tega smo želeli orodje oblikovati tako, da bo prilagojeno tudi za primere, ko bi bili prisiljeni mononapenjalke posameznih pramen na stopnji sile P_i v poljubnem času ločiti od skupnega hidravličnega sistema, kar bi omogočalo nadaljevanje preskusa nosilnosti sidra tudi v primeru odpovedi posameznih pramen sidra. Taka izločitev posameznih mononapenjalk na poljubni stopnji sile P_i tehnično gledano predstavlja precejšno težavo, saj zaradi tega ukrepa porazdelitev sidrne sile na posamezna pramena sidra ne bo več enakomerna, pač pa bo raven sile v izločenih pramenih sidra nižja (odvisna od tlaka olja v hidravličnem sistemu, pri katerem bomo

ventil mononapenjalke zaprli). V preostalih pramenih se bo raven sile posledično zvišala, saj bodo morala preostala pramena prevzeti tudi manjkajoči delež sile izločenih pramen, pri čemer pa moramo paziti, da obremenitev po jeklu preostalih pramen ne bo previsoka. Dejanske ravni sil v pramenih moramo pravilno upoštevati pri vrednotenju efektivnih prostih dolžin l_f , kot tudi pri generiranju vseh diagramov. Očitno je bilo, da bo priprava takšnega vsestranskega orodja zahtevna, njegovo testiranje na praktičnih primerih in iskanje napak pa zelo dolgotrajno, zato smo pri njegovi zasnovi razmišljali tudi o tem, da bi lahko z njim ob manjših spremembah izvajali in analizirali tudi tristopenjske celovite preskuse napenjanja (CPN).

Računalniško orodje za izvedbo terenskih preskušanj v sklopu RRN smo zaradi prilagodljivosti in dobrih izkušenj pri uporabi osnovne verzije orodja, kot tudi iz praktičnih razlogov (časovna omejitev za izdelavo orodja, če smo hoteli RRN zaključiti v predvidenem roku), ponovno izdelali v računalniškem programu Microsoft Excel. Pri pripravi orodja smo izhajali iz računalniškega orodja za PS, zasnovanega leta 2001, katerega osnovni koncept je sicer ostal nespremenjen, vendar pa smo ga morali bistveno nadgraditi in razširiti, saj je bilo treba zagotoviti obdelavo rezultatov modificiranih tipov sider RCP/D-Z in RCP/D-I z različnimi dolžinami prostih delov pramen kabla sidra, ter omogočiti vpogled v obnašanje posameznih pramen, podsider, kot tudi sidra kot celote. Ohranili smo princip delovanja računalniškega orodja – podatke vnesene v *lista 1* in *2* orodje avtomatsko prenaša naprej po ostalih listih iste datoteke, kjer se vrednosti za opredelitev obnašanja karakteristik veznega, kot tudi prostega dela sidra, avtomatsko preračunavajo. Razvoj in izdelavo orodja smo opravili v več fazah:

- Za izvedbo preskušanj na terenu leta 2008 smo morali v čimkrajšem času izdelati orodje, ki bo omogočalo stalni sproti vpogled v vse ključne karakteristike, ki opisujejo delovanje veznega dela sidra, kar je še posebej pomembno pri VPN, kjer nenadna porušitev veznega dela katerekakoli sidra ni bila dopustna. Zato smo v prvi fazi orodje izdelali in preskusili do te mere, da je orodje, na podlagi vnesenih splošnih podatkov in izbranega območja gibanja preskusnih sil ter opredeljenega števila stopenj PS oz. VPN, samodejno generiralo vpisno stran, kamor smo med terenskimi preskusi sproti vpisovali odčitke izvlečkov vseh pramen sidra. Na podlagi teh vrednosti je orodje avtomatsko preračunalo vse ključne parametre obnašanja veznega dela sidra, predvsem mere lezenja posameznih pramen, podsider, kot tudi povprečja vseh pramen (obnašanje sidra kot celote). Poleg navedenih podatkov smo med preskušnji skrbno spremljali gibanje vrednosti trajnih izvlečkov Δs_{bl} , kot tudi efektivnih prostih dolžin l_f , v diagramih $\Delta s - P$, kamor so se zbirno izrisovali vsi odčitki izvlečkov pramen in podsider, pa smo preverjali globalno obnašanje pramen in podsider med PS oz. VPN.
- Po vrnitvi s terenskega preskušanja leta 2008, smo računalniško orodje v drugi fazi nadgradili tako, da je omogočalo podrobnejšo analizo zajetih rezultatov PS in VPN. Pri tem smo se osredotočili na analizo obnašanja modificiranih sider, na podlagi katere bi lahko identificirali obnašanje posameznih pramen in podsider med terenskimi preskusi, obenem pa bi pridobili tudi podatke za nadaljnje analize, pri čemer smo želeli poiskati tudi odgovor na vprašanje, ki ga različni predpisi obravnavajo različno – katera od metod za določitev merodajnih intervalnih mer lezenja, preko njih pa tudi odpornosti veznega dela sidra na izvlek, je najprimerejša.

Pred izvedbo ponovitve preskušanj sider testnega polja leta 2009 smo računalniško orodje za sproti vrednotenje parametrov obnašanja sider pri preskusih nosilnosti v tretji fazi nagradili tako, da smo zajeli vse tiste parametre sidra, ki jih pri preskušanjih sider leta 2008 nismo zajeli oz. spremljali. Med obdelavo in analizo rezultatov PS in VPN sider testnega polja na opornem zidu OZ-05, opravljenih v sklopu RRN leta 2008, se je namreč izkazalo, da se modificirani tipi sider obnašajo na specifičen način

glede na referenčna sidra RCP/D, pri čemer pa se je predvsem pri sidrih tipa RCP/D-Z, deloma pa tudi pri sidrih RCP/D-I, izkazalo, da je med preskušnji prisoten mehanizem popuščanja veznega dela sider, ki je bil posledica izvlečenja veznega dela pramen iz injekcijske mase v notranjosti rebraste PE cevi, torej nismo uspeli v celoti izkoristiti razpoložljive odpornosti sider vzdolž vrtin na vezi s tlemi zaledja. Glede na to, da ob določenih odprtih vprašanjih o delovanjih modificiranih sider ter ugotovitev nekaterih že izvedenih laboratorijskih preskusov izotermne relaksacije pramen po postopku za PS, kot tudi omejenosti izključno le na meritve izvlečkov pramen in skupne sile v sidru, smo najprej izpopolnili računalniško orodje tako, da je med ponovitvami preskušanj leta 2009 omogočalo zajem in opazovanje še dodatnih parametrov. *List 2* orodja (slika C.2) smo nadgradili tako, da smo lahko:

- beležili začetno trenje ob vnosu sile, kot tudi končno trenje ob spuščanju sile, ki nastajata v mononapenjalkah, na podlagi katerega bomo lahko ugotovili, kolikšne so v absolutni vrednosti sile trenja, ter ali so sile trenja odvisne od velikosti sile v sidru,
- v več korakih spuščali silo v sidru ter beležili izvlečke pramen sider, s čimer smo registrirali razbremenjevalni del krivulje vsakega pramena posebej,
- tekom preskušanj vpisovali čase potrebne za povečanje sile iz začetne stopnje sile P_a na stopnjo sile tekoče faze P_i , ki so služili kot referenčni časi za vnos sile pri kasnejših laboratorijskih preskusih izotermne relaksacije pramen,
- glede na dosedanje izkušnje, da so padci sile v sidru pred izvedbo odčitkov v posameznih časovnih intervalih tudi eden od pokazateljev delovanja veznega dela sidra, smo si med preskušnji na *list 2* med terenskim preskušanjem zapisovali tudi dejansko raven sile P_i v sidru pred izvedbo popravkov, na podlagi katerih lahko ugotovimo, kolikšen je bil padec sile pred izvedbo odčitka v posameznem časovnem intervalu.

V nadaljevanju tega poglavja podajamo opis zasnove, oblikovanja in delovanja končne verzije računalniškega orodja na primeru VPN sidra SBz-60 tipa RCP/D-I, ki smo ga dne 12.05.2009 izvedli na testnem polju opornega zidu OZ-05.

Že od samega začetka smo v računalniško orodje vključili tudi list, v katerem se na podlagi merodajnih mer lezenja po metodi najmanjših kvadratov določajo aproksimacijske krivulje za pramena, podsidra, kot tudi sidro kot celoto, vendar se je izkazalo, da je zaradi majhnega števila točk, dobljenih pri PS in VPN, takšno modeliranje manj primerno oz. za prakso manj uporabno.

C.2 VNOS IN OSNOVNO VREDNOTENJE ODČITANIH VREDNOSTI

Pred začetkom terenskega preskusa nosilnosti sidra moramo na *listu 1* računalniškega orodja (slika C.1) vpisati vse osnovne podatke, na podlagi katerih se generirajo in opredelijo parametri za izvedbo PS oz. VPN, ki so potrebni za delovanje orodja. V ta sklop, poleg povsem splošnih podatkov o preskusu, sodijo ključni podatki o sidru: dolžini prostega in veznega dela pramen sidra, število in karakteristike pramen kabla sidra, število stopenj preskusa, ter predvidene sile zaklinjenja P_0 in preskusne sile P_p sider objekta, na podlagi katerih se določita dovoljeni območji začetne sile P_a in preskusne sile P_{pv} . Po poljubni ročni izbiri obeh vrednosti iz predlaganih območij se izvede preračun stopenj sile, avtomatsko pa se na za vsako stopnjo sile P_i določijo tudi minimalni opazovalni časi.

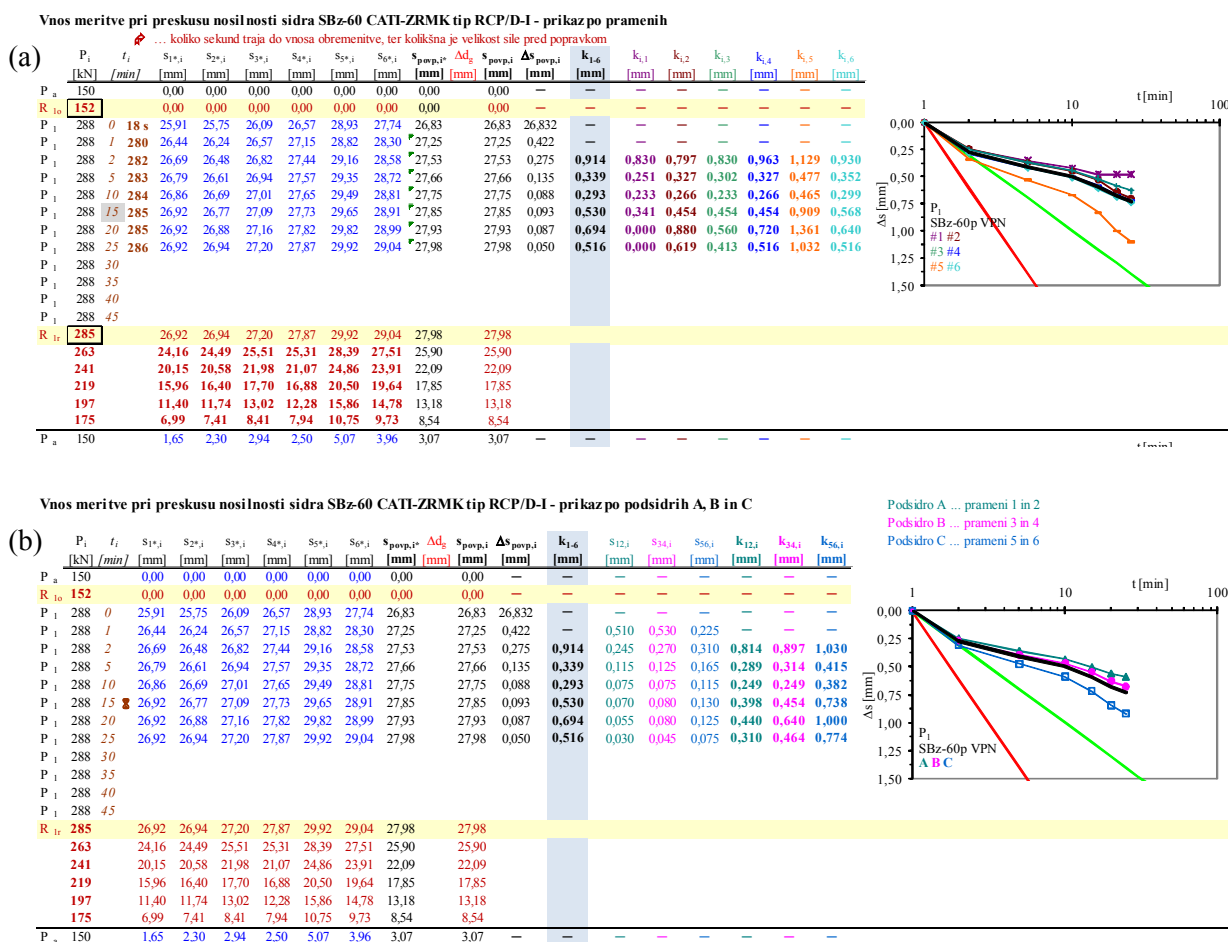
Poročilo preskusa nosilnosti sidra SBz-60																																																																								
Lokacija / trasa: AC Slivnica Pesnica																																																																								
Sidrani objekt: OZ-05																																																																								
Naročnik: DARS RRN 2006																																																																								
Datum preiskave sidra: 12.5.2009																																																																								
Starost sidra [dni]: 382																																																																								
Izvajalec preiskave sidra: GEOT d.o.o.																																																																								
Oznaka sidra: SBz-60																																																																								
Tip sidra: CATI-ZRMK tip RCP/D-I																																																																								
Število pramen sidra: 6																																																																								
Terenski preskus sidra:																																																																								
- GEOT: Umek																																																																								
- ZAG: Klemenc,Pagon,Konjar																																																																								
Obdelava in analiza: mag. Iztok Klemenc																																																																								
Ljubljana, 23.06.2009																																																																								
Dolžine delov sidra:																																																																								
<table border="1"> <thead> <tr> <th>l_p [m]</th> <th>l_v [m]</th> <th>l [m]</th> <th>l_{odr} [m]</th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>28,0</td> <td>7,0</td> <td>35,0</td> <td>0,28</td> <td>#1</td> </tr> <tr> <td>28,0</td> <td>7,0</td> <td>35,0</td> <td>0,23</td> <td>#2</td> </tr> <tr> <td>30,4</td> <td>4,6</td> <td>35,0</td> <td>0,28</td> <td>#3</td> </tr> <tr> <td>30,4</td> <td>4,6</td> <td>35,0</td> <td>0,23</td> <td>#4</td> </tr> <tr> <td>32,8</td> <td>2,2</td> <td>35,0</td> <td>0,28</td> <td>#5</td> </tr> <tr> <td>32,8</td> <td>2,2</td> <td>35,0</td> <td>0,23</td> <td>#6</td> </tr> </tbody> </table>										l_p [m]	l_v [m]	l [m]	l_{odr} [m]		28,0	7,0	35,0	0,28	#1	28,0	7,0	35,0	0,23	#2	30,4	4,6	35,0	0,28	#3	30,4	4,6	35,0	0,23	#4	32,8	2,2	35,0	0,28	#5	32,8	2,2	35,0	0,23	#6																												
l_p [m]	l_v [m]	l [m]	l_{odr} [m]																																																																					
28,0	7,0	35,0	0,28	#1																																																																				
28,0	7,0	35,0	0,23	#2																																																																				
30,4	4,6	35,0	0,28	#3																																																																				
30,4	4,6	35,0	0,23	#4																																																																				
32,8	2,2	35,0	0,28	#5																																																																				
32,8	2,2	35,0	0,23	#6																																																																				
<table border="1"> <thead> <tr> <th>$f_{p0,1k}$ [MPa]</th> <th>f_{tk} [MPa]</th> <th>E_p [kN/mm²]</th> <th>Kot sidra [°]</th> <th>$R_{1, pred}$ [MΩ]</th> <th>$R_{1, po}$ [MΩ]</th> <th>$R_{1, po}$ [MΩ]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1670</td> <td>1860</td> <td>194,4</td> <td>15</td> <td>-</td> <td>105,2</td> <td>32,8</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>2,2</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>35,0</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>0,28</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>0,23</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>35,0</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>0,28</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>0,23</td> </tr> </tbody> </table>										$f_{p0,1k}$ [MPa]	f_{tk} [MPa]	E_p [kN/mm ²]	Kot sidra [°]	$R_{1, pred}$ [MΩ]	$R_{1, po}$ [MΩ]	$R_{1, po}$ [MΩ]	1670	1860	194,4	15	-	105,2	32,8							2,2							35,0							0,28							0,23							35,0							0,28							0,23
$f_{p0,1k}$ [MPa]	f_{tk} [MPa]	E_p [kN/mm ²]	Kot sidra [°]	$R_{1, pred}$ [MΩ]	$R_{1, po}$ [MΩ]	$R_{1, po}$ [MΩ]																																																																		
1670	1860	194,4	15	-	105,2	32,8																																																																		
						2,2																																																																		
						35,0																																																																		
						0,28																																																																		
						0,23																																																																		
						35,0																																																																		
						0,28																																																																		
						0,23																																																																		
Izvajalec vrtnanja: GEOT, d.o.o.																																																																								
Izvajalec injektiranja: GEOT, d.o.o.																																																																								
Datum vgradnje sidra: 25.4.2008																																																																								
Količina cementa [kg]: 800																																																																								
Količina IM [l]: 607																																																																								
Čas injektiranja [min]:																																																																								
Injek. tlak [bar]:																																																																								
T [°C]:																																																																								
Pretočnost [s]:																																																																								
Oprema za izvedbo preskusa nosilnosti sidra:																																																																								
Hidraulični sistem: DSI oznaka: 77-193A kapaciteta/hod: 300 mm																																																																								
Tip dinamometra: SISGEO oznaka: L216V150 št. 0629377																																																																								
Tip merilnika R_f : Metrel Iso 1000 SI E-7-10 št. 96102675																																																																								
Merjenje izvlečne dolžine pramen: digitalne merilne urice (nazivna ločljivost 1/100 mm)																																																																								
Merjenje pomika objekta: -																																																																								
Določitev nivojev obremenitev med preskusom nosilnosti sidra:																																																																								
Štev. stopenj obremenitve: 8																																																																								
ΔP [kN]: 138																																																																								
$P_{a, min}$ [kN]: 125,4																																																																								
P_0 [kN]: 450																																																																								
R_f [kN]: 1570																																																																								
$P_{a, max}$ [kN]: 188,1																																																																								
izbrana P_a [kN]: 150																																																																								
$P_{pv, min} = 1,67 P_0$ [kN]: 751,5																																																																								
izbrana P_{pv} [kN]: 1254																																																																								
$P_{pv, max} = 95\% A_p f_{p0,1k}$ [kN]: 1339,3																																																																								
stopnja:																																																																								
izbrane stopnje:																																																																								
<table border="1"> <thead> <tr> <th>P_i [kN]</th> <th>P_i [kN]</th> <th>$\Delta s_{el, teor}$ [mm]</th> <th>t_{min} [min]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>150</td> <td>150</td> <td>0,0</td> <td></td> </tr> <tr> <td>288</td> <td>288</td> <td>23,8</td> <td>15</td> </tr> <tr> <td>426</td> <td>426</td> <td>47,6</td> <td>30</td> </tr> <tr> <td>564</td> <td>564</td> <td>71,4</td> <td>30</td> </tr> <tr> <td>702</td> <td>702</td> <td>95,2</td> <td>15</td> </tr> <tr> <td>840</td> <td>840</td> <td>119,0</td> <td>15</td> </tr> <tr> <td>978</td> <td>978</td> <td>142,8</td> <td>15</td> </tr> <tr> <td>1116</td> <td>1116</td> <td>166,6</td> <td>15</td> </tr> <tr> <td>1254</td> <td>1254</td> <td>190,4</td> <td>60</td> </tr> </tbody> </table>										P_i [kN]	P_i [kN]	$\Delta s_{el, teor}$ [mm]	t_{min} [min]	150	150	0,0		288	288	23,8	15	426	426	47,6	30	564	564	71,4	30	702	702	95,2	15	840	840	119,0	15	978	978	142,8	15	1116	1116	166,6	15	1254	1254	190,4	60																							
P_i [kN]	P_i [kN]	$\Delta s_{el, teor}$ [mm]	t_{min} [min]																																																																					
150	150	0,0																																																																						
288	288	23,8	15																																																																					
426	426	47,6	30																																																																					
564	564	71,4	30																																																																					
702	702	95,2	15																																																																					
840	840	119,0	15																																																																					
978	978	142,8	15																																																																					
1116	1116	166,6	15																																																																					
1254	1254	190,4	60																																																																					
preskusna sila P_{pv} [kN]: 1254																																																																								

Slika C.1: List 1 računalniškega orodja za vrednotenje in analizo preiskave sidra.

Figure C.1: Sheet 1 of the software tool for evaluation and analysis of an anchor's investigation test.

Vsi potrebni podatki za delovanje orodja med preiskavo sidra se avtomatsko prenesejo na list 2, kamor se direktno vpisujejo odčitane vrednosti sil v sidru kot tudi izvlečki posameznih pramen, na podlagi katerih se avtomatsko preračunavajo vrednosti mer lezenja pramen $k_{i,j}$ kot tudi povprečna mera lezenja sidra k_{1-6} . Izračunane mere lezenja na sliki C.2a v diagramih prirastkov izvlečkov v odvisnosti od logaritma časa ($\Delta s - \log t$) predstavljajo nagib krivulj posameznih pramen, podsider in sidra kot celote.

Za sidra tipa RCP/D-Z in RCP/D-I je bilo ključnega pomena spremljati dogajanje tudi po parih pramen istih dolžin l_v in l_{fr} (podsiderih), zato so se podatki iz lista 2 avtomatsko prepisali tudi na list 3 za vnos odčitkov preračunanih po podsiderih (slika C.2b), kjer so se sprotno izračunavale tudi vrednosti mer lezenja po podsiderih A do C (podsidro A sta vedno sestavljala pramena z najkrajšim prostim delom, medtem ko je bilo na drugi strani podsidro C sestavljeno iz obeh pramen z najdaljšim prostim delom).

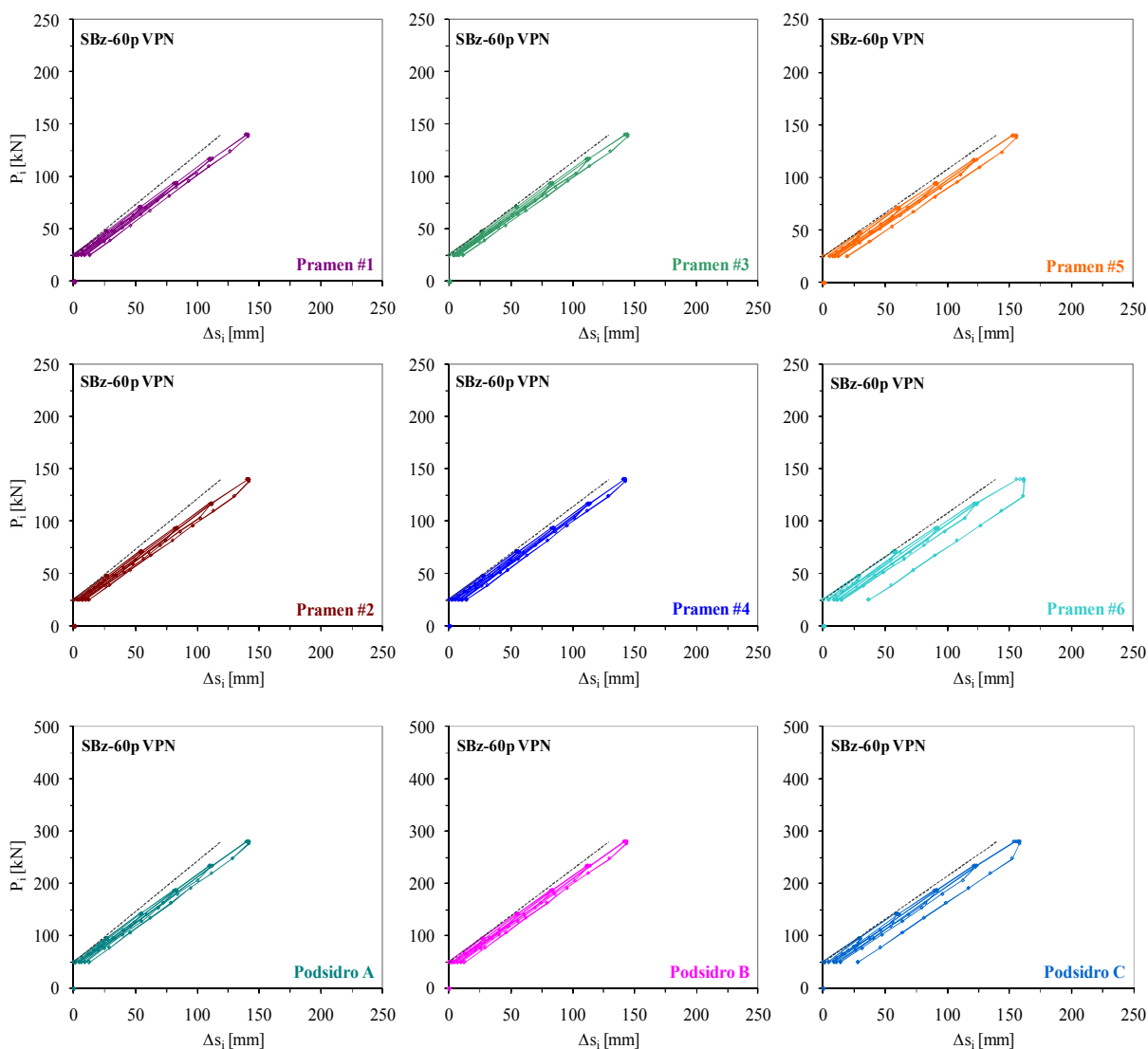


Slika C.2: Izsek lista 2 računalniškega orodja s podatki o obnašanju pramen in sidra kot celote (a), izsek lista lista 3 s podatki o obnašanju podsider (b).

Figure C.2: Section of sheet 2 of the software tool with data about behaviour of strands and anchor as a whole (a), section of sheet 3 with data about behaviour of anchor units (b).

Za globalni vpogled v obnašanje posameznega pramena oz. podsidera se vse vrednosti odčitkov pramen oz. podsider sprotro vrstujejo v skupni zbirni diagram $\Delta s - P$. Na sliki C.3 je prikazan primer takšnih diagramov za primer VPN modificiranega sidra tipa RCP/D-I, pri čemer je razporeditev pramen v prikazih vedno takšna, da pramena #1 in #2 sestavljata podsidero A, pramena #3 in #4 tvorita podsidero B, preostala pramena #5 in #6 pa sestavljata podsidero C. Zaradi boljše primerjave smo diagrame sestavnih pramen kabla sidra na sliki C.3 razporedili tako, da se diagrama $\Delta s - P$ sestavnih pramen podsidera nahajata nad diagramom $\Delta s - P$ tistega podsidera, ki ga tvorita. V takšnem prikazu so na enem mestu dejansko zbrane pravzaprav vse ključne informacije (elastični in trajni izvlečki) v zvezi z obnašanjem prostih delov pramen in podsider, ki omogočajo njihovo medsebojno primerjavo obnašanja na globalni ravni, vendar pa je prikaz premalo natančen, da bi lahko razbrali vrednosti oz. specifičnosti obnašanja. V kolikor pri PS odčitujemo vmesne vrednosti izvlečkov pramen pri razbremenjevanju (t.j. pri spuščanju s tekoče stopnje sile P_i na raven začetne sile P_a), potem pri analizi obnašanja sidra uporabljamo diagrame iz lista 4b orodja, kjer se izrisujejo tudi vrednosti razbremenilnega dela krivulje. Za opredelitev krivulje razbremenilnega dela histereze moramo v vsaki fazi PS celotno območje sile med silo tekoče stopnje P_i in začetno silo P_a razdeliti na zadostno število intervalov. Odločili smo se, da bomo v sklopu razbremenitve s sile P_1 naredili šest odčitkov, nato pa bomo število odčitkov povečevali tako, da smo pri

razbremenitvi z ravni preskusne sile P_{pv} izvedli po enajst odčitkov. Diagrami brez vrisanega razbremenilnega dela krivulj se nahajajo na *listu 4a*.

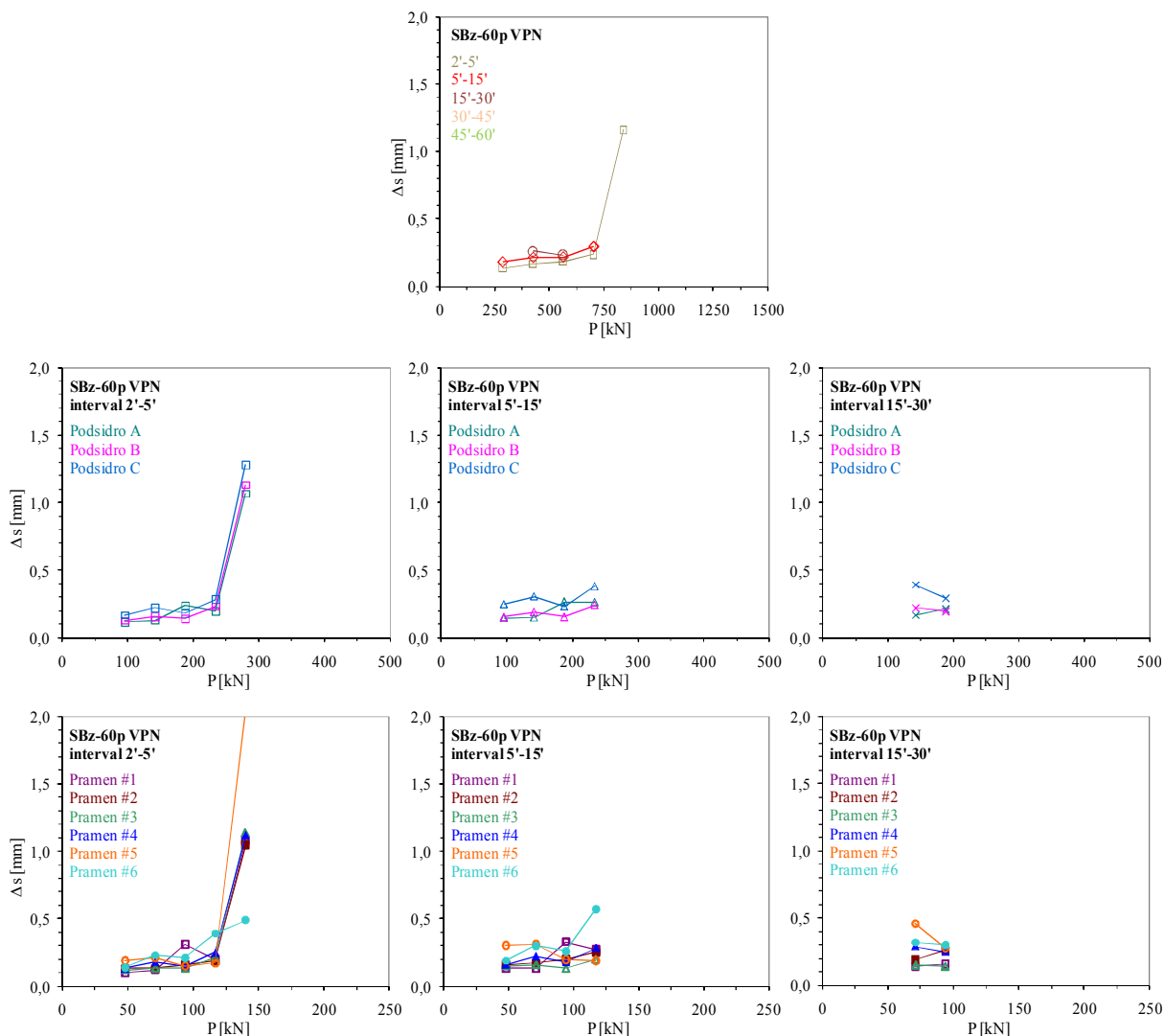


Slika C.3: Krivulje sila-izvleček za pramena (#1 to #6) in podsidra (A, B in C) iz *lista 4b* računalniškega orodja.

Figure C.3: Load-extension curves for strands (#1 to #6) as well as for anchor units (A, B and C) from *sheet 4b* of the software tool.

Za primerjavo dejanskega obnašanja sider objekta z obnašanjem preskusnih sider, smo na *listu 5* zbrali tudi prirastke pomikov posameznih pramen na stopnjah sile P_i , izmerjenih na glavi sidra v tipičnih časovnih intervalih. Na podlagi prirastkov pramen se v orodju v posameznih časovnih intervalih na različnih ravneh stopenj sil P_i avtomatsko izvednotijo tudi prirastki podsider, kot tudi povprečni prirastki na ravni sidra. Izvednotene vrednosti so na *listu 5* orodja zbrani po preglednicah, zaradi boljše vizualne predstave pa so prikazani tudi grafično: na *sliki C.4* je v zgornjem delu slike podan diagram prirastkov pomikov za sidro kot celoto (povprečje izvlečkov vseh pramen kabela sidra), v srednji vrsti so podani diagrami prirastkov pomikov za podsidra, v spodnji vrsti pa diagrami prirastkov pomikov za vsak posamezni pramen. Vsi diagrami se vrednotijo po posameznih časovnih intervalih opazovanja,

zato je število odčitkov (s tem pa tudi prirastkov pomikov) v začetnih časovnih intervalih veliko – v vseh primerih se obnašanje sidra opazuje vsaj 15 minut (v nadaljevanju: 15'), medtem ko so podaljšana opazovanja običajno redkejša ali pa jih sploh ni (časovni intervali 15'-30', 30'-45' in 45'-60').



Slika C.4: Diagrami s prirastki pomikov Δs izmerjeni na pramenih v območju glave sidra, prikazani za sidro kot celoto, za podsidra (A, B in C) ter pramena (#1 do #6) iz lista 5 računalniškega orodja.

Figure C.4: Diagrams from sheet 5 of the software tool with increments of displacements Δs measured in the region of anchor head on strands, presented for anchor as a whole, for anchor units (A, B and C) as well as for strands (#1 to #6).

C.3 VREDNOTENJE EFEKTIVNIH PROSTIH DOLŽIN IN TRAJNIH IZVLEČKOV

Med sestavljanjem sidra v proizvodnem obratu se vsak pramen v območju prostega dela (t.j. v območju računске proste dolžine l_{fr}) namasti in vstavi v PE cev za oplaščenje pramena. Na tem prostem delu pramena se vsak pramen med PS po principu elastične vzmeti razteguje in stiska. Na veznem delu sidra l_v so pramena gola in zalita v cementni injekcijski masi, vendar pa se pri vnosu stopnje sile P_i

med PS zaradi neenakosti elastičnega modula jeklenega pramena in injekcijske mase v njej pojavijo razpoke, zaradi česar se pramen med PS razteza in krči tudi v območju razpokane injekcijske mase. V tem lokalnem območju začetka veznega dela se pramena zaradi trenja sicer ne raztegujejo in stiskajo popolnoma neovirano, vendar pa ta del vseeno prispeva k povečanju proste dolžine pramena. Vpogled v dejansko obnašanje pramen sidra med PS podaja efektivna prosta dolžina l_f , ki jo lahko po vsaki stopnji sile P_i PS izračunamo na podlagi znanih karakteristik kabla sidra (površine prečnega prereza A_p in modula elastičnosti E_p) in elastičnega skrčka Δs_{el} pri razbremenitvi pramena s sile P_i na silo P_a :

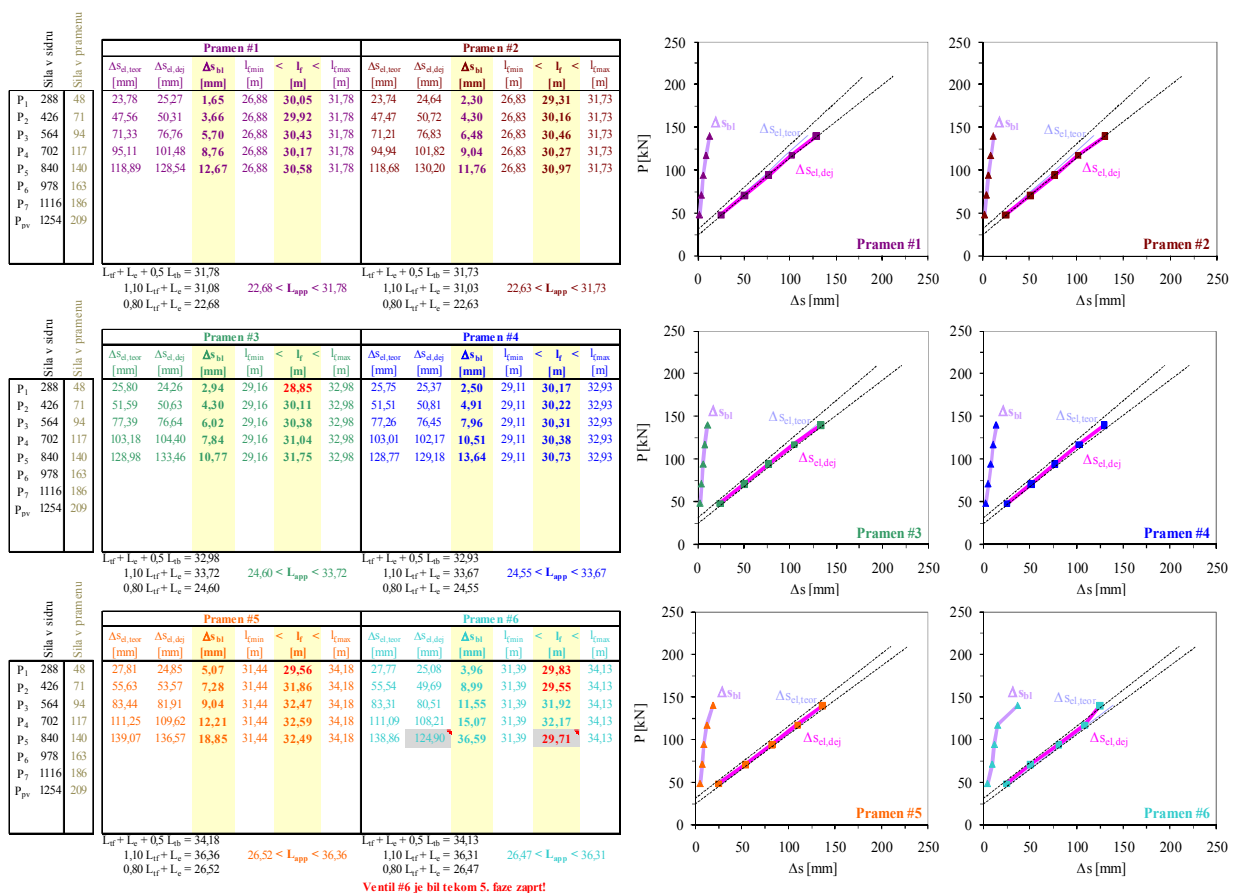
$$l_f(P_i) = \frac{\Delta s_{el}}{P_i - P_a} \cdot A_p \cdot E_p. \quad (C.1)$$

Vrednost efektivne proste dolžine l_f mora ležati znotraj predpisanega območja:

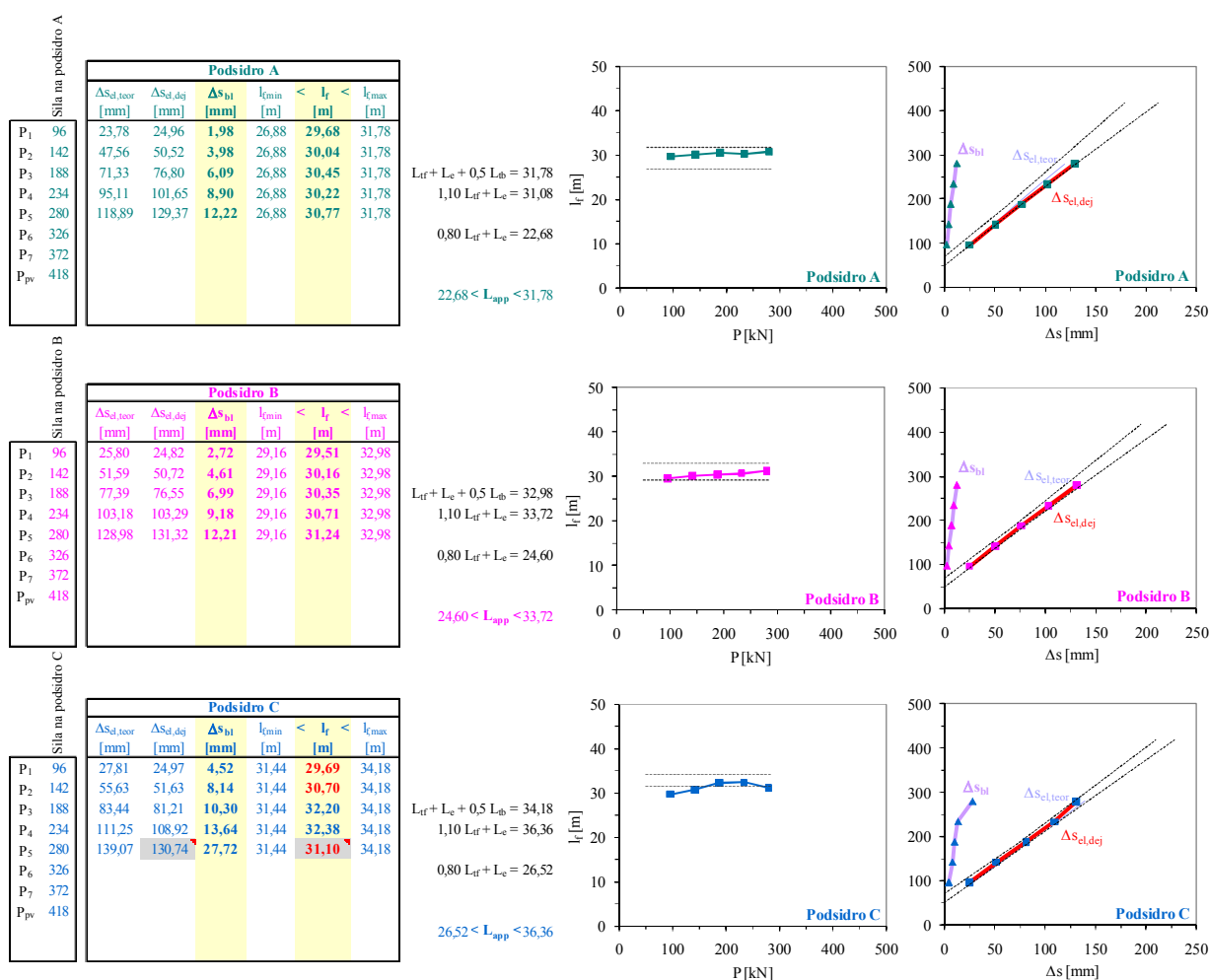
$$0,95 \cdot l_{fr} \leq l_f(R_a) \leq l_{fr} + 0,5 \cdot l_v \quad SIA 267/1, \quad (C.2)$$

$$0,80 \cdot l_{fr} + l_{odr} \leq l_f(R_a) \leq \max\{l_{fr} + l_{odr} + 0,5 \cdot l_v, (1,10 \cdot l_{fr} + l_{odr})\} \quad EN 1537, \quad (C.3)$$

kjer je l_v dolžina veznega dela pramena, l_{odr} pa odrezna dolžina pramena sidra (potrebna za namestitvev mononapenjalk med izvedbo napenjanja in zaklinjenja sidra, merjena od zagozde v glavi sidra do mesta oprijema čeljusti napenjalk). Izvrednotene vrednosti l_f in Δs_{bl} so v orodju zbrane v preglednicah, za nazornejšo predstavitev pa so prikazane tudi v diagramih in sicer ločeno po posameznih pramenih na listu 6a (slika C.5), kot tudi ločeno po podsidrih na listu 6b (slika C.6).



Slika C.5: Efektivne proste dolžine l_f in trajni izvlečki Δs_{bl} pramen iz lista 6a računalniškega orodja. Figure C.5: Apparent free lengths l_f and permanent displacements Δs_{bl} for strands from sheet 6a of the software tool.



Slika C.6: Efektivne proste dolžine l_f in trajni izvlečki ΔS_{bl} po podsidih iz lista 6b računalniškega orodja.

Figure C.6: Apparent free lengths l_f and permanent displacements ΔS_{bl} for anchor units from sheet 6b of the software tool.

Če sta v enačbah C.2 in C.3 prekoračeni zgornji meji efektivne proste dolžine, moramo bodisi ustrezno povečati dolžino veznega dela pramena l_v bodisi ustrezno zmanjšati odpornost sidra na izvlek, ki je merodajna za določitev dopustne sile zaklinjenja. Prekoračitev spodnje meje efektivne proste dolžine kaže na preveliko trenje oz. adhezijo v področju proste dolžine pramena. V tem primeru lahko poskusimo prekomerno trenje in adhezijo premagati z vrsto obremenjevalnih ciklov $P_a - P_{pv} - P_a$; v kolikor ta poskus ne uspe, mora izvajalec pri izvedbi nadaljnjih sider sprejeti ustrezne ukrepe, npr. povečati premer vrtine, spremeniti metodo vrtanja ipd., njihovo učinkovitost pa mora dokazati z dodatnimi PS. V nasprotnem primeru moramo koristno računsko sidrno silo v uporabnem stanju zmanjšati za delež sile na račun prekomernega trenja in adhezije.

Po vsaki stopnji PS, ko se pramena sidra razbremenijo iz tekoče stopnje sile P_i na začetno silo P_a , se izvedejo odčitki pramen na ravni začetne sile P_a , ki opredeljujejo trajne (neelastične) izvlečke pramen ΔS_{bl} . Iz primerjave vrednosti ΔS_{bl} med posameznimi prameni ter v kombinaciji z efektivno prosto dolžino l_f lahko sklepamo na mehanizem delovanja veznega dela, kot tudi sklepamo o morebitnem popuščanju in izvlečenju veznih delov posameznih pramen iz injekcijske mase.

C.4 DOLOČANJE IN ANALIZA MER LEZENJA PO RAZLIČNIH METODAH IN DOLOČITEV ODPORNOSTI SIDER NA IZVLEK

Kot smo že zapisali računalniško orodje na podlagi odčitanih vrednosti izvlečkov posameznih pramen med PS sprotno preračunava mere lezenja k pramen in podsider. Iz diagramov na [sliki C.2](#) je razvidno, da se vrednosti k ves čas opazovanja na posamezni stopnji sile P_i spreminjajo, zato moramo poiskati po eno reprezentativno mero lezenja za vsako stopnjo sile P_i PS. Po končanem terenskem delu PS bomo vse reprezentativne mere lezenja vrisali v skupni diagram, s čimer bomo dobili odsekoma ravno krivuljo mer lezenja v odvisnosti stopnje sile P_i . Presečišče te krivulje s kritično mero lezenja $k_{krit} = 2$ mm bo določalo mejno odpornost preskusnega sidra na izvlek R_a . Postavlja se problem, na kakšen način izbrati reprezentativne mere lezenja k oz. kako jih ovrednotiti na vsaki stopnji sile P_i ? Glede na to, da se mere lezenja k z vsakim izvedenim odčitkom ves čas spreminjajo, moramo poiskati tisto vrednost mere lezenja, ki bo ustrezno opisovala oz. povzemala obnašanje sidra na posamezni stopnji sile P_i . Taka vrednost bo lahko na zadovoljiv način povzemala lezenje veznega dela sidra le, če bo zajemala več zaporednih časovnih intervalov v zadnjem delu opazovanja na posamezni stopnji sile P_i , v katerih se v tleh vplivi začetne motnje napetostno-deformacijskega stanja zaradi relativno hitrega vnosa sile že umirijo, lezenje veznega dela sidra se stabilizira, prav tako pa se v tem času umiri tudi območje glave sidra, v katerem se preko čeljusti mononapenjalk vnaša sila v pramena. Takšno opisno mero lezenja poimenujmo **merodajna intervalna mera lezenja** k_{int} .

Stališče stroke o načinu določitve merodajne intervalne mere lezenja k_{int} se je s časom spreminjalo, vendar pa tudi v istem časovnem obdobju ni povsod enako. Pogosto določitev te vrednosti v veljavnih predpisih niti ni zajeta, kar velja tudi za veljavne evropske standarde. Na drugi strani so se v obdobju zadnjih 40 let uporabljali različni bolj ali manj jasno opredeljeni pristopi, ki način določitve k_{int} različno opredeljujejo, kar pa je po svoje tudi pričakovati, saj so tudi zahteve posameznih predpisov glede trajanja opazovanja na posamezni stopnji sile različne. V računalniško orodje smo vključili naslednje metode določitve k_{int} :

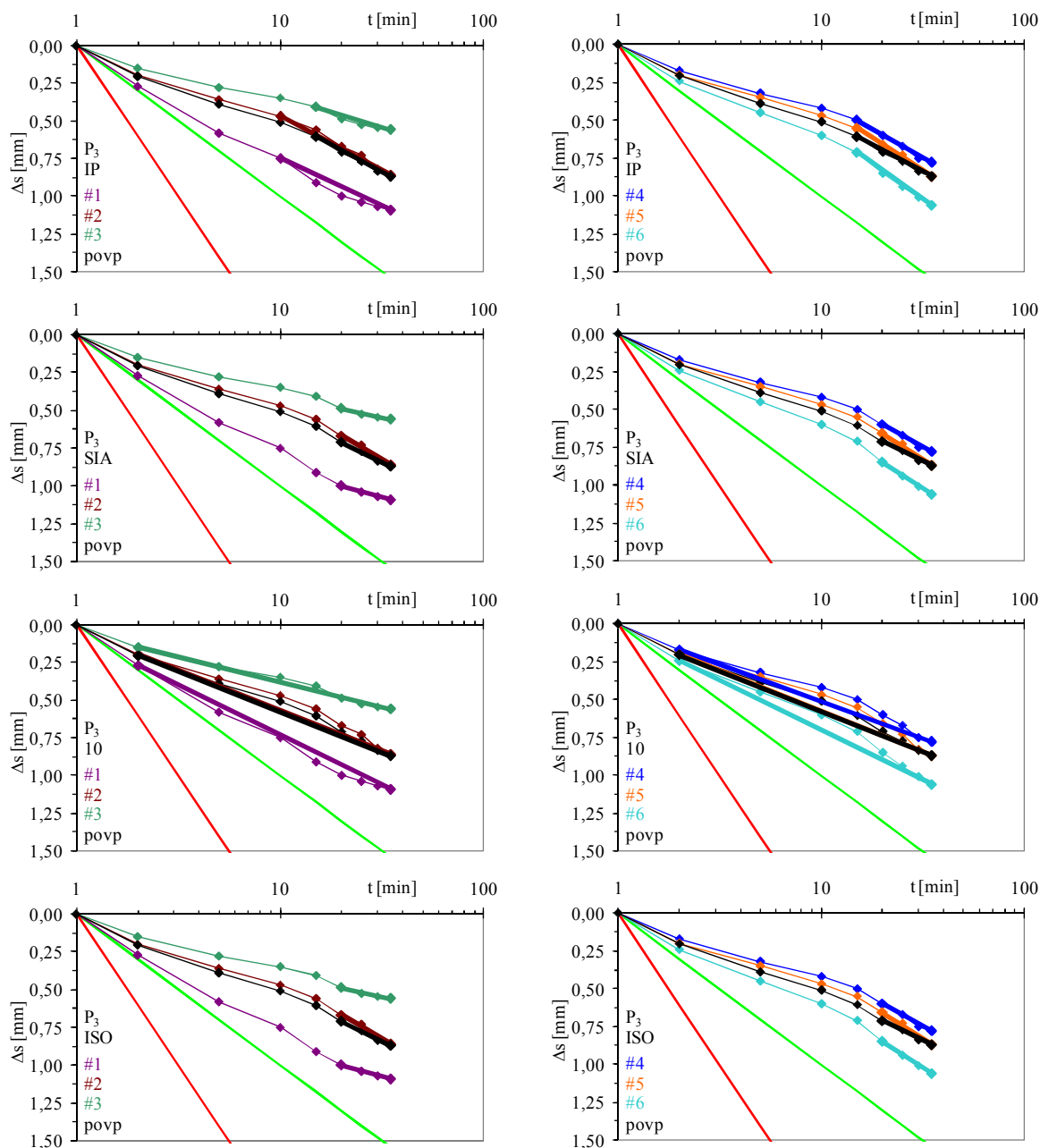
- Nemški standard *DIN 4125* iz 1970-ih določa, da se merodajna intervalna mera lezenja k_{int} določi kot nagib daljice med odčitkoma izvlečkov opravljenih v časovnih trenutkih t_1 in $t_2 = 10 \cdot t_1$, zato smo to metodo poimenovali **metoda 10**. Ta metoda je najstarejša in je zastarela iz dveh razlogov: po eni strani se na tako dolgem intervalu izrazite popustitve sider v posamičnih časovnih trenutkih zaradi povprečenja z vrednostmi ostalih časovnih trenutkov praktično zgladijo, po drugi strani pa smo na nižjih stopnjah sile prisiljeni sidro opazovati tako dolgo, da je zadoščeno pogoju $t_2 = 10 \cdot t_1$, čeprav to zaradi obnašanja veznega dela sidra sploh ne bi bilo potrebno.
- Švicarsko priporočilo *SIA V 191*, nato pa tudi standard *SIA 267/1*, podajata bolj zapleten pristop, ki minimalni potrebni opazovalni čas na posamezni stopnji sile opredeljuje na podlagi dejansko doseženih mer lezenja k . V splošnem je minimalni opazovalni čas 15', ki velja v vseh primerih, ko je prirastek izvlečka Δs v intervalu 5'-15' manjši od 0,20 mm. Če je ta vrednost prekoračena, ali pa je že v intervalu 2'-5' $\Delta s > 0,20$ mm, potem se o nadaljnjem postopku odločamo na podlagi pollogaritemskega diagrama lezenja ($\Delta s - \log t$). Če v diagramu lezenja naklon linije $\Delta s - \log t$ nedvoumno upada, smemo opazovalni čas še nadalje pustiti 15'. V nasprotnem primeru se opazovalni čas podaljša za tako dolgo, dokler v območju zadnjih merilnih intervalov ni mogoče konstruirati enolične ravne črte ali pa dokler naklon krivulje lezenja ne začne nedvoumno upadati. V kolikor je naklon ravne črte bolj strm od naklona referenčne premice ($k = 1$ mm), opazovalni čas zadošča; v kolikor dobimo ravno črto, ki je bolj strma od te referenčne premice, opazovalni čas še podaljšamo, dokler mera lezenja na podlagi osmih merilnih intervalov ni enolično določljiva ali dokler

naklon krivulje lezenja ne začne nedvoumno upadati. V kolikor se naklon linije $\Delta s - \log t$ na koncu minimalnega opazovalnega časa poveča, opazovalni čas podaljšamo, dokler mera lezenja ni enolično določljiva oz. dokler naklon krivulje lezenja ne začne spet upadati ali dokler ni dokazano, da mera lezenja prekoračuje mero lezenja k_{krit} . Po opisanem postopku je določitev minimalnega opazovalnega časa sicer jasna, vendar pa ne glede na to ni nikjer jasno podano, koliko zadnjih odčitkov izvlečkov (točk) je potrebno vzeti za opredelitev merodajnih intervalnih mer lezenja k_{int} . Postopek določitve k_{int} , zasnovan na podlagi švicarskih predpisov, smo poimenovali **metoda SIA**, v kateri smo pri določitvi potrebnega števila zadnjih točk za izvednotenje k_{int} poskušali smiselno zajeti zahteve za določitev minimalnega opazovalnega časa: pri opazovanjih zaključenih do 15' smo upoštevali interval 5'-15', pri opazovanjih daljših od 15' pa smo v primerih, ko je bil nagib zadnjih štirih točk manjši od $k = 1$ mm upoštevali zadnje štiri točke, če je bil zadnjih osmih točk v okviru območja $1 \text{ mm} < k < 2 \text{ mm}$ smo upoštevali zadnjih osem točk, ko pa je bil presežen k_{krit} pa smo upoštevali tiste zadnje intervale, na katerih je bila presežena k_{krit} .

- Pri uporabi *SIA V 191* in *SIA 267/1* pri izvedbi in vrednotenju PS trajnih prednapetih geotehničnih sider zadnjih 15 let v naši praksi se je izkazalo, da so določila v zvezi z določitvijo minimalnega opazovalnega časa primerna, vendar pa v predpisih ni bilo opredeljeno, kako določiti merodajne intervalne mere lezenja k_{int} . Poleg tega moramo upoštevati tudi razpoložljivo opremo (odčitavanje izvlečkov pramen neposredno na cilindrih napenjalk in (ne)upoštevanju pomikov glav sider ter ločljivosti dinamometrov) kot tudi pogoje na gradbiščih, pod katerimi se PS izvajajo. Čeprav je v dostopnih predpisih možno prepoznati idejo, da se vrednosti k_{int} določajo na podlagi zadnjih izvedenih odčitkov izvlečkov na zadnji stopnji preskusov nosilnosti, pa na drugi strani ne moremo povsem zanemariti dogajanja predhodnih odčitkov na isti stopnji sile. Po naši oceni ne moremo povsem spregledati, ali so bile v teh točkah izvednotene vrednosti k nizke, ali pa je bila pri posameznem odčitku morda presežena celo vrednost k_{krit} , zato v praksi za določitev k_{int} uporabljamo pristop, ki smo ga poimenovali metoda inženirske presoje – **metoda IP**. Po tej metodi pri izvedbi PS sicer sledimo postopku švicarskih predpisov, vendar pa območja intervalov (t.j. kolikšen del krivulje v diagramu $\Delta s - \log t$ povzema obnašanje veznega dela sidra na ravni posamezne sile P_i), na podlagi katerih izvednotimo k_{int} , opredelimo po subjektivni oceni in glede na specifičnosti obnašanja sidra med izvedbo PS.
- Najbolj neposredno navodilo za določitev k_{int} podaja osnutek standarda *prEN ISO 22477-5*, po katerem se merodajna intervalna mera lezenja k_{int} vedno določa na podlagi zadnjih dveh intervalov. Ob tem velja opozoriti, da se odčitki v obeh standardih v območju od 15' naprej glede na ostale standarde izvajajo bolj poredko, zato je posledično zajeti merodajni interval daljši: če je bil zadnji odčitek izveden v 45', potem se k_{int} določi na podlagi zadnjih treh odčitkov (časovni interval 20'-45'), pri čemer pa bi po švicarskih predpisih v območju 20'-45' opravili kar šest odčitkov! Postopek določitve k_{int} po *prEN ISO 22477-5* smo poimenovali **metoda ISO**.

V računalniškem orodju smo za vsako od naštetih štirih metod pripravili po en list za mere lezenja pramen #1 do #6. Na teh listih smo po zgoraj navedenih principih vrednotili merodajne mere lezenja k_{int} za posamezne stopnje sile P_i PS. V računalniškem orodju merodajne mere lezenja k_{int} za pramena določamo na naslednjih listih: po metodi IP na *listu 7*, po metodi SIA na *listu 8*, po metodi 10 na *listu 9* in po metodi ISO na *listu 10*. Na vsakem se izračunane vrednosti k_{int} zaradi boljše preglednosti ločeno prikazujejo v diagramih za pramena #1 do #3 in ločeno za pramena #4 do #6. Za primer vzorčnega sidra SBz-60 tipa RCP/D-I so na **sliki C.7** za vse štiri metode prikazani diagrami določitve merodajne mere lezenja k_{int} na stopnji sile P_3 VPN, pri čemer so merodajne mere lezenja pramen k_{int} vrisane z odebeljeno barvno črto, medtem ko je s črno odebeljeno črto prikazana povprečna merodajna mera

lezenja vseh pramen (torej sidra kot celote). Vse vrednosti k_{int} za pramena se za vse štiri metode v orodju zberejo v zbirnih preglednicah na listu 11.



Slika C.7: Določanje merodajnih mer lezenja k_{int} pramen in sidra po metodah IP (list 7), SIA (list 8), 10 (list 9) in ISO (list 10) za stopnjo sile P_3 VPN SBz-60.

Figure C.7: Definition of the competent creep coefficients k_{int} for the strands and the anchor SBz-60, at force level P_3 of VPN, after the methods IP (sheet 7), SIA (sheet 8), 10 (sheet 9) and ISO (sheet 10).

Podobno smo za vsako od štirih metod pripravili po en list za mere lezenja podsider A, B in C. Tudi na teh listih orodja smo po zgoraj navedenih principih vrednotili merodajne mere lezenja k_{int} za posamezne stopnje sile P_i PS in sicer: po metodi IP na listu 12, po metodi SIA na listu 13, po metodi 10 na listu 14 in po metodi ISO na listu 15. Tudi pri podsidrih se, zaradi boljše preglednosti, izračunane vrednosti

k_{int} prikazujejo v diagramih. Vse vrednosti k_{int} za podsidera se za vse štiri metode v orodju zberejo v preglednicah na *listu 16*, ki jih za primer sidra SBz-60 tipa RCP/D-I podajamo na **sliki C.8**.

Zbirnik merodajnih intervalnih mer lezenja po podsiderih sidra SBz-60 CATI-ZRMK tip RCP/D-I

Intervalne mere lezenja po podsiderih - metoda IP

P _i [kN]	Podsidero A				Podsidero B				Podsidero C				Povprečje za sidro									
	k _{max}	k _{int}			k _{max}	k _{int}			k _{max}	k _{int}			k _{max}	k _{int}								
	pri P _i	t ₁ ... t ₂	[t ₁ -t ₂]	[mm]	[mm]	[min]	[mm]	[kN]	pri P _i	t ₁ ... t ₂	[t ₁ -t ₂]	[mm]	[mm]	[min]	[mm]	[kN]	pri P _i	t ₁ ... t ₂	[t ₁ -t ₂]	[mm]	[mm]	[min]
P ₁ 96	0,81	10 ... 25	0,390	96	0,90	10 ... 25	0,515	96	1,03	10 ... 25	0,829	288	0,91	10 ... 25	0,578							
P ₂ 142	0,77	15 ... 30	0,548	142	0,88	15 ... 30	0,731	142	1,58	10 ... 30	1,100	426	1,01	15 ... 30	0,858							
P ₃ 188	0,80	15 ... 35	0,652	188	0,72	15 ... 35	0,584	188	1,07	15 ... 35	0,910	564	0,84	15 ... 35	0,716							
P ₄ 234	0,80	10 ... 20	0,764	234	0,88	10 ... 20	0,548	234	1,11	10 ... 20	1,013	702	0,82	10 ... 20	0,775							
P ₅ 280	2,68	2 ... 5	2,676	280	2,84	2 ... 5	2,840	280	4,95	1 ... 2	4,950	840	2,91	2 ... 5	2,911							
P ₆ 326																						
P ₇ 372																						
P _{pv} 418																						

Intervalne mere lezenja po podsiderih - metoda SIA

P _i [kN]	Podsidero A				Podsidero B				Podsidero C				Povprečje za sidro									
	k _{max}	k _{int}			k _{max}	k _{int}			k _{max}	k _{int}			k _{max}	k _{int}								
	pri P _i	t ₁ ... t ₂	[t ₁ -t ₂]	[mm]	[mm]	[min]	[mm]	[kN]	pri P _i	t ₁ ... t ₂	[t ₁ -t ₂]	[mm]	[mm]	[min]	[mm]	[kN]	pri P _i	t ₁ ... t ₂	[t ₁ -t ₂]	[mm]	[mm]	[min]
P ₁ 96	0,81	10 ... 25	0,390	96	0,90	10 ... 25	0,515	96	1,03	10 ... 25	0,829	288	0,91	10 ... 25	0,578							
P ₂ 142	0,77	15 ... 30	0,548	142	0,88	15 ... 30	0,731	142	1,58	1 ... 30	0,850	426	1,01	15 ... 30	0,858							
P ₃ 188	0,80	20 ... 35	0,576	188	0,72	20 ... 35	0,514	188	1,07	20 ... 35	0,864	564	0,84	20 ... 35	0,651							
P ₄ 234	0,80	5 ... 20	0,598	234	0,88	5 ... 20	0,490	234	1,11	5 ... 20	0,814	702	0,82	5 ... 20	0,634							
P ₅ 280	2,68	2 ... 5	2,676	280	2,84	2 ... 5	2,840	280	4,95	1 ... 2	4,950	840	2,91	2 ... 5	2,911							
P ₆ 326																						
P ₇ 372																						
P _{pv} 418																						

Intervalne mere lezenja po podsiderih - metoda 10

P _i [kN]	Podsidero A				Podsidero B				Podsidero C				Povprečje za sidro									
	k _{max}	k _{int}			k _{max}	k _{int}			k _{max}	k _{int}			k _{max}	k _{int}								
	pri P _i	t ₁ ... t ₂	[t ₁ -t ₂]	[mm]	[mm]	[min]	[mm]	[kN]	pri P _i	t ₁ ... t ₂	[t ₁ -t ₂]	[mm]	[mm]	[min]	[mm]	[kN]	pri P _i	t ₁ ... t ₂	[t ₁ -t ₂]	[mm]	[mm]	[min]
P ₁ 96	0,81	2 ... 25	0,315	96	0,90	2 ... 25	0,369	96	1,03	2 ... 25	0,556	288	0,91	2 ... 25	0,413							
P ₂ 142	0,77	2 ... 30	0,374	142	0,88	2 ... 30	0,480	142	1,58	2 ... 30	0,778	426	1,01	2 ... 30	0,544							
P ₃ 188	0,80	2 ... 35	0,595	188	0,72	2 ... 35	0,410	188	1,07	2 ... 35	0,599	564	0,84	2 ... 35	0,535							
P ₄ 234	0,80	2 ... 20	0,555	234	0,88	2 ... 20	0,525	234	1,11	2 ... 20	0,770	702	0,82	2 ... 20	0,617							
P ₅ 280	2,68	1 ... 5	1,974	280	2,84	1 ... 5	2,074	280	4,95	1 ... 2	4,950	840	2,91	1 ... 5	2,671							
P ₆ 326																						
P ₇ 372																						
P _{pv} 418																						

Intervalne mere lezenja po podsiderih - metoda ISO

P _i [kN]	Podsidero A				Podsidero B				Podsidero C				Povprečje za sidro									
	k _{max}	k _{int}			k _{max}	k _{int}			k _{max}	k _{int}			k _{max}	k _{int}								
	pri P _i	t ₁ ... t ₂	[t ₁ -t ₂]	[mm]	[mm]	[min]	[mm]	[kN]	pri P _i	t ₁ ... t ₂	[t ₁ -t ₂]	[mm]	[mm]	[min]	[mm]	[kN]	pri P _i	t ₁ ... t ₂	[t ₁ -t ₂]	[mm]	[mm]	[min]
P ₁ 96	0,81	15 ... 25	0,383	96	0,90	15 ... 25	0,563	96	1,03	15 ... 25	0,902	288	0,91	15 ... 25	0,616							
P ₂ 142	0,77	15 ... 30	0,548	142	0,88	15 ... 30	0,731	142	1,58	15 ... 30	1,296	426	1,01	15 ... 30	0,858							
P ₃ 188	0,80	20 ... 35	0,576	188	0,72	20 ... 35	0,514	188	1,07	20 ... 35	0,864	564	0,84	20 ... 35	0,651							
P ₄ 234	0,80	10 ... 20	0,764	234	0,88	10 ... 20	0,548	234	1,11	10 ... 20	1,013	702	0,82	10 ... 20	0,775							
P ₅ 280	2,68	2 ... 5	2,676	280	2,84	2 ... 5	2,840	280	4,95	1 ... 2	4,950	840	2,91	2 ... 5	2,911							
P ₆ 326																						
P ₇ 372																						
P _{pv} 418																						

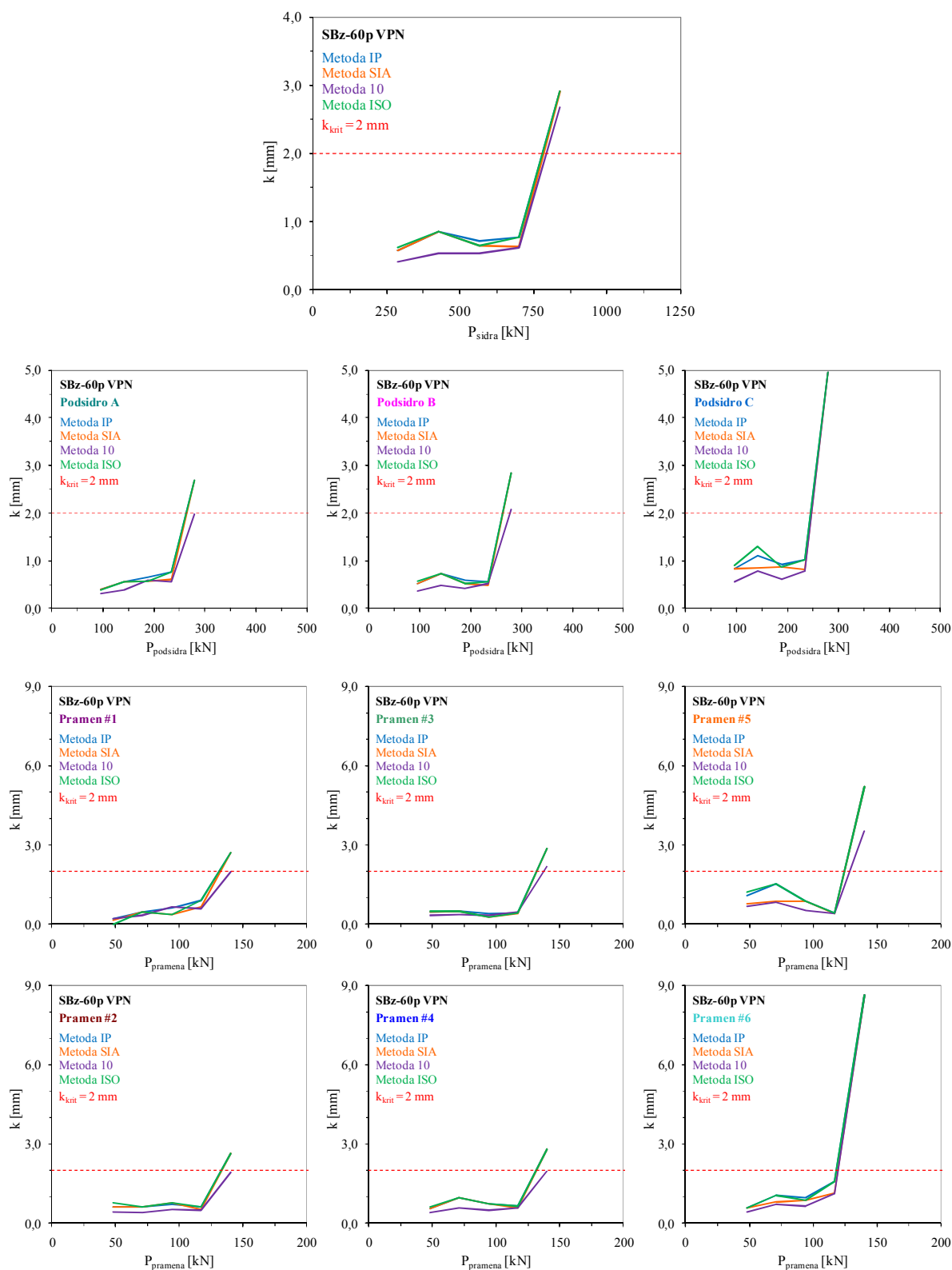
Slika C.8: Preglednice z merodajnimi merami lezenja k_{int} podsider in sidra po metodah IP, SIA, 10 in ISO na *listu 16* računalniškega orodja.
Figure C.8: Tables of the competent creep coefficients k_{int} for the anchor units and the anchor after the methods IP, SIA, 10 and ISO from *sheet 16* of the software tool.

Merodajne mere lezenja k_{int} , določene po vseh štirih obravnavanih metodah, so za sidro kot celoto, po podsidrih, kot tudi po posameznih pramenih povzete v zbirnih preglednicah na skupnem *listu 17* računalniškega orodja. Za boljši pregled in medsebojno primerjavo vrednosti k_{int} , dobljenih po različnih metodah, se iste vrednosti prikažejo tudi na diagramih ([slika C.9](#)).

Za vsako od uporabljenih metod kot končni rezultat PS iz vrednotimo odpornosti na izvlek R_a preskusnega sidra, ki jo za vsakega od pramen, kot tudi za sidro kot celoto, določimo kot presečišča odsekoma ravnih krivulj k_{int} s kritično mero lezenja $k_{krit} = 2$ mm. Vrednosti sile v presečiščih opredeljujejo odpornost na izvlek posameznega pramena oz. sidra kot celote in jih označimo kot $R_{a,int}$. V kolikor pri PS dobimo nenavaden potek odsekoma ravnih krivulj k_{int} , ki odstopajo od pričakovane oblike krivulje, potem se je v praksi izkazalo, da približno oceno odpornosti lahko dobimo tako, da za posamezni pramen oz. sidro po metodi najmanjših kvadratov poiščemo tisto kvadratno parabolo, ki poteka skozi izhodišče koordinatnega sistema in najbolje opisuje vse točke k_{int} . Za kvadratne parabole pramen oz. sidra se avtomatsko določijo presečišča z vodoravnico k_{krit} . Tako ocenjene odpornosti preskusnega sidra na izvlek označimo kot $R_{a,par}$ in jih uporabimo le kot kontrolo odpornosti $R_{a,int}$, kot primerna oporna točka pa se izkažejo v primerih, ko je potek odsekoma ravnih krivulj k_{int} nenavaden v smislu izmenično naraščajočih in padajočih vrednosti k_{int} , na podlagi katerih ne moremo nedvoumno določiti vrednosti $R_{a,int}$. V kolikor niti na ravni preskusne sile P_{pv} med PS ni presežena kritična mera lezenja k_{krit} , potem obravnavni pramen oz. sidro ni doseglo točke porušitve, zato lahko njegovo odpornost le približno ocenimo. Ob tem moramo upoštevati posamezne dosežene mere lezenja in velikost merodajne mere lezenja k_{int} posameznih pramen in sidra kot celote, kot tudi vrednosti efektivnih prostih dolžin ter trajnih izvlečkov; v kolikor presoja vseh navedenih vrednosti pokaže, da znaki popuščanja veznih delov pramen oz. sidra kot celote niso jasno razvidni, potem *SIA V 191* in *SIA 267/1* dopuščata, da odpornost sidra na izvlek ocenimo kot preskusno silo P_{pv} , ekstrapolirano za 10 %, ki jo označimo kot $R_{a,eks}$. V orodju se opisani postopek izvede za vsako od uporabljenih metod, pri čemer so vrednosti za metodo IP na *listu 18*, metodo SIA na *listu 19*, metodo 10 na *listu 20* in metodo ISO na *listu 21*.

Kot je razvidno iz diagramov na [sliki C.9](#) z različnimi metodami vrednotenja merodajnih mer lezenja vplivamo na poteke krivulj merodajnih mer lezenja v odvisnosti od stopnje sile PS. Z uporabo različnih metod (IP, SIA, 10 oz. ISO) so presečišča teh krivulj (za sidro kot celoto, po podsidrih kot tudi po posameznih pramenih) z vodoravnico $k_{krit} = 2$ mm različna, s tem pa po različnih metodah dobimo različne odpornosti preskusnega sidra na izvlek R_a .

Na [sliki C.10](#) je prikazan izsek iz *lista 18* računalniškega orodja, ki prikazuje praktično uporabo opisanega pristopa vrednotenja rezultatov PS na primeru vzorčnega VPN sidra SBz-60 tipa RCP/D-I. Odpornost sidra na izvlek je iz vrednotena na dva načina: v prvem sidro obravnavamo kot celoto, pri čemer odčitke izvlečkov vseh pramen kabla sidra povprečimo, na podlagi česar iz vrednotimo povprečne mere lezenja k , nato pa določimo merodajne mere lezenja k_{int} . V drugem načinu obravnavamo vsak pramen posebej, pri čemer za vsak pramen zase po izbrani metodi poiščemo merodajne mere lezenja k_{int} . V zgornjem delu [slike C.10](#) je podana zbirna preglednica s prikazanimi k_{int} pramen in sidra kot celote določeni po metodi IP, medtem ko se v spodnjem delu nahajata tako diagram z vrisanimi točkami k_{int} posameznega pramena določenimi po metodi IP kot tudi preglednica z določeno odpornostjo sidra na izvlek $R_{a,s(k-povp)}$, ki je iz vrednotena na podlagi merodajne povprečne mere lezenja vseh pramen kabla sidra za sidro kot celoto. Vzporedno se po enakem postopku določijo tudi odpornosti posameznih pramen sidra, pri čemer se odpornosti vseh pramen kabla sidra seštejejo v odpornost sidra na izvlek $R_{a,s(\Sigma pramen)}$.

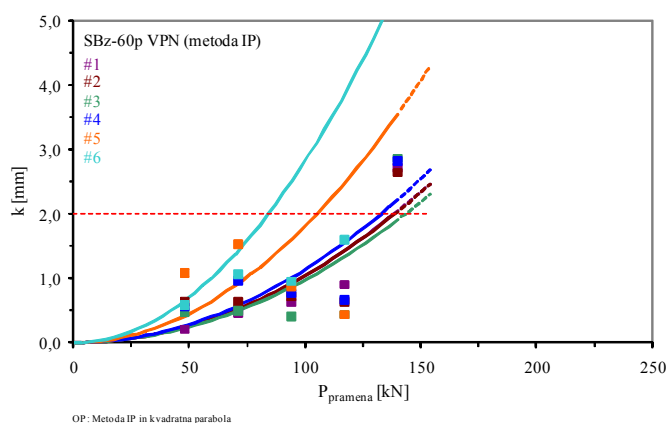


Slika C.9: Diagrami k_{int} v odvisnosti od ravni sile iz lista 17, določene po metodah IP, SIA, 10 in ISO za sidro kot celoto, po podsidihih (A do C) kot tudi po pramenih (#1 do #6).

Figure C.9: Diagrams of k_{int} dependent on load level (sheet 17), defined after the methods IP, SIA, 10 and ISO for the anchor as a whole, for anchor units (A to C) as well as for strands (#1 to #6).

Analiza rezultatov preskusa nosilnosti sidra (metoda IP)

P _i [kN]	Sila v sidru [kN]	Pramen #1			Pramen #2			Pramen #3			Pramen #4			Pramen #5			Pramen #6			Povprečje za sidro			
		k _{max}	pri P _i	t ₁ ... t ₂ [t ₁ -t ₂]	k _{max}	pri P _i	t ₁ ... t ₂ [t ₁ -t ₂]	k _{max}	pri P _i	t ₁ ... t ₂ [t ₁ -t ₂]	k _{max}	pri P _i	t ₁ ... t ₂ [t ₁ -t ₂]	k _{max}	pri P _i	t ₁ ... t ₂ [t ₁ -t ₂]	k _{max}	pri P _i	t ₁ ... t ₂ [t ₁ -t ₂]	k _{max}	pri P _i	t ₁ ... t ₂ [t ₁ -t ₂]	
P ₁	288	48	0,830	2 ... 25	0,210	0,880	10 ... 25	0,628	0,830	10 ... 25	0,477	0,963	10 ... 25	0,553	1,361	10 ... 25	1,081	0,930	10 ... 25	0,578	0,914	10 ... 25	0,578
P ₂	426	71	0,722	15 ... 30	0,465	0,826	15 ... 30	0,631	0,722	15 ... 30	0,498	1,263	15 ... 30	0,963	2,021	15 ... 30	1,528	1,196	15 ... 30	1,063	1,015	15 ... 30	0,858
P ₃	564	94	0,909	10 ... 35	0,625	1,137	10 ... 35	0,717	0,640	15 ... 35	0,408	1,010	15 ... 35	0,761	1,263	15 ... 35	0,870	1,121	15 ... 35	0,951	0,840	15 ... 35	0,716
P ₄	702	117	1,041	10 ... 20	0,897	0,681	10 ... 20	0,631	0,864	10 ... 20	0,432	0,897	10 ... 20	0,664	0,565	10 ... 20	0,432	1,760	10 ... 20	1,595	0,823	10 ... 20	0,775
P ₅	840	140	2,714	2 ... 5	2,714	2,639	2 ... 5	2,639	2,865	2 ... 5	2,865	2,814	2 ... 5	2,814	5,202	2 ... 5	5,202	8,637	1 ... 2	8,637	2,911	2 ... 5	2,911



Vsota $R_{a,sidra(\Sigma pramen),IP} = 770 \text{ kN}$ 98,6%

	R _{a,par} [kN]	R _{a,int} [kN]	R _{a,eks} [kN]	R _{a,min} [kN]
1. pramen	—	131	—	131
2. pramen	—	133	—	133
3. pramen	—	132	—	132
4. pramen	—	131	—	131
5. pramen	—	125	—	125
6. pramen	—	118	—	118
Sidro (k_{povp})	—	781	—	781

R_{a,par} ... presek kvadratne parabole s k = 2 mm
 R_{a,int} ... linearna interpolacija med intervalnimi k-ji
 R_{a,eks} ... ekstrapolacija največje dosežene sile za 10 %

R_{a,sidra(k-povp),IP = 781 kN}

P₀ ≤ 469 kN

563 ≤ P_p ≤ 981 izbrana P_p = 586 kN

Slika C.10: Izsek iz lista 18 računalniškega orodja z zbirno preglednico vseh k_{int}, določenih po metodi IP (zgoraj) in vrednotenjem odpornosti sidra na izvlek R_a (spodaj).

Figure C.10: Section of sheet 18 of software tool with joint table of all k_{int}, defined after the method IP (above) and evaluation of anchor pull-out resistance R_a (below).

Pri analizi dobljenih rezultatov PS se postavlja vprašanje, katera od vrednosti R_{a,s(k-povp)} ali R_{a,s(Σpramen)} je prava? Odgovor na to vprašanje ni preprost, posebej še v primeru tistih modificiranih sider, pri katerih prihaja do izvlačanja veznih delov posameznih pramen iz injekcijske mase v notranjosti rebraste PE cevi še predno je v celoti izkoriščena odpornost vezi zunanje injekcijske mase veznega dela sidra in stene vrtine.

V primerih napenjanja pramen sider z mononapenjalkami, za vsak pramen posebej poznamo tako silo v pramenu kot tudi odčitane vrednosti izvlečkov, po drugi strani pa vsakega od pramen zaklinimo s svojo kotvo, torej vsak pramen deluje kot samostojen prednapeti konstrukcijski element. Zato imamo v tem primeru pravzaprav vzporedno vezane konstrukcijske elemente, od katerih ima vsak svoj prosti del, ki v praksi deluje ločeno. Konstrukcijski elementi si kot posamezna podsidera (sidra tipov RCP/D-Z in RCP/D-I) oz. kot sidro (RCP/D in RCP/D-K) delijo skupni vezni del, ki je zaradi mehanizma delovanja prednapetih sider med PS obremenjeno izven območja elastičnosti, kjer sicer velja pravilo superpozicije. Pri iskanju odgovora na vprašanje, ali smemo odpornosti posameznih pramen kabla sidra enostavno sešteti, moramo upoštevati tip porušnega mehanizma veznega dela sidra, pri čemer obstajata dve možnosti:

- Zaželen in pričakovan je mehanizem, pri katerem je odpornost vezi pramen z injekcijsko maso v notranjosti PE ovoja sidra zadostna, da lahko v celoti izkoristimo razpoložljivo odpornost veznega dela sidra na izvlek po vezi s tlemi zaledja. V tem primeru je šibki člen, ki določa odpornost sidra

na izvlek R_a , zunanji stik injekcijske mase z vrtino in tlemi zaledja, zato je v tem primeru pravi-
len pristop, po katerem obravnavamo vsa pramena sidra kot celoto, torej je merodajen rezultat
 $R_{a,s(k-povp)}$. Odpornosti veznih delov pramen znotraj rebraste PE cevi so zadostne, obnašanje veznih
delov pramen oz. podsider pa primerljivo, sicer se takšen mehanizem sploh ne bi mogel pojaviti,
zato v tem primeru s povprečenjem odčitanih izvlečkov posameznih pramen ne naredimo velike
napake.

- Med PS lahko pride do razvoja mehanizma, pri katerem začno popuščati vezi posameznih pramen
z injekcijsko maso znotraj rebraste PE cevi in to še preden je v celoti izkoriščena odpornost vezi
veznega dela sidra in stene vrtine. Take primere smo pogosto opazili med preskušnji nosilnosti sider
tipov RCP/D-Z in RCP/D-I na testnem polju opornega zidu OZ-05. Tak porušni mehanizem vez-
nega dela sidra je manj zaželen in pričakovan, saj (zaradi prezgodnje popustitve in izvlečenja
veznih delov posameznih pramen) ne omogoča izkoristka odpornosti vseh pramen kabla sidra v
celoti: vezni deli posameznih pramen se že izvlačijo, medtem ko vezni deli ostalih pramen še
vedno izkazujejo visoko odpornost. Na glavi sidra na pramenih, katerih vezni deli popuščajo,
izmerimo velike izvlečke (zaradi česar dobimo visoke vrednosti k), medtem ko so izvlečki in k
ostalih še polno nosilnih pramen kabla sidra bistveno nižji. V kolikor posamezne velike izvlečke
povprečimo z ostalimi pretežno majhnimi izvlečki izgubimo pregled nad dejanskim obnašanjem
pramen sidra, pri čemer dobimo neko povprečno vrednost brez fizikalnega ozadja v rušnem me-
hanizmu. V primeru, ko popusti le posamezni pramen, njegove velike izvlečke povprečimo z majh-
nimi izvlečki ostalih pramen, pri čemer je zaradi tega tudi povprečna vrednost lahko še vedno
relativno nizka, a je pri tem stik veznega dela šibkega pramena že lahko porušen, s čimer povprečna
vrednost izkazuje navidezno višjo odpornost veznega sidra od dejansko razpoložljive. Očitno je, da
je v takih primerih boljši pristop, pri katerem seštevamo odpornosti posameznih pramen, vzporedno
priključenih na glavo sidra, saj vsak od pramen v skupno odpornost $R_{a,s(\Sigma pramen)}$ prispeva glede na
dejansko stanje njegovega veznega dela.

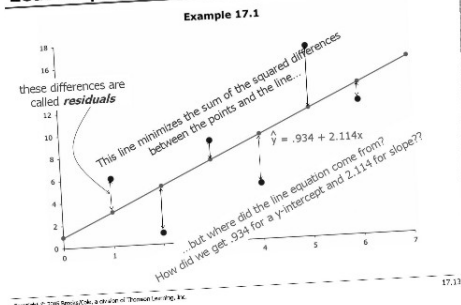
Tak pristop za večkratna sidra je zaslediti tudi v literaturi: v sklopu določitve mejne odpornosti
sider v nevezljivih zemljinah Ostermayer in Barley (2003) navajata, da vgradnja večih enot sider
(podsider) s kratkimi veznimi deli v zamaknjenem vzorcu v eno vrtino omogoča mobilizacijo zelo
visokih odpornosti, pri čemer se odpornosti teh podsider lahko seštejejo.

(prazna stran)

Dodatek D

Uporaba metode najmanjših kvadratov pri analizi rezultatov preiskav sider

Least Squares Line...



Johann Carl Friedrich Gauss

Overview
Introduction
Least Squares Fitting
Sample Least Squares Calculations
Recap

Correlation Coefficient
Sum of squares error and standard deviation
Standard errors in y-intercept and slope

One important concept which will come up later is that of **degrees of freedom**, which is simply the number which is the difference between the number of data points, (N above), and the number of parameters being determined by the fit, (2 for a straight line). Thus, for a linear fit, the number of degrees of freedom, ν , is given by:

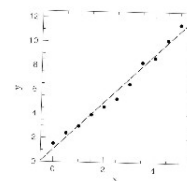
$$\nu = N - 2$$

Physics 115/242
Least squares fitting

Peter Young
Dated: 04/20, 2010

1. INTRODUCTION

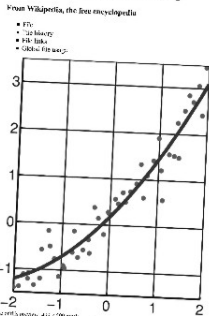
Frequently we are given a set of data points (x_i, y_i) , $i = 1, 2, \dots, m$. A model which we would like to fit to is a smooth function. The function could be straight line (the easiest case), a higher order polynomial, or a more complicated function. As an example, the data in the figure below seems to follow a linear behavior and we may like to describe the "best" straight line through it. More generally, our fitting function $y = f(x)$ will have some adjustable parameters and we would like to determine the "best" choice of those parameters.



The definition of "best" is not unique. However, the most useful choice, and the one we'll use here, is the "least squares" fit, in which one minimizes the sum of the squares of the difference between the observed y 's, y_i , and the fitting function's evaluation, $y = f(x)$, for the available

$$\sum_{i=1}^m (y_i - f(x_i))^2$$

File: Linear least squares2.png



Primer 3 - aproksimacija z nelinearnim modelom

Iščemo krivuljo oblike $y = ac^{bx}$, ki se najbolje prilega točkam (x_i, y_i) , $i = 1, \dots, m$. V tem primeru si lahko pomagamo tako, da model lineariziramo:

$$\ln y = \ln a + bx$$

Tako dobimo predoločeni sistem

$$\begin{bmatrix} 1 & x_1 \\ 1 & x_2 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & x_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ln a \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ln y_1 \\ \ln y_2 \\ \vdots \\ \ln y_m \end{bmatrix}$$

Če nelinearni model dobro opisuje podatke, potem bo rešitev lineariziranega modela zelo dober približek za rešitev originalnega problema.

V primerih, ko iščemo aproksimacijske funkcije, ki se bodo kar najbolje prilegale naboru znanih podatkov, lahko uporabimo metodo najmanjših kvadratov, ki je uveljavljena metoda za iskanje približnih rešitev predločenih sistemov t.j. sistemov, v katerih nastopa več enačb kot neznan. Metoda, ki jo je okoli leta 1795 prvi uporabil Carl Friedrich Gauss pri reševanju astronomskega problema, v praksi predstavlja običajen pristop za določevanje parametrov aproksimacijskih funkcij neposredno izmerjenih ali posredno iz vrednotenih empiričnih podatkov, dobljenih pri eksperimentih ali preskusih. Po tej metodi je najboljše prileganje aproksimacijske funkcije na empirične podatke doseženo, če so odstopanja normalno porazdeljena.

Naloga metode najmanjših kvadratov je prilagoditi parametre aproksimacijske funkcije tako, da se bo le-ta v čim večji meri prilegala naboru empiričnih opazovanj sestavljenih iz n parov točk, podanih v obliki tabele:

$$\begin{aligned} x: & x_1, x_2, \dots, x_n \\ f(x): & y_1, y_2, \dots, y_n \end{aligned} \tag{D.1}$$

pri čemer so x_i neodvisne spremenljivke, medtem ko so y_i odvisne spremenljivke. Nabor vseh opazovanj – n parov točk (x_i, y_i) – želimo aproksimirati z analitično izraženo funkcijo $g(x)$, ki bo funkcijo $f(x)$ v celoti čimbolje ponazorila. Izbira funkcije $g(x)$ je odvisna od narave problema, ki ga obravnavamo, a jo v splošnem vedno lahko zapišemo kot

$$y = g(x; a_1, \dots, a_m), \tag{D.2}$$

pri čemer vektor \vec{a} vsebuje m parametrov. Glede na to, da so točke (x_i, y_i) $i = 1, \dots, n$ dobljene empirično, jih ni mogoče interpolirati tako, da bo šla funkcija $g(x)$ natančno skozi točke. Poleg tega interpolacija ni možna tudi zaradi tega, ker je število parov točk (x_i, y_i) običajno veliko v primerjavi s številom parametrov a_j v funkciji $g(x)$. Cilj metode najmanjših kvadratov je torej določiti parametre a_j tako, da se bo aproksimacijska krivulja čimbolj tesno prilegala naboru n parov točk (x_i, y_i) . Ob tem je lahko število parametrov a_j v funkciji $g(x)$ kvečjemu enako naboru vseh opazovanj ($m \leq n$). Ti dve vrednosti opredeljujeja število prostostnih stopenj ν , ki ga izračunamo kot število vseh opazovanj, zmanjšano za število parametrov a_j

$$\nu = n - m. \tag{D.3}$$

Število prostostnih stopenj ν je torej število neodvisnih opazovanj, ki je v skrajnem primeru kvečjemu lahko enako nič, kar je primer, ko $g(x)$ predstavlja interpolacijsko funkcijo.

V vsaki točki opazovanja (x_i, y_i) definirajmo odstopanje r_i kot razliko med vrednostmi aproksimacijske funkcije $g(x)$ in merjenimi vrednostmi y_i :

$$r_i = g(x_i) - y_i. \tag{D.4}$$

Na podlagi odstopanj r_i želimo pri metodi najmanjših kvadratov iz nabora možnih aproksimacijskih funkcij $g(x)$ poiskati tisto, pri kateri je vsota kvadratov odstopanj vseh opazovanj najmanjša:

$$F = \sum_{i=1}^n r_i^2 = \sum_{i=1}^n (g(x_i) - y_i)^2 = \min. \tag{D.5}$$

Probleme najmanjših kvadratov razdelimo na dve kategoriji v odvisnosti od tega, ali je aproksimacijska funkcija $g(x)$ linearno odvisna od parametrov a_j ali pa je $g(x)$ nelinearna funkcija teh parametrov, pri čemer pa so lahko spremenljivke x v funkciji $g(x)$ linearne ali nelinearne. Bistvena razlika med obema kategorijama je v tem, da za linearni problem najmanjših kvadratov obstaja rešitev v zaključeni obliki, medtem ko za nelinearne probleme taka rešitev v splošnem ne obstaja.

Problem najmanjših kvadratov je linearen, ko lahko funkcijo $g(x; a_1, \dots, a_m)$ zapišemo kot linearno kombinacijo linearno neodvisnih funkcij $h_j(x)$ $j = 1, \dots, m$:

$$g(x) = a_0 h_0(x) + a_1 h_1(x) + \dots + a_m h_m(x). \quad (\text{D.6})$$

Za primer takšne funkcije dobi enačba (D.5) obliko:

$$F(a_0, a_1, \dots, a_m) = \sum_{i=1}^n (a_0 h_0(x_i) + \dots + a_m h_m(x_i) - y_i)^2 = \min. \quad (\text{D.7})$$

Ekstrem funkcije F bo dosežen v kolikor bodo vsi parcialni odvodi $\partial F / \partial a_j$ enaki nič:

$$\frac{\partial F}{\partial a_j} = 2 \sum_{i=1}^n (a_0 h_0(x_i) + \dots + a_m h_m(x_i) - y_i) h_j(x_i) = 0, \quad (\text{D.8})$$

torej dobimo za parametre a_j ($j = 1, \dots, m$) sistem linearnih enačb.

Za primer funkcije $g(x)$ v obliki polinoma, kjer velja $h_j(x) = x^j$, lahko izraz (D.8) zapišemo v obliki

$$\frac{\partial F}{\partial a_j} = 2 \sum_{i=1}^n (a_0 x_i^0 + \dots + a_m x_i^m - y_i) x_i^j = 0, \quad (\text{D.9})$$

oz. kot sistem linearnih enačb v matrični obliki

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n x_i^0 & \dots & \sum_{i=1}^n x_i^m \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{i=1}^n x_i^m & \dots & \sum_{i=1}^n x_i^{2m} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_0 \\ \vdots \\ a_m \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \sum_{i=1}^n y_i x_i^0 \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^n y_i x_i^m \end{Bmatrix}. \quad (\text{D.10})$$

V kolikor je $g(x; a_1, \dots, a_m)$ nelinearna funkcija parametrov, potem je parametre po metodi najmanjših kvadratov mnogo težje določiti, saj je v tem primeru funkcija F

$$F(a_0, a_1, \dots, a_m) = \sum_{i=1}^n (g(x; a_1, \dots, a_m) - y_i)^2 = \min. \quad (\text{D.11})$$

v primerjavi z enačbo (D.6) precej bolj zapletena, saj sistem

$$\frac{\partial F}{\partial a_j} = 2 \sum_{i=1}^n r_i \frac{\partial r_i}{\partial a_j} = 0, \quad j = 1, \dots, m \quad (\text{D.12})$$

predstavlja nelinearen sistem enačb, zato rešitve v zaključeni obliki ne moremo dobiti. Iz navedenega je očitno, da je z numeričnega stališča reševanje sistema enačb (D.12) neugodno, vendar se lahko temu opravi izognemo, v kolikor nam uspe funkcijo $g(x; a_1, \dots, a_m)$ linearizirati. Iskanje ekstrema funkcije F se poenostavi v tolikšni meri, da lahko rešujemo sistem linearnih enačb (D.10), vendar pa zato za rešitev po metodi najmanjših kvadratov dobimo le približek.

V sklopu obdelave in vrednotenja opravljenih terenskih preskusov nosilnosti (preiskav sider in več-stopenjskih preskusov nosilnosti) sider tipov RCP/D, RCP/D-K, RCP/D-Z in RCP/D-I na testnem polju opornega zidu OZ-05, za izvrednotene merodajne mere lezenja k_i v odvisnosti od stopnje sile P_i , po metodi najmanjših kvadratov iščemo aproksimacijske krivulje, s katerimi bomo dosegli najboljše ujemanje glede na empirične podatke preskusov. Pri izbiri aproksimacijske funkcije $g(P; a_1, \dots, a_m)$ upoštevamo naslednja izhodišča:

- I. Glede na fizikalno pogojenost modeliranja zveze med silami v sidru in merami lezenja k veznega dela sidra naj aproksimacijska funkcija poteka skozi izhodišče koordinatnega sistema: v kolikor v prednapeto sidro natezna sila ni vnesena ($P = 0$), potem tudi ne more priti do lezenja veznega dela sidra ($k = 0$).

- II. Dolgoletne praktične izkušnje kažejo, da ni možno privzeti linearne odvisnosti merodajnih mer lezenja k_i od stopenj sile P_i , saj so v splošnem mere lezenja k pri nizkih stopnjah sile relativno nizke, nato pa se na ravni sile, ko vezni del sidra popusti, hipoma močno povečajo.
- III. Glede na omejeno število stopenj sile, ki so jih sidra pri preskušanjih na testnem polju opornega zidu OZ-05 uspešno prenesla, s tem pa tudi na omejeno število opazovanj – točk $n(P_i, k_i)$ – naj bo število parametrov v aproksimacijski funkciji čim manjše (po možnosti ne več kot tri). Taka omejitev je smiselna tudi za aproksimacijske polinome, saj so polinomi s potencami višje stopnje medsebojno slabo linearno neodvisni ter tvorijo občutljiv sistem enačb, zato smo se odločili, da se bomo omejili na polinom druge stopnje. Odločitev za omejitev števila parametrov v aproksimacijski funkciji $g(P; a_1, \dots, a_m)$ podpira tudi dejstvo, da v splošnem primeru, ko dva modela enako dobro opisujeta neko zvezo, kot boljši model velja tisti z manj parametri.

Glede na navedena izhodišča je logična izbira družine enoparametričnih aproksimacijskih funkcij, ki potekajo skozi središče koordinatnega sistema, v obliki:

- kvadratne funkcije: $k = aP^2$, (D.13a)

- kubične funkcije: $k = aP^3$. (D.13b)

Splošna funkcija, ki se nam v tem razredu krivulj ponuja, je tudi polinom druge stopnje

$$k = a_0 + a_1P + a_2P^2, \quad (\text{D.13c})$$

vendar v taki obliki, zaradi parametra a_0 , ki v splošnem ni enak nič, ne poteka skozi izhodišče koordinatnega sistema, s čimer ni zadoščeno izhodišču I. Zato funkcijo preoblikujemo v obliko:

$$k = a_1P + a_2P^2. \quad (\text{D.13d})$$

Metodo najmanjših kvadratov lahko učinkovito in na relativno enostaven način uporabimo tudi v primerih, ko nam dvoparametrično aproksimacijsko funkcijo uspe linearizirati že s preprosto zamenjavo spremenljivk. V našem primeru smo izbrali naslednji dvoparametrični nelinearni funkciji:

- potenčno funkcijo: $k = aP^b$, (D.13e)

ki smo jo najprej prevedli v obliko $\log k = \log a + b \log P$, nato pa smo jo z uvedbo novih spremenljivk $\tilde{k} = \log k$, $\tilde{a} = \log a$ in $\tilde{P} = \log P$ preoblikovali v linearno funkcijo $\tilde{k} = \tilde{a} + b\tilde{P}$ ter

- eksponentno funkcijo: $k = ae^{bP}$, (D.13f)

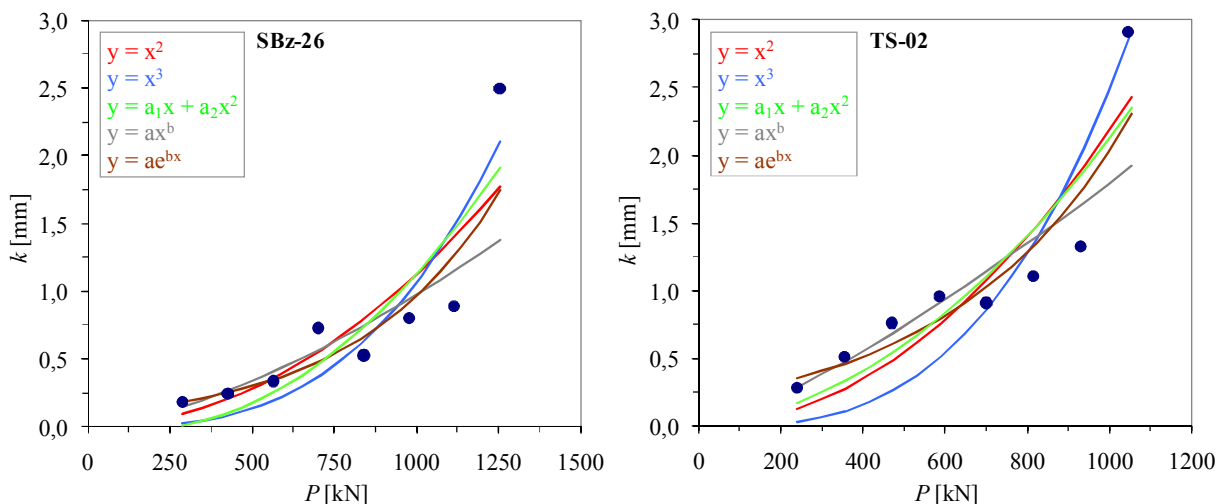
ki jo preoblikujemo podobno kot potenčno funkcijo, pri čemer z uvedbo novih spremenljivk $\tilde{k} = \ln k$, $\tilde{a} = \ln a$ in $\tilde{P} = P$ prav tako dobimo linearno funkcijo $\tilde{k} = \tilde{a} + b\tilde{P}$.

V obeh primerih smo izhodiščni nelinearni aproksimacijski funkciji prevedli na sistem z linearno odvisnostjo od parametrov v obliki $\tilde{k} = \tilde{a} + b\tilde{P}$, ki ga lahko rešujemo kot sistem linearnih enačb po izrazu (D.9), dobljene vrednosti parametrov pa potem preko uvedenih spremenljivk preračunamo v prvotni izhodiščni funkciji. Ob predpostavkah:

- da je odstopanje v vrednosti y pri obeh zgornjih nelinearnih izhodiščnih funkcijah proporcionalno pričakovani velikosti vrednosti y (a je sicer neodvisno od x), potem pri logaritmiranju pride do stabilizacije variance napake (Seber in Wild, 2003) in
- da smo z nelinearnim modelom relativno dobro opisali podatke,

potem rešitev lineariziranega modela še vedno daje dober približek za rešitev izhodiščnega problema.

Na **sliki D.1** sta podana primera rezultatov dveh preiskav sider, izvedenih na testnem polju opornega zidu OZ-05 do porušitve, pri katerih smo pri iskanju najboljše analitične funkcije, ki bi čimboljše opisala točke merodajnih mer lezenja k_i na posameznih stopnjah preiskave sidra P_i , uporabili aproksimacijske funkcije (D.13a), (D.13b), (D.13d), (D.13e) in (D.13f).

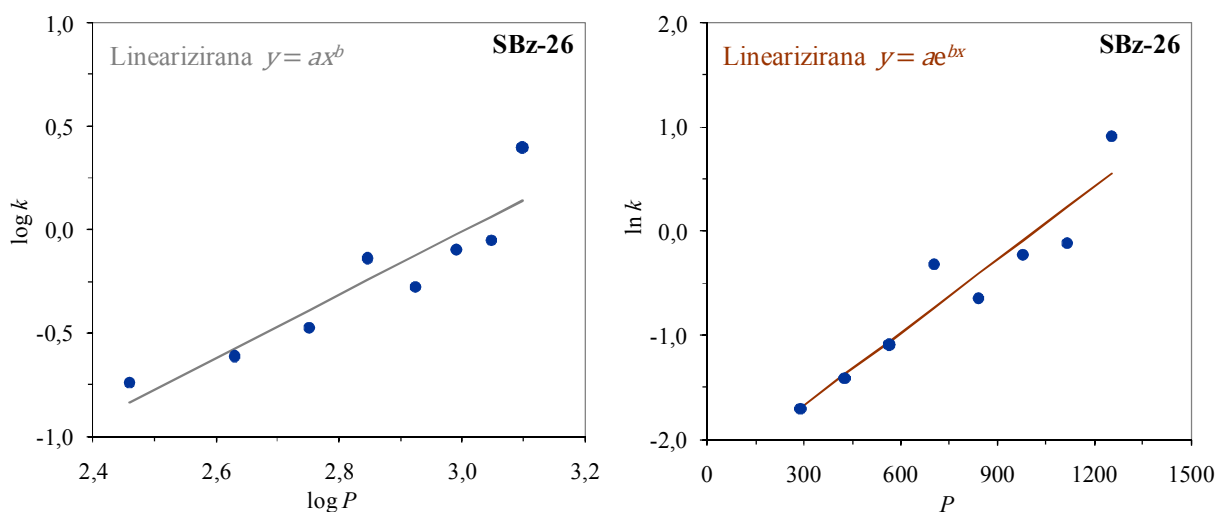


Slika D.1: Vzorčna primera uporabe metode najmanjših kvadratov pri analizi rezultatov preiskav sider izvedenih na testnem polju OZ-05.

Figure D.1: Two typical samples of application of least square method in analysis of investigation test results obtained on the testing field OZ-05.

Iz diagramov je razvidno, da vse izbrane funkcije v principu ustrezajo naravi problema, ki ga želimo opisati, pri čemer se nekatere krivulje točkam (P_i, k_i) bolje prilagajajo v začetnem delu preiskave sidra, medtem ko je prilaganje drugih aproksimacijskih funkcij točkam sicer slabše, a so na oko krivulje bližje vsem točkam (P_i, k_i) preiskave sidra. Takšna subjektivna ocena za prakso ni primerna, zato želimo iz nabora aproksimacijskih funkcij izbrati tisto, ki se po nekem objektivnem kriteriju kar najbolje prilega naboru vseh opazovanj – v našem primeru osmim parom točk (P_i, k_i). V primeru aproksimacijskih funkcij z enakim številom parametrov bi bila to funkcija, katerih vrednost vsote kvadratov napak bi bila najmanjša. Po drugi strani velja, da med več modeli, ki v istem območju vrednosti vsot kvadratov napak podajajo neko zvezo, kot najboljši model velja tisti z manj parametri, saj je pri tem število prostostnih stopenj ν , s tem pa tudi število neodvisnih opazovanj zajetih v modelu, največje. Pri aproksimacijskih funkcijah z več parametri se lahko pojavi tudi primer, ko je vrednost katerega od parametrov bistveno manjša od ostalih oz. se lahko približa vrednosti nič, torej tak parameter ni statistično značilno različen od nič, kar pomeni, da v tem primeru z večjim številom parametrov nismo dosegli bistvenega zmanjšanja vsote kvadratov napak.

Kot smo že omenili, v primeru reševanja problema nelinearnih enačb s prevedbo na linearizirani sistem na enostavnejši način rešimo sistem lineariziranih enačb. Vendar pa je v tem primeru treba preveriti, ali v danem primeru takšno linearizacijo sploh lahko naredimo, torej ali se linearizirana aproksimacijska funkcija $g(P)$ prilega naboru točk, za katerega iščemo aproksimacijsko funkcijo. Čeprav na podlagi obeh diagramov na **sliki D.1** lahko sklepamo, da smo z linearizacijo obeh nelinearnih funkcij ((D.13.e) in (D.13.f)) dobili primerne približne rešitve, smo na **sliki D.2** za preiskavo sidra SBz-26 podali razsevna grafa – prikaza ujemanja lineariziranih funkcij $\tilde{k} = \tilde{a} + b\tilde{P}$ v obeh prevedenih sistemih.



Slika D.2: Prikaz ujemanja lineariziranih potenčne in eksponentne aproksimacijske funkcije na nabor empirično dobljenih točk preiskave sidra SBz-26.

Figure D.2: Representation of linearized potential and exponential model functions for the set of empirically obtained points for the SBz-26 anchor investigation test.

Iz obeh diagramov na **sliki D.2** je razvidno, da se linearizirani funkciji dobro prilegata empiričnem naboru točk (P_i, k_i) preiskave sidra SBz-26, torej smo z izbranim sistemom prevedbe nelinearnega sistema v linearnega v celotnem območju uspešno zajeli empiričen nabor točk, na podlagi česar lahko potrdimo, da v konkretnem primeru preiskave sidra z linearizacijo nelinearnih funkcij ((D13.e) in (D13.f)) dobimo uporaben približek aproksimacijske funkcije za dani nabor točk. Izračun ujemanja z linearno regresijo v programskem orodju Microsoft Excel v primeru obeh aproksimacijskih funkcij pokaže močno povezanost med spremenljivkama \tilde{k} in \tilde{P} : vrednosti koeficienta R^2 znašata 0,85 oz. 0,90, torej znaša koeficient korelacije R za primer levega diagrama (**slika D.2**) 0,92, desnega diagrama pa 0,95. V obeh primerih sta torej vrednosti R blizu vrednosti ena, kar kaže na močno pozitivno linearno povezanost spremenljivk \tilde{k} in \tilde{P} .

Oceno najboljše od petih aproksimacijskih krivulj na posameznem diagramu **slike D.1** lahko dobimo tako, da za vseh pet funkcij – (D.13a) do (D.13f) – izvednotimo vsoto kvadrato odstopanj F , vendar pa zaradi različnega števila parametrov v teh funkcijah (dve funkciji sta enoparametrični, medtem ko so ostale tri funkcije dvoparametrične), s tem pa tudi števila prostostnih stopenj ν , takšna primerjava ni najprimernejša. Bolj nepristransko oceno odstopanj posamezne aproksimacijske funkcije $g(P)$ dobimo, če vsoto kvadratov odstopanj F reduciramo s številom prostostnih stopenj ν , ki jih uporabimo pri oceni funkcije $g(P)$. Za primer obeh preiskav na **sliki D.1** smo v **preglednici D.1** za vseh pet izbranih aproksimacijskih funkcij zbrali neposredne vsote kvadratov odstopanj F , reducirane s številom prostostnih stopenj ν .

Iz **preglednice D.1** je razvidno, da pri obravnavanih vzorčnih preiskavah sider SBz-26 in TS-02 vse aproksimacijske funkcije $g(P)$ potekajo blizu empiričnih vrednosti (P_i, k_i) . Družina funkcij $g(P)$ je torej primerno izbrana, pri čemer bo ujemanje ene od funkcij vedno najboljše: katera funkcija bo to, pa bo v primeru konkretne preiskave sidra odvisno od empiričnih vrednosti in vrednosti F/ν . Za konkretna primera podana na **sliki D.1** in **preglednici D.1** lahko ugotovimo, da v primeru preiskave sidra SBz-26 najboljše prileganje funkcije $g(P)$ na empirične podatke dosežemo z uporabo kubične funkcije

po enačbi (D.13b), medtem ko pri PS TS-02 najboljše ujemanje dosežemo s kvadratno funkcijo po enačbi (D.13a).

Preglednica D.1: Vsote kvadratov odstopanj F reduciranih s številom prostostnih stopenj ν za izbrane aproksimacijske funkcije.

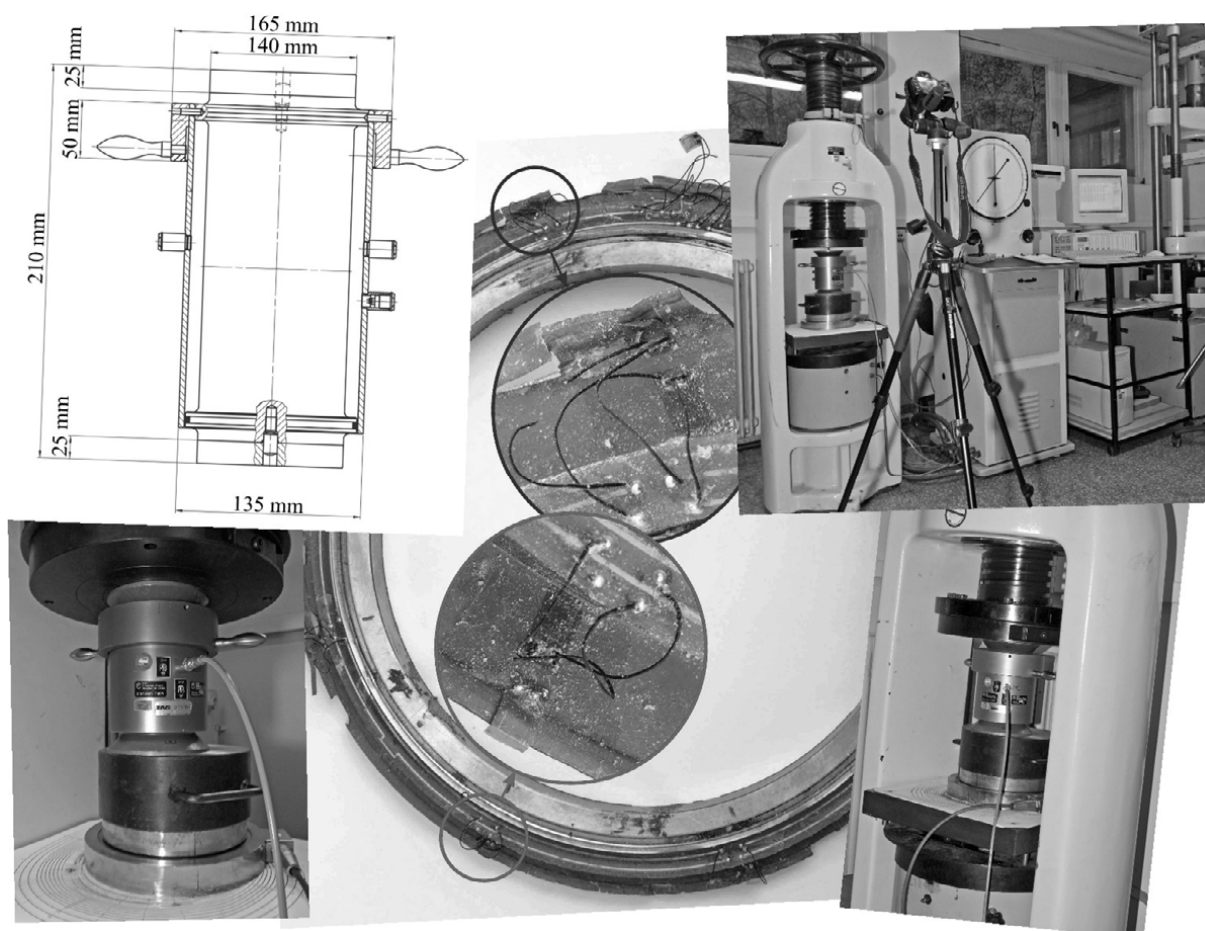
Table D.1: The sum of squares F divided by the number of degrees of freedom ν for selected model functions.

Aproksimacijska funkcija $g(x)$					
	$y = ax^2$	$y = ax^3$	$y = a_1x + a_2x^2$	$y = ax^b$	$y = ae^{bx}$
Preiskava sidra SBZ-26					
F	0,976	0,754	0,911	1,420	0,799
$\frac{F}{\nu}$	0,14	0,11	0,15	0,24	0,13
Preiskava sidra TS-02					
F	3,718	4,717	4,443	4,268	4,479
$\frac{F}{\nu}$	0,53	0,67	0,74	0,71	0,75

(prazna stran)

Dodatek E

Laboratorijska preskušanja vpliva ekscentrične lege obročastega dinamometra na izmerjene vrednosti sil



Temeljna funkcija trajnih prednapetih geotehničnih sider je prenos natezne sile med nosilnimi tlemi zaledja in sidrano konstrukcijo. Za korektno izvedbo preskušanja nosilnosti sider v sklopu vgradnje (pri preiskavah sider – PS, celovitih preskusih napenjanja – CPN in enostavnih preskusih napenjanja – EPN), kot tudi za kasnejše spremljanje delovanja sidranja, je pomembno točno poznavanje in uravnavanje sil v prednapetih geotehničnih sidrih. Vpogled v raven tlaka v hidravličnem sistemu, s tem pa posredno tudi v raven sidrne sile, podaja manometer pritrjen na hidravlično črpalko, ki se lahko uporablja samostojno (v primeru ustrezno umerjenih preciznih digitalnih manometrov) ali kot kontrolni element v kombinaciji skupaj z dinamometrom. Za točno spremljanje sil med preskusi nosilnosti sider obstajata dve možnosti:

- Na raven sile v sidru lahko sklepamo preko tlaka olja v hidravličnem sistemu s katerim napenjamo kabel sidra, pri čemer mora biti v takem primeru sistem kalibriran in opremljen s preciznim digitalnim manometrom, ki omogoča spremljanje tlaka z zadostno točnostjo, prav tako pa mora biti umerjen na način, da zagotavlja zadostno točnost izmerjene vrednosti neodvisno od zunanje temperature okolja. Prednost takega sistema je nedvomno enostavnost uporabe, za izvedbo preskušanj sider ne potrebujemo dodatnega dinamometra, prav tako ni dodatnih stroškov kalibracije tega dinamometra. Očitna slabost takega sistema je, da sila v sidru zaradi trenja v napenjalki ne ustreza vrednostim sile, kot jo preračunamo na podlagi odčitane tlaka, kar še posebej velja za sistem napenjanja s skupno napenjalko. V praksi so se pokazale tudi težave pri zagotavljanju točnosti odčitkov tlaka v primerih mrzlih dni pozno jeseni ali zgodaj spomladi, ko je čitalec tlaka v senci, cevi hidravličnega sistema pa so na soncu. V takem primeru temperaturna kompenzacija v digitalnem manometru ne zagotavlja pravih vrednosti, saj se tlak olja v ogretyh ceveh dvigne, kar pa digitalni manometer ne zazna in ga zato ne more korigirati. V takih primerih je nujna zaščita cevi hidravličnega sistema pred neposrednim osončenjem.
- V primeru druge možnosti odčitki tlaka na manometru služijo le za oceno absolutne vrednosti tlaka, vnesenega v hidravlični sistem (torej le kot groba kontrola ravni sile v sidru), medtem ko se točna vrednost sile odčitava z dinamometrom, ki se namesti med jekleni plošči v območju med skupno napenjalko (oz. mononapenjalko) ter sidrani element oz. konstrukcijo. Takšni dinamometri so razmeroma dragi, relativno občutljivi na zunanje vplive in za zagotovitev zanesljivega delovanja na merilnih sidrih zahtevajo redno vzdrževanje. Dinamometri, ki se na terenu uporabljajo za izvedbo PS ter preskusov nosilnosti (CPN in EPN) sider, so pogosto izpostavljeni številnim transportom, grobem ravnanju, prav tako pa so med uporabo podvrženi različnim škodljivim vplivom (vlagi, umazaniji, naleganju na ne povsem čiste in ravne površine, poševnim vnosom sile glede na os kabla sidra, ekscentrični legi glede na os sidra ipd.), zato jih je nujno potrebno redno kalibrirati v periodičnih intervalih.

Dinamometri so po principu delovanja bodisi elektronski bodisi hidravlični, pri čemer z njimi običajno zajamejo vsa pramena kabla sidra (sliki E.1 levo in sredina), za posebne primere uporabe pa obstajajo tudi dinamometri, s katerimi spremljamo sile v posameznih pramenih (slika E.1 desno). V sklopu vgradnje prednapetih pramenskih geotehničnih sider, pri katerih se vsak pramen napenja s svojo mononapenjalko in je zaklinjen v svoji kotvi, je pri izvedbi napenjanja za namestitev vseh mononapenjalk na sidrno ploščo potrebno več prostora, zato mora biti sidrna plošča večjega premera, kar pa posledično (zaradi geometrijske združljivosti oz. skladnosti) vpliva tudi na izbiro dinamometra. V takih primerih se v praksi običajno uporabijo elektronski obročasti dinamometri (slika E.1 sredina), ki so se zaradi svoje velikosti, oblike in enostavnega odčitovanja sidrskih sil izkazali kot najprimernejši.



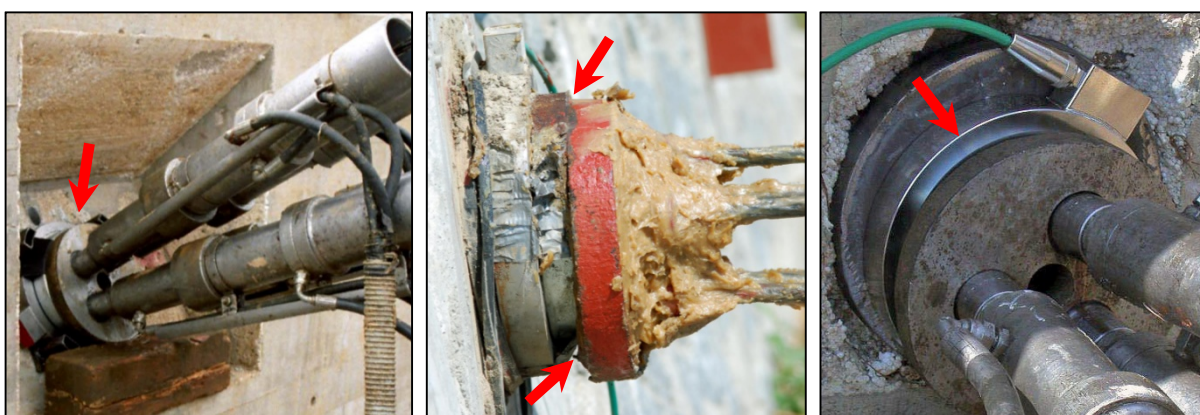
Slika E.1: Različni tipi elektronskih dinamometrov vgrajenih v prednapeta geotehnična sidra: valjasti dinamometer Bauer za sidro (levo), obročasti dinamometer SISGEO za sidro (sredina), valjasti dinamometer OG150/20 za pramen (desno).

Figure E.1: Different types of electrical load cells installed with prestressed ground anchors: a cylindrical load cell Bauer for an anchor (left), a ring load cell SISGEO for an anchor (middle), a cylindrical load cell OG150/20 for a strand (right).

Poznavanje ravni natezne sile v sidru, vključno z njenim spreminjanjem (porastom ali upadom) med življenjsko dobo, je pomembno tudi po zaklinjenju sidra, saj lahko na podlagi dinamike spreminjanja sil sklepamo na delovanje in učinkovitost sidranja, v kombinaciji z ostalimi ukrepi opazovanja (angl. monitoring) pa tudi na stanje sidranega objekta. Glede na to, da je pojavnost in intenzivnost določenih korozijskih procesov prednapetega jekla odvisna od visoke ravni napetosti v pramenih kabla sidra, so visoke vrednosti sidrskih sil v kombinaciji s pomanjkljivo protikorozijsko zaščito v območju glav sider tudi signal za nujno izvedbo ukrepov, v kolikor želimo s trajnimi prednapetimi sidri zagotoviti dolgo-ročno varnost in stabilnost sidranih objektov.

Alternativno se lahko velikost sidrskih sil v posebej prilagojenih merilnih sidrih ugotavlja z vnosom sile s posebno napenjalko in odmikom glave sidra od objekta (angl. lift-off test), vendar pa je tak postopek zamuden in možen le pri dostopnih sidrih, opremljenih s posebej prilagojeno kotvo sidra. V praksi se zato redno periodično spremljanje sil v sidrih običajno izvaja na merilnih sidrih opremljenih z dinamometri. Pri izbiri dinamometra se v praksi upoštevajo parametri kot so cena, merilno območje, zahtevana točnost, pa tudi okolje v katerih so vgrajeni (dostopnost mesta vgradnje za izvajanje odčitkov, temperatura, vlažnost, možnost poškodb med izvajanjem gradbenih del ali kasneje med fazo uporabe). Za zagotovitev točnosti izmerjenih sil Hanna (1982) navaja naslednje pogoje: sam dinamometer mora biti dovolj tog, zagotovljen mora biti centričen vnos sidrne sile, prav tako pa dinamometer ne sme biti občutljiv na vplive okolja. Za zanesljivo delovanje dinamometra je pomembno, da je dinamometer kalibriran, obenem pa mora biti skrbno vgrajen (enakomerno mora nalegati na obe ravni in dovolj togi naležni površini), njegova lega pa mora biti pravokotna ter čimbolj centrična glede na os sidra. Glede na to, da so sile v merilnih sidrih med življenjsko dobo objekta eden od pomembnih parametrov za oceno varnosti objekta, pri čemer pa je v praksi delež vgrajenih merilnih sider vedno znotraj minimalnih zahtev predpisov (skupno število kontrolnih in merilnih sider mora znašati 5 % vseh sider, a ne manj kot tri sidra na gradbeni element), obenem pa s časom lahko pride do poškodb in napak v delovanju dinamometrov vgrajenih v merilna sidra, morajo biti merilna sidra izdelana tako, da so dinamometri zamenljivi.

Možnih vzrokov za pomanjkljivo vgradnjo dinamometra je več: do osnega zamika dinamometra glede na os sidra lahko pride zaradi nenatančnosti pri izdelavi sidrišč sidranega objekta, netočne namestitve jeklenih elementov glave sidra, dinamometra in skupne napenjalke/mononapenjalk v času napenjanja in zaklinjenja sidra, do pomikov jeklenih elementov glave sidra pa lahko pride tudi med izvedbo napenjanja. Problem netočne poravnave dinamometra na ostale elemente glave in na samo os pramen kabla zainjektiranega sidra je še posebej izrazit pri namestitvi obročastega dinamometra (tako za preskuse nosilnosti sider kot tudi pri vgradnji v merilna sidra); kljub temu, da si izvajalci pri tem postopku pomagajo s podlaganjem elementov glav sidra in uporabljajo posebne šablone, se neenakomerni zdrsi elementov glave sidra navzdol v praksi pojavljajo tako med samimi preskusi nosilnosti sider kot tudi med zaklinjenjem merilnih sider (*sliki E.2 levo in sredina*). Posledica zdrsa je ekscentrična lega dinamometra glede na os kabla sidra, zaradi česar obročasti dinamometer ni enakomerno obremenjen po celotni površini, posledično pa je možen tudi vpliv na vrednosti izmerjenih sil v sidru.



Slika E.2: Ekscentrične lege obročastega dinamometra: primera iz naše prakse – med napenjanjem (levo) in zaklinjeno merilno sidro (sredina), med napenjanjem iz prospekta proizvajalca SISGEO (2009).

Figure E.2: Eccentric positions of a ring load cell: examples from our praxis – during tensioning (left) and at locked-off measuring anchor (middle), during tensioning published in the datasheet of SISGEO (2009).

Dodatni potencialni vir težav v smislu vpliva na točnost izmerjenih sil je lahko tudi kotni odklon med osjo vgrajenega kabla sidra in pravokotnico na naležno površino glave sidra, ki je lahko posledica netočne vgradnje jeklenega opažnega tulca sidra v sidrani objekt ali pa netočne kota vrtine sidra. Posledica kotnega odklona so lokalne preobremenitve žic pramen na mestih oprijema zagozd, kar lahko privede po pokanja žic in pramen pri silah, ki so bistveno nižje od porušnih sil pri čisti enoosni obremenitvi, možen pa je tudi vpliv na izmerjene sile v dinamometru, v skrajnem primeru pa lahko pride tudi do poškodb dinamometra. Zato je za preprečitev tega pojava v veljavnih predpisih podana zahteva, da mora biti glava sidra oblikovana na način, da dopušča odklon pramen od normale na glavo sidra do največ 3° pri 97 % porušne sile pramen, v primerih večjih odklonov pa je potrebno podlaganje glav sider s klinasto oblikovanimi ploščami.

Nekateri raziskovalci (Barley in McBarron, 1997 ter Barley in Windsor, 2000) navajajo dolgoletne slabe izkušnje pri izvedbi preskusov nosilnosti sider, predvsem v smislu slabe zanesljivosti dinamometrov pri obremenjevanju v terenskih pogojih: raziskovalci so pogosto imeli težave z ujemanjem vrednosti sil izvedenih iz vrednosti tlaka v hidravličnem sistemu in površine bata napenjalke ter vrednosti sil, odčitanih iz različnih tipov dinamometrov (hidravličnih, elektronskih z uporovnimi lističi oz. z

vibrirajočo žico). Zaradi tega so v praksi uravnavanje in spremljanje sil namesto z dinamometri vedno pogosteje izvajali preko hidravličnih sistemov, v katerih se tlak v sistemu določa na podlagi centralnega manometra z veliko analogno številčnico, ki omogoča dovolj točno odčitovanje tlaka. Posebno možnost kontrole delovanja sistema ponujajo večkratna sidra: vrednost tlaka v sistemu se na eni strani preverja na manometru hidravlične črpalke, na drugi strani pa je tudi vsaka od napenjalk opremljena s svojim manometrom, s čimer je možno spremljati tudi merilne napake manometrov (razlike v izmerjenem tlaku). Možen je tudi drugačen pristop, pri katerem se (ne glede na tip vgrajenega dinamometra) ekscentričnost vnosa sile v dinamometer bodisi prepreči bodisi se njen vpliv oceni (Littlejohn in Bruce, 1977, Hanna, 1973). V tistem času sta o vplivih ekscentričnosti na odčitke sidrskih sil podrobno poročala MacLeod in Hoadley (1974), ki sta na vzorcu sto vgrajenih dinamometrov (Melbourne, Avstralija) ugotovila, da je znašal povprečen padec sidrskih sil v času tri do šest mesecev po zaklinjenju sider 9 %, medtem ko je bil povprečni padec sile v 80 % merilnih sider le 5 %. Razliko v obnašanju sider sta pripisala netočnemu delovanju dinamometrov, vezanem na njihovo vgradnjo. To so potrjevali rezultati meritev padca sil na drugem objektu, na katerem so točni vgradnji dinamometrov posvetili večjo skrb, saj je po enem mesecu sila v vseh merilnih sidrih padla le za 1 %.

Pomembnost izmerjenih sil v sidrih za izvedbo in vrednotenje preskusov nosilnosti sider, kot tudi poznavanje velikosti sil v merilnih sidrih sidranega objekta med njegovo življenjsko dobo, odpira dilemo, ali so slabe izkušnje glede nezanesljivosti dinamometrov posledica nižje tehnološke razvitosti pred desetletji ali pa so bile slabosti s tehnološkim razvojem zadovoljivo odpravljene, kot to nakazuje primer ekscentrično postavljenega obročastega dinamometra med izvedbo napenjanja, kot je podan v prospektu italijanskega proizvajalca SISGEO S.r.l. (slika E.2 desno).

E.1 IZVEDBA LABORATORIJSKEGA PRESKUSA EKSCENTRIČNO OBREMENJENEGA OBROČASTEGA DINAMOMETRA

E.1.1 Opis elektronskega obročastega dinamometra SISGEO tip L216V150

Za izvedbo PS po sistemu napenjanja z mononapenjalkami se pri nas uporabljajo elektronski obročasti pretvorniki sile (dinamometri) italijanskega proizvajalca SISGEO S.r.l. tipa L216V150, katerih nazivna kapaciteta 1500 kN zadošča za izvedbo PS do porušitve 6-pramenskih sider. Po podatkih proizvajalca so elektronski dinamometri sestavljeni iz treh komponent:

- obročastega telesa iz nerjavnega jekla na katerega so pritrjeni elektro uporovni merilni lističi v obliki Wheatstonovega mostu z 8 do 16 merilnimi lističi (v tip L216V150 je glede na [sliko E.11](#) vgrajenih 16 merilnih lističev), s samo zasnovo in izvedbo dinamometra pa naj bi bila zmanjšana njegova občutljivost na ekscentrične obremenitve,
- togega porazdelitvenega jeklenega obroča za enakomernejšo porazdelitev sile na dinamometer ter
- električnega kabla za prenos signala do digitalnega prikazovalnika obremenitev.

Osnovni princip delovanja dinamometra z elektro uporovnimi merilnimi lističi temelji na lastnosti kovine, da se njena električna upornost spreminja v direktni odvisnosti od deformacije, povzročene z mehansko obremenitvijo: pri tlačni obremenitvi se jekleno telo – v tem primeru obroč dinamometra – elastično deformira, kar zaradi toge povezave merilnih lističev s telesom dinamometra posledično povzroči tudi deformacijo merilnih lističev, zaradi česar se spremeni presek prevodnikov lističev, posledično pa tudi njihova električna upornost. Digitalni prikazovalnik sile C6003, ki istočasno zagotavlja tudi vir

električnega toka za delovanje dinamometra in izvedbo meritve, zbere signale vseh na dinamometru vgrajenih merilnih lističev in jih pretvori v enotno vrednost izhodnega električnega signala v [mV/V], ki jo prikaže na svojem zaslonu in je sorazmerna tlačni sili, delujoči na dinamometer.

Tehnična dokumentacija dinamometra L216V150 predvideva dve možnosti za prevrednotenje odčitane vrednosti [mV/V] v inženirsko enoto [kN]:

- Pri običajnem pristopu se na podlagi linearnosti pretvornika prevrednotenje izvede po izrazu:

$$P = \frac{L}{S}, \quad (\text{E.1})$$

kjer so: P ...vrednost sile v inženirskih enotah [kN],
 L ...odčitek v električnih enotah [mV/V] in
 S ...faktor občutljivosti podan v tovarniškem kalibracijskem certifikatu.

- V kolikor je potreben odčitek sile večje točnosti, potem se v tem primeru odčitek iz električnih enot [mV/V] v inženirske [kN] pretvori z interpolacijskim polinomom po naslednjem izrazu:

$$P = AL^2 + BL + C, \quad (\text{E.2})$$

kjer so: P ...vrednost sile v inženirskih enotah [kN],
 L ...odčitek v električnih enotah [mV/V] in
 A, B in C ... faktorji občutljivosti podani v kalibracijskem certifikatu.

Obročasti dinamometer L216V150 je namenjen meritvam sil v območju med 0 in 1500 kN, premer osrednje odprtine telesa dinamometra (obroča) znaša 165 mm, njegov zunanji premer je 260 mm, višina pa 40 mm. Premer osrednje odprtine pripadajočega porazdelitvenega obroča znaša prav tako 165 mm, zunanji premer 210 mm, njegova višina pa 30 mm. Po tehnični specifikaciji proizvajalca so lahko obročasti dinamometri preobremenjeni do 50 % nazivnega območja, njihova občutljivost znaša 0,001 mV, točnost do 0,5 % nazivnega območja, vpliv temperature na izmerjene vrednosti (angl. thermic zero shift) pa znaša do 0,005 %/°C. Delovanje dinamometra je predvideno v območju temperatur med -15 °C in 70 °C, pri čemer je temperaturna kompenzacija zagotovljena v območju temperatur med -10 °C in 60 °C.

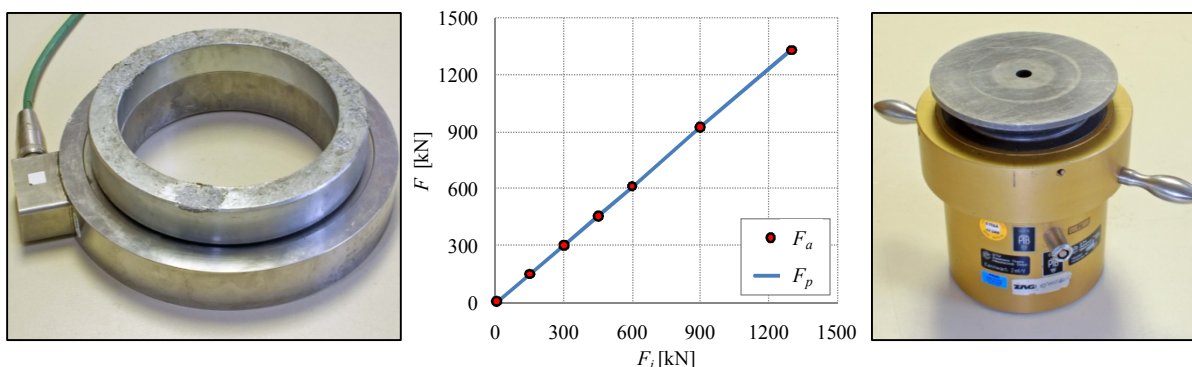
Proizvajalec v tehnični dokumentaciji dinamometra L216V150 navaja, da je zaradi specifične zasnove njegova občutljivost na ekscentričen vnos sile zelo nizka. Ne glede na to moramo pri vgradnji vsakega dinamometra posebno pozornost nameniti ravnosti in vzporednosti zgornje in spodnje naležne ploskve, med kateri se namesti dinamometer, da se lahko sila enakomerno porazdeli po obroču. V praksi je tako nujno namestiti podložno jekleno ploščo zadostne debeline (vsaj 30 mm) kot tudi premera, ki mora biti od premera dinamometra večji vsaj za 20 mm. Proizvajalec v tehnični dokumentaciji opozarja, da so korektni rezultati meritev možni le pod pogojem, da sta togosti obeh jeklenih plošč, med kateri je vstavljen dinamometer, večji od togosti dinamometra, kar pravzaprav pomeni, da mora biti dinamometer najmanj tog element sklopa glave sidra.

Laboratorijski preskus smo izvedli na obročastem dinamometru z oznako 08-33990 (slika E.3 levo) z ločenim digitalnim kazalnikom obremenitev C6003, ki ga je izvajalec sidrskih del redno uporabljal pri svojem delu za izvedbe PS in preskusov nosilnosti v letu 2009, uporabljen pa je bil tudi pri ponovitvi terenskih preskušanj sider testnega polja na opornem zidu OZ-05. Dinamometer je bil marca 2009 skladno s standardom *EN ISO 376* kalibriran v Metrološkem laboratoriju Zavoda za gradbeništvo Slovenije,

pri čemer je bila izvednotena naslednja interpolacijska enačba, katere vrednosti so v diagramu (slika E.3 sredina) prikazane skupaj z vrednostmi dejanske sile F_p vnesene pri kalibraciji:

$$F_a = 976,8549 \cdot F_i + 99,6509 \cdot F_i^2 - 49,7180 \cdot F_i^3, \quad (E.3)$$

kjer sta: F_i ...izbrana sila na merilu (kazalniku obročastega dinamometra) v [MN],
 F_a ...interpolirana sila v [kN].



Slika E.3: Obročasti dinamometer SISGEO L216V150 (levo), kalibracijski diagram dobljenim po standardu *EN ISO 376* (sredina), referenčni dinamometer KTN-DZY nazivne kapacitete 3 MN proizvajalca GTM Gassmann Testing and Metrology GmbH (desno).

Figure E.3: The ring load cell SISGEO L216V150 (left), the diagram of calibration obtained according to the standard *EN ISO 376* (middle), the reference load cell KTN-DZY with nominal capacity of 3 MN made by GTM Gassmann Testing and Metrology GmbH (right).

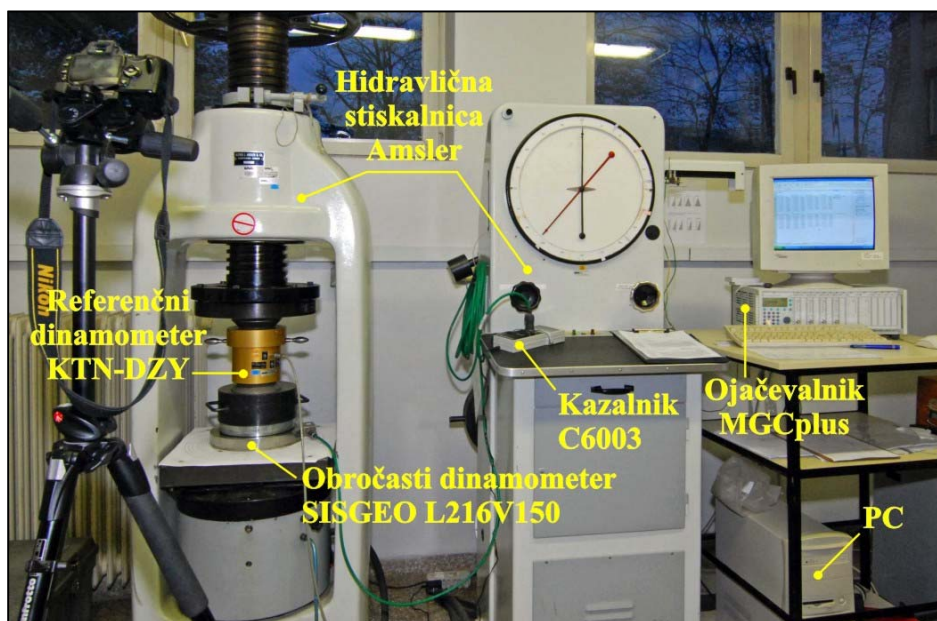
E.1.2 Opis merilne in preskusne opreme

Laboratorijski preskus vpliva ekscentrične lege na vrednosti izmerjenih sil obročastega dinamometra tipa L216V150 proizvajalca SISGEO S.r.l. smo izvedli na kalibracijski preskuševalni napravi – hidravlični stiskalnici proizvajalca Alfred J. Amsler & Co. z oznako ID1100246, ki je predvidena za vnašanje tlačnih sil v smeri osi njenega bata. Za preprečitev poškodb preskušancev, do katerih bi lahko prišlo pri njihovem ekscentričnem tlačnem obremenjevanju, je v zgornjem delu vgrajen posebni varovalni mehanizem v obliki vrtljive zgornje plošče, ki med tlačnim preskusom omogoča zasuk zgornje plošče velikostnega reda nekaj stopinj.

Preskusni sistem stiskalnice je sestavljen iz hidravlične črpalke z ventili ter sistema za razvod olja, mehanskega merilnega sistema ter ohišja stiskalnice z batom. Zasnova delovanja sistema je preprosta: črpalka iz shranjevalne posode črpa olje v stiskalnico z batom, s povečevanjem tlaka olja pa se povečuje tlačna sila v stiskalnici. Uravnavanje tlaka olje se izvaja z ročnim, vendar zelo zanesljivim regulacijskim sistemom z dvema ventiloma. V dovodnem ventilu ob zaprtem povratnem ventilu povečujemo tlak v sistemu, medtem ko pri odpiranju povratnega ventila olje odteče nazaj v shranjevalno posodo, s čimer se ob zaprtem dovodnem ventilu tlak v sistemu zmanjšuje. Z uravnavanjem obeh ventilov lahko izkušeni operater učinkovito obvladuje tako hitrost vnosa sile v stiskalnico kot tudi točno uravnava raven sile. V sklopu sistema se nahaja mehanski merilni sistem z nihalom in utežmi, ki operaterju omogoča osnovno kontrolo in vpogled v delovanje sistema, vendar pa raven točnosti odčitovanja tlačne sile za potrebe našega preskušanja ni bil zadosten. Zato smo za točno spremljanje tlačne sile v hidravlično stiskalnico preko toge krožne jeklene plošče položene na preskušani dinamometer SISGEO L216V150 namestili referenčni elektronski pretvornik sile (dinamometer) tipa KTN-DZY nazivne kapacitete 3 MN

(slika E.3 desno) nemškega proizvajalca GTM Gassmann Testing and Metrology GmbH, ki ga v Metrološkem laboratoriju Zavoda za gradbeništvo Slovenije pri kalibracijah tudi sicer uporabljajo kot prenosni etalon. Dinamometer KTN-DZY je namenski referenčni dinamometer razreda 1 za izvajanje kalibracij z visokimi tlačnimi silami, katerega značilnosti sta visoki ponovljivost in dolgotrajna stabilnost. Kot je razvidno iz certifikata o kalibraciji št. C 231/09-310-14 z dne 23.03.2009 za dinamometer SISGEO tipa L216V150, številka 08-033990, pri uporabi dinamometra KTN-DZY kot prenosnega etalona v območju temperature $21,8\text{ °C} \pm 0,5\text{ °C}$ znaša merilna negotovost 0,17 % izmerjene vrednosti sile.

Pri izvedbi laboratorijskega preskusa smo na posameznih stopnjah sile na ročnem kazalniku C6003 obročastega dinamometra L216V150 odčitovali sile, ki smo jih med preskušanjem vnašali v sistem, medtem ko smo dejansko vrednost tlačne sile v stiskalnici odčitovali na referenčnem dinamometru KTN-DZY. Referenčni dinamometer je bil povezan z univerzalnim večkanalnim ojačevalnikom in sistemom za zajemanje podatkov MGCplus nemškega proizvajalca HBM, ki omogoča izvedbo dolgotrajno stabilnih statičnih meritev visoke ločljivosti in se uporablja tudi pri kalibracijah. Analogni signal referenčnega dinamometra je bil v 24-bitnem analogno-digitalnem konverterju sistema za zajemanje podatkov MGCplus pretvorjen v digitalno obliko in posredovan v osebni računalnik, kjer smo podatke zajemali s programsko opremo Catman. Sistem (slika E.4) smo z uravnavanjem ventilov stiskalnice Amsler krmilili ročno, z ročnim proženjem pa smo odčitovali sile v referenčnem dinamometru.



Slika E.4: Elementi sistema za preskušanje vpliva ekscentrične lege dinamometra SISGEO L216V150 na velikost izmerjenih sil.

Figure E.4: Elements of the system used for testing of influence of eccentrical lays of the SISGEO L216V150 load cell on measured forces.

E.1.3 Izvedba laboratorijskega preskusa vpliva ekscentrično obremenjenega obročastega dinamometra SISGEO L216V150

Kalibracije merilnikov sile se izvajajo po standardu *SIST EN ISO 376:2005 Kovinski materiali – Kalibracija merilnikov sile, ki se uporabljajo za preverjanje preskusnih strojev z enoosno obremenitvijo (EN ISO 376)*. Skladno s tem standardom se med kalibracijo v merilnik sile vnašajo točne sile, hkrati

pa se beležijo vrednosti izmerjene v merilniku. Pred izvedbo postopka kalibracije standard predvideva predhodno trikratno obremenitev in razbremenitev sistema do maksimalne sile. Postopek kalibracije se izvede najprej kot serija dveh meritev samo naraščajočih sil, nato pa se izvedeta še najmanj dve seriji meritev naraščajočih in padajočih sil, s tem da se merilni inštrument med posameznimi serijami zavrti za 180° (pri dveh serijah) ali pa za 120° (pri treh serijah). Za določitev interpolacijske krivulje je potrebnih najmanj osem točk, čimbolj enakomerno porazdeljenih po kalibracijskem območju. Časovni intervali med zaporednimi obremenitvami morajo biti čimbolj enakomerni, pri čemer se odčitek po standardu ne opravi prej kot v 30 sekundah po spremembi sile. Celoten postopek kalibracije se izvede pri konstanti temperaturi, ki se lahko med kalibracijo spreminja za največ ± 1 °C, pri čemer mora biti temperatura v območju med 18 °C in 28 °C.

Z laboratorijskim preskusom vpliva ekscentrične lege obročastega dinamometra L216V150 nazivne kapacitete 1500 kN na izmerjene vrednosti sil smo želeli v najboljši možni meri ponazoriti vpliv zamika med osjo vgrajenega sidra in osjo obročastega dinamometra, do katerega prihaja na mestu preskušanja sider v praksi. Zaradi tega smo izbrali isti obročasti dinamometer, s katerim smo izvajali PS in VPN prednapetih geotehničnih sider leta 2009. V kolikor bi nas bolj zanimali vplivi ekscentrične lege dinamometrov merilnih sider, potem bi bilo bolj primerno izbrati nov (še nerabljen) dinamometer nižje nazivne kapacitete, saj so sile zaklinjenja merilnih sider precej nižje od preskusnih sil pri PS. Tudi sicer nekateri izvajalci sidrskih del v praksi vgrajujejo dinamometre tipa L212V100 nazivne kapacite 1000 kN, ki so tudi geometrijsko nekoliko manjši od tipa L216V150 (zunanji premer dinamometra je manjši za 40 mm, notranji premer za 45 mm, medtem ko je njegova debelina enaka).

Preskus smo izvajali v kontroliranih laboratorijskih pogojih Metrološkega laboratorija Zavoda za gradbeništvo Slovenije, kjer je bilo zagotovljeno izvajanje meritev pri stacionarnih pogojih okolja $21,0$ °C \pm $0,5$ °C. Da bi se pri oceni pogrškov dejanskih sil pri preskušanju sider v praksi čimbolj približali dejanskim pogojem na terenu, smo pri izvedbi laboratorijskega preskusa obročastega dinamometra smernice in navodila standarda *EN ISO 376* smiselno prilagodili dejanskim pogojem v praksi pri izvedbi PS, obenem pa smo poskušali čimbolj realno oceniti in upoštevati najpomembnejše vplivne parametre:

- Odločili smo se, da pred izvedbo preskusa izvedemo le enkratno predobremenitev in razbremenitev sistema do maksimalne preskusne sile, s katero smo dosegli, da se je celoten laboratorijski sistem obročastega in referenčnega dinamometra ter vmesne toge jeklene plošče prilagodil na zgornjo in spodnjo ploščo hidravlične stiskalnice. Ta odločitev je bila kompromis med zahtevami in zasnovo laboratorijskega preskušanja ter dejanskim stanjem na terenu – takšna predobremenitev se pri preskušanjih sider v praksi ne izvaja, čeprav bi bilo treba, glede na dosedanje izkušnje terenskih in laboratorijskih preskušanj, o tem razmišljati. Pri terenskem in laboratorijskem preskušanju so pri izvedbi preskušanja poleg obročastega dinamometra vključeni še ostali elementi, ki so nameščeni bodisi v preskuševalni napravi bodisi v območju glave sider, ki se morajo še pred začetkom meritev medsebojno naravnati in prilagoditi, saj v nasprotnem primeru pride do medsebojnega uleganja elementov med samo meritvijo, kar posledično vpliva tudi na njene rezultate.
- Pri vsaki seriji izvedenih meritev obročastega dinamometra nismo obračali po postopku, kot ga za postopek kalibracije predvideva standard *EN ISO 376*, saj na ta način ne bi mogli raziskovati vpliva rotacije obročastega dinamometra na izmerjene vrednosti sile, prav tako pa se to ne izvaja pri terenskih preskusih nosilnosti sider.
- Pri izbiri zgornje ravni tlačne sile, kot tudi ekscentričnosti (zamika) med osema referenčnega in obročastega dinamometra, sta bila pomembna vplivna faktorja varnost izvedbe laboratorijskega preskusa in preprečitev poškodb opreme. Zaradi teh razlogov smo preskus izvedli tako, da zglob

zgornje plošče stiskalnice ni bil blokiran, s čimer je bilo omogočeno rahlo prilagajanje kota zgornje plošče, čeprav rotacija zgornje jeklene plošče nad obročastim dinamometrom med preskušanjem sider v praksi ni možna oz. je posledica napak in nedoslednosti pri izvedbi preskušanj sider (npr. preskusni betonski blok sidra ni izdelan na trdni podlagi in se med preskušanjem premika oz. nenakomerno vtiska v podlago). Odločitev smo sprejeli na podlagi posveta s strokovnjaki za taka preskušanja, saj je, zaradi iz osi izmaknjene naganja zgornje plošče pri visokih tlačnih silah, obstajala potencialna možnost poškodbe referenčnega dinamometra KTN-DZY, večja pa bi bila tudi nevarnost bočnega izmeta valjastega referenčnega dinamometra v območju največje izbrane ekscentričnosti.

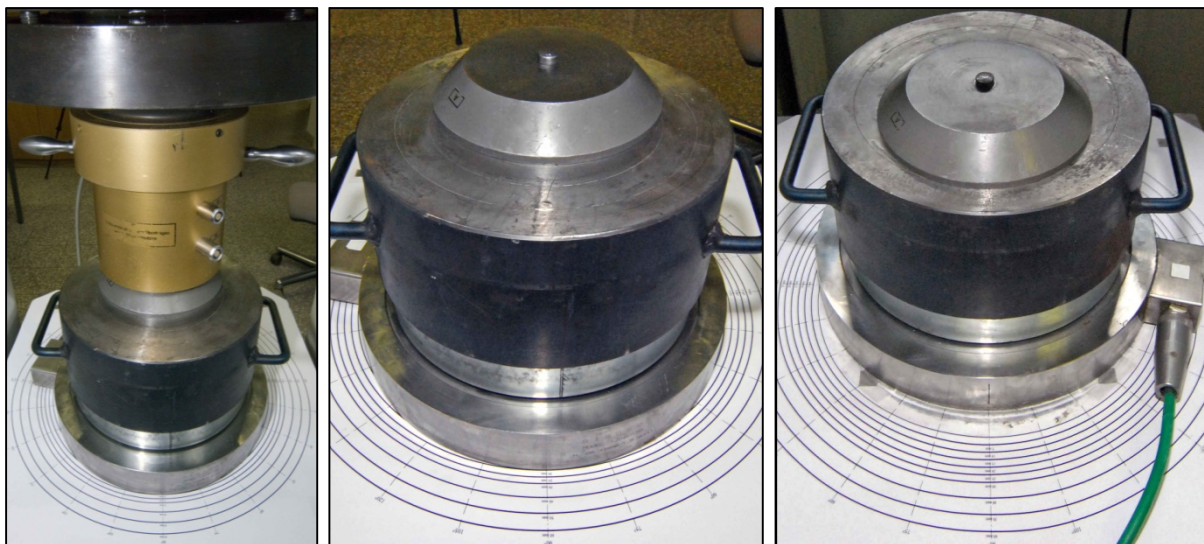
- Pri izbiri zgornje meje območja ekscentričnosti med osjo bata hidravlične stiskalnice z referenčnim dinamometrom KTN-DZY in osjo obročastega dinamometra L216V150 se je izkazalo, da se pri vrednosti ekscentričnosti 40 mm spodnja krožna podložna plošča referenčnega dinamometra že močno približa zunanjemu robu toge krožne jeklene plošče položene na obročasti dinamometer (slika E.6 skrajno spodaj levo).

Zaradi varnosti izvedbe preskusa in preprečitve morebitnih poškodb referenčnega dinamometra smo se odločili, da omejimo velikost ekscentričnosti osi med dinamometroma na 40 mm, čeprav so v praksi (pri sidrih z manjšim številom pramen) teoretično možne tudi še nekoliko večje ekscentričnosti, vendar pa se takšna sidra praviloma ne pojavljajo kot preskusna sidra, na katerih bi se izvajale PS do porušitve. Glede na izbrano zgornjo mejo ekscentričnosti 40 mm in zasnovo preskusnega sistema smo ocenili, da bi v območju večjih ekscentričnosti zaradi lokalnih tlačnih preobremenitev lahko prišlo tudi do poškodb obročastega dinamometra L216V150, zato smo kot zgornjo raven maksimalne preskusne sile izbrali vrednost 1200 kN, kar je v praksi blizu tako preskusne sile $P_{pv} = 1254$ kN terenskih preskusov nosilnosti, opisanih v poglavjih 3.5 in 3.6 disertacije, kot tudi zgornje meje preskusne sile za 6-pramenska preskusna sidra, sestavljena iz pramen nazivne površine prečnega prereza 140 mm^2 . Tako raven preskusne sile laboratorijskega preskusa smo ohranili do ekscentričnosti osi 10 mm, pri ekscentričnosti osi 20 mm in 30 mm smo jo zmanjšali za eno stopnjo na 1050 kN, medtem ko smo v zadnji fazi pri ekscentričnosti 40 mm zaradi varnosti uporabili le še tlačno silo velikosti 900 kN.

Območje do maksimalne preskusne sile 1200 kN smo s korakom 150 kN razdelili na osem intervalov, pri čemer smo preskus izvajali z enakomerno naraščajočimi tlačnimi silami na podoben način, kot tudi v praksi delamo PS in ostale preskuse nosilnosti sider. Laboratorijski preskus smo izvedli tako, da smo obročasti dinamometer SISGEO položili na spodnjo ploščo hidravlične stiskalnice, na katero smo pritrdili papirnato šablono z označenimi stopnjami zamikov ekscentričnosti in rotacije. Obročasti dinamometer smo centrično položili na šablono (zamik $e = 0$ mm) in ga nastavili na začetno rotacijo ($\phi = 0^\circ$). Preko njega smo centrično položili najprej vmesno togo jekleno ploščo, nato pa še referenčni dinamometer. Pred začetkom preskusa smo po končani obremenitvi in razbremenitvi sistema do maksimalne preskusne sile ponovno nastavili referenčni dinamometer, medtem ko smo na ročnem kazalniku C6003 obročastega dinamometra odčitali začetno vrednost sile, ki predstavlja ničelni zamik (angl. zero offset) tega dinamometra ter vključuje tudi težo vmesne toge jeklene plošče in referenčnega dinamometra. Začeli smo z enakomernim povečevanjem tlačne sile v hidravlični stiskalnici. Ko je raven sile na ročnem kazalniku C6003 obročastega dinamometra pokazala raven stopnje sile, povečan za začetno vrednost sile, smo z ročnim proženjem (preko osebnega računalnika povezanega z univerzalnim večkanalnim ojačevalnikom in sistemom za zajemanje podatkov MGCplus) odčitali vrednost sile v referenčnem dinamometru. Po izvedenem zadnjem odčitku na ravni največje sile smo sistem razbremenili ter ponovili celoten preskus pri isti nastavitvi ekscentričnosti in rotacije obročastega dinamometra.

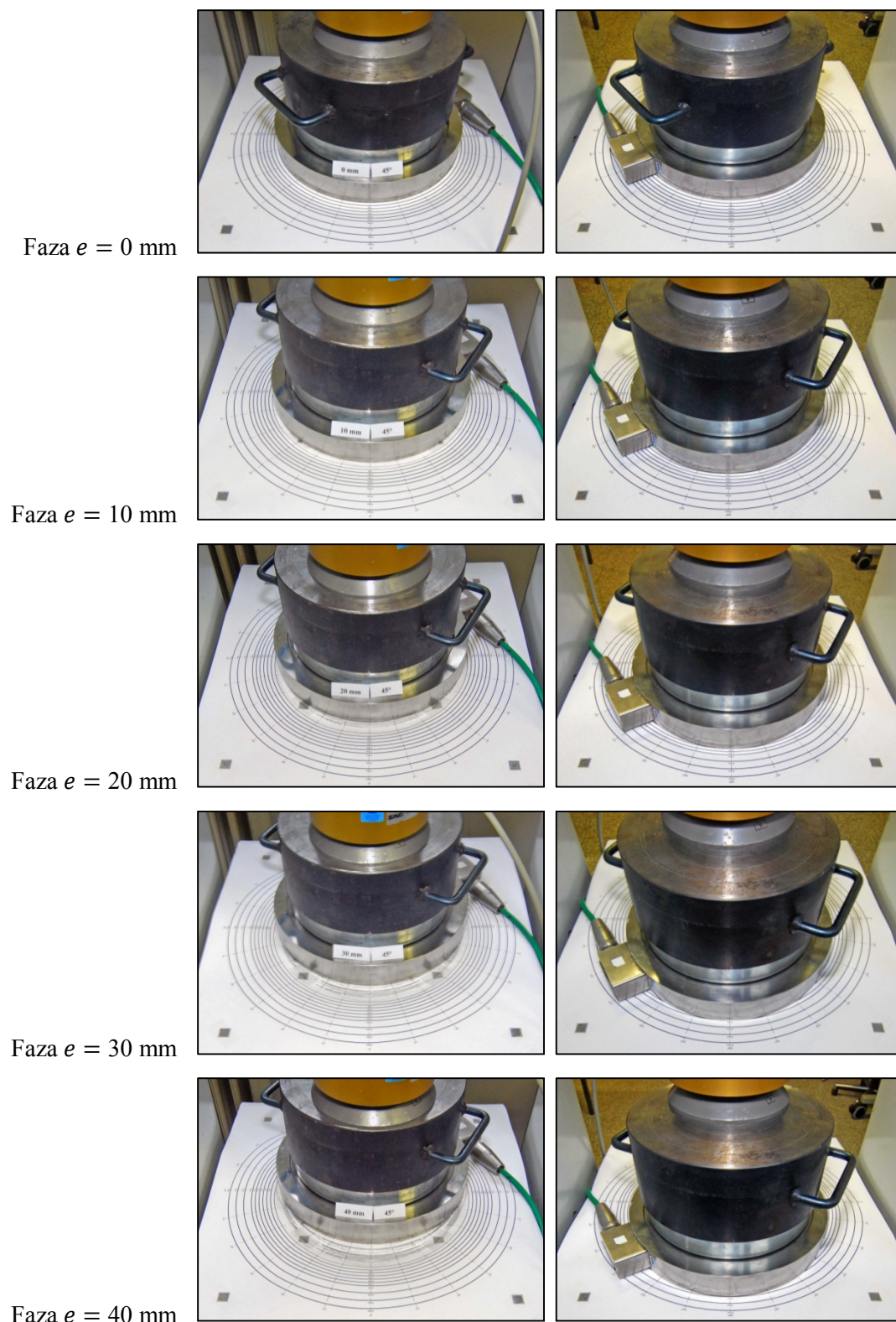
Iz primerjave rezultatov obeh meritev sil pri različnih ekscentričnostih pri isti rotaciji obročastega dinamometra se je izkazalo, da so se rezultati obeh meritev zelo dobro ujemale, zato smo tudi v nadaljevanju preskusa pri isti rotaciji obročastega dinamometra izvajali le po dve ponovitvi meritev.

Po končani ponovitvi preskusa na eni stopnji ekscentričnosti smo odstranili referenčni dinamometer in vmesno togo jekleno ploščo, ter obročasti dinamometer pod istim kotom rotacije prestavili za naslednji korak zamika osi 5 mm oz. 10 mm. Na obročasti dinamometer smo centrično namestili vmesno togo jekleno ploščo, na katero smo s posebno pozornostjo namestili najprej spodnjo krožno podložno ploščo referenčnega dinamometra, nanjo pa smo položili še referenčni dinamometer. Ročno smo na razdaljo nekaj milimetrov spustili zgornjo ploščo hidravlične stiskalnice ter preverili centričnost naleganja referenčnega dinamometra v stiskalnici. Ponovno smo preverili namestitev vmesne toge jeklene plošče in referenčnega dinamometra ter izvedli enkratno obremenitev in razbremenitev sistema do maksimalne preskusne sile. Nato smo začeli z dvigovanjem tlačne sile v sistemu ter na vnaprej določenih stopnjah sile ročno odčitovali vrednosti sil v referenčnem dinamometru. Tudi na tej stopnji smo sistem razbremenili in ponovno nastavili ter ponovili celoten preskus pri isti nastavitvi ekscentričnosti in rotacije obročastega dinamometra. Po istem postopku smo z laboratorijskim preskusom pri isti rotaciji dinamometra nadaljevali še pri vseh nadaljnjih stopnjah ekscentričnosti, pri čemer je bilo v naslednjih fazah z večjimi ekscentričnostmi potrebno še bolj skrbno merjenje in preverjanje tako lege referenčnega dinamometra glede na jekleno ploščo kot tudi glede na zgornjo ploščo stiskalnice (slika E.5). Po enakem postopku smo s preskušanjem nadaljevali še pri ostalih stopnjah rotacije dinamometra L216V150 15°, 22,5°, 30° in 45°, pri čemer je celoten program preskušanj podan v preglednici E.1, medtem ko so pogledi s sprednje in z zadnje strani na postavitve dinamometrov v hidravlični stiskalnici Amsler med serijo preskušanj pri rotaciji 45° prikazani na sliki E.6.



Slika E.5: Detajli namestitve obročastega dinamometra SISGEO in referenčnega dinamometra KTN-DZY pri ekscentričnosti 20 mm: med preskusom v hidravlični stiskalnici Amsler (levo), toga podložna plošča referenčnega dinamometra od zadaj (sredina), toga podložna ploščica referenčnega dinamometra od spredaj (desno).

Figure E.5: Details of positioning of the ring load cell SISGEO and the reference load cell KTN-DZY at eccentricity of 20 mm: during testing in the Amsler hydraulic press (left), rear view (middle) and front view (right) on the stiff bearing plate below reference load cell.



Slika E.6: Faze preskusa vpliva ekscentričnosti na izmerjene sile obročastega dinamometra SISGEO L216V150 zavrnega za 45° – pogled od spredaj (levo), pogled od zadaj (desno).

Figure E.6: Testing phases for assessment of influence of eccentricity on measured forces of ring load cell SISGEO L216V150 rotated for 45° – front view (left), rear view (right).

Preglednica E.1: Izvedene faze laboratorijskega preskusa vpliva ekscentrično obremenjenega obročastega dinamometra SISGEO L216V150 na izmerjene sile.

Table E.1: Accomplished phases of the laboratory testing of the influence of eccentrically loaded ring load cell SISGEO L216V150 on measured forces.

ϕ [°]	e [mm]	Stopnja sile [kN]								ϕ [°]	e [mm]	Stopnja sile [kN]							
		150	300	450	600	750	900	1050	1200			150	300	450	600	750	900	1050	1200
0	0	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	15	0	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	5	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		5	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	10	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		10	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	20	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		20	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	30	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		30	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	40	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		40	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
22,5	0	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	30	0	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	5	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		5	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	10	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		10	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	20	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		20	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	30	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		30	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	40	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		40	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
45	0	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	45	0	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	5	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		5	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	10	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		10	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	20	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		20	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	30	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		30	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	40	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		40	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Opombi:

- ϕ ... rotacija obročastega dinamometra,
- e ... ekscentričnost (zamik med osema obročastega in referenčnega dinamometra).

E.1.4 Rezultati laboratorijskega preskusa vpliva ekscentrično obremenjenega obročastega dinamometra SISGEO L216V150

Kot smo že opisali smo laboratorijski preskus izvedli s po dvema zaporednima serijama enakomernega tlačnega obremenjevanja obročastega dinamometra L216V150 v hidravlični stiskalnici Amsler. Ker v posamezni seriji preskušanja obročastega dinamometra nismo obračali, smo pri vrednotenju rezultatov preskusa upoštevali ustrezne izraze predvidene v standardu *EN ISO 376*. Med laboratorijskim preskusom smo na vnaprej predvidenih ravneh izbranih sil F_i , kot jih je prikazovalo merilo (vrednost odčitana iz digitalnega kazalnika C6003 obročastega dinamometra L216V150), korigiranih za začetno vrednost sile, z ročnim proženjem odčitali vrednost X na univerzalnim večkanalnem sistemu za zajemanje podatkov MGCplus, direktno priključenem na referenčni dinamometer KTN-DZY (v nadaljevanju: etalon). Odčitane vrednosti etalona X so bile v enotah izhodnega električnega signala [mV/V], pri čemer smo vrednosti prve serije označili s X_1 , vrednosti druge serije pa X_2 .

Rezultate meritev smo ovrednotili z naslednjimi parametri, opredeljenimi v standardu *EN ISO 376*:

- na osnovi parametrov, dobljenih pri kalibraciji etalona, lahko za vsako predvideno raven sile F_i izvrednotimo pričakovano vrednost X_i [mV/V], ki jo kaže etalon; v našem primeru se pričakovane vrednosti X_i [mV/V] iz odčitanih vrednosti etalona F_{ei} izvrednotijo po naslednji interpolacijski enačbi:

$$X_i = 6,7013 \cdot 10^{-4} \cdot F_{ei} - 4,0479 \cdot 10^{-9} \cdot F_{ei}^2 + 5,9896 \cdot 10^{-13} \cdot F_{ei}^3; \quad (E.4)$$

- na podlagi odčitkov obeh serij meritev, kot jih je pri izbranih silah F_i kazal etalon, smo izvednotili povprečne vrednosti etalona brez rotacije X_{wr} [mV/V]:

$$\bar{X}_{wr} = \frac{X_1 + X_2}{2}; \quad (E.5)$$

- srednje vrednosti dejanske sile etalona F_p [kN] izračunamo na podlagi izbrane sile F_i merila, ki jo pomnožimo s kvocientom povprečne vrednosti odklona brez rotacije \bar{X}_{wr} obeh serij in pričakovanih vrednosti X_i (kvocient je torej razmerje med povprečnimi vrednostmi, ki jih etalon kaže, in vrednostmi, ki bi jih etalon pri izbranih silah po interpolacijski enačbi moral kazati):

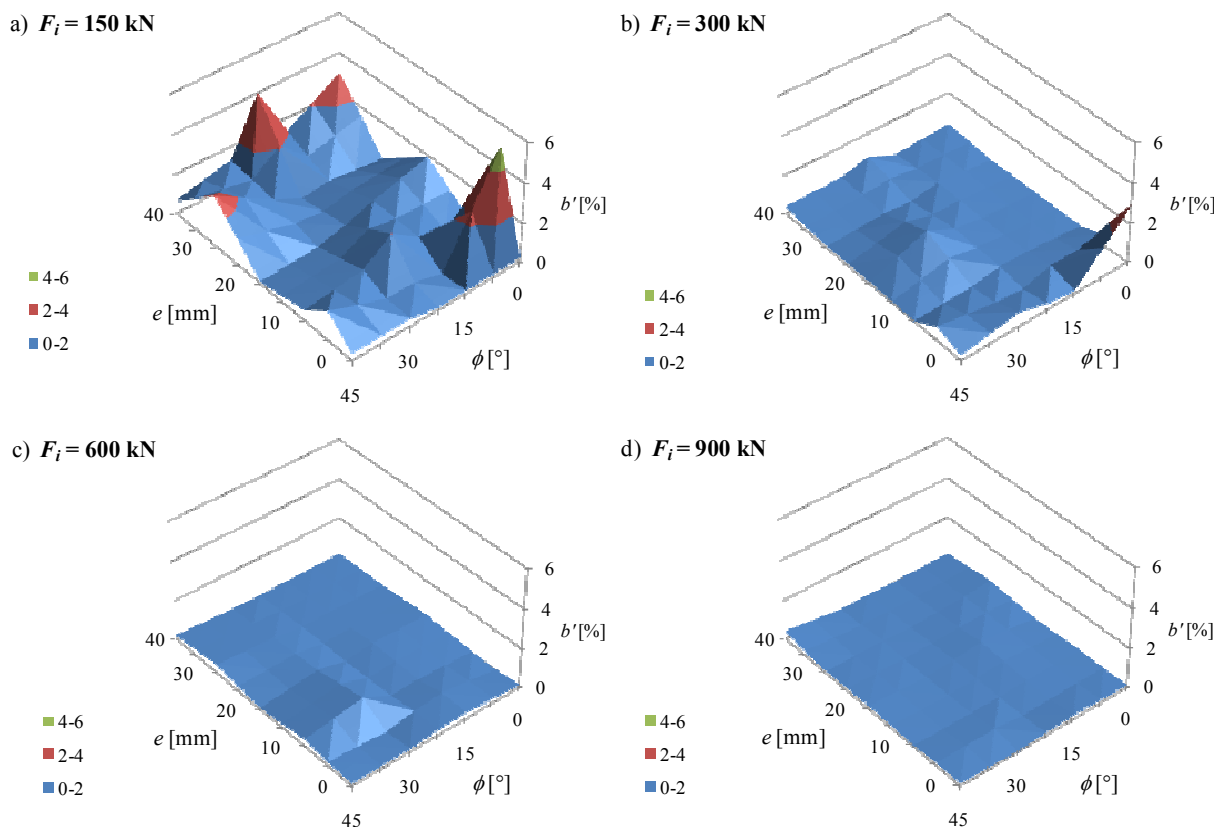
$$F_p = F_i \frac{\bar{X}_{wr}}{X_i}; \quad (E.6)$$

- na osnovi odčitkov vrednosti obeh serij ter izvednotene povprečne vrednosti odklona brez rotacije \bar{X}_{wr} lahko izvednotimo tudi relativni pogrešek ponovljivosti brez rotacije b' [%]:

$$b' = \left| \frac{X_2 - X_1}{\bar{X}_{wr}} \right| \cdot 100. \quad (E.7)$$

Relativni pogrešek ponovljivosti je po standardu *EN ISO 376* eden izmed tistih parametrov, na podlagi katerega dinamometre razvrščamo v posamezne razrede: za dinamometre razreda 00 lahko relativni pogrešek ponovljivosti brez rotacije b' znaša največ 0,025 %, vrednosti pa se višajo do 0,20 %, kot znaša mejna vrednost pri razredu 2.

V splošnem s ponovljivostjo zajamemo kakovosti meritev, ki so jih izvedli isti ljudje, pod enakimi pogoji in postopki, na isti preskuševalni opremi in istem merjencu. Za rezultate neke meritve lahko rečemo, da so ponovljivi, če je njihova sprememba manjša od neke dogovorjene mejne vrednosti oz. da se rezultati zaporednih meritev iste merjene veličine, opravljenimi pod enakimi pogoji merjenja, ujemajo. V našem primeru smo relativni pogrešek ponovljivosti brez rotacije b' uporabili kot kazalnik za oceno občutljivosti preskuševalnega sistema v smislu ponovljivosti izvedbe meritev vpliva ekscentrične lege obročastega dinamometra na vrednosti izmerjenih sil, ki jih kaže: pri različnih stopnjah tlačne sile, delujoče na obročasti dinamometer, smo spreminjali tako rotacijo tega dinamometra kot tudi njegov zamik (ekscentričnost) glede na os preskuševalne naprave in etalon. Za globalni vpogled vpliva posameznega parametra (raven tlačne sile, ekscentričnost dinamometra in rotacija dinamometra) na relativni pogrešek ponovljivosti brez rotacije b' smo vse izvednotene vrednosti preskušanja najprej prikazali v tridimenzionalnih diagramih, kjer smo vse tri parametre (stopnjo sile F_i , zamik e in rotacijo ϕ) prikazali v vseh medsebojnih kombinacijah. Pregled rezultatov je pokazal, da ima na relativni pogrešek ponovljivosti brez rotacije b' največji vpliv prav raven preskusne sile (slika E.7), pri čemer so posamezne vrednosti b' visoke in so lahko celo večje od 4 %, vendar pa z naraščanjem tlačne sile zelo hitro upadajo. Glede na to, da so te visoke lokalne vrednosti precej neenakomerno porazdeljene po opazovanem področju le na prvi stopnji preskusa pri sili 150 kN, lahko privzamemo, da niso posledica človeškega faktorja pri namestitvi dinamometrov in toge jeklene plošče v hidravlično stiskalnico, pač pa jih lahko pripišemo vplivu omejene ločljivosti obročastega dinamometra na skrajnem spodnjem delu merilnega območja (b' se izraža v odstotku razlike sil med meritvama), delno pa rahlo zvitemu togemu porazdelitvenemu jeklenemu obroču dinamometra. S povečevanjem tlačne sile na raven druge stopnje (300 kN) se povečana vrednost b' pojavi le še v eni točki (t.j. pri centrični legi dinamometra, rotacija 0°), nato pa nič več. V splošnem se torej v povprečju (z izjemo prve faze preskušanja pri sili 150 kN) vrednosti relativnega pogreška ponovljivosti brez rotacije z naraščanjem tlačne sile, ki deluje na obročasti dinamometer, hitro zmanjšujejo, kar v preglednici E.2 potrjujejo rezultati osnovnega statističnega pregleda relativnega pogreška ponovljivosti brez rotacije b' v odvisnosti od stopnje sile F_i preskusa vpliva ekscentričnosti obročastega dinamometra SISGEO L216V150.



Slika E.7: Relativni pogrešek ponovljivosti brez rotacije b' glede na stopnjo ekscentričnosti in rotacijo obročastega dinamometra SISGEO L216V150 pri sili 150 kN (a), 300 kN (b), 600 kN (c) in 900 kN (d).

Figure E.7: Relative repeatability error without rotation b' in view of the level of eccentricity and rotation of the ring load cell SISGEO L216V150 at force 150 kN (a), 300 kN (b), 600 kN (c) and 900 kN (d).

Preglednica E.2: Osnovne statistične veličine relativnega pogreška ponovljivosti brez rotacije b' [%] iz vrednotene pri preskušanju vpliva ekscentrične lege obročastega dinamometra SISGEO L216V150.

Table E.2: Basical statistical quantities of relative repeatability error without rotation b' [%] evaluated at the testing of the influence of eccentrical positions of the ring load cell SISGEO L216V150.

Raven sile F_i [kN]	Število odčitkov	Min b'_{\min} [%]	Max b'_{\max} [%]	Povprečje b'_{povp} [%]	Standardna deviacija $S_{b'}$ [%]
150	30	0,07	4,90	1,06	1,20
300	30	0,02	2,97	0,41	0,55
450	30	0,01	0,63	0,25	0,17
600	30	0,01	0,85	0,20	0,18
750	30	0,01	0,66	0,11	0,13
900	30	0,02	0,40	0,11	0,09
1050	25	0,02	0,21	0,10	0,06
1200	15	0,01	0,17	0,09	0,06

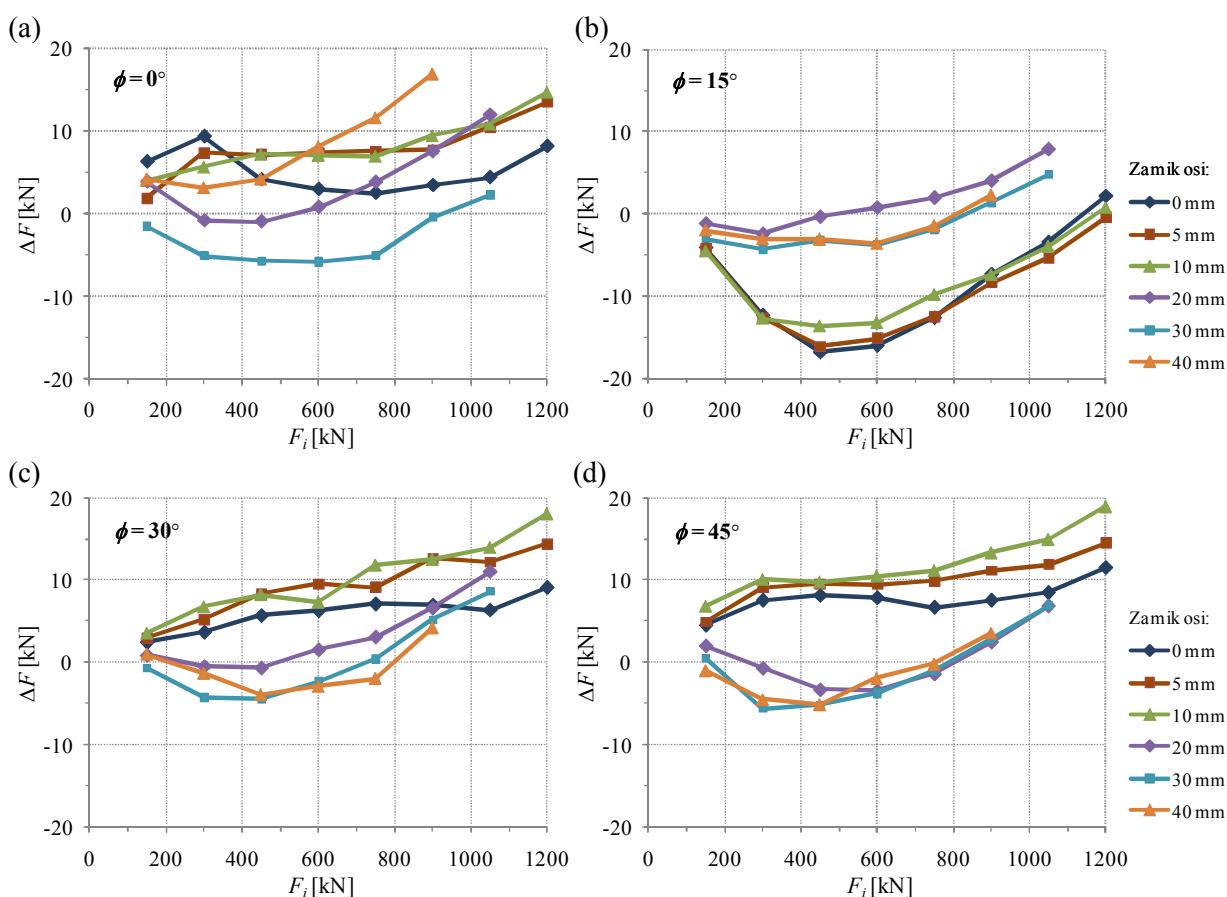
Pregled rezultatov v [preglednici E.2](#) pokaže, da so bile osnovne statistične veličine na prvih šestih stopnjah preskusa iz vrednotene na podlagi 30 relativnih pogreškov ponovljivosti brez rotacije b' , pri približevanju tlačne sile najvišjim vrednostim, pa se je vzorec vrednosti b' zmanjšal na 25 (pri sili 1050 kN) oz. 15 vrednosti (pri sili 1200 kN). Minimalne vrednosti b' se z izjemo prve stopnje sile gibljejo med 0,01 in 0,02 %, medtem ko se maksimalne dosežene vrednosti b' začnejo z vrednostjo 4,90 % (pri sili 150 kN), v drugi stopnji znaša b'_{\max} 2,97 % (pri sili 300 kN), v tretji stopnji b'_{\max} pa upade na 0,63 %, nato pa se z naraščanjem tlačne sile na obročasti dinamometer od sile F_4 naprej vrednosti b'_{\max} zmanjšujejo. Podobno sliko kažejo tudi povprečne vrednosti vseh b' na ravni posamezne sile, razlika je le v tem, da se pretežni del upada vrednosti b' izvede v polovici območja tlačne sile, nato pa se praktično ne spremeni več. Podobno upadanje vrednosti je opazno tudi pri standardni deviaciji $S_{b'}$. Iz rezultatov v [preglednici E.2](#) ni videti, da bi manjše število zajetih vzorcev na predzadnji in zadnji stopnji sile imelo opazen vpliv na relativne pogreške ponovljivosti brez rotacije b' .

EN ISO 376 za razred 2 kalibracijskih dinamometrov kot zgornjo mejo relativnih pogreškov ponovljivosti brez rotacije b' določa vrednost 0,20 %, na podlagi česar lahko ugotovimo, da povprečne vrednosti b' dosežene pri našem preskusu ta kriterij izpolnjujejo v četrti fazi laboratorijskega preskusa pri sili 600 kN, čeprav preskušani obročasti dinamometer ni kalibracijski inštrument. Analiza rezultatov torej kaže, da je bila z izjemo prve faze preskusa pri 150 kN, v manjši meri pa tudi druge faze preskusa pri 300 kN, dosežena dovolj dobra ponovljivost preskušanja vpliva ekscentrične lege obročastega dinamometra na izmerjene vrednosti sile. Le enkratna predobremenitev in razbremenitev sistema do maksimalne preskusne sile je bila torej dovolj, da se je celoten sistem obročastega dinamometra in etalona ter vmesne toge jeklene plošče prilagodil na zgornjo in spodnjo ploščo hidravlične stiskalnice. Poleg tega lahko tudi rečemo, da subjektivni vpliv pri izvedbi preskušanja – človeški faktor pri ročnem proženju sistema za zajemanje vrednosti sile na etalonu – ni imel pomembnega vpliva na rezultate laboratorijskega preskušanja.

Ugotovimo torej lahko, da sta bili v našem primeru dve seriji izvajanja meritev zadostni, še posebej če upoštevamo, da pri praktični izvedbi PS na terenu prva stopnja, pa tudi druga stopnja sile PS, glede samega končnega rezultata PS nimata pomembne vloge. Prav v prvih stopnjah sile PS se pogosto pojavijo visoke vrednosti mer lezenja k , ki jih s stališča popuščanja veznega dela sidra (pri tako nizkih silah) težko pojasnimo in jih lahko deloma pripišemo tudi težavam povezanim s slabšo ločljivostjo dinamometra, kot tudi z omejeno točnostjo odčitovanja sidrne sile na začetnem (spodnjem) območju obročastega dinamometra. Problem je namreč v tem, da z obročastim dinamometrom spremljamo padce sidrne sile in izvajamo korekcije na predpisano raven, kar posledično pomeni, da ravni dodanih sil niso tako točno uravnane, kot na višjih stopnjah PS, s tem pa so direktno povezani odčitani izvlečki pramen, posledično pa to tudi mere lezenja k . Obenem se moramo zavedati tudi dejstva, da v praksi prednapeto sidro opremljeno z dinamometrom in pripravljeno za izvedbo PS ni predhodno obremenjeno (kot smo to naredili pri laboratorijskem preskusu), zato se elementi glave sidra in obročasti dinamometer medsebojno ne morejo naravnati, kar najverjetneje vpliva na izmerjene vrednosti, kar še posebej velja za začetni del terenskega preskušanja. Očitno je torej, da visoke mere lezenja k v prvi fazi PS, v manjši meri pa tudi kasneje, ne moremo povezovati z odpornostjo veznega dela sidra (torej direktno ne odražajo popuščanja veznega dela sidra), pač pa se v veliki meri nanašajo na mehanizem prenosa sile z napenjalke v žice pramena, kot tudi raznosa med zunanji in osrednjo žico posameznega pramena, opisanimi v naslednjem [dodatku F](#).

Najenostavnejši prikaz rezultatov laboratorijskega preskušanja vpliva ekscentrične lege obročastega dinamometra na velikost izmerjenih sil dobimo, če pri vsaki stopnji rotacije dinamometra v isti

diagram narišemo vse razlike ΔF (to je direktne razlike med izmerjenimi vrednostmi sile F_p na etalonu – referenčnem dinamometru KTN-DZY – in med silami F_i izmerjenimi na obročastem dinamometru SISGEO L216V150) pri vseh zamikih osi (ekscentričnostih). Na [sliki E.8](#) so prikazani rezultati, izvednoteni za rotacije obročastega dinamometra 0° , 15° , 30° in 45° , iz katerih je opazna podobnost diagramov dobljenih pri rotacijah 0° in 30° ter 15° in 45° . Takšna podobnost je lahko posledica načina razporeditve merilnih lističev po obroču dinamometra, tako da smo z rotacijo dinamometra za 30° ponovno ujeli enako razporeditev oz. lego merilnih lističev glede na preskuševalno napravo in etalon (glej tudi [sliko E.11](#)). Druga opazna razlika se nanaša na razporeditev krivulj na diagramih rotacij 15° in 45° v drugi skupini, pri čemer so v prvi skupini krivulje za ekscentričnosti med 0 in 10 mm, v drugi skupini pa za ekscentričnosti 20 do 40 mm. Takšno obnašanje je lahko posledica same notranje zasnove dinamometra in razporeditve merilnih lističev po njem, kot tudi povezave merilnih lističev oz. koncepta zajemanja vrednosti z namenom zmanjšanja vplivov ekscentrične lege dinamometra na izmerjene sile, v določeni meri pa bi jih lahko pripisali tudi ne povsem idealno ravni površini obročastega dinamometra. Iz diagramov na [sliki E.8](#) je opazna še ena značilnost in sicer, da se je pri izvedenem preskušanju območje gibanja razlike sil ΔF med obema dinamometroma vedno gibalo v območju 30 kN: pri rotacijah 0° , 30° in 45° med -10 in $+20$ kN, pri rotacijah 15° pa med -20 in $+10$ kN.

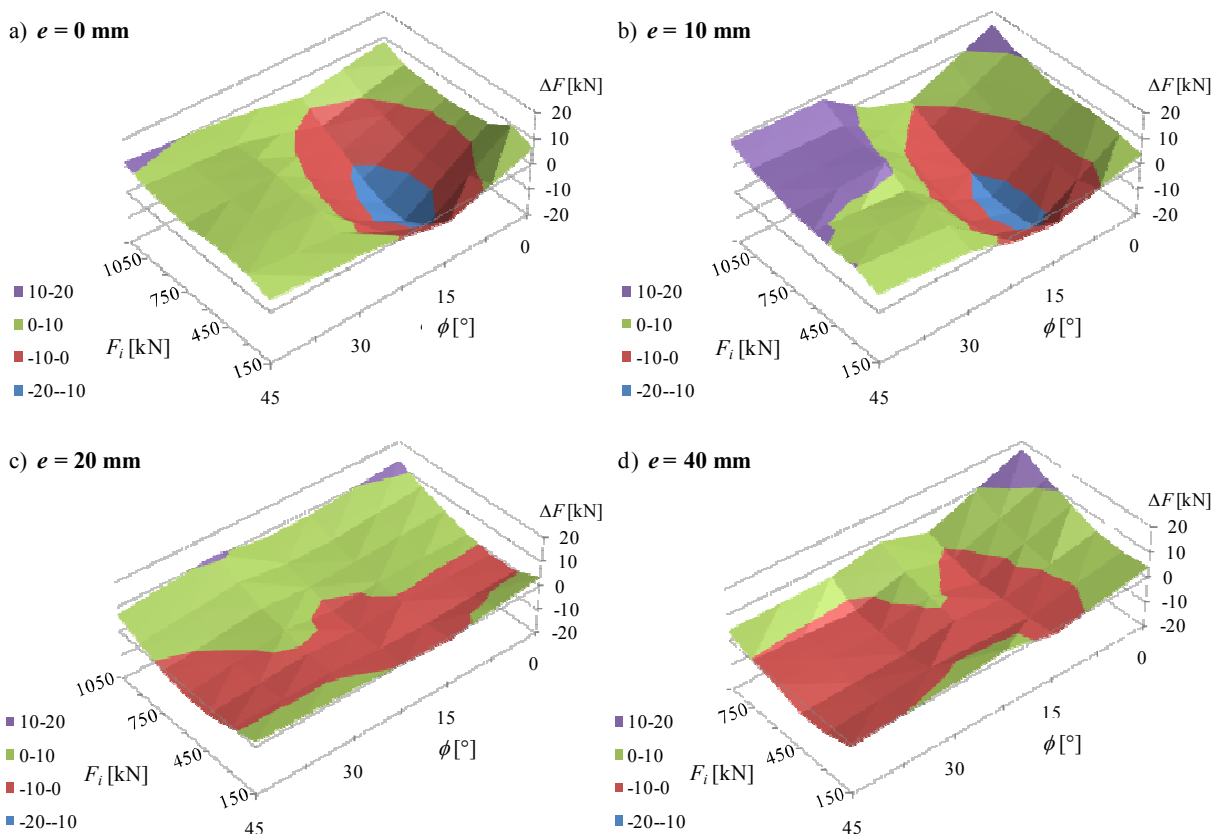


Slika E.8: Odštete vrednosti med izmerjenimi silami F_p na referenčnem dinamometru KTN-DZY in silami F_i na obročastem dinamometru SISGEO L216V150 pri rotaciji 0° (a), 15° (b), 30° (c) in 45° (d).
Figure E.8: Subtracted values between measured forces F_p on the reference load cell KTN-DZY and forces F_i measured on the ring load cell SISGEO L216V150 at rotation of 0° (a), 15° (b), 30° (c) and 45° (d).

Preglednica E.3: Najmanjše in največje razlike sil ΔF med obročastim in referenčnim dinamometrom podane v odvisnosti od ekscentričnosti e in rotacije ϕ obročastega dinamometra.

Table E.3: Minimal and maximal subtracted forces ΔF between the ring and the reference load cell given in dependence on eccentricity e and rotation ϕ of the ring load cell.

e [mm]	$\phi = 0^\circ$		$\phi = 15^\circ$		$\phi = 22,5^\circ$		$\phi = 30^\circ$		$\phi = 45^\circ$	
	ΔF_{\min} [kN]	ΔF_{\max} [kN]	ΔF_{\min} [kN]	ΔF_{\max} [kN]	ΔF_{\min} [kN]	ΔF_{\max} [kN]	ΔF_{\min} [kN]	ΔF_{\max} [kN]	ΔF_{\min} [kN]	ΔF_{\max} [kN]
0	2,52	9,37	-16,78	2,12	-7,58	6,13	2,49	9,05	4,57	11,44
5	1,88	13,48	-16,13	-0,40	-5,11	6,86	2,93	14,33	4,88	14,47
10	4,05	14,71	-13,71	0,79	-7,37	6,50	3,53	18,01	6,86	18,85
20	-0,93	12,00	-2,36	7,85	-1,95	7,63	-0,69	11,00	-3,42	6,78
30	-5,79	2,30	-4,28	4,80	-0,11	14,58	-4,52	8,58	-5,58	6,83
40	3,14	16,90	-3,57	2,23	-2,11	8,06	-3,91	4,18	-5,07	3,57



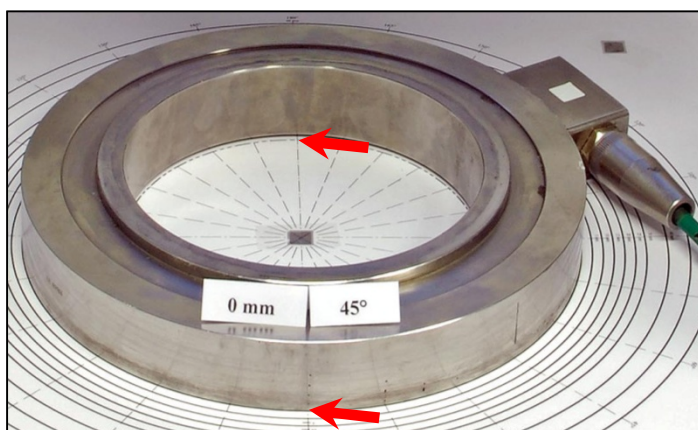
Slika E.9: Odštete vrednosti med izmerjenimi vrednostmi sile F_p na referenčnem dinamometru KTN-DZY in silami F_i na obročastem dinamometru SISGEO L216V150 pri ekscentričnosti 0 mm (a), 10 mm (b), 20 mm (c) in 40 mm (d).

Figure E.9: Subtracted values between measured forces F_p on the reference load cell KTN-DZY and forces F_i measured on the ring load cell SISGEO L216V150 at eccentricity of 0 mm (a), 10 mm (b), 20 mm (c) and 40 mm (d).

Kot drugo možnost prikaza rezultatov laboratorijskega preskušanja smo izbrali način, v katerem bomo istočasno prikazali vse tri parametre, ki smo jih pri preskušanju spreminjali: raven tlačne sile F_i , zamik osi (ekscentričnost) med osema dinamometrov e in rotacijo obročastega dinamometra ϕ . Na [sliki E.9](#) so prikazani tridimenzionalni diagrami, v katerih za vsak zamik osi med dinamometroma (ekscentričnost e) podajamo iste razlike ΔF [kN], kot smo jih prikazali na [sliki E.8](#), le da so tokrat prikazane v odvisnosti tako od ravni izbrane tlačne sile F_i kot tudi od rotacije obročastega dinamometra ϕ . Iz diagramov za centrično lego dinamometra ($e = 0$ mm) in ekscentričnosti 10 mm, 20 mm in 40 mm je razvidno, da ima na razlike sil ΔF , poleg zamika med osema obeh dinamometrov e , pomemben vpliv tudi rotacija obročastega dinamometra ϕ : pri nižjih vrednostih ekscentričnosti so bile v območju sil med 300 in 750 kN pri rotaciji obročastega dinamometra 15° dosežene najnižje vrednosti ΔF , pri čemer pa so bile na drugi strani pri istih vrednostih ekscentričnosti rotacije obročastega dinamometra za 45° dosežene vrednosti največje vrednosti ΔF .

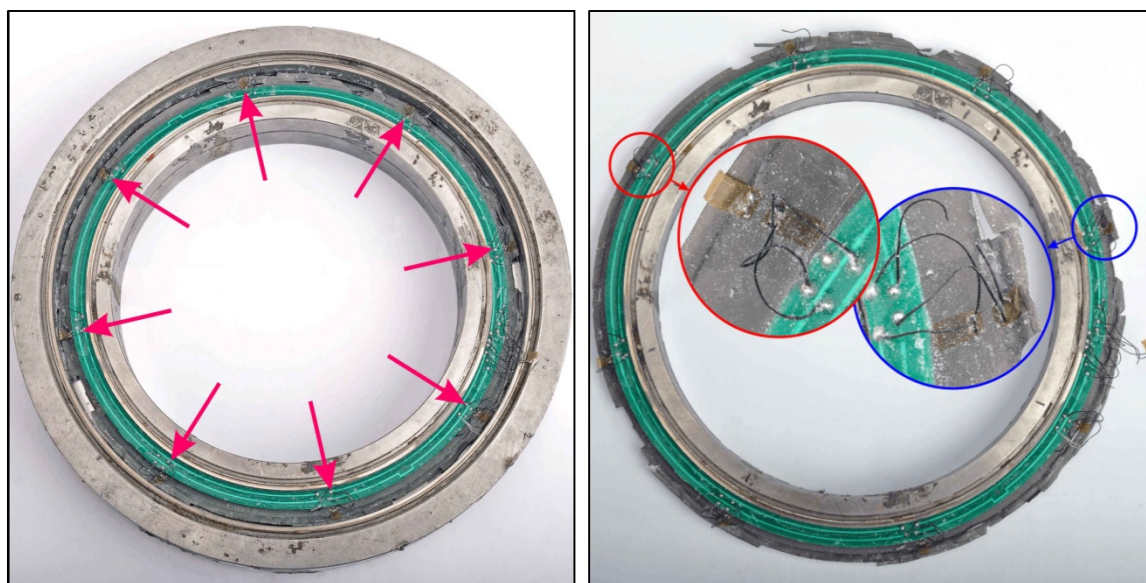
Nekoliko presenetljivi so rezultati na [sliki E.9a](#) za centrično lego dinamometra ($e = 0$ mm), saj smo preskuse v hidravlični stiskalnici izvajali osno simetrično, torej pri poljubnih rotacijah ϕ obročastega dinamometra, centrično nameščenega v hidravlični stiskalnici, velikih razlik med ΔF ne bi pričakovali. Glede na to, da smo preskušanja izvajali pri stacionarnih pogojih, tako da vplivi sprememb temperature na vrednosti izmerjenih sil niso bili prisotni, bi torej pričakovali, da se bodo rezultati meritev gibali znotraj točnosti do 0,5 % nazivnega območja sile dinamometra, kot jo deklarira proizvajalec. V našem primeru to pomeni, da proizvajalec dopušča raztros vrednosti izmerjene sile od točne vrednosti do $\pm 7,5$ kN, medtem ko smo pri preskušanju največje območje odstopanj 18,90 kN (od $-16,78$ do $+2,12$ kN) izmerili prav pri centrični legi dinamometra ($e = 0$ mm) in rotaciji $\phi = 15^\circ$. Razloge za takšno obnašanje obročastega dinamometra lahko iščemo v več smereh:

- Dinamometer je bil po dostopnih podatki v praktični uporabi že celo koledarsko leto, zato obstaja realna možnost, da se je porazdelitveni jekleni obroč dinamometra mehansko poškodoval oz. zvil, tako da ni bil več povsem raven – iz praktičnih razlogov se dinamometer na glavo sidra vedno namešča in obrača na enak način, zato obstaja verjetnost, da dinamometer z ostalimi jeklenimi ploščami med namestitvijo napenjalk zaradi gravitacije vedno zdrsne na enak način, torej je vedno najbolj obremenjeno isto področje jeklenega obroča; ob tem moramo upoštevati, da je v praksi težko zagotoviti popolno čistost in ravnost površin sestavnih elementov pod in nad obročastim dinamometrom, kar pa lahko privede tudi do poškodb površin oz. vtisnjenosti dinamometra.
- Teoretično bi moral biti obročasti dinamometer geometrijsko gledano obroč, vendar se je pri namestitvi dinamometra na papirnato šablono izkazalo, da notranji obod dinamometra ne sovпада s krožnico na šablono, torej tlorisno notranji obod ni bil krožnica pač pa rahla elipsa ([slika E.10](#)).



Slika E.10: Centrična lega obročastega dinamometra SISGEO L216V150 na papirnati šablono.
Figure E.10: Central position of the ring load cell SISGEO L216V150 on the paper template.

- Na **sliki E.11** je prikazan prečno prepolovljen dinamometer SISGEO L216V150, ki je bil med uporabo v preteklosti uničen. Da bi ugotovili število in smer namestitve merilnih lističev po obodu dinamometra smo ga v prečni smeri prerezali, pri čemer smo ugotovili, da sta v splošnem na osmih ekvidistantno razporejenih mestih dinamometra radialno vgrajena po dva merilna lističa, na obroču je en merilni listič vgrajen v tangencialni smeri, za en merilni listič pa smeri vgradnje nismo mogli določiti, saj se je med rezanjem in odpiranjem dinamometra odluščil.



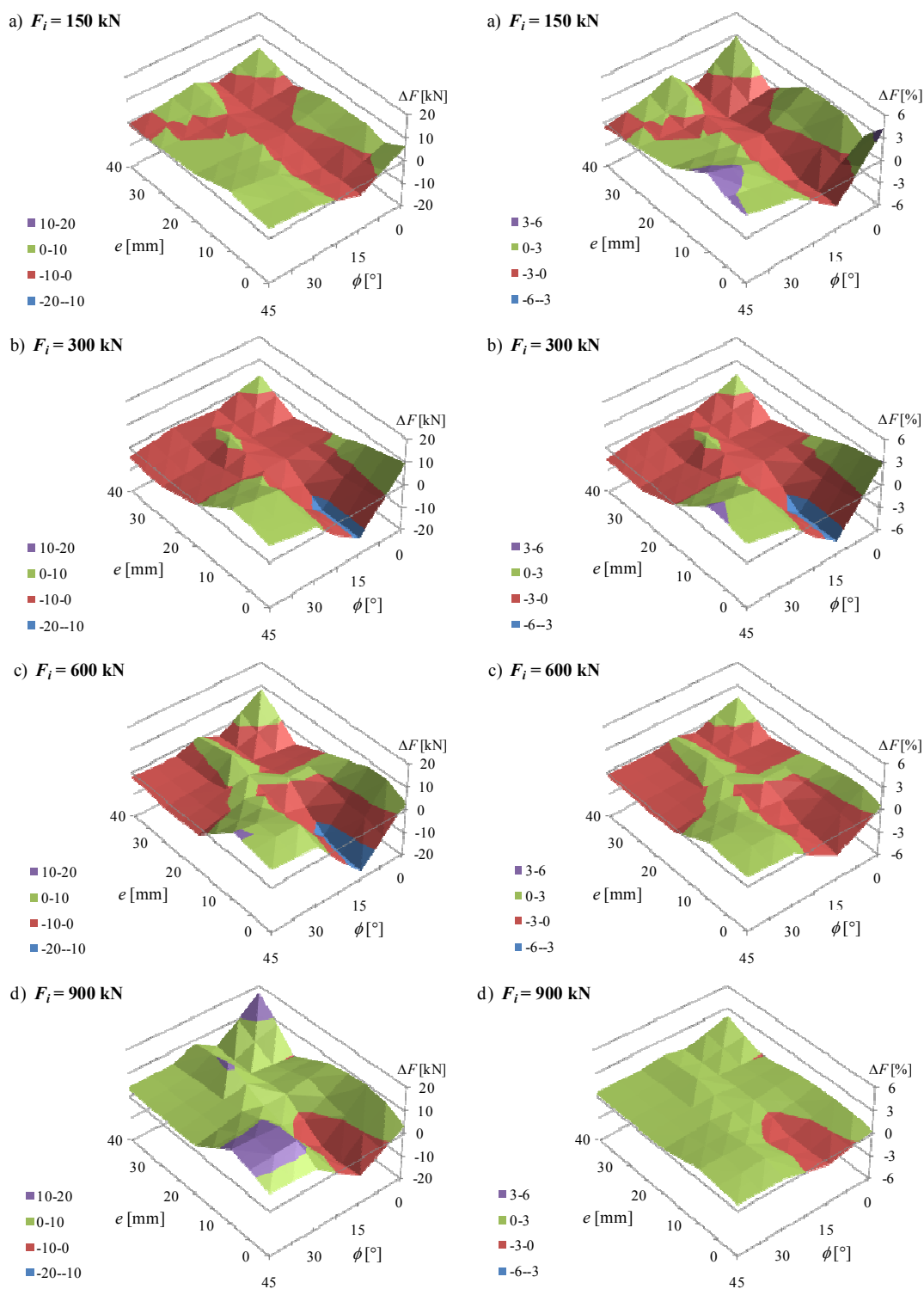
Slika E.11: Prežagani obročasti dinamometer SISGEO L216V150: mesta namestitve merilnih lističev (levo), detajli obroča s pritrjenimi merilnimi lističi (desno).

Figure E.11: The sawn trough ring load cell SISGEO L216V150: strain-gauge locations (left), details of the ring with attached strain-gauges (right).

Preglednica E.4: Osnovne statistične veličine razlike sil ΔF med obročastim in referenčnim dinamometrom podane za ΔF v absolutni vrednosti [kN] in relativno v [%] glede na raven sile F_i .

Table E.4: Basic statistical quantities of subtracted forces ΔF between the ring and the reference load cell given for absolute values of ΔF in [kN] and for values of ΔF relative to the level of force F_i in [%].

Raven sile F_i [kN]	Število vseh odčitkov	Min ΔF_{\min} [kN]	Max ΔF_{\max} [kN]	Povprečje ΔF_{povp} [kN]	Standardna deviacija $S_{\Delta F}$ [kN]	Min ΔF_{\min} [%]	Max ΔF_{\max} [%]	Povprečje ΔF_{povp} [%]	Standardna deviacija $S_{\Delta F}$ [%]
150	30	-4,51	6,86	0,86	3,13	-3,01	4,57	0,57	2,09
300	30	-12,75	10,08	-0,72	6,44	-4,25	3,36	-0,24	2,15
450	30	-16,78	9,79	-1,04	7,32	-3,73	2,17	-0,23	1,63
600	30	-15,97	10,49	-0,13	7,17	-2,66	1,75	-0,02	1,19
750	30	-12,61	11,78	1,55	6,65	-1,68	1,57	0,21	0,89
900	30	-8,40	16,90	4,69	6,13	-0,93	1,88	0,52	0,68
1050	25	-5,41	14,91	6,90	5,61	-0,51	1,42	0,66	0,53
1200	15	-0,40	18,85	9,64	6,05	-0,03	1,57	0,80	0,50



Slika E.12: Razlike med izmerjenimi vrednostmi sile F_p na referenčnem dinamometru in silami F_i na obročastem dinamometru pri tlačni sili 150 kN (a), 300 kN (b), 600 kN (c) in 900 kN (d): odštete vrednosti $F_p - F_i$ (levi stolpec), prikaz odštetih vrednosti v odstotku izbrane sile F_i (desni stolpec).

Figure E.12: Differences between measured forces F_p on the reference load cell and forces F_i on the ring load cell at compressive force 150 kN (a), 300 kN (b), 600 kN (c) and 900 kN (d): subtracted values $F_p - F_i$ (left column), subtracted values represented as a percentage of selected force F_i (right column).

Povzetek rezultatov laboratorijskega preskušanja v praksi rabljenega obročastega dinamometra na različnih ravneh tlačne sile je podan v [preglednici E.4](#), v kateri so zbrane osnovne statistične veličine razlik sil ΔF med vrednostmi izmerjenih sil F_p na referenčnem dinamometru (etalonu) in silami F_i izmerjenimi na obročastem dinamometru. Pri tem predstavljajo vrednosti ΔF_{\min} in ΔF_{\max} največje negativne in pozitivne razlike $F_p - F_i$ pri vseh ekscentričnostih e in rotacijah ϕ , kot so bile dobljene pri laboratorijskih preskušanjih (t.j. ovojnica razlik med izmerjenimi vrednostmi sile F_p na etalonu in med silami F_i izmerjenimi na obročastem dinamometru SISGEO L216V150). Celoten nabor vrednosti, dobljenih pri laboratorijskih preskušanjih je prikazan na [sliki E.12](#), kjer so za iste stopnje sile prikazane razlike sil ΔF tako v absolutnih vrednostih [kN] kot tudi relativnih vrednostih (t.j. kot odstotek sil F_i) glede na ekscentričnost lege kot tudi rotacijo obročastega dinamometra. Kot je razvidno iz [preglednice E.4](#) razlike sil izmerjene na etalonu in v obročastem dinamometru niso tako majhne, saj ekstremi v absolutnih vrednostih dosežejo $-16,78$ kN oz. $+18,85$ kN, vendar pa je ob tem treba opozoriti, da se ta dva ekstrema ne pojavljata pri isti legi (glede na ekscentričnost e in rotacijo ϕ) obročastega dinamometra na glavi sidra, torej se ne moreta pojaviti sočasno.

Glede na namen in uporabo je nedvomno pomembneje poznati odstopanje razlik ΔF v absolutnih vrednostih [kN]: povprečne vrednosti razlik ostajajo pod 2 kN do vključno faze 750 kN, nato pa se z naraščanjem obtežbe ves čas povečujejo, pri čemer v prvem delu preskušanja prevladujejo največje vrednosti odklonov ΔF v negativni smeri, v drugem delu pa prevladujejo največje vrednosti odklonov ΔF v pozitivni smeri. Na delu preglednice z absolutnimi vrednostmi se (z izjemo prve stopnje) standardne deviacije odčitkov izvedenih na vseh ravneh sile gibljejo med 5,6 in 7,3 kN, kar iz stališča namena merilnih in preskusnih sider ni malo. Za globalno presojo primernosti obročastega dinamometra po zahtevah predpisov glede točnosti prikaza sile je primernejši del preglednice, kjer so vrednosti ΔF podane v odstotku sile F_i : absolutne vrednosti tako minimumov kot tudi maksimumov se z naraščanjem sile zmanjšujejo, isto pa velja tudi za vrednosti standardne deviacije, medtem ko so vse absolutne vrednosti povprečja do 0,80 %, s čimer so izpolnjene zahteve večine predpisov (npr. *EN 1537*) zahteva točnost večjo od 2 %). Standardne deviacije izračunane na podlagi ΔF [%] ves čas enakomerno upadajo od vrednosti 2,09 % (pri sili 150 kN) na vrednost 0,50 % (pri sili 1200 kN), kar pravzaprav pomeni, da se raztros vrednosti razlik ΔF , z večanjem tlačne sile F_i , relativno zmanjšuje.

E.2 ZAKLJUČKI LABORATORIJSKEGA PRESKUSA VPLIVA EKSCENTRIČNE LEGE OBROČASTEGA DINAMOMETRA NA IZMERJENE VREDNOSTI SIL

Analiza rezultatov kažejo, da je bila z izjemo prve faze preskusa pri 150 kN, v manjši meri pa tudi z izjemo druge faze preskusa pri 300 kN, dosežena dovolj dobra ponovljivost laboratorijskega preskušanja vpliva ekscentrične lege obročastega dinamometra na izmerjene vrednosti sile. Lokalno večje vrednosti relativnega pogreška ponovljivosti brez rotacije b' predvsem v prvi fazi, v manjši meri pa tudi v drugi fazi preskusa, smo pretežno pripisali omejeni ločljivosti obročastega dinamometra na skrajnem spodnjem delu merilnega območja, v manjši meri pa tudi rahlo zvitemu togemu porazdelitvenemu jeklenemu obroču dinamometra, ki se je s povečevanjem tlačnem sile v hidravlični stiskalnici poravnal.

Glede na gibanje dobljenih rezultatov laboratorijskega preskušanja pri spremembah ekscentričnosti in rotacije sklepamo, da je bil obročasti dinamometer SISGEO L216V150 zasnovan tako, da bi bili vplivi ekscentrične lege na izmerjene vrednosti omiljeni, kar potrjujejo povprečja tako absolutnih kot tudi relativnih razlik sil ΔF pri različnih ekscentričnostih, ki v pretežnem delu diagramov na [sliki E.8](#) z

naraščanjem tlačne sile na dinamometer sprva padejo v negativno območje, nato pa se z nadaljnim naraščanjem vedno bolj povečujejo v pozitivni smeri.

Pri pregledu rezultatov laboratorijskega preskušanja v oči zbodejo rezultati primerov, ko je obročasti dinamometer sicer centrično nameščen v hidravlični stiskalnici ($e = 0$ mm), vendar pri obremenjevanju pride do večjih sprememb izmerjenih sil, čeprav je teoretično gledano celoten sistem zasnovan in preskušen osno simetrično (slika E.9). Po tehnični specifikaciji proizvajalca SISGEO S.r.l. znaša točnost elektronskih obročastih dinamometrov do 0,5 % nazivnega območja sile dinamometra, kar za preskušani tip L216V150 pomeni, da lahko znaša pogrešek izmerjene sile največ do $\pm 7,5$ kN. Čeprav smo preskušanja izvajali pri stacionarnih pogojih so največje vrednosti odmikov, ki smo jih izmerili v primeru naših laboratorijskih preskušanj v praksi dlje časa rabljenega obročastega dinamometra, od vrednosti referenčnega dinamometra navzgor odstopale največ do +18,85 kN, navzdol pa največ do -16,78 kN, kar je precej več od točnosti navedene s strani proizvajalca, vendar pa ob tem velja opozoriti, da sta bili obe skrajni vrednosti izmerjeni pri različni ekscentričnosti in rotaciji dinamometra, torej se v praksi ne moreta pojaviti sočasno. Po rezultatih naših laboratorijskih preskušanj bi bilo lahko največje območje odstopanj, ki bi se v praksi lahko pojavilo, 18,90 kN (od -16,78 do +2,12 kN), nastopilo pa bi pri centrični legi dinamometra ($e = 0$ mm) in pri rotaciji $\phi = 15^\circ$.

Manjšo točnost dinamometra od deklarirane s strani proizvajalca smo pripisali predvsem dejstvu, da je izvajalec sidrskih del v koledarskem letu poleg vseh rednih preskusov nosilnosti sider (PS, CPN in EPN) z njim izvedel tudi večje število PS in VPN, ki jih obravnavamo v poglavju 3 te disertacije, posledica česar je realna možnost, da je bil ta obročasti dinamometer oz. porazdelitveni obroč med uporabo že nekoliko poškodovan (zvit), saj v praksi dinamometer (v nasprotju z zahtevami) pogosto ni nameščen povsem pravokotno na os sidra, prav tako pa obe jekleni plošči, med kateri je vstavljen, nista idealno ravni.

Izmerjene vrednosti odstopanj izmerjenih sil z obročastim dinamometrom niso zanemarljive niti s stališča dolgotrajnih meritev v merilnih sidrih niti s stališča preskušanja sider, kjer je vpliv točnosti meritev sil na rezultate PS na terenu iskati predvsem v smislu vpliva na efektivne proste dolžine sider l_f , ki se vrednotijo po vsaki stopnji sile (fazi) PS, medtem ko vpliv na mero lezenja k ni tako pomemben, čeprav tega s tipom laboratorijskega preskusa, kot smo ga izvedli, nismo eksplicitno dokazali. Za izvedbo PS oz. preskusa nosilnosti sidra je pomembno rezultate komentirati s stališča konstantne rotacije in ekscentričnosti: zanima nas, kolikšne so torej največje možne oscilacije sile našega rabljenega dinamometra pri določeni rotaciji in ekscentričnosti, saj se po namestitvi dinamometra na glavo sidra le-ta več ne obrača, po začetku napenjanja pa so čisto v začetni fazi možni le še minimalni zdrsi navzdol zaradi teže napenjalk, dinamometra in elementov glave sidra.

Simulacijo vpliva netočne vrednosti sile v sidru, na vrednosti efektivnih prostih dolžin med izvedbo PS, bomo izvedli na primeru 6-pramenskega sidra z računsko prosto dolžino $l_{fr} = 28$ m. Na predvidenih stopnjah sile F_i smo po Hookovem zakonu, po katerem smo prosti del sidra obravnavali kot vzmet z znanimi karakteristikami (dolžino l_{fr} , prečnim prerezom A_p in elastičnim modulom E_p), izračunali teoretične elastične raztezke prostega dela takega sidra:

$$\Delta S_{el,i} = \frac{(F_i - F_1) l_{fr}}{A_p E_p}. \quad (E.8)$$

Glede na to, da v sidro dejansko niso vnesene nazivne stopnje sile F_i , kot jih kaže obročasti dinamometer, pač pa sile, kot jih kaže etalon $F_{p,i}$, se to posledično odraža tudi v efektivnih prostih dolžinah.

Enačbo (E.8) prilagodimo za izračun primerjalne efektivne proste dolžine, kot bi jo dobili ob upoštevanju dejanske vrednosti sile etalona $F_{p,i}$:

$$l_{f,i} = A_p E_p \frac{\Delta s_{el,i}}{F_{p,i} - F_{p,1}} \quad (\text{E.9})$$

Pri simulaciji smo privzeli naslednje podatke:

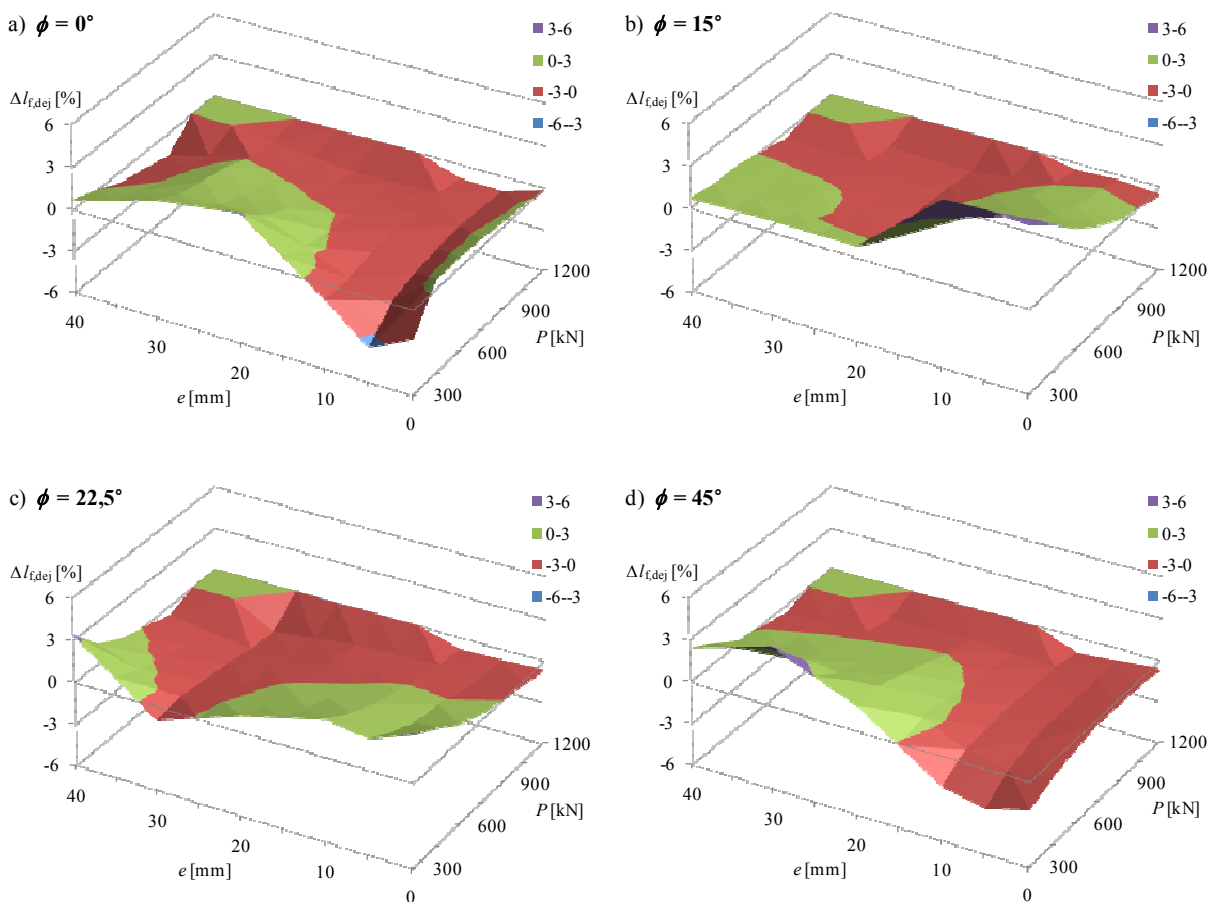
- presek prečnega prereza 6-pramenskega kabla sidra: $A_p = 6 \cdot 140,7 = 844,2 \text{ mm}^2$,
- elastični modul pramen kabla sidra: $E_p = 194,4 \text{ kN/mm}^2$,
- za vrednosti teoretičnih elastičnih raztezkov $\Delta s_{el,i}$, ki bi jih v praksi sicer izmerili na glavi sidra, smo vzeli kar teoretične raztezke kabla sidra računsko proste dolžine $l_{fr} = 28 \text{ m}$ pri silah 300, 450, 600, 750, 900, 1050 in 1200 kN, ki smo jih glede na izhodiščno (začetno) silo $F_1 = 150 \text{ kN}$ izvrednotili na podlagi Hookovega zakona,
- za razlike sil $F_{p,i} - F_{p,1}$ smo upoštevali povprečje obeh dejansko izmerjenih vrednosti sile na etalonu, dosežene pri isti rotaciji in ekscentričnosti obročastega dinamometra.

Vrednosti efektivne proste dolžine sider $l_{f,i}$ smo izvrednotili za vse ekscentričnosti in rotacije laboratorijskega preskušanja obročastega dinamometra – za vsako rotacijo ϕ in ekscentričnost e obročastega dinamometra na vsaki ravni sile F_i od 300 do 1200 kN smo tako dobili po eno vrednost efektivne proste dolžine, od katere smo odšteli računsko prosto dolžino l_{fr} . Na ta način smo dobili razlike efektivnih prostih dolžin $\Delta l_{f,dej}$, ki so posledica ne povsem točne vrednosti sile obročastega dinamometra. Razlike $\Delta l_{f,dej}$ za različne rotacije dinamometra (0° , 15° , $22,5^\circ$ in 45°) so v odvisnosti od stopnje sile F_i in ekscentričnosti e prikazane na [sliki E.13](#), medtem ko smo v [preglednici E.5](#) zaradi preglednosti zbrali le obe skrajni vrednosti razlik efektivne proste dolžine (minimalno $\Delta l_{f,min}$ in maksimalno $\Delta l_{f,max}$), ki opredeljujeta ovojnico vseh ekscentričnosti e pri posamezni rotaciji obročastega dinamometra ϕ , izražene v odstotku računsko proste dolžine.

Preglednica E.5: Ovojnice minimalnih in maksimalnih razlik efektivnih prostih dolžin $\Delta l_{f,def}$ v [%] glede na računsko prosto dolžino $l_{fr} = 28 \text{ m}$, ki so posledica netočnih izmerjenih sil, nastalih zaradi ekscentrične lege in rotacije obročastega dinamometra.

Table E.5: Envelopes of minimal and maximal subtractions of apparent free lengths $\Delta l_{f,def}$ in [%] with regard to free length $l_{fr} = 28 \text{ m}$, as a consequence of inexact measured forces due to eccentrical positions and rotations of the ring load cell.

F_i [kN]	$\Delta s_{el,i}$ [mm]	$\phi = 0^\circ$		$\phi = 15^\circ$		$\phi = 22,5^\circ$		$\phi = 30^\circ$		$\phi = 45^\circ$	
		$\Delta l_{f,min}$ [%]	$\Delta l_{f,max}$ [%]	$\Delta l_{f,min}$ [%]	$\Delta l_{f,max}$ [%]	$\Delta l_{f,min}$ [%]	$\Delta l_{f,max}$ [%]	$\Delta l_{f,min}$ [%]	$\Delta l_{f,max}$ [%]	$\Delta l_{f,min}$ [%]	$\Delta l_{f,max}$ [%]
300	25,59	-3,54	3,24	0,71	5,96	-0,94	3,42	-2,09	2,47	-2,74	4,21
450	51,18	-1,73	1,64	-0,27	4,41	-0,67	2,40	-1,75	1,65	-1,51	1,93
600	76,77	-1,22	0,96	-0,43	2,70	-0,91	1,18	-1,44	0,87	-0,99	1,21
750	102,36	-1,22	0,64	-0,52	1,43	-1,09	0,49	-1,36	0,49	-0,82	0,57
900	127,95	-1,67	0,38	-0,68	0,56	-1,47	0,01	-1,27	-0,43	-0,85	-0,06
1050	153,54	-0,94	0,21	-0,99	0,13	-1,61	-0,29	-1,14	-0,43	-0,89	-0,43
1200	179,13	-1,09	-0,18	-0,59	-0,36	-0,85	-0,63	-1,36	-0,62	-1,13	-0,65



Slika E.13: Odstopanja iz vrednotenih efektivnih prostih dolžin $\Delta l_{f,dej}$ v [%] glede na računsko prosto dolžino $l_{fr} = 28$ m, ki so posledica netočnih izmerjenih sil nastalih zaradi ekscentrične lege obročastega dinamometra pri rotacijah 0° (a), 15° (b), $22,5^\circ$ (c) in 45° (d).

Figure E.13: Deviations of calculated apparent free lengths $\Delta l_{f,dej}$ in [%] with regard to the free length $l_{fr} = 28$ m, as a consequence of inexact measured forces due to eccentrical positions of the ring load cell at rotations of 0° (a), 15° (b), $22,5^\circ$ (c) and 45° (d).

V primeru izvedbe PS in preskusov nosilnosti pramenskih sider z mononapenjalkami se pri nas uporabljajo elektronski dinamometri proizvajalca SISGEO S.r.l. tipa L216V150, katerih nazivna kapaciteta 1500 kN zadošča za izvedbo PS do porušitve pri nas potrjenih tipov sider. Laboratorijski preskus vpliva ekscentrične lege obročastega dinamometra tega tipa na same vrednosti izmerjenih sil je pokazal, da vrednosti, ki jih med PS in preskusi nosilnosti pramenskih sider, lahko odčitamo na digitalnem prikazovalniku sile C6003 obročastega dinamometra, pričakovano niso identične silam, ki delujejo na dinamometer, pri čemer pa so ugotovljena odstopanja sile pri posameznih legah dinamometra vendarle lahko precej večja od tolerančnih mej, kot jih podaja proizvajalec dinamometra.

Sklepne ugotovitve laboratorijskega preskušanja vpliva ekscentrične lege obročastega dinamometra na izmerjene vrednosti sile lahko strnemo v naslednje točke:

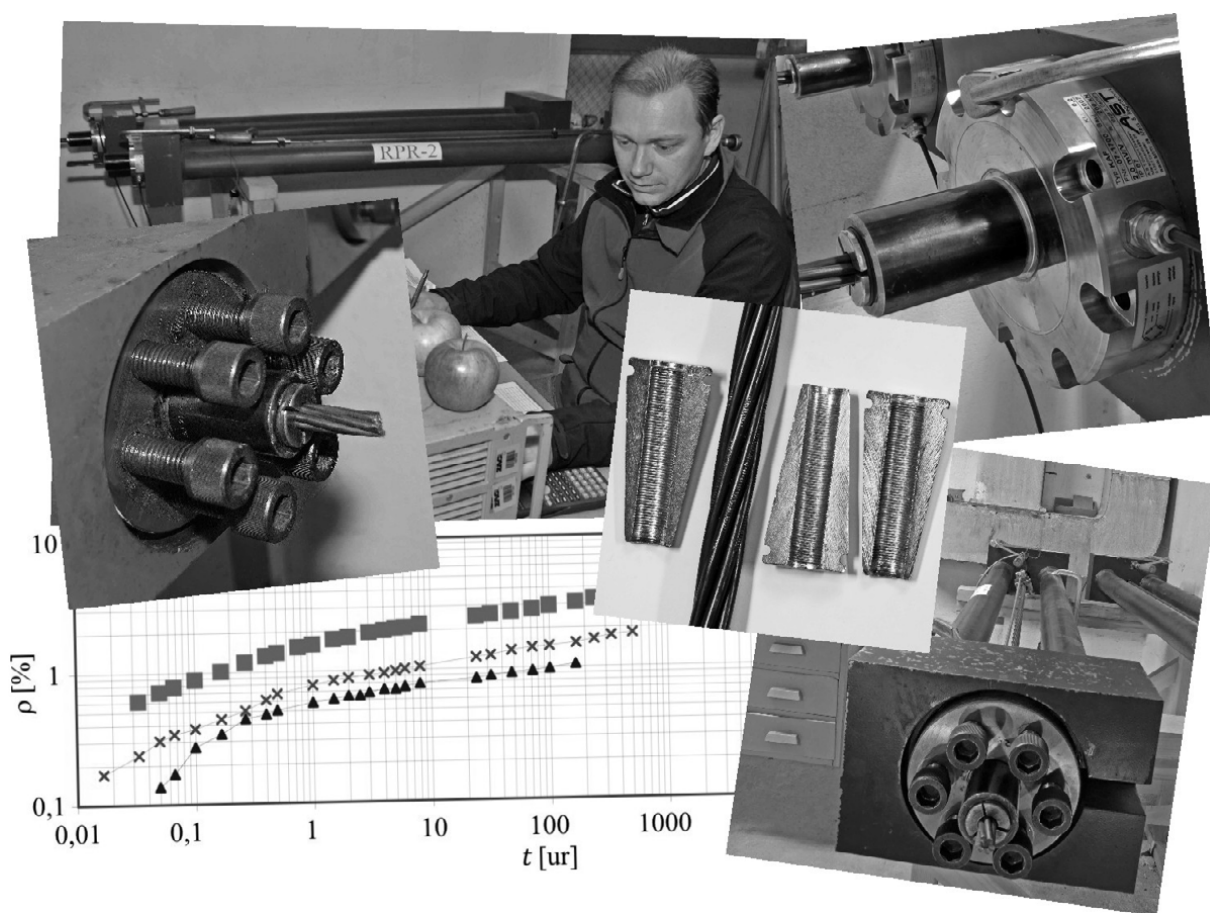
- Vpliv zamika med osjo sidra in osjo obročastega dinamometra v kombinaciji z rotacijo nedvomno vpliva na prikazano vrednost sile, kot jo podaja digitalni prikazovalnik sile, vendar pa so odstopanja

sile tako majhna, da ne vplivajo na vrednosti upadlih sil, ki jih moramo dodajati pred izvedbo odčitkov izvlečkov pramen sidra, tako da ta vpliv pri vrednotenju mer lezenja k v pri kratkih opazovalnih časih lahko zanemarimo, medtem ko vpliv pri dolgih opazovalnih časih v splošnem ni zanemarljiv. Pri tem je ugodno, da se dolgi opazovalni časi običajno pojavljajo na višjih stopnjah sile, kjer so bila odstopanja sile ΔF razmeroma majhna.

- Na drugi strani odstopanja sil preko izmerjenih vrednosti izvlečkov pramen sidra vplivajo tako na mere lezenja k kot tudi izrednotene efektivne proste dolžine l_f , pri čemer rezultati laboratorijskega preskušanja kažejo, da je ta vpliv sicer izrazitejši na začetnih stopnjah sile PS, na višjih stopnjah sile pa se ta vpliv zmanjšuje. Vrednosti odstopanj l_f so velikostnega reda (navzgor ali navzdol) do 2 %, kar ne more pomembno vplivati na oceno obnašanja sidra na ravni dosežene odpornosti sidra, medtem ko so v najslabšem primeru (t.j. v prvih fazah PS) ta odstopanja večja (velikostnega reda do 6 %), kar je eden od razlogov za krajše vrednosti efektivnih prostih dolžin sidra na začetnih stopnjah PS.
- Po obstoječih postopkih se tako PS kot tudi preskusi nosilnosti sider izvajajo tako, da se takoj po namestitvi dinamometra na glavo sidra pristopi k izvedbi preskusa, ne da bi bil sistem predhodno obremenjen, s čimer bi omogočili medsebojno prilagoditev jeklenih elementov in dinamometra. Na podlagi izkušenj tega laboratorijskega preskusa ocenjujemo, da bi bilo za zagotovitev korektnjših vrednosti odčitkov izvlečkov, posledično pa tudi izrednotenih mer lezenja k , smiselno sidro vsaj enkrat počasi predhodno obremeniti s počasi naraščajočo silo. Ob tem naj velja omejitev ravni sile predobremenitve, saj pri tem ne sme priti do poškodb veznega dela sidra, pač pa naj bo sila taka, da bo prišlo do medsebojne prilagoditve elementov v območju glave sidra, da se bo aktiviral prosti del sidra ter da bo izničeno trenje v območju prostega dela, območja pod glavo sidra ter v samih mononapenjalkah. Na podlagi opravljenih raziskav je težko natančno opredeliti raven sile predobremenitve, zato bo potrebno izvesti ustrezne dodatne raziskave, v osnovi pa bi lahko izhajali iz 30 % nazivne natezne trdnosti jekla pramen R_m , pri čemer pa ta sila v nobenem primeru ne sme preseči 50 % (vnaprej ocenjene) odpornosti preskusnega sidra na izvlek.
- Zaradi vpliva morebitnih poškodb dinamometra na izmerjene vrednosti sil bi bilo treba razmisliti v smeri zagotovitve intervalov kalibracije teh dinamometrov, s katerimi se izvajajo PS in preskusi nosilnosti sider.
- Na koncu velja opozoriti, da dobljene rezultate laboratorijskega preskušanja lahko v prakso prenašamo le pod pogojem, ko so obročasti dinamometri na sidra nameščeni skladno z navodili proizvajalca, torej da sta podložna in sidrna plošča zadostne debeline in premera, da je zagotovljena dovolj velika togost obeh naležnih površin, med katere v nameščen obročasti dinamometer (torej da je obročasti dinamometer najmanj tog del sistema v območju glave sidra).

Dodatek F

Laboratorijska preskušanja izotermne relaksacije jeklenih pramenov po postopku za izvedbo preiskav sider



F.1 PREGLED LITERATURE V ZVEZI Z RELAKSACIJO JEKLENIH PRAMEN

Med preskušanjem nosilnosti oz. med uporabo prednapetih geotehničnih sider so v pramenih kabla sidra prisotne visoke natezne napetosti, ki pri preiskavi sidra (PS) lahko dosežejo do 85 % nazivne natezne trdnosti pramen R_m . Za zaklinjenje sidra je postavljena zgornja meja nateznih napetosti na 60 % R_m , medtem ko se natezne napetosti med življenjsko dobo sidranja lahko dvignejo do 70 % R_m . V jeklenih pramenih kabla sidra, obremenjenih z visokimi nateznimi napetostmi, katerih dolžina je konstantna, po vnosu natezne sile pride do pojava **relaksacije**, opaznega kot padec nateznih napetosti oz. padec sile v sidru. V primerih, ko ni zaznati premika sidranega objekta, lahko prav temu pojavu pripišemo upad sil v prednapetih sidrih objekta. Za relaksacijo je značilno, da v začetnem obdobju (takoj po vnosu natezne sile) poteka zelo intenzivno, nato pa s časom upada, a se teoretično gledano nikoli povsem na ustavi. Zelo podoben pojav relaksaciji je **tečenje**, pri čemer je razlika med njima razvidna iz njune definicije:

- pri **relaksaciji** – časovno odvisnem upadanju sile – se vzorec jeklenega pramena ohranja pri konstantni deformaciji: opazujemo torej $\sigma(t)$ pri $\varepsilon = \text{konst}$, medtem ko se
- pri **tečenju** – časovno odvisnem naraščanju deformacije – se v vzorcu jeklenega pramena ohranja konstantna napetost: v tem primeru torej spremljamo $\varepsilon(t)$ pri $\sigma = \text{konst}$.

Primerna formulacija za zvezo med njima zaenkrat še ne obstaja (Zeren in Zeren, 2003).

Poleg obeh navedenih pojavov je v metalurgiji poznan še pojav **lezenja**, ki je počasna deformacija kovin in poteka pri konstantni obremenitvi ter povišanih temperaturah (pri jeklih nad 500 °C), pri čemer na hitrost deformacije pri lezenju v veliki meri vpliva temperatura (Vojvodič-Tuma, 2002). Pojav lezenja je torej zelo podoben pojavu tečenja, s to razliko, da se odvija pri bistveno višji temperaturi.

Na intenzivnost odvijanja pojava relaksacije v jeklu neposredno vplivajo štiri faktorji: tip jekla nateznega elementa, raven začetnih nateznih napetosti v elementu, temperatura okolja, v katerem se proces relaksacije odvija, ter čas trajanja obremenitve. Hill (2006) ugotavlja, da so relaksacijske lastnosti pramena prvenstveno odvisne od metod njegove izdelave, natančneje rečeno od proizvodnih postopkov procesa izdelave pramena, pri čemer sta kritična elementa med proizvodnjo pramen z nizko relaksacijo dosledno obvladovanje spremenljivk tako procesa hladnega vlečenja gladkih žic in spletanja pramena, kot tudi nadaljnjega preoblikovanja normalnega pramena v pramen z nizko relaksacijo. Če katerikoli parameter proizvodnega procesa (napetost, hitrost žice pri prevlačenju, temperatura in hitro ohlajevanje) ni točno nadzorovan, lahko to pomembno vpliva na relaksacijske lastnosti pramena, še posebej pomembna pa je zadnja faza procesa (sicer že spletenega pramena), v katerem se izvaja pomiritev napetosti v jeklu žic pramena, ki so posledica predhodnih faz proizvodnega procesa: pri pomirjenih pramenih se pramen segreje na približno 350 °C in nato počasi ohlaja, medtem ko se pri pramenih z nizko relaksacijo pramen najprej mehansko napne, šele nato pa se pramen segreje na isto temperaturo (350 °C). Primerjava vpliva različnega postopka izdelave pramena na njegove lastnosti relaksacije je razvidna iz diagramov na **sliki F.1**: levi diagram prikazuje relaksacijske krivulje za različne stopnje obremenitve pomirjenih pramen, na desnem diagramu pa so relaksacijske krivulje za različne stopnje obremenitve pramen z nizko relaksacijo. Krivulje v diagramih na **sliki F.1**, ki predstavljajo delež preostalih napetosti v pramenu glede na ravni začetnih napetosti, so bile iz vrednotene na podlagi izrazov objavljenih v poročilu komiteja PCI *Recommendations for estimating prestress losses* (1975), povzetih v Hill (2006):

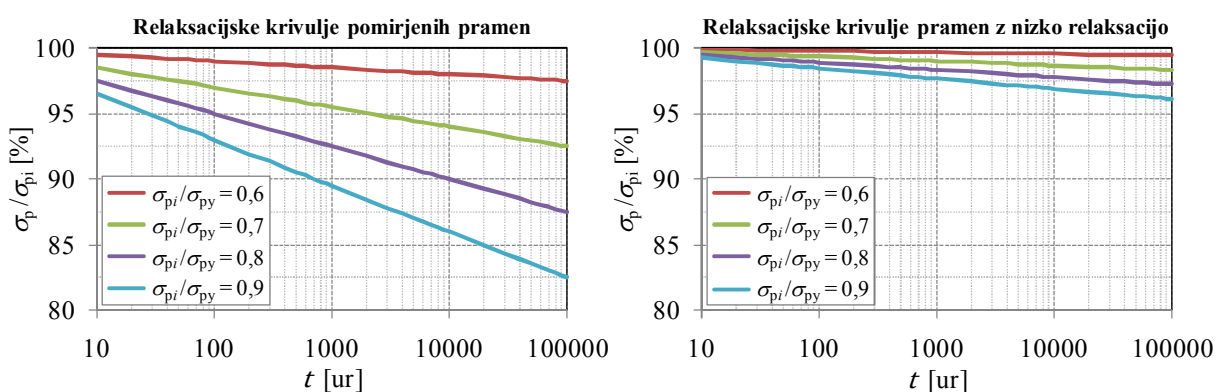
- relaksacijske krivulje za pomirjen pramen se izvednotijo po izrazu:

$$\frac{\sigma_p}{\sigma_{pi}} = 1 - \left(\frac{\log t}{10}\right) \cdot \left(\frac{\sigma_{pi}}{\sigma_{py}} - 0,55\right), \quad (F.1)$$

- medtem ko za relaksacijske krivulje za pramen z nizko relaksacijo velja:

$$\frac{\sigma_p}{\sigma_{pi}} = 1 - \left(\frac{\log t}{45}\right) \cdot \left(\frac{\sigma_{pi}}{\sigma_{py}} - 0,55\right), \quad (F.2)$$

pri čemer so: σ_p napetost v pramenu v času t ,
 σ_{pi} začetna napetost v pramenu,
 σ_{py} napetost tečenja pramena,
 t čas v urah.



Slika F.1: Tipične krivulje relaksacije za pomirjena pramena (levo) in pramena z nizko relaksacijo (desno) (prirejeno po Hill, 2006).

Figure F.1: Typical relaxation curves for stress-relieved strands (left) and low-relaxation strands (right) (adapted after Hill, 2006).

Iz obeh diagramov na **sliki F.1** je že na prvi pogled razvidno, da so izgube zaradi relaksacije pramen z nizko relaksacijo bistveno nižje od izgub pomirjenih pramen, ter da je upad napetosti zaradi relaksacije linearen z logaritmom časa, zaradi česar se večina izgub zaradi relaksacije izvrši v začetnem obdobju po zaklinjenju pramena, nato pa njihova intenzivnost pada. Izraza za račun relaksacijskih krivulj obeh tipov pramen sta z izjemo ene konstante enaka, pri čemer relaksacijske izgube jekla pramen z nizko relaksacijo znašajo le 22 % relaksacijskih izgub jekla pomirjenih pramen. Podobne ugotovitve sta objavila Koretski in Pritchard (1982) že pred skoraj tremi desetletji, kjer so na podlagi opravljenih preskušanj vzorcev pramen iz običajnega jekla in pramen z nizko relaksacijo ugotovili pomembne razlike izmerjenih izgub relaksacije, pri čemer so različne tako posamezne vrednosti, kot tudi hitrosti napredovanja relaksacije z logaritmom časa: ekstrapolirane vrednosti izgub relaksacije pri 10^6 urah (približno 114 let) pri 70 % mejne natezne trdnosti za pramena z običajno relaksacijo znašajo do 24 %, za pramena z nizko relaksacijo pa do 7 %. Po oceni Gilbert in Mickleborough (2004) so z uporabo jekel z nizko relaksacijo vrednosti relaksacije od prvotnih 10 do 15 % močno upadle na nizke vrednosti, običajno nižje od 5 %, medtem ko Pritchard in sod. (2006) ocenjujejo, da bi bile izgube pramen z običajno relaksacijo v deležu med 20 do 30 % začetne natezne sile, v primerjavi z današnjimi prameni z nizko relaksacijo, pri katerih bi izgube zaradi relaksacije med celotno življenjsko dobo konstrukcije znašale pod 5 %. V praksi pri podelitvi nacionalnih tehničnih soglasij v Nemčiji (npr. ABZ Z-12.3-4, 2009) za pletena pramena iz jekla z nizko relaksacijo 1570/1770 iz sedem hladno vlečenih gladkih žic

kot orientacijsko oceno vrednosti izgube prednapetja glede na vzpostavljeno začetno silo navajajo za pramena obremenjena na 70 % trdnosti orientacijsko vrednost izgub po 1000 urah 2 %, po $5 \cdot 10^5$ urah (približno 57 letih) se vrednost izgub poveča na 6,5 %, medtem ko se po 10^6 urah (približno 114 letih) vrednost izgub giblje okoli 7 %. V kolikor so pramena obremenjena na 80 % trdnosti, potem se vrednost izgub po 1000 urah giblje okoli 5 %, po $5 \cdot 10^5$ urah (približno 57 letih) se vrednost izgub poveča na 13 %, po 10^6 urah (približno 114 letih) pa izgube dosežejo delež 14 %. Toliko nižje vrednosti izgub sile zaradi relaksacije jekel z nizko relaksacijo so torej razlog, zakaj se, za prednapenjanje konstrukcij in elementov, jekla z normalno relaksacijo že dolgo vrsto let več ne uporabljajo.

Britanski standard za geotehnična sidra *BS 8081* med drugim navaja tudi določene zahteve glede relaksacijskih lastnosti 7-žičnih pramen narejenih iz jekla z nizko relaksacijo. Za vrednosti relaksacije pramen po 1000 urah je vedno treba upoštevati vrednosti navedene v certifikatu proizvajalca pramen, pri čemer naj bi bile vrednosti relaksacije navadno podane za ravni napetosti 60 %, 70 % in 80 % f_{pu} (karakteristične natezne trdnosti kabla sidra), vrednosti napetosti na vmesnih ravneh pa se določijo z interpolacijo. Zanimivo je, da standard podaja tudi tipične vrednosti dinamike upadanja napetosti v 7-žičnih pramenih iz jekla z nizko relaksacijo obremenjenih na 70 % f_{pu} v izotermnih pogojih pri 20 °C: po 0,1 uri znaša vrednost relaksacije 0,07 %, po 1 uri 0,33 %, po 10 urah 0,60 %, po 100 urah 0,84 %, po 500 urah 0,98 % ter po 1000 urah 1,10 % (glej tudi **sliko F.6**). Za napetosti nižje od 60 % f_{pu} se lahko pri pramenih iz jekla z nizko relaksacijo, v primerih, ko ni eksperimentalno podprtih dokazov, za vrednost relaksacije po 1000 urah upošteva linearno upadanje iz 2,5 % (pri 70 % f_{pu}) na 1,0 (pri 50 % f_{pu}). Končno projektno oceno upada sile zaradi relaksacije pri trajnih sidrih iz pramen iz jekla z nizko relaksacijo dobimo tako, da vrednosti relaksacije po 1000 urah pomnožimo s faktorjem 1,5.

Evrokod 2 (EN 1992) podaja izraz za izračun izgube zaradi relaksacije pramen z nizko relaksacijo v pramenih kablov pri prednapenjanju betonskih konstrukcij. Dobljene vrednosti niso neposredno primerljive z vrednostmi dobljenimi po izrazih **(F.1)** in **(F.2)**, po katerih dobimo delež preostalih napetosti (ne pa delež padlih napetosti), obenem pa se v izračunu obremenitev pramen po izrazih **(F.1)** in **(F.2)** napetosti podaja v deležu glede na mejo tečenja, medtem ko se v izrazu **(F.3)** napetosti podajajo glede na karakteristično natezno trdnost pramen. Račun izgub zaradi relaksacije prednapetega jekla temelji na vrednosti ρ_{1000} (t.j. padcu sile v % 1000 ur po napenjanju, pri srednji temperaturi 20 °C). Vrednost ρ_{1000} je v odstotkih izražen delež začetne napetosti dosežen pri začetni napetosti $0,7 \cdot f_p$, pri čemer je f_p dejanska natezna trdnost vzorca jekla za prednapenjanje, na podlagi katere se za dimenzioniranje določi karakteristična natezna trdnost (f_{pk}). Za vrednosti ρ_{1000} lahko privzamemo bodisi vrednost 2,5 % (razred 2) bodisi jih vzamemo iz certifikata. Izguba zaradi relaksacije po *EN 1992* se za kable za prednapenjanje iz pramen z nizko relaksacijo (razred 2) izvednoti po izrazu:

$$\frac{\Delta\sigma_{pr}}{\sigma_{pi}} = 0,66 \cdot \rho_{1000} \cdot e^{0,1 \cdot \mu} \cdot \left(\frac{t}{1000}\right)^{0,75 \cdot (1-\mu)} \cdot 10^{-5}, \quad (\text{F.3})$$

pri čemer so: $\Delta\sigma_{pr}$ absolutna vrednost izgube prednapetja zaradi relaksacije,
 σ_{pi} pri naknadnem napenjanju je to začetna vrednost prednapetja $\sigma_{pi} = \sigma_{pm0}$,
 t čas po napenjanju (v urah),
 ρ_{1000} vrednost izgube zaradi relaksacije (v %) 1000 ur po napenjanju pri srednji temperaturi 20 °C,
 $\mu = \sigma_{pi} / f_{pk}$, kjer je f_{pk} karakteristična natezna trdnost jekla za prednapenjanje.

Pri izbranem tipu jekla pramena je relaksacija močno odvisna od ravni napetosti v jeklu, njena intenzivnost pa s povečevanjem napetosti narašča. Podolny (1967) ter Ghali in sod. (2002) podajajo oceno iz prakse, da pojav relaksacije pri pramenih postane opazen pri napetostih višjih od 50 % natezne trdnosti jekla. Sengupta in sod. (2009) navajajo, da se s povečevanjem napetosti v jeklu nad 70 % natezne trdnosti jekla začnejo izgube zaradi relaksacije izraziteje povečevati. Vpliv relaksacije bi pri prednapetih geotehničnih sidrih teoretično lahko kompenzirali z donapenjanjem sider; če bi ga izvedli po 1000 urah, bi se na primer (pri začetnih napetosti 70 % natezne trdnosti jekla) končna relaksacija zmanjšala na $\frac{1}{4}$ normalne vrednosti, pri začetnih napetostih 80 % natezne trdnosti jekla pa na $\frac{1}{2}$ (Littlejohn in Bruce, 1977).

Začetno pojmovanje relaksacije iz 1960-ih, po katerem naj bi bila vrednost relaksacije po 1000 urah že kar končna vrednost, se je izkazalo kot popolnoma napačno. Littlejohn in Bruce (1977) podajata oceno iz konca 1970-ih, ko so kot dolgoročno relaksacijo smatrali padec napetosti po 100 000 urah (t.j. po približno 11 letih), ki naj bi bil pri običajnih vrednosti napetosti približno dvakrat večji od vrednosti relaksacije po 1000 urah pri 20 °C. Dejansko so rezultati dolgoročnih preskušanj na različnih tipih jekel pokazali, da je padec napetosti po 100 urah dvakrat tolikšen kot po 1 uri, hkrati pa predstavlja 80 % padca po 1000 urah oz. 40 % padca po 30 letih. Ghali in sod. (2002) citirajo navedbo iz *MC-90* (1990), da je vrednost relaksacije po 50 letih in več, glede na vrednost po 1000 urah, trikrat večja.

Preostala vplivna parametra v sklopu obravnave trajnih prednapetih geotehničnih sider nista tako zelo pomembna, res pa je, da na njiju ne moremo vplivati:

- Dolžina trajanja prevzemanja sidrne sile je odvisna od predvidene življenjske dobe sider, med katero morajo zaklinjena sidra zagotavljati prenos sidrne sile.
- Podobno velja za vpliv temperature na stopnjo relaksacije: pri pogojih laboratorijskega preskušanja (20 °C) se relaksacija z naraščanjem temperature sicer hitro povečuje (Littlejohn in Bruce, 1977, Ghali in sod., 2002 in Gilbert in Mickleborough, 2004), vendar pa ta pojav pri prednapetih geotehničnih sidrih, ki so v pretežnem delu vgrajena v tla s stabilno temperaturo velikostnega reda okoli 10 °C, v splošnem ni tako zelo pomemben. Izjema so po Xanthakos (1991) pri nas izjemni primeri, ko so sidra vgrajena v topla tla zaledja in kjer je sicer treba spremljati temperaturi tal in talne vode.

Dejanski mehanizem relaksacije je zelo zapleten in je bil predmet mnogih diskusij od simpozija FIP o prednapetem jeklu v Madridu leta 1968 naprej (Koretsky in Pritchard, 1982). Po istem viru je bilo v tistem času splošno sprejeto, da je skupna deformacija natezno obremenjenega jeklenega pramena konstantna, sestavljena pa je iz elastičnega in neelastičnega dela. Za elastični del obnašanja velja splošno poznana teorija elastičnosti (Hookov zakon), medtem ko je neelastično obnašanje bolj zapleteno. Za neelastične oz. plastične deformacije Koretsky in Pritchard (1982) navajata, da naj bi bile posledica lokalnih zdrsov in procesa difuzijskih dislokacij med sosednjimi kristali. Po Pritchard in sod. (2006) je v izotermnem okolju pri konstantni temperaturi začetna stopnja kristalne dislokacije visoka in se nato zmanjša na raven konstantne logaritmične stopnje.

F.2 STANDARDIZIRANO PRESKUŠANJE RELAKSACIJE PRAMEN ZA POTREBE PREDNAPENJANJA KONSTRUKCIJ

F.2.1 Uvod v standardizirano preskušanje relaksacije prednapetih pramen

Ključna težava pri izmerjenih rezultatih relaksacije je, da se v splošnem vsi rezultati relaksacije, v kolikor so pridobljeni po kakršnemkoli veljavnem standardu, smatrajo kot nesporni, vendar se je ob tem treba zavedati dejstva, da niso standardizirane oz. predpisane niti vrsta preskuševalne opreme niti dolžine vzorcev (predpisana je zgolj minimalna dolžina vzorcev). Edini usklajeni parameter je čas opazovanja izgub, saj v splošnem veljavni predpisi preskušanje relaksacije kot merodajni interval opazovanja izgub zaradi relaksacije določajo 1000 ur, kar je še praktično izvedljiva dolžina opazovanja, ki na drugi strani omogoča določitev linearnega dela krivulje v dvojno logaritemskem diagramu ter ekstrapolacijo vrednosti v obdobju npr. po $5 \cdot 10^5$ urah (približno 57 letih) oz. 10^6 urah (približno 114 letih) kar nekje ustreza predvideni življenjski dobi inženirske konstrukcije, kamor nedvomno sodijo tudi sidrane konstrukcije z vgrajenimi trajnimi prednapetimi geotehničnimi sidri.

Preskušanje relaksacije je bila pri avstralskih raziskovalcih aktualna tema pred več kot 40 leti, ko je že bilo znano, da se pri hladno vlečeni žici obremenjeni z visokimi nateznimi silami pojavlja "*mehanizem tečenja*", ki se sčasoma povečuje in je tem izrazitejši, čim večje so natezne napetosti, prav tako pa so vrednosti tečenja pri istih obremenitvah v samo prevlečenih žicah večje kot pri napetostno pomirjenih žicah (Podolny, 1967). Pomembne razlike v tehnikah merjenja izgub oz. preskusnih metodah za ugotavljanje relaksacije v prednapetih pramenih, kot tudi same vrednosti relaksacije priporočene v avstralskih in mednarodnih standardih oz. predpisih za projektiranje, sta raziskovala Koretsky in Pritchard (1982). Za korektno izvedbo preskusov izgub zaradi relaksacije v pramenih je pomembno, da sta preskusni okvir in dinamometer v osni smeri vzorca dovolj toga, s čimer zagotavljata, da bo imela vsaka sprememba sile preskušanca zaradi relaksacije zanemarljiv vpliv na deformacijo pramena. Obenem mora biti preskusni okvir dovolj dolg, da omogoča namestitvev reprezentativne dolžine pramena. Avtorja ugotavljata, da v tistem času ni bilo enotne metode za vrednotenje izgub zaradi relaksacije: v vseh primerih so prvi odčitek opravili šele eno minuto (1') po vnosu sile, opazovalni čas je v vseh primerih znašal 1000 ur, istočasno pa so bile prisotne občutne razlike glede dolžine vzorca. Le-ta je bila določena med 14 in $100 \cdot \varnothing_{\text{pramena}}$ (za pramen $\varnothing 15,2$ mm je to med 21,3 cm in 152,0 cm), čeprav je bila zaradi minimiziranja vplivov na konceh vzorcev zaželjena večja dolžina preskušancev. Raziskovalca ugotavljata, da postopek z izvedbo prvega odčitka šele 1' po vnosu sile v vzorec ni pravi, saj je namreč na ta način izločeno začetno obdobje silovitih dislokacij kristalov, s čimer so prezrte pomembne izgube zaradi relaksacije, do katerih pride neposredno po končanem napenjanju pramena. Povedano z drugimi besedami: avtorja sta prepričana, da so odčitki v 1' odločilni za pravilno oceno izgub relaksacije, saj sta na pramenih z nizko relaksacijo napetih na 70 do 80 % nazivne natezne trdnosti jekla samo v 1' po končanem napenjanju zabeležila od 10 do 27 % celotne izgube sile zaradi relaksacije po 1000 urah.

Rezultati preskušanj, ki sta jih Koretsky in Pritchard (1982) dobila na pramenih $\varnothing 12,5$ mm (vzorci pramen z nizko relaksacijo v viru označenih kot "A" in "C"), kažejo določen raztros vrednosti kljub temu, da sta bila po dva vzorca odvzeta iz istega koluta: izmerjene vrednosti po 1' so se razlikovale do 40 %, medtem ko se vrednosti po 1000 urah razlikujejo le še za 3,7 %. Kot glavna razloga za raztros vrednosti sta raziskovalca poleg skrajno hitre in neenakomerne dislokacije kristalov navedla tudi težave pri vzdrževanju natančnega časa napenjanja in hitrosti obremenjevanja. Posledica teh dveh faktorjev so bile nekatere težave pri koreliranju časa vzpostavitve obremenitve (napenjanja) in odčitka ničelne relaksacije v sklopu raziskave vpliva razlik v času napenjanja (t.j. v času potrebnem za vnos

sile) na dveh vzorcih pramen B z običajno relaksacijo. Pramen B1 so napeli v 210 s, pramen B3 pa v 30 s, pri čemer je imel pramen B3 višje izgube relaksacije kot pramen B1, kar povzemata naslednji aproksimacijski enačbi:

- izguba sile pri pramenu B1 napetem v 210': $\log \rho = 0,440 + 0,160 \cdot \log t$, (F.4)

- izguba sile pri pramenu B3 napetem v 30': $\log \rho = 0,514 + 0,159 \cdot \log t$. (F.5)

Očitno je, da hitrost vnosa sile vpliva na začetno vrednost relaksacije (pri hitrejšem vnosu sile je začetna relaksacija izrazitejša), vendar pa je hitrost prirasta vrednosti med nadaljnjim opazovanjem (torej z logaritmom časa) praktično enak. Čeprav je bila po eni uri izguba zaradi relaksacije vzorca B3 16,8 % višja od izgub vzorca B1, pa je bila po 1000 urah opazovanja izguba vzorca B3 višja le še za 7,7 %, iz česar po viru lahko sklepamo, da intenziteta pojava s časom pojema. V kolikor bi časovno bazo preoblikovali tako, da bi začetek relaksacije začeli spremljati šele 15' po končanem napenjanju, bi dobili skoraj popolno ujemanje odčitkov.

Nekateri laboratoriji imajo že dolgo tradicijo preskušanja relaksacije prednapetih pramen. Pri Main Roads (Avstralija) so že leta 1977 izvedli prvi preskus relaksacije na takrat novem proizvodu – pramenu iz sedmih žic z nizko relaksacijo, pri čemer od takrat naprej izvajajo preskušanja relaksacij pramen. Pri tem so uporabljali številne preskusne naprave, ki vključujejo različne zasnove, metode preskušanja in sisteme sidranja vzorcev pramen, pri čemer vsi našeti parametri lahko vplivajo na rezultate preskušanj. Leta 2002 so v Avstraliji pri različnih proizvajalcih pramen izvedli raziskavo učinkovitosti različnih naprav za preskušanje relaksacije, v kateri so ugotovili različne pomanjkljivosti tako preskusnih naprav kot tudi preskusnih metod. Na podlagi teh ugotovitev so na Univerzi Queensland razvili novo preskusno napravo s togim preskusnim okvirom opremljenim s togimi dinamometri. Kot ključne značilnosti preskusnih postopkov in opreme za preskušanje relaksacije Pritchard in sod. (2006) navajajo:

- Preskusni okviri morajo biti dovolj togi, kar pomeni, da morajo biti osne tlačne napetosti v okviru samo do nekaj odstotkov napetosti v vzorcu pramena, saj se le v tem primeru po intenzivni začetni relaksaciji izmerjene vrednosti v diagramu $\log \rho - \log t$ nahajajo na premici, pod pogojem, da meritev sile v pramenu izvaja s togim dinamometrom. Če napetosti v okviru dosežejo 10 % napetosti v pramenu, se tak okvir smatra kot delno tog (angl. soft rigid) in kot tak neprimeren za izvedbo takega preskusa.
- Za zmanjšanje vpliva zasidranja obeh koncev vzorca pramena v preskuševalni napravi na rezultate, naj bi bila dolžina vzorcev čim daljša, pri čemer kot minimalno dolžino predlagajo 9-kratnik koraka ovitja pramena (angl. lay length).
- Predlagajo zalivanje skrajnih koncev vzorcev pramen namesto oprijema z zagozdo in kotvo, saj v tem primeru ni težav z zdrsom in uvlečenjem zagozde v odprtino kotve pramena. Dodatno varnost proti preprečitvi zdrsa vzorca pramena na mestih zasidranja se lahko doseže s 24-urnim namakanjem obeh koncev vzorca v slani kopeli.
- Temperatura v laboratoriju mora biti čimbolj konstantna, dobro ujemanje rezultatov (t.j. lega točk na premici v zadnjem delu preskusa) je zagotovljeno pri nihanju temperature znotraj $\pm 0,5$ °C.
- Po končanem preskusu se na dinamometru odčita ničelna vrednost, s čimer se preveri, da v njem ni učinka rezidualne histreze.

Hill (2006) ugotavlja, da še vedno na nek način ostaja odprto vprašanje vpliva dolžine vzorca pramena na rezultat preskusa relaksacije. Avstralski standard *AS 1311:1972 Steel tendons for prestressed concrete* je predpisoval minimalno dolžino vzorca kot $100 \cdot \varnothing_{\text{pramena}}$, medtem ko je britanski standard *BS*

3617:1971 *Standard specification for seven wire strand for prestressed concrete* v istem času predpisoval minimalno dolžino vzorca le kot $14 \cdot \varnothing_{\text{pramena}}$. Nekaj let kasneje sta CEB – Comité Euro-International du Béton in FIP – Fédération Internationale de la Précontrainte v *Model code for concrete structures* (1978) kot standardno minimalno preskusno dolžino določila $40 \cdot \varnothing_{\text{pramena}}$. Zadnja verzija standarda *ASTM A416:2005 Standard specification for steel strand, Uncoated seven-wire for prestressed concrete* kot prioritarno dolžino preskušancev navaja $60 \cdot \varnothing_{\text{pramena}}$.

Z namenom raziskati vpliv dolžine vzorca na končni rezultat relaksacije je Hill (2006) na Virginia Tech (ZDA) po *ASTM E328:2002 Standard test methods for stress relaxation tests for materials and structures* izvedel preskušanja relaksacije 22 vzorcev pramen $\varnothing 0,5''$ (12,7 mm), trdnostnega razreda GR 270 in GR 300 in 4 vzorcev $\varnothing 0,6''$ (15,2 mm) trdnostnega razreda GR 270, vzorci pa so bili dejansko obremenjeni od 56,8 do 81,1 % natezne trdnosti pramen. Vzorci so bili preskušeni v treh različnih preskuševalnih napravah in sicer v kratki (95 cm), srednji (190 cm) in dolgi (380 cm). Po *ASTM A416* mora biti preskus relaksacije izveden pri temperaturi $20 \pm 1,94$ °C; dejansko je bila med preskušanjem večine vzorcev v laboratoriju zagotovljena temperatura 22,1 °C, tekom celotnega preskušanja pa se je temperatura gibala v območju 22,0 in 22,5 °C. Med preskušanjem so preverjali tudi pogoj *ASTM E328* glede konstantne deformacije ($\pm 2,5 \cdot 10^{-5}$ mm/mm), pri čemer so vrednosti med preskušanjem nihale v območju $\pm 2,0 \cdot 10^{-5}$ mm/mm. Priporočeni čas opazovanja po *ASTM A416* znaša 1000 ur, čeprav je dovoljen tudi krajši opazovalni čas 200 ur, če je možno izmerjene vrednosti ekstrapolirati na 1000 ur. Pri preskušanjih so ugotovili, da so bile vrednosti izgub zaradi relaksacije pri 200-urnih preskusih nižje od vrednosti izmerjenih po 200 urah sicer 1000-urnih preskusov. Analiza rezultatov je pokazala, da so bile po 1000 urah opazovanja:

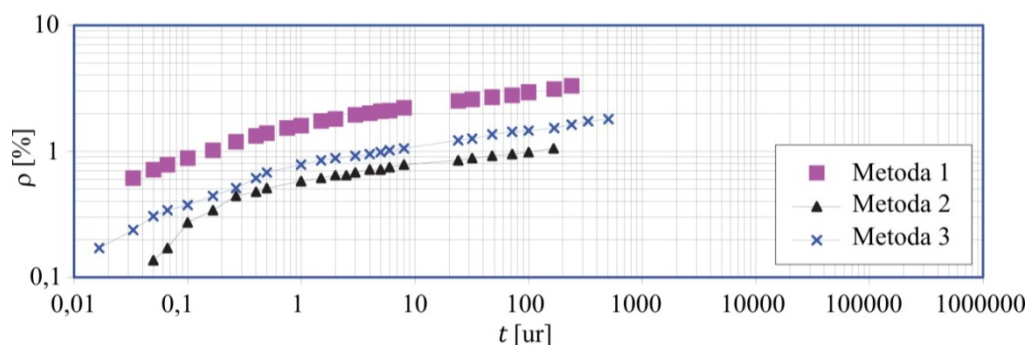
- največje povprečne vrednosti izgub sile 1,81 % izmerjene v kratkih okvirih dolžine 95 cm pri povprečni vrednosti napetosti 59,5 % natezne trdnosti,
- nekoliko manjše povprečne izgube 1,71 % so bile izmerjene v okvirih dolžine 190 cm pri povprečni vrednosti napetosti 66,5 % natezne trdnosti,
- najmanjše povprečne vrednosti izgub sile 1,11 % izmerjene v dolgih okvirih dolžine 380 cm pri povprečni vrednosti napetosti 75,0 % natezne trdnosti.

Očitno je, da je dolžina okvira vplivala na raven napetosti, ki so jo lahko ohranjali v vzorcu, čemur je najbolj pripomogel zdrs in usedanje čeljusti v obeh kotvah. Vpliv teh dveh pojavov se je sicer spreminjal od vzorca do vzorca, vendar po viru velja splošna ugotovitev, da je bil najmanjši pri daljših dolžinah vzorcev pramena.

Na izmerjene vrednosti relaksacije lahko poleg vseh že navedenih faktorjev vpliva še zdrs na stiku osrednje žice z ostalimi šestimi zunanji žicami pramena. V fazi prevleka žic med proizvodnjo pramen proizvajalci žice pogosto premažejo z mazivom za zmanjševanje trenja, vprašanje pa je, v kolikšni meri je to sredstvo nato odstranjeno z žic pramena. Kljub temu, da je osrednja žica večjega premera prav zaradi zmanjšanja zdrsa na stiku z ostalimi zunanji žicami pramena, pa lahko po vnosu natezne sile v pramen, zaradi nezadostnega trenja na stiku osrednje z zunanji žicami, preko katerih se sila vnaša v osrednjo žico pramena, pride do zdrsa po tem stiku, zaradi česar so posledično napetosti v osrednji žici nižje kot v ostalih zunanji žicah pramena. Istočasno pa je ravno od tega, v kolikšni meri med žicami pramena pride do zdrsa, odvisna tudi končna vrednost izgub relaksacije pramena. Ravno ta pojav so Pritchard in sod. (2006) eksperimentalno preverili na Univerzi v Queenslandu: iz istega koluta, pri katerem je bil premer osrednje žice pramena za 3 % večji od premera ostalih šestih žic, so odvzeli tri vzorce, na katerih so na isti preskuševalni napravi po treh različnih metodah opravili preskus relaksacije:

- **metoda 1:** pramen v dobavljenem stanju, na mestu oprijema na zunanje žice pramena čeljusti niso zdrsnile, opazen pa je bil zdrs osrednje žice po stiku z zunanjimi žicami; napenjalne glave pramena niso premikali in je bila ves čas na istem mestu;
- **metoda 2:** pramen v dobavljenem stanju, na mestu oprijema na zunanje žice pramena čeljusti niso zdrsnile, opazen pa je bil zdrs osrednje žice po stiku z zunanjimi žicami; napenjalno glavo pramena so premikali tako, da so ohranjali konstantno deformacijo;
- **metoda 3:** predhodni tretma pramena v agresivnem okolju na mestih oprijema čeljusti pred preskusom (povzročitev površinskih korozijskih poškodb na žicah pramena); na mestu oprijema čeljusti zunanje žice pramena niso zdrsnile, prav tako ni prišlo do zdrsa osrednje žice po stiku z zunanjimi žicami, pri čemer je bila napenjalna glava pramena ves čas na istem mestu.

Na **sliki F.2** so nazorno prikazane razlike v izmerjenih izgubah zaradi relaksacije, ki so posledica različnih metod preskušanja: po 100 urah se izmerjene vrednosti relaksacije gibljejo v razponu med 1,0 in 3,0 %, kar predstavlja trikratno razliko! Iz te raziskave je razvidno, da je lahko izmerjena relaksacija vzorcev pramena iz istega koluta nižja od meje, ki jo podajajo predpisi (torej bi bil pramen potrjen kot skladen z njihovimi zahtevami), na drugi strani pa bi lahko z uporabo druge metode izmerili vrednosti relaksacije, ki bi bile višje od mejne vrednosti v predpisih (posledično bi bil pramen zavrjen).



Slika F.2: Primerjava rezultatov preskusov relaksacije na vzorcih pramena iz istega koluta opravljenih po različnih metodah (prirejeno po Pritchard in sod., 2006).

Figure F.2: Comparison of relaxation results on strand samples from the same reel using various test methods (adapted after Pritchard et al., 2006).

F.2.2 Preskušanja izotermne relaksacije po standardu SIST EN ISO 15630-3

Preskusne metode za preskušanje jekla za prednapenjanje, kamor sodijo tudi jeklena pramena, podaja standard *ISO 15630-3*, ki smo ga pri nas privzeli kot *SIST EN ISO 15630-3:2003 – Jeklo za armiranje in prednapenjanje betona – Metode preskušanja – 3. del: Jeklo za prednapenjanje*. Med ostalim standard podaja zahteve za preskušanje izotermne relaksacije ρ [%], pri katerem se na vzorcu pramena konstantne dolžine v pogojih stalne temperature merijo spremembe sile glede na začetno vrednost F_0 . Za izvedbo preskušanja izotermne relaksacije standard podaja tudi zahteve za preskusno opremo:

- deformacije preskusnega okvira morajo biti take, da ne vplivajo na rezultate preskušanja vzorca;
- dinamometer mora biti kalibriran, pri čemer moramo v območju do 1000 kN zagotoviti točnost ± 1 %, ločljivost dinamometra pa mora biti vsaj $5 \cdot 10^{-4} \cdot F_0$ ali boljša;
- merjenje sprememb dolžine naj se izvaja na dolžini vsaj 200 mm, pri čemer je za pramena priporočljiva dolžina merilne baze $L_0 \cong 1000$ mm; točnost merilnika pomikov naj znaša ± 1 %, medtem ko mora biti njegova ločljivost vsaj $5 \cdot 10^{-6} \cdot L_0$;

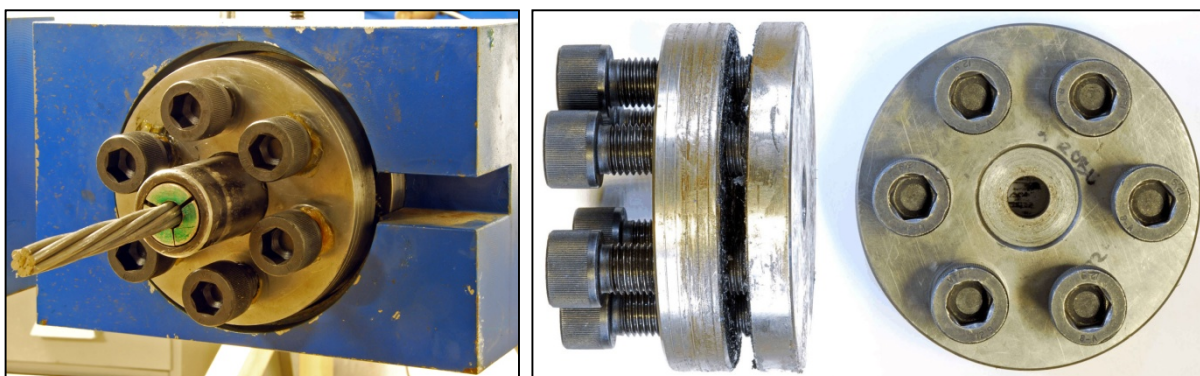
- standard ne podaja natančnih zahtev za vpetje vzorcev v preskuševalno napravo, zahteva le, da moramo na obeh koncih vzorca zagotoviti dober oprijem in preprečiti zdrs vzorca v čeljustih ali pa morajo biti možni popravki zdrsov, na mestu vpetja pa mora biti preprečena tudi rotacija;
- ves čas preskušanja moramo zagotoviti enakomeren vnos sile v vzorec brez sunkov.



Slika F.3: Togi jekleni okvir za preskus izotermne relaksacije (leva stran fotografije); vzorec jeklenega pramena med preskusom (desna stran fotografije).

Figure F.3: The stiff steel frame used for an isothermal stress relaxation test (left part of the photo); testing of a sample of steel strand (right part of the photo).

Na Zavodu za gradbeništvo Slovenije se v sklopu redne dejavnosti na dveh posebej zasnovanih in izdelanih preskuševalnih okvirih (slika F.3) izvajajo preskušanja izotermne relaksacije po standardu *SIST EN ISO 15630-3*. Namensko izdelana toga jeklena okvira sta sestavljena iz dveh polnih jeklenih palic $\varnothing 80$ mm dolžine 1500 mm, ki sta na obeh koncih privarjeni na jeklena bloka dimenzij $140 \times 200 \times 300$ mm, v sredini katerih sta izvrtini $\varnothing 30$ mm skozi kateri med preskusom poteka vzorec pramena. Na tisti strani jeklenega okvira, na kateri v vzorec pramena vnašamo natezno silo, je v bloku zarezan utor $\varnothing 180$ mm, globine 60 mm, ki omogoča namestitev napenjalne glave $\varnothing 165$ mm, na katero neposredno nalega kotva pramena. Pri izvedbi preskusov izotermne relaksacije je pomembno zagotoviti, da se natezna sila v vzorec pramena vnaša čimbolj enakomerno, kar v primeru naše naprave zagotavljamo preko napenjalne glave s šestimi vijaki (slika F.4), ki jih izmenično ročno zategujemo in s tem odmikamo napenjalno glavo od bloka jeklenega okvira. Sam postopek zategovanja vijakov kontroliramo preko dinamometra in dejansko vnesene natezne sile v pramen.



Slika F.4: Napenjalna glava s kotvo nameščena na vzorec pramena v jeklenem preskuševalnem okviru (levo), detajlni pogled na napenjalno glavo od strani in od spredaj (desno).

Figure F.4: A strand sample in the steel testing frame equipped with a stressing head with a bush (left), side and front detailed view of the stressing head (right).

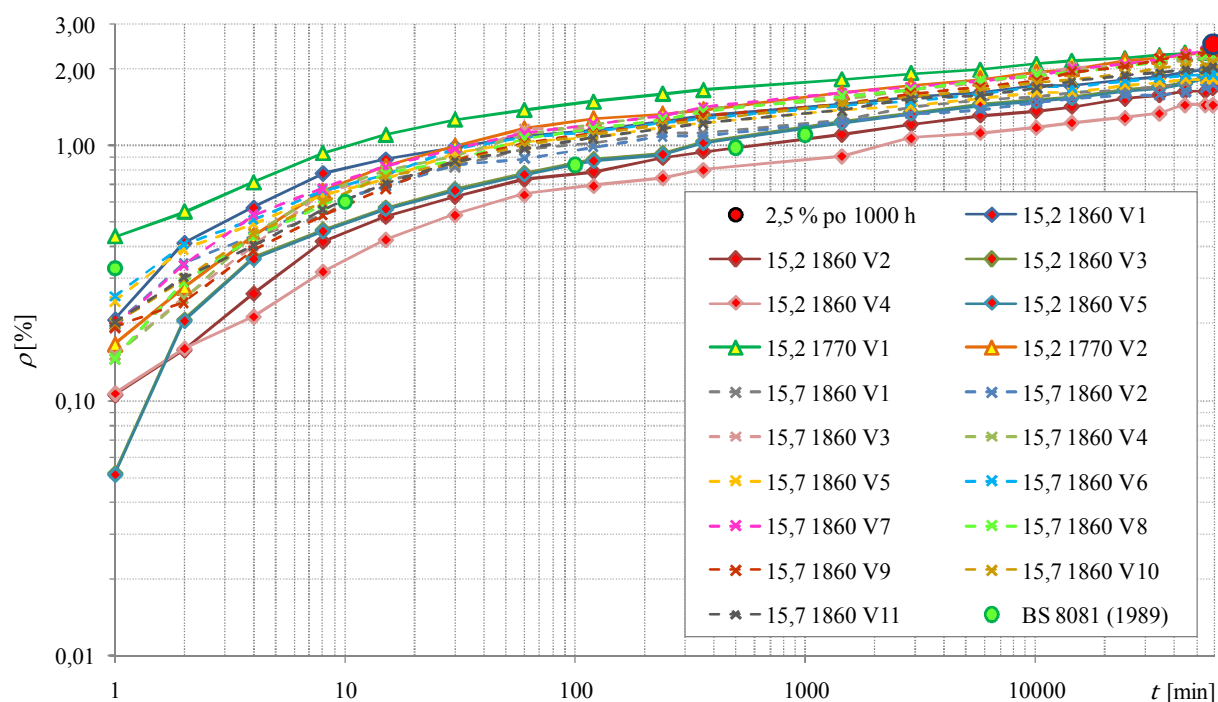
Minimalna potrebna dolžina vzorca pramena za pritrditev v jekleni okvir mora biti vsaj 2000 mm, pri čemer je vzorec dejansko obremenjen na dolžini približno 1795 mm, kar pri koraku ovitja (angl. lay length) 215 mm znaša približno 8,3 korakov ovitja. Poleg tega se skladno s standardom *SIST EN ISO 15630-3* iz območja odvzema vzorca za preskus izotermne relaksacije odzame še dva vzorca, na katerih se v univerzalnem trgalnem stroju ZWICK Z2500 kN z nateznim preskusom določita maksimalni sili F_m , na podlagi katerih se izračuna povprečna maksimalna sila $F_{m,m}$, ki je osnova za izvednotenje začetne sile za preskus izotermne relaksacije F_0 , ki znaša 70 % $F_{m,m}$.

Vzorec za preskušanje relaksacije moramo v preskusnem laboratoriju hraniti vsaj 24 ur pred začetkom preskušanja, pri čemer mora biti v laboratoriju zagotovljena stalna temperatura v območju 20 ± 2 °C. Po vpetju vzorca v preskuševalno napravo se v vzorec po posebnem postopku, predpisanem v standardu, vnese začetna natezna sila F_0 , ki jo moramo dve minuti (v nadaljevanju: 2') ohranjati na konstantni ravni, predno se začne z meritvami padca sile, pri čemer standard za čas opazovanj do pet dni natančno podaja časovne intervale, v katerih moramo odčitovati vrednosti sile v vzorcu. Meritve sil se izvajajo z elektronskim pretvornikom sile KAF 200 kN (slika F.5), vrednosti sile s točnostjo $\pm 0,5$ kN pa se odčitavajo z merilnim inštrumentom Proceq Wigameter N100. Poleg sil moramo med preskusom spremljati še morebitne deformacije vzorca pramena, kar se pri standardiziranih preskusih preverja z merilno točnostjo ± 1 μ m s pretvornikom pomikov Huggenberger S-4229.



Slika F.5: Dinamometer KAF 200 kN nameščen na vzorec pramena v jeklenem preskuševalnem okviru.
Figure F.5: A strand sample instrumented with a load cell KAF 200 kN installed into the steel testing frame.

Po osnutku standarda *prEN 10138-1:2000 Prestressing steels – Part 1: General requirements* se krivulje izotermne relaksacije določajo za čas izpostave 1000 ur pri nominalni temperaturi 20 °C, pri čemer je v vzorec vnese začetna natezna sila v vrednosti 70 % povprečne maksimalne sile $F_{m,m}$. Osnutek standarda *prEN 10138-3:2000 Prestressing steels – Part 3: Strand* v tem primeru za mejno vrednost relaksacije določa vrednost padca začetne sile (70 % $F_{m,m}$) v deležu 2,5 % $F_{m,m}$; v kolikor se po dogovoru med dobaviteljem in kupcem preskušanje relaksacije izvaja na višji ravni sile (80 % $F_{m,m}$), potem se kriterij vrednosti padca začetne sile zviša na 4,5 % $F_{m,m}$. Tipični rezultati preskusov izotermne relaksacije po standardu *SIST EN ISO 15630-3* za vzorce jeklenih pramenov \varnothing 15,2 in 15,7 mm trdnostnega razreda 1770 in 1860 MPa so podani na **sliki F.6**. Iz diagrama je razvidno, da je bila pri preskušanjih vseh vzorcev pramenov vrednost relaksacije po 1000 urah nižja od 2,5 % $F_{m,m}$, s čimer je izpolnjen kriterij osnutka standarda *prEN 10138-3*. Za krivulje podane v diagramu je značilen relativno velik raztros vrednosti, k čemur najbolj prispevajo vrednosti odčitane v prve pol ure, od tam naprej pa so krivulje medsebojno skorajda vzporedne.



Slika F.6: Tipični rezultati meritev preskusov izotermne relaksacije po standardu *SIST EN ISO 15630-3* za pramena \varnothing 15,2 mm in \varnothing 15,7 mm iz jekla trdnostnega razreda 1770 in 1860 MPa.

Figure F.6: Typical results of isothermal stress relaxation tests of strands \varnothing 15,2 mm and \varnothing 15,7 mm of steel grade 1770 and 1860 MPa performed according to the standard *SIST EN ISO 15630-3*.

F.3 PRESKUŠANJE IZOTERMNE RELAKSACIJE PRAMEN PO POSTOPKU ZA IZVEDBO PREISKAV PREDNAPETIH GEOTEHNIČNIH SIDER

Za določanje dolgoročne relaksacije jeklenih pramen, na podlagi katerega lahko ocenimo padec sile v prednapetih konstrukcijah in zaklinjenih geotehničnih sidrih, torej obstajajo standardne opredelitve, ki v določeni meri tudi podajajo zahteve za njihovo izvedbo in presojo. Do istega pojava v smislu izgube napetosti oz. padca sile v prednapetih geotehničnih sidrih pa prihaja tudi že med preskušanjem njihove odpornosti, kar še posebej velja za PS, pri katerih je jeklo pramen kabla sidra v zadnji fazi lahko obremenjeno celo do 85 % nazivne natezne trdnosti jekla pramen R_m . Zaradi pojava relaksacije med PS bodo zaporedni odčitki izvlečkov pramen sidra med opazovanjem na posamezni stopnji sile P_i dejansko izvedeni pri vedno nižji sili. Kot kažejo ugotovitve in rezultati podani v poglavju F.2 je intenzivnost izotermne relaksacije najbolj burna prav takoj na začetku po vnosu sile, obenem pa je situacija pri prednapetih geotehničnih sidrih zaradi stalnega cikličnega naraščujočega spreminjanja sile na raven začetne sile P_a , nazaj na raven predhodnje sile P_{i-1} in takoj nato na raven nove stopnje sile P_i , kjer se tudi izvaja opazovanje lezenja, nekoliko specifična. Standard *SIA 267/1* sicer določa, da moramo pred vsakim odčitkom izvlečkov pramen popraviti raven upadle sile na začetno raven te stopnje sile, vendar pa na drugi strani evropski predpisi (*EN 1537* in *prEN ISO 22477-5*) popravljanja sile pred izvedbo odčitkov ne zahtevajo. V kolikor se preskusna sila P_i med opazovanjem ne popravlja, je predvsem v drugi polovici PS (pri dolgih opazovalnih časih) pričakovati, da upad sile ne bo več zanemarljiv, posledično pa to pomeni, da mere lezenja sidra k ne bodo iz vrednotene na identični ravni sile P_i , pač pa bo vsaka naslednja vrednost iz vrednotena pri nižji sili v pramenu, zaradi česar bo sidro zaradi

padanja sile izkazovalo boljšo odpornost (mere lezenja sidra k bodo nižje) kot bi dejansko sicer bila, če bi silo ohranjali na konstantni ravni.

Namen preskušanj opisanih v tem poglavju ni ugotoviti končne izgube sidrskih sil zaklinjenega sidra zaradi relaksacije, pač pa ugotoviti vpliv padca sil, do katerega pride med izvedbo PS in ostalih preskusov nosilnosti sider, kot tudi oceniti, ali je popravljanje sil v sidrih pred izvedbo posameznih odčitkov izvlečkov pramen kabla sidra res potrebno ali ne. V ta namen smo v jeklenem preskusnem okviru preskušali relaksacijo vzorcev pramen, ki pa jih nismo opazovali na konstantni ravni sile 70 % $F_{m,m}$, kot to zahteva *SIST EN ISO 15630-3*, pač pa smo vzorce pramen obremenjavali po postopku za izvedbo PS. V tem primeru je konstantna dolžina vzorca pramena zagotovljena le na ravni posamezne stopnje sile P_i , saj se vzorec med posameznimi stopnjami sile zaradi cikličnega spreminjanja sile razteguje oz. krči. Dodatni spremembi glede na standardizirani postopek sta bili tudi vsakokratno razbremenjevanje na raven začetne sile P_a , poleg tega pa vzorca nismo monotono obremenjevali le do 70 % nazivne natezne trdnosti jekla pramen R_m , pač pa s ciklično naraščajočimi stopnjami sil do 80 % R_m . Na vsaki posamezni stopnji sile P_i smo v istih časovnih intervalih, kot pri terenskih preskusih, odčitovali upadanje sile na ravni te stopnje sile, opazovanje pa smo zaključili po tolikšnem času, kot so znašali značilni časi terenskega opazovanja t_{dej} na tej ravni sile. Ravni obremenitve vzorcev pramen in opazovalni časi na posamezni stopnji sile med laboratorijskim preskušanjem izotermne relaksacije vzorcev pramen po postopku za PS so prikazani v **preglednici F.1**.

Preglednica F.1: Stopnje sile in opazovalni časi za preskušanje relaksacije vzorcev jeklenih pramen $\varnothing 15,2$ mm po postopku za izvedbo preiskav prednapetih geotehničnih sider.

Table F.1: Force levels and reading intervals for relaxation testing of steel strand samples $\varnothing 15,2$ mm according to the procedure used for investigation tests of prestressed ground anchors.

Stopnja sile	P_i [kN]	$\sigma_{t,dej}$ [MPa]	$\sigma_{t,dej}$ [% R_m]	t_{dej} [min]	Opazovalni časi t_i [min]
P_a	25	179	10	–	–
P_1	48	343	18	35	0, 1, 2, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35
P_2	71	507	27	30	
P_3	94	671	36	35	
P_4	117	836	45	60	isti časi kot pri P_7 in P_{pv}
P_5	140	1000	54	35	0, 1, 2, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40
P_6	163	1164	63	40	
P_7	186	1329	71	60	0, 1, 2, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60*
P_{pv}	209	1486	80	60	

Opombe: R_m nazivna natezna trdnost jekla pramen 1860 MPa,
 $\sigma_{t,dej}$ raven dejanskih natezних napetosti v vzorcu pramena površine prečnega prereza 140 mm^2 ,
 * nadaljnji odčitki najprej na 30', nato pa na 120'.

Stopnje sile, na katere smo pri laboratorijskih preskusih obremenjevali vsak vzorec pramena, so podane v drugem stolpcu preglednice. V četrtem stolpcu so podane vrednosti, kolikšen delež so v posamezni fazi preskusa dejanske natezne napetosti v pramenu $\sigma_{t,dej}$ dosegle v primerjavi z nazivno natezno trdnostjo pramen R_m . Ugotovimo lahko, da je bila šele na stopnji P_5 presežena meja 50 % R_m , od katere

naprej naj bi bile v jeklenem pramenu prisotne izgube zaradi relaksacije. V naslednjem stolpcu smo podali značilne čase opazovanja pri terenskih preskusih (t_{dej}), ki smo jih izvedli v letih 2008 in 2009 in ki jih podrobneje obravnavamo v poglavjih 3.5 in 3.6 disertacije.

Na podlagi znanih stopenj sil pri laboratorijskih preskušanjih vzorcev pramena je bilo treba preveriti, ali je togost preskusnega okvira zadostna, torej ali raven osnih tlačnih napetosti v okviru dosega le nekaj odstotkov nateznih napetosti v vzorcu pramena. V kolikor bi napetosti v okviru dosegle 10 % napetosti v pramenu, bi se po Pritchard in sod. (2006) tak okvir štel kot delno tog in kot tak neprimeren za izvajanje preskušanj. Na ravni preskusne sile 209 kN so v vzorcu pramena prisotne natezne napetosti, ki dosegajo 1486 MPa (80 % R_m), medtem vsaka polna palica jeklenega okvira \varnothing 80 mm prevzema tlačno silo 104,5 kN, tako da so bile na ravni preskusne sile v vsaki od palic preskusnega okvira prisotne tlačne napetosti 20,8 MPa, torej dosegajo le 1,4 % nateznih napetosti v vzorcu pramena. Glede na kriterij iz literature (Pritchard in sod., 2006) lahko naš preskusni okvir smatramo kot dovolj tog.

F.3.1 Merilna oprema za izvedbo laboratorijskih preskusov

Izvedbo preskušanj izotermne relaksacije na vzorcih jeklenih pramen \varnothing 15,2 mm iz sedmih žic z nizko relaksacijo trdnostnega razreda 1860 MPa smo izvajali z merilno opremo, s katero smo v vnaprej določenih časovnih intervalih avtomatsko odčitavali izmerjene vrednosti sile kot tudi osne deformacije vzorca pramena. Preskuse smo opravljali na togem jeklenem okviru, na katerem se tudi sicer izvajajo standardizirana preskušanja relaksacije, pri čemer smo priredili sistem zajemanja podatkov: z univerzalnim večkanalnim ojačevalnikom UPM 60 smo v predpisanih časovnih intervalih avtomatsko odčitavali vrednosti iz elektronskega pretvornika sile KAF 200 kN (dinamometra) kot tudi induktivnega pretvornika pomikov IW12/50 (slika F.7). Podrobnejši opis merilne opreme, uporabljene pri našem laboratorijskem preskušanju izotermne relaksacije vzorcev pramen, podajamo v naslednjih podpoglavjih.



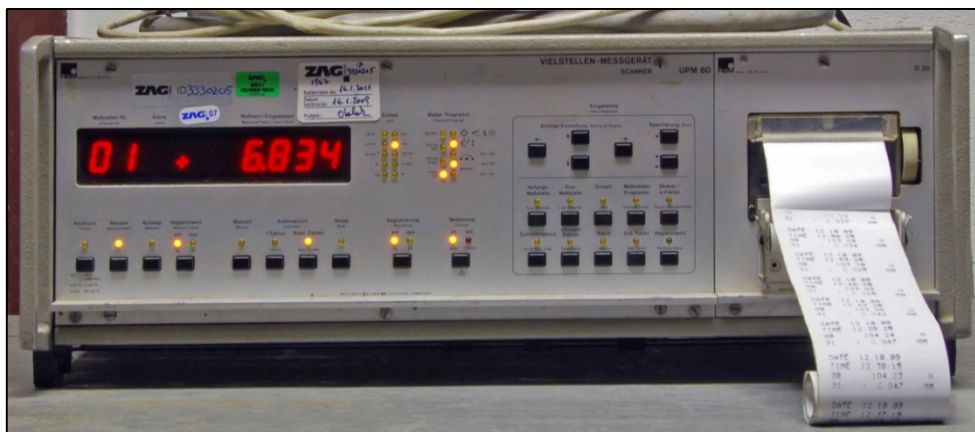
Slika F.7: Elementi merilnega sistema za izvedbo preskušanj izotermne relaksacije po postopku izvedbe preiskav prednapetih geotehničnih sider.

Figure F.7: Elements of an instrumentation system used for isothermal relaxation tests according to the procedure of an investigation test of prestressed ground anchors.

F.3.1.1 Univerzalni večkanalni ojačevalnik UPM 60

Pri izvedbi laboratorijskih in terenskih preskušanj, pri katerih se meritve različnih fizikalnih veličin (npr. sil, pomikov, deformacij, naklonov, tlakov, temperatur) izvajajo z različnimi elektronskimi pretvorniki in senzorji, se zajemanje podatkov lahko izvaja z univerzalnim večkanalnim ojačevalnikom UPM 60 proizvajalca HBM iz Nemčije (slika F.8), ki omogoča priklop največ 60 merskih mest. Naprava omogoča tako ročni kot tudi avtomatski zajem podatkov v vnaprej sprogramiranih časovnih intervalih, pri čemer se v trenutku odčitka zaporedoma odčitajo signali na vseh merskih mestih. V trenutku odčitka se v

ojačevalniku izvede pretvorba analognih signalov elektronskih pretvornikov in senzorjev v digitalno obliko, pretvorjene vrednosti pa se lahko zapisujejo na prenosni računalnik ali pa se vrednosti preko tiskalnika, ki je tudi vgrajen v UPM 60, beležijo na papirnati trak.



Slika F.8: Zajemanje podatkov z univerzalnim večkanalnim ojačevalnik UPM 60 med preskusom izotermne relaksacije na vzorcu jeklenega pramena.

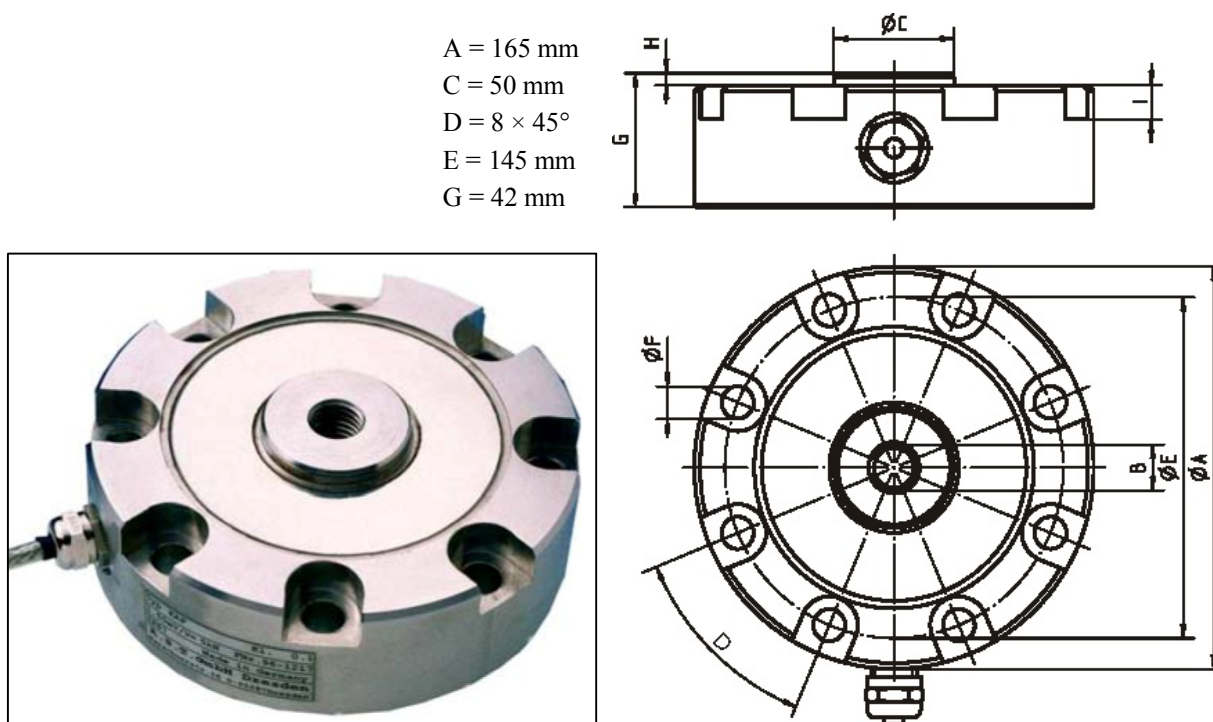
Figure F.8: Data recording on the universal data acquisition system UPM 60 during isothermal stress relaxation test on a sample of steel strand.

Pri laboratorijskih preskušanjih izotermne relaksacije na vzorcih pramen smo na ojačevalnik UPM 60 priklopili elektronski pretvornik sile (dinamometer) KAF 200 kN za odčitavanje sil v pramenu in induktivni pretvornik pomikov IW12/50, s katerim smo spremljali raztezke vzorca pramena. Zaradi večje točnosti zajemanja odčitkov smo opazovanja do 5' avtomatično odčitavali na 1', v intervalu od 5' do 60' pa smo odčitke avtomatično izvajali na 5'. Odčitki po 60' na zadnji stopnji sile P_{pv} niso več pomembni za oceno vpliva sprememb stopnje sil pri PS na samo relaksacijo pramen, vendar smo jih zaradi primerjave z rezultati standardnih preskušanj relaksacije podaljšali vsaj preko noči, čeprav zaradi vseh prej naštetih različnosti postopkov preskušanja niso neposredno primerljivi. V odvisnosti od dolžine trajanja opazovanja smo te podaljšane odčitke izvajali na 30', 60' ali 120'. V primerih laboratorijskih preskušanj izotermne relaksacije, kjer smo pred izvedbo odčitkov popravljali upadle vrednosti sil na začetno stopnjo sile P_i , smo bili prisiljeni odčitke izvajati ročno, saj smo v tem primeru odčitavanje sprožili šele po tem, ko smo ročno nadomestili padli delež sile in tako v vzorcu pramena v vsaki fazi opazovanja vzpostavili predpisano raven sile P_i . V teh primerih smo odčitke izvedli šele, ko so bili končani popravki sile na predpisano vrednost, zato odčitki v teh primerih niso bilo opravljeni točno po preteku časovnega intervala (običajno je bil odklon velikostnega reda nekaj sekund), kar je v skladu s postopkom, kot se uporablja tudi pri izvedbi PS v praksi.

F.3.1.2 Elektronski pretvornik sile KAF 200 kN

Dinamometre po natančnosti razvrščamo v različne razrede, pri čemer posamezni razred natančnosti določa ovojnico napak za posamezni parameter, kot so npr. linearnost, histereza, vplivi temperature, lezenje ipd. V praksi so posamezni parametri močno odvisni od načine uporabe dinamometra, fizičnega vnosa sile v pretvornik in ostalih motečih faktorjev, pri čemer na točnost delovanja dinamometra lahko učinkujejo različni škodljivi vplivi v obliki horizontalnih sil, upogibnih momentov, torzijskih momentov ali ekscentričnega vnosa sile. Z namenom doseganja čim večje ločljivosti spremljanja sil med izvedbo preskušanj, smo izbrali elektronski pretvornik sile (dinamometer) KAF 200 kN proizvajalca A.S.T.

iz Nemčije, ki je namenjen za merjenje sil v območju do nominalne sile 200 kN. Kot je razvidno iz [slike F.9](#) izbrani tip dinamometra po geometrijskih karakteristikah ustreza pogojem in namenu preskušanja, glede na relativno majhno maso 4,9 kg pa smo ga na jekleni preskuševalni okvir lahko enostavno namestili z ročno spono ([slika F.7](#)).



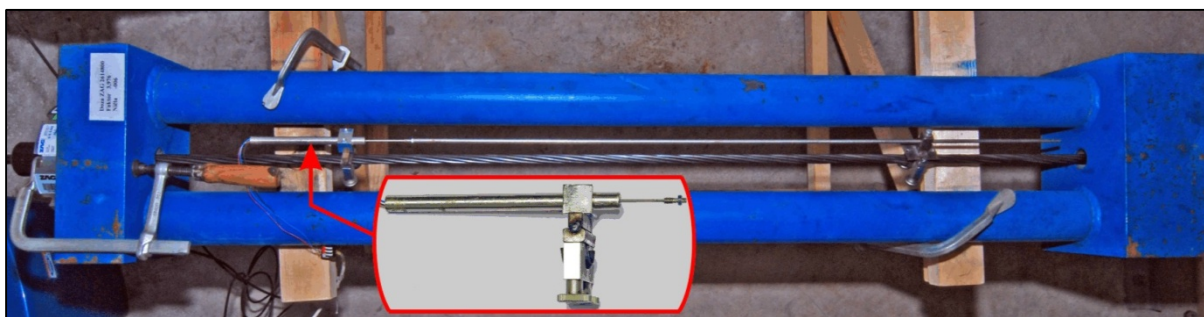
Slika F.9: Fotografija in shema s pomembnejšimi dimenzijami pretvornika sile KAF 200 kN.
Figure F.9: A photo and scheme with significant dimensions of a force transducer KAF 200 kN.

Izbrani dinamometer spada v razred točnosti 0,2 %, torej kombinirana napaka, ki je ovojnica napak prej naštetih parametrov, lahko znaša največ 0,2 % izmerjene sile. Uporabljeni dinamometer je periodično kalibriran v Laboratoriju za metrologijo ZAG Ljubljana; zadnja kalibracija po standardu *EN ISO 376* v območju med nič in 200 kN z dne 14.09.2009 je potrdila zadostno točnost dinamometra. Med našim preskušanjem smo dinamometer za 9 kN (4,5 % merilnega območja) preobremenili, vendar pa smo s tem še vedno ostali globoko v območju zgornje meje varne preobremenitve, ki pri tem dinamometru znaša 150 % nominalne sile. Po diskusiji z vodjem Laboratorija za metrologijo Zavoda za gradbeništvo Slovenije je takšna preobremenitev majhna in ne bi smela vplivati na točnost dinamometra na ravni preskusne sile P_{pv} , zato smo ocenili, da je takšna preobremenitev vseeno manj slaba možnost, kot če bi izbrali dinamometer z višjim območjem. Pri izbiri tipa, s tem pa tudi razreda natančnosti in velikosti dinamometra, smo se morali prilagoditi razpoložljivemu prostoru in dimenzijam tako kotve kot tudi naležne ploskve togega jeklenega okvira. V splošnem namreč velja, da se s povečanjem nominalne sile, ki jo lahko z izbranim dinamometrom še merimo, povečujejo njegove dimenzije, teža, kot tudi razred natančnosti (s tem pa seveda tudi velikost napak), na drugi strani pa se zmanjšuje ločljivost, zaradi česar bi bila točnost meritev izgub sile zaradi relaksacije s takim dinamometrom slabša. Na tržišču seveda so na voljo tudi manjši dinamometri najvišjega razreda natančnosti vendar pa je njihova cena enormno višja.

Z dinamometrom KAF 200 kN je bilo treba glede na zahteve *SIST EN ISO 15630-3* na vseh ravneh sile (v našem primeru med $P_1 = 48$ kN do $P_{pv} = 209$ kN) zagotoviti ločljivost odčitavanja sile $5 \cdot 10^{-4} \cdot F_0$. Če omenjenemu kriteriju zadostimo na prvi stopnji sile P_1 , bo ta kriterij s tem avtomatično izpolnjen tudi na višjih stopnjah sile. Potrebna ločljivost na prvi stopnji sile P_1 znaša $48 \cdot 5 \cdot 10^{-4} = 0,024$ kN, dejansko pa je ločljivost odčitavanja sil znašala 0,020 kN, s čimer je kriterij izpolnjen. Za primerjavo: na ravni preskusne sile P_{pv} bi zadostovala že ločljivost 0,105 kN.

F.3.1.3 Induktivni pretvornik pomikov IW12/50

Za spremljanje raztezkov vzorcev pramena med preskusom izotermne relaksacije smo uporabili induktivni pretvornik pomikov IW12/50 proizvajalca TWK Elektronik iz Nemčije, z linearnim območjem pomikov ± 25 mm in ločljivostjo 1 μ m. Glavni del pretvornika (ohišje) smo na pramen pritrdili na enem koncu merilne baze, medtem ko smo na drugi konec pritrdili podaljševalno tipalo jedra pretvornika tako, da smo dobili dovolj dolgo bazo, na kateri smo beležili raztezke vzorca (slika F.10).



Slika F.10: Vzorec pramena opremljen z induktivnim merilnikom pomikov IW 12/50 med preskusom izotermne relaksacije.

Figure F.10: Sample of strand during the isothermal stress relaxation test instrumented with the inductive displacement transducer IW 12/50.

Pretvornik IW12/50 je oblikovan kot kovinski cilindar premera 12 mm dolžine 170 mm, v katerega sta zaporedno, v obliki delne prevezave, vgrajeni dve simetrični navitji. Pretvornik deluje tako, da pri pomiku preko podaljševalnega tipala jedro znotraj ohišja pretvornika povzroča spremembo magnetnega polja obeh navitij, ki sta priključeni na zunanji oscilator in zagotavljata enosmerni izhodni signal, ki je sorazmeren merjenemu pomiku. Posebno pozornost je zahtevala pritrditev obeh točk pretvornika na vzorec pramena, saj je bilo treba na eni strani zagotoviti dober oprijem na površino žic pramena, na drugi strani pa pri pritrditvi nismo smeli poškodovati površine žic. Na obeh mestih pritrditve pretvornika IW12/50 na vzorec pramena smo za pritrdišča podložili s posebnimi vmesnimi gumijastimi podložkami.

Skladno z zahtevami *SIST EN ISO 15630-3* moramo merjenje sprememb dolžine vzorca pramena izvajati na dolžini vsaj 200 mm, pri čemer je za pramena priporočljiva dolžina merilne baze $L_0 \cong 1000$ mm, pri čemer smo pri naših preskušanjih uporabljali dolžine baze 900 oz. 1000 mm. Po standardu mora točnost merilnika pomikov znašati ± 1 %, medtem ko mora biti njegova ločljivost vsaj $5 \cdot 10^{-6} \cdot L_0$. Če pogoju za potrebno ločljivost zadostimo pri krajši dolžini baze, bo avtomatsko zagotovljena ločljivost tudi v primeru daljše baze: za primer baze 900 mm mora znašati ločljivost sistema odčitavanja pomikov $900 \cdot 5 \cdot 10^{-6} = 0,0045$ mm = 4,5 μ m, pri čemer pretvornik IW12/50 v območju pomikov ± 25 mm zagotavlja ločljivostjo 1 μ m, s čimer smo v celoti zadostili pogoju potrebne ločljivosti.

Med preskusom relaksacije vzorca pramena moramo ohranjati tudi konstantno dolžino vzorca, pri čemer spremembe raztezka vzorca $\Delta L_0/L_0$ tekom celotne meritve ne smejo presegati $5 \cdot 10^{-6}$, med dvema zaporednima odčitkoma pa ne smejo presegati $5 \cdot 10^{-5}$. Glede na to, da pri naših meritvah obremenjevanje vzorca nismo izvedli po standardu *SIST EN ISO 15630-3* pač pa smo stopnje sile spreminjali ciklično naraščujoče z vmesnimi razbremenitvami na silo P_a (glej uvodni del [poglavja F.3](#)), prvem pogoju ni možno zadostiti. Med dvema zaporednima odčitkoma pa se dolžina vzorca ne sme spremeniti za več kot $900 \cdot 5 \cdot 10^{-5} = 0,045 \text{ mm} = 45 \text{ }\mu\text{m}$. Pogoj je bil med našimi meritvami izpolnjen, zato dodatna korekcija sile za ohranjanje dolžine vzorca ni bila potrebna.

F.3.2 Predhodna preskušanja izotermne relaksacije po stopnjah sil faz preiskav sider brez spremljanja časa vnosa sile

Glede na dostopne rezultate in izkušnje dosedanjih standardiziranih preskušanj izotermne relaksacije, v literaturi objavljene raziskave relaksacije jeklenih pramen ter zahteve veljavnih predpisov je bilo očitno, da bo izvedba preskušanj izotermne relaksacije po postopku za izvedbo terenskih PS zahtevna. Logična posledica je bila, da je bilo treba pred začetkom sistematičnega preskušanja vzorcev pramen izvesti določena predhodna preskušanja, v sklopu katerih smo poskušali ugotoviti morebitne težave in specifičnosti same izvedbe ter instrumentiranja vzorcev, ki bi lahko vplivale na končni rezultat – stopnje upada sile ρ_i na ravni posamezne stopnje sile P_i preiskave sidra. Pojavljalo se je vprašanje, ali bomo uspeli izmeriti padce sil oz. relaksacijo pramena tudi na nižjih stopnjah sile PS (P_1 do P_4), pri katerih so natezne napetosti nižje od 50 % natezne trdnosti jekla pramen, saj naj bi bila po literaturnih virih (Podolny, 1967, Ghali in sod., 2002) relaksacija pod to ravni napetosti zanemarljiva. Po drugi strani smo želeli tudi preveriti, kolikšen bo raztros izmerjenih vrednosti pri prekušanjih relaksacije po postopku za izvedbo terenskih PS, ki je bistveno krajši od opazovanja izgub sile zaradi relaksacije po standardiziranem postopku (1000 ur). Preston (1985) sicer navaja, da se kratkotrajni preskusi relaksacije v trajanju 30' uporabljajo za identifikacijsko ugotavljanje tipa pramena, torej ali gre za pramen iz pomirjenega jekla ali pa za pramen z nizko relaksacijo, pri čemer pa je bil raztros vrednosti pri kratkotrajnih preskusih večji kot pri 1000 urnih preskusih, ki že tako ali tako ni majhen (glej diagram na [sliki F.6](#)).

Določene težave smo pričakovali z vnašanjem in spuščanjem sile po postopku za PS, saj se pri uporabljenem mehanskem tipu napenjalne glave raven sile v vzorcu pramena spreminja z izmeničnim ročnim zategovanjem vijakov, s katerimi se napenjalna glava odmika od bloka togega okvira (povečevanje natezne sile v vzorcu) oz. primika k bloku togega okvira (zmanjševanje natezne sile v vzorcu). Pri tem možnost natančne izvedbe prilagajanja sile ni bila vprašljiva, pojavljal pa se je dvom, ali bomo sile lahko vnašali dovolj hitro, hkrati pa pozorno spremljali silo v dinamometru (intenzivnost procesa relaksacije je namreč najbolj burna prav v začetnem obdobju po vnosu sile).

Če sledimo definiciji relaksacije (izguba napetosti oz. padec sile pri ohranjanju konstantne deformacije pramena), do takega pojava pri izvajanju PS v praksi nedvomno prihaja, saj je minimalno popravljanje sile potrebno že od prve stopnje sile PS naprej, obenem pa ni pričakovati, da bi bil padec sile posledica popuščanja veznega dela že pri tako nizkih silah. Po Koretsky in Pritchard (1982) na taki ravni sile tudi ni pričakovati, da bi bila relaksacija posledica lokalnih zdrsov in procesa difuzijskih dislokacij med sosednjimi kristali. Očitno so torej v praksi prisotni še ostali faktorji, ki prispevajo k padcem sile v napetem pramenu konstantne dolžine, torej v primeru terenskih preskušanj sider prispevajo k padcu sile v sidru. Predvidevamo, da mednje sodijo:

- slabši oprijem čeljusti na zunanje žice pramena zaradi nizkih nateznih napetosti v pramenu (pri naših preskušanjih dosegajo pri sili $P_1 = 48 \text{ kN}$ le $18 \% R_m$), medtem ko je po *SIA 267* za učinkovit oprijem zagozd potrebna raven napetosti vsaj $30 \% R_m$,
- medsebojno usedanje komponent preskusne naprave (zagozde v kotvah, stik kotev-dinamometer-jekleni okvir, stik kotev-napenjalna glava-jekleni okvir),
- pri nizkih nateznih silah so napetosti v radialni smeri, ki se pojavijo zaradi konusne oblike kotev, še precej omejene, kar se odraža kot nizko razpoložljivo trenje, zato obstaja precejšnja verjetnost zdrsa osrednje žice, glede na zunanje spiralno oblikovane žice pramena.

Probleme s oprijemom čeljusti na žice pramena pri preskusih relaksacije so imeli raziskovalci Preston (1985), Hill (2006), Pritchard in sod. (2006) in Loflin (2008) že na običajni (standardizirani) ravni preskusne sile, zato smo predvidevali, da bo za uspešnost in čim manjši raztros rezultatov naših laboratorijskih preskušanj ključnega pomena uporabiti takšno namestitvev zagozd v kotve, da bo zdrs pramena v teh območjih čim manjši, po drugi strani pa smo poskušali čimbolj natančno posnemati delovanje čeljusti, kot se v naši praksi uporabljajo v napenjalkah (slika F.11).

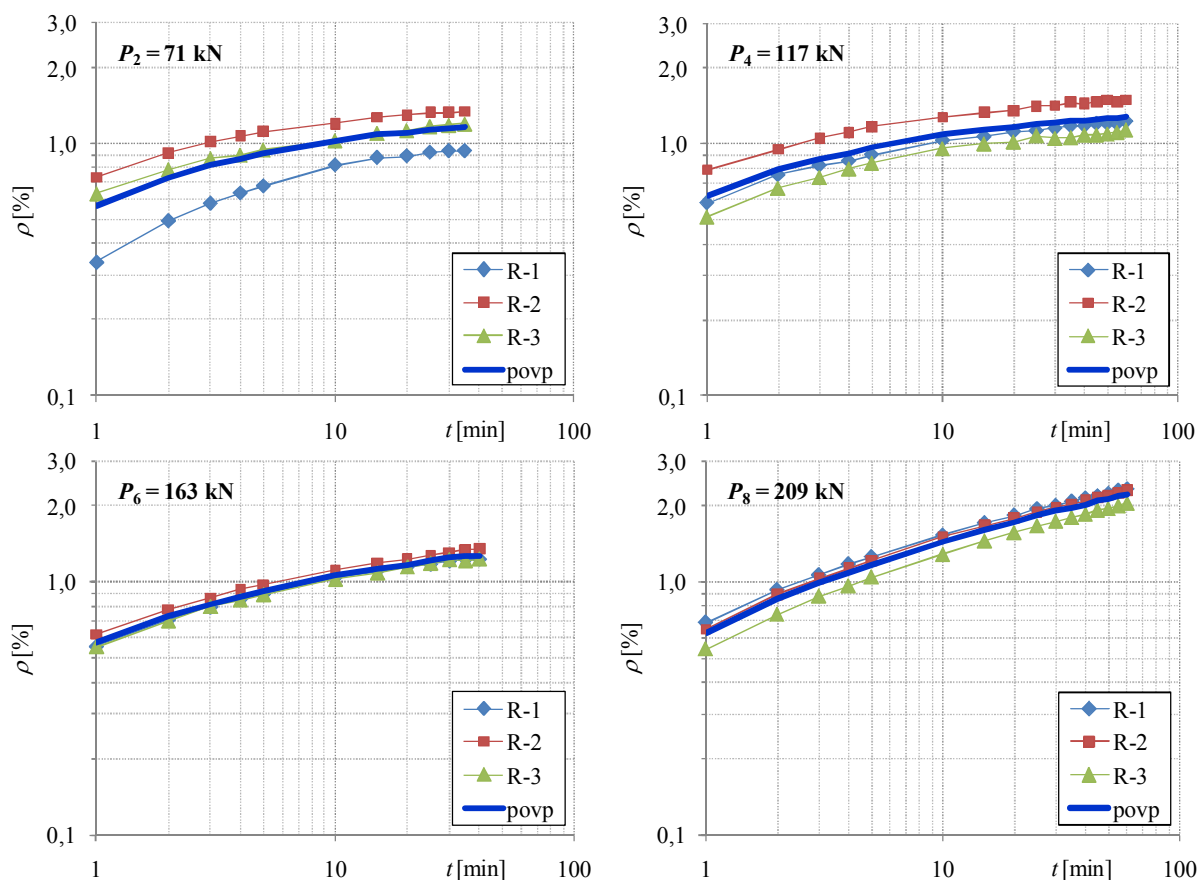


Slika F.11: Kotev in sestavljena trikraka zagozda pred preskusom (levo), detajl poškodb žic pramena (zarezni učinek) na mestih prijema zagozd (desno).

Figure F.11: A bush and a combined three part wedge before the test (left), a detail view of bite marks due to strand notching on the wires of a strand on the wedge grip spots (right).

Tako pri skupnih napenjalkah kot tudi pri mononapenjalkah se po razpoložljivih podatkih uporabljajo čeljusti s klinasto oblikovanimi zagozdami, ki se žic pramena oprijemajo le preko mehanizma trenja, zato smo se odločili, da bomo tudi naša preskušanja izvedli na ekvivalentni način – torej smo oprijem kotev na obeh straneh vzorca pramena zagotavljali preko trikrakih zagozd (slika F.11 levo), ki smo jih na obeh straneh pramena skrbno namestili v odprtine kotev. Glede na to, da so rezultati prvih opravljenih preskušanj pokazali, da je raztros vrednosti upadle sile v začetnih fazah preskušanja relaksacije velik, smo v nadaljevanju preskušanj pri namestitvi vzorcev v preskuševalno napravo trikrake zagozde ne samo vstavili v odprtini kotev, pač pa smo jih pred vnosom sile v odprtini rahlo ročno vtisnili. Na ta način se je raztros rezultatov bistveno zmanjšal, po drugi strani pa s tem nismo bistveno vplivali na mehanizem oprijema zagozd. Po končanem preskušanju relaksacije na vzorcih pramen smo po odstranitvi vzorcev pregledali tudi naležna mesta zagozd na žice pramen, iz katerih je bilo razvidno, da na žicah pramen sledov zdrsovanja krakov zagozd ni bilo opaziti oz. je bil oprijem zagozd dober (slika F.11 desno).

Rezultati predhodnih preskušanj treh vzorcev pramen (R-1 do R-3), pri katerih smo spremljali vrednosti padcev sile po posameznih stopnjah sile PS, so prikazani na **sliki F.12**. Vzorci so bili preskušeni po stopnjah sile in opazovalnih časih navedenih v **preglednici F.1**, vendar pri njih še nismo posebej pazili na hitrost vnašanja sile na posamezni stopnji. Da bi zagotovili neposredno medsebojno primerljivost rezultatov relaksacije oz. izmerjenih vrednosti upadlih sil so bili vsi trije vzorci pramen odvzeti iz istega koluta. Uporabili smo vzorce pramen, ki smo jih najhitreje lahko dobili, vendar pa kolut tega pramena ni bil proizveden pri istem proizvajalcu, od katerega so bila dobavljena pramena za izvedbo PS v sklopu preskušanja na testnem polju opornega zidu OZ-05, kot tudi vzorci pramen za laboratorijska preskušanja relaksacije, opisana v nadaljevanju.



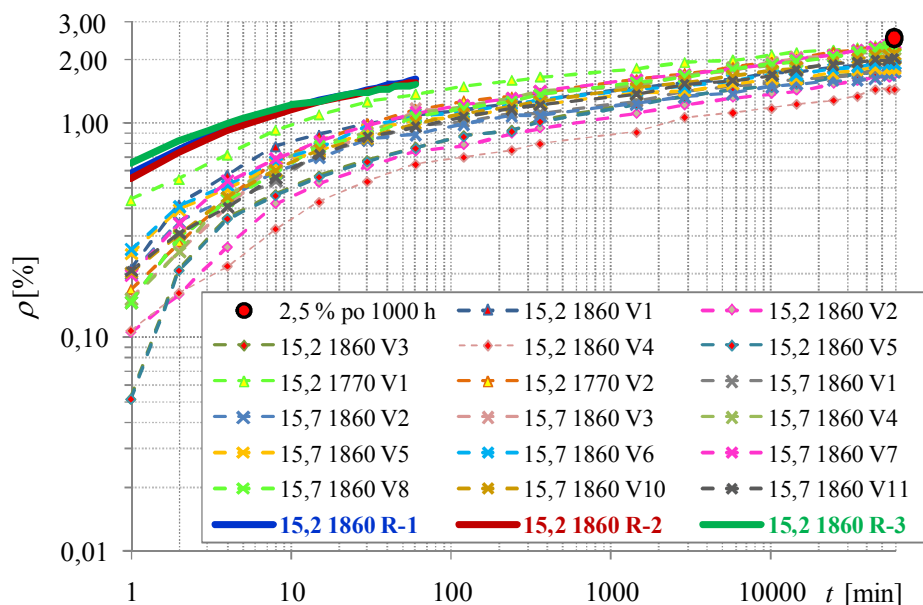
Slika F.12: Rezultati predhodnih preskusov relaksacije vzorcev pramen R-1 do R-3 iste šarže po postopku za preiskavo sidra.

Figure F.12: Preliminary results of relaxation tests for strand samples R-1 to R-3 of the same lot according to the ground anchors' investigation test procedure.

Glede na to, da so bili vsi vzorci odvzeti iz istega koluta, je raztros vrednosti rezultatov preskušanj na **sliki F.12** precejšen, kar še posebej velja za ravni nižjih preskusnih sil, medtem ko so vrednosti od vključno šeste stopnje naprej (torej od $P_6 = 163$ kN do $P_8 = 209$ kN) precej podobne. Razlike na nižjih ravneh sil lahko pripišemo tako odstopanjem pri namestitvi zagozd v kotve kot tudi hitrosti vnosa sile posamezne stopnje sile P_i v preskušanece. Izmerjene vrednosti padcev sil in izvednotene vrednosti relaksacije v odstotku padca natezne sile glede na začetno vrednost sile pri izotermnih pogojih (ρ) kažejo, da je s takim pristopom možno izvajati preskuse relaksacije po postopku za PS, pri čemer pa smo morali v nadaljevanju izvesti še določene dopolnitve operativne izvedbe postopka preskušanja v

smislu kontroliranja hitrosti vnašanja sil, kot tudi poskušati zagotoviti čimbolj podobne pogoje oprijema zagozd v obeh kotvah preskušancev, da bodo odstopanja med rezultati meritev čim manjša.

Rezultate predhodnih preskušanj relaksacije za vzorce R-1 do R-3 dobljene po metodi za izvedbo PS je zanimivo primerjati z rezultati standardiziranih preskušanj relaksacije pramen. Pri primerjavi izvedenih vrednosti relaksacije sicer je nujno treba upoštevati, da sta postopka izvedbe obeh tipov preskušanj precej različna tako v smislu same izvedbe obremenjevanja kot tudi različnih ravni sile, s tem, da se pri preskušanju relaksacije po postopku za PS sile posameznih stopenj sile vnašajo v ciklih z vmesnim razbremenjevanjem na raven začetne sile. Zaradi tega smo na [sliki F.13](#) vrisali rezultate standardiziranih preskušanj po *SIST EN ISO 15630-3*, ki so se izvajali pri 70 % povprečja maksimalne sile $F_{m,m}$, izmerjene na dveh vzorcih, za primerjavo pa smo dodali še predhodna preskušanja vzorcev R-1 do R-3 preskušena po metodi preskušanja za izvedbo PS in sicer le za 7. stopnjo sile, kjer je raven sile (71 % R_m) primerljiva z ravnijo sile standardiziranih preskušanj (70 % $F_{m,m}$).



Slika F.13: Primerjava rezultatov predhodnih preskusov relaksacije vzorcev pramen R-1 do R-3 na ravni sile $P_7 = 186$ kN postopka za preiskavo sidra in rezultatov vzorcev pramen preskušanih po *SIST EN ISO 15630-3*.

Figure F.13: Relaxation tests results for strand samples R-1 to R-3 tested according to the ground anchors' investigation test procedure at force level $P_7 = 186$ kN in comparison to the strand samples tested according to *SIST EN ISO 15630-3*.

Ujemanje diagramov na [sliki F.13](#) je navkljub različnim metodam preskušanja izredno dobro, še posebej če upoštevamo, da hitrosti vnosa sile nismo posvečali posebne pozornosti. Začetna vrednost relaksacije vzorcev R-1 do R-3 v 1' je seveda precej višja kot pri preskušanju po *SIST EN ISO 15630-3*, kar pa je posledica zahteve standarda, da je po vnosu sile v vzorec pramena raven sile treba 2' ohranjati na konstantni ravni preden se začne z meritvami padca sile. Razlog za takšno zahtevo navaja Preston (1985) – pri preskušanjih relaksacije naj bi se čeljusti prilagodile oz. vsedle na vzorec pramena v roku 1' po vnosu preskusne sile (70 % R_m). Pri naši primerjavi to pravzaprav pomeni, da bi za korektno primerjavo diagrame vzorcev R-1 do R-3 morali za to časovno razliko zamakniti v desno navzdol, s čimer pa bi rezultati v celoti padli v območje rezultatov dobljenih po standardizirani metodi.

Način obremenjevanja in preskušanja pri naših laboratorijskih preskušanjih simulacije obnašanja pramen pri PS je precej drugačen od standardiziranega preskušanja izotermne relaksacije pramen, zato je realno pričakovati, da se bodo z naraščanjem stopnje sile usedali in medsebojno prilagajali tudi elementi našega preskusnega sistema, kar se odraža tudi v obliki raztrosa poteka krivulj pri začetnih opazovalnih časih.

F.3.3 Postopek preskušanja izotermne relaksacije po stopnjah sil faz preiskav sider s spremljanjem časa vnosa sile

Rezultati predhodnih preskušanj relaksacije na vzorcih R-1 do R3 so pokazali, da je na obstoječi opremi možno izvesti preskušanja izotermne relaksacije po stopnjah sil faz preiskav sider, ter da je delovanje sistem vnosa sile v vzorce pramena z izmeničnim ročnim zategovanjem vijakov zadovoljivo in omogoča še dovolj hitro in natančno vnašanje sil na posameznih stopnjah P_i . Za boljši pregled nad preskušanjem smo se odločili, da bomo izvajali meritve časov potrebnih za vnos sil P_i , obenem pa smo s tem želeli tudi preveriti, ali so pogoji obremenjevanja pri laboratorijskem preskušanju relaksacije na vzorcih pramen primerljivi s pogoji pri terenskem preskušanju nosilnosti sider, ki so bila že predhodno preskušena na testnem polju. Z namenom zagotoviti neposredno primerljivost z rezultati terenskih preskušanj smo tudi vsa nadaljnja preskušanja vzorcev pramen izvedli na pramenih $\varnothing 15,2$ mm trdnostnega razreda 1860 kN, odvzetih iz različnih kolutov in šarž istega tipa in proizvajalca pramen, kot so vgrajena v sidrih testnega polja, s čimer smo tudi v statističnem smislu (navkljub majhnemu številu vzorcev) poskušali zajeti čimbolj reprezentativen vzorec uporabljenih pramen, kot jih dobavlja predmetni proizvajalec.



Slika F.14: Vzorec pramena med preskušanjem po metodi s kontrolirano hitrostjo vnosa sile.
Figure F.14: A strand sample during the testing by the method with controlled speed of loading.

Postopek preskušanja izotermne relaksacije je ostal isti, kot smo ga opisali že v [poglavju F.3.2](#), namenjenem predhodnem preskušanju izotermne relaksacije vzorcev pramen R-1 do R-3 – izvedli smo ga tako, da smo vzorec pramena ciklično obremenjevali po stopnjah sile P_i , navedenih v [preglednici F.1](#), pri čemer smo na ravni vsake stopnje sile P_i opazovali upadanje sile v pramenu ΔP toliko časa, kot je to navedeno v prej navedeni preglednici, nato pa smo sidro razbremenili na začetno silo P_a , ter ga v nadaljevanju obremenili na raven naslednje stopnje sile P_{i+1} . Bistvena razlika od postopka predhodnih preskušanj vzorcev R-1 do R-3 je bila kontrolirana hitrost vnosa sile na posamezni stopnji sile P_i , kar smo zagotavljali z merjenjem časa vnosa sile. Vzorec pramena med preskušanjem po opisani metodi je prikazan na [sliki F.14](#).

Pri prvih treh predhodno izvedenih preskusih izotermne relaksacije na vzorcih R-1 do R-3 se je izkazalo, da je vnos sile z regulacijo šestih vijakov na napenjalni glavi relativno zamuden, zato je obstajala nevarnost, da bi bil raztros izmerjenih padcev sile velik, saj bi se zaradi intenzivnega odvijanja procesa relaksacije neposredno po vnosu sile v vzorec pri dalj časa trajajočem vnašanju sile del padcev sile lahko izvršil že med samim vnosom sile posamezne stopnje sile P_i PS. Na drugi strani pa smo se s kontroliranim vnosom sile v vzorec pramena želeli čimbolj približati realni situaciji pri terenskem preskušanju sider. Zaradi tega smo maja 2009 pri izvedbi drugega sklopa terenskih preskušanj sider, vgrajenih na testnem polju, merili čase, potrebne za vnos sile (povprečne vrednosti vseh izvedenih PS in VPN, pri katerih so bile obremenitve pramen enake obremenitvi vzorca pramena pri laboratorijskem preskusu relaksacije) so v **preglednici F.2** navedene v stolpcu $t_{\text{teren,povp}}$. Za primerjavo smo v preglednici v stolpcu $t_{\text{min},22477-5}$ podali najkrajši čas, izvrednoten na podlagi največje dopustne hitrosti vnosa sile po standardu *oSIST prEN ISO 22477-5:2005 – Geotehnično preiskovanje in preskušanje – Preskušanje geotehničnih konstrukcij – 5. del: Preskušanje sider*, ki je potreben za vnos sile od ravni začetne sile P_a na raven trenutne stopnje sile P_i , pri čemer smo upoštevali, da je v praksi sidrno silo prevzemalo šest pramen (omejitev hitrost vnosa se nanaša na celotno sidro in ne na posamezni pramen). V zadnjem stolpcu te preglednice so podane povprečne vrednosti časov vnosa sile pri laboratorijskih preskušanjih relaksacije $t_{\text{lab,povp}}$, ki smo jih izračunali na podlagi vseh izmerjenih vrednosti časov vnosa sile pri v nadaljevanju predstavljenih preskušanih vzorcih pramen R-4, R-5, R-6, R-7, R-8, R-9, R-9p1, R-9p2, RV-1388, RPR-1, RPR-2 in RPR-3.

Preglednica F.2: Čas potreben za vnos sile na posamezni stopnji sile P_i med terenskim preskušanjem sider maja 2009 in med laboratorijskim preskušanjem relaksacije na vzorcih pramen.

Table F.2: Time needed for loading with individual force P_i during field testing of anchors (May 2009) and during laboratory testing of relaxation properties of strand samples.

Stopnja sile	P_{pramena} [kN]	Raven napetosti [% R_m]	$t_{\text{min},22477-5}^{(1)}$ [s]	$t_{\text{teren,povp}}$ [s]	$t_{\text{lab,povp}}^{(2)}$ [s]
P_1	48	18	14	18	27
P_2	71	27	28	35	38
P_3	94	36	41	52	52
P_4	117	45	55	71	71
P_5	140	54	69	88	93
P_6	163	63	83	104	115
P_7	186	71	97	123	155
P_8	209	80	110	146	191

Opombe: ⁽¹⁾ *oSIST prEN ISO 22477-5* opredeljuje največjo primerno hitrost obremenjevanja oz. razbremenjevanja kabla sidra kot 10 kN/s, kar pri 6-pramenskem sidru pomeni 1,67 kN/s na pramen;

⁽²⁾ povprečen čas vnosa sile izmerjen na vzorcih R-4, R-5, R-6, R-7, R-8, R-9, R-9p1, R-9p2, RV-1388, RPR-1, RPR-2 in RPR-3.

Iz vrednosti podanih v **preglednici F.2** lahko razberemo, da so bili časi vnosa sile v sidra pri terenskih preskusih nosilnosti sider na vseh stopnjah sile P_i PS daljši od minimalno potrebnih, kot so opredeljeni z največjo dovoljeno hitrostjo vnosa sile v sidro po osnutku standarda *oSIST prEN ISO 22477-5*. Pri

izvedbi laboratorijskih preskusov smo želeli v čim večji možni meri slediti časom terenskih preskusov, tako da bi bili končni rezultati laboratorijskih preskušanj izgub zaradi relaksacije čimbolj neposredno prenosljivi na rezultate terenskih preskušanj. Na prvih dveh stopnjah P_1 in P_2 smo natezne sile v vzorce pramena vnesli počasneje tako od meje standarda *oSIST prEN ISO 22477-5* kot tudi od časov, ki smo jih izmerili pri terenskem preskušanju. V naslednjih nekaj obremenilnih fazah smo se pri laboratorijskih preskušanjih uspeli zelo dobro približati izmerjenim časom terenskih preskušanj (fazi P_3 in P_4), nato pa smo bili v nadaljevanju preskušanj vedno počasnejši od terenskih rezultatov, kar je predvsem posledica dejstva, da je bilo pri visokih natezних silah potrebno paziti, da se je plošča napenjalne glave vzporedno odmikala od bloka preskusnega okvira, s čimer smo preprečevali morebitne poškodbe in zarezne učinke na mestih oprijema zagozd na zunanjih žicah vzorcev pramen. Ne glede na to ocenjujemo, da so hitrosti vnosa sile zadovoljivo blizu hitrostim obremenjevanja pramen pri terenskih preskušanjih nosilnosti sider. Daljši časi vnosov sil pri laboratorijskih preskušanjih pravzaprav pomenijo, da se je v primerjavi s terenskimi preskusi nosilnosti sider del padca sile izvršil že med vnosom sile, kar posledično pomeni, da so laboratorijski rezultati (tako v smislu padca sile ΔP kot tudi relaksacije ρ) pravzaprav nekoliko podcenjeni.

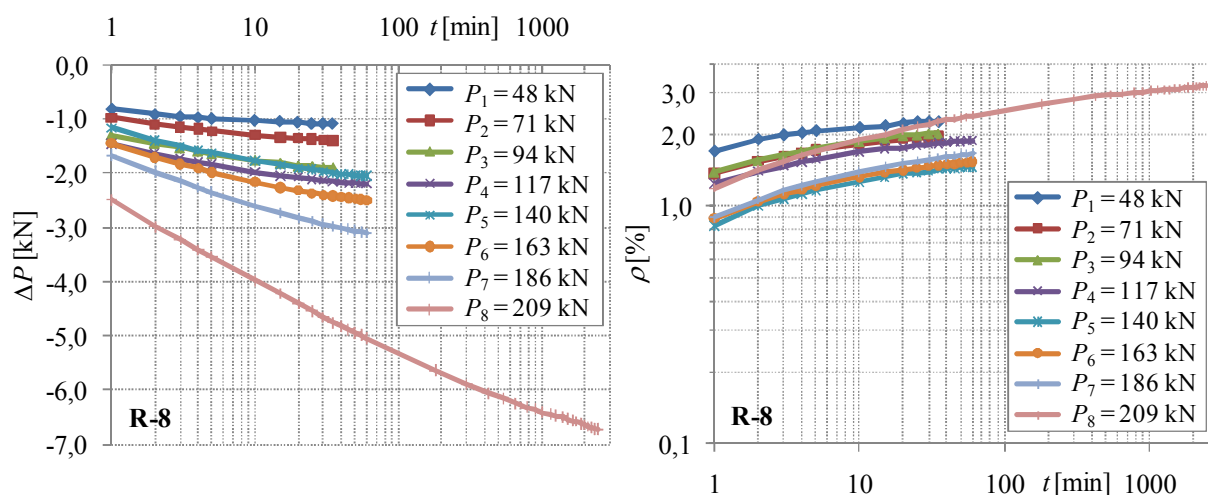
F.3.3.1 Postopek preskušanja izotermne relaksacije po fazah preiskav sider brez dodajanja upadlih sil

Kot prvo možnost postopka laboratorijskega preskušanja izotermne relaksacije vzorcev pramen po postopku za terensko izvedbo PS smo izvedli s spremljanjem časa vnosa sile na posameznih stopnjah sile, kot smo to opisali že v predhodnem poglavju. Edini odmik od dejanske izvedbe PS na terenu je bil v tem, da pred izvedbo odčitka upadlega deleža sile nismo popravili na začetno vrednost, saj smo v tej prvi fazi želeli ohraniti postopek podoben standardiziranemu. Laboratorijska preskušanja smo v tej fazi izvedli na šestih vzorcih R-4 do R-9. Na [sliki F.15](#) sta za vzorec pramena R-8, preskušen po postopku za PS s kontrolirano hitrostjo vnosa sil na vmesnih stopnjah P_i , podane izmerjene vrednosti upadlih sil ΔP in vrednosti relaksacije ρ .

Levi diagram na [sliki F.15](#), na katerem so prikazane vrednosti upadlih sil s časom na posameznih stopnjah sil P_i , daje v določenem območju na prvi pogled nepričakovane rezultate. Vidimo namreč lahko, da skladno s pričakovanji z naraščanjem stopnje sile naraščajo tudi padci sile ΔP , a le do stopnje $P_4 = 117$ kN (45 % nazivne natezne trdnosti jekla pramen R_m), nato pa padci sile ΔP nekoliko upadejo, v nadaljevanju pa se s povečevanjem sile ΔP spet pričakovano povečujejo. Podobno se je dogajalo tudi pri ostalih vzorcih, le da je do upada padcev sile ΔP v nekaterih primerih prišlo že $P_3 = 94$ kN (36 % R_m). Sklepali smo, da pri nizkih silah prihaja do slabšega oprijema zagozd na žice pramena oz. zaradi majhnih sil prihaja tudi do zdrsa osrednje žice pramena glede na zunanje spiralne žice v območju obeh kotev.

Enako obnašanje pramena je razvidno tudi iz desnega diagrama na [sliki F.15](#), v katerem so opazne visoke začetne vrednosti ρ , ki pa jih zaradi nizke vrednosti natezних napetosti ne moremo povezovati s tipično relaksacijo pramena in dosedanjimi objavljenimi izsledki raziskovalcev. Vidimo lahko tudi, da je vrednost ρ najvišja že v prvi fazi $P_1 = 48$ kN (20 % R_m), nato pa vrednosti upadajo do faze $P_5 = 140$ kN (54 % R_m), od tam naprej pa naraščajo – sprva zelo počasi, v fazi $P_7 = 186$ kN (71 % R_m) že izraziteje, najbolj pa v zadnji fazi $P_8 = 209$ kN (80 % R_m). To naraščanje vrednosti ρ pa že lahko pripišemo tipični relaksaciji pramena, s čimer ti rezultati potrjujejo podatke iz literature, da je stopnja tipične relaksacije opazna pri napetostih višjih od 50 % R_m , s povečevanjem napetosti v jeklu nad 70 % R_m pa se izgube zaradi relaksacije začnejo izraziteje povečevati (Podolny, 1967, Ghali in

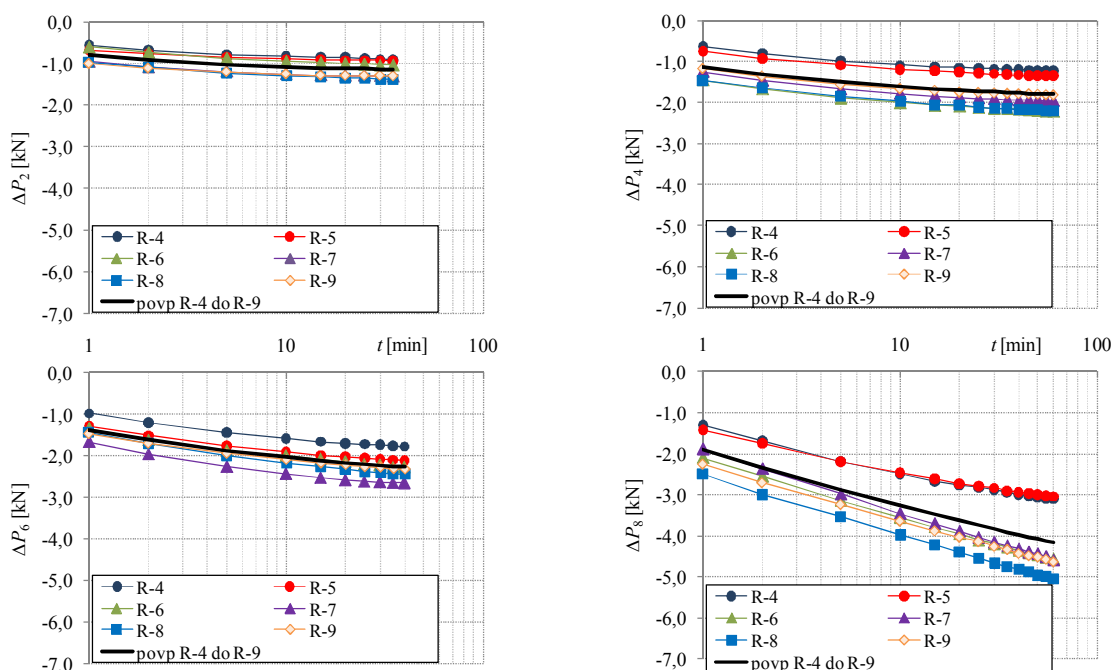
sod., 2002, Sengupta in sod., 2009). Glede na to, da je mehanizem oprijema pramena s čeljustmi napenjalke pri preskušanjih sider v praksi podoben, lahko že na nižjih stopnjah sil pričakujemo padce sil, ki pa jih v prvem delu preskušanj ne moremo povezovati s tipično relaksacijo, pač pa z mehanizmom oprijema čeljusti na zunanje žice pramen ter z raznosom sile z zunanjih spiralnih na notranjo ravno žico pramena, medtem ko so padci sile v zadnjih fazah preskušanj pri visokih natezih v pramenih povezani s tipično relaksacijo pramena.



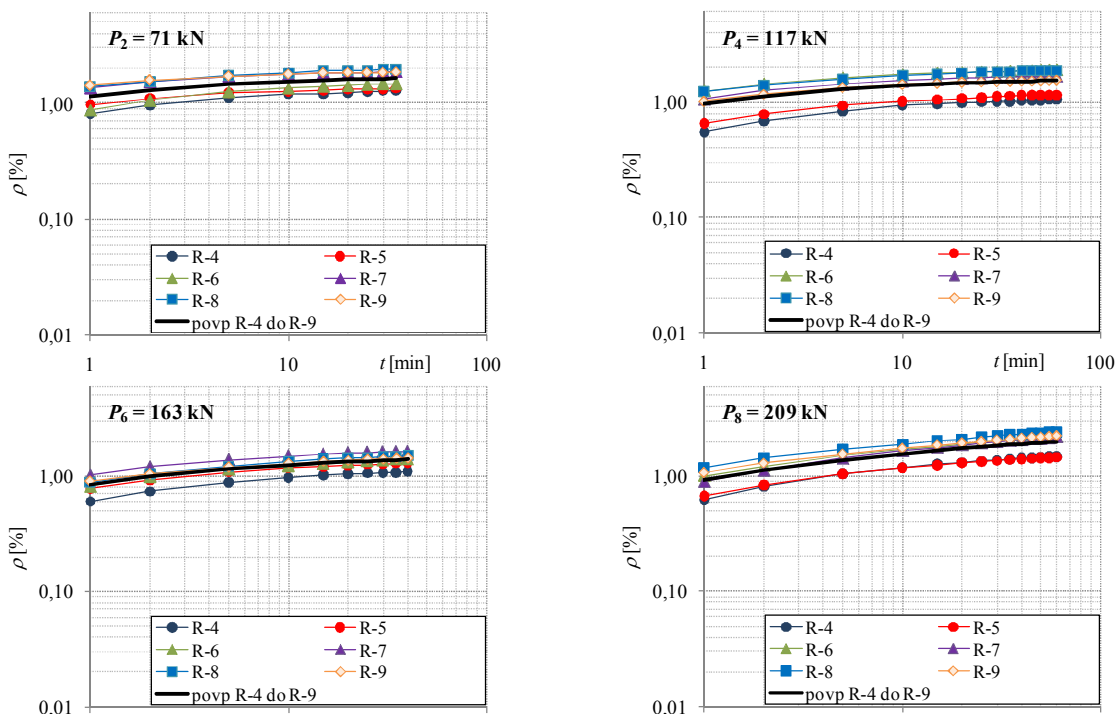
Slika F.15: Izmerjene vrednosti upadlih sil ΔP (levo) in iz vrednotene vrednosti ρ (desno) na vseh ravneh sil P_1 do P_8 preskusa relaksacije vzorca pramen R-8 po postopku za preiskavo sidra s kontrolirano hitrostjo vnosa sile na posameznih stopnjah sile P_i .

Figure F.15: Measured values of decreased forces ΔP (left) and calculated values ρ (right) at all force levels P_1 to P_8 of relaxation test for the sample R-8 performed after the anchors' investigation test procedure with controlled speed of the loading at individual force level P_i .

Na **sliki F.16** podajamo izmerjene vrednosti upadlih sil ΔP [kN] med preskusi relaksacije vzorcev pramen R-4 do R-9 po postopku za PS s kontrolirano hitrostjo vnosa sile na stopnjah sile P_2 , P_4 , P_6 in P_8 , medtem ko na **sliki F.17** za iste vzorce na istih stopnjah sile podajamo še iz vrednotene vrednosti relaksacije ρ [%]. V vseh primerih lahko ugotovimo dobro medsebojno ujemanje rezultatov (krivulje so približno vzporedne), pri čemer pa je raztros krivulj diagramov različnih vzorcev pri istih silah posledica začetne hitrosti vnosa sile: pri prvih vzorcih (predvsem vzorca R-4 in R-5) pri vnosu sile še nismo bili dovolj spretni in hitri, zato se je zaradi počasnejšega vnosa lahko izvršil določen upad sile še preden smo lahko izvedli odčitke. Prepočasen začetni vnos sile P_8 pri vzorcih R-4 in R-5 je bil prav tako razlog za nižje vrednosti tako upadlih sil ΔP , kot tudi vrednosti relaksacije ρ . Poleg tega smo morali pri vzorcu R-4 zaradi napake pri nastavitvi ojačevalnika UPM 60 že sestavljeni okvir z vzorcem in nameščenima kotvama z zagozdama razdreti in ponovno namestiti, pri tem vzorcu smo prvič, le z delnim uspehom, poskušali silo vnašati v predpisanem času, pri obeh vzorcih R-4 in R-5 smo zagozde v kotvi le namestili (ne pa tudi ročno vtisnili), prav tako pa je v prizadevanjih, da bi silo vnesli čimbolj v predpisanem času, med vnašanjem sile nekajkrat prišlo do hipnega dviga in nato padca togega jeklenega okvira, ki je bil le položen na stojki, zaradi česar je lahko prišlo do določenih premikov na preskuševalni napravi z vzorcem. Zaradi tega smo pri preskušanjih naslednjih vzorcev dodatno pritrdili togi jekleni okvir, kot tudi modificirali namestitev zagozd v kotvi tako, da smo pred vnosom sile ročno vtisnili zagozde v odprtini obeh kotev. Oba ukrepa sta se izkazala kot uspešna, kar potrjuje večja skladnost rezultatov vzorcev R-6 do R-9.



Slika F.16: Izmerjene vrednosti upadlih sil med preskusi relaksacije vzorcev R-4 do R-9 po postopku za preiskavo sidra s spremljanjem časa vnosa sile na stopnjah sile P_2 , P_4 , P_6 in P_8 .
Figure F.16: Measured values of decreased forces during relaxation tests of the samples R-4 to R-9 by the anchors' investigation test procedure with time registration for loading at levels P_2 , P_4 , P_6 and P_8 .



Slika F.17: Izmerjene vrednosti relaksacije ρ med preskusi relaksacije vzorcev R-4 do R-9 po postopku za preiskavo sidra s spremljanjem časa vnosa sile na stopnjah sile P_2 , P_4 , P_6 in P_8 .
Figure F.17: Measured values of relaxation ρ during relaxation tests of the samples R-4 to R-9 by the anchors' investigation test procedure with time registration for loading at levels P_2 , P_4 , P_6 and P_8 .

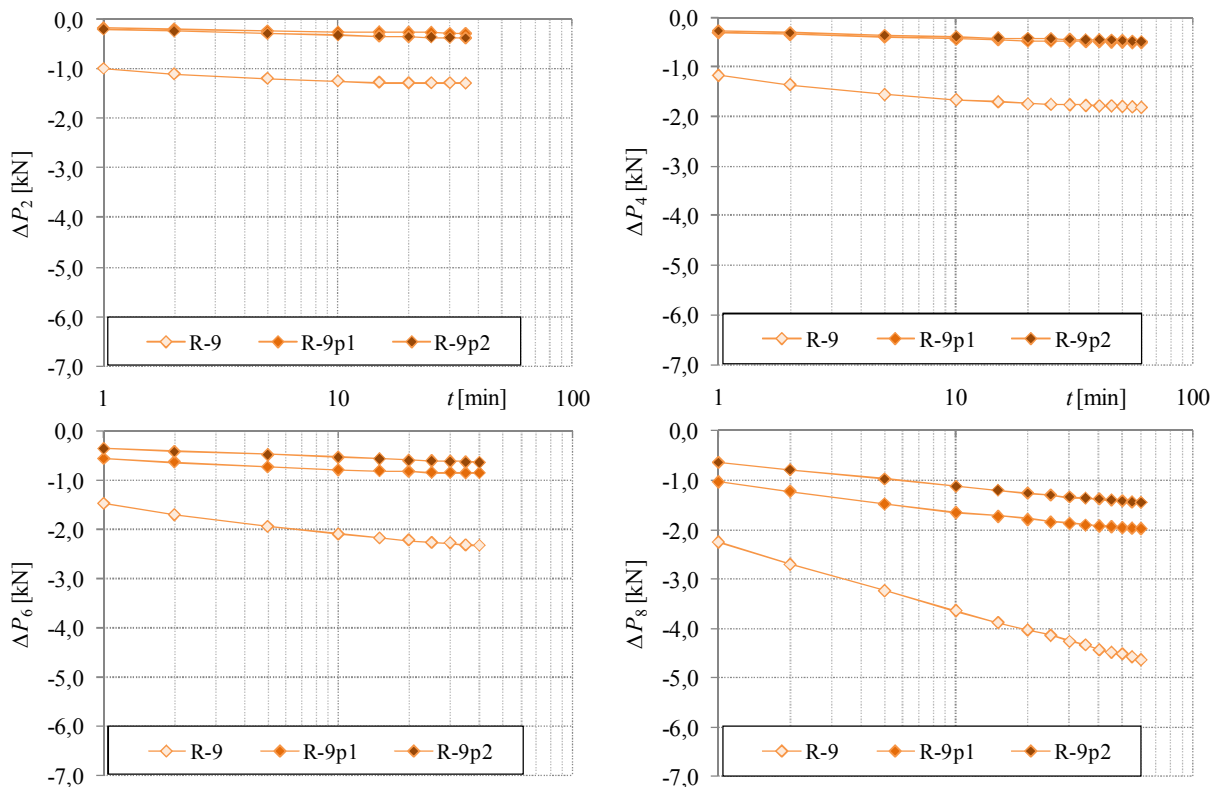
F.3.3.2 Vpliv ponovitve postopka preskušanja izotermne relaksacije po fazah preiskav sider brez dodajanja upadlih sil

Pri nadaljevanju laboratorijskih preskušanj smo želeli poiskati tudi odgovor na vprašanje, ali na nekem vzorcu pramena do upadanja sile pride le pri prvem obremenjevanju, nato pa teh upadanj ni več oz. so minimalna, ali pa se v pramenu pri popolni razbremenitvi kmalu vzpostavi začetno stanje in se bodo pri ponovni obremenitvi spet pojavili upadi sil podobnega velikostnega reda kot pri prvi obremenitvi. To vprašanje se navezuje na opažanja iz prakse, da so v primeru zaporednega izvajanja preskusov nosilnosti sider (običajno celovitih preskusov napenjanja) drugega za drugim, pri ponovitvi padci sil v posameznih časovnih intervalih manjši, prav tako pa so ugodnejši rezultati v smislu manjših izvlečkov oz. nižjih vrednosti mer lezenj k . Včasih namreč izvajalci sidrskih del v primeru, ko pri prvem preskusu nosilnosti sidra ne uspejo zadovoljiti zahtevam postavljenih kriterijev, preskus ponovijo, pri čemer so pri ponovitvi preskusa vrednosti mere lezenja k običajno manjše. Ob tem nas je zanimalo, v kolikšni meri so manjši izvlečki pramen, s tem pa tudi nižje vrednosti k , posledica morebitnega zmanjšanelega upada sil zaradi manj intenzivnega poteka relaksacije pramen v ponovljenem preskusu. Obenem smo s ponovljenimi preskušnji želeli tudi ugotoviti, kolikšni bodo upadi sile na nižjih stopnjah sile PS, ki niso posledica prave relaksacije pramen, pač pa pojavov v zvezi z vnosom sile v žice pramen v primerih, ko bomo vzorec v preskuševalno napravo namestili le enkrat, nato pa bo ves čas preskušanj zagotovljen vnos sile v vzorec pramena na istem mestu.

Vpliv ponovitve postopka preskušanja izotermne relaksacije po fazah PS s spremljanjem časa vnosa sile na posameznih stopnjah sile smo preverjali na vzorcu R-9. Odločili smo se, da bomo ponovitve preskušanja tega vzorca izvajali na način, da bomo vzorec pred ponovitvijo preskušanja le razbremenili, pri tem pa ga ne bomo vzeli iz jeklenega preskuševalnega okvira, s čimer bo ohranjen dober oprijem zarez zagozd čeljusti na žice vzorca pramena v območju obeh kotev tudi v prvih fazah ponovljenih preskušanj pri nizkih stopnjah sil. Pri prvem preskušanju smo vzorec skrbno namestili v tog preskuševalni okvir, pri čemer smo še posebej pozorno namestili zagozdi v odprtini obeh kotev, da bi čimbolj zmanjšali vpliv zdrsa žic vzorca pramena pri prvem preskusu. Le-tega smo izvedli po že opisanem postopku, pri čemer smo vzorec R-9 po zaključenem opazovanju (t.j. po 60' na zadnji stopnji sile $P_8 = 209$ kN) pustili obremenjenega v preskusnem okviru preko popoldneva in noči (slabih 15 ur). Naslednje jutro smo vzorec razbremenili na minimalno silo 4,8 kN, ki je še zagotavljala oprijem zagozd na žice pramena v kotvah. V roku 5' je sila na razbremenjenem vzorcu narasla za 2,0 kN, zato smo silo ponovno spustili na 3,5 kN, pri čemer je sila v 90' narasla na 4,7 kN. Silo smo ponovno spustili na 2,5 kN, pri čemer se je sila na razbremenjenem vzorcu v 30' ponovno dvignila na 2,8 kN. Na vzorcu smo nato ponovili celoten preskus relaksacije po postopku za PS, pri čemer smo vzorec označili kot **R-9p1**. Po zadnjem odčitku (t.j. po 60' na zadnji stopnji pri sili $P_8 = 209$ kN) smo vzorec razbremenili na minimalno silo 3,5 kN in ga tako razbremenjenega pustili v preskuševalnem okviru za dobrih 14 ur. Pred začetkom novega cikla preskušanj smo izmerili silo v razbremenjenem vzorcu, ki se je v tem času dvignila iz 3,5 kN na 5,0 kN. Na vzorcu, ki smo ga označili kot **R-9p2** smo ponovno izvedli celoten preskus relaksacije po postopku za PS. Rezultati meritev upadlih sil za ravni sil $P_2 = 71$ kN, $P_4 = 117$ kN, $P_6 = 163$ kN in $P_8 = 209$ kN so prikazani na diagramih na [sliki F.18](#).

Skladno s pričakovanji so bili v vseh diagramih na [sliki F.18](#) največji padci sile prisotni pri prvi izvedbi preskušanj izotermne relaksacije po fazah PS. V začetnem delu prvega ponovljenega preskušanja so padci sile na stopnji sile P_2 znašali le 20 do 24 %, na stopnji sile P_4 pa le 25 do 28 % padcev sile ΔP pri prvem preskusu. S povečevanjem natezne sile v vzorcu pramena so se povečevali tudi padci sile v

nadaljevanju prvega ponovljenega preskušanja, tako da so pri sili P_6 znašali med 36 in 38 %, pri sili P_8 pa že med 43 in 46 % padca sile pri prvem preskusu.



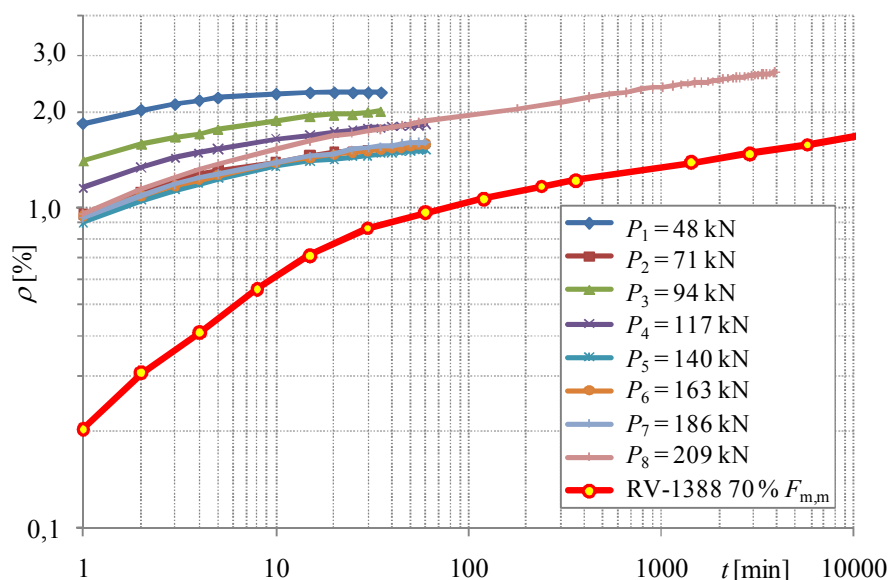
Slika F.18: Izmerjene vrednosti upadlih sil pri preskuh relaksacije vzorca pramena R-9 po postopku za preiskavo sidra: osnovni preskus (**R-9**), prvi ponovljeni preskus relaksacije en dan po osnovnem preskusu (**R-9p1**), drugi ponovljeni preskus relaksacije dva dni po osnovnem preskusu (**R-9p2**).

Figure F.18: Values of decreased forces for the sample of strand R-9 measured at the relaxation tests performed by the anchors' investigation test procedure: a primary test (**R-9**), first repetition of the relaxation test one day after the primary test (**R-9p1**), second repetition of the relaxation test two days after the primary test (**R-9p2**).

Rezultati kažejo, da so bili pri drugi ponovitvi v začetnem delu preskušanja vrednosti padcev sile praktično istega velikostnega reda, kot pri prvi ponovitvi preskušanja, medtem ko so bili v nadaljevanju druge ponovitve preskušanja padci sile ΔP še nižji in so pri sili P_6 znašali med 24 in 27 %, pri sili P_8 pa med 28 in 32 % padca sile pri prvem preskusu. Iz tega bi lahko zaključili, da je mehanizem delovanja natezno obremenjenega vzorca pramena pri preskusu relaksacije pri nižjih silah drugačen od mehanizma pri višjih silah. Padci sile pri nižjih ravneh sile (nekje pod 60 % R_m) so povezani z delovanjem mehanizma vnosa sile preko kotve in zagozd na žice pramena, vendar v primeru zaporedno ponovljenih preskušanj do zdrsa na stiku zagozd in zunanjih (spiralnih) žic pramena ne more priti, saj so se nabrazdane površine zagozd v te žice dobro vtisnile že pri predhodnem preskusu relaksacije. V tem primeru očitno pride do izraza mehanizem prenosa sile iz zunanjih žic na notranjo osrednjo žico pramena, ki je v celoti odvisen samo od trenja, ki pa pri ravneh nizkih sil očitno ni zadostno, da bi preprečilo zdrsa na stiku zunanjih spiralnih žic z ravno osrednjo žico. Na višjih ravneh nateznih napetosti (v območju nad 60 % R_m) se v pramenu pojavljajo izgube, ki jih lahko pripisujemo tipični relaksaciji, kot je poznana pri prednapenjanju konstrukcij, ki je posledica tako delovanja pramena sestavljenega iz

žic kot tudi lokalnih zdrsov in procesa difuzijskih dislokacij med sosednjimi kristali (Koretsky in Pritchard, 1982). Kot nakazujejo rezultati zaporedno ponovljenih preskušanj vzorca R-9 lahko z vsakim zaporedno ponovljenim preskusom relaksacije izvedenim na enak način pričakujemo, da bodo izgube zaradi relaksacije vedno manjše, vendar pa bodo še vedno prisotne. Ta ugotovitev govori v prid dejstva, da pojav relaksacije ni samo posledica pojava dislokacij kristalov, saj se kristali niso mogli obnoviti, ker za to ni bilo ustreznih pogojev (povišane temperature) – ta del izgub zaradi relaksacije bi lahko pripisali medsebojnemu delovanju žic pramena, ki se pri visokih nateznih obremenitvah medsebojno ulegajo, zunanje spiralne žice pa se poskušajo poravnati, s čimer pa na stiku teh žic z osrednjo ravno žico prihaja do pojava trenja. Zaključek zaporedno izvedenih ponovitev torej nakazuje, da pri dovolj visokih nateznih obremenitvah pramena (v območju nad 60 % R_m) do določenega deleža izgub zaradi relaksacije v pretežni meri pride le enkrat (torej pri prvi obremenitvi vzorca) in ga lahko povezujemo z lokalnimi zdrsi in difuzijsko dislokacijo med sosednjimi kristali jekla, medtem ko do deleža izgub, ki se navezujejo na ravnanje spiralnih žic pramena, prihaja pri vsaki ponovni obremenitvi pramena.

Podoben preskus s ponovitvijo preskusa relaksacije smo izvedli tudi na vzorcu pramena $\varnothing 15,2$ mm trdnostnega razreda 1860 kN z oznako RV-1388, ki je bil predhodno že preskušen po standardu *SIST EN ISO 15630-3* v trajanju 1000 ur pri sili 196,84 kN (70 % dejanske maksimalne sile $F_{m,m}$ ugotovljene z nateznim preskusom), pri čemer je bila končna izmerjena vrednost relaksacije ($\rho_{1000} = 2,03$ %) v okviru zahtev standarda. Po končanem preskusu je bil vzorec odstranjen iz preskuševalne naprave in 11 dni v neobremenjenem stanju shranjen v laboratoriju. Vzorec smo ponovno namestili v preskuševalno napravo, pri čemer smo pazili, da zagozde žice vzorca pramena niso prijele na lokalno načetih (nabrazdanih) območjih žic pramena, kjer so pri prvem preskusu nalegale zagozde. Na vzorcu smo ponovno izvedli preskus izotermne relaksacije po postopku za PS. Rezultati tako standardnega preskusa kot tudi preskusa relaksacije po postopku za PS so prikazani v skupnem diagramu na [sliki F.19](#).



Slika F.19: Rezultati preskusov relaksacije vzorca pramena RV-1388 preskušene po standardu *oSIST prEN ISO 22477-5* in po postopku za preiskavo sidra s kontrolirano hitrostjo vnosa sile.

Figure F.19: The relaxation test results for the sample of strand RV-1388 tested according to the standard *oSIST prEN ISO 22477-5* as well as by the anchors' investigation test procedure with controlled speed of loading.

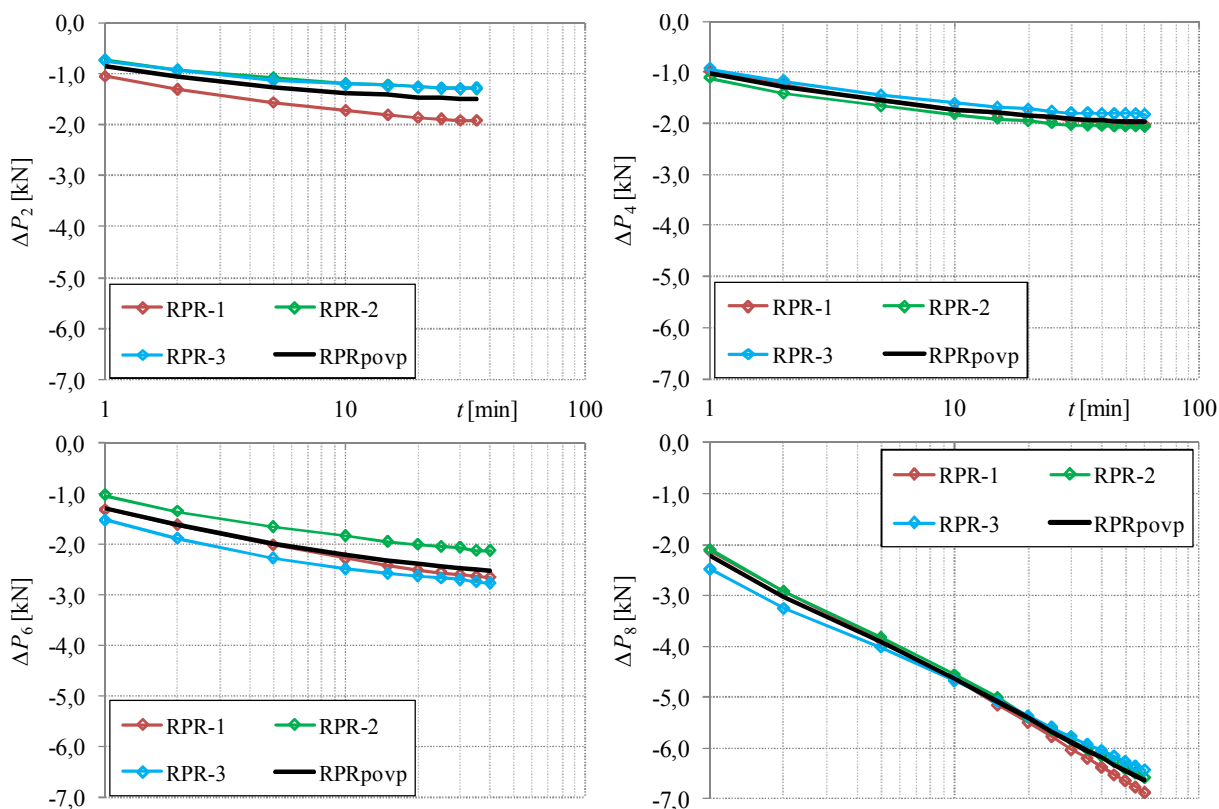
Iz **slike F.19** je razvidno, da so vrednosti relaksacije ρ , s tem pa tudi padci sile ΔP , na ravni stopnje sile $P_2 = 71$ kN v primerjavi z ostalimi vrednostmi glede na sosednji ravni sil P_1 in P_3 neobičajno majhni, kar bi lahko povežali z neenakomernim oprijemom zagozd na žice pramena oz. z zdrsom osrednje žice pramena glede na zunanje spiralne žice v območju obeh kotev pri nizki sili v vzorcu pramena. Od faze $P_5 = 140$ kN (54 % R_m) so se z vsako nadaljnjo stopnjo obremenitve sicer povečevali padci sile ΔP , vendar pa so se vrednosti relaksacije ρ ohranjale na praktično enakih vrednostih, tako da je šele v zadnji fazi $P_8 = 209$ kN (80 % R_m) opaziti naraščanje vrednosti ρ , pri čemer pa je naklon zadnjega linearnega dela krivulje malenkost manjši kot pri krivulji relaksacije dobljeni po standardu na nižji ravni obremenitve (70 % $F_{m,m}$). Glede na različne ravni sil je neposredna primerjava z rezultati preskušanja izotermne relaksacije po standardu *SIST EN ISO 15630-3* (vzorec je bil obremenjen na 70 % dejanske maksimalne sile $F_{m,m}$) korektna le za ravni obremenitve $P_7 = 186$ kN (71 % R_m) in $P_8 = 209$ kN (80 % R_m). Ugotovimo lahko, da so prve (začetne) vrednosti relaksacije pri 1' pri metodi preskušanja po postopku PS sicer višje, kar je posledica tega, da je po standardu zahtevan interval 2' za umiritev obremenjenega vzorca in se odčitki padcev sile še ne smejo izvajati, medtem ko se po postopku za PS odčitki začnejo takoj po vstavitvi sile, zato so seveda padci sile, ki so v začetku najbolj intenzivni, seveda višji. Takšno stanje se odraža tudi v izvrednoteni začetni vrednosti relaksacije ρ . Z opazovanjem tako na ravni sile P_7 kot tudi sile P_8 pri preskušanju relaksacije po postopku za PS pa je naklon krivulje lezenja manjši od naklona krivulje, dobljene po standardiziranem postopku. Na podlagi enega ponovljenega preskusa lahko torej le indikativno ugotovimo, da so rezultati pri ponovljenem preskusu relaksacije na isti ravni natezne sile pri ponovljenem preskusu nekoliko nižji, vendar pa bi bilo za natančnejšo oceno dolgoročnega vpliva na zmanjšanje vrednosti ρ potrebno izvesti še dodatna preskušanja.

F.3.4 Postopek preskušanja izotermne relaksacije po stopnjah sil faz preiskav sider z dodajanjem upadlih sil s spremljanjem časa vnosa sile

V zadnjem paketu preskušanj izgub zaradi relaksacije vzorcev pramena $\varnothing 15,2$ mm trdnostnega razreda 1860 kN istega tipa in proizvajalca, kot so bila vgrajena na testnem polju, smo se želeli v največji možni meri približati postopku izvedbe PS, kot se dejansko izvajajo v praksi, po katerem se pred izvedbo odčitka izvlečka pramen sidra izvede dodajanje upadle sile ΔP na začetno vrednost P_i posamezne stopnje sile. Z dodajanjem upadlih sil pred izvedbo odčitkov sile v posameznih časovnih intervalih se odmikamo od postopka preskušanja relaksacije po standardu *SIST EN ISO 15630-3*, pri čemer se v vzorcu pramena s temi dodajanja upadlih sil neprestano vsiljujejo motnje napetostnega stanja. V tako modificiranem načinu preskušanja relaksacije, kjer vzorec opazujemo pri konstantni deformaciji ($\varepsilon = \text{konst}$), pri katerem se s časom spreminjajo napetosti, pri čemer s stalnim dodajanjem sile uvajamo elemente preskušanja tečenja, pri katerem so napetosti v vzorcu konstantne. Glede na to, da se prav na tak način izvajajo preskušanja sider v praksi, smo želeli s takim modificiranim preskušanjem indikativno ugotoviti, ali bi takšno stalno dodajanje upadlih sil na nek način pospešilo intenziteto procesa relaksacije – torej ali bodo izmerjene vrednosti padlih sil ΔP oz. vrednosti relaksacije ρ na ravni posameznih sil P_i višje v primerjavi s preskušanja, kjer sil nismo dodajali. Za preskušanje tipične relaksacije prednapetih konstrukcij tak pristop po oceni Pritchard in sod. (2006) ni primeren, saj se med preskusom relaksacije ne sme spreminjati niti deformacija niti sila v pramenu, saj bi lahko v nasprotnem primeru izvajalec preskusa vplival na rezultat in ga subjektivno prilagajal.

Modificirane preskuse izotermne relaksacije po postopku za PS s stalnim dodajanjem upadle sile ΔP na začetno vrednost P_i posamezne faze smo izvedli na vzorcih RPR-1 do RPR-3 pramena $\varnothing 15,2$ mm trdnostnega razreda 1860 kN istega tipa in proizvajalca pramen, kot so vgrajena v sidrih testnega polja. Preskušanja navedenih treh vzorcev smo izvedli po popolnoma enakem postopku kot pri vzorcih R-4

do R-9 (postopek za preiskavo sidra s kontrolirano hitrostjo vnosa sile na posameznih stopnjah sile) z edino razliko, da smo pred izvedbo odčitka v vsakem časovnem intervalu silo popravili na začetni raven sile P_i te faze. Način izvedbe in časovno dinamiko popravkov sile smo izvedli na identičen način, kot se to v praksi izvaja pri izvedbi PS. Vrednosti upadlih sil smo v vsaki fazi kumulativno seštevali, pri čemer so te vrednosti za ravni sil P_2 , P_4 , P_6 in P_8 prikazane na **sliki F.20**.



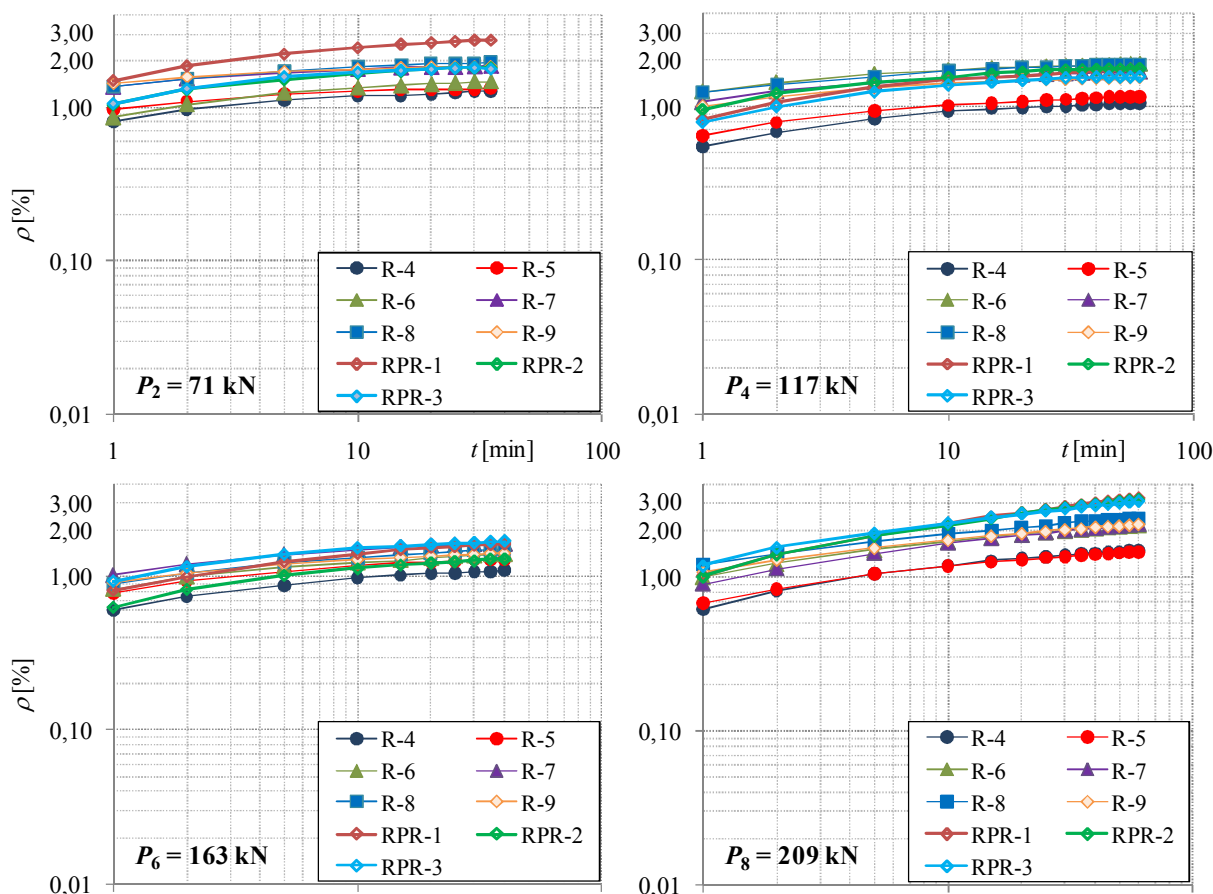
Slika F.20: Izmerjene vrednosti upadlih sil pri preskusih relaksacije vzorcev pramen po postopku za preiskavo sidra s stalnim dodajanjem upadlih sil s kontrolirano hitrostjo vnosa sile na stopnjah sile P_2 , P_4 , P_6 in P_8 .

Figure F.20: Values of decreased forces measured at the relaxation tests performed by the anchors' investigation test procedure with permanent supplement of decreased forces and with controlled speed of loading at force levels P_2 , P_4 , P_6 and P_8 .

Na ravni sile P_2 so vrednosti upadlih sil pri vzorcu RPR-1 za približno 40 do 50 % višje kot pri ostalih dveh vzorcih, preskušanih na enak način. Obnašanje vseh treh vzorcev na ravni sile P_4 je z minimalnim raztrosom vrednosti praktično enako, pri čemer je končna vrednost povprečne upadle sile pri tej sili za 32 % večja od povprečne upadle sile na ravni sile P_2 . Na ravni sile P_6 je raztros upadlih sil vseh treh vzorcev že večji in v skrajnem primeru (t.j. pri 1') znese tudi do 50 %, pri čemer pa je končna vrednost povprečne upadle sile pri tej sili za 28 % večja od povprečne upadle sile na ravni sile P_4 . Na ravni zadnje stopnje so raztrosi izmerjenih vrednosti vseh treh vzorcev spet bistveno manjši, pri čemer pa je opazna drugačna oblika krivulj kot na ostalih prikazanih diagramih: vrednosti upadlih sil od 5' naprej z logaritmom časa ne kažejo tendence umirjanja, pač pa je krivulja povprečnih upadlih sil vseh treh vzorcev praktično premica, kar bi po analogiji mer lezenja k pomenilo, da bi bil vpliv upadlih sil oz.

relaksacije pramen na taki ravni sile (80 % natezne trdnosti pramen R_m), pod pogojem stalnega dodajanja upadlih sil, na izvednotene mere lezenja k , konstanten.

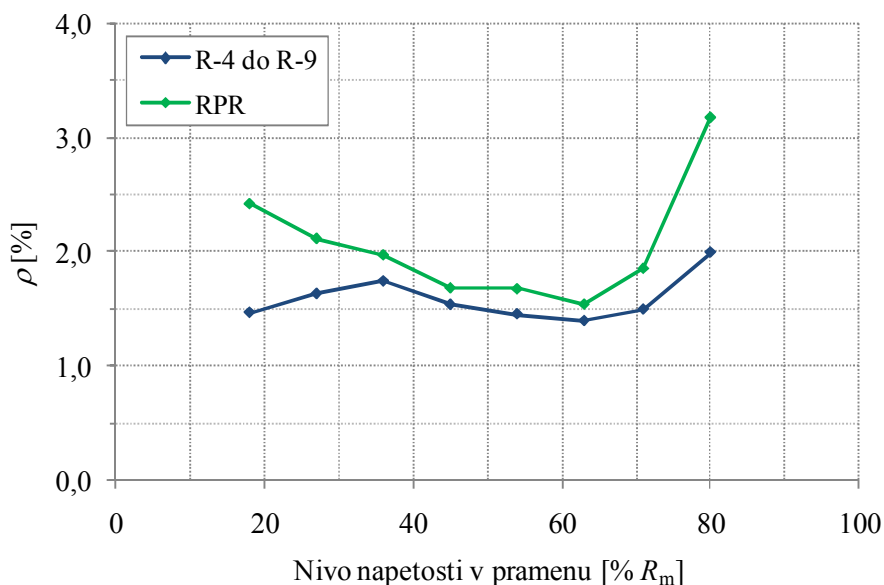
V diagramih na **sliki F.21** smo za primerjavo skupaj vrisali rezultate preskusov izotermne relaksacije po postopku za PS vzorcev pramen preskušanih brez dodajanja upadlih sil (vzorci R) kot tudi s stalnim dodajanjem upadlih sil (vzorci RPR). Zaradi raztrosa izmerjenih vrednosti lahko iz diagramov na tej sliki opazimo le, da se krivulje vseh treh vzorcev tipa RPR večinoma nahajajo znotraj območja krivulj vzorcev tipa R.



Slika F.21: Primerjava rezultatov preskusov relaksacije vzorcev pramen preskušanih po postopku za preiskavo sidra: brez dodajanja upadlih sil (vzorci R) in s stalnim dodajanjem upadlih sil (vzorci RPR).
Figure F.21: Comparison of the relaxation test results for the strand samples tested by the anchors' investigation test procedure: without supplements of decreased forces (samples R) and with continual supplements of decreased forces (samples RPR).

Natančnejši pregled rezultatov meritev pokaže, da se vpliv stalnega dodajanja upadlih sil ΔP spreminja glede na raven sile P_i : če bi primerjali končne povprečnih vrednosti upadlih sil vzorcev R-4 do R-9 ($\Delta P_{R_4-R_9-povp}$) s končnimi povprečnimi vrednosti upadlih sil vzorcev RPR-1 do RPR-3 ($\Delta P_{RPR-povp}$) bi lahko ugotovili, da so na ravni sile P_2 vrednosti $\Delta P_{RPR-povp}$ v primerjavi z vrednostmi $\Delta P_{R_4-R_9-povp}$ višje do 30 %, na ravni sile P_4 so višje do 10 %, na ravni sile P_6 so višje do 11 %, medtem ko so na zadnji ravni sile P_8 višje kar do 59 %. Zaradi lažje primerljivosti smo diagrame na **sliki F.21** skrčili na končne vrednosti relaksacije, ki je posledica kumulativnih upadlih sil in je bila dosežena pri zadnjem

odčitku na posamezni stopnji sile P_i , ki so predstavljene na [sliki F.22](#). V teh primerih torej rezultate povprečnih končnih vrednosti popravljenih sil, pretvorjenih v vrednosti relaksacije ρ , podajamo glede na raven napetosti v vzorcih in sicer v dveh krivuljah: ločeno kot povprečje vzorcev R-4 do R-9 in ločeno za povprečje vzorcev RPR-1 do RPR-3.



Slika F.22: Končne povprečne vrednosti relaksacije ρ vzorcev pramen \varnothing 15,2 mm trdnostnega razreda 1860 MPa istega proizvajalca glede na raven napetosti v vzorcih.

Figure F.22: The final average relaxation values ρ for strand samples \varnothing 15,2 mm of grade 1860 MPa (all made by the same manufacturer) as regards the stress level in the samples.

Iz krivulj na [sliki F.22](#) je opaziti, da je vpliv stalnih dodajanj sile (vzorci RPR) zelo velik na samem začetku preskušanj, kjer so izgube sile predvsem posledica mehanizma vnosa sile v žice pramen, v manjši meri pa tudi medsebojnega usedanja elementov v območjih obeh vnosov sile v vzorce pramena. S povečevanjem obremenitev se zaradi klinasto oblikovanih trikrakih zagozd in konusne odprtine obeh kotev vedno bolj povečujejo napetosti v radialni smeri glede na vzdolžno os vzorca pramena, zaradi česar se povečuje trenje med žicami pramena (torej je delež zdrsa med žicami pramena na mestu vnosa sile vedno manjši), prav tako pa se vedno bolj v zunanje žice pramen vtiskajo narebrene površine zagozd, zaradi česar so možnosti za pojav zdrsa na stiku zagozd in površine zunanjih žic pramena vedno manjše. S povečevanjem nateznih obremenitev vzorcev pramen se upadi sile zmanjšujejo vse do točke, kjer se začne pojavljati prava relaksacija pramena (angl. intrinsic relaxation). Od stopnje sile $P_6 = 163$ kN (63 % R_m) naprej pa začne v vzorcih RPR relaksacija zelo hitro naraščati, kar je očitno posledica stalnega popravljanja sile na začetno predpisano raven pred izvedbo odčitkov.

V primerih, ko upadlih sil med opazovanjem vzorcev na stopnji sile P_i nismo stalno popravljali (vzorci R-4 do R-9), so bili začetni upadi sile sicer nižji, a so s povečevanjem natezne sile v vzorcih (v nasprotju z obnašanjem vzorcev RPR) naraščali vse do stopnje sile $P_3 = 94$ kN (36 % R_m), ki približno sovпада s spodnjo mejo napetosti 30 % R_m , ki je po *SIA 267* potrebna za učinkoviti vnos sile v zaklinjena prednapeta geotehnična sidra. Od te točke naprej so se upadi sile, podobno kot pri vzorcih RPR, zmanjševali vse do stopnje sile $P_6 = 163$ kN (63 % R_m), kjer se začne pojavljati prava relaksacija pramena, vendar pa je intenzivnost tega pojava, v primerjavi z vzorci RPR, opazno manjša.

F.4 ZAKLJUČKI LABORATORIJSKEGA PRESKUŠANJA IZOTERMNE RELAKSACIJE JEKLENIH PRAMEN ZA POTREBE PRESKUŠANJA SIDER

Za oceno izgub sile v zaklinjenih sidrih objektov lahko uporabimo pristop in metode preskušanj jeklenih pramen, kot se izvajajo pri prednapenjanju konstrukcij. Ob tem moramo dodatno upoštevati še značilnosti sidranja objektov z vgrajenimi trajnimi prednapetimi geotehničnimi sidri, ki se razlikuje od prednapenjanja konstrukcij: pri sidranih objektih bo tekom njihove življenjske dobe prišlo do določenih sprememb v smislu premikov zaledja, sprememb hidroloških razmer v tleh zaledja, sprememb v okolici sidranega objekta (novogradnje, izkopi, spremembe oblike terena, plazovi, zaledni pritiski ipd.), ki bodo dolgoročno dodatno vplivale na velikosti sidrnih sil.

Namen izvedenih preskušanj izotermne relaksacije na vzorcih jeklenega pramena $\varnothing 15,2$ mm trdnostnega razreda 1860 kN, opisanih v tem poglavju, je bil izvesti preskušanja, s katerimi smo želeli posnemati izgube sile v pramenih med samo izvedbo PS v praksi. Po dostopnih virih do sedaj takšne raziskave na svetovni ravni še niso bile narejene, so pa rezultati pomembni za opredelitev postopkov preskušanj, ki jih sicer opredeljujejo izvedbeni standardi za preskušanje sider. Izkušnje iz prakse namreč kažejo, da do precej velikih izvlečkov (preko njih pa tudi relativno velikih mer lezenja k) prihaja že pri nizkih stopnjah sile PS, ki pa jih ne moremo pojasniti niti z mehanizmom delovanja veznih delov sidra niti s padci sile in izgubam zaradi relaksacije jeklenih pramen, kot jih poznamo pri prednapenjanju konstrukcij, saj so v obeh primerih v pramenih potrebne visoke natezne sile, ki pa v začetnih fazah PS nedvomno niso prisotne.

Po drugi strani je bil cilj preskušanja vplivov izgub sile zaradi relaksacije po postopku za PS ugotoviti velikostni red upadlih sil pred izvedbo odčitka na posamezni stopnji sile P_i med PS, na podlagi katerega bi lahko presojali o upravičenosti zahteve po popravljanju upadlih sil pred izvedbo odčitka na posamezni stopnji sile P_i med PS, kar eksplicitno predpisuje le švicarski standard *SIA 267/1*, medtem ko v veljavnem izvedbenem standardu *EN 1537*, kot tudi osnutku standarda *oSIST prEN ISO 22477-5*, to ni predvideno. V teh primerih se izvlečki pramen sidra na vsaki stopnji opazovanja odčitavajo pri vedno nižjih silah, zato so izmerjeni izvlečki nižji, kar se posledično odraža tudi v nižjih vrednostih izvedenih mer lezenja k . Rezultati izvedenih laboratorijskih preskusov kažejo, da se vpliv izgube sile v natezno obremenjenih pramenih z naraščanjem stopnje sile in s podaljševanjem opazovalnih časov opazno povečuje, pri čemer pa s stališča PS ni bistveno, do katere ravni sile lahko padce sile ΔP pripišemo prevladujočemu vplivu oprijemanja čeljusti v žice pramena in vplivom medsebojnega delovanja posameznih spletenih žic sestavljenega pramena na padec sile, od katere ravni sile naprej pa lahko padce sile ΔP v celoti pripišemo pojavu prave relaksacije (angl. intrinsic relaxation).

Vpliv oprijemanja čeljusti v žice pramena in vpliv medsebojnega delovanja posameznih spletenih žic sestavljenega pramena, na padec sile, je zaradi določenih razlogov izrazitejši pri laboratorijskem preskušanju pramena: dolžine pramen prostega dela sider so precej večje, prav tako pa pri terenskem preskušanju nosilnosti sider čeljusti mononapenjalk pramena opijemajo le na eni strani (na drugi strani so v veznem delu zalita v cementni injekcijski masi). Vendar pa so pri terenskem preskušanju prisotni tudi drugi moteči vplivi, posledica katerih je nižja dejanska sila v pramenih veznega dela sidra od teoretične (izgube zaradi trenja pramen v ovojne PE cevi prostega dela sidra, sila za premagovanje trenja v pramenu na mestu tesnitve stika vezni-prosti del, trenje, ki nastaja zaradi spremembe kota pramen v območju pod glavo sidra, trenje v napenjalki, neraven potek pramen kabla sidra v začetnem pa tudi v končnem delu prostega dela sidra, morebitno vtiskanje sidranega elementa v zaledje ipd.).

Od samega začetka izvajanja laboratorijskih preskušanj izotermne relaksacije so naši rezultati potrjevali ugotovitve virov (npr. Preston, 1985, Hill, 2006, Loflin, 2008), da je za izmerjene vrednosti upadlih sil ΔP (in posledično za izvednotene vrednosti relaksacije ρ) ključnega pomena izvedba vnosa sile iz napenjalne glave v žice vzorca pramena. V literaturi je sicer najti ugotovitve ter priporočila ameriških in avstralskih raziskovalcev za izvedbo detajla vnosa sile, vendar jih pri naših raziskavah namerno nismo upoštevali, saj smo želeli posnemati dejansko obnašanje pramen pri PS v praksi, kjer površine pramen na mestih oprijema čeljusti lokalno niso posebej prirejene. Zato je bil vnos sile iz napenjalne glave v pramena zagotavljen le preko narebrenih površin zagozd, ki so neposredno nalegale na žice vzorcev pramen; edini ukrep, ki smo ga uvedli zaradi velikega izmerjenega raztrosa upadlih sil na nižjih stopnjah sil P_i , izmerjenih na prvih vzorcih, je bil skrbno ročno vtiskovanje trikrakih zagozd v odprtini obeh kotev. V praksi se to dejansko ne izvaja, pač pa se vnos sile v pramena sidra tako pri skupnih napenjalkah kot tudi mononapenjalkah izvaja izključno le preko trenja na stiku čeljusti z žicami pramen, pri čemer so te čeljusti oblikovane na zelo podoben način kot trikrake zagozde, uporabljene pri naših preskušanjih.

Res je, da je bil vnos sile v vzorce pri laboratorijskih preskušanjih izveden preko zagozd na obeh koncih vzorca pramena, medtem ko so v praksi pramena v veznem delu sider zalita v cementni injekcijski masi in se vnos sile v sidro preko zagozd oz. čeljusti skupne napenjalke (oz. mononapenjalk) izvaja le v območju glave sidra, po drugi strani pa je tudi res, da se stanje površine čeljusti skupne napenjalke (oz. mononapenjalk) z uporabo stalno slabša in je po daljši uporabi že bistveno slabše od stanja trikrakih zagozd, uporabljenih pri naših laboratorijskih preskušanjih. Določene omejitve je deloma že na ravni sile P_6 , predvsem pa na ravneh sile P_7 in P_8 , predstavljala tudi napenjalna glava preskuševalne naprave (slika F.4), ki smo jo uporabljali pri laboratorijskih preskusih. Pri visokih obremenitvah vzorca pramena smo za preprečitev morebitnih zareznihi učinkov v žicah vzorca pramena morali šest vijakov napenjalne pazljivo izmenično ročno zategovati, zaradi česar sile stopnje nismo uspeli v vzorec vnesti tako hitro, kot pri terenskem preskušanju. Ob upoštevanju vseh zgoraj navedenih dejstev ocenjujemo, da smo s preskušnji v zadovoljivi meri zajeli obnašanje pramen sider pri izvedbi PS v praksi, pri čemer pa so vrednosti upadlih sil predvsem v zadnjih dveh oz. treh fazah terenske PS najverjetneje vseeno nekoliko podcenjene.

Prispevek opravljenega eksperimentalnega dela v sklopu opravljenih laboratorijskih preskušanj izotermalne relaksacije jeklenih pramen $\varnothing 15,2$ mm trdnostnega razreda 1860 kN istega proizvajalca, kot so vgrajena v sidrihi testnega polja, po postopku za PS, lahko povzamemo v naslednjih zaključkih:

- Dosedanje raziskave relaksacije jeklenih pramen za potrebe prednapenjanja konstrukcij kažejo, da je pojav relaksacije opazen pri napetostih višjih od 50 % natezne trdnosti jekla R_m , s povečevanjem napetosti nad 70 % R_m pa izgube sile zaradi relaksacije začnejo izraziteje povečevati (Podolny, 1967, Ghali in sod., 2002 ter Sengupta in sod., 2009). Nedvoumni zaključek naših laboratorijskih preskušanj je, da pri razpoložljivi opremi in obstoječih postopkih za izvedbo preiskav prednapetih geotehničnih sider do padcev sile v natezno obremenjenih pramenih sidra prihaja že od prve faze PS naprej, torej so padci sile prisotni tudi pri silah nižjih od 50 % R_m . Te padce sile lahko obravnavamo v širšem vidiku definicije relaksacije (upad sile na napetem pramenu konstantne dolžine), res pa je, da so vzroki za njihov nastanek na začetnih stopnjah obremenjevanja drugačni kot na višjih ravneh nateznih sil.
- Na dejansko vrednost sile v natezno obremenjenih pramenih kabla sidra med PS vplivajo faktorji:
 - Tako pri laboratorijskih preskušanjih vzorcev pramen, kot tudi pri terenskih PS, je vnos sile v žice pramen odvisen od trenja med narebreno površino zagozd oz. čeljusti ter površino zunanjih

spiralno zaviti žic pramen. V območju nižjih sil pridejo do izraza izgube, ki so povezane z načinom in kakovostjo vnosa sile iz napenjalne naprave v jeklena pramena: pri mehanizmih, ki so odvisni samo od trenja (kot smo jih uporabljali pri laboratorijskih preskusih relaksacije, prav tako pa se enaki mehanizmi uporabljajo tudi pri preskusih nosilnosti in napenjanju sider v praksi) se kaže, da je tudi na nižjih ravneh sil (torej pri silah, pri katerih še ni prisoten upad sil v pramenih zaradi tipične relaksacije, poznane pri prednapenjanju konstrukcij z jeklenimi prameni) prisoten upad sile, ki pa je neposredno odvisen od kakovosti stika med zobmi zagozd oz. čeljusti napenjalke, kot tudi od trenja med žicami pramen. Čeprav je površina kotev konusno oblikovana so normalne napetosti, ki delujejo v radialni smeri glede na os pramena, zaradi majhne natezne sile v pramenu relativno nizke, zato v tem delu preskušanj zaradi nizke sile trenja ni pričakovati, da bi se zagozde že lahko zajedle v površino zunanjih žic pramena, zaradi česar lahko na tem mestu prihaja do določenih zdrsov. Iz istega razloga, kot tudi morebitnih ostankov maziva še iz proizvodnje pramena, v tem lokalnem območju pramen prihaja tudi do zdrsa na stiku osrednje žice z ostalimi šestimi zunanjimi spiralno zaviti žicami pramena, zaradi česar so napetosti v osrednji žici nižje kot v ostalih zunanjih žicah pramena.

- Tako pri laboratorijskih preskusih pramen kot tudi terenskih preskusih sider, predvsem v začetnem delu preskušanj, svoj delež doprinese tudi usedanje preskusnega sistema. Pri laboratorijskih preskušanjih sta to območji obeh zaklinjenj (usedanje sistema na stiku kotev-dinamometer-blok jeklenega okvira in kotev-napenjalna glava- blok jeklenega okvira, pri čemer je pričakovati, da je usedanje v območju napenjalne glave bistveno večje kot na strani dinamometra, kar je bilo zaznati tudi med izvedbo preskusov). Pri terenskih preskušanjih sider pa z vnosom sile v sidro pride do stisnjenja sistema podložna plošča-dinamometer-podložna plošča, v primeru ne povsem ravnega podložnega obroča obročastega dinamometra pa se poravna tudi ta, dodatno pa pride tudi do pomikov oz. zdrsa skupne napenjalke oz. mononapenjalk na stiku s podložno ploščo. V kolikor sidro ni vgrajeno povsem pravokotno na naležno površino sidranega objekta, je vpliv medsebojnega usedanja elementov še izrazitejši. Za korektnost rezultatov tako laboratorijskih preskusov pramen kot tudi terenskih preskusov sider je torej ključnega pomena skrbna in natančna priprava glave sidra pred izvedbo preskusa!
- V nekaterih primerih izdelave manjšega samostojnega sidrnega bloka za izvedbo PS na objektu na ne dovolj utrjeni površini tal zaledja med izvedbo preskusa pride do vtiskanja sidrnega bloka v tla, kar se odraža tudi v padcu natezne sile v kablju sidra.
- Stanje čeljusti skupne napenjalke kot tudi mononapenjalk pri izvedbi vseh preskusov nosilnosti (s tem pa tudi PS), se ves čas spreminja, zato ni možno natančno oceniti, kolikšni so med preskusom nosilnosti upadi sil, ki so posledica izrabljenosti čeljusti skupne napenjalke/mononapenjalk. Z vsako uporabo napenjalke se stanje čeljusti v njej slabša, vendar pa je tudi z obrabljenimi čeljustmi še vedno možno izvajati preskuse sider. Največje posledice v smislu obrabljenih čeljusti so zagotovo v območju nižjih sil, kjer so sile še tako nizke, da se (obrabljena) narebrana površina čeljusti ne more vtisniti v zunanje žice pramena. Povedano drugače – v primerih izrabljenih čeljusti napenjalk so te izgube zagotovo večje kot v primeru brezhibnih čeljusti, kar se posledično izkazuje v večjih izvlečkih in večjih vrednosti mer lezenja k , čeprav le-te niso posledica popuščanja vezi veznega dela sidra s tlemi zaledja.
- Rezultati opravljenih preskusov kažejo, da se na višjih stopnjah sile (v območju nad 60 % R_m) pojavlja relaksacija, ki je tipična za prednapenjanje konstrukcij in se s povečevanjem nateznih obremenitev pramen intenzivno povečuje. Glede na to, da pramen ni monolitni element, pač pa je sestavljen iz osrednje in zunanjih spiralnih žic, se pri vnosu natezne sile zunanje žice pramena poskušajo zravnati, s čimer pa se tudi vedno bolj obvijajo ob osrednjo žico pramena, zaradi česar

na stiku med žicami prihaja do določenih napetosti. Po Koretsky in Pritchard (1982) se temu pojavu pridružujejo še neelastične deformacije, ki naj bi bile posledica lokalnih zdrsov in procesa difuzijskih dislokacij med sosednjimi kristali, pri čemer je v izotermnem okolju začetna stopnja kristalne dislokacije visoka in se nato zmanjša na raven konstantne logaritmčne stopnje (Pritchard in sod., 2006).

- V sklopu izvedenih preskušanj smo iskali tudi načelni odgovor na vprašanje, pomembno tudi za izvajanje zaporedno ponavljajočih preskusov nosilnosti sider v praksi, torej kolikšen je vpliv zaporednega ponavljanja preskušanj prednapetih geotehničnih sider na velikosti upadlih sil. Zanimalo nas je, ali na pramenih do izgube sile pride le pri prvem obremenjevanju, nato pa teh izgub ni več oz. so minimalne, ali pa se v pramenih pri popolni razbremenitvi vzpostavi začetno stanje in se bodo pri ponovni obremenitvi pojavile izgube v povezavi s širšim vidikom relaksacije podobnega velikostnega reda kot pri prvi obremenitvi. Vpliv ponovitve zaporedno ponavljajočih preskušanj izotermne relaksacije smo preverili na vzorcu R-9, ki smo ga preskusili v treh zaporedno ponavljajočih ciklih preskušanj, ne da bi pri tem vzorec pramena odstranili iz preskuševalne naprave. Ob tem smo opazili naslednje:
 - Po zaključenem preskusu relaksacije in razbremenitvi vzorca pramena na minimalno silo nekaj kN, je minimalna sila v vzorcu počasi, vendar vztrajno naraščala (po prvem preskusu je sila iz začetnih 4,8 kN v 5' narastla za 2,0 kN, nato smo silo spustili na 3,5 kN, pri čemer je sila v 90' ponovno narastla na 4,7 kN, nakar smo silo ponovno spustili na 2,5 kN, vendar se je v 30' ponovno dvignila na 2,8 kN; po drugem preskusu je sila v 14 urah narastla iz 3,5 kN na 5,0 kN). Ocenjujemo, da je to stalno naraščanje napetosti v razbremenjenem pramenu po preskusu relaksacije v izotermnih pogojih posledica sproščanja napetosti med posameznimi žicami vzorca pramena, do katerih je prišlo med preskusom relaksacije, lahko bi rekli, da se je v fazi prehoda na začetno stanje vršil **pojav obratne relaksacije**, ko se v predhodno močno napetem pramenu sproščajo napetosti in pramen prehaja v prvotno stanje pred obremenitvijo.
 - Pri zaporednih ponovitvah preskusov relaksacij so bili največji padci sile v celotnem območju stopenj preskusne sile prisotni pri prvem preskušanju. Pri kasnejših zaporednih ponovitvah je bilo obnašanje pramena odvisno od stopnje preskusne sile: v prvi polovici stopenj preskusne sile so bili padci sile v primerjavi s prvim preskušanjem sicer nižji, vendar pa razlik med vrednostmi druge in tretje ponovitve preskusa ni bilo opaziti, medtem ko so bili v drugi polovici stopenj preskusne sile padci sile pri tretji ponovitvi še nižji do padcev sile pri drugi ponovitvi. Takšna ugotovitev potrjuje tezo, da je mehanizem delovanja natezno obremenjenega vzorca pramena pri nižjih silah drugačen od mehanizma pri višjih silah: pri nižjih silah so padci sile povezani s samim vnosom sile preko zagozd (čeljusti) v zunanje žice pramena, nato pa tudi od prerazporeditve sile iz zunanjih žic na osrednjo žico pramena, medtem ko se na višjih ravneh natezih napetosti v pramenu pojavljajo izgube, ki jih lahko pripisujemo tipični relaksaciji, kot je poznana pri prednapenjanju konstrukcij.
- V kolikor se preskus relaksacije ne ponovi takoj po končanem prvem preskusu, se stanje med žicami pramena vzorca pramena že pretežno umiri. Na vzorcu RV-1388 je bil izveden preskus izotermne relaksacije po standardu *SIST EN ISO 15630-3* v trajanju 1000 ur pri 70 % $F_{m,m}$, pri čemer je bila končna izmerjena vrednost relaksacije $\rho_{1000} = 2,03$ % v okviru zahtev standarda. Po končanem preskusu je bil vzorec odstranjen iz preskuševalne naprave in 11 dni v neobremenjenem stanju shranjen v laboratoriju, nato pa smo na njem izvedli preskus izotermne relaksacije po postopku za PS. Ugotovili smo, da so zaradi razlik v metodologiji prve (začetne) vrednosti relaksacije pri 1' pri metodi preskušanja po postopku PS sicer nekoliko višje, vendar pa je bil naklon krivulje lezenja (na ravni sile P_7 kot tudi sile P_8) pri preskušanju relaksacije po postopku

za PS manjši od naklona krivulje, dobljene po standardiziranem postopku preskušanja. Na podlagi enega ponovljenega preskusa lahko torej le indikativno ugotovimo, da so rezultati pri ponovljenem preskusu relaksacije na isti ravni natezne sile pri ponovljenem preskusu nekoliko nižji, kar se posredno preko izmerjenih manjših izvlečkov izkazuje kot navidezno večja odpornost veznega dela sidra na izvlek, vendar pa bi bilo za oceno dolgoročnega vpliva na zmanjšanje vrednosti ρ potrebno izvesti še dodatna preskušanja.

- Največji vpliv stalnega dodajanja upadlih sil ΔP pred izvedbo odčitkov v posameznih časovnih intervalih je opazen na samem začetku preskušanj, kjer so izgube sile predvsem posledica mehanizma vnosa sile v žice pramena in se s povečevanjem natezних obremenitev vzorcev pramen zmanjšujejo. V srednjem območju obremenitev pramena (nekje med 35 in 60 % R_m) je vpliv stalnega dodajanja upadlih sil praktično zanemarljiv, vendar pa spet pride do izraza pri višjih obremenitvah (> 60 % R_m), kjer je prisotna tipična relaksacija poznana iz prednapenjanja konstrukcij, kjer so upadi sile zaradi stalnega dodajanja upadlih sil bistveno bolj izraziti (slika F.22).

Skupna končna ugotovitev obeh **oddatkov E in F**, ki se nanašata na izvedene laboratorijske preskuse je, da moramo za natančno oceno nosilnostnih karakteristik pri PS izločiti vpliv motečih dejavnikov na končno oceno odpornosti sidra na izvlek R_a , kar še posebej velja za obvladovanje upadanja sile v natezno obremenjenih pramenih. Na ravnih prvih stopenjih sile PS so izmerjeni izvlečki in iz vrednotene mere lezenja k v pretežni meri posledica delovanja najrazličnejših motečih faktorjev in neposredno ne odražajo obnašanja veznega dela sidra, zato v tem območju sil s stalnim popravljanjem upadlih sil vpliv teh motečih dejavnikov še povečujemo. Na drugi strani se v območju višjih sil, ko napetosti v pramenih presežjo 60 % nazivne natezne trdnosti R_m , začne pojavljati prava relaksacija, poznana že pri prednapenjanju konstrukcij. Posledica tega pojava je stalen upad natezne sile v pramenu, ki pa pod pogojem brezhibnega stanja in delovanja opreme za napenjanje (hidravlične črpalke, hidravličnega razvoda in mononapenjalk) ostaja v omejenem obsegu vse do pojava prave relaksacije (> 60 % R_m), nato pa se glede na rezultate opravljenih laboratorijskih preskusov upadi sile začnejo opazno povečevati, tako da na zadnji stopnji sile PS v roku ene ure kumulativna vrednost upadlih sil znaša do 3,3 %. V praksi pri 6-pramenskem sidru to pomeni, da v roku ene ure iz naslova relaksacije pramen, obremenjenih na 80 % R_m , preskusna sila v sidru upade za približno 40 kN. Po drugi strani, bi lahko upadle sile pred izvedbo odčitkov vedno popravili na predpisano raven, vendar bi bilo potrebno za zagotovitev večje natančnosti postaviti višje zahteve za ločljivost dinamometrov, v primerjavi z dinamometri, ki se sedaj uporabljajo pri PS in preskusih nosilnosti prednapetih geotehničnih sider. V tem primeru bi bila ocena odpornosti preskusnega sidra na izvlek na varni strani, saj bi zaradi stalnega dodajanja upadlih sil sidro preskušali pri ostrejših pogojih, kot če upadlih sil ne bi stalno dodajali, zaradi česar lahko pričakujemo večje izvlečke pramen, višje mere lezenja k , s tem pa tudi nižjo vrednost odpornosti preskusnega sidra na izvlek R_a .