

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*



Jamova cesta 2
1000 Ljubljana, Slovenija
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

DRUGG – Digitalni repozitorij UL FGG
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

To je izvirna različica zaključnega dela.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

Golčman Ribič, S., 2013. Vpliv volumnske deformacije pri različnih napetostnih stanjih na strižno trdnost kemične sadre. Magistrska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Jovičič, V., somentorica Petkovšek, A.): 134 str.

University
of Ljubljana

Faculty of
*Civil and Geodetic
Engineering*



Jamova cesta 2
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

DRUGG – The Digital Repository
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is original version of final thesis.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Golčman Ribič, S., 2013. Vpliv volumnske deformacije pri različnih napetostnih stanjih na strižno trdnost kemične sadre. M.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Jovičič, V., co-supervisor Petkovšek, A.): 134 pp.

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*

Jamova 2, p.p. 3422
1115 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si



**MAGISTRSKI ŠTUDIJ
GRADBENIŠTVA
PROMETNA SMER**

Kandidatka:

SIMONA GOLČMAN RIBIČ, univ. dipl. inž. geol.

**VPLIV VOLUMSKE DEFORMACIJE PRI RAZLIČNIH
NAPETOSTNIH STANJIH NA STRIŽNO TRDNOST
KEMIČNE SADRE**

Magistrsko delo štev.: 239

**THE INFLUENCE OF VOLUME STRAIN ON SHEAR
STRENGTH OF CHEMICAL GYPSUM UNDER
VARIOUS STRESS CONDITIONS**

Master of Science Thesis No.: 239

Mentor:

doc. dr. Vojkan Jovičić, IRGO

Predsednik komisije:

izr. prof. dr. Marijan Žura

Somentorica:

doc. dr. Ana Petkovšek

Člana komisije:

prof. dr. Bojan Majes

doc. dr. Ana Mladenovič, ZAG

Ljubljana, 27. avgust 2013

»Ta stran je namenoma prazna.«

STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisana **SIMONA GOLČMAN RIBIČ**, univ. dipl. inž. geol. izjavljam, da sem avtorica magistrskega dela z naslovom: »**VPLIV VOLUMSKE DEFORMACIJE PRI RAZLIČNIH NAPETOSTNIH STANJIH NA STRIŽNO TRDNOST KEMIČNE SADRE**«.

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

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v repozitoriju.

Ljubljana, 27.8.2013

.....
(podpis)

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK	549.766.21:624.131(043.3)
Avtor	Simona Golčman Ribič, univ. dipl. inž. geol.
Mentor	doc. dr. Vojkan Jovičić, univ. dipl. inž. grad.
Somentorica	doc. dr. Ana Petkovšek, univ. dipl. inž. geol.
Naslov	Vpliv volumske deformacije pri različnih napetostnih stanjih na strižno trdnost kemične sadre
Obseg in oprema	134 str., 21 pregl., 81 sl., 39 en., 46 pril.
Ključne besede	Kemična sadra, strižna trdnost, volumska deformacija, konsolidacija, lezenje, tiksotropno otrjevanje

IZVLEČEK

Kemične sadre kot zemljini podoben material same ali v kombinaciji z drugimi materiali predstavljajo potencial za uporabo pri gradnji zemeljskih objektov. Glavne značilnosti kemičnih sader so visoka strižna trdnost, dolgotrajna konsolidacija, visoka topnost ter tiksotropno obnašanje. Raziskovalno delo je bilo zasnovano na hipotezi, da je kemična sadra primeren material za gradnjo različnih nasipov, pri čemer se moramo zavedati njenih posebnosti in omejitev. V nalogi so predstavljeni rezultati raziskav, katerih cilj je bil določiti nekatere trdnostne in deformacijske lastnosti kemičnih sader, proizvedenih v Sloveniji. Pri preiskavah direktnega striga smo ugotovili, da v času mirovanja porušeni vzorci kemičnih sader pride do povečanja strižne trdnosti, ki ni samo posledica zgoščanja, ampak se v tem času odvijajo še drugi procesi. Poleg lezenja so možni vzroki za takšno povečanje še tiksotropno otrjevanje, rekristalizacija in drugi. S kontrolnimi preiskavami smo izločili vpliv napake postopkov in aparature.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC	549.766.21:624.131(043.3)
Author	Simona Golčman Ribič, B. Sc.
Supervisor	assoc. prof. Vojkan Jovičić, Ph. D.
Co-advisor	assoc. prof. Ana Petkovšek, Ph. D.
Title	The influence of volume strain on shear strength of chemical gypsum under various stress conditions
Notes	134 p., 21 tab., 81 fig., 39 eq., 46 ann.
Key words	Synthetic gypsum, shear strength, volume strain, consolidation, creep, thixotropic hardening

ABSTRACT

Synthetic gypsum (also in combination with other materials) could be a suitable fill material for road embankments or earth dams, but we must consider its special geotechnical properties, which are a consequence of its origin. High shear strength, long term creep, thixotropic hardening, and high solubility are the main characteristics of chemical gypsum. The thesis was based on the hypothesis that chemical gypsum is a suitable material for the construction of various dams, but we must be aware of its characteristics and limitations. The paper presents the results of research aimed at defining some of the strength and deformation properties of some chemical gypsums produced in Slovenia. In direct shear tests we found that during the resting period the chemical gypsum samples increased their shear strength, which is not only a result of compaction, but also other processes that take place in this time. Possible causes for this increase besides creep are thixotropic hardening, recrystallization, and others. We performed control tests to exclude errors because of methods or apparatus.

ZAHVALA

Mentorju doc. dr. Vojkanu Jovičiču in somentorici doc. dr. Ani Petkovšek se zahvaljujem za strokovno pomoč in nasvete pri izdelavi magistrske naloge.

Zahvaljujem se tudi sodelavcem Maji Rojšek, Marjanu Filipiču, Mihi Peternelu in Niku Golešu za pomoč in nasvete pri laboratorijskih preiskavah ter dr. Mateju Mačku za izvedbo kontrolnih preiskav.

Zahvaljujem se mag. Mateji Golež za pomoč pri elektronski vrstični mikroskopiji.

Hvala Vladu Vukadinu za priložnost in vzpodbudo.

Hvala sodelavcem, ki so pomagali ustvarjati ugodno delovno okolje ter vsem ostalim, ki so kakorkoli pripomogli k izdelavi magistrske naloge.

Hvala Valentini in Mitju, ki sta se veselila z mano, ko je šlo in me vzpodbujala ter potrpeala, kadar je bilo težko.

KAZALO VSEBINE

1	UVOD	1
1.1	Izhodišče in namen naloge.....	1
1.2	Uporabljeni materiali.....	2
1.2.1	Energetska sadra iz Termoelektrarne Trbovlje.....	2
1.2.2	Titanova sadra iz Cinkarne Celje	3
1.2.3	Steklarska sadra iz Steklarne Rogaška	4
2	TEORETIČNE OSNOVE	5
2.1	Uvod	5
2.2	Trdnost zemljin in konsolidacija.....	6
2.2.1	Napetosti	6
2.2.2	Deformacije	8
2.2.3	Povezava napetosti in deformacij.....	9
2.2.4	Coulomb-ov zakon o strižni trdnosti zemljin	9
2.2.5	Totalna in efektivna napetost	10
2.2.6	Mohr-Coulombov kriterij porušitve.....	11
2.2.7	Določitev parametrov strižne trdnosti v laboratoriju	11
2.2.8	Konsolidacija	12
2.3	Sadra kot "zemljini podoben material"	18
2.3.1	Zemljinam podobni materiali.....	18
2.3.2	Naravna sadra.....	19
2.3.3	Kemična ali sintetična sadra	20
2.4	Tiksotropija	25
2.4.1	Reološke lastnosti tiksotropnih materialov	25
2.4.2	Tiksotropija in viskoznost	28
2.4.3	Tiksotropija zemljin	33
2.4.4	Tiksotropija sadre	41
2.5	Stabilnost in trajnost nasipov iz kemične sadre	44
2.5.1	Uporaba sadre pri gradnji cestnih nasipov.....	44
2.5.2	Stabilizacija kemične sadre	50
3	LABORATORIJSKE RAZISKAVE	52
3.1	Uvod	52
3.2	Odvzem vzorcev	52

3.3	Določanje vlage.....	52
3.4	Določanje količnika por in stopnje zasičenosti	53
3.5	Določanje relativne gostote vzorca.....	55
3.6	Elektronska vrstična mikroskopija (SEM).....	57
3.7	Določevanje zrnivosti	58
3.8	Določanje strižne trdnosti zemljin v laboratoriju	60
3.8.1	Direktni strig	60
3.8.2	Vgradnja vzorca za strižno preiskavo	63
3.8.3	Konsolidacija.....	67
3.8.4	Prekinitev striga	73
3.8.5	Preverjanje vpliva konsolidacije na strižno trdnost	74
3.8.6	Preglednica preiskovanih vzorcev	75
3.9	Preverjanje primerljivosti in ponovljivosti preiskav	76
3.9.1	Preverjanje v teku preiskav	76
3.9.2	Neodvisno preverjanje.....	77
4	PRIKAZ IN INTERPRETACIJA REZULTATOV.....	78
4.1	Uvod	78
4.2	Rezultati določanja vlage in stopnje zasičenosti.....	79
4.3	Rezultati določanja relativne gostote vgrajenih vzorcev	81
4.4	Rezultati elektronske vrstične mikroskopije (SEM)	84
4.5	Rezultati določevanja zrnivosti	89
4.6	Vpliv časovne komponente in volumske deformacije na strižno trdnost	92
4.6.1	Rezultati direktnega striga	92
4.6.2	Rezultati prekinitve striga	96
4.6.3	Rezultati preverjanja vpliva konsolidacije na strižno trdnost.....	106
4.7	Rezultati preverjanja primerljivosti in ponovljivosti preiskav	120
4.7.1	Rezultati preverjanja v teku preiskav	120
4.7.2	Rezultati neodvisnega preverjanja	122
5	DISKUSIJA IN ZAKLJUČKI.....	124
6	POVZETEK	130
7	SUMMARY	132
8	VIRI.....	134

KAZALO SLIK

Slika 2.1: Napetosti v točki tal (Maksimović, 2008).....	6
Slika 2.2: Prostor možnih napetostnih stanj (prirejeno po Maksimović, 2008).....	7
Slika 2.3: Opis napetosti z Mohrovim krogom (prirejeno po Maksimović, 2008).....	7
Slika 2.4: Mohrov krog deformacij - definicije deformacijskih parametrov (Maksimović, 2008)8	
Slika 2.5: Obremenitev prevzamejo delci zemljine in porna voda (prirejeno po Smith & Smith, 1998)	10
Slika 2.6: Komponente deformacije med konsolidacijo (prirejeno po Maksimović, 2008).....	13
Slika 2.7: Določanje koeficienta konsolidacije po metodi kvadratnega korena (Maksimović, 2008)	16
Slika 2.8: Določanje koeficienta konsolidacije po logaritemski metodi (prirejeno po Maksimović, 2008)	17
Slika 2.9: Kristalna struktura sadre (http://www.webmineral.com , 2012).....	19
Slika 2.10: Edometrska krivulja titanske sadre CC (Petkovšek in drugi, 2012).....	23
Slika 2.11: Oblike histereznih zank (Mewis in Wagner, 2009).....	31
Slika 2.12: Odziv tiksotropnega materiala glede na predhodno napetostno stanje (Mewis in Wagner, 2009).....	32
Slika 2.13: Dva načina preiskovanja tiksotropnih materialov (prirejeno po Barnes, 1997)	32
Slika 2.14: Vpliv časa mirovanja na izgradnjo strukture materiala (prirejeno po Cheng, D.C.H., 1987, cit. po Billberg, 2006).....	33
Slika 2.15: Odnos razdalje in energije med delci za dispergirane, flokulirane in tiksotropne materiale (prirejeno po Mitchell, 1960).....	35
Slika 2.16: Shematičen prikaz tiksotropnih strukturnih sprememb v drobnozrnatih zemljinah (prirejeno po Mitchell, 1960).....	37
Slika 2.17: Odnos razdalje in energije med delci v tiksotropni zemljini (prirejeno po Mitchell, 1960)	38
Slika 2.18: Tiksotropno razmerje trdnosti meljaste glin v odvisnosti od vsebnosti vode (prirejeno po Mitchell, 1960).....	40
Slika 2.19: Pojav tiksotropije pri zgoščanju steklarske sadre (Petkovšek, 2008).....	43
Slika 2.20: Postopno utekočinjenje materiala pri tehnoloških poskusih na terenu (Petkovšek, 2004)	43
Slika 2.21: Prerez in tloris eksperimentalnih nasipov z razporeditvijo merilne opreme (prirejeno po Gorle, 1978)	44
Slika 2.22: Porni tlaki v odvisnosti od globine od površja nasipa (prirejeno po Gorle, 1978). 46	
Slika 2.23: Razvoj posedkov: A-celotni, B-pesek in podlaga, C-sredina med površjem in peskom, (A-B)-samo fosforna sadra (prirejeno po Gorle, 1978)	47

Slika 3.1: Sušenje sadre in vzorci po sušenju	53
Slika 3.2: Tehnične specifikacije uporabljenega vrstičnega elektronskega mikroskopa (http://www.zag.si/dl/lablist/mikroskopija.pdf)	57
Slika 3.3: Sestav strižnega aparata s 60 mm celico, z detekcijo premikov in sile (prirejeno po Head, 1994)	61
Slika 3.4: Osnova preiskave direktnega striga: a) začetek testa, b) med preiskavo (prirejeno po Head, 1994)	61
Slika 3.5: Rezultat preiskave direktnega striga: a) krivulje strižne napetosti v odnosu do horizontalnega premika in b) maksimalna strižna napetost v odvisnosti od normalne napetosti - Coulombova ovojnica (prirejeno po Head, 1994)	62
Slika 3.6: Priprava steklarske sadre SR za vgradnjo	65
Slika 3.7: Razporeditev steklarske sadre SR v model in stiskanje po plasteh	65
Slika 3.8: Stiskanje vzorca s stiskalnico in merjenje pomika	65
Slika 3.9: Vzorec steklarske sadre SR, pripravljen za vgradnjo v strižno celico	66
Slika 3.10: Konsolidacija energetske sadre TET iz Termoelektrarne Trbovlje	68
Slika 3.11: Izpeljava hitrosti strižne deformacije iz konsolidacijske krivulje (prirejeno po Head, 1994)	69
Slika 3.12: Določitev hitrosti striženja iz nestandardne konsolidacijske krivulje (prirejeno po Head, 1994)	70
Slika 3.13: Konsolidacijske krivulje energetske sadre TET	71
Slika 3.14: Konsolidacijske krivulje titanove sadre CC	71
Slika 3.15: Konsolidacijske krivulje steklarske sadre SR	72
Slika 4.1: Posnetek energetske sadre TET z elektronskim vrstičnim mikroskopom, povečano 350 x	84
Slika 4.2: Posnetek titanove sadre CC z elektronskim vrstičnim mikroskopom, povečano 1000 x	85
Slika 4.3: Posnetek steklarske sadre SR z elektronskim vrstičnim mikroskopom, povečano 700 x	86
Slika 4.7: Primerjava a) energetske TET, b) titanove CC in c) steklarske SR sadre, povečane 500 x	88
Slika 4.5: Zrnovostna krivulja energetske sadre TET	89
Slika 4.6: Zrnovostna krivulja titanove sadre CC	90
Slika 4.7: Zrnovostna krivulja steklarske sadre SR	90
Slika 4.8: Primerjava zrnovostnih krivulja energetske TET, titanove CC in steklarske SR sadre	91
Slika 4.9: Rezultat preiskave direktnega striga na energetski sadri TET pri 4 različnih normalnih obremenitvah	93

Slika 4.10: Odvisnost med normalno efektivno napetostjo in strižno trdnostjo pri preiskavi direktnega striga na energetski sadri TET.....	93
Slika 4.11: Rezultat preiskave direktnega striga na titanovi sadri CC pri 4 različnih normalnih obremenitvah.....	94
Slika 4.12: Odvisnost med normalno efektivno napetostjo in strižno trdnostjo pri preiskavi direktnega striga na titanovi sadri CC	94
Slika 4.13: Rezultat preiskave direktnega striga na steklarski sadri iz SR pri 4 različnih normalnih obremenitvah.....	95
Slika 4.14: Odvisnost med normalno efektivno napetostjo in strižno trdnostjo pri preiskavi direktnega striga na steklarski sadri SR	95
Slika 4.15: Rezultat preiskave direktnega striga, po poružitvi prekinjenega za 24 ur, na energetski sadri TET	97
Slika 4.16: Rezultat preiskave direktnega striga, po poružitvi prekinjenega za 24 ur, na titanovi sadri CC	98
Slika 4.17: Rezultat preiskave direktnega striga, po poružitvi prekinjenega za 24 ur, na steklarski sadri SR.....	98
Slika 4.18: Rezultat preiskave direktnega striga, prekinjenega na 1/3 vrednosti strižne trdnosti, na energetski sadri TET pri 4 različnih normalnih obremenitvah.....	99
Slika 4.19: Rezultat preiskave direktnega striga, prekinjenega na 1/3 vrednosti strižne trdnosti, na titanovi sadri CC pri 4 različnih normalnih obremenitvah	100
Slika 4.20: Rezultat preiskave direktnega striga, prekinjenega na 1/3 vrednosti strižne trdnosti, na steklarski sadri SR pri 4 različnih normalnih obremenitvah	100
Slika 4.21: Primerjava rezultatov preiskav s prekinitvijo striga na energetski sadri TET	101
Slika 4.22: Primerjava rezultatov preiskav prekinitve striga na titanovi sadri CC.....	102
Slika 4.23: Primerjava rezultatov preiskav prekinitve striga na steklarski sadri SR	103
Slika 4.24: Odvisnost strižnega kota od časa mirovanja med preiskavo za energetsko TET, titanovo CC in steklarsko SR sadro.....	105
Slika 4.25: Povprečje vertikalnih deformacij med konsolidacijo preiskovanih vzorcev za vse tri vrste kemične sadre	108
Slika 4.26: Strižna napetost in vertikalne deformacije pri direktnem strigu steklarske sadre SR	109
Slika 4.27: Strižna napetost in vertikalne deformacije pri poskusu s 24-urno prekinitvijo striga energetske sadre TET.....	110
Slika 4.28: Strižna napetost in vertikalne deformacije pri poskusu s 24-urno prekinitvijo striga na 1/3 strižne trdnosti na energetski sadri TET.....	111
Slika 4.29: Strižna napetost in vertikalne deformacije pri poskusu direktnega striga po 1 dnevu konsolidacije na titanovi sadri CC.....	112

Slika 4.30: Spremembe količnika por med konsolidacijo in direktnim strigom pri energetski sadri TET	113
Slika 4.31: Spremembe količnika por med konsolidacijo in direktnim strigom pri titanovi sadri CC	114
Slika 4.32: Spremembe količnika por med konsolidacijo in direktnim strigom pri steklarski sadri SR	114
Slika 4.33: Razmerje τ/σ in σ v odvisnosti od količnika por in pri strižnih preizkusih na energetski sadri TET	116
Slika 4.34: Razmerje τ/σ in σ v odvisnosti od količnika por in pri strižnih preizkusih na titanski sadri CC	116
Slika 4.35: Razmerje τ/σ in σ v odvisnosti od količnika por in pri strižnih preizkusih na steklarski sadri SR	117
Slika 4.36: Razmerje τ/σ v odvisnosti od količnika por pri poskusu na vseh treh sadrah	118
Slika 4.37: Primerjava sprememb strižnih kotov za vse tri obravnavane sadre.....	118
Slika 4.38: Primerjava razmerja τ/σ vseh treh sader glede na: a) čas konsolidacije pred direktnim strigom in b) čas mirovanja po poružitvi	119
Slika 4.39: Rezultat preiskave direktnega striga, po poružitvi prekinjenega za 24 ur, na kamni moki Stahovica	120
Slika 4.40: Strižna napetost in vertikalne deformacije pri poskusu s 24-urno prekinitvijo striga na kamni moki Stahovica	121
Slika 4.41: Strižna napetost in vertikalne deformacije pri poskusu s 24-urno prekinitvijo striga na kamni moki Stahovica	121
Slika 4.42: Primerjava med testi, opravljenimi na različnih zemljinah in v različnih napravah (Maček in drugi, 2013)	122
Slika 4.43: Primerjava med napetostno in deformacijsko vodenim enostavnim strižnim preizkusom na energetski sadri TET (Maček in drugi, 2013).....	123

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 2.1: Primerjava fizikalnih lastnosti nekaterih kemičnih sader v Sloveniji (Petkovšek in drugi, 2012).....	23
Preglednica 2.2: Klasifikacija glin glede na njihovo občutljivost (Das, 2008).....	41
Preglednica 2.3: Nedrenirani parametri steklarske sadre, ki odražajo učinke tiksotropije (Petkovšek in drugi, 2008).....	42
Preglednica 3.1: Preglednica preiskovanih vzorcev za določanje stopnje zasičenosti po konsolidaciji	55
Preglednica 3.2: Maksimalna suha gostota in optimalna vlažnost treh vrst sader, proizvedenih v Sloveniji (Petkovšek in drugi, 2008)	63
Preglednica 3.3: Parametri za izračun mase pri vgradnji vzorca za strižno preiskavo	64
Preglednica 3.4: Preglednica preiskovanih vzorcev	75
Preglednica 3.5: Kemična sestava kamene moke Calcivit VP (http://www.calcit.si/).....	76
Preglednica 3.6: Fizikalne lastnosti kamene moke Calcivit VP (Mazurek, 2010).....	76
Preglednica 4.1: Povprečne vlage preiskovanih sader pri vgradnji in po strižni preiskavi	79
Preglednica 4.2: Povprečne vrednosti vlage in količnikov por po strižni preiskavi	80
Preglednica 4.3: Rezultati določanja stopnje zasičenosti po konsolidaciji.....	80
Preglednica 4.4: Rezultati določanja maksimalnega in minimalnega količnika por kemičnih sader.....	81
Preglednica 4.5: Povprečni količniki por kemičnih sader pred in po konsolidaciji pri preiskavah strižne trdnosti.....	82
Preglednica 4.6: Povprečne vrednosti relativne gostote kemičnih sader pri preiskavah strižne trdnosti.....	82
Preglednica 4.7: Kvalitativni opis gostote grobozrnatih zemljin po (a) Lambe in Whitman (1969) in (b) Meyerhof (1956, cit. po Maksimović, 2008)	83
Preglednica 4.8: Rezultat kvalitativne in kvantitativne kemične analize treh zrn v vzorcu energetske sadre TET	85
Preglednica 4.9: Rezultat kvalitativne in kvantitativne kemične analize štirih zrn v vzorcu titanove sadre CC.....	86
Preglednica 4.10: Rezultat kvalitativne in kvantitativne kemične analize 7 zrn v vzorcu steklarske sadre SR (zrni 6 in 7 sta izven slike - Slika 4.3)	87
Preglednica 4.11: Vrednosti strižnih kotov in navidezne kohezije pri različnih preiskavah na vseh treh preiskovanih sadrah.....	104
Preglednica 4.12: Vrednosti posedkov med konsolidacijo pred strižnimi preiskavami za vse vrste preiskovanih sader.....	107

LIST OF FIGURES

Figure 2.1: Three dimensional state of stress in soil (Maksimović, 2008)	6
Figure 2.2: Mohr strength envelope (adapted from Maksimović, 2008)	7
Figure 2.3: Mohr circle diagram (adapted from Maksimović, 2008).....	7
Figure 2.4: Mohr circle strain diagram - strain parameters definition (Maksimović, 2008)	8
Figure 2.5: Load carried by soil particles and pore water (adapted from Smith & Smith, 1998)	10
Figure 2.6: Consolidation stages (adapted from Maksimović, 2008).....	13
Figure 2.7: Coefficient of consolidation derivation using Taylor's method (Maksimović, 2008)	16
Figure 2.8: Coefficient of consolidation derivation using Casagrande's method (Maksimović, 2008).....	17
Figure 2.9: Crystal Structure of Gypsum (http://www.webmineral.com , 2012)	19
Figure 2.10: Oedometric curve of titanium gypsum CC (Petkovšek et al 2012).....	23
Figure 2.11: Fig. 7: Possible shapes of hysteresis loops (Mewis and Wagner, 2009)	31
Figure 2.12: Response of a thixotropic material to a complex shear history (Mewis and Wagner, 2009)	32
Figure 2.13: Two kinds of step experiment (adapted from Barnes, 1997).....	32
Figure 2.14: Structural build-up depending on resting time (adapted from Cheng, D.C.H., 1987, cit. po Billberg, 2006)	33
Figure 2.15: Energy-distance curves for dilute suspensions of dispersed, flocculated and thixotropic materials (adapted from Mitchell, 1960)	35
Figure 2.16: Schematic diagram of thixotropic structure change in a fine graded soil (adapted from Mitchell, 1960).....	37
Figure 2.17: Energy-distance curves for a thixotropic soil (adapted from Mitchell, 1960)	38
Figure 2.18: Thixotropic strength ratio for silty clay as a function of molding water content (adapted from Mitchell, 1960)	40
Figure 2.19: Glass gypsum thixotropy phenomena during compaction (Petkovšek, 2008).....	43
Figure 2.20: Material progressive liquefaction during technological field tests (Petkovšek, 2004).....	43
Figure 2.21: Vertical section and top view of the eksperimental embankments, with disposition of the measuring equipment (adapted from Gorle, 1978)	44
Figure 2.22: Pore water pressures in relation to the depth under the upper surface of the embankment (adapted from Gorle, 1978).....	46

Figure 2.23: Evolution of the settlements A: total; B: sand and subsoil; C: half distance between the surface and the sand; (A-B): phosphogypsum only (adapted from Gorle, 1978)	47
Figure 3.1: Gypsum during drying and dry samples of gypsum.....	53
Figure 3.2: SEM technical specifications (http://www.zag.si/dl/lablist/mikroskopija.pdf).....	57
Figure 3.3: Arrangement of conventional 60 mm shearbox apparatus with displacement control (adapted from Head, 1994)	61
Figure 3.4: Principle of shearbox test: a) start of test, b) during relative displacement (adapted from Head, 1994)	61
Figure 3.5: Direct shear test result: a) shear stress/displacement curves and b) maximum shear stress related to normal stress - Coulomb envelope (adapted from Head, 1994)	62
Figure 3.6: Glass gypsum prepared for compaction	65
Figure 3.7: Placing glass gypsum in to the square specimen cutter and compacting by layers	65
Figure 3.8: Compacting with hidraulic press and displacement measurements	65
Figure 3.9: Glass gypsum sample ready to put in to the shearbox.....	66
Figure 3.10: Consolidation curves of FGD gypsum from Power plant Trbovlje	68
Figure 3.11: Derivation of time to failure from consolidation curve (adapted from Head, 1994)	69
Figure 3.12: Derivation of time to failure from "non-standard" consolidation curve (adapted from Head, 1994)	70
Figure 3.13: Consolidation curves of FGD gypsum TET	71
Figure 3.14: Consolidation curves of titanium gypsum CC	71
Figure 3.15: Consolidation curves of glass gypsum SR	72
Figure 4.1: SEM micrograph of FGD gypsum TET, mag. 350 ×	84
Figure 4.2: SEM micrograph of titanium gypsum CC, mag. 1000 ×.....	85
Figure 4.3: SEM micrograph of glass gypsum SR, mag. 700 ×	86
Figure 4.7: FGD gypsum TET (a), titanium gypsum CC (b) and glass gypsum SR, mag. 500 ×	88
Figure 4.5: Granulometric curve of FGD gypsum TET	89
Figure 4.6: Granulometric curve of titanium gypsum CC	90
Figure 4.7: Granulometric curve of glass gypsum SR	90
Figure 4.8: Comparison of granulometric curves of FGD TET, titanium CC and glass SR gypsum.....	91
Figure 4.9: Shear stress/displacement curves for FGD gypsum TET specimens under 4 different normal pressures.....	93

Figure 4.10: Maximum shear stress related to effective normal stress for FGD gypsum TET	93
Figure 4.11: Shear stress/displacement curves for titanium gypsum CC specimens under 4 different normal pressures	94
Figure 4.12: Maximum shear stress related to effective normal stress for titanium gypsum CC	94
Figure 4.13: Shear stress/displacement curves for glass gypsum SR specimens under 4 different normal pressures	95
Figure 4.14: Maximum shear stress related to effective normal stress for glass gypsum SR	95
Figure 4.15: Shear stress/displacement curves as result of direct shear tests which have been stoped after failure and carried on after 24 hours - FGD gypsum TET	97
Figure 4.16: Shear stress/displacement curves as result of direct shear tests which have been stoped after failure and carried on after 24 hours titanium gypsum CC	98
Figure 4.17: Shear stress/displacement curves as result of direct shear tests which have been stoped after failure and carried on after 24 hours - glass gypsum SR	98
Figure 4.18: Shear stress/displacement curves as result of direct shear tests which have been stoped at value of 1/3 shear strenght and carried on after 24 hours - FGD gypsum TET	99
Figure 4.19: Shear stress/displacement curves as result of direct shear tests which have been stoped at value of 1/3 shear strenght and carried on after 24 hours - titanium gypsum CC	100
Figure 4.20: Shear stress/displacement curves as result of direct shear tests which have been stoped at value of 1/3 shear strenght and carried on after 24 hours - glass gypsum SR	100
Figure 4.21: Coulomb envelopes from direct shear test and from those shear tests which have been stoped at certain value and then carried on after 24/72 hours - FGD gypsum TET	101
Figure 4.22: Coulomb envelopes from direct shear test and from those shear tests which have been stoped at certain value and then carried on after 24/72 hours - titanium gypsum CC	102
Figure 4.23: Coulomb envelopes from direct shear test and from those shear tests which have been stoped at certain value and then carried on after 24/72 hours - glass gypsum SR	103
Figure 4.24: Angle of shear resistance/resting time after failure curves for FGD gypsum TET, titanium gypsum CC and glass gypsum SR	105
Figure 4.25: Average settlements during consolidation of investigated synthetic gypsums	108

Figure 4.26: Shear stress and vertical strain curves from direct shear tests on glass gypsum SR	109
Figure 4.27: Shear stress and vertical strain curves from direct shear test with 24-hours resting time on FGD gypsum TET	110
Figure 4.28: Shear stress and vertical strain curves from direct shear test with 24-hours resting time on 1/3 of shear strength on FGD gypsum TET	111
Figure 4.29: Shear stress and vertical strain curves from direct shear test with consolidation lasting one day on titanium gypsum CC	112
Figure 4.30: Void ratio changes during consolidation and direct shear tests on FGD gypsum TET	113
Figure 4.31: Void ratio changes during consolidation and direct shear tests on titanium gypsum CC	114
Figure 4.32: Void ratio changes during consolidation and direct shear tests on glass gypsum SR	114
Figure 4.33: τ/σ ratio and σ against void ratio from direct shear tests on FGD gypsum TET	116
Figure 4.34: τ/σ ratio and σ against void ratio from direct shear tests on titanium gypsum CC	116
Figure 4.35: τ/σ ratio and σ against void ratio from direct shear tests on glass gypsum SR	117
Figure 4.36: τ/σ ratio against void ratio from direct shear tests on all three investigated gypsums	118
Figure 4.37: Angles of shear resistance for all investigated gypsums	118
Figure 4.38: τ/σ ratio for all investigated gypsums against: a) consolidation time before direct shear test and b) after failure resting time	119
Figure 4.39: Shear stress/displacement curves as result of direct shear tests which have been stopped after failure and carried on after 24 hours – stone powder Stahovica	120
Figure 4.40: Maximum shear stress related to effective normal stress for stone powder Stahovica	121
Figure 4.41: Shear stress and vertical strain curves from direct shear test with 24-hours resting time on stone powder Stahovica	121
Figure 4.42: Test results from different investigations made on different materials (Maček et al, 2013)	122
Figure 4.43: Stress and strain controlled measurements on simple shear device - FGD gypsum TET (Maček et al, 2013)	123

LIST OF TABLES

Table 2.1: Geotechnical characterization of five typical synthetic gypsums in Slovenia (Petkovšek et al, 2012)	23
Table 2.2: The classification of clays based on sensitivity (Das, 2008).....	41
Table 2.3: Undrained characteristics of glass gypsum illustrating the effect of tixotropy (Petkovšek et al, 2008)	42
Table 3.1: List of investigated samples for determination of degree of saturation after consolidation	55
Table 3.2: Maximum dry density and optimum water content of investigated gypsums (Petkovšek et al, 2008)	63
Table 3.3: Input parameters used for determination the amount of sample for direct shear tests	64
Table 3.4: List of investigated samples.....	75
Table 3.5: Chemical composition of stone powder Calcivit VP (http://www.calcit.si/)	76
Table 3.6: Physical properties of stone Powder Calcivit VP (Mazurek, 2010)	76
Table 4.1: Average water content of investigated samples before and after direct shear tests	79
Table 4.2: Average water content and void ratio after direct shear tests.....	80
Table 4.3: Degree of saturation after consolidation	80
Table 4.4: Maximum and minimum void ratio of investigated gypsums	81
Table 4.5: Average void ratio of synthetic gypsums before and after consolidation.....	82
Table 4.6: Average relative density of synthetic gypsums before and after consolidation ...	82
Table 4.7: Relative density classification system after (a) Lambe in Whitman (1969) and (b) Meyerhof (1956, in Maksimović, 2008)	83
Table 4.8: Qualitative and quantitative elemental analysis of three grains in TET gypsum sample	85
Table 4.9: Qualitative and quantitative elemental analysis of four grains in CC gypsum sample	86
Table 4.10: Qualitative and quantitative elemental analysis of seven grains in SR gypsum sample	87
Table 4.11: Angles of shear resistance (in terms of effective stress) and apparent cohesion values from different shear tests on investigated synthetic gypsums	104
Table 4.12: Settlements during consolidation of investigated synthetic gypsums.....	107

SIMBOLI IN OKRAJŠAVE

Simbol	Enota	Opis
σ	kPa	totalna normalna napetost
τ	kPa	strižna napetost
σ_1, σ_2 in σ_3	kPa	glavne napetosti
$\sigma_1 - \sigma_3$	kPa	deviator napetosti
θ	°	kot med normalo poljubne ravnine in smerjo maksimalne glavne napetosti
τ_{max}	kPa	maksimalna strižna napetost
ε	-	specifična deformacija
$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$	-	glavne specifične deformacije
γ_{xy}	-	strižna deformacija
e	-	količnik por
τ_f	kPa	strižna napetost ob porušitvi, t.i. strižna trdnost
c	kPa	kohezija zemljine
φ	°	strižni kot zemljine ali kot notranjega trenja
φ'	°	strižni kot zemljine za efektivne napetosti
σ'	kPa	efektivna normalna napetost
u	kPa	porni tlak
k	m/s	koeficient vodoprepustnosti
E_{oed}	kN/m ²	modul stisljivosti
ρ	kg/m ³	gostota
ρ_w	kg/m ³	gostota vode
ρ_s	kg/m ³	gostota trdnine
g	m/s ²	gravitacijski pospešek
c_v	m ² /s	koeficient konsolidacije
U	-, %	stopnja konsolidacije
T_v	-	časovni faktor konsolidacije
c_u	kPa	nedrenirana strižna trdnost
V	m ³	volumen
V_v	m ³	volumen por
V_s	m ³	volumen trdnine
W	kN	teža
W_s	kN	teža trdnine
W_w	kN	teža vode
m	kg	masa
m_s	kg	masa trdnine
m_w	kg	masa vode
γ_s	kN/m ³	specifična prostorninska teža, izražena kot razmerje γ_s/γ_w
γ_w	kN/m ³	prostorninska teža vode
S_r	-, %	stopnja zasičenosti
w	%	vlaga
G_s	-	specifična teža
e_{max}	-	maksimalni količnik por
e_{min}	-	minimalni količnik por
D_r	%	relativna gostota
E_{VD}	MPa	dinamični deformacijski modul
D_{pr}	%	relativna gostota po Proctorju
η	kg/ms	viskoznost

Okrajšava	Opis
TET	Termoelektrarna Trbovlje
CC	Cinkarna Celje
SR	Steklarna Rogaška
FGD Gypsum , REA Gips	Flue Gas Desulphurisation Gypsum , Rauchgas Entschweflungs Anlagen Gips - energetska sadra
BCS	Blended Calcium Sulfate - sadra z dodatkom apna ali apnenca
SEM	Scanning Elektron Microscopy - elektronska vrstična mikroskopija
EDS	Energy Dispersive Spectroscopy - energijska disperzijska spektroskopija
VTN	Veliki tehnološki nasip
MEN	Mali ekološki nasip
IRGO	Inštitut za rudarstvo, geotehnologijo in okolje
NRDP	Naprava za razžvepljevanje dimnih plinov

1 UVOD

1.1 Izhodišče in namen naloge

Sadra se kot naravni material nahaja v sedimentnih kamninah. Kemične sadre pa nastajajo v kemičnih tovarnah ali v energetskih objektih kot stranski produkt različnih tehnoloških procesov. Kemične sadre so poimenovane po proizvodnji, v kateri nastajajo in so specifične zaradi primesi ter velikosti in oblike kristalov, ki jih vsebujejo. V Sloveniji največje količine sadre nastajajo pri čiščenju dimnih plinov, ki nastajajo pri izgorevanju fosilnih goriv v termoelektrarnah (energetska sadra) in pri procesih nevtralizacije kislin v različnih proizvodnih procesih (titanova sadra, steklarska sadra ipd).

Vse strožji predpisi o zaščiti človekovega okolja so v večini razvitih držav že pripomogli, da je vsak večji vir SO₂ opremljen z razžvepljevalno napravo, s tem pa je pogojen tudi nastanek velikih količin energetske sadre. Države, kot sta Japonska in Nemčija, že vso energetsko, kakor tudi druge vrste kemičnih sader z ustreznimi postopki predelave uporabljajo v številnih panogah, kot so: proizvodnja cementa, gradbeništvo, poljedelstvo, sadjarstvo itd. V Sloveniji nastane približno 600.000 ton kemijske sadre letno, ki se deloma porabi na zgoraj omenjene načine, deloma pa se z njo zapolnjujejo opuščeni rovi rudnikov ali pa se odlaga na posebnih odlagališčih.

Predmet mojega raziskovanja so bile kemične sadre različnega izvora (energetska sadra iz Termoelektrarne Trbovlje, titanova sadra iz Cinkarne Celje in steklarska sadra iz Steklarne Rogaška), ki same ali v kombinaciji z elektrofiltrskim pepelom, apnom in drugimi gradivi predstavljajo potencial za uporabo pri gradnji prometne infrastrukture, denimo za spodnji ustroj cest, nasipe ipd.

Kemične sadre so zaradi oblike in velikosti zrn, ki nastajajo v suspenziji, specifični materiali. Po zrnavostni sestavi so ti materiali melji in drobni peski in jih deloma lahko obravnavamo s stališča geomehanike in inženirske geologije, vendar je potrebno upoštevati tudi njihovo kemično aktivnost. Zaradi izrazite enoosno usmerjene rasti zrn se ta sedimentirajo v rahli strukturi, ki se ob zunanji obremenitvi hipno podre, material pa ima značilne tiksotropne lastnosti. Tiksotropija je glavni razlog, da se sadra v Sloveniji stabilizira z elektrofiltrskim pepelom, ki izboljša njene geomehanske lastnosti in zmanjša pojave tiksotropije (Petkovšek et al, 2008).

Pri nizkih gostotah lahko plasti sadre sprejmejo in zadržujejo precejšnje količine vode, ki pronicajo s površja ali iz zaledja. Sadra je v vodi delno topna, pri spremembah pogojev v geološkem okolju pa lahko precipitira iz zasičene porne vode. V primeru nasipov (pregrad) se na tak način bistveno zmanjša učinkovitost talnih drenaž, kar je bilo opaženo na jalovišču uranske jalovine Boršt (Petkovšek, 2004).

Konsolidacija kemične sadre poteka počasi. Pri konsolidaciji zemljin ločimo dve fazi. Pri primarni konsolidaciji gre za prenos obtežbe iz vodne na trdno fazo materiala. Sekundarna konsolidacija je posledica plastične reorientacije zrn zaradi spremenjenega nivoja napetosti, progresivnega loma med zrn in progresivnega loma posameznih zrn. Pri kemični sadri je potek sekundarne konsolidacije zaradi viskoznega lezenja zelo dolgotrajen.

Moje raziskovalno delo je bilo zasnovano na hipotezi, da je kemična sadra primeren material za gradnjo različnih nasipov, pri čemer se moramo zavedati njenih posebnosti in omejitev. Kemična sadra ne sodi med tradicionalne materiale, ki se sicer preiskujejo v geomehanskih laboratorijih in se vgrajujejo v nasipe, zato so podatki o njenih geomehanskih lastnostih omejeni. Namen raziskovalnega dela je bil določiti nekatere trdnostne in deformacijske lastnosti kemične sadre za njeno potencialno rabo kot nasipni material. Med zastavljenimi cilji je bila tudi določitev vpliva nivoja napetosti, časa konsolidacije ter z njima povezanih volumskih deformacij na razvoj oz. izgubo strižne trdnosti kemične sadre.

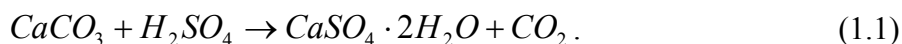
V okviru raziskovalnega dela sem najprej zbrala in preučila obstoječo literaturo o kemični sadri na splošno, o proizvodnji kemične sadre v Sloveniji, o izkušnjah pri vgrajevanju kemične sadre v nasipe in o konsolidaciji in tiksotropiji kemične sadre. Na podlagi znanih podatkov, razpoložljivega materiala in razpoložljive opreme sem zasnovala laboratorijske preiskave. Večji del preiskav je bil izveden z aparatom za direktne strižne preiskave, še pred tem pa sem sadro preiskala z elektronskim vrstičnim mikroskopom, ji določila zrnastost, vlago in relativno gostoto. Podatki, pridobljeni z mojim raziskovalnim delom, so prispevek k boljšemu razumevanju mehanskega obnašanja kemične sadre, vendar pa bo pred končno rabo potrebno osvetliti še druge vidike, pomembne za trajnost objektov iz sadre.

1.2 Uporabljeni materiali

1.2.1 Energetska sadra iz Termoelektrarne Trbovlje

V Termoelektrarni Trbovlje (TET) v procesu razžvepljevanja dimnih plinov nastaja sadra kot stranski produkt. V tehnološkem procesu naprave za razžvepljevanje dimnih plinov (NRDP) se kot aditiv, ki se dozira kot reagent v pralnik dimnih plinov, uporablja apnenčeva moka, ki

vsebuje več kot 95 % kalcijevega karbonata (CaCO_3), ostalo pa so druge primesi. V spodnjem delu pralnika poteka reakcija med apnenčevo moko in kislimi vodami po formuli:



V energetski sadri TET se poleg sadre nahajajo še druge snovi, kot so nezreagirani CaCO_3 , CaCl_2 , inertne snovi iz apnenca in delci EF pepela, kot so SiO_2 , Fe_2O_3 in druge (Renko, 2006). Del nastale sadre transportirajo po traku na deponijo Prapretno, kjer se odlaga skupaj z EF peplom in žlindro, glavnino sadre pa prodajo za proizvodnjo cementa in mavčnih plošč.

TET mora zagotoviti varno odlaganje treh vrst odpadkov: elektrofiltrskega pepela, žlindre in sadre. Do leta 2008 so pepel in sadro transportirali na vrh odlagališča, od koder so odpadki prosto padali in tvorili brežino odlagališča z naklonom $35 - 40^\circ$, tik pod iztresališčem pa je brežina dosegala tudi 60° (Pogačnik, 2007). V letu 2008 so uvedli novo tehnologijo odlaganja. Sedaj odpadke vgrajujejo od spodaj navzgor in oblikujejo berme višine 10 in širine 5 metrov z naklonom 40° . Odpadke vgrajujejo v plasteh debeline do 50 cm, jih sproti vlažijo in utrjujejo. Ko je berma oblikovana, se izvede še prekrivna plast zemljine, humusa ter zasaditev drevesnih vrst in zatravitev (<http://www.hse.si>, 2013).

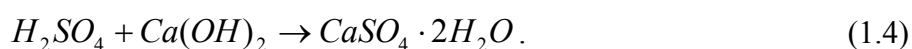
V Zasavju je bil ustanovljen Razvojni center Novi materiali, ki poleg TET vključuje še 11 gospodarskih družb. V konzorcij Novi materiali se je TET vključila s projektom novi materiali in nova energija, v okviru katerega bodo raziskovali možnost reciklaže in nadaljnje uporabe stranskih produktov (elektrofiltrski pepel, sadra in žlindra), ki bi se lahko uporabljali v gradbeništvu in industriji (napr. za saniranje ugrezninskih površin, za grajenje nasipov in cestnih tamponov, za uporabo v cementarnah in betonarnah itd) (<http://www.tet.si>, 2013).

1.2.2 Titanova sadra iz Cinkarne Celje

V Cinkarni Celje nastaja titanova sadra CC v postopku nevtralizacije odpadne žveplove kisline. Titanov dioksid pridobivajo po sulfatnem postopku iz ilmenita in titanove žlindre, pri tem nastaja odpadna žveplena kislina:



Kislino nevtralizirajo dvostopenjsko z apnencem in hidratiziranim apnom:



Pri prvi stopnji nevtralizacije nastane razmeroma čista sadra, svetle krem barve (imenovana bela sadra), medtem ko so v nevtralizacijskem blatu po drugi stopnji oprisotne železove spojine, ki dajejo produktu značilno rjavo rdečo barvo (Ljubičič in drugi, 2000).

Belo sadro tržijo (napr. kot dodatek v proizvodnji cementa), rdečo sadro pa črpajo po 3,6 km dolgem cevovodu na deponijo Za Travnikom. Trdi delci sadre se v vodi posedejo in zgostijo, bistri del (voda) pa odteka v vodotok. Cinkarna Celje se je leta 1999 odločila za spremembo odlaganja sadre v ekološko prijaznejši in varnejši način suhega zapolnjevanja. Suspenzijo sadre ožamejo na filter stiskalnicah. Nastane trda pogača, ki jo postopno vgrajujejo na naravno osušeni rob mokrega odlagališča. Ožeta sadra izpodriva mehko sadro. Sadro iz mokrega odlagališča s črpalnim bagrom črpajo v rezervoar, kjer se meša s svežo suspenzijo sadre. Postopek praznjenja in zapolnjevanja z ožeto, za vodo slabo prepustno sadro, bo trajal vse do zapolnitve celotne doline, zatraitve in vrnitve celotne površine v koristno uporabo (<http://www.cinkarna.si>, 2011).

Cinkarna Celje v sodelovanju s strokovnjaki s Katedre za mehaniko tal z laboratorijem Fakultete za gradbeništvo in geodezijo v Ljubljani od leta 2011 izvaja raziskovalni projekt, ki obsega izvedbo dveh ločenih poskusnih nasipov iz rdeče titanove sadre. Večji od obeh nasipov (imenovan veliki tehnološki nasip – VTN) je prvenstveno namenjen monitoringu trdnostno-deformacijskega obnašanja sadre v nasipu, podrejeno pa tudi spremljanju trajnih in sezonsko pogojenih sprememb gibanja vlage in sukcije. Mali ekološki nasip - MEN je namenjen potrebam hidrogeoloških analiz (Petkovšek, 2010).

1.2.3 Steklarska sadra iz Steklarne Rogaška

Steklarna Rogaška proizvaja različne vrste odpadkov, od katerih je količinsko najvažnejša odpadna steklarska sadra SR, ki nastaja pri nevtralizaciji kislih odpadnih vod, nastalih pri kemičnem poliranju brušenih kristalnih izdelkov. Brezovnik (2007) opisuje proces nastajanja steklarske sadre v Steklarni Rogaška. Mešanico odpadnih vod sestavljajo fluorovodikova kislina (HF), žveplena kislina (H_2SO_4) in heksafluoro silicijeva kislina (H_2SiF_6). Mešanico nevtralizirajo z apnenim mlekom $Ca(OH)_2$. Suspenzijo, ki vsebuje približno 15 % trdne snovi, filtrirajo v filtrskih stiskalnicah. Produkt filtriranja je pogača, ki vsebuje približno 45 % vlage. Trdno snov predstavljajo predvsem sadra $CaSO_4 \times 2H_2O$, kalcijev fluorid CaF_2 , magnezijev fluorid MgF_2 in v manjši meri še svinčev sulfat $PbSO_4$. Delno topna je samo sadra, ostali so v vodi netopni. Steklarna Rogaška odlaga sadro na deponiji industrijskih odpadkov Tuncovec pri Rogaški Slatini skupaj z odpadnimi steklenimi črepinjami.

2 TEORETIČNE OSNOVE

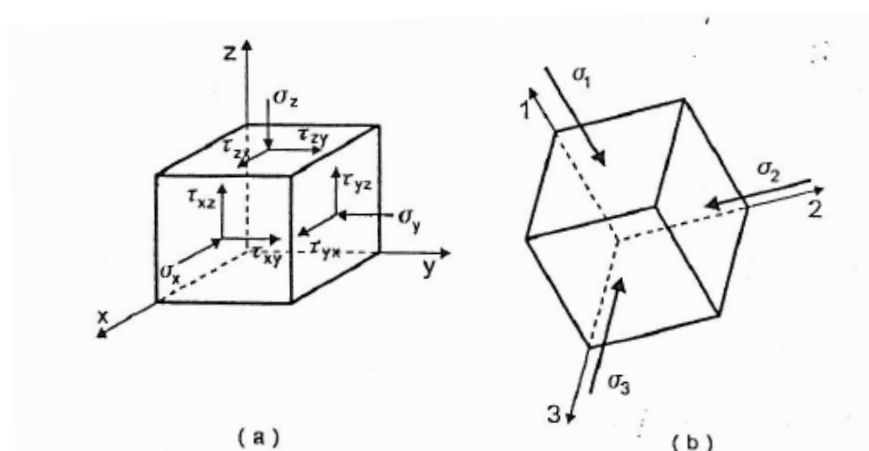
2.1 Uvod

Pri svojem raziskovalnem delu sem kemično sadro različnega izvora obravnavala kot zemljini podoben material in sem jo kot tako preiskovala v Geomehanskem laboratoriju IRGO. Predmet raziskovanja je bil njen odziv na razmere, ki bi vladale v nasipu, zgrajenem iz tovrstnega materiala. V ta namen podajam osnovne zakonitosti s področja trdnosti in konsolidacije zemljin ter opišem sadro kot zemljini podoben material, ki ima določene posebnosti in omejitve. Opišem tudi pojav tiksotropije, ki je bil opažen pri vseh vrstah kemičnih sader. Navajam tudi izkušnje z gradnjo nasipov (predvsem cestnih) iz kemične sadre in nekaj primerov njene stabilizacije.

2.2 Trdnost zemljin in konsolidacija

2.2.1 Napetosti

Splošni primer napetostnega stanja v točki opišemo s stanjem napetosti, ki deluje na elementarno kocko kontinuuma (Slika 2.1a). Na vsako od šestih ploskev elementarne kocke obremenjenega kontinuuma delujeta normalna in strižna napetost. V mehaniki tal se, v skladu z dogovorom, tlačne napetosti smatrajo kot pozitivne. Iz napetostne analize izhaja, da za neko dano napetostno stanje obstajajo tri medsebojno pravokotne ravnine, v katerih so strižne napetosti ničelne, normalne napetosti pa imenujemo glavne napetosti in jih označimo s σ_1 , σ_2 in σ_3 (Slika 2.1b).



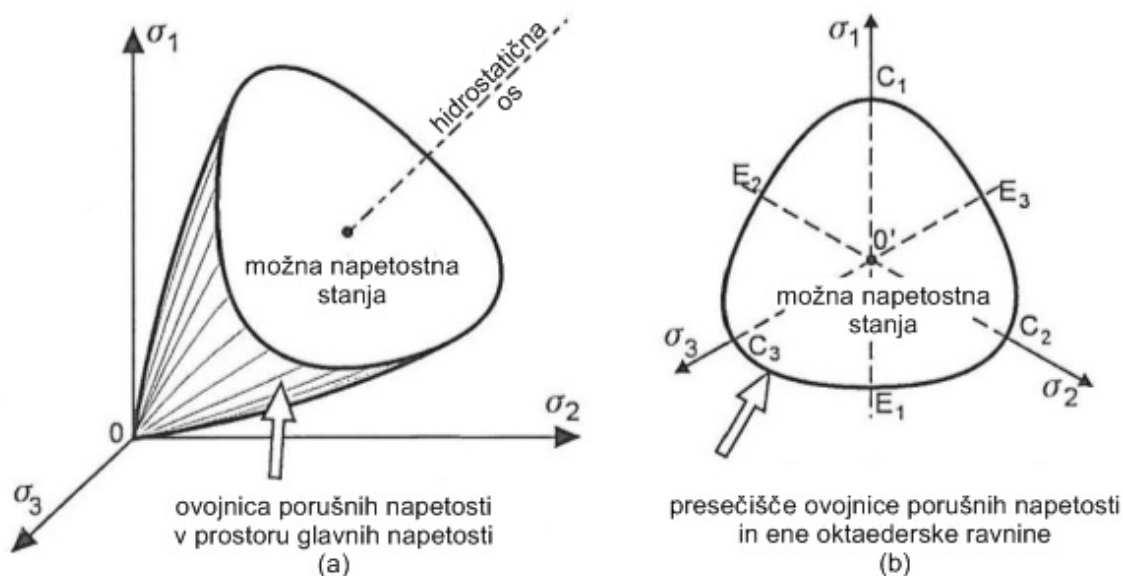
Slika 2.1: Napetosti v točki tal (Maksimović, 2008)

Figure 2.1: Three dimensional state of stress in soil (Maksimović, 2008)

Vsi materiali (tudi zemljine) imajo trdnost, ki omejuje možna napetostna stanja, ki jih ta material lahko prenaša. Odvisnosti med napetostmi in deformacijami znotraj teh omejitev opisujejo modeli obnašanja zemljin, ki jih imenujemo konstitutivni modeli. Na sliki (Slika 2.2) je prikazana ovojnica porušnih napetosti v prostoru glavnih napetosti. V mehaniki tal se najbolj pogosto obravnava dvodimenzionalno napetostno stanje, t.j. takšno stanje, ki je popolno definirano z dvema glavnima napetostima: σ_1 in $\sigma_2 = \sigma_3$. Ena od važnih spremenljivk, ki nastopajo v takšnem pristopu, se imenuje deviator napetosti in je razlika glavnih napetosti ($\sigma_1 - \sigma_3$).

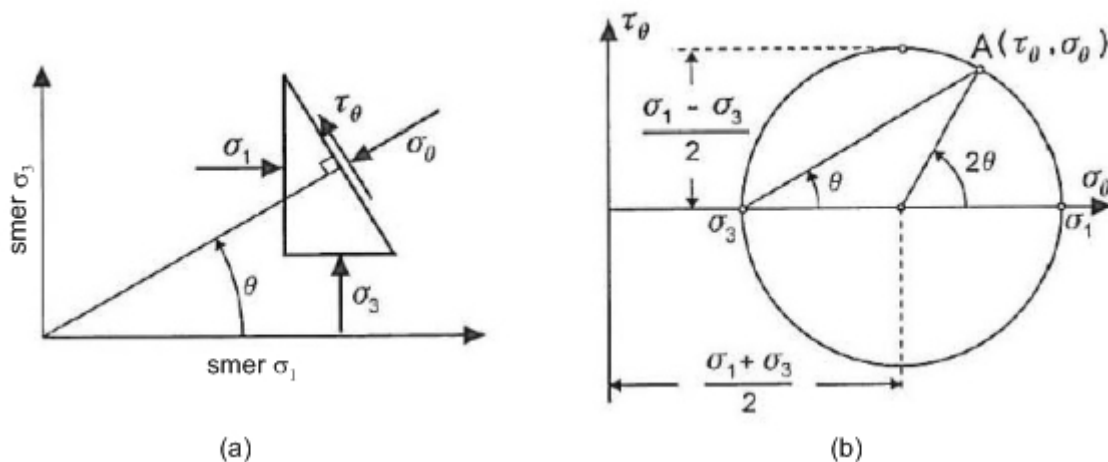
Če poznamo velikost in smer glavnih napetosti σ_1 in σ_3 , lahko izračunamo normalno in strižno napetost za vsako ravnino s poljubno orientacijo (Slika 2.3a). Velja pa tudi obratno: če poznamo normalno in strižno napetost, ki deluje na katerikoli dve ravnini v prostoru, potem lahko izračunamo tudi smer in velikost glavnih napetosti. Enačbe, ki popolnoma opišejo napetostno stanje, definirajo enačbo Mohrovega kroga. Vsaka točka na Mohrovem krogu

predstavlja napetostno stanje ravnine, katere normala oklepa z normalo ravnine maksimalne glavne napetosti kot θ (Slika 2.3b).



Slika 2.2: Prostor možnih napetostnih stanj (prirejeno po Maksimović, 2008)

Figure 2.2: Mohr strength envelope (adapted from Maksimović, 2008)



Slika 2.3: Opis napetosti z Mohrovim krogom (prirejeno po Maksimović, 2008)

Figure 2.3: Mohr circle diagram (adapted from Maksimović, 2008)

$$\sigma_{\theta} = \sigma_1 \cos^2 \theta + \sigma_3 \sin^2 \theta = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\theta \quad (2.1)$$

$$\tau_{\theta} = (\sigma_1 - \sigma_3) \sin \theta \cos \theta = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\theta \quad (2.2)$$

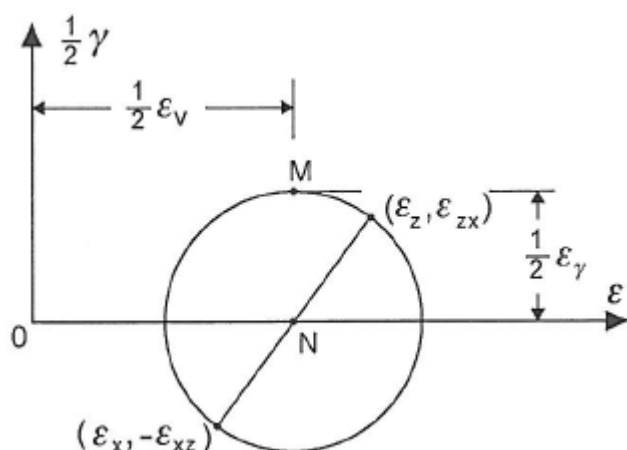
Iz izrazov 2.1 in 2.2 ter iz slike Mohrovega kroga (Slika 2.3b) je razvidno, da je maksimalna strižna napetost:

$$\tau_{\max} = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{2}, \quad (2.3)$$

torej da je enaka polmeru Mohrovega kroga. Takšna strižna napetost deluje v ravnini, ki z ravnino maksimalne glavne napetosti oklepa kot $\pm 45^\circ$. V geostatičnih napetostnih pogojih maksimalne strižne napetosti delujejo v ravnini, ki oklepajo kot 45° glede na horizontalo.

2.2.2 Deformacije

Analogno kot napetosti, opisujemo tudi deformacijska stanja. Deformacijo, opisano z glavnimi specifičnimi deformacijami ($\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$), lahko razčlenimo na spremembo volumna (volumetrijska deformacija) in spremembo oblike (distorzijska deformacija). Trenutno stanje deformacije lahko prikažemo z Mohrovim krogom deformacij, pri čemer osi Mohrovih krogov predstavljajo velikost normalnih deformacij in deformacij čistega striga in da je $\varepsilon_{xy} = (1/2) \gamma_{xy}$, pri čemer je γ_{xy} inženirska mera za strižno deformacijo (Slika 2.4).



Slika 2.4: Mohrov krog deformacij - definicije deformacijskih parametrov (Maksimović, 2008)

Figure 2.4: Mohr circle strain diagram - strain parameters definition (Maksimović, 2008)

V primeru eno-dimenzionalne deformacije, ki prevladuje v edometriškem preizkusu (ali pri konsolidaciji), kjer so bočne deformacije preprečene, je edina glavna specifična deformacija $\varepsilon_1 = \varepsilon_z$ in je enaka volumenski deformaciji, zato lahko za ta primer zapišemo:

$$\Delta \varepsilon_1 = \Delta \varepsilon_v = \frac{\Delta e}{1 + e}, \quad (2.4)$$

2.2.3 Povezava napetosti in deformacij

Deformiranje tal lahko razdelimo v dve skupini:

- deformacija zaradi spremembe efektivnih ali totalnih napetosti,
- deformacije zaradi spremembe stanja okolja, brez pomembnih sprememb obtežbe.

Vsak material, ki je izpostavljen napetostim, se deformira. Iz napetostne analize izhaja, da deformacije lahko prikažemo kot vsoto volumskih deformacij in deformacij spremembe oblike. Povezave med napetostmi in deformacijami (konstitutivni modeli) so večinoma precej kompleksne, kar še posebej velja za tla. Le-te največkrat niso niti linearne, niti reverzibilne, lahko so funkcija časa in so odvisne od predhodnih obremenitev, napetostnih poti oziroma od zgodovine deformacij.

2.2.4 Coulomb-ov zakon o strižni trdnosti zemljin

Strižno trdnost, ki jo izkazuje določena zemljina, tvorita dve komponenti: trenje in kohezija. Strižni odpor, ki ga nudi zemljina zaradi trenja med zrni, nima konstantne vrednosti, ampak se spreminja v odvisnosti od normalne napetosti, ki deluje na strižno ravnino. Kohezija pa je funkcija napetostnega stanja zaradi privlaka vodnih molekul. Leta 1776 je Coulomb ugotovil, da je mogoče zvezo med strižno napetostjo ob poružitvi (strižno trdnostjo) in normalno napetostjo na porušni ploskvi izraziti z linearno enačbo:

$$\tau_f = c + \sigma \tan \varphi, \quad (2.5)$$

kjer je

τ_f ...strižna napetost ob poružitvi, t.i. strižna trdnost (kPa)

c ...kohezija zemljine (kPa)

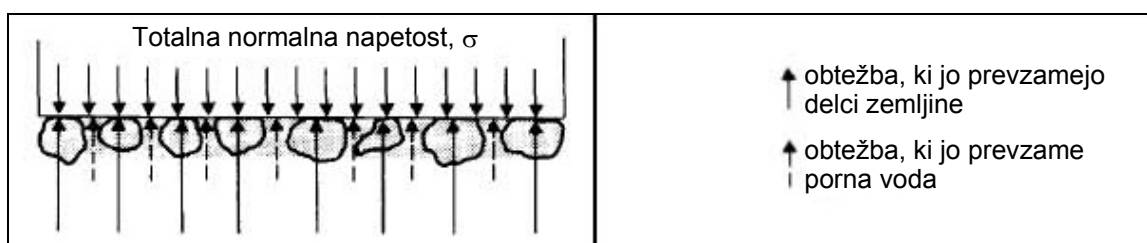
σ ...totalna normalna napetost na porušni ravnini (kPa)

φ ...strižni kot zemljine ali kot notranjega trenja (°).

Enačba 2.5 daje zadovoljive rezultate za peske in prode, ni pa povsem primerna za melje in glin. Razlog za to je, da na strižno odpornost zemljin poleg normalnih obremenitev vplivajo tudi pogoji dreniranja.

2.2.5 Totalna in efektivna napetost

Leta 1925 je Terzaghi objavil teorijo o efektivnih napetostih. Napetost, ki vpliva na spremembe volumna in na trdnost zemljine, poznamo kot efektivno napetost. Zemljino tvorijo mineralni delci, med katerimi so pore. Le-te so lahko zapolnjene z vodo, z vodo in zrakom ali samo z zrakom. Če obremenimo popolnoma zasičeno zemljino, bo obremenitev prevzela voda (kar bo povzročilo povečanje poregna tlaka) ali skeletna zgradba zemljine (v obliki napetosti na kontaktih med delci zemljine) ali pa bo obremenitev razdeljena med vodo in skeletno strukturo, kot je prikazano na sliki (Slika 2.5).



Slika 2.5: Obremenitev prevzamejo delci zemljine in porena voda (prirejeno po Smith & Smith, 1998)

Figure 2.5: Load carried by soil particles and pore water (adapted from Smith & Smith, 1998)

Del totalne napetosti, ki jo prevzamejo delci zemljine, poznamo kot efektivno napetost σ' , breme, ki ga prevzame voda, pa poveča poreni tlak u . Terzaghi je pokazal, da če povečamo normalno napetost na zasičeno zemljino za $\Delta\sigma$, se poreni tlak poveča za Δu in vrednost $\Delta\sigma$ je enaka vrednosti Δu v trenutku nanosa obtežbe. Tak porast porenih tlakov ne povzroča nobenih merljivih sprememb volumna ali trdnosti zemljine. Terzaghi zato zaključil, da samo del napetosti, ki delujejo na trdne delce zemljine, povzročata merljive spremembe v obnašanju zemljin. Razmerje med totalnimi obremenitvami in porenimi tlaki imenujemo efektivne napetosti. To razmerje opišemo z znano enačbo v mehaniki tal – Terzaghijevo enačbo:

$$\sigma' = \sigma - u \quad (2.6)$$

Kot je prikazano v poglavju 2.2.1, je pri reševanju "zemljinjskih problemov" potrebno poznati vrednosti glavnih napetosti σ_1 , σ_2 in σ_3 , ki delujejo v določeni točki. Ko so enkrat določene te tri vrednosti, lahko izračunamo vrednosti normalne in strižne napetosti za katerokoli ravnino skozi to točko. V skladu s prej navedenim torej v vsaki točki zasičene zemljine vse tri glavne napetosti tvorita dve komponenti:

- poreni tlak, ki deluje enako v vseh smereh in
- efektivni tlak $(\sigma_1 - u)$, $(\sigma_2 - u)$ in $(\sigma_3 - u)$.

2.2.6 Mohr-Coulombov kriterij porušitve

Strižna trdnost je odvisna od efektivnih napetosti in ne od totalnih napetosti. Coulombovo enačbo je potrebno zato modificirati v smislu efektivnih napetosti in dobimo:

$$\tau_f = c' + \sigma' \tan \varphi' = c' + (\sigma - u) \tan \varphi', \quad (2.7)$$

kjer je

c' ...kohezija zemljine (kPa)

σ' ...efektivna normalna napetost, ki deluje na strižno ravnino (kPa) in

φ' ...kot notranjega trenja ($^{\circ}$).

2.2.7 Določitev parametrov strižne trdnosti v laboratoriju

Strižna trdnost je pogojena z efektivno napetostjo, zaradi česar bi morale geotehnične analize uporabljati efektivna napetostna parametra φ' in c' . Vendar obstajajo izjeme: na primer pri zasičeni glini, ki je podvržena obremenitvi v nedreniranih pogojih, je veliko bolj enostavno izvajati analizo z uporabo totalnih napetostnih parametrov $\varphi_u = 0$ in c_u . Takšne primere najdemo pri računanju stabilnosti in nosilnosti zemljin za nedrenirane pogoje obtežbe. V splošnem se zahtevajo tako drenirani kot nedrenirani trdnostni parametri. Pridobimo jih z laboratorijskimi preiskavami, kjer preiskujemo reprezentativne vzorce zemljin, ki jih izpostavimo takšnim obremenitvam in pogojem dreniranja, kot vladajo na terenu. Za določanje parametrov strižne trdnosti zemljin (φ' in c') uporabljamo direktne in triosne strižne preiskave. Za ugotavljanje nedrenirane strižne trdnosti c_u uporabljamo triosno preiskavo v nedreniranih pogojih, pomožne preiskave pa so enoosna tlačna trdnost, krilna sonda in laboratorijski švedski konus.

2.2.8 Konsolidacija

Konsolidacija je geološki proces, pri katerem se zemljini manjša volumen s časom. Gre za proces iztiskanja vode iz por zasičene zemljine zaradi presežnega poreznega tlaka (Δu), ki je posledica dodatne obremenitve tal. Pri nasičenih zemljinah je sprememba volumna enaka količini iztisnjene porene vode in je odvisna od velikosti obremenitve ter od stisljivosti zemljine.

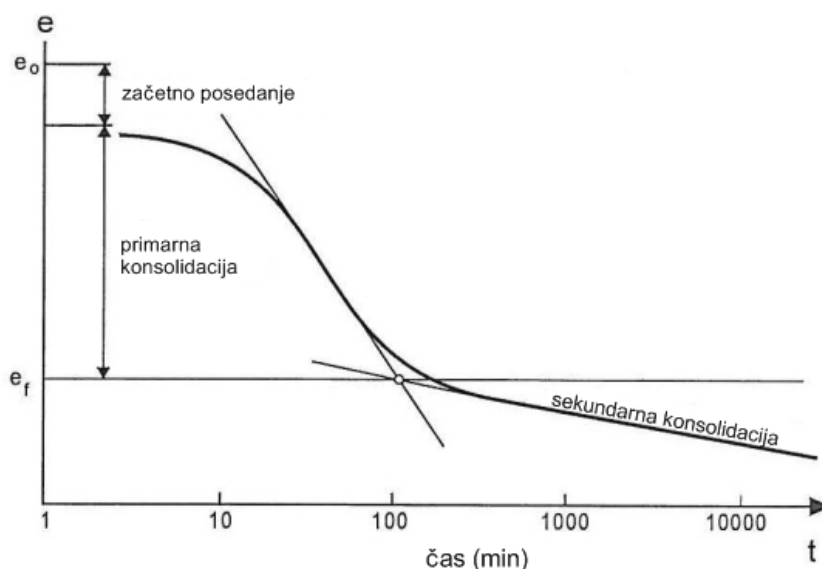
Časovni razvoj konsolidacije je odvisen od večih dejavnikov. Eden od njih je vodoprepustnost tal, ki neposredno določa potreben čas, da vode odteče iz por. Pri dobro prepustnih debelozrnatih zemljinah, kot so peski in prodi, je proces iztiskanja porene vode relativno kratek oziroma trenuten. Pri teh materialih ne opazimo daljše zakasnitve med nanosom obtežbe in ustrezno deformacijo. Pri slabo prepustnih glinah je za iztiskanje porene vode in s tem za prenehanje spremembe volumna, potrebno več časa.

Konsolidacijo lahko razumemo kot prenos dodatne obtežbe z vodne na trdno fazo zemljine. Med konsolidacijo se poreni tlaki zmanjšujejo, učinkoviti pa večajo. Konsolidacija je končana, ko zrna najdejo novo ravnovesno stanje, v katerem lahko prenašajo novo obremenitev, poreni tlak v zasičeni zemljini pa je enak hidrostatskemu tlaku. Takšen proces postopnega zmanjševanja volumna, zmanjševanja presežnih porenih tlakov in povečanja učinkovitih napetosti imenujemo konsolidacija (Maksimović, 2008). Spremembe volumna so pogojene s kompleksno interakcijo med učinkovitimi in totalnimi napetostmi, med porenimi tlaki, pronicanjem vode in stisljivostjo. Razmerje med spremembo volumna zemljine in med spremembo učinkovite napetosti imenujemo stisljivost, ki ni časovno odvisna (Atkinson in Bransby, 1978). Po popolni disipaciji porenih tlakov in končani primarni konsolidaciji pa se pri določenih tleh lahko volumen zemljine še naprej zelo počasi zmanjšuje. To je tako imenovana sekundarna konsolidacija, ki je posledica plastične reorientacije zrn zaradi spremenjenega nivoja napetosti ali progresivnega loma med zrn oziroma progresivnega loma posameznih zrn. V praksi se pokaže, da vse zemljine izkazujejo določeno mero sekundarne konsolidacije (lezenja), vendar gre v večini primerov za deformacije, ki so majhne v primerjavi s tistimi, ki nastanejo zaradi spremembe učinkovite napetosti (Atkinson in Bransby, 1978).

Časovno odvisne spremembe volumna so rezultat tako primarne konsolidacije, pri katerih je stopnja deformacije odvisna od tega, kako hitro lahko odteka voda (hidrodinamična zakasnitev), in sekundarne konsolidacije, ki je odvisna od viskoznega odpora strukture zemljine. Slednjo pogosto pripisujemo volumetričnemu lezenju. Časovno odvisne strižne deformacije pa pripisujemo tako imenovanemu deviatoričnemu ali strižnemu lezenju. Različni

tipi zemljin izkazujejo različne količine časovno odvisnih deformacij in napetosti, ki se odražajo kot sekundarna konsolidacija, lezenje in popuščanje napetosti. Lezenje je časovno povečevanje deformacije pri konstantni obremenitvi, medtem ko je relaksacija ali popuščanje napetosti časovno zmanjševanje napetosti pri konstantni deformaciji. Razumevanje teh procesov je pomembno pri reševanju geotehničnih problemov v smislu dolgoročnega obnašanja zemljin pod stalno obtežbo. Časovno odvisen odziv zemljin je splet kompleksne interakcije med strukturo zemljine, napetostno zgodovino, pogoji dreniranja, temperaturnimi spremembami, napetostmi in biokemičnim okoljem (Mitchell, 1976).

Na sliki spodaj (Slika 2.6) so prikazane faze konsolidacije pri laboratorijskem poskusu: začetno posedanje, primarna in sekundarna konsolidacija. Slika ne odraža povsem realnega stanja, saj se v resnici te faze prekrivajo. Faza začetnega posedanja nastopi skoraj istočasno z obremenitvijo, še pred začetkom dreniranja. Deloma gre za posledico iztiskanja manjših količin v porah ujetega zraka, deloma pa za vzpostavljanje kontakta med površino vzorca in pokrovom, preko katerega vzorec obremenjujemo. Del začetne deformacije lahko pripišemo tudi elastični deformaciji, ki je reverzibilna. Ta faza je odgovorna za odklon teoretičnih krivulj na začetku obremenjevanja. V visoko prepustnih, relativno togih zemljinah se zemljina tudi že v tej fazi drenira, torej se hkrati z začetnim posedanjem odvija tudi primarna konsolidacija. Dogajanje med primarno in sekundarno konsolidacijo sem že predhodno opisala.



Slika 2.6: Komponente deformacije med konsolidacijo (prirejeno po Maksimović, 2008)

Figure 2.6: Consolidation stages (adapted from Maksimović, 2008)

Terzaghi-jeva teorija konsolidacije temelji na naslednjih predpostavkah (Head, 1994):

- plast zemljine, ki se konsolidira, je horizontalna, homogena, enakomerno debela in bočno omejena,

- zemljina je polno zasičena,
- voda in delci zemljine so nestisljivi,
- za tok vode skozi zemljino velja Darcy-jev zakon,
- koeficient vodoprepustnosti in ostale lastnosti zemljine so med procesom konstantne,
- napetost je enakomerna po celi horizontalni ravnini,
- tok vode poteka samo v vertikalni smeri (dreniranje in kompresija sta enodimezionalna),
- sprememba efektivnih napetosti v zemljini odgovarja spremembi količnika por, njuna odvisnost je linearna,
- začetni presežni porni tlaki zaradi obremenitve so konstantni po celi globini plasti, ki se konsolidira,
- podaljšan čas konsolidacije je povezan izključno z nizko vodoprepustnostjo zemljine,
- obe plasti, ki obdajata plast, ki se konsolidira, sta visoko vodoprepustni,
- težo zemljine lahko zanemarimo.

Terzaghi je na osnovi zgoraj navedenih predpostavk izpeljal enačbo za enostaven enodimenzionalen primer konsolidacije:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{k}{\rho_w g E_{oed}} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (2.8)$$

kjer je:

u - presežni porni tlak ob času t , na določeni točki

z - višinska kota te točke

k - koeficient vodoprepustnosti

E_{oed} - modul stisljivosti zemljine

ρ_w - gostota vode

g - gravitacijski pospešek

Koeficiente na desni strani enačbe 2.8 nadomestimo s koeficientom konsolidacije c_v , kjer je:

$$c_v = \frac{k}{\rho_w g E_{oed}} \quad (2.9)$$

tako, da enačba 2.8 dobi obliko:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (2.10)$$

Z rešitvijo enačbe 2.10 dobimo izraz za stopnjo konsolidacije U , kot funkcijo c_v , h in časa t , kjer je h dolžina najdaljše poti dreniranja:

$$\frac{U}{100} = f\left(\frac{c_v t}{h^2}\right) \quad (2.11)$$

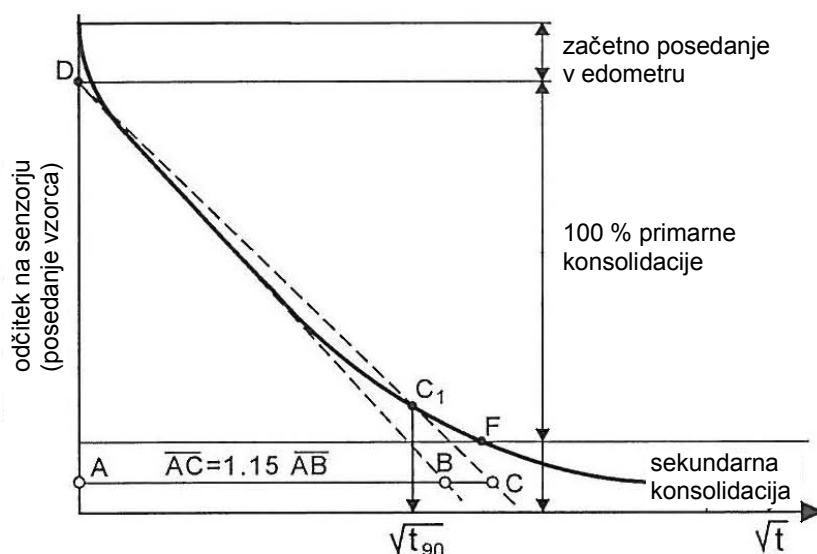
Izraz $(c_v t/h^2)$ nadomestimo s tako imenovanim časovnim faktorjem konsolidacije T_v in zapišemo enačbo kot

$$\frac{U}{100} = f(T_v) \quad (2.12)$$

Iz enačbe 2.11 je razvidno, da je stopnja konsolidacije obratno sorazmerna s kvadratom razdalje maksimalne poti dreniranja. V praksi to pomeni, da konsolidacijski čas raste s kvadratom debeline plasti. Če za primer vzamemo dve različno debeli plasti z enakimi parametri, je čas, v katerem je doseženo 90 % konsolidacije, za 6 m debelo plast devetkrat daljši kot za 2 m debelo plast.

Rešitev izraza 2.10 lahko grafično prikažemo tako, da nanašamo razporeditev presežnega poreznega tlaka ob določenem času po višini sloja zemljine. Na tak način dobimo družino krivulj, ki se imenujejo izohrone.

Koeficient konsolidacije, definiran z enačbo 2.9, določamo z analizo rezultatov edometerskega preizkusa. Karakteristike konsolidacijskih krivulj postanejo bolj razvidne, če na ordinato nanesemo kvadratni koren časa ali pa uporabimo logaritemsko skalo. Pri določanju koeficienta konsolidacije se uporabljata dve metodi in sicer metoda kvadratnega korena (Taylor-jeva metoda) in logaritemska metoda (Casagrade-jeva metoda). Na sliki (Slika 2.7) je prikazana oblika teoretične in eksperimentalne krivulje konsolidacije, pri čemer je na ordinati nanešen posedek vzorca, na abscisi pa kvadratni koren časa, merjenega v minutah.



Slika 2.7: Določanje koeficienta konsolidacije po metodi kvadratnega korena (Maksimović, 2008)

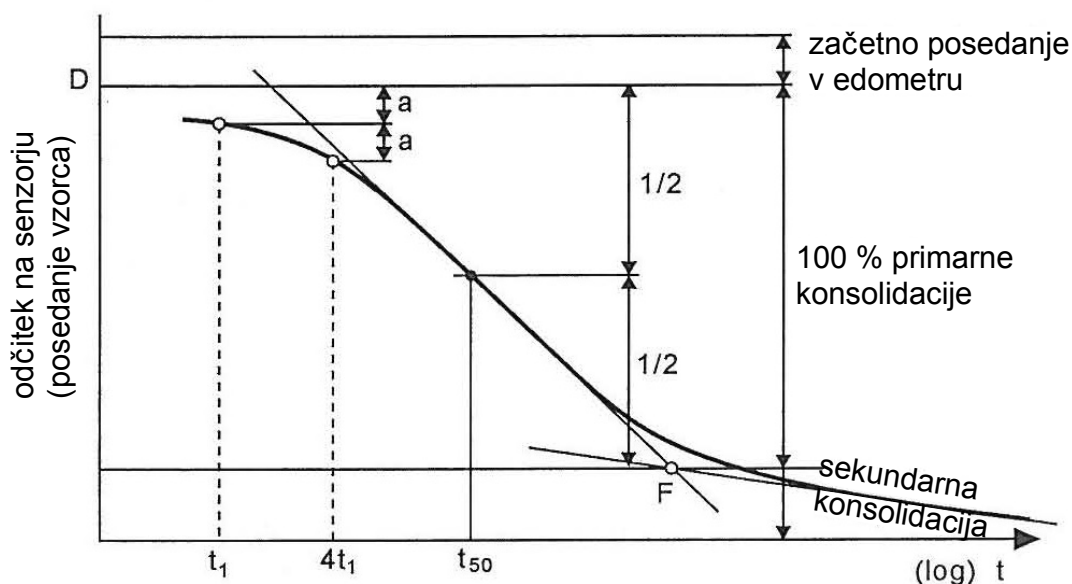
Figure 2.7: Coefficient of consolidation derivation using Taylor's method (Maksimović, 2008)

Pri 90 % izvršene konsolidacije velja, da je $AC = 1,15 AB$, kjer točko *B* določa podaljšek ravnega dela konsolidacijske krivulje. Točko *D* dobimo s podaljšanjem tega istega dela do preseka z ordinato in predstavlja korigirano ničelno stanje, ki se razlikuje od dejanskega začetnega stanja za velikost začetnega posedka zaradi iztiskanja zraka. S povezavo točk *D* in *C* na eksperimentalni krivulji dobimo točko *C*₁, ki odgovarja stopnji konsolidacije $U = 90 \%$ in odčitamo vrednost $\sqrt{t_{90}}$. Vrednost T_v za $U = 90 \%$ znaša 0,848, tako da je koeficient konsolidacije:

$$c_v = 0.848 \times \frac{H^2}{t_{90}} \quad (2.13)$$

Slika 2.8 prikazuje obliko konsolidacijske krivulje v pollogaritemski skali. Presek premic, ki se prilegata ravnemu delu krivulj v območju primarne in sekundarne konsolidacije, določa točko *F*, ki označuje 100 % konsolidacije. Upoštevati moramo, da se začetek konsolidacije na pollogaritemski skali nahaja neskončno levo. Za določanje korigiranega ničelnega stanja, ki odgovarja ordinati točke *D*, izkoristimo dejstvo, da je začetni del krivulje približno paraboličen. Na tem delu krivulje označimo dve točki s časom v razmerju 1:4, dobljeno razdaljo na ordinati pa nanesimo navzgor in tako dobimo korigirano ničelno stanje. Ko smo tako definirali velikost deformacij pri 0 % in 100 % konsolidaciji, lahko odčitamo čas, ki je potreben, da se izvrši 50 % deformacije. Ta čas ustreza časovnemu faktorju $T_v = 0,196$, tako da je koeficient konsolidacije:

$$c_v = 0.196 \times \frac{H^2}{t_{50}} \quad (2.14)$$



Slika 2.8: Določanje koeficienta konsolidacije po logaritemski metodi (prirejeno po Maksimović, 2008)

Figure 2.8: Coefficient of consolidation derivation using Casagrande's method (Maksimović, 2008)

Maksimović (2008) navaja, da obe opisani metodi dajeta približno enake rezultate. Pogosteje se uporablja metoda kvadratnega korena, pri kateri zadostuje krajši čas obtežitve za definiranje konsolidacijske krivulje in za določanje koeficienta konsolidacije. Logaritemsko metodo uporabimo v primerih, ko z metodo kvadratnega korena ne dobimo izrazito linearnega segmenta konsolidacijske krivulje, medtem ko logaritemska metoda daje zadovoljive rezultate. Nekatere zemljine izkazujejo tako veliko sekundarno konsolidacijo, da pollogaritemska krivulja izgubi svojo karakteristično obliko, s čimer je onemogočeno zanesljivo določanje točke 100 % konsolidacije. V teh primerih je zopet bolj primerna metoda kvadratnega korena.

2.3 Sadra kot "zemljini podoben material"

2.3.1 Zemljinam podobni materiali

V geotehniki okolja se večkrat srečujemo z materiali, ki jih imenujemo "zemljinam podobni materiali", v literaturi pa večkrat zasledimo tudi izraz alternativni materiali. Petkovšek (2004) navaja, da gre za geomateriale, ki so bili podvrženi različni stopnji predelave v proizvodnih obratih. Lahko so tudi geomateriali "in situ", ki so bili podvrženi nadzorovanemu in nenadzorovanemu delovanju kemikalij. Za naravne zemljine v geotehniki privzemamo, da so kemijsko in mineraloško inertne. V zemljinam podobnih materialih pa ne smemo prezreti možnosti, da v času geotehnične obravnave v njih še vedno potekajo kemijski, mineraloški in drugi diagenetski procesi. Ti procesi lahko na kratek ali dolgi rok pomembno vplivajo na mehanske lastnosti materiala, posledično na trajnost inženirskih konstrukcij in na koncu na obnašanje geotehničnega objekta kot celote. Petkovšek (2004) opozarja na to, da te procese slabo poznamo, se jih pogosto ne zavedamo, jih morda celo zavestno ignoriramo ali pa jih z ustaljenimi postopki geotehničnega preiskovanja ne zaznamo.

Pri gradnji cest (nasipov in voziščnih konstrukcij) narašča uporaba recikliranih in alternativnih materialov. Širšo uporabo takšnih materialov na eni strani ovirajo pomisleki o njihovi primernosti z okoljevarstvenega vidika, na drugi strani pa zakonodaja vzpodbuja uporabo odpadkov, stranskih proizvodov in recikliranih materialov. Dawson (2008) opisuje delovanje vode v takšnih materialih in pravi, da voda v nekaterih primerih povzroči cementacijo materiala, kar pripomore k njegovi stabilnosti, pri drugih materialih pa lahko povzroči nezaželeno izluževanje. Zato je pomembno, da razumemo karakteristike alternativnih materialov in njihovo uporabnost s hidrološkega in okoljskega vidika.

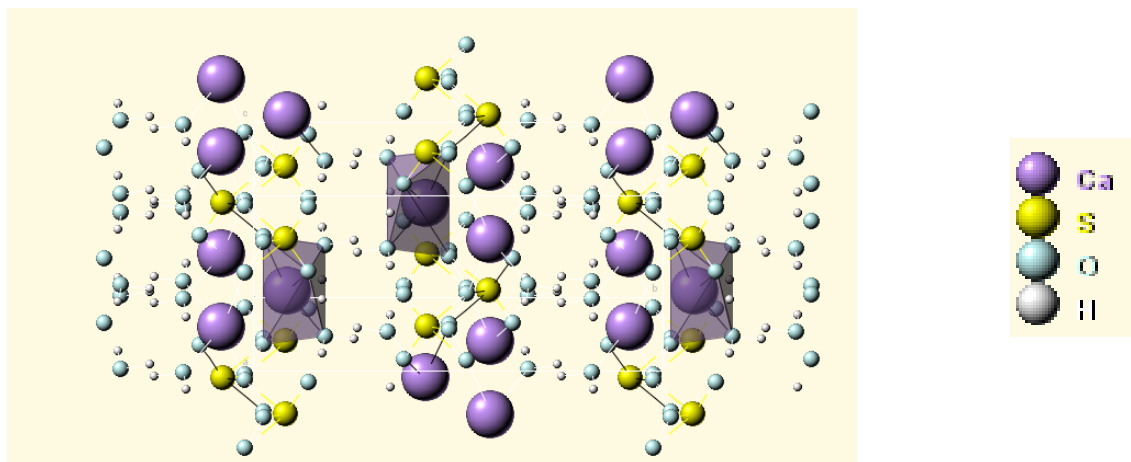
Glede uporabe alternativnih materialov se pojavlja veliko pomislekov zaradi morebitnega izluževanja nevarnih snovi, ki pa velikokrat niso utemeljeni. Veliko alternativnih materialov nastaja pri industrijskih procesih, pri katerih nastopajo tudi kemične sestavine, za katere ne želimo, da se širijo v okolje. Vendar vpliv takšnih materialov na okolje ni odvisen od same vsebnosti kemičnih snovi, temveč od njihovega stika s pornimi vodami, njihove topnosti in sposobnosti za transport. Veliko alternativnih materialov je v procesu nastajanja prestalo visoke temperature, pri katerih so nastale stabilne mineralne faze, v katerih so vgrajene potencialno nevarne kemične snovi in zaradi tega ni nevarnosti, da bi se iz njih izločile. Na drugi strani pa lahko vrednost pH na mestu, kjer takšne materiale vgradimo, pospeši topnost in izluževanje snovi iz alternativnih materialov (Dawson, 2008).

Primeri zemljinam podobnih materialov, s katerimi se srečujemo tudi v Sloveniji so: kemična sadra, različne žindre, elektrofiltrski pepel, hidrometalurška jalovina in drugi.

2.3.2 Naravna sadra

Sadra se kot naravni mineral nahaja v sedimentnih kamninah in ob toplih hidrotermalnih izviroh. Nastaja z evaporacijo morske vode in se odlaga v plasteh na morskem dnu. V pogojih visokega pritiska in temperature se spreminja v anhidrit. Vsebnost sadre v takšni sedimentni kamnini se spreminja od 75 % do 95 %, preostanek predstavljajo minerali glin in karbonati (<http://www.eurogypsum.org>, 2012).

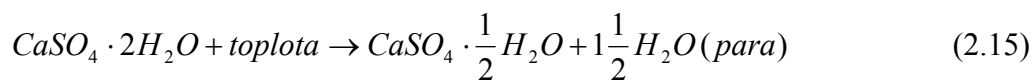
Po kemični sestavi je sadra kalcijev sulfat dihidrat s kemijsko formulo $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Sestavljena je iz plasti, kjer vodne molekule povezujejo plasti CaSO_4 , kot je prikazano na sliki spodaj (Slika 2.9). Cepljivost je najlažja po plasteh, kjer so vodne molekule.



Slika 2.9: Kristalna struktura sadre (<http://www.webmineral.com>, 2012)

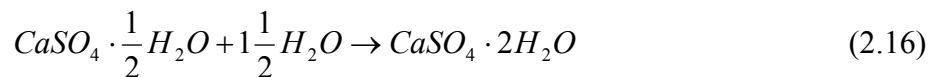
Figure 2.9: Crystal Structure of Gypsum (<http://www.webmineral.com>, 2012)

Sadra pri temperaturah nad 150 °C (temperature reakcij se v različnih virih nekoliko razlikujejo) odda 75 % kristalno vezane vode (<http://www.chemistrydaily.com>, 2012):



Dehidracija (v tem primeru imenovana kalcinacija) se prične pri temperaturi 40-80 °C. Energija, ki jo dovajamo v obliki toplote, se porablja za pretvorbo kristalno vezane vode v vodno paro, temperatura trdnine pa se pri tem ne povečuje. Ko se iz kristala sadre izloči 75 % vode, temperatura kristala prične počasi rasti, dokler ni odstranjena vsa voda. Nato se temperatura minerala povečuje hitreje. Sposobnost sadre, da določen čas ohranja relativno nizko temperaturo tudi pri izpostavljenosti direktnemu ognju, izkoriščajo v gradbeništvu v obliki mavčnih plošč za protipožarno zaščito lesenih delov konstrukcije.

Delno dehidriran kristal, nastal iz sadre, imenujemo kalcijev sulfat hemihidrat (v nekaterih virih polhidrat) ali kalcinirana (žgana) sadra in ima kemijsko formulo $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$. Kalcinirana sadra ima nenavadno lastnost: ko jo zmešamo z vodo pri sobni temperaturi, se ponovno hidratizira in tvori močno kristalno mrežo:

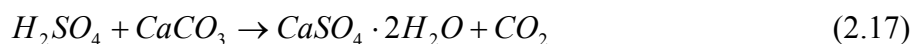


Reakcija, opisana z enačbo 2.16, je eksotermna, kar pomeni, da se pri njej sprošča toplota. Pri segrevanju sadre nad temperaturo 180 °C nastane anhidrit s kemijsko formulo CaSO_4 . Anhidrit se v stiku z vodo počasi pretvarja nazaj v dihidrat. Pri temperaturah nad 1100 °C nastane mrtvo žgani CaSO_4 . Večina mineralov pri stiku z vodo tvori tekoče ali poltekoče zmesi, sadra pa tvori močno kristalno strukturo, kar jo dela zelo uporabno za različne namene. Sadra je v vodi delno topna (~2,0-2,5 g/L pri 25 °C) in ima v nasprotju z večino drugimi soli retrogradno topnost, t.j. lastnost, da postane pri višjih temperaturah manj topna.

V Sloveniji so naravna nahajališča sadre pri Hrušici, Idriji, Litiji, Mežici, v okolici Dovjega, pri Trziču in Jesenicah, Šenturški Gori pri Cerkljah in Zagorju.

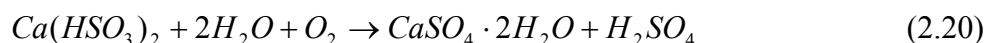
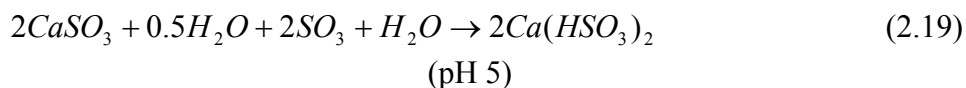
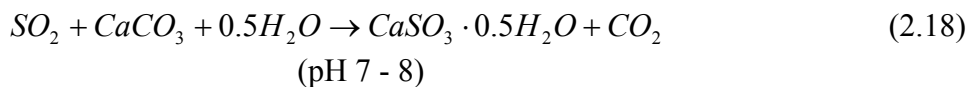
2.3.3 Kemična ali sintetična sadra

Vse večja alternativa naravni sadri v razvitih deželah postaja kemična sadra, ki je rezultat številnih kemijskih procesov v industriji. Preprost mehanizem nastanka kemične sadre lahko zapišemo z naslednjo relacijo:



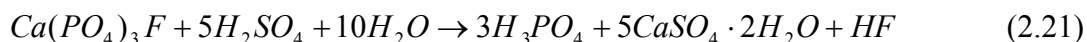
Kemične sadre so imenovane po proizvodnji, v kateri nastajajo in so specifične zaradi primesi ter velikosti in oblike zrn. Pri proizvodnji organskih kislin nastajajo manjše količine tako imenovanih organskih sader: citronska, mravljična, vinska in druge. Zaradi strogih okoljskih predpisov so v današnjem času elektrarne v razvitem svetu opremljene z napravami za razžvepljevanje dimnih plinov. V večini primerov uporabljajo tako imenovani mokri postopek, kjer dimne pline čistijo v pralnikih s suspenzijo kalcita, kjer SO_2 reagira s CaCO_3 (enačba 2.18), tako da se tvori netopni $\text{Ca}(\text{HSO}_3)_2$ (enačba 2.19) v obliki gošče. Le-ta se z znižanjem pH pretvori v topno obliko in pri reakciji s kisikom iz zraka do konca oksidira. Tako nastala žveplova kislina reagira s presežkom kalcita in tvori energetsko sadro (nemško: REA Gips – Rauchgas Entschweflungs Anlagen Gips, angleško: FGD Gypsum – Flue Gas Desulphurisation Gypsum). Čiščenje, separacija in odvodnjavanje potekajo v hidrociklonih, filtrih in centrifugah. Na ta način nastane zelo čista sadra $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (enačba 2.20), s približno 10 % vlage, ki jo lahko neposredno uporabimo v gradbeništvu ali v proizvodnji

cementa. Pri takšnem postopku na vsako tono odstranjenega žvepla nastane 5,4 ton energetske sadre.



Uporablja se tudi tako imenovani suhi postopek, pri katerem fino zmleto kalcitno moko ali apno ($CaCO_3$, $Ca(OH)_2$, ali CaO) vbrizgavajo direktno v vroč dimni plin ali pa jo mešajo z gorivom v peči. Separacijo nato izvajajo s tekstilnimi filtri (Büchel in drugi, 2000).

Büchel in drugi (2000) navajajo, da največje količine kemične sadre nastajajo pri proizvodnji fosforne kisline. Pri reakciji fosfatov z žveplovo kislino nastaja fosforna sadra kot stranski produkt proizvodnje fosforne kisline.



V reakciji, opisani z enačbo 2.21, na vsako tono surovega fosfata nastane 1,7 ton fosforne sadre, ki vsebuje toliko nečistoč, da ni primerna za neposredno uporabo v gradbeništvo. Nečistoče so lahko organske snovi, magnezijeve soli, fosfati in fluoridi, vgrajeni v kristalno rešetko sadre.

Poleg nečistoč so omejitve za širšo uporabo fosforne sadre še oblika kristalov, ki povzročata lastnosti, ki niso zaželene pri proizvodnji mavčnih plošč. Poleg tega ima lahko fosforna sadra v primerjavi z drugimi sadrami tudi večjo radioaktivnost, ki izhaja iz fosfatnih kamnin. Radioaktivnost sicer ne presega dovoljenih mej, vseeno pa lahko predstavlja realno oviro za njeno uporabo (<http://www.eurogypsum.org>, 2012).

Titanov dioksid je beli pigment in je v kvantitativnem smislu daleč najbolj pomemben industrijski pigment. Svetovna proizvodnja titanovega dioksida je približno 4 milijone ton na leto. Polovica te količine nastane s sulfatnimi procesi, druga polovica pa s kloridnimi. Samo pri sulfatnem procesu nastane titanova sadra, od katere je približno 50 % bele sadre, ki je primerna kot surovina pri proizvodnji mavčnih plošč, cementa in drugo (<http://www.eurogypsum.org>, 2012).

Naravna sadra bo tudi v prihodnosti predstavljala glavni vir za proizvodnjo mavčnih plošč, sledila ji bo energetska sadra. Največji potencial med preostalimi kemičnimi sadrami ima očiščena fosforna sadra, sledi ji očiščena titanova sadra. V preteklosti so v Evropi zaradi strožjih okoljskih predpisov sistematično ukinjali proizvodnjo fosforne kisline in titanovega dioksida, zato je za ohranjanje te industrije pomembno, da se investira v predelavo (čiščenje) proizvedene sadre, oziroma, da se najde način uporabe te sadre (<http://www.eurogypsum.org>, 2012).

Leta 1992 je bila celotna proizvodnja kemične sadre v Sloveniji ocenjena na 150.000 ton letno. Deset let kasneje, v letu 2002, je zgolj proizvodnja energetske sadre narasla na 270.000 ton, v letu 2006 pa je proizvodnja vseh vrst kemičnih sader znašala približno 600.000 ton. Tovrstna sadra se deloma porabi v zgoraj omenjenih uporabah, deloma se z njo zapolnjujejo opuščeni rovi rudnikov ali pa se odlaga na posebnih odlagališčih (Petkovšek, 2003). Veliko povečanje proizvodnje sadre v letu 2006 je pretežno posledica uvajanja procesa razžveplanja dimnih plinov v termoelektrarnah in drugih industrijskih obratih, delno pa tudi povečane proizvodnje titanovega dioksida, medtem ko je bila proizvodnja fosforne sadre povsem opuščena (Petkovšek, 2008).

Kemično sadro odlagajo na tri načine: mokro zapolnjevanje v posebej zgrajenih akumulacijskih bazenih, suho odlaganje in razgrinjanje ožete sadre ter stabilizacija z elektrofiltrskim pepelom. Velike količine stabilizirane mešanice uporabljajo za zapolnjevanje ugreznin, ki so posledica rudarjenja in opuščeni rudniških rogov ter za gradnjo nasipov, ki služijo za ohranjanje ugrezninskih jezer na ustreznem nivoju (Petkovšek, 2008).

V preglednici (Preglednica 2.1) so prikazani osnovni fizikalno mehanski parametri kemičnih sader, ki jih navajajo Petkovšek in drugi (2012). Z vidika zagotavljanja stabilnosti suhih deponij ali nasipov iz sadre je pomembna njihova sposobnost zgoščanja. Iz preglednice (Preglednica 2.1) je razvidno, da so maksimalne suhe gostote sintetičnih sader neprimerljivo nižje v primerjavi z naravnimi zemljinami, ki imajo primerljivo zrnastostno sestavo. Ta razlika je delno posledica nižje gostote, predvsem pa neugodne oblike zrn sadre, ki tudi po nabijanju zadržijo strukturo hiše iz kart, v kateri je velik porni prostor (Petkovšek in drugi, 2012).

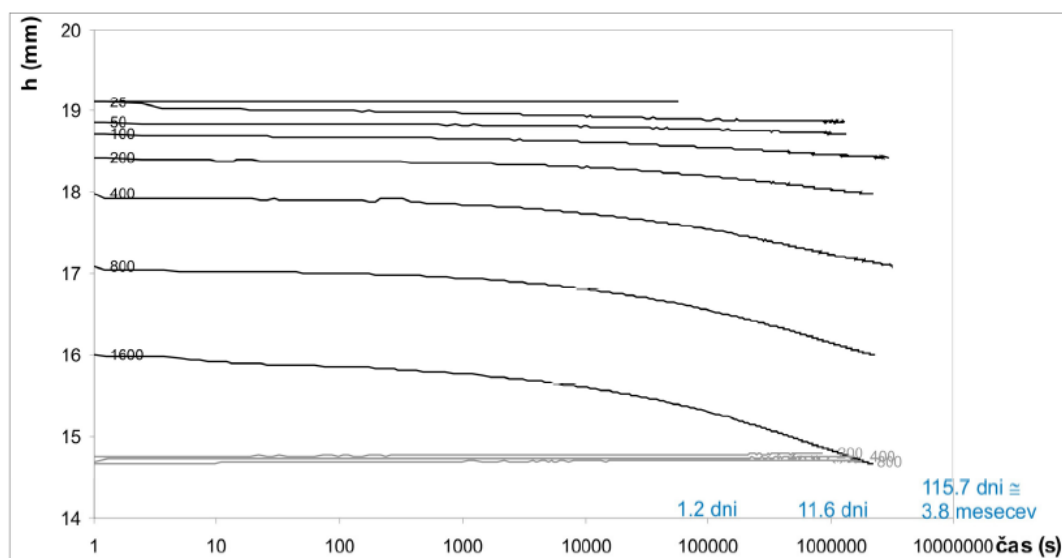
Preglednica 2.1: Primerjava fizikalnih lastnosti nekaterih kemičnih sadrer v Sloveniji (Petkovšek in drugi, 2012)

Table 2.1: Geotechnical characterization of five typical synthetic gypsums in Slovenia (Petkovšek et al, 2012)

	Energetska sadra A	Energetska sadra B	Titanova sadra	Steklarska sadra	Uranova sadra
Vlaga (%)	10	7 - 9	36	65 - 80	22 - 88**
Gostota zrn (g/cm)	2,35	2,31	2,3 - 2,4	2,4	2,4 - 2,7
Meja plastičnosti (%)	ni plastična	ni plastična	* - 45	*	ni plastična
Meja židkosti (%)			46 - 56	*	
Indeks plastičnosti (%)			* - 11	*	
Maksimalna suha gostota (g/cm³)	1,4 - 1,5	1,4 - 1,5	1,1 - 1,2	1,1 - 1,2	1,8 - 1,9
Optimalna vlaga (%)	17 - 18	65 - 80	32 - 40	32 - 36	11 - 13***
Vodoprepustnost (m/s)	/	10 ⁻⁶ - 10 ⁻⁷	3×10 ⁻⁸	10 ⁻⁸ - 10 ⁻⁹	10 ⁻⁸ - 10 ⁻⁹
Strižna trdnost					
c' (kPa)	15		0	34	0 - 20
φ' (°)	36	>35	38	32	34 - 40

*določitev ni možna, **preiskave izvedene pred letom 1984, ***preiskave izvedene v letu 2003

Petkovšek in drugi (2012) nadalje navajajo, da vsak najmanjši premik zrn v takšni strukturi v pornem prostoru nabite sadre povzroči polno saturacijo in zaradi majhne prepustnosti tudi hiter prirast pornega tlaka. To stalno medsebojno premikanje zrn v rahli strukturi vodi do zanimivega obnašanja sadre v edometru, ko je pod vertikalnimi totalnimi tlaki komajda možno oceniti, ali pri kemičnih sadrah sploh lahko govorimo o primarni in sekundarni konsolidaciji, ali pa so vse deformacije le posledice lezenja. Na sliki (Slika 2.10) je prikazana edometriška krivulja, ki ponazarja njeno dolgoročno lezenje.



Slika 2.10: Edometriška krivulja titanske sadre CC (Petkovšek in drugi, 2012)

Figure 2.10: Oedometric curve of titanium gypsum CC (Petkovšek et al 2012)

Petkovšek in drugi (2008) ugotavljajo, da je določevanje vlažnosti pri kemični sadri verjetno najbolj problematičen test pri preučevanju geomehanskih lastnosti sadre ali mešanic, ki vsebujejo sadro. Sadra precipitira iz vodne raztopine pri temperaturi nižji od 60-70 °C, pri višjih temperaturah se izloča anhidrit. Pri sušenju sadra prične izgubljati kemično vezano vodo že pri temperaturah, nižjih od 40 °C, pri čemer se spreminja v polhidrat ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + \text{toplota} \rightarrow \text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O} + 1\frac{1}{2}\text{H}_2\text{O} (\text{para})$).

Avtorji (Petkovšek in drugi, 2008) so s pomočjo termičnih analiz na titanovi sadri pokazali, da se prve spremembe zgodijo med 30 in 40 °C. Pri 51-55 °C eksotermna reakcija nakaže začetek nastanka nove kristalne faze – polhidrata, pri temperaturi 60 °C titanova sadra izgubi 46% kristalno vezane vode. Kristali polhidrata in anhidrita imajo drugačne karakteristike kot kristali sadre, kar močno vpliva na fizikalne parametre. Vse vlage, navedene v omenjenem prispevku (Preglednica 2.1), so bile določene s sušenjem sadre na 40 °C.

Tesárek in Černý (2007) sta raziskovala učinek temperature sušenja na lastnosti energetske sadre. Uporabila sta dva temperaturna režima sušenja in sicer enega z maksimalno temperaturo sušenja 40 °C in drugega z 80 °C. Pri vzorcih sadre, sušenih po omenjenih režimih, sta opazovala prostorninsko gostoto, efektivno poroznost, toplotno prevodnost, volumsko toplotno kapaciteto, koeficient absorpcije in navidezno razporeditev vlage ter primerjala rezultate. Poleg čiste sadre sta preiskovala še sadro, modificirano s hidrofobnimi snovmi in plastifikatorji. Navajata, da gre pri sušenju sadre za kompleksen proces, saj vzorci sadre vsebujejo tako fizikalno kot kemično vezano vodo. Pri tem za nastanek β -oblike polhidrata (kalcinirane sadre) iz dihidrata navajata temperaturo 110 – 150 °C. Faktorji, ki vplivajo na odstranjevanje kemično in fizikalno vezane vode so temperatura, relativna vlažnost in tlak (zračni tlak ali vakuum). Če je med potekom dehidracije dihidrata v polhidrat presežena kritična temperatura, sadra ostane nekje med tema dvema fazama.

Mnenja raziskovalcev o višini kritične temperature se precej razlikujejo. Tesárek in Černý (2007) navajata podatke različnih raziskovalcev, pri katerih priporočena temperatura sušenja sadre variira od 35 do 70 °C. Pri svojem eksperimentu pa sta ugotovila, da sušenje sadre pri 80°C ni primerno, saj pomembno vpliva na osnovne lastnosti tako čistih kot modificiranih sader, če jih primerjamo s tistimi, ki so bile sušene na 40 °C. Očitno se pri segrevanju do 80°C odstrani nekaj kemično vezane vode, kar pomeni, da material pri tej temperaturi ni stabilen. Zaključek je tak, da dehidracija kalcijevega sulfata dihidrata v polhidrat poteka v temperaturnem območju med 40 in 80 °C.

2.4 Tikotropija

2.4.1 Reološke lastnosti tiksotropnih materialov

Termin tiksotropija najdemo v reološki literaturi, kjer se nanaša predvsem na lastnost nekaterih industrijskih tekočin. Ker je primerjava mehanizmov v tiksotropnih tekočinah in tiksotropnih zemljinah mogoča in koristna, v nadaljevanju podajam nekatere osnove reologije, definicije, reološko razdelitev sistemov in načine merjenja v reometriji, ki sem jih povzela po Zupančič Valant (2007).

Reologija je interdisciplinarna veda o tokovnem obnašanju in deformaciji materiala, ki združuje znanja mnogih znanstvenih disciplin, kot so biologija, kemija, gensko in kemijsko inženirstvo, medicina, fizika ter mnoge druge. Osnovni koncepti, na katerih temelji veda, so kinematika, ki obravnava geometričen vidik deformacije in toka, zakoni o ohranitvi mase in energije, ki obravnavajo razmerja med silami, napetostmi in spremembami energijskih stanj, ter konstitutivne zveze, ki povezujejo sile z deformacijo materiala. Reologija omogoča ovrednotiti mehanske lastnosti predvsem tekočin in poltrdnih snovi ter viskoelastičnih trdnih snovi. Najpomembnejši pojavi, ki jih obravnava reologija, so:

- strižna odvisnost viskoznosti realnih tekočin,
- časovna odvisnost oz. reverzibilnost deformacije, kar je značilno za tekočine, poltrdne in trdne snovi,
- pojav razlik v normalnih napetostih, značilen za viskoelastične snovi,
- naraščanje viskoznosti pri raztežku, značilno za viskoelastične snovi.

Viskozne sisteme v grobem delimo na newtonske (idealne) in na ne-newtonske (realne). Viskoznost newtonskih tekočin je pri danem tlaku in temperaturi lastnost tekočine, ki je neodvisna od smeri, jakosti in časa delovanja striga. Newtonsko obnašanje tekočin je sicer idealizacija realnega obnašanja tekočine, vendar v nekaterih primerih dobro ponazarja upor tekočine proti toku pri normalnih, vsakdanjih pogojih. Veliko realnih tekočin lahko izkazuje v določenem območju strižnih hitrosti ali določenem temperaturnem območju newtonsko obnašanje. Torej izkazujejo konstantno viskoznost, ki je lastnost newtonskih tekočin. Številnejše so realne tekočine, katerih viskoznost je le v ozkem območju delovanja striga konstantna.

Ne-newtonske tekočine so realne tekočine, katerih viskoznost pri danem tlaku in temperaturi ni konstantna. Viskoznost takih tekočin se lahko spreminja glede na jakost in smer delovanja strižne sile, lahko pa je odvisna tudi od časa delovanja striga. Tekočine, katerih viskoznost je

odvisna le od jakosti delovanja strižne sile, imenujemo časovno neodvisne ne-newtonske tekočine, če pa se viskoznost tekočine pri konstantnih strižnih pogojih spreminja tudi s časom in smerjo delovanja striga, tekočine imenujemo časovno odvisne ne-newtonske tekočine. Viskoznost teh tekočin je odvisna tudi od predhodne strižne zgodovine.

Pojave strižno in časovno odvisnega obnašanja tekočin si je mogoče razložiti z dejstvom, da imajo tekočine neko notranjo strukturo. Spreminjanje viskoznosti neneuonskih tekočin pri danem tlaku in temperaturi je posledica preurejanja notranje strukture tekočine pod vplivom delovanja strižne sile. V polimernih raztopinah in talinah tvorijo notranjo strukturo polimerne molekule, v suspenzijah predstavlja notranjo strukturo naključna porazdelitev delcev, ki so lahko stabilizirani, agregirani ali flokulirani, odvisno od interakcij, ki vladajo med delci in med delci ter disperznim medijem. Notranjo strukturo v emulzijah tvorijo kapljice ene faze v drugi, med njimi lahko vladajo različne interakcije. Vpliv delovanja strižne sile na urejanje oziroma odziv notranje strukture realnih tekočin je lahko zelo različen, odvisno od urejenosti notranje strukture. Zato realne tekočine izkazujejo različne tipe strižno in časovno odvisnega obnašanja.

Poznamo več tipov strižne odvisnosti viskoznosti realnih tekočin, tako ločimo psevdoplastične tekočine, tekočine s plastičnim tokovnim obnašanjem in dilatanco. Psevdoplastične tekočine so tiste, katerih viskoznost je v območju zelo nizkih strižnih hitrostih konstantna, v pogojih delovanja strižnega toka v območju "srednjih" strižnih hitrosti viskoznost enakomerno upada z naraščanjem strižnih hitrosti in doseže neko konstantno vrednost pri zelo visokih strižnih hitrostih. Za tekočine s plastičnim tokovnim obnašanjem je značilno, da je potrebna določena strižna sila, da tekočina steče. Notranja struktura takih tekočin je dovolj čvrsta, da se upira strižnemu toku do neke mere, tekočina se pri teh pogojih le plastično deformira. Ko je strižna napetost v tekočini dovolj velika, da omogoči urejanje osnovnih delcev, ki tvorijo notranjo strukturo v smeri strižne sile, tekočina steče. Viskoznost realnih tekočin lahko v določenih območjih strižnih hitrosti (oz. strižnih napetosti) strižno odvisno narašča (shear thickening). Takšno obnašanje je značilno za suspenzije z zelo visoko vsebnostjo trdnih delcev in ga imenujemo tudi dilatanca.

Časovno odvisne tekočine prav tako izkazujejo različne tipe strižno odvisnega obnašanja, na primer psevdoplastično, plastično ali v določenem območju strižnih hitrostih dilatantno. Tikotropne tekočine so tiste, katerih viskoznost pri danih strižnih pogojih upada s časom delovanja striga. Če tekočino izpostavimo neki konstantni strižni hitrosti, bo viskoznost tekočine upadala, dokler se osnovni delci tekočine, ki tvorijo notranjo strukturo, ne uredijo v smeri toka. Torej si v tem primeru razlagamo upadanje viskoznosti s časom kot nek proces

urejanja notranje strukture v nek strižni tok, vendar le ta poteka dovolj dolgo, da ga lahko časovno, med trajanjem eksperimenta zaznavamo. Če spremenimo strižne pogoje, na primer povečamo strižno hitrost, bo viskoznost tiksotropne tekočine s časom zopet upadala, dokler ni doseženo ravnotežno stanje podiranja in vzpostavljanja notranje strukture. Ko pa strižno hitrost zmanjšamo, je proces ponovne izgradnje notranje strukture tekočine izrazitejši od procesa podiranja, zato viskoznost ponovno narašča s časom delovanja striga. Viskoznost tekočine po prenehanju delovanja strižnih sil je po določenem času zopet enaka začetni. Tako časovno odvisno obnašanje imenujemo reverzibilno tiksotropno obnašanje. V primeru reverzibilnega časovno odvisnega obnašanja lahko dosežemo ravnotežno stanje med podiranjem in izgrajevanjem notranje strukture, zato tudi ravnotežne vrednosti viskoznosti pri določenih strižnih pogojih in določimo ravnotežno tokovno krivuljo.

Realne tekočine pa lahko izkazujejo tudi ireverzibilno časovno odvisno obnašanje. V tem primeru se viskoznost tekočine spreminja s časom delovanja striga, vendar po prenehanju delovanja striga vrednosti viskoznosti niso enake začetni, tudi če tekočina miruje dlje časa. Realne tekočine lahko izkazujejo obraten pojav, kot je tiksotropno obnašanje; to pomeni, da viskoznost s časom delovanja striga pri določenih strižnih pogojih narašča. Takšnih tekočin je veliko manj, pojav pa se imenuje antitiksotropija ali reopeksija.

Preučevanje reološkega obnašanja tekočin omogočajo različni inštrumenti, kot so viskozimetri in reometri. Inštrumente, namenjene proučevanju reološkega obnašanja tekočin, v splošnem delimo v dve skupini:

- absolutni inštrumenti (rotacijski ter kapilarni reometri in viskozimetri), za katere lahko vrednosti strižnih hitrosti oziroma strižnih napetosti izračunamo s pomočjo merljivih in nastavljivih količin ter s pomočjo geometrijskih karakteristik izbranega senzorskega sistema,
- relativni inštrumenti (viskozimeter s padajočo kroglico, viskozimeter s turbinskimi mešali, penetrometer, Fordova čaša itd), za katere strižni pogoji med meritvijo niso natančno določeni. Viskoznost proučevane tekočine določimo primerjalno, glede na tekočino znane viskoznosti ali pa je določena kar z enotami, ki so značilne za inštrument.

Rotacijski reometri in viskozimetri so inštrumenti, ki se zelo pogosto uporabljajo za proučevanje reološkega obnašanja nenewtonskih tekočin. Merilni sistem je sestavljen iz dveh delov, od katerih lahko eden miruje in drugi rotira ali obratno, lahko pa oba dela rotirata. Glede na načine merjenja poznamo dve vrsti rotacijskih reometrov:

- rotacijski reometer z nastavljivo strižno hitrostjo, pri katerem je neodvisna spremenljivka strižna hitrost, merimo pa strižno napetost,
- rotacijski reometer z nastavljivo strižno napetostjo, pri katerem je neodvisna spremenljivka strižna napetost, merimo pa strižno hitrost.

Novejši tipi komercialnih reometrov so reometri z nastavljivo strižno napetostjo, ki omogočajo meritve pod različnimi pogoji enostavnega striga in lahko delujejo tudi kot reometri z nastavljivo strižno hitrostjo.

2.4.2 Tiksotropija in viskoznost

Termin tiksotropija je prvi uporabil Peterfi (1929, cit. po Mewis in Wagner, 2009), uvedel pa ga je Freundlich (1935, cit. po Mewis in Wagner, 2009). Sestavljen je iz grških besed thixis (dotakniti) in trepo (spremeniti) in se je prvotno nanašal na mehansko pogojeno spremembo suspenzije sol-gel brez časovnega faktorja. Kasneje se je pričel termin tiksotropija uporabljati bolj splošno in sicer Chapman (1949) v svojem delu o tiksotropiji in dilatanci morskih sedimentov opisuje tiksotropijo kot zmanjšanje viskoznosti zaradi mešanja ali kot zmanjšanje strižne trdnosti pri večanju hitrosti strižne deformacije.

Barnes (1997) navaja, da se danes strokovnjaki, ki se ukvarjajo s tiksotropijo, delijo v dve struji: prvi jo razumejo kot časovno odvisne spremembe v mikrostrukturi, ki jih povzročijo strižne obremenitve oz. mirovanje materiala in posledični reološki učinki. V teh krogih tiksotropijo velikokrat obravnavajo zelo ozko v smislu spremembe viskoznosti, ne zanimajo pa jih reverzibilne spremembe iz gela v tekoče stanje. V drugo strujo spadajo predvsem strokovnjaki iz industrijskega okolja, ki tiksotropijo dojemajo kot lastnost koncentriranih gelov, ki se zaradi tresenja utekočinijo in nato ob mirovanju zopet otrdijo. Ta lastnost je zaželena in tudi izkoriščena v praksi, na primer v barvah, prevlekah, lepilih itd. V kolikor ne upoštevamo teh razlik v mišljenju, lahko pride do napačnega razumevanja pri branju strokovne literature, ki obravnava tiksotropijo.

Na tem mestu bi navedla dve definiciji, ki ju omenja Billberg (2006) in odražata omenjeno dvojnost dojetanja tiksotropije. Prva definicija je skladna s prvo strujo in jo povzeta po Bauer in Collins (1967, cit. po Billberg, 2006): kadar se spremembe magnitude reoloških lastnosti sistema, kot so elastični moduli, meja tečenja in viskoznost, dogajajo reverzibilno in izotermalno zaradi strižnih deformacij in so te spremembe časovno odvisne, sistem smatramo kot tiksotropen. Druga definicija je iz Swedish National Encyclopaedia (cit. po Billberg, 2006) in je bolj po meri druge struje: tiksotropija je lastnost viskoznih ali gelastih materialov, ki se spremenijo v tekoče zaradi deformacije (napr. mešanja). Vzrok za

tiksotropijo je v strukturnih spremembah materiala, ki so odvisne od delovanja sile na sistem in so tudi časovno odvisne. Ko se deformiranje materiala preneha, se obnovi njegova originalna struktura.

Barnes (1997) navaja tudi definicije tiksotropije iz različnih leksikonov in iz reološke literature. Ena od novejših definicij je sledeča: tiksotropija je (časovno odvisno) zmanjševanje viskoznosti zaradi konstantne strižne napetosti ali hitrosti strižne deformacije, ki mu sledi povečanje viskoznosti, ko napetost ali strižna deformacija preneha (Barnes, Hutton in Walters, 1989, cit. po Barnes, 1997). Tudi ta definicija po njegovem mnenju še ni zadovoljiva, saj bi morala obsegati tudi reološke spremembe v mikrostrukturi kot posledico zunanjih sil ali strižne deformacije.

Danes je v znanstvenih krogih doseženo soglasje o naslednji definiciji tiksotropije (Mewis in Wagner, 2009): nenehno upadanje viskoznosti v času, ko material (vzorec), ki je prej miroval, teče in posledično naraščanje viskoznosti s časom, ko tečenje materiala ni več. Bistveni elementi te definicije so naslednji:

- temelji na viskoznosti,
- vsebuje časovno odvisno upadanje viskoznosti zaradi tečenja materiala,
- učinek je reverzibilen, ko se tečenje upočasni ali prekine.

Ta definicija vsebuje časovno odvisnost ali "spomin", ki je ponavadi povezan z viskoelastičnimi efekti.

Za razlago tiksotropije je pomemben koncept mikrostrukture, kot je poudaril Bilberg (2006), citiram: kadar govorimo o mikrostrukturi tiksotropnih materialov, imamo večinoma v mislih sistem s flokuliranimi delci. Lahko pa se pojem mikrostruktura nanaša tudi na vlakna, ki se razporejajo v najbolj ugoden položaj znotraj toka materiala, ali na kapljice v emulziji, ki spreminjajo geometrijo, ali na molekule v raztopini, ki se združujejo v oblike, ki so najbolj ugodne v danih razmerah. Različne oblike teh strukturnih sistemov se odražajo tako v viskoznosti kot v elastičnih lastnostih snovi. Čas, ki je potreben za porušitev strukture, je ponavadi občutno krajši kot čas, ki je potreben, da se struktura ponovno zgradi.

Barnes (1997) opisuje pojav tiksotropije na naslednji način, citiram: za vse tekočine z mikrostrukturo je značilna tiksotropija, saj ta odraža čas, ki je potreben za pretvorbo iz enega stanja mikrostrukture v drugega in spet nazaj. Gonilna sila mikrostrukturnih sprememb je rezultat tekme med poružitvijo strukture zaradi strižnih napetosti, regeneracije strukture zaradi trkov delcev in Brownovega gibanja. Brownovo gibanje je neurejeno termično gibanje

makroskopskih delcev v plinih ali kapljevinah kot posledica trkov z molekulami. Pri opazovanju Brownovega gibanja opazimo sledeče:

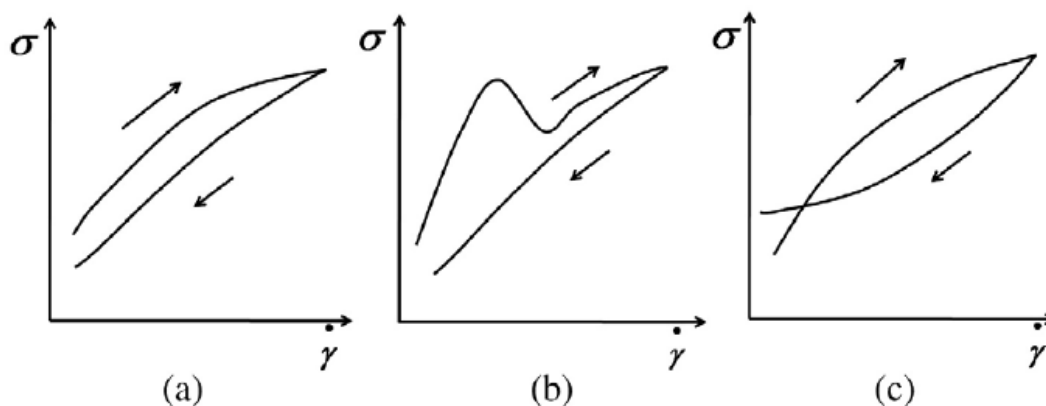
- določen delec se giblje v poljubni smeri,
- nadaljnje gibanje nima nobene povezave s predhodnim,
- gibanje nikoli ne preneha,
- intenzivnost gibanja delca narašča z višanjem temperature in je manjša pri večjih delcih in
- intenzivnost gibanja narašča z upadanjem viskoznosti okoliške tekočine.

Brownovo gibanje povzroča konstantne trke med delci v mikrostrukturi, ki iščejo najugodnejši položaj in se zaradi privlačnih sil navežejo na druge delce. Pojem mikrostruktura se v tiksotropnih sistemih nanaša večinoma na usmerjenost in prostorsko razporeditev podolgovatih delcev, ki pa vpliva na stopnjo viskoznosti in elastičnosti in zahteva določen čas za spremembo iz enega v drugo stanje v pogojih strižne napetosti ali zaradi Brownovega gibanja. V primeru "maksimalne" mikrostrukture je prostorska razporeditev in usmerjenost delcev naključna in delci so prepleteni med sabo, kar se odraža v večji viskoznosti. V primeru "minimalne" mikrostrukture so delci poravnani v smeri toka (strižne napetosti), med sabo niso prepleteni in takšna asimetrična razporeditev se odraža v manjši viskoznosti.

Mewis in Wagner (2009) opisujeta koncept tiksotropije kot kompleksno reološko obnašanje tiksotropnih materialov, ki ga lahko razumemo na nivoju mikrostrukture in je odvisno od strižne obremenitve materiala v preteklosti. Najpogosteje je odvisno od relativno šibkih atomskih sil med delci. Te sile pogojujejo nastanek kosmičev (flokul), ki tvorijo mrežno strukturo. Sile med delci so dovolj šibke, da se lahko pretrgajo pri tečenju snovi. Zaradi tega prostorska mrežna struktura razpade na posamezne kosmiče (flokule), pri povečani stopnji strižne obremenitve pa tudi ti kosmiči razpadejo na manjše delce. Zmanjšanje ali odsotnost strižne obremenitve omogoča ponoven nastanek kosmičev in mrežne strukture. Napetosti v suspenziji so odvisne od mikrostrukture. Če strukturne spremembe zahtevajo določeno časovno obdobje, enako velja tudi za napetosti, kar se odraža v tiksotropnem obnašanju suspenzije.

Merjenje tiksotropije je težavno. Mewis in Wagner (2009) navajata več tehnik, s katerimi lahko evidentiramo tiksotropijo pri določenem materialu. Ena od njih je histerezna tehnika. Pri tej tehniki sistematično povečujemo in nato zmanjšujemo hitrost strižne deformacije med ničelno in maksimalno vrednostjo. Če na graf narišemo vrednosti strižnih napetosti (na sliki v članku je sicer prikazana normalna napetost) v odvisnosti od hitrosti strižne deformacije, bo krivulja tiksotropnega materiala v obliki histerezne zanke, zaradi zaostajanja napetosti za deformacijo (Slika 2.11a). Histerezne zanke so lahko različnih oblik. Dva običajna primera

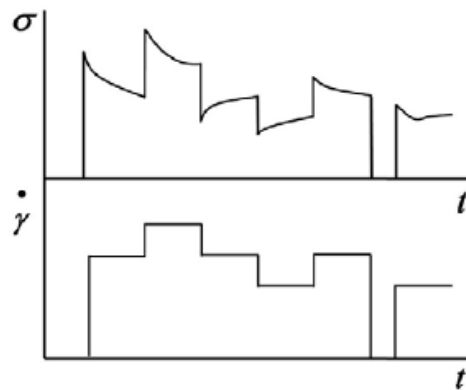
sta prikazana v nadaljevanju (Slika 2.11). Na sliki (Slika 2.11b) je prikazana histerezna zanka materiala, pri katerem je pri povečevanju hitrosti strižne deformacije prišlo do porušitve primarne strukture. Pri nekaterih materialih pa pri takšnem preizkusu lahko pride do heterogene porazdelitve hitrosti strižne deformacije v vzorcu. Pri tem lahko nastane histerezna zanka oblike, kot je prikazana na sliki (Slika 2.11c).



Slika 2.11: Oblike histereznih zank (Mewis in Wagner, 2009)

Figure 2.11: Fig. 7: Possible shapes of hysteresis loops (Mewis and Wagner, 2009)

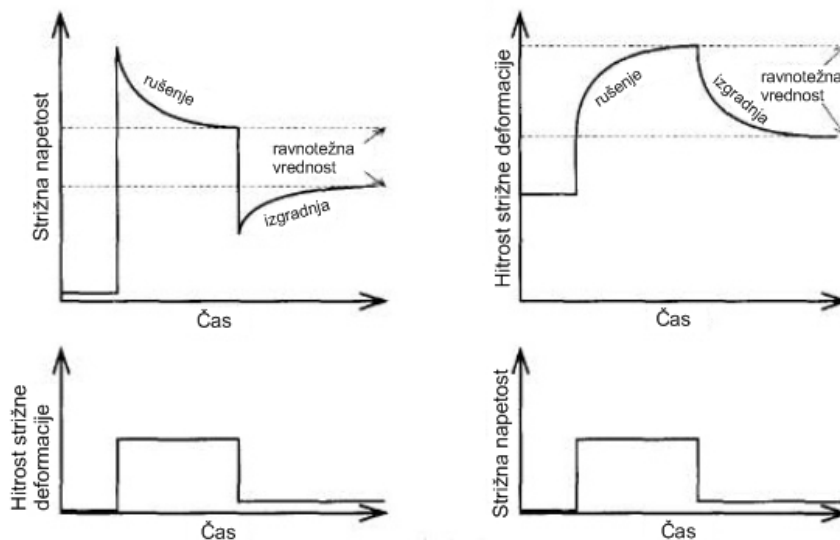
Največja omejitev histerezne zanke kot orodja za karakterizacijo tiksotropije je ta, da sta v eksperimentu združena hitrost strižne deformacije in čas. Zaradi tega ne moremo ločiti učinkov teh dveh parametrov. Glavni slabosti metode histerezne zanke se lahko izognemo tako, da uporabimo metodo stopničastega spreminjanja hitrosti strižne deformacije ali strižne napetosti. Vzorec strižemo z določeno hitrostjo strižne deformacije, dokler ni doseženo stabilno stanje. Na tak način lahko dosežemo novo začetno stanje. Ko nenadoma povečamo ali zmanjšamo hitrost strižne deformacije, viskoznost materiala odraža spremembe mikrostrukture pri dobro definiranih pogojih (Slika 2.12). Preizkus lahko ponovimo v nasprotno smer, s čimer dokažemo reverzibilnost.



Slika 2.12: Odziv tiksotropnega materiala glede na predhodno napetostno stanje (Mewis in Wagner, 2009)

Figure 2.12: Response of a thixotropic material to a complex shear history (Mewis and Wagner, 2009)

Barnes (1997) predlaga dva načina opazovanja tiksotropije na vzorcih (Slika 2.13): tako, da pri določeni strižni deformaciji opazujemo strižne napetosti, ali obratno, da pri določeni strižni napetosti opazujemo strižne deformacije.

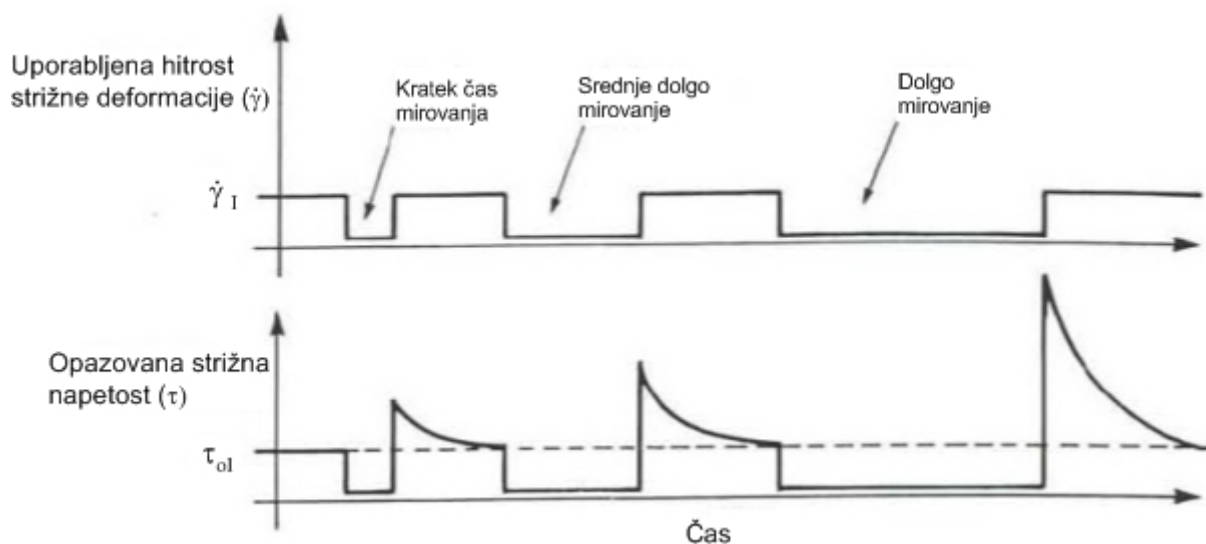


Slika 2.13: Dva načina preiskovanja tiksotropnih materialov (prirejeno po Barnes, 1997)

Figure 2.13: Two kinds of step experiment (adapted from Barnes, 1997)

Barnes (1997) še opozarja, da je pri preiskovanju tiksotropnih lastnosti materialov poleg časa in stopnje strižne obremenitve pomembna tudi "napetostna zgodovina" vzorca in čas mirovanja pred striženjem.

Billberg (2006) pa je v svojem doktorskem delu objavil diagram (Slika 2.14), ki lepo ponazarja vpliv časa mirovanja materiala na izgradnjo strukture in na strižno trdnost, ki jo pri tem razvije.



Slika 2.14: Vpliv časa mirovanja na izgradnjo strukture materiala (prirejeno po Cheng, D.C.H., 1987, cit. po Billberg, 2006)

Figure 2.14: Structural build-up depending on resting time (adapted from Cheng, D.C.H., 1987, cit. po Billberg, 2006)

2.4.3 Tikotropija zemljin

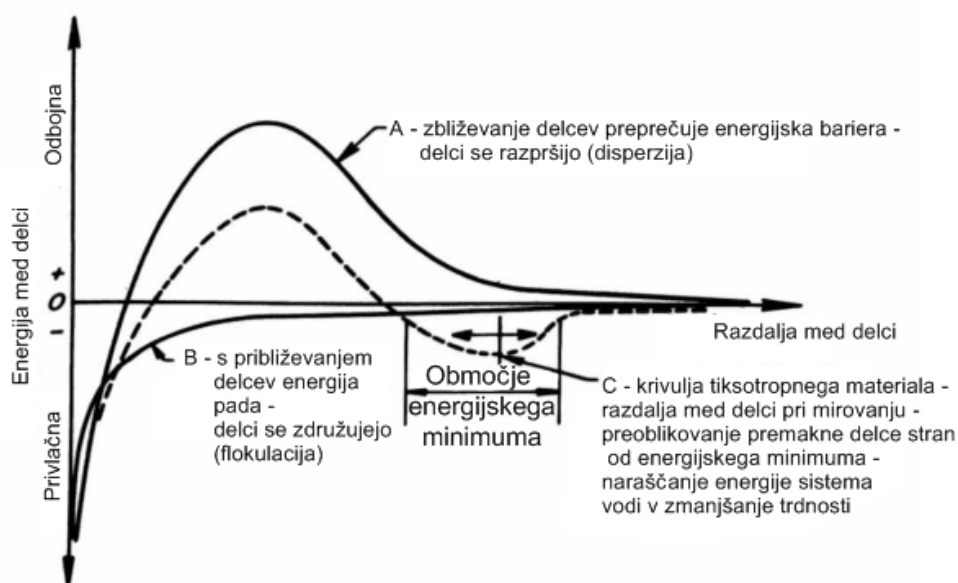
Ackermann (1950) je v članku, ki ima zgodovinsko vrednost, opisal tikotropijo drobnozrnatih zemljin na primeru postglacialnih glin na Norveškem. Preizkus tikotropije v laboratoriju je opisal takole: enako količino gline in vode s tresenjem premešamo v epruveti in ko jo po določenem času počasi obrnemo, se bo glina še vedno držala dna epruvete. Če epruveto v tem položaju stresemo ali nanjo potrkamo, bo glinena zmes zdrsela navzdol. Čez nekaj časa se bo suspenzija zopet strdila, tako da pri obračanju epruvete ne bo zdrsela. Postopek lahko ponavljamo poljubno dolgo. Takšno izotermalno, reverzibilno spremembo viskoznosti koncentrirane suspenzije zelo drobnih delcev imenujemo tikotropijo. Ackermann (1950) razlaga tikotropijo kot mejni fenomen, ki v tistem času še ni imel zadovoljive teoretične razlage. V tikotropnem sistemu trdnih delcev in tekočine med trdnimi delci ni neposrednih stikov, ker vsak delec obdaja tekočina in jih tako izolira. Delci v gel stanju tvorijo zelo rahlo strukturo, v kateri so sile, ki povezujejo delce, ekstremno majhne. Že ob najmanjši mehanski motnji (sunek, tresenje) se vezi pretrgajo (sol stanje), ko pa tresenje preneha, se po določenem času struktura obnovi. Ackermann meni, da na tikotropijo vplivajo številni faktorji, kot najbolj pomembne pa navaja: tip in koncentracijo disperznega sistema, velikost zrn, obliko zrn, vrsto glinenih mineralov in vsebnost elektrolitov. S tikotropijo pogojene

spremembe trdnosti, ki so bile opažene in dokazane v laboratoriju, imajo lahko v naravi katastrofalne posledice, kar opiše Ackermann na primerih drsenja hitrih glin "quick clays" na Norveškem. Ackermann na podlagi laboratorijskih preizkusov na "quick clays" in opazovanj v naravi meni, da je potrebno dopolniti koncept konsistenčnih stanj, ki ga je uvedel Atterberg (1912, cit. po Ackermann, 1950). Ko je vsebnost vode višja od meje tečenja, glina ni v trajno tekočem stanju, ampak je v latentnem tekočem stanju oziroma v kvazi trdnem stanju, ki lahko postane začasno tekoče. Tekoče stanje, ki ga povzročijo vibracije ali tresenje, po določenem času mirovanja zamenja kvazi trdno stanje. Obnašanje gline je tako tiksotropno ali hitro (quick). Med permanentno plastično in permanentno tekočo konsistenco, kot ju je definiral Atterberg, obstajaj torej hitro (quick) ali kvazi trdno stanje, ki na podlagi zgolj mehanske motnje postane tekoča. Trajanje tiksotropnega utekočinjenja in minimalna viskoznost sta odvisna od stopnje tiksotropije. Ackermann za mejo med hitro in tekočo konsistenco predlaga mejo otrdevanja. V nadaljevanju navaja, da je tiksotropija pri zemljinah omejena na drobnozrnate zemljine. Če se poruši struktura nekonsolidiranih, rahlih in mokrih zemljin, lahko opazujemo učinke tiksotropije kot deloma reverzibilne spremembe viskoznosti, neodvisne od konsistence. Zaradi tega je potrebno ločiti med tiksotropno konsistenco in med tiksotropnimi lastnostmi zemljin.

Chapman (1949) je preučeval vpliv fizikalnih lastnosti morskih sedimentov na obnašanje živali, ki v njih živijo. Pri tem se je osredotočil na penetrabilnost zemljin, na njihove tiksotropne lastnosti in na spremembe lastnosti zemljin s spreminjanjem njihove sestave. Teste je izvajal z dilatančnim viskozimetrom, ki sta ga zasnovala Freundlich in Röder, podrobno pa ga je opisal Röder (1939, cit. po Chapman, 1949). Ugotovil je, da mešanice peska in vode lahko izkazujejo različne lastnosti, od dilatantnih do tiksotropnih, odvisno od njunega razmerja. Z izbrano metodo preiskovanja sicer ni zaznal izrazitih razlik v lastnostih med suhimi in mokrimi peski, prav tako ne med peski, ki so vsebovali melj in glino in med tistimi, iz katerih je bila fina frakcija sprana. Kljub temu rezultati kažejo na to, da so gostota, viskoznost in količina vode tisto, kar določa velik razpon lastnosti peska, ki je izpostavljen dinamičnim obremenitvam. Ta zaključek je podkrepil s testi, pri katerih je uporabil tekočine z drugačno gostoto in viskoznostjo, kot jo ima voda.

Najbolj sistematično se je preučevanju pojava tiksotropije pri zemljinah posvetil Mitchell (1976), zato največkrat zasledimo njegovo definicijo tiksotropije: izotermalen, reverzibilen, časovno odvisen proces, pri katerem se material pri konstantni vlagi, sestavi in volumnu med preoblikovanjem zmehta ali utekočini, po mirovanju pa zopet pridobiva na trdnosti. Ker se Mitchell pri postavitvi svoje hipoteze naslanja na dognanja nekaterih svojih sodobnikov, bom v nadaljevanju navedla bistvene.

Tiksotropija v redkih suspenzijah: Fizikalno gledano je le malo podobnosti med redkimi raztopinami in glino, vendar Mitchell meni, da je mogoča in koristna primerjava mehanizmov agregacije in disperzije v redkih suspenzijah in v bolj koncentriranih "voda-glina" sistemih. Pri tem se sklicuje na Freundlicha (1935, cit. po Mitchell, 1960), ki je med prvimi podrobneje raziskoval pojav tiksotropije. Le-ta je pokazal, da je tiksotropno obnašanje nedvoumno odvisno od ravnotežja sil med delci. Opazil je tudi velik vpliv elektrolitov na sistem in sicer, da višja koncentracija elektrolita pomeni hitrejši nastanek gela iz tiksotropne suspenzije. Delci iste snovi so nagnjeni k temu, da se združujejo. Na površini vseh delcev (zrn) obstaja neravnovesje sil. To neravnovesje je lahko uravnoteženo ali s kontaktom z delcem iste snovi ali z adsorbicijo ionov sosednje faze. Zaradi tega je možno, da se delci v suspenziji kot rezultat njihovega termalnega gibanja združijo in s tem povzročijo solidifikacijo (otrditev) suspenzije. Razlaga tiksotropije na osnovi ravnotežja privlačnosti in odbijanja je dobila podporo mnogih drugih raziskovalcev. Ta koncept je ilustriran na sliki (Slika 2.15), kjer ordinatna vrednost krivulje predstavlja energijo, potrebno za premik delca iz enega položaja v drugega vzdolž abscise (torej za spremembo razmika med delci).



Slika 2.15: Odnos razdalje in energije med delci za dispergirane, flokulirane in tiksotropne materiale (prirejeno po Mitchell, 1960)

Figure 2.15: Energy-distance curves for dilute suspensions of dispersed, flocculated and thixotropic materials (adapted from Mitchell, 1960)

Krivulja A predstavlja stabilno suspenzijo, ki ne kaže tiksotropnih lastnosti, niti ne težnje po flokulaciji, ker energijska bariera preprečuje zblizevanje delcev. Krivulja B predstavlja pogoje, v katerih se bodo delci pri zmanjševanju energije spontano kopičili. Energijski minimum krivulje C predstavlja položaj delcev v tiksotropnem gelu. Vsako premikanje (tresenje ali

strižne napetosti) vodijo v spremembo razdalje med delci in povečajo energijo odbijanja, kar vodi v bolj tekoče stanje. Takšen koncept je sicer vzbudil tudi nekaj pomislekov pri ostalih raziskovalcih. Največ zaradi tega, ker temelji na predpostavki, da so ploščasto oblikovani delci poravnani vzporedno drug ob drugemu, v resnici pa so v prostoru naključno orientirani in tvorijo nekakšno togo strukturo.

Mitchell (1960) nadalje ugotavlja, da obstaja veliko dokazov o tem, da je tiksotropno obnašanje povezano s težnjo delcev po flokulaciji, dokler imajo le-ti dovolj prostora za "prosto izbiro" svojega položaja v disperziji. Tiksotropija se največkrat pojavlja v materialih s podolgovatimi delci, kot je na primer glina, obstajajo pa tudi izjeme.

Porni tlaki in energija sistema: do pomembnih spoznanj za Mitchell-ovo hipotezo je prišel Day (1954, 1955, cit. po Mitchell, 1960), ki je preučeval učinke striženja materiala na kohezijske sile med delci gline in sicer z merjenjem adsorpcijskih sil vode. Meritve je izvajal s tenziometri in tako pridobil podatke o negativnih pornih tlakih v glini. Uporabil je saturirane vzorce gline z vsebnostjo vode blizu meje tečenja. Vzorce je premešal in opazoval spremembe pornih tlakov. Ugotovil je, da porni tlaki po preoblikovanju gline narastejo na maksimalno vrednost, potem pa postopoma padajo proti začetni vrednosti. Dejstvo, da se pri staranju materiala nižajo porni tlaki, podpira osnovno razumevanje tiksotropije. Zdi se logično, da manjšanje pornih tlakov in s tem večanje efektivnih napetosti, pogojuje večjo trdnost materiala. Z merjenjem pornih tlakov pri konstantnem volumnu dobimo informacijo o prosti energiji vode. Večanje pornih tlakov je povezano z večanjem proste energije, kar Mitchell smatra za neposreden dokaz za to, da prosta energija sistema s časom pada. To pomeni, da spontane reakcije v sistemu težijo k vzpostavitvi ravnotežja.

Kemične spremembe: Mitchell opozarja na možnost kemičnih sprememb v materialu. Železovi oksidi, karbonati, organska snov, kremenica in aluminijevi oksidi so v različnih količinah prisotni v večini zemljin in vse te snovi lahko povežejo zrna. S preoblikovanjem ali kompakcijo materiala se te vezi lahko uničijo, vendar ni zagotovila, da se bodo s časom znova vzpostavile. Ker je za tiksotropne sisteme značilna reverzibilnost, cementacije ne moremo obravnavati kot vzrok za tiksotropno obnašanje, kar pa ne pomeni, da kemične spremembe niso prisotne v procesu staranja materiala.

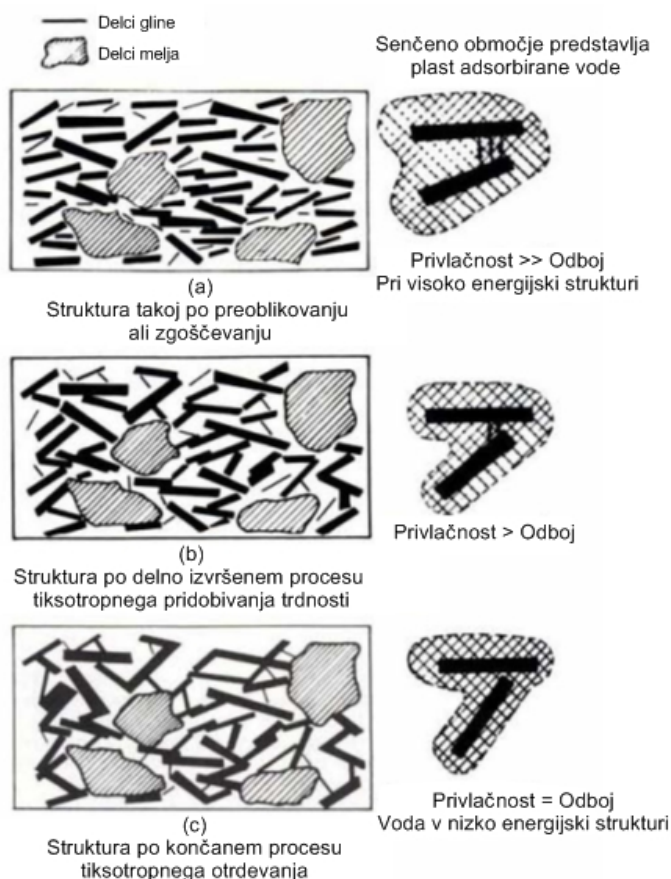
Mitchell-ova hipoteza o vzrokih tiksotropnega obnašanja temelji na domnevi, da energijsko in napetostno stanje v zemljini, takoj po preoblikovanju, ni v ravnovesju. V kolikor bi ravnovesje stanje obstajalo, v zemljini ne bi prišlo do sprememb, ki pa se očitno zgodijo. Hipoteza se nanaša na takšne zemljine, pri katerih se tiksotropija odraža prvenstveno v obliki strukturnih

sprememb, t.j. da so spremembe lastnosti pogojene z razporeditvijo delcev, s strukturo adsorbirane vode in z razporeditvijo ionov v tekoči fazi.

Mitchell meni, da morata biti za pojav tiksotropije izpolnjena dva pogoja:

- ravnotežje sil med delci mora biti takšno, da omogoča flokulacijo in
- težnja k flokulaciji mora biti dovolj majhna, da jo preseže mehanska obdelava zemljine (striženje, tresenje).

Po preoblikovanju ali kompakciji tiksotropne zemljine se s pomočjo te "zunanje" energije, ki je delovala na sistem, vzpostavi disperzna struktura, v kateri so delci poravnani vzporedno. To pomeni, da je delovanje zunanje sile pripomoglo odbojnim silam, ki delujejo med delci, da je prišlo do nastanka disperznega sistema. Energija med delci je spremenjena zaradi delovanja zunanje sile, plasti adsorbirane vode in ioni pa so razporejeni v skladu z novim energijskim stanjem.

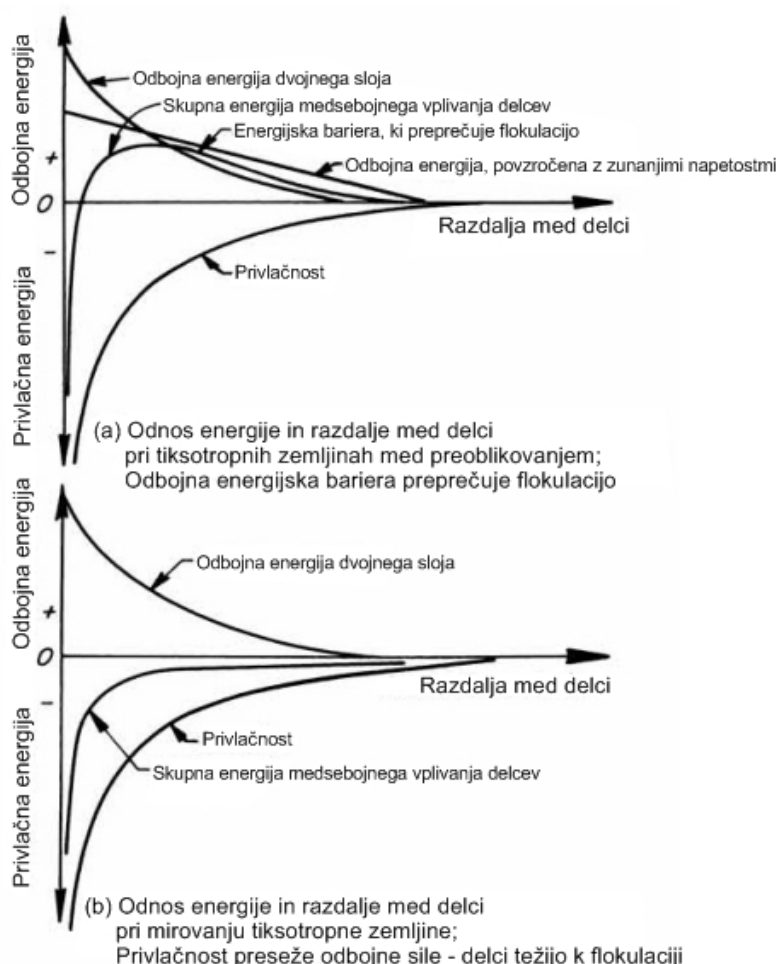


Slika 2.16: Shematičen prikaz tiksotropnih strukturnih sprememb v drobnozrnatih zemljinah (prirejeno po Mitchell, 1960)

Figure 2.16: Schematic diagram of thixotropic structure change in a fine graded soil (adapted from Mitchell, 1960)

Struktura tiksotropnega materiala takoj po preoblikovanju je prikazana na sliki (Slika 2.16a). V trenutku, ko ni več delovanje zunanje sile na sistem, odbojne sile pojenjajo. Presežejo jih privlačne sile, ki narekujejo novo razporeditev delcev in vode v prostoru (Slika 2.16b,c). Posledično se struktura sistema prične prilagajati temu novemu energijskemu stanju. Ker so strukturne spremembe pri tiksotropiji povezane s fizičnim premikanjem delcev, vode in ionov, je ta proces časovno odvisen. Takšne strukturne spremembe vplivajo na mehanske lastnosti zemljin, kot je naraščanje trdnosti.

Na sliki spodaj (Slika 2.17) so prikazane krivulje, ki prikazujejo privlačne in odbojne sile ter skupno energijo, ki deluje med delci med preoblikovanjem in mirovanjem zemljine. Energijske spremembe so povezane s spremembo razporeditve delcev, adsorbirane vode in ionov. Osnovo za razumevanje tega mehanizma predstavlja teorija o difuznem dvojnem sloju (Mitchell, 1976 in Das, 2008).



Slika 2.17: Odnos razdalje in energije med delci v tiksotropni zemljini (prirejeno po Mitchell, 1960)

Figure 2.17: Energy-distance curves for a thixotropic soil (adapted from Mitchell, 1960)

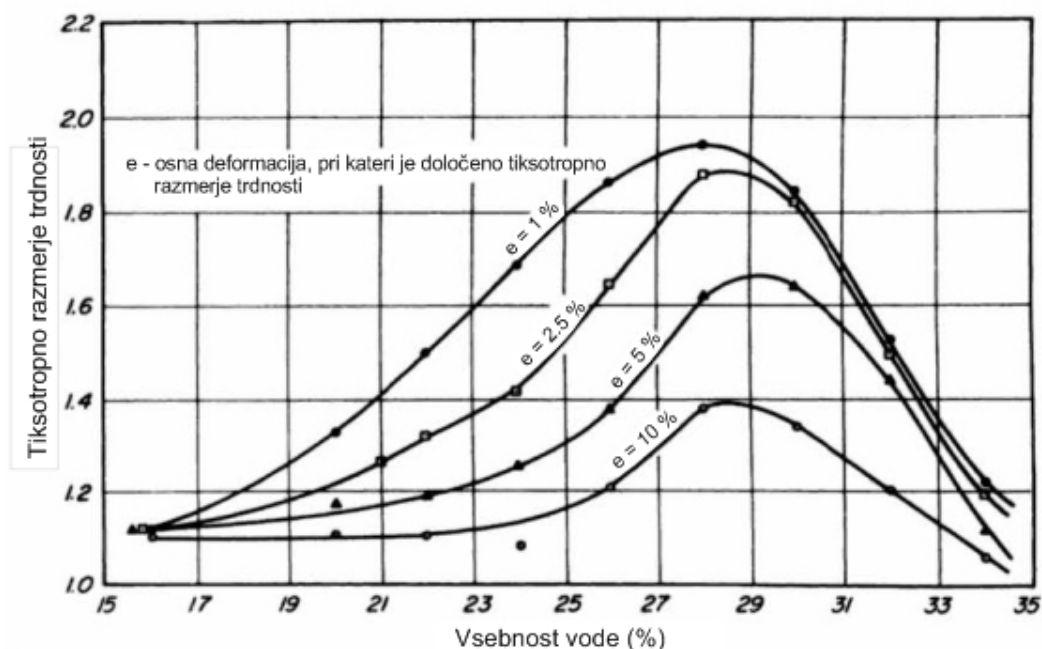
Na sliki (Slika 2.17a) so prikazana odbojna energija dvojnega sloja, privlačna energija ter odbojna energija, povzročena s zunanjimi strižnimi napetostmi. Slednja se manjša z naraščanjem razdalje med delci, saj velja, da manjša, kot je razdalja med delci, večji procent energije je potreben za premik delcev. Energijska krivulja celotnega sistema je grbave oblike. Grbina predstavlja energijsko bariero, ki preprečuje približevanje delcev oziroma flokulacijo. Zaradi tega se vzpostavi šibka disperzna struktura. Ko delovanje zunanje sile preneha (Slika 2.17b), se energija odbijanja zmanjša, kar pomeni, da ni več bariere, ki bi preprečevala kosmičenje. Ko privlačna energija preseže energijo odbijanja, pride do flokulacije. To pa zahteva lokalno prerazporeditev ionov v dvojni plasti ter vode same. Hkrati s temi procesi se formira nekoliko drugačna struktura adsorbirane vode. Ker ti procesi zahtevajo premikanje delcev, ionov in vode, se ne zgodijo v trenutku. Čas, ki je potreben za vzpostavitev ravnotežnega stanja, je odvisen od začetnega stanja preoblikovane zemljine ter od vsebnosti vode, zrnivosti materiala, oblike delcev, gibanja adsorbiranja vode in od magnitude efektivnih napetosti med staranjem zemljine. Ker se proces tiksotropnega utrjevanja zemljine odvija pri konstantnem volumnu, so premiki delcev po vsej verjetnosti majhni in rotacijske narave. Vendar pa imajo lahko ti premiki izrazit učinek na trdnost zemljine.

Pogosto se kot merilo za učinke tiksotropije v zemljinah uporablja razmerje trdnosti, ki sta ga uvedla Seed and Chan (1957, cit. po Mitchell, 1960). Tiksotropno razmerje trdnosti je definirano kot razmerje med nedrenirano strižno trdnostjo v času t po preoblikovanju in med nedrenirano strižno trdnostjo v času $t = 0$ (takoj po preoblikovanju):

$$\text{Tiksotropno razmerje trdnosti} = \frac{c_{u(t)}}{c_{u(t=0)}} \quad (2.22)$$

Razmerje trdnosti je bolj primerno za opis pojava tiksotropije pri določenem materialu kot absolutna trdnost, saj omogoča primerjavo med različnimi zemljinami z različno vsebnostjo vode.

Rezultati eksperimentov: Mitchell navaja rezultate različnih avtorjev, ki potrjujejo njegovo hipotezo. Karakteristični rezultati so prikazani na sliki (Slika 2.18), kjer je tiksotropno razmerje trdnosti prikazano v odvisnosti od vlage. Vidimo, da obstaja območje vsebnosti vode v zemljini, pri kateri pride pojav tiksotropije bolj do izraza. Voda ima odločilen vpliv na sile, ki delujejo med zrni v zemljini. Pri določeni vlagi so delci flokulirani, vendar dovzetni za disperzijo ob delovanju zunanje sile. Zmanjšanje tiksotropnih učinkov pri povečani strižni deformaciji je pričakovano, saj deformacije uničujejo strukturo, ki nastaja s staranjem vzorca.



Slika 2.18: Tiksotropno razmerje trdnosti meljaste gline v odvisnosti od vsebnosti vode (prirejeno po Mitchell, 1960)

Figure 2.18: Thixotropic strength ratio for silty clay as a function of molding water content (adapted from Mitchell, 1960)

Mitchell ugotavlja, da je tiksotropno razmerje trdnosti boljši pokazatelj učinkov tiksotropije kot dejansko povečanje trdnosti, saj razmerje odraža spremembo trdnosti glede na začetno vrednost. Nadalje ugotavlja, so bili vzorci, kompaktirani z gnetenjem, veliko bolj tiksotropni kot tisti, ki so bili kompaktirani statično. Razlaga je naslednja: pri dani vlagi sile med delci (v odsotnosti vpliva zunanjih strižnih sil) diktirajo flokulacijo. Pri statični kompaktaciji, kjer so strižne deformacije majhne, se ustvari kosmičasta struktura. Ker je ta struktura blizu ravnotežni strukturi, so učinki tiksotropije majhni. Struktura pregnetenega vzorca pa je disperzna, torej začetna struktura precej odstopa od ravnotežne, kar pogojuje izrazite tiksotropne učinke. S poskusi je bilo dokazano tudi, da se s staranjem tiksotropne zemljine manjša njena stisljivost, kar je pričakovano, saj različne strukture enakega materiala narekujejo različen potek konsolidacije. Kosmičaste strukture se bolj upirajo stiskanju kot disperzne.

Tudi Das (2008) opisuje občutljivost in tiksotropijo pri glinah. Pri večini glinastih zemljin pride pri preoblikovanju do izrazitega zmanjšanja trdnosti. To karakteristiko saturiranih kohezivnih zemljin kvantitativno ovrednotimo kot občutljivost:

$$\text{Občutljivost} = \frac{C_{u(\text{neporušen})}}{C_{u(\text{preoblikovan})}}, \quad (2.23)$$

pri čemer uporabimo vrednosti nedrenirane strižne trdnosti. Klasifikacija glin, ki temelji na občutljivosti, je podana v preglednici (Preglednica 2.2).

Preglednica 2.2: Klasifikacija glin glede na njihovo občutljivost (Das, 2008)

Table 2.2: The classification of clays based on sensitivity (Das, 2008)

Občutljivost	Glina
≈ 1	Neobčutljiva
1-2	Malo občutljiva
2-4	Srednje občutljiva
4-8	Občutljiva
8-16	Ekstra občutljiva
> 16	Hitra (quick clay)

Petkovšek (2004) opozarja, da so geološke in geotehnične razmere v Sloveniji sicer takšne, da se le redko srečamo z zemljinami, ki bi jih opisovali z izrazoma "občutljive" ali "tikotropne". Nasprotno pa je v zemljinam podobnim materialih tikotropija pogosta in moramo biti nanjo zelo pozorni.

2.4.4 Tikotropija sadre

O tikotropiji kemične sadre ni veliko podatkov. Petkovšek in drugi (2008) opisujejo načine odlaganja kemičnih sader, ki nastajajo Sloveniji pri različnih proizvodnih procesih in navajajo, da pri ravnanju s temi materiali tikotropija predstavlja velik problem. Nekaj primerov težav, ki so nastopile pri ravnanju s kemično sadro, je opisanih v nadaljevanju.

Raziskave za potrebe sanacije odlagališča steklarske sadre (Slika 2.19) in raziskave energetskih sader so pokazale, da je eno največjih tveganj pri načrtovanju tehnologije gradnje in v izračunih stabilnosti in deformacij nasipov iz sintetičnih sader vezano na pojav tikotropnega mehčanja (Petkovšek in drugi, 2012). Steklarska sadra pride iz filtrskih stiskalnic v obliki ploščatih, na videz suhih kompaktnih kosov. Zaradi transporta s tovornjaki na mesto odlaganja in zaradi vibracij pri razgrinjanju z buldožerji pride do preurejanja podolgovatih zrn sadre. Posledice takšnega preoblikovanja odražajo laboratorijski rezultati, podani v preglednici (Preglednica 2.3).

Tudi ožemanje fosforne sadre in njeno suho odlaganje na odlagališču Učno pod Hrastnikom so med vgrajevanjem spremljale težave zaradi tikotropije. Suho odlaganje se je kmalu

pokazalo za neekonomično, proizvodnja fosforne kisline v TKI Hrastnik je bila ukinjena in z njo vred tudi proizvodnja fosforne sadre (Petkovšek in drugi, 2012).

Petkovšek (2004) poroča o pojavu tiksotropije na jalovišču Boršt, kjer je odlagališče hidrometalurške jalovine, ki je nastajala pri proizvodnji uranovega koncentrata na Rudniku urana Žirovski vrh do leta 1990. Jalovina je bila klasificirana kot melj in meljast pesek, v njej pa prevladujeta minerala kremen kot primarni mineral prikamnine in sadra kot značilni sekundarni mineral, nastal pri nevtralizaciji v metalurškem obratu. Že pri razgrinjanju na jalovišču je prišlo do lokalnih pojavov utekočinjenja materiala pod gosenicami buldožerja. Sčasoma deponiranje jalovine zaradi utekočinjanja ni bilo več možno, zato so oblikovali posebno začasno zimsko deponijo, s katere so poleti razgrinjali material na jalovišče.

Petkovšek in drugi (2008) nadalje navajajo, da je bila tiksotropija opažena pri vseh kemičnih sadrah, ki se proizvajajo v Sloveniji, in sicer pri določeni vlagi. Glede na izkušnje je optimalna vlaga tista, pri kateri lahko pričakujemo prve znake tiksotropije. Pri nizkih gostotah, ki so dosežene s slabo kompakcijo na odlagališčih, lahko plasti kemične sadre sprejmejo in zadržujejo precejšnje količine vode, ki pronica s površja ali iz zaledja, kar lahko sčasoma ustvari pogoje za tiksotropno utekočinjanje.

Preglednica 2.3: Nedrenirani parametri steklarske sadre, ki odražajo učinke tiksotropije (Petkovšek in drugi, 2008)

Table 2.3: Undrained characteristics of glass gypsum illustrating the effect of tixotropy (Petkovšek et al, 2008)

	Ožeta sadra iz filtrske stiskalnice	Preoblikovan vzorec
Vlaga (%)	65 - 75	65 - 75
Suha gostota vzorca iz filtrske stiskalnice (g/cm³)	8,6 - 9,8	
Suha gostota preoblikovanega vzorca (g/cm³)		7,1 - 11
	> 100 kPa	
	Čas mirovanja vzorca	
Nedrenirana strižna trdnost (kPa)	1 dan	7,1
	4 dni	15,1
	7 dni	18,9
	35 dni	20,5

Sadra je v vodi topna. Na območjih z veliko padavinami lahko pričakujemo, da se bodo prvotno stabilne plasti kemične sadre sčasoma spremenile v trajno metastabilne tiksotropne mase. Tiksotropija je glavni razlog, da se vsa v Sloveniji proizvedena energetska sadra (razen tiste, ki jo uporabijo pri proizvodnji cementa) stabilizira z elektrofiltrskim pepelom. Le-

ta izboljša geomehanske lastnosti in zmanjša tiksotropijo (Petkovšek, 2003). Po letu 2008 so v Cinkarni Celje pričeli z uporabo učinkovitih fitrskih preš, ki ožemajo sadro v kolač z nizko vlago. Ker se pri tem ustvarja makrostruktura, tiksotropija ne nastopa kot moteč dejavnik.

Na slikah spodaj (Slika 2.19 in Slika 2.20) je prikazan pojav tiksotropije na terenu.



Slika 2.19: Pojav tiksotropije pri zgoščanju steklarske sadre (Petkovšek, 2008)

Figure 2.19: Glass gypsum tixotropy phenomena during compaction (Petkovšek, 2008)



Slika 2.20: Postopno utekočinjenje materiala pri tehnoloških poskusih na terenu (Petkovšek, 2004)

Figure 2.20: Material progressive liquefaction during technological field tests (Petkovšek, 2004)

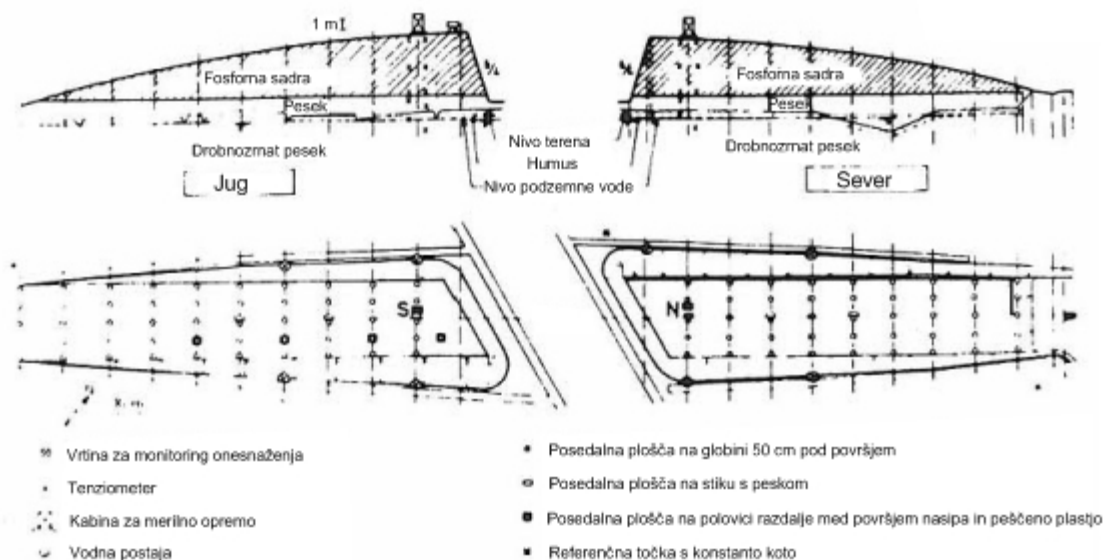
2.5 Stabilnost in trajnost nasipov iz kemične sadre

2.5.1 Uporaba sadre pri gradnji cestnih nasipov

V preteklosti je bilo izvedeno več poskusov gradnje cest z uporabo kemične sadre. V nadaljevanju podrobneje opisujem primere iz Belgije in Floride ter izkušnje iz Texasa.

Gorle (1978) opisuje eksperiment, ki je bil izveden v letih od 1976 do 1978 v Belgiji. Zgradili so poskusni cestni nasip iz fosforne sadre in ga opazovali eno leto, pri čemer so merili posedke, porne tlake, razporeditev vlage, morebitno onesnaženost podzemne vode in razpoke. V Belgiji so v sedemdesetih letih prejšnjega stoletja letno proizvedli okrog 2 milijona ton fosforne sadre. Le majhen del te sadre so uporabili, večino pa so odlagali na deponijah v Severnem morju. Po drugi strani pa so v tem času cene tradicionalnih materialov v cestogradnji strmo rastle. To je bil povod, da so izvedli omenjeno študijo, v kateri so preučili možnost uporabe sadre pri gradnji cestnih nasipov.

Iz fosforne sadre sta bila zgrajena dva priključna nasipa, ki sta vodila do mostu preko dveh hitrih cest v Zelzate (Belgija). Na sliki (Slika 2.21) je prikazan presek in tlorisna situacija z razporeditvijo merilne opreme.



Slika 2.21: Prerez in tloris eksperimentalnih nasipov z razporeditvijo merilne opreme (prirejeno po Gorle, 1978)

Figure 2.21: Vertical section and top view of the eksperimental embankments, with disposition of the measuring equipment (adapted from Gorle, 1978)

Horizontalna plast finega peska je zagotovila, da je bila sadra 2 m nad najvišjim nivojem vode, s čimer je bilo preprečeno izluževanje, vsebnost vode v fosforni sadri pa je bila

omejena na 20 %. Prvi del severnega nasipa (Slika 2.21) je bil zgrajen pred zimo 1976/77. Drugi del severnega in južni nasip pa sta bila zgrajena od avgusta do novembra 1977. Fosforno sadro so zgoščevali v plasteh z minimalno debelino 20 cm z uporabo nabijalnega valjarja (16 prehodov), ki mu je sledila še uporaba valjarja s pnevmatikami (20 prehodov).

Za južni nasip je bila povprečna vsebnost vode pri zgoščevanju 19 ± 3 %, povprečna debelina zgoščene plasti 20 ± 6 cm in povprečna suha prostorninska teža $1,33 \pm 0,1$ t/m³. Kljub temu, da je bila energija zgoščevanja štirikrat večja kot pri tradicionalnih nasipnih materialih, so bile povprečne gostote relativno nizke, poleg tega je bil vertikalni gradient gostote znotraj vsake posamezne plasti zelo velik. Preizkusi s krožno ploščo so v splošnem kazali deformacijski modul, večji od 30 MPa.

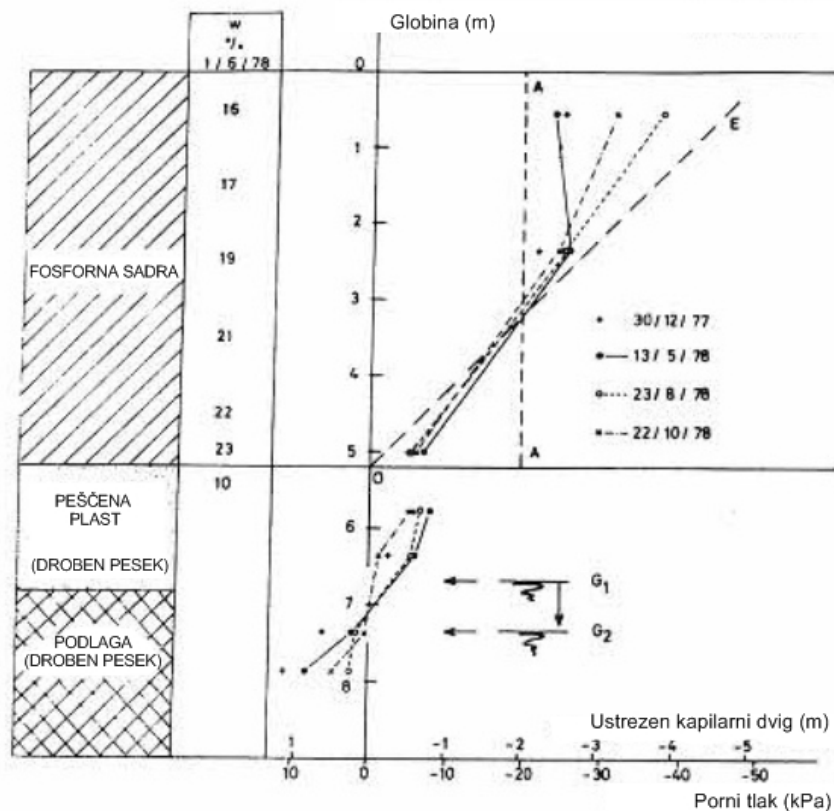
Zgornji del nasipa je bil razdeljen na štiri enake dele, ki so jih zaščitili pred zimo na naslednje načine:

- penetracija z rezanim bitumnom 80/120 (1,2 kg/m²) in zaščita z oksidiranim bitumnom 30/45 (6 kg/m²),
- polietilenska prevleka (debeline 0,2 mm), pokrita s 15 cm humusa,
- zaščita z drobirjem 8/16: 15 kg/m² – površinska zaščita s kislno emulzijo 65 % bitumna (1,8 kg/m²) in drobir 2/8: 6 kg/m²,
- četrti del nasipa so pustili neobdelan za primerjavo z ostalimi tremi.

Porne tlake so merili zvezno v obeh nasipih in sicer na različnih globinah v fosforni sadri, v peščeni plasti in v podlagi. Na sliki (Slika 2.22) so prikazani rezultati meritev ob štirih različnih datumih.

Med gradnjo nasipa je bila povprečna vlaga v fosforni sadri 19 %. Začetno razporeditev pornih tlakov v fosforni sadri kaže vertikalna linija AA (Slika 2.22) pri -20 kPa. S slike je tudi razvidno, da sukcijska v zgornjih delih nasipa pada, na meji med sadro in peskom pa doseže ničlo (atmosferski tlak). Z drugimi besedami, porni tlaki se približajo liniji 0E (Slika 2.22), ki podaja ravnotežni tlak vode na površju nasipa. Plast peska posledično upočasni vertikalno drenažo in povzroča akumulacijo vode v spodnjem delu sadre. Ti podatki so bili potrjeni z določanjem vsebnosti vode v vzorcih, pridobljenih z vertikalnim vrtanjem v nasip: vsebnost vode v navpični smeri narašča od 16 % na površju do 23 % na dnu nasipa iz fosforne sadre (Slika 2.22). Vsebnost vode v spodnjem delu nasipa narašča tudi v horizontalni smeri proti brežini nasipa, kjer pride infiltracija bolj do izraza, kot na sredini nasipa. Vsebnost vode v pesku tik pod sadro je precej nižja in znaša 10 %. Nivo podzemne vode v podlagi in peščeni plasti niha med linijama G₁ in G₂ (Slika 2.22). Porni tlaki sledijo temu nihanju. Na ta način se

je pesek izkazal kot učinkovita zaščita proti izluževanju sadre zaradi podzemne vode, vendar je povzročil akumulacijo vode v sadri.



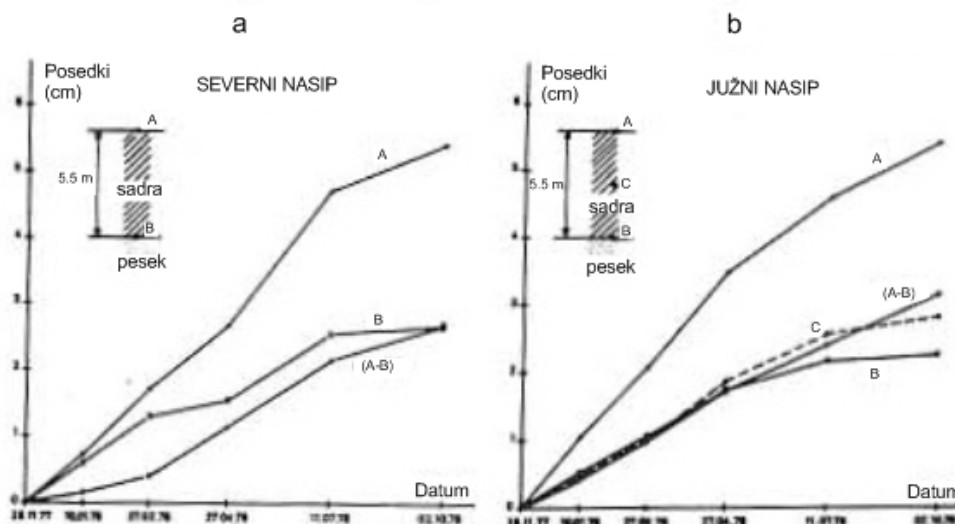
Slika 2.22: Porni tlaki v odvisnosti od globine od površja nasipa (prirejeno po Gorle, 1978)

Figure 2.22: Pore water pressures in relation to the depth under the upper surface of the embankment (adapted from Gorle, 1978)

Iz slike (Slika 2.22) je razvidno, da lahko s stališča vodnega toka izločimo 3 zelo različne dele nasipa: zgornji del nasipa, debeline približno 2 m, se izsušuje z velikimi nihanji sukcije; srednji del skorajda ne kaže sprememb v vsebnosti vode ali sukcije vse od gradnje nasipa; v spodnjem delu pa prihaja do povečanja vsebnosti vode, porni tlaki pa dosegajo nivo atmosferskega tlaka. Ta razporeditev vode je pomembna v povezavi z razpokami (ki nastajajo zaradi krčenja), zaradi posedkov, stabilnosti in možnosti onesnaženja podzemne vode.

V nasip so namestili naprave za merjenje posedkov in periodično merili njihov položaj glede na referenčne točke izven nasipa. Posedki glede na prvotno površje so predstavljeni na sliki (Slika 2.23), ločeno za južni in severni nasip. Krivulja A prikazuje celotne posedke, krivulja B prikazuje posedke peska in podlage, krivulja C pa posedke v nasipu na sredini med površjem in peskom. Razlika A-B podaja posedke v fosforni sadri. Posedki so relativno majhni, kaže se tendenca umirjanja za pesek in podlago, posedki v sadri pa naraščajo skoraj linearno s

časom. Krivulja C kaže na to, da so se posedki v prvih 5 mesecih vršili samo v zgornji polovici nasipa, saj krivulji C in B v tem času sovpadata. To pomeni, da so bili posedki bolj posledica krčenja kot zgoščevanja fosforne sadre zaradi lastne teže. Razvoj takšnih posedkov v sadri ni povsem pojasnjen, možna pa je razlaga z različnimi mehanizmi: sprememba strukture, rekristalizacija, izluževanje in krčenje.



Slika 2.23: Razvoj posedkov: A-celotni, B-pesek in podlaga, C-sredina med površjem in peskom, (A-B)-samo fosforna sadra (prirejeno po Gorle, 1978)

Figure 2.23: Evolution of the settlements A: total; B: sand and subsoil; C: half distance between the surface and the sand; (A-B): phosphogypsum only (adapted from Gorle, 1978)

Čeprav so površje nasipa zaščitili na 3 različne načine, četrti del nasipa pa so pustili nezaščiten, so se razpoke v nasipu pojavile v vseh štirih primerih, vendar s pomembnimi razlikami med posameznimi deli nasipa. Pod delom nasipa, ki je bil zaščiten s polietilensko folijo, nad katero je bilo še 15 cm humusa, razpoke niso tvorile sklenjene mreže. Pod plastjo oksidirane bitumna, ki ne zagotavlja tako dobre neprepustnosti kot polietilenska prevleka, so se pojavile večje razpoke, širine do 1 cm in globine približno 30 cm. V delu nasipa, ki je bil zaščiten s kislno emulzijo bitumna in drobirjem, so se pojavile longitudinalne in transverzalne razpoke, ki so formirale mrežo z enotami površine približno 4 m². Širina razpok je bila do 5 cm, globina pa do 1 m. V nezaščitenem delu nasipa se je pojavila podobna mreža, poleg tega se je po prvem ciklu zamrzovanja in odtajanja pojavila še druga mreža z enotami površine 0,1 m², globino razpok 40 cm in širino do 8 mm. Opazovanja razpok so pokazala, da se v nasipu pojavljajo velike razpoke, kljub temu, da je bila fosforna sadra zgoščena z veliko večjo energijo, kot se to zahteva za tradicionalne materiale. Takšne razpoke (še posebej tiste, ki segajo do 1 m globoko) bi lahko povzročile škodo na cestišču, ki bi ga zgradili na takšnem nasipu.

Morebitno onesnaženje podzemne vode so preverjali z analizo vzorcev iz 8 vrtin, ki so bile izvrtane okrog nasipa. Prvi vzorci vode so bili odvzeti, še preden je bila fosforna sadra transportirana na mesto nasipa. Rezultati analiz kažejo, da se je od takrat koncentracija Ca^{2+} in SO_4^{2-} znatno povečala, v zadnjih odvzetih vzorcih pa zopet zmanjšala. Razen omenjenih ionov se v podzemni vodi ni povečala koncentracija nobenih drugih elementov oz. v bližini poskusnega nasipa ni bilo opaženega nobenega pomembnega onesnaženja podzemne vode. Možno je, da je bilo obdobje opazovanja prekratko, ali pa je vodni tok skozi nasip nezadosten, da bi transportiral onesnaževala skozi peščeno plast v podzemno vodo.

Zaključki po skoraj enoletnem opazovanju poskusnega cestnega nasipa iz fosforne sadre so bili:

- meritve pornega tlaka kažejo na prerazporeditev vode znotraj fosforne sadre,
- celotni posedki so majhni; posedki v peščeni plasti se sčasoma zmanjšujejo, medtem ko tisti v sadri naraščajo linearno;
- oblike in dimenzije razpok se razlikujejo na posameznih delih nasipa, ki so bili različno površinsko zaščiteni: manj razpok se je pojavilo na boljše zaščitenih območjih, medtem ko so se druge razpoke razvijale preko celega leta in so dosegle širino do 5 cm in globino do 1 m;
- onesnaženja podzemne vode z nečistočami iz fosforne sadre ni bilo opaziti, prišlo pa je do povečanja vsebnosti kalcijevega sulfata.

Iz teh opazovanj torej sledi, da je pred začetkom uporabe fosforne sadre za gradnjo cestnih nasipov potrebno rešiti predvsem probleme, povezane s posedki in razpokami.

Tudi pri poskusu na Floridi (Chang in Chin, 1989) so konec osemdesetih let pri gradnji dveh cest uporabili fosforno sadro. V tem obdobju je število prebivalstva na Floridi strmo naraščalo, s tem pa se je tudi povečala potreba po gradnji novih cest. Gradnja je bila tako intenzivna, da je pričelo primanjkovati tradicionalnih materialov za cestogradnjo. Takšna situacija je narekovala potrebo po iskanju alternativnih materialov za gradnjo cest. Tako so pričeli z iskanjem primerljivih materialov za popravilo obstoječih cest s čim boljšim izkoristkom razpoložljivih lokalnih materialov. Poskusno so zgradili dve cesti in sicer 800 m dolg odsek ceste v okrožju Polk in 3200 m dolg odsek ceste v okrožju Kolumbija. V okviru tega projekta so izvajali tudi obsežne laboratorijske raziskave, terenske raziskave, monitoring podzemne vode, monitoring sevanja in ekonomske analize.

Namen laboratorijskih preiskav je bil raziskati inženirske lastnosti različnih mešanic fosforne sadre in peska, ki na tem območju predstavlja matična tla. Da bi se prepričali o primernosti teh materialov za uporabo pri gradnji cest, so preučevali njihovo enoosno tlačno trdnost,

optimalno vlago, gostoto in CBR vrednost. Poleg omenjenih mešanic so preiskovali tudi vzorce čiste sadre iz različnih virov. Preiskave so pokazale, da sadra doseže maksimalno tlačno trdnost pri optimalni vlagi, t.j. vlaga, pri kateri s kompakcijo materiala dosežemo največjo gostoto. Pokazalo se je tudi, da vrednost tlačne trdnosti močno variira pri vzorcih iz različnih virov. V nadaljevanju so iskali optimalno razmerje fosforne sadre in peska. Splošne ugotovitve preiskav so sledeče: mešanice fosforne sadre in peska, stabilizirane z manjšo količino cementa, dosežajo večjo nosilnost kot tradicionalni materiali in so tako primerne za gradnjo nosilne plasti cestišč.

Eksperimentalno rekonstrukcijo obeh cestnih odsekov so izvedli na naslednji način: obstoječo površino ceste so zravnali in zgostili. S tovornjaki so navozili fosforno sadro ter jo razprostrli po cestišču, da so dosegli ustrezno višino. Z mešalnikom za prašnata veziva so zmešali sadro s spodaj ležečim materialom. Debelina mešane plasti je bila izbrana glede na zahtevane lastnosti mešanice. Vsebnost vlage v mešanici so po potrebi povečali s pršenjem vode ali zmanjšali z razprostiranjem mešanice in sušenjem na soncu. Po fazi mešanja je prišlo na vrsto oblikovanje cestnega profila, pri čemer so posebno pozornost posvetili naklonu vozišča, ki omogoči odtekanje meteorne vode. Sledilo je zgoščevanje z zaporedjem različnih tipov valjarjev (valjar z bodicami, valjar z jeklenim obročem in valjar s pnevmatikami). Na koncu so površino cestišča zaščitili še z asfaltno plastjo.

Med gradnjo so odvzemali vzorce mešanic za laboratorijske preiskave, pri katerih so določali vsebnost vlage in CBR. Laboratorijske preiskave teh vzorcev so pokazale pomembnost kontrole vsebnosti vlage v času zgoščevanja. Maksimalna gostota in nosilnost je dosežena le pri optimalni vlagi mešanice fosforne sadre in zemljine v podlagi. Med gradnjo so opravljali tudi terenske meritve in sicer meritve z izotopsko sondo in meritve nosilnosti CBR. Po končani izgradnji pa so izvajali meritve dinamične podajnosti. Meritve nosilnosti CBR so pokazale, da se nosilnost zgoščenih tal znatno izboljša po stabilizaciji s fosforno sadro, vendar pa so mešanice s sadro občutljive na vsebnost vlage, kar se odraža v padanju vrednosti CBR pri naraščanju vlage.

Monitoring podzemnih vod vzdolž obeh cest med gradnjo ni pokazal pomembnega vpliva na podzemne vode. Tudi maksimalne vrednosti meritev gama sevanja vzdolž obeh cest po izgradnji so bile v mejah naravnega sevanja okolja. Ekonomske analize so pokazale, da bi z uporabo fosforne sadre namesto tradicionalnih materialov pri cestogradnji veliko prihranili.

Saylak (1996) navaja izkušnje iz Texasa, ki so jih dobili na podlagi preko 700 projektov, v katerih so gradili zgornje nosilne plasti za mestne ceste, nakupovalne centre, terminale za

tovornjake, parkirišča itd. Nosilne plasti so gradili z uporabo fosforne in fluorove sadre, ki so jo stabilizirali s cementom in elektrofiltrskim pepelom. Uporabo sadre so nato prekinili zaradi prekoračenih koncentracij radona in težkih kovin v njej. Pri načrtovanju razširitve uporabe stabilizirane sadre za gradnjo državnih cest so se soočali tudi z nekaterimi drugimi pomisleki. Čeprav je bila uporaba sadre pri gradnji cest 95 % uspešna, je pri nekaterih cestah vendarle prihajalo do konstrukcijskih težav. Vzroki za težave so bili naslednji: presežek vode med gradnjo, prekomerna stabilizacija, nepopolno mešanje, nekompatibilni dodatki, nezadostno zgoščevanje in prehitro odprtje ceste za promet. Kasnejše raziskave vpliva uporabe stabilizirane sadre v cestogradnji na okolje so pokazale, da so koncentracije nevarnih kemičnih elementov zanemarljive oz. v okviru dopustnih koncentracij po standardih ameriške agencije za varovanje okolja (EPA). Iz navedenega je razvidno, da kemična sadra predstavlja velik potencial za uporabo pri gradnji cest, vendar je potrebno dosledno upoštevati navodila za vgradnjo.

Pri uporabi kemičnih sader za gradnjo nasipov v prihodnosti bo imel odločilno besedo okoljski vidik, ki bo pogojen s strategijo držav oziroma politike, ki s svojimi regulativami lahko vzpodbujajo ali zavirajo rabo sekundarnih surovin. Kemična sadra sedaj večinoma predstavlja odpadek in kot taka je last in obveza proizvajalca. Odlaganje kemične sadre na deponijah za proizvajalca pomeni strošek, s primerno predelavo pa bi lahko postala primeren material za gradnjo nasipov, torej tržno blago. Seveda je tukaj še vprašanje stroškov predelave in transporta.

2.5.2 Stabilizacija kemične sadre

V literaturi je opisanih več poskusov, kako stabilizirati kemično sadro, da bi bila primerna za uporabo v gradbeništvu. V nadaljevanju opisujem dva izmed njih.

Smith in drugi (1975) so preiskovali različne mešanice elektrofiltrskega pepela, apna in sulfatnih odpadkov kot potencialne materiale za uporabo pri gradnji cest. Raziskave so bile izvedene z laboratorijskimi testi, ki so bili načrtovani tako, da so podali osnovno informacijo za praktično uporabo sulfatov in pepela kot vezivo ali agregat v cestogradnji. Najprej so podrobno preučili mešanice apna, pepela, kalcijevega sulfata in vode. Nato so izbrali določene recepture, v katerih so dali prednost sulfatnim odpadkom pred čistim kalcijevim sulfatom. Končen izbor mešanic so nato uporabili za določitev njihovih inženirskih lastnosti in za pripravo agregatov. Agregate so testirali v cementnih in asfaltnih zmesih. Njihovi laboratorijski preizkusi so pokazali, da uporaba čiste sadre izboljša trdnost, ki jo razvijejo mešanice apna, elektrofiltrskega pepela in vode.

Tao in Zhang (2005) opisujeta izboljšanje lastnosti fluorove sadre po stabilizaciji z apnom, cementom in elektrofiltrskim pepelom. Fluorova sadra je stranski proizvod pri pridobivanju fluorove kisline iz fluorita in žveplove kisline. Izraz "blended calcium sulfate" (BCS) se uporablja za sadro z dodatkom apna ali apnenca. S tem dodatkom zadostijo okoljskim zahtevam glede pH vrednosti. Takšno sadro je podjetje "The Louisiana Department of Transportation and Development" uporabljalo v Louisiani pri gradnji voziščnih konstrukcij. Izkazala se je kot material z zadovoljivimi lastnosti v več projektih, skrb pa je vzbujala občutljivost sadre na vlago, ki je večkrat povzročala probleme v mokrih okoljih. Zaradi tega so BCS sadro uporabljali samo za gradnjo vozišč na dobro dreniranih tleh v Louisiani.

Slaba odpornost sadre na vodo je bila opažena že prej. Pri absorpciji 2 % vode lahko pričakujemo do 50 % zmanjšanje trdnosti sadre. Raziskovalni center iz Louisiane (Louisiana Transportation Research Center) je izvedel študijo, v kateri so raziskovali osnovne mehanizme občutljivosti sadre na vlago in načine, kako izboljšati njeno odpornost na vodo. Izvedli so serijo laboratorijskih testov za določanje učinkov različnih stabilizacijskih dodatkov na trdnost BCS sadre. Njihove ugotovitve so sledeče: razvoj trdnosti nestabilizirane BCS sadre je funkcija različnih spremenljivk, kot so prostorninska teža suhe faze, energija zgoščevanja, pogoji sušenja in končna vlažnost. Med temi faktorji je končna vlažnost najbolj odločilen dejavnik. Prisotnost proste vode v nestabilizirani BCS sadri dramatično vpliva na njeno trdnost. Trdnost sadre je močno odvisna od magnitude njene končne vlage in relativno neodvisna od zgodovine nihanja vlage. Variacije trdnosti, povezane z vsebnostjo vlage, so reverzibilne (Tao in Zhang, 2005).

Tao in Zhang (2005) navajata, da lahko BCS sadro zadovoljivo stabiliziramo z nekaterimi materiali, kot so žindra, portlandski cement, apno, elektrofiltrski pepel in njihove mešanice. Med temi materiali se je za najbolj ekonomsko ugodno izkazala grobozrnata plavžna žindra (stranski proizvod pri proizvodnji železa in jekla), ki poleg tega izkazuje najmanjše volumske spremembe. Obstočnost sadre, stabilizirane z debelozrnato plavžno žindro (GGBFS), so potrdili tudi laboratorijski testi. Čeprav so laboratorijski rezultati obetajoči, pa morajo biti omenjene stabilizacijske sheme potrjene še na terenu.

3 LABORATORIJSKE RAZISKAVE

3.1 Uvod

V tem poglavju opisujem metode dela, ki sem jih uporabila pri raziskovalnem delu. Pri izbiri metod za posamezno fazo sem upoštevala cilje raziskovalnega dela, podatke iz literature, razpoložljivost in stanje vzorcev, razpoložljivost sredstev in raziskovalne opreme ter časovne omejitve. Metode sem tudi sprti prilagajala na podlagi lastnih izkušenj, s ciljem izboljšanja nekaterih postopkov priprave in testiranja vzorcev.

3.2 Odvzem vzorcev

Vzorec energetske sadre TET sem odvzela pri proizvajalcu v Termoelektrarni Trbovlje. Dne 11.2.2011 je bilo odvzetega približno 50 kg vzorca energetske sadre izpod vakuumskega tračnega filtra, na katerem poteka druga faza ožemanja. Vzorec je bil v razsutem stanju, do začetka preiskav smo ga hranili v nepredušno zaprtih plastičnih posodah v Geomehanskem laboratoriju IRGO, kjer sem opravljala raziskovalno delo.

Vzorec titanove sadre CC (približno 30 kg vzorca, deloma v obliki ploščatih kosov, deloma v razsutem stanju) je bil odvzet 24.3.2011 na odlagališču Cinkarne Celje Za Travnikom. Vzorec je bil hranjen v nepredušno zaprti PVC vreči.

Vzorec steklarske sadre SR sem dobila posredno iz laboratorija Katedre za mehaniko tal na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo. Vzorec je bil v obliki ploščatih kosov, kot pridejo iz filtrskih stiskalnic, podatki o datumu in načinu odvzema pa niso bili na voljo. Hranili smo ga v nepredušno zaprti PVC vreči.

Preostanek vzorcev vseh treh sader, ki pri raziskovalnem delu ni bil porabljen, je shranjen v prostorih Geomehanskega laboratorija IRGO.

3.3 Določanje vlage

V poglavju 2.3.3 navajam ugotovitve različnih avtorjev, ki so raziskovali učinek sušenja kemičnih sader različnih temperaturah na njihove geomehanske lastnosti. Mnenja raziskovalcev o višini kritične temperature se precej razlikujejo. Avtorji (Petkovšek in drugi, 2008) so s pomočjo termogravimetričnih analiz na titanovi sadri pokazali, da do prvih sprememb pride med 30 in 40 °C. Vse vlage, navedene v omenjenem prispevku (poglavje 2.3.3, Preglednica 2.1), so bile določene s sušenjem sadre na 40 °C. V Termoelektrarni Trbovlje določajo vlago v energetski sadri s 24-urnim sušenjem na 35 °C.

Pri svojem raziskovalnem delu sem sušila vzorce sadre iz Termoelektrarne Trbovlje, Cinkarne Celje in Steklarne Rogaška pri temperaturi 35-40 °C (Slika 3.1). Pri vzorcih v razsutem stanju je bilo dovolj 24 ur sušenja. Vzorce po končanem strižnem preizkusu pa sem sušila skupaj s ploščicami. Na ta način sem se želela izogniti napakam pri tehtanju, saj se del vzorca med preiskavo zaleze v perforirane ploščice. Te ploščice so nekoliko ovirale sušenja vzorca in s poskusi sem ugotovila, da 24-urno sušenje takšnih vzorcev pri tej temperaturi ne zadošča, zato sem čas sušenja podaljšala na 48 h. Po 48-urah ni več prihajalo do izgube mase, zato sem vse vzorce sušila 48 ur pri temperaturi 35-40 °C. Rezultati določanja vlage vzorcev preiskovanih sadre so podani v poglavju 4.2 in v prilogi A.



Slika 3.1: Sušenje sadre in vzorci po sušenju

Figure 3.1: Gypsum during drying and dry samples of gypsum

3.4 Določanje količnika por in stopnje zasičenosti

Določevanje količnika por in stopnje zasičenosti je imelo pomembno vlogo pri mojem raziskovalnem delu glede na to, da sem preučevala vpliv volumskih deformacij na strižno trdnost kemične sadre. Pri preiskavah direktnega striga, ki predstavljajo glavnino mojih preiskav, sem določala količnik por in zasičenost vzorcev pred konsolidacijo, po konsolidaciji oz. pred strigom in po strigu.

Količnik por je definiran kot:

$$e = \frac{V_v}{V_s}, \quad (3.1)$$

kjer je V_v volumen por in V_s volumen trdnih delcev. Količnik por se izraža kot decimalno število. Enačbo 3.1 lahko zapišemo tudi kot:

$$e = \frac{V - V_s}{V_s}, \quad (3.2)$$

volumen trdnih delcev pa izrazimo kot:

$$V_s = \frac{W_s}{\gamma_s}, \quad (3.3)$$

pri čemer je W_s teža trdnine, γ_s pa specifična prostorninska teža, v mojem primeru specifična prostorninska teža kemične sadre. Glede na podatke iz literature (Petkovšek in drugi, 2008) sem za specifično prostorninsko težo titanove in energetske sadre privzela vrednost $\gamma_s = 23,1 \text{ kN/m}^3$, za steklarsko sadro pa vrednost $\gamma_s = 24,0 \text{ kN/m}^3$.

Stopnja zasičenosti pove, kolikšen odstotek praznin je zapolnjen z vodo. Če je zemljina povsem suha, je $S_r = 0$, če pa je zemljina popolnoma zasičena, je $S_r = 1$. Pri določitvi stopnje zasičenosti ali stopnje saturacije sem izhajala iz enačbe:

$$S_r = \frac{w \cdot G_s}{e}, \quad (3.4)$$

kjer je w vlažnost zemljine, G_s pa je specifična teža. Specifična teža je razmerje suhe teže zemljine določenega volumna in teže vode enakega volumna. Izračunamo jo lahko po enačbi:

$$G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} \quad (3.5)$$

Prostorninska teža vode je $\gamma_w = 9,807 \text{ kN/m}^3$, torej je specifična teža za titanovo in energetsko sadro $G_s = 2,355$, za steklarsko sadro pa znaša $G_s = 2,447$.

Preiskovala sem vzorec kvadraste oblike standardnih dimenzij ($6,0 \times 6,0 \times 2,24 \text{ cm}$). Takšne dimenzije je imel vzorec pred konsolidacijo. Pri določevanju količnika por in stopnje zasičenosti po konsolidaciji sem upoštevala zmanjšanje volumna vzorca med procesom konsolidacije, prav tako sem pri računanju obeh količin po strigu upoštevala spremembe volumna med strigom.

Težava se pojavi pri določevanju stopnje zasičenosti po konsolidaciji oz. pred strigom. Kot je razvidno iz enačbe 3.4, je za določitev stopnje zasičenosti potrebno poznati vlažnost zemljine. Če želimo v tej fazi strižne preiskave določiti vlažnost vzorca, moramo vzorec posušiti, s čimer je onemogočeno nadaljevanje strižne preiskave na istem vzorcu. Zaradi tega sem izvedla serijo preiskav na vsaki od preiskovanih sader, s katerimi sem določila stopnjo zasičenosti po končani konsolidaciji. Teste sem izvedla za vrednosti normalne obremenitve $\sigma = 250$ in 500 kPa . V preglednici (Preglednica 3.1) so navedeni vzorci, na katerih sem določala stopnjo zasičenosti po konsolidaciji za vse tri obravnavane vrste sader. Rezultati določanja stopnje zasičenosti po konsolidaciji za vse tri obravnavane sadre pri dveh

različnih normalnih obremenitvah so podani v poglavju 4.2. Ugotovila sem, da so vzorci vseh treh vrst sader pri omenjenih normalnih obremenitvah po končani konsolidaciji popolnoma zasičeni. Ta podatek sem nato privzela za vse obremenitve pri vseh nadaljnjih preiskavah

Preglednica 3.1: Preglednica preiskovanih vzorcev za določanje stopnje zasičenosti po konsolidaciji

Table 3.1: List of investigated samples for determination of degree of saturation after consolidation

Vrsta sadre	Oznaka vzorca	Datum odvzema vzorca	Datum preiskave	Vrsta preiskave
Energetska TET	S-VZ1-15	11.2.2011	7.9.2011	Določanje stopnje zasičenosti po konsolidaciji
Titanova CC	S-VZ3-9	24.3.2011	7.9.2011	Določanje stopnje zasičenosti po konsolidaciji
Steklarska SR	S-VZ4-6	Ni podatka	6.9.2011	Določanje stopnje zasičenosti po konsolidaciji

3.5 Določanje relativne gostote vzorca

V vseh razsutih materialih, vključno z zemljinami, so možne variacije poroznosti. Maksimalni količnik por za neko zemljino označimo kot e_{max} in minimalni količnik por kot e_{min} . Približno vrednost minimalnega količnika por lahko dosežemo z zbijanem ali s kombinacijo zbijanja in vibriranja, pri čemer ne sme priti do loma posameznih zrn. Približno maksimalno poroznost lahko dosežemo z nasipanjem suhe zemljine z minimalne višine skozi lijak. Tako za naravna tla kot za laboratorijske mešanice peskov velja, da so vrednosti e_{max} in e_{min} v največji meri odvisne od zaobljenosti zrn R in koeficienta enakomernosti C_U (Maksimović, 2008).

Odvisnost med dejansko poroznostjo tal in njihovimi mejnimi vrednostmi opišemo z relativno gostoto D_r :

$$D_r = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} \times 100(\%) \quad (3.6)$$

Metode določanja maksimalnega in minimalnega količnika por e_{max} in e_{min} opisujeta standarda ASTM D 4253-00 (2000) in ASTM D 4254-00 (2000). Tako Maksimović (2008) kot omenjena standarda navajajo, da se določanje relativne gostote uporablja samo za grobozrnate materiale, ki vsebujejo manj kot 15 % drobozrnate frakcije, t.j. zrn, ki so manjša od 75 μm . Na tem mestu je potrebno povedati, da je kemična sadra material, ki ne izpolnjuje tega pogoja. Gre namreč za drobozrnat material v velikosti melja. Vzorce, na katerih sem nato izvajala preiskavo direktnega striga, sem vgrajevala tako, da sem se čim bolj približala maksimalni suhi gostoti po Proctorju, kot jo za vsako posamezno sadro navaja Petkovšek (2008). Kljub temu, da po navedenih standardih kemična sadra zaradi zrnivosti ni primeren

material za določevanje relativne gostote, me je zanimalo, v kakšnem stanju zgoščenosti je takšen vzorec, zato sem določila približno vrednost maksimalnega in minimalnega količnika por e_{max} in e_{min} po postopku, ki ga opisuje Maksimović (2008).

Maksimalni količnik por sem določila tako, da sem sadro najprej posušila pri temperaturi 35 °C, nato sem grude sprijete posušene sadre zdrobila v terilniku. S suhim homogenim materialom sem s sipanjem skozi lijak napolnila model znane mase in dimenzij. Na podlagi mase suhega materiala, volumna modela in specifične prostorninske teže posamezne sadre sem lahko izračunala maksimalni količnik por po enačbah 3.2 in 3.3.

Minimalni količnik por sem določila tako, da sem vlažen material naribala, nato sem ga po plasteh vsipala v model znanih dimenzij in zbijala. Tako napolnjen model sem stehtala in sušila pri temperaturi 35°C. Po sušenju sem model s suhim materialom zopet stehtala. Na podlagi mase suhega materiala, volumna modela in specifične prostorninske teže posamezne sadre sem lahko izračunala minimalni količnik por po enačbah 3.2 in 3.3.

Ko sem določila minimalni in maksimalni količnik por za vsako od preiskovanih sader, sem lahko po enačbi 3.6 izračunala relativno gostoto vzorcev, na katerih sem izvajala preiskave direktnega striga. Poudariti je potrebno, da ta določitev relativne gostote ni bila izvedena v skladu s standardom in da dobljene vrednosti služijo le za orientacijo. Razlogov, zaradi katerih sem kljub temu določala relativno zbitost kemičnih sader, je več. Mehanske lastnosti grobozrnatih zemljin so namreč v veliki meri odvisne od relativne gostote. Večja kot je relativna gostota, manjša je deformabilnost in vodoprepustnost ter večja strižna trdnost. Rahla tla lahko prenesejo določeno obremenitev, vendar njihova struktura izrazito nestabilna. Podatek o relativna gostoti zemljine lahko pomaga tudi pri primerjavi različnih vrst zemljin, v mojem primeru sader. Rezultati določanja relativne gostote vzorcev preiskovanih sader so podani v poglavju 4.3.

3.6 Elektronska vrstična mikroskopija (SEM)

Poznavanje mikrostrukture in mikro sestave nam pomaga pri razumevanju in ocenjevanju makroskopskih lastnosti materialov ter pomaga razložiti in celo napovedati potek različnih procesov. Najbolj učinkovita metoda za preiskovanje mikrostrukturnih lastnosti materialov je vrstična elektronska mikroskopija (SEM – Scanning Electron Microscopy) z energijsko disperzijsko spektroskopijo rentgenskih žarkov (EDS – Energy Dispersive Spectroscopy). SEM omogoča opazovanje površine trdnih vzorcev z ločljivostjo pod $0,01 \mu\text{m}$, EDS pa elementno kvalitativno in kvantitativno analizo posameznih faz oziroma izbranega področja vzorca (<http://www.zag.si/dl/lablist/mikroskopija.pdf>).

Vzorke treh vrst sader (energetske, titanove in steklarske) sem s pomočjo mag. Mateje Golež pregledala pod grobovakuumskim vrstičnim elektronskim mikroskopom LV SEM (JEOL 5500 LV) z EDS analizatorjem na Zavodu za gradbeništvo Slovenije. Uporabljena je bila metoda brez naprševanja, z odbitimi elektroni. Na ta način sem dobila vpogled v mikrostrukturo obravnavanih materialov. Tehnične specifikacije uporabljenega mikroskopa so navedene na sliki (Slika 3.2). Obravnavane sadre nastajajo pri različnih industrijskih procesih, kar pogojuje obliko zrn in zrnastost posamezne vrste sader. S pomočjo SEM sem lahko primerjala posamezne vrste sader. Za posamezna izbrana zrna v vzorcih je bila narejena tudi kvalitativna in kvantitativna elementna analiza. Rezultati elektronske vrstične mikroskopije na preiskovanih vrstah sadre so prikazani v poglavju 4.4.

Tehnične specifikacije grobo-vakuumskega vrstičnega elektronskega mikroskopa LV SEM (JEOL 5500 LV) z EDS analizatorjem:

- visoko-vakuumski način + nizko-vakuumski način mikroskopiranja, v katerem lahko spreminjamo tlak od 1 do 130 Pa
- pospeševalna napetost od 0,5 do 30 kV
- povečava od 18 do 300.000 x
- ločljivost 3,5 nm v visoko-vakuumskem načinu in 5 nm v nizko-vakuumskem načinu
- slika sekundarnih elektronov (detektor sekundarnih elektronov) in slika odbitih elektronov (detektor odbitih elektronov)
- komora večjih dimenzij, izdelana po naročilu; maksimalni premer vzorca je okrog 16 cm
- pomik mizice: X = 80 mm, Y = 40 mm, Z = 43 mm, R = 360° , naklon = -10° do 90°
- volframova katoda
- digitalna obdelava slike
- kvalitativna in kvantitativna elementna analiza od B (bora) do U (urana)
- "mapping" in linijska analiza



Slika 3.2: Tehnične specifikacije uporabljenega vrstičnega elektronskega mikroskopa (<http://www.zag.si/dl/lablist/mikroskopija.pdf>)

Figure 3.2: SEM technical specifications (<http://www.zag.si/dl/lablist/mikroskopija.pdf>)

3.7 Določevanje zrnivosti

Zrnavost vseh treh vrst sadre sem določala po standardu *SIST-TS CEN ISO/TS 17892-4:2004. Geotehnično preiskovanje in preskušanje - laboratorijsko preskušanje zemljin - 4. del: Ugotavljanje zrnavostne sestave*. Pri interpretaciji rezultatov sem upoštevala omejitve, ki so posledica lastnosti sadre. Pri tem mislim na delno topnost sadre in na njeno lastnost (ki je izražena predvsem pri titanovi sadri), da z lepljenjem zrn tvori aglomerate, ki se pri uporabljenem standardnem postopku ugotavljanja zrnavostne sestave ne razlepijo povsem.

Glede na standard je potrebno na materialih, ki vsebujejo več kot 90 % delcev večjih od 0,063 mm, uporabiti metodo sejanja na sitih. Pri materialih, ki vsebujejo več kot 10 % delcev, manjših od 0,063 mm, je potrebno izvesti sedimentacijo z areometriranjem. Če želimo izrisati celotno zrnavostno krivuljo, izvedemo obe metodi. Pri določanju zrnavostne sestave kemične sadre je bila uporabljena kombinirana metoda sejanja in sedimentacije. Na reprezentativnem vzorcu vsake od preiskovanih sader je bilo najprej opravljeno mokro sejanje. Priprava vzorca za mokro sejanje je potekala tako, da sem približno 200 g vlažnega materiala za nekaj ur namočila v vodo. Po namakanju je bilo opravljeno mokro sejanje na sitih s premerom odprtih 0,250, 0,200, 0,125, 0,100 in 0,063 mm. Ostanke na sitih in presejek skozi sito 0,063 mm so bili posušeni na temperaturi 35 °C in stehtani.

Na presejku skozi sito s premerom 0,063 mm je bilo izvedeno določanje zrnivosti z areometrom. Mešanici vode in sadre je bilo dodano antikoagulacijsko sredstvo, vse skupaj se je nato 20 minut mešalo v mešalniku. Za antikoagulacijsko sredstvo je bil uporabljen natrijev heksametafosfat (40g/l). Po končanem mešanju je bil 1 liter dispergirane suspenzije prelit v merilni valj. Suspenzija v merilnem valju je bila še enkrat premešana z obračanjem valja (60-krat v dveh minutah). Po mešanju se je pričelo odčitavanje gostote suspenzije z merilne skale na areometru. Pri vsaki izvedeni meritvi je bil zabeležen čas meritve in temperatura suspenzije. Meritve so se izvajale v predpisanih časovnih presledkih. Zadnja meritev je bila izvedena 24 ur po začetku sedimentacije. Po končani sedimentaciji je sledila obdelava podatkov. Prava vrednost na areometru se izračuna iz odčitka z upoštevanjem korekcije meniska:

$$R_h = R'_h + C_m, \quad (3.7)$$

kjer je

R_h - prava vrednost na areometru,

R'_h - odčitana vrednost na areometru,

C_m - korekcija meniska.

Vrednost R_n , ki jo izračunamo po enačbi 3.7, nam služi za določitev efektivne globine H_r , kar opravimo s pomočjo kalibracijske skale areometra. Ekvivalentni premer delca, ki ustreza vrednosti R_n , izračunamo na podlagi Stokesovega zakona, opisanega z enačbo:

$$d_i = 0,005531 \sqrt{\frac{\eta \times H_r}{(\rho_s - 1) \times t}}, \quad (3.8)$$

kjer je

d_i - ekvivalentni premer delcev (mm),

η - dinamična viskoznost vode (odvisna od temperature),

H_r - efektivna globina areometra (mm),

ρ_s - gostota delcev (Mg/m^3),

t - čas (s).

Delež frakcije, manjše od ekvivalentnega premera, izračunanega po enačbi 3.8, izračunamo s pomočjo formule:

$$K = \frac{100 \times \rho_s}{m(\rho_s - 1)} R_d, \quad (3.9)$$

kjer je

K - delež frakcije, manjši od ekvivalentnega premera (%),

ρ_s - gostota delcev (Mg/m^3),

m - suha masa vzorca (g),

R_d - odčitek na areometra, modificiran na podlagi odčitka v referenčni raztopini.

Na podlagi opravljene sejalne analize in metode z areometrom je bila izrisana krivulja zrnivosti za vse tri obravnavane sadre.

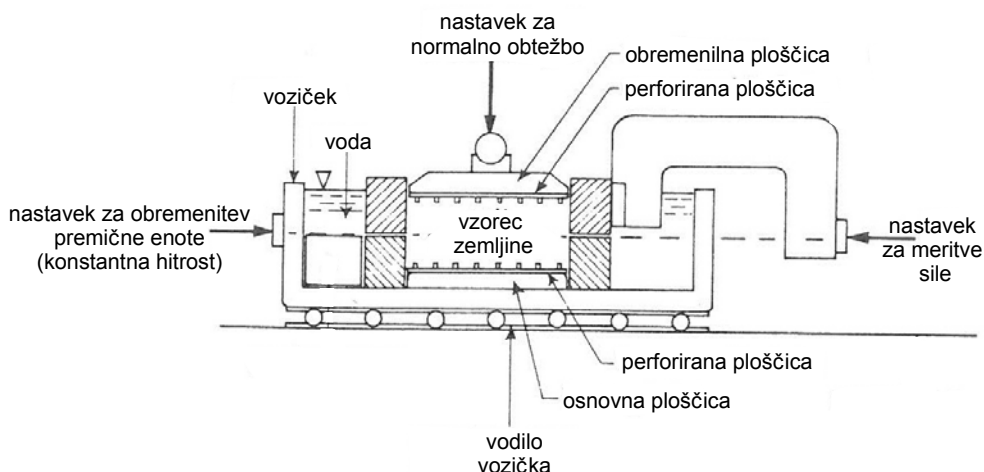
3.8 Določanje strižne trdnosti zemljin v laboratoriju

Strižna trdnost zemljine je maksimalna strižna napetost, ki jo zemljina prenese. To je strižna napetost, ki deluje na ploskvi, vzdolž katere poteka drsenje. Ločimo tri stanja: vrhunsko strižno trdnost, kritično strižno trdnost in rezidualno strižno trdnost. Vrhunska strižna trdnost je maksimalna strižna napetost na ploskvi, pri kateri pride do porušitve (zdrsa). Kritična strižna trdnost je strižna napetost, pri kateri se zemljina striže pri konstantnem volumnu, o rezidualni strižni trdnosti pa govorimo pri velikih deformacijah, ko zdrs poteka po že zglajeni strižni ploskvi (<http://www.fgg.uni-lj.si>, 2013).

Strižne karakteristike zemljine določimo tako, da na zemljino, ki je obremenjena s konstantno normalno napetostjo (pravokotno na drsno ploskev), izvajamo strižno silo v smeri drsne ploskve. Pri tem merimo sile in pomike. To je osnova preiskave direktnega striga, pri kateri kontroliramo hitrost horizontalne deformacije. Na ta način določimo kot notranjega trenja in kohezijo zemljine. Teoretične osnove preiskave direktnega striga so opisane v poglavjih 2.2.1-2.2.7.

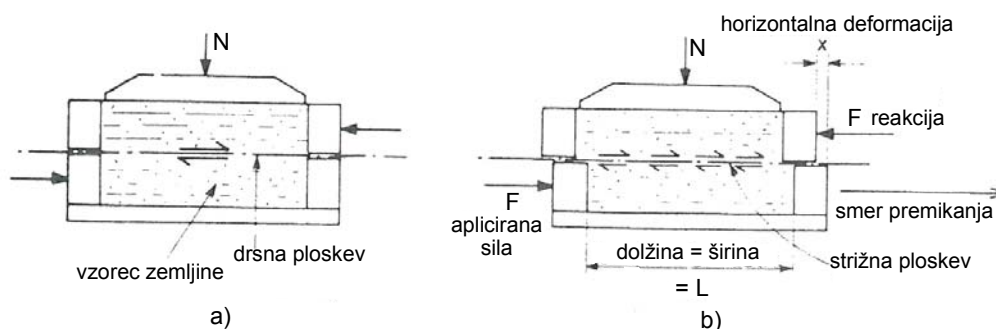
3.8.1 Direktni strig

Za izhodišče pri izvajanju preiskav direktnega striga sem uporabila standard *SIST-TS CEN ISO/TS 17892-10:2004. Geotehnično preiskovanje in preskušanje - Laboratorijsko preskušanje zemljin - 10. del: Neposredni strižni preskus*. Pri raziskovanju je bilo preiskavo direktnega striga potrebno prilagoditi. S tem mislim predvsem na prekinitev striženja pri določeni horizontalni deformaciji ali pri določeni strižni napetosti, kar bom podrobneje opisala kasneje. Omenjeni standard opisuje dve vrsti direktne strižne preiskave in sicer translatorno (v kvadratni ali okrogli strižni celici) in obročno. Sama sem pri preiskovanju uporabljala translatorno strižno preiskavo z uporabo kvadratne strižne celice. Na slikah (Slika 3.3 in Slika 3.4) je shematski prikaz strižnega aparata in strižne celice. Strižna celica je horizontalno razdeljena na dva dela. Ena polovica je fiksna, druga pa je premična v horizontalni smeri. Vzorec po vgradnji v strižno celico obremenimo z vertikalno (normalno) obtežbo σ . Po končani konsolidaciji vzorec strižno obremenimo, tako da s konstantno hitrostjo vlečemo ali potiskamo premično polovico celice, dokler ne pride do prestriga vzorca. Hitrost strižne deformacije mora biti dovolj počasna, da omogoča izničenje presežnih pornih tlakov z drenažo, tako da so učinkovite napetosti enake totalnim napetostim. Med preiskavo merimo strižno silo ter horizontalno in vertikalno deformacijo vzorca.



Slika 3.3: Sestav strižnega aparata s 60 mm celico, z detekcijo premikov in sile (prirejeno po Head, 1994)

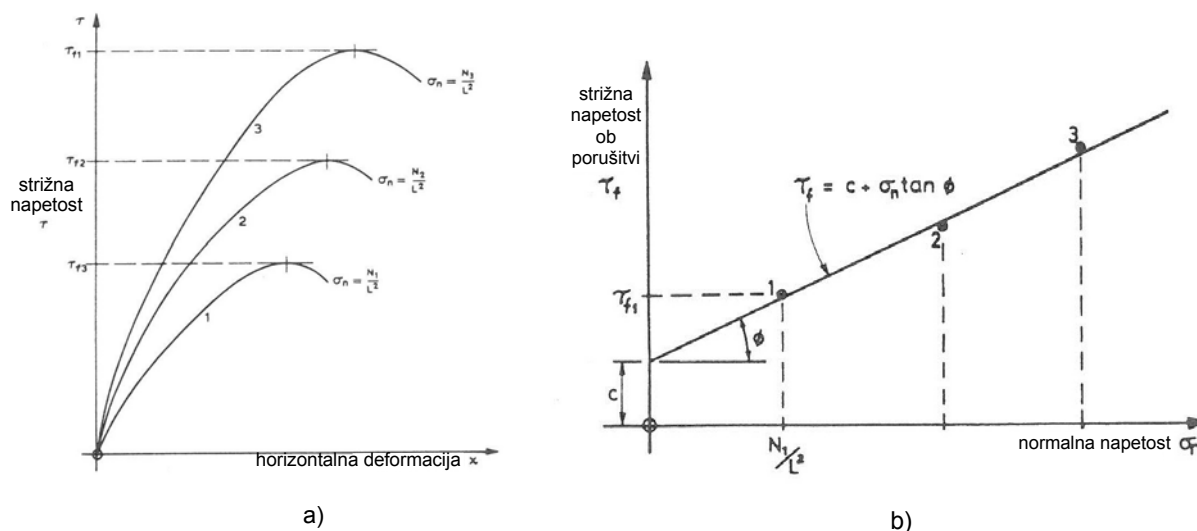
Figure 3.3: Arrangement of conventional 60 mm shearbox apparatus with displacement control (adapted from Head, 1994)



Slika 3.4: Osnova preiskave direktnega striga: a) začetek testa, b) med preiskavo (prirejeno po Head, 1994)

Figure 3.4: Principle of shearbox test: a) start of test, b) during relative displacement (adapted from Head, 1994)

Na podlagi rezultatov preiskave direktnega striga izrišemo graf odvisnosti strižne trdnosti od efektivne normalne napetosti. V skladu z Mohr-Coulombovim kriterijem porušitve (enačba 2.7) z grafa odčitamo oz. izračunamo kot notranjega trenja in kohezijo zemljine. Shematski prikaz rezultata preiskave direktnega striga je na sliki (Slika 3.5).



Slika 3.5: Rezultat preiskave direktnega striga: a) krivulje strižne napetosti v odnosu do horizontalnega premika in b) maksimalna strižna napetost v odvisnosti od normalne napetosti - Coulombova ovojnica (prirejeno po Head, 1994)

Figure 3.5: Direct shear test result: a) shear stress/displacement curves and b) maximum shear stress related to normal stress - Coulomb envelope (adapted from Head, 1994)

Pri preiskavah sem uporabljala strižni aparat proizvajalca Matest, model S277-01 z naslednjimi karakteristikami:

- dimenzije: 1200×550×1100 mm,
- teža: 150 kg,
- nazivna napetost: 230 V; 50/60 Hz; 100 W,
- min. strižna hitrost: 0.00001 mm/min,
- max. strižna hitrost: 10 mm/min,
- max. strižna sila: 5000 N,
- max. vertikalna obtežba: 500 N,
- razmerje ročice: 10:1,
- max. vertikalna obtežba z ročico: 5000 N.

Za meritve sil je bil uporabljen dinamometer proizvajalca Celmi (S-TYPE-STS), katerega nelinearnost znaša 0,03 %, histerezna napaka 0,03 %, ponovljivost pa 0,02 %. Za dinamometer so v strižnem aparatu tovarniško nastavljene kalibracijske konstante, interno pa se jih periodično preverja z utežmi in s certificiranim etalonom. Interni funkcijski preizkusi ne kažejo odstopanj >1 %, zato tovarniške nastavitve niso bile spremenjene. Za meritve pomikov so bili uporabljeni potenciometrični senzorji pomika proizvajalca Bursters (model 8712 in 8709) s tovarniško nastavljenimi kalibracijskimi konstantami. Senzorje se periodično preverja z merilnimi kladicami. Rezolucija meritev znaša 0,01 mm, maksimalna odstopanja meritev pa 0,05 %.

3.8.2 Vgradnja vzorca za strižno preiskavo

Energetsko sadro sem dobila v razsutem stanju, titanovo sadro delno razsuto, delno v ploščatih kosih, steklarsko sadro pa v ploščatih kosih, kot pridejo iz filtrskih stiskalnic. Glede na stanje materiala se je bilo potrebno odločiti o načinu vgrajevanja in o željeni maksimalni suhi gostoti. Način vgradnje naj bi omogočal tudi ponovljivost rezultatov. Odločila sem se, da se bom pri vgradnji vzorcev za strižno preiskavo poskušala približati maksimalni suhi gostoti po Proctorju za vsako posamezno vrsto sadre. Pri tej odločitvi me je vodilo dejstvo, da lahko takšno gostoto dosežemo pri vgrajevanju materiala v nasipe z gradbeno mehanizacijo na ekonomsko vzdržen način. Pomagala sem si s podatki o geotehničnih karakteristikah kemičnih sader slovenske proizvodnje, kot jih navajajo Petkovšek in drugi (2008) v preglednici (Preglednica 3.2).

Preglednica 3.2: Maksimalna suha gostota in optimalna vlažnost treh vrst sader, proizvedenih v Sloveniji (Petkovšek in drugi, 2008)

Table 3.2: Maximum dry density and optimum water content of investigated gypsums (Petkovšek et al, 2008)

	Energetska sadra TET	Titanova sadra CC	Steklarska sadra SR
Maksimalna suha gostota po Proctorju (g/cm³)	1,4 - 1,5	1,1 - 1,2	1,1 - 1,2
Optimalna vlažnost (%)	15 - 18	32 - 40	32 - 36

Predhodno sem določila vlažnost vseh treh materialov. Glede na povprečno vlažnost in na dimenzije vzorca za strižno preiskavo sem izračunala maso vlažnega vzorca, ki ga je bilo potrebno vgraditi, da sem dosegla željeno suho gostoto. Pri tem sem izhajala iz formule za suho gostoto:

$$\rho_d = \frac{m_s}{V} \rightarrow m_s = \rho_d \cdot V, \quad (3.10)$$

kjer je:

ρ_d - suha gostota

m_s - masa trdnine

V - volumen

in za vlažnost:

$$w = \frac{W_w}{W_s} = \frac{m_w}{m_s} \rightarrow m_w = w \cdot m_s, \quad (3.11)$$

kjer je:

w - vlaga

W_w - teža vode

W_s - teža trdnine

m_w - masa vode

Preglednica 3.3: Parametri za izračun mase pri vgradnji vzorca za strižno preiskavo

Table 3.3: Input parameters used for determination the amount of sample for direct shear tests

	Energetska sadra TET	Titanova sadra CC	Steklarska sadra SR
Maksimalna suha gostota (g/cm³)	1,5	1,2	1,2
Vlažnost (%)	16	35,5	32
Volumen vzorca (cm³)	82,8	82,8	82,8
Masa suhega materiala (g)	124,2	99,36	99,36
Masa vode (g)	19,87	35,27	31,8
Masa vlažnega materiala (g)	144,07	134,63	131,16

Zaradi podcenjene vlage steklarske sadre so bile dosežene suhe gostote pri tej sadri nekoliko nižje, a še vedno znotraj razpona maksimalne suhe gostote po Proctorju.

Vzorke vseh treh kemičnih sader sem vgrajevala s pomočjo stiskanja s stiskalnico. Energetska sadra TET je bila v razsutem stanju, titanova CC in steklarska SR sadra pa v obliki kolača, kot pride iz filtrskih stiskalnic oz. sprijeta v grude. Titanovo sadro CC in steklarsko sadro SR sem zato pred tehtanjem naribala, s čimer sem dosegla, da so bile grude čim manjše, vzorec pa bolj homogen. Potrebno maso vlažnega materiala sem razdelila na pet enakih delov - plasti (Slika 3.6). Material ene plasti sem enakomerno razporedila v model (Slika 3.7) ter s pomočjo stiskalnice stisnila vsako od 5 plasti (Slika 3.8). Pri tem sem si pomagala s senzorji pomika, ki so mi omogočili, da sem vsako plast stisnila do potrebne debeline in enakomerno napolnila model (Slika 3.9). Za liho število plasti sem se odločila, da bi se izognila kasnejšemu striženju vzorca ravno po meji med dvema plastema.



Slika 3.6: Priprava steklarske sadre SR za vgradnjo

Figure 3.6: Glass gypsum prepared for compaction



Slika 3.7: Razporeditev steklarske sadre SR v model in stiskanje po plasteh

Figure 3.7: Placing glass gypsum in to the square specimen cutter and compacting by layers



Slika 3.8: Stiskanje vzorca s stiskalnico in merjenje pomika

Figure 3.8: Compacting with hydraulic press and displacement measurements



Slika 3.9: Vzorec steklarske sadre SR, pripravljen za vgradnjo v strižno celico

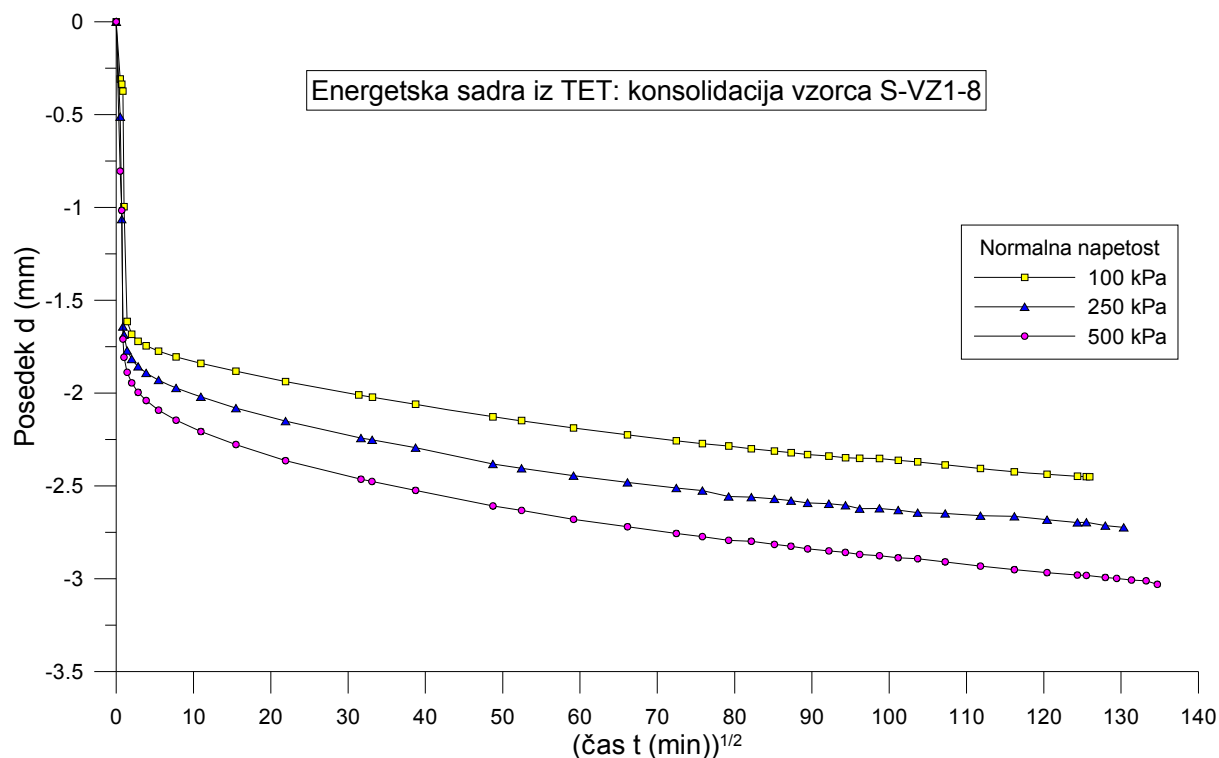
Figure 3.9: Glass gypsum sample ready to put in to the shearbox

3.8.3 Konsolidacija

Vzorci sem po vgradnji v strižno celico obremenila z vertikalno (normalno) obtežbo σ . Pri vsakem strižnem preizkusu sem uporabila štiri različne vrednosti normalne obtežbe in sicer 50, 100, 250 in 500 kPa. Pri izbiri vrednosti normalnih obremenitev me je vodila ideja o uporabi kemičnih sader za gradnjo nasipov (cestnih, visokovodnih, protihrupnih itd.). Z upoštevanjem vrednosti prostorninske teže kemične sadre 16 kN/m^3 normalna obremenitev 50 kPa ustreza 3 m visokemu nasipu, 100 kPa 6 m, 250 kPa 15 m in 500 kPa 31 m visokemu nasipu. Upoštevala sem tudi podatke o geometriji poskusnega nasipa (VTN) iz ožete titanove sadre, ki je predmet raziskovalnega projekta Cinkarne Celje v sodelovanju s strokovnjaki s Katedre za mehaniko tal z laboratorijem Fakultete za gradbeništvo in geodezijo v Ljubljani in je namenjen dolgoročnemu spremljanju trdnostno-deformacijskega obnašanja nasipov, zgrajenih iz sadre (Petkovšek, 2010). Načrtovana višina VTN je 12 m, kar ustreza normalni obremenitvi približno 200 kPa.

Vzorci sem konsolidirala v preplavljenem stanju. Izkazalo se je, da konsolidacija kemične sadre poteka počasi. Na vzorcu energetske sadre sem izvedla test konsolidacije za vrednosti normalnih obremenitev 100, 250 in 500 kPa, ki je trajal 11 oz. 12 dni. Konsolidacijska krivulja (Slika 3.10), kjer sem na abscisi nanese vrednost kvadratnega korena časa, se tudi po 11 dnevih konsolidacije še ni povsem izravnala.

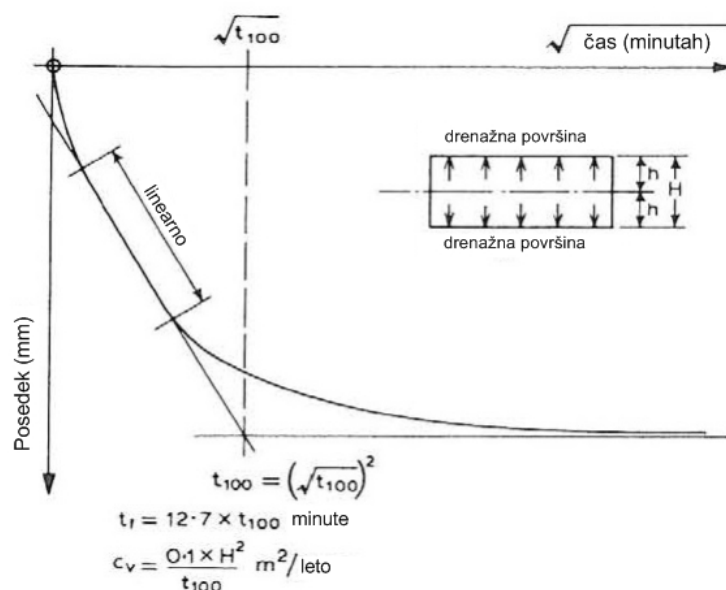
Pri kemični sadri je močno izražen proces sekundarne konsolidacije. Da sem lahko preiskave opravila v razumnem roku, sem ocenila, v kolikšnem času se izvede večji del posedka in določila potreben čas konsolidacije za vsako posamezno sadro. Tako sem energetske sadro TET konsolidirala v povprečju 59 ur, titanovo sadro CC 83 ur in steklarsko sadro SR 101 uro.



Slika 3.10: Konsolidacija energetske sadre TET iz Termoelektrarne Trbovlje

Figure 3.10: Consolidation curves of FGD gypsum from Power plant Trbovlje

Drenirani testi slabo prepustnih zemljin potekajo počasneje kot pri peskih, ker je potrebno več časa za dreniranje porne vode. Zato med konsolidacijo merimo hitrost dreniranja, na podlagi katere nato izračunamo ustrezno hitrost striženja. Hitrost striženja mora biti namreč dovolj majhna, da dovoljuje disipacijo presežnih pornih tlakov. Na tak način zagotovimo pogoje, v katerih so efektivne napetosti enake totalnim napetostim. Hitrost horizontalne deformacije pri preiskavi direktnega striga je odvisna od prepustnosti zemljine in od debeline vzorca. Prepustnost zemljine je povezana s koeficientom konsolidacije, zato lahko iz procesa konsolidacije dobimo podatke za določitev primerne hitrosti striženja. Teoretične osnove sem opisala v poglavju 2.2.8. V praksi uporabimo empirično izpeljavo, katere principe navaja Head (1994). Na podlagi opazovanja posedkov vzorca, obremenjenega z določeno normalno obtežbo, izrišemo konsolidacijsko krivuljo, tako da na absciso nanašamo kvadratni koren časa, kot je prikazano na sliki (Slika 3.11).



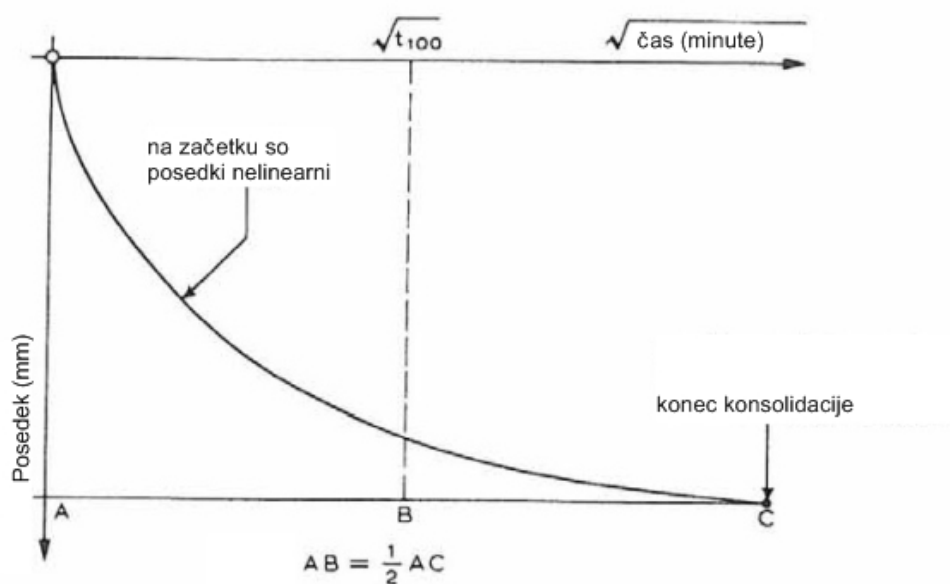
Slika 3.11: Izpeljava hitrosti strižne deformacije iz konsolidacijske krivulje (prirejeno po Head, 1994)

Figure 3.11: Derivation of time to failure from consolidation curve (adapted from Head, 1994)

Narišemo tangento na linearnem delu konsolidacijske krivulje in jo podaljšamo do presečišča s horizontalno linijo, ki predstavlja 100 % konsolidacije. Presečišče predstavlja vrednost $\sqrt{t_{100}}$ (Slika 3.11). Čas, ki je potreben za porušitev vzorca pri direktnem strigu, izračunamo po empirični enačbi, ki sta jo definirala Gibson in Henkel (1954, cit. po Head, 1994).

$$t_f = 12,7 \times t_{100} \text{ min} \quad (3.12)$$

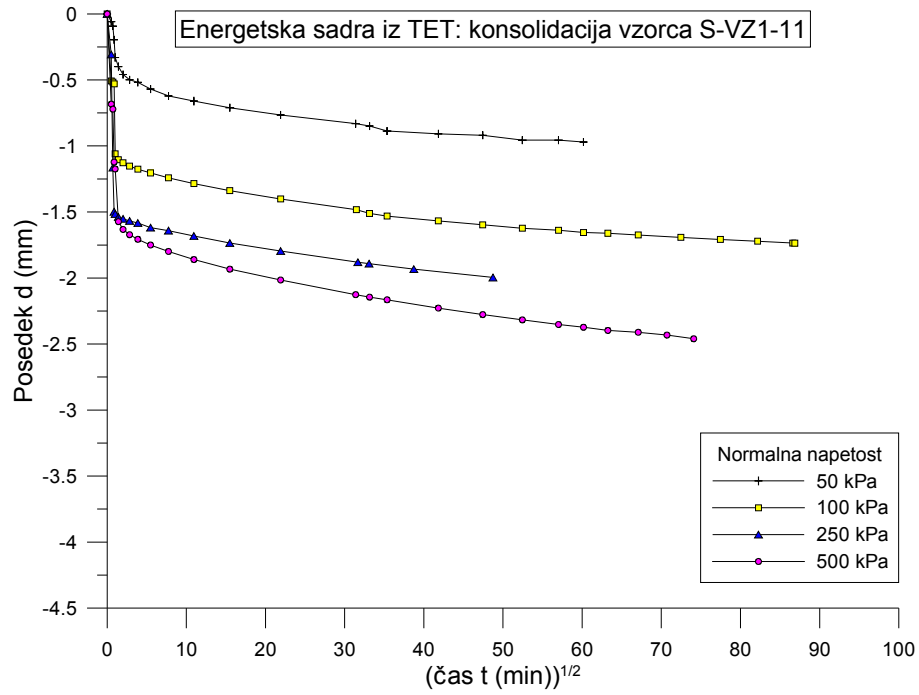
Težava nastane, kadar se oblika konsolidacijske krivulje ne ujema s teoretično krivuljo v smislu, da začetni del konsolidacijske krivulje ni linearen. V tem primeru ustrezen čas za porušitev vzorca pri direktnem strigu ocenimo z metodo, ki je prikazana na sliki (Slika 3.12). Določimo točko C, kjer se konsolidacijska krivulja izravna. V točki B ($AB=1/2C$) odčitamo vrednost $\sqrt{t_{100}}$ in izračunamo vrednost t_f po enačbi 3.12.



Slika 3.12: Določitev hitrosti striženja iz nestandardne konsolidacijske krivulje (prirejeno po Head, 1994)

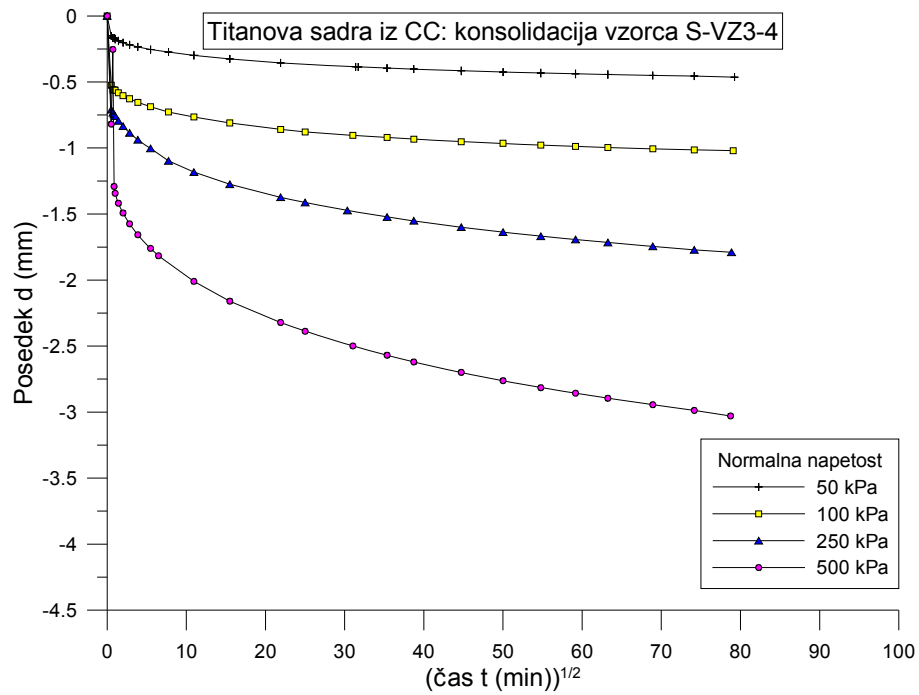
Figure 3.12: Derivation of time to failure from "non-standard" consolidation curve (adapted from Head, 1994)

Pri preiskovanju kemične sadre sem za določitev hitrosti striženja uporabila metodo, ki se uporablja za nestandardne konsolidacijske krivulje (Slika 3.12). Na slikah spodaj (Slika 3.13, Slika 3.14, Slika 3.15) so prikazane konsolidacijske krivulje vseh preiskovanih sader, na podlagi katerih sem določila hitrosti striženja za vse normalne obremenitve. Te hitrosti sem nato upoštevala pri vseh nadaljnjih testih.



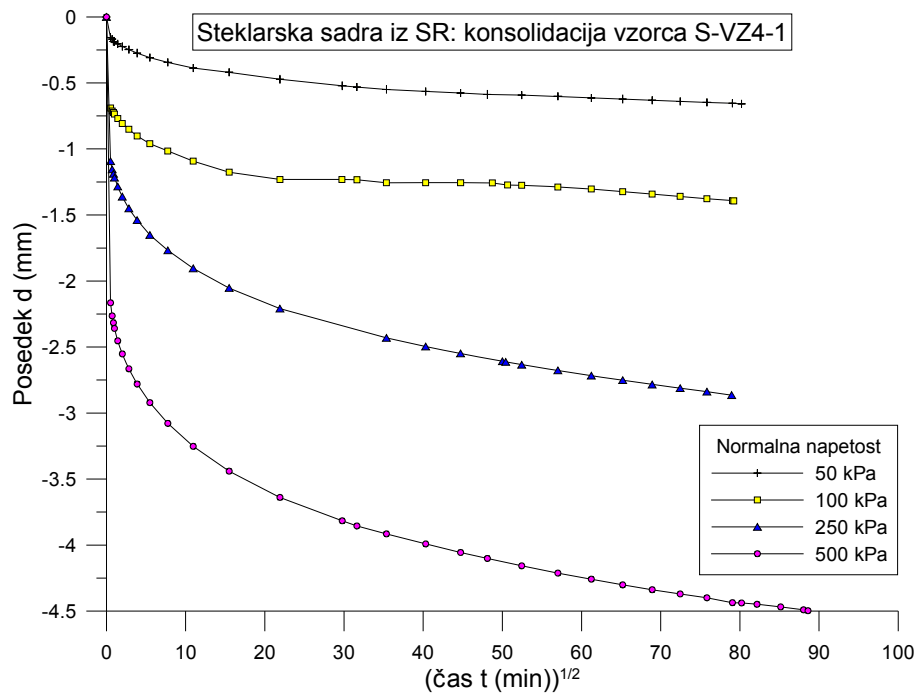
Slika 3.13: Konsolidacijske krivulje energetske sadre TET

Figure 3.13: Consolidation curves of FGD gypsum TET



Slika 3.14: Konsolidacijske krivulje titanove sadre CC

Figure 3.14: Consolidation curves of titanium gypsum CC



Slika 3.15: Konsolidacijske krivulje steklarske sadre SR

Figure 3.15: Consolidation curves of glass gypsum SR

Hitrosti striženja pri energetski sadri TET so znašale med 0,024 in 0,097 mm/min, pri titanovi sadri CC od 0,099 do 0,156 mm/min in pri steklarski sadri SR od 0,066 do 0,119 mm/min.

3.8.4 Prekinitev striga

Eden od ciljev mojega raziskovalnega dela je bil z laboratorijskimi raziskavami dokazati tiksotropne lastnosti kemične sadre, ki so bile sicer opažene na terenu. Kot sem že opisala v poglavju 2.4.3, je definicija tiksotropije po Mitchellu (1976) sledeča: izotermalen, reverzibilen, časovno odvisen proces, pri katerem se material pri konstantni vlagi, sestavi in volumnu med preoblikovanjem zmehča ali utekočini, po mirovanju pa zopet pridobiva na trdnosti. Pojav tiksotropije na vzorcih lahko opazujemo na dva načina: tako, da pri določeni strižni deformaciji opazujemo spremembe strižne napetosti, ali obratno, da pri določeni strižni napetosti opazujemo spremembe strižne deformacije. Na sliki (Slika 2.13) v poglavju 2.4.2 je prikazana razlika med tema dvema pristopoma. Pri preiskavi direktnega striga pri konstantni hitrosti strižne deformacije opazujemo strižne napetosti, torej gre za prvi opisani način opazovanja tiksotropije.

Pri preiskavah direktnega striga, ki sem jih na vzorcih kemičnih sader izvajala po standardu SIST-TS CEN ISO/TS 17892-10:2004. Geotehnično preiskovanje in preskušanje - Laboratorijsko preskušanje zemljin - 10. del: Neposredni strižni preskus), sem ugotovila, da do porušitve oz. do ustaljene vrednosti strižne napetosti pride približno na 4 mm horizontalne deformacije. Zato sem pri naslednji seriji preiskav ustavila strig po porušitvi, torej na 4 mm horizontalne deformacije. Strig sem ustavila za različna časovna obdobja (24 in 72 ur). V času mirovanja je bil vzorec preplavljen in obremenjen z enako normalno napetostjo kot med strigom. Po določenem času mirovanja sem nadaljevala s preiskavo direktnega striga in opazovala razvoj strižnih napetosti.

Pri preiskavah direktnega striga po standardu sem za vsako sadro pri določeni normalni obremenitvi določila strižno trdnost. Glede na to vrednost sem pri naslednji seriji preiskav prekinila striženje pri 1/3 strižne trdnosti. Tudi pri teh preiskavah je bil vzorec v času mirovanja preplavljen in obremenjen z enako normalno napetostjo kot med strigom. Po določenem času mirovanja (24 ur) sem nadaljevala s preiskavo direktnega striga in opazovala razvoj strižnih napetosti.

Na podlagi rezultatov preiskav s prekinitvijo direktnega striga sem izrisala grafe odvisnosti strižne trdnosti od efektivne normalne napetosti in izračunala kot notranjega trenja in kohezijo zemljine za posamezen primer. Rezultate sem nato primerjala z rezultati direktnega striga, narejenega po standardni metodi. Za vsak vzorec sem izračunala še količnik por pred konsolidacijo, po konsolidaciji in po strigu.

Rezultati preiskav s prekinitvijo striga so v poglavju 3.8.4 ter v prilogah B, C in F. Seznam vzorcev, na katerih sem opravila preiskavo s prekinitvijo striga, je podan v preglednici (Preglednica 3.4).

3.8.5 Preverjanje vpliva konsolidacije na strižno trdnost

Pri interpretaciji rezultatov zgoraj opisanih preiskav se je pojavilo vprašanje, kaj je vzrok za povečanje strižne napetosti pri prekinitvi striga. Možnih je več mehanizmov, eden izmed njih je tudi konsolidacija (lezenje). Da bi preverila, kolikšen je vpliv konsolidacije oz. zmanjšanja količnika por na strižno trdnost kemične sadre, sem izvedla naslednjo serijo preiskav. Vzorce sader sem po vgradnji konsolidirala različno dolgo (1, 3 ali 5 dni). Po tem času sem vzorce prestrigla brez prekinitve. Na podlagi rezultatov preiskav sem izrisala grafe odvisnosti strižne trdnosti od efektivne normalne napetosti in izračunala kot notranjega trenja in kohezijo zemljine za posamezen primer. Kot že pri prejšnjih serijah, sem tudi pri teh preiskavah za vsak vzorec izračunala količnik por pred konsolidacijo, po konsolidaciji in po strigu ter nato pri obdelavi in interpretaciji rezultatov upoštevala tudi ta parameter.

Rezultati preiskav, ki so bile namenjene preverjanju vpliva konsolidacije na strižno trdnost, so v poglavju 4.6.3 ter v prilogah D, E in F. Seznam vzorcev, na katerih sem opravila preiskavo z različno dolgo konsolidacijo pred direktnim strigom, je podan v preglednici (Preglednica 3.4).

3.8.6 Preglednica preiskovanih vzorcev

Na vseh treh obravnavanih vrstah kemičnih sader sem opravila 7 različnih strižnih preiskav, kot so opisane v poglavjih 3.8.1 - 3.8.5, pri 4 različnih normalnih obremenitvah. V preglednici (Preglednica 3.4) je podan seznam preiskovanih vzorcev z imeni vzorcev in vrstami preiskav.

Preglednica 3.4: Preglednica preiskovanih vzorcev

Table 3.4: List of investigated samples

Vrsta sadre	Oznaka vzorca	Datum odvzema vzorca	Datum preiskave	Vrsta preiskave
Energetska TET	S-VZ-1-13	11.2.2011	4.8.2011	Direktni strig
Energetska TET	S-VZ-1-11	11.2.2011	12.5.2011	Prekinitiv striga po poružitvi za 24 ur
Energetska TET	S-VZ-1-12	11.2.2011	10.6.2011	Prekinitiv striga po poružitvi za 72 ur
Energetska TET	S-VZ-1-14	11.2.2011	4.8.2011	Prekinitiv striga pri 1/3 strižne trdnosti
Energetska TET	S-VZ2-17	11.2.2011	3.11.2011	1 dan konsolidacije, direktni strig
Energetska TET	S-VZ1-16	11.2.2011	17.10.2011	3 dni konsolidacije, direktni strig
Energetska TET	S-VZ2-18	11.2.2011	3.11.2011	5 dni konsolidacije, direktni strig
Titanova CC	S-VZ3-7	24.3.2011	1.8.2011	Direktni strig
Titanova CC	S-VZ3-4	24.3.2011	4.5.2011	Prekinitiv striga po poružitvi za 24 ur
Titanova CC	S-VZ3-6	24.3.2011	3.6.2011	Prekinitiv striga po poružitvi za 72 ur
Titanova CC	S-VZ3-5	24.3.2011	26.5.2011	Prekinitiv striga pri 1/3 strižne trdnosti
Titanova CC	S-VZ3-11	24.3.2011	23.10.2011	1 dan konsolidacije, direktni strig
Titanova CC	S-VZ3-10	24.3.2011	25.10.2011	3 dni konsolidacije, direktni strig
Titanova CC	S-VZ3-12	24.3.2011	3.11.2011	5 dni konsolidacije, direktni strig
Steklarska SR	S-VZ4-2	Ni podatka	11.7.2011	Direktni strig
Steklarska SR	S-VZ4-1	Ni podatka	17.5.2011	Prekinitiv striga po poružitvi za 24 ur
Steklarska SR	S-VZ4-3	Ni podatka	15.7.2011	Prekinitiv striga po poružitvi za 72 ur
Steklarska SR	S-VZ4-4	Ni podatka	19.7.2011	Prekinitiv striga pri 1/3 strižne trdnosti
Steklarska SR	S-VZ4-9	Ni podatka	25.10.2011	1 dan konsolidacije, direktni strig
Steklarska SR	S-VZ4-8	Ni podatka	18.10.2011	3 dni konsolidacije, direktni strig
Steklarska SR	S-VZ4-10	Ni podatka	2.11.2011	5 dni konsolidacije, direktni strig

3.9 Preverjanje primerljivosti in ponovljivosti preiskav

3.9.1 Preverjanje v teku preiskav

Z namenom, da preverim verodostojnost rezultatov strižnih preiskav na kemičnih sadrah in morebitni vpliv naprave, sem preiskavo s prekinitvijo direktnega striga, kot je opisana v poglavju 3.8.4, opravila tudi na testnem materialu. Za referenčni material sem izbrala karbonatno kameno moko – proizvod Calcivit VP iz kamnoloma Stahovica. V preglednici spodaj (Preglednica 3.5) so podatki o kemični sestavi, v naslednji preglednici (Preglednica 3.6) pa so podane fizikalne lastnosti uporabljene kamene moke.

Preglednica 3.5: Kemična sestava kamene moke Calcivit VP (<http://www.calcit.si/>)

Table 3.5: Chemical composition of stone powder Calcivit VP (<http://www.calcit.si/>)

Kemična sestava	Vrednost (%)
CaCO ₃	98
MgCO ₃	1,5
Fe ₂ O ₃	0,02
Al ₂ O ₃	0,05
Izguba pri žarjenju	43,8

Preglednica 3.6: Fizikalne lastnosti kamene moke Calcivit VP (Mazurek, 2010)

Table 3.6: Physical properties of stone Powder Calcivit VP (Mazurek, 2010)

Fizikalna lastnost	Vrednost
Specifična gostota (t/m ³)	2,72
Največja suha gostota (t/m ³)	1,76
Optimalna vlažnost (%)	15,9
Sposobnost vpijanja vode (%)	33,0
Vrednost metilen modro (g/kg)	2,0

Vzorci kamene moke (z oznako KM-1) sem vgradila ročno z nabijanjem pri začetni vlagi 15,79 %, kar sovpada z optimalno vlago tega materiala. Enako kot pri preiskavah kemičnih sader, sem tudi pri kameni moki uporabila štiri različne vrednosti normalne obtežbe in sicer 50, 100, 250 in 500 kPa. Vzorci sem konsolidirala 24 ur. Iz konsolidacijskih krivulj za vsako normalno obtežbo sem določila hitrosti striženja, ki so znašale med 0,071 in 0,104 mm/min. Preiskavo direktnega striga sem po poružitvi materiala (pri vrednosti horizontalne deformacije približno 4 mm) ustavila za 24 ur. Po tem času sem nadaljevala s striženjem. Rezultati preiskav na kameni moki so podani v poglavju 4.7.1.

3.9.2 Neodvisno preverjanje

Da bi preverili sledljivost in ponovljivost rezultatov preiskav, ki sem jih izvajal v okviru svojega raziskovalnega dela v Geomehanskem laboratoriju IRGO, so Maček in drugi (2013) izvedli kontrolne preiskave v standardnem direktnem strižnem aparatu (proizvajalca ELE) in v enostavnem strižnem aparatu (proizvajalca Seiken). Za preiskave so izbrali sadro iz Termoelektrarne Trbovlje (TET), glino iz Renč in pesek z območja Mokric.

Na direktnem strižnem aparatu so izvajali direktni strižni preizkus po standardu SIST-TS CEN ISO/TS 17892-10:2004 ter direktni strižni preizkus, izveden v dveh fazah (s 24-urno prekinitvijo po porušitvi) - enako kot opisujem v poglavju 3.8.4.

Preiskavo v enostavnem strižnem aparatu so opravili na preizkušancu premera 70 mm in višine 30 mm. Vgrajeni so bili zbiti preizkušanci, ki so jih pred preiskavo popolnoma zasitili ($S_r=1$). Opravili so dve vrsti preiskav: deformacijsko vodeno in napetostno vodeno.

Pri deformacijsko vodeni preiskavi so po konsolidaciji preizkušanec strigli s konstantno hitrostjo prirasta strižnih deformacij (podobno kot pri direktnem strižnem aparatu). Po prestrigu so preizkušanec pustili mirovati 24 ur pri konstantni strižni deformaciji, vertikalna obremenitev pa je bila identična tisti ob konsolidaciji. Po preteku 24 ur so ponovno pričeli s striženjem zemljine s konstantno hitrostjo.

Pri napetostno vodeni preiskavi so vzorec obremenjevali s strižno napetostjo in sicer s prirastom 1/30 vertikalne napetosti na 15 minut. Po porušitvi so preizkušanec pustili mirovati toliko časa, da so presežni porni tlaki upadli. Ko so dosegli 95 % maksimalne strižne trdnosti glede na deformacijsko vodeno preiskavo, so preizkušanec pustili mirovati 24 ur pri konstantni strižni obremenitvi in ob spremljavi prirasta strižnih deformacij. Po preteku 24 ur so ponovno pričeli povečevati strižno napetost.

Rezultati opisanih preiskav so podani v poglavju 4.7.2.

4 PRIKAZ IN INTERPRETACIJA REZULTATOV

4.1 Uvod

Preiskovala sem tri vrste kemičnih sader, ki nastajajo pri različnih industrijskih procesih v Sloveniji:

- energetsko sadro iz Termoelektrarne Trbovlje (sadra TET), ki nastaja v procesu razžvepljevanja dimnih plinov,
- titanovo sadro iz Cinkarne Celje (sadra CC), ki nastaja v postopku nevtralizacije odpadne žveplove kisline pri proizvodnji titanovega dioksida in
- steklarsko sadro iz Steklarne Rogaška (sadra SR), ki nastaja pri nevtralizaciji kislih odpadnih vod, nastalih pri kemičnem poliranju brušenih kristalnih izdelkov.

Podrobnosti o proizvodnji navedenih sader so v poglavju 1. Na vseh treh navedenih vrstah sadre sem izvajala enake preiskave, kot so opisane v poglavju 3. V poglavju 4 podajam rezultate opravljenih preiskav, hkrati pa rezultate tudi komentiram.

4.2 Rezultati določanja vlage in stopnje zasičenosti

V okviru preiskav direktnega striga sem določala vlago materiala pri vgradnji in vlago materiala po strižni preiskavi. Sadro sem sušila pri temperaturi 35 °C. Običajno sušimo zemljine pri temperaturi 105 °C, vendar ta temperatura za sušenje kemične sadre ni primerna, kar podrobneje opisujem v poglavju 2.3.3. Postopek določanja vlage preiskovanih vzorcev je opisan v poglavju 3.3. Pri določanju vlage pred preiskavo, ko je bil material v razsutem stanju, je bilo dovolj 24-urno sušenje pri temperaturi 35 °C. Vzorci po strigu so bili pri sušenju obdani s perforiranimi ploščicami, da ni prišlo do izgube materiala. Pri teh vzorcih je bil potrebno sušenje 48 ur pri temperaturi 35 °C. V preglednici spodaj (Preglednica 4.1) so navedene povprečne vrednosti vlage vsake od preiskovanih sadre pri vgradnji preiskavo in po strižni preiskavi. Podatki o vlagah vseh preiskovanih vzorcev so podani v prilogi A.

Preglednica 4.1: Povprečne vlage preiskovanih sader pri vgradnji in po strižni preiskavi

Table 4.1: Average water content of investigated samples before and after direct shear tests

Vrsta sadre	Vlaga vzorcev pri vgradnji		Vlaga vzorcev po strižni preiskavi	
	Povprečna vrednost (%)	Razpon (%)	Povprečna vrednost (%)	Razpon (%)
TET	16,67	15,35 - 17,40	24,15	21,86 - 27,04
CC	35,24	32,79 - 36,10	37,15	27,88 - 47,19
SR	51,24	43,85 - 57,50	43,67	33,70 - 56,40

Najnižjo povprečno vlago pri vgradnji je imela energetska sadra TET (16,67 %), najvišjo pa steklarska sadra SR (51,24 %). Kolač titanove sadre CC je pri vgradnji za strižno preiskavo vseboval 35,24 % vlage. Povprečna vlaga vseh vzorcev posamezne sadre po strižni preiskavi lahko služi za hitro primerjavo različnih sader, sicer pa ne pove veliko, glede nato, da so v to vrednost zajete vlage vzorcev, ki so bili konsolidirani in striženi pri različnih normalnih obremenitvah. V preglednici (Preglednica 4.2) so navedene povprečne vrednosti vlage preiskovanih sader po strižni preiskavi pri posameznih normalnih obremenitvah, ki so jim bili vzorci izpostavljeni med konsolidacijo in strižno preiskavo. Iz rezultatov je razvidno, da je pri večjih normalnih obremenitvah vlaga manjša, kar je razumljivo, saj se vzorci pri večjih normalnih obremenitvah bolj konsolidirajo in posledično se iz zasičenega vzorca iztisne več vode.

V preglednici (Preglednica 4.3) podajam rezultate določanja stopnje zasičenja vzorcev po konsolidaciji. Postopek določanja stopnje zasičenja je opisan v poglavju 3.4. Iz preglednice je razvidno, da so bili vzorci vseh treh vrst sader pri normalnih obremenitvah 250 in 500 kPa po končani konsolidaciji popolnoma zasičeni. Ta podatek sem nato privzela za vse

obremenitve pri vseh nadaljnjih preiskavah. Če so torej vzorci po konsolidaciji in prav tako po strigu polno zasičeni, je vlaga neposredno odvisna od količnika por. V preglednici (Preglednica 4.2) so zato navedene tudi povprečne vrednosti količnikov por po strižni preiskavi pri posamezni normalni obremenitvi. Največje vrednosti količnikov por po strigu so pri steklarski sadri SR, kar pogojuje tudi največjo vsebnost vlage pri tej sadri.

Preglednica 4.2: Povprečne vrednosti vlage in količnikov por po strižni preiskavi

Table 4.2: Average water content and void ratio after direct shear tests

Vrsta sadre	Normalna obremenitev (kPa)	Povprečna vrednost vlage vzorcev po strižni preiskavi (%)	Povprečna vrednost količnika por po strižni preiskavi
TET	50	25,55	0,55
	100	24,78	0,52
	250	23,74	0,51
	500	22,52	0,47
CC	50	42,43	0,95
	100	38,74	0,87
	250	33,86	0,75
	500	33,10	0,69
SR	50	48,39	1,17
	100	45,00	1,12
	250	40,57	0,93
	500	37,43	0,79

Preglednica 4.3: Rezultati določanja stopnje zasičenosti po konsolidaciji

Table 4.3: Degree of saturation after consolidation

Vrsta sadre	Oznaka vzorca	Normalna obremenitev (kPa)	Količnik por pred konsolidacijo	Stopnja zasičenosti pred konsolidacijo	Količnik por po konsolidaciji	Stopnja zasičenosti po konsolidaciji
Energetska TET	S-VZ-1-15	250	0,67	0,64	0,51	1,09
Energetska TET	S-VZ-1-15	500	0,63	0,68	0,46	1,15
Titanova CC	S-VZ3-9	250	0,98	0,88	0,81	1,16
Titanova CC	S-VZ3-9	500	0,98	0,87	0,71	1,23
Steklarska SR	S-VZ4-6	250	1,25	0,95	0,99	1,14
Steklarska SR	S-VZ4-6	500	1,29	0,93	0,85	1,20

4.3 Rezultati določanja relativne gostote vgrajenih vzorcev

Za določitev relativne gostote vzorcev kemične sadre pri preiskavah strižne trdnosti je bilo potrebno določiti maksimalni in minimalni količnik por za vsako posamezno sadro. Postopek sem opisala v poglavju 3.5, rezultati pa so prikazani v preglednici (Preglednica 4.4), v kateri je prikazana tudi vlaga vzorcev pri določanju maksimalnega in minimalnega količnika por za vse vrste obravnavanih sader. Pri določevanju minimalnega količnika por steklarske sadre SR sem najprej uporabila sadro z 52,2 % vlage, kar se je izkazala za neustrezno, saj je pri zbijanju prihajalo do utekočinjenja materiala. Steklarsko sadro SR sem zato sušila na zraku do vlage 18,1 % in pri tej vlagi določila minimalni količnik por, kot je prikazan v spodnji preglednici (Preglednica 4.4).

Preglednica 4.4: Rezultati določanja maksimalnega in minimalnega količnika por kemičnih sader

Table 4.4: Maximum and minimum void ratio of investigated gypsums

	Maksimalni količnik por		Minimalni količnik por	
	e_{max}	w (%)	e_{min}	w (%)
TET	1,33	0	0,51	14,5
CC	2,10	0	0,86	34,7
SR	2,91	0	0,69	18,1

Za izračun relativne gostote potrebujemo tudi dejanski količnik por materiala. V ta namen sem izračunala povprečni količnik por vgrajenih vzorcev pred konsolidacijo in po konsolidaciji za vsako od obravnavanih sader (Preglednica 4.5). Izkazalo se je, da je bil povprečni količnik por energetske sadre TET in titanove sadre CC pri večjih obremenitvah po konsolidaciji manjši od minimalnega količnika por, kot sem ga določila po opisanem postopku. Komentar o možnih razlogih podajam v poglavju 4.7.

S podatki iz preglednic (Preglednica 4.4 in Preglednica 4.5) sem z uporabo formule 3.6 določila relativno gostoto vzorcev vseh obravnavanih kemičnih sader pred in po konsolidaciji (Preglednica 4.6). Zaradi prej omenjenih težav z določitvijo minimalnega količnika por pri energetski sadri TET in titanovi sadri CC so izračunane vrednosti relativne gostote pri določenih normalnih obremenitvah večje od 100 %. To seveda ni mogoče, vendar sem vrednosti za ilustracijo obdržala v preglednici.

Preglednica 4.5: Povprečni količniki por kemičnih sader pred in po konsolidaciji pri preiskavah strižne trdnosti

Table 4.5: Average void ratio of synthetic gypsums before and after consolidation

Vrsta sadre	Povprečni količnik por pred konsolidacijo (pri vgradnji) e_{povpr_pred}	Povprečni količnik por po konsolidaciji	
		Normalna obremenitev σ (kPa)	Povprečni količnik por po konsolidaciji (pred strigom) e_{povpr_po}
TET	0,64	50	0,55
		100	0,52
		250	0,51
		500	0,47
CC	0,95	50	0,95
		100	0,87
		250	0,75
		500	0,69
SR	1,30	50	1,17
		100	1,12
		250	0,93
		500	0,79

Preglednica 4.6: Povprečne vrednosti relativne gostote kemičnih sader pri preiskavah strižne trdnosti

Table 4.6: Average relative density of synthetic gypsums before and after consolidation

Vrsta sadre	Relativna gostota pred konsolidacijo (po vgradnji) Dr_{pred} (%)	Relativna gostota po konsolidaciji	
		Normalna obremenitev (kPa)	Relativna gostota po konsolidaciji (pred strigom) Dr_{po} (%)
TET	84	50	94
		100	98
		250	100
		500	105
CC	93	50	93
		100	99
		250	109
		500	114
SR	72	50	78
		100	81
		250	89
		500	96

Maksimović (2008) navaja dve vrsti klasifikacij, s katerimi kvalitativno opišemo gostoto grobozrnatih zemljin (Preglednica 4.7). Glede na obe klasifikaciji so bili vzorci kemičnih sader vgrajeni v gostem do zelo gostem stanju, v procesu konsolidacije pred strižno preiskavo pa je večina vzorcev dosegla zelo gosto stanje. Relativna gostota vzorcev po konsolidaciji se veča z večanjem normalne obremenitve. Preiskovane kemične sadre se sicer uvrščajo med drobnozrnate materiale, zato uporabljena metoda določanja relativne gostote in klasifikacija

ni povsem ustrezna, na kar sem opozorila že v poglavju 3.5. Dobljene vrednosti relativne gostote kemičnih sader zato služijo le za orientacijo.

Preglednica 4.7: Kvalitativni opis gostote grobozrnatih zemljin po (a) Lambe in Whitman (1969) in (b) Meyerhof (1956, cit. po Maksimović, 2008)

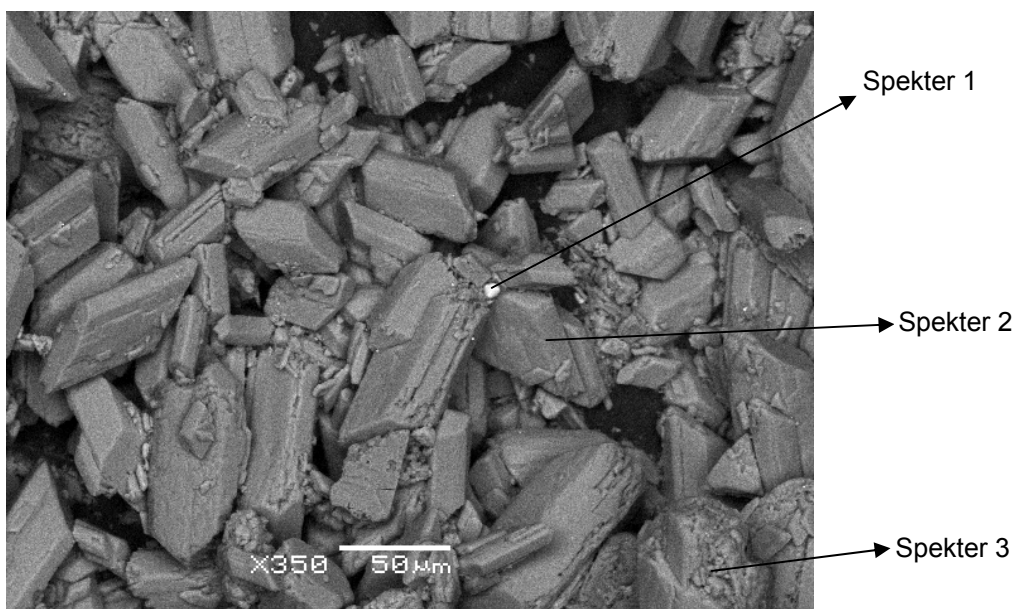
Table 4.7: Relative density classification system after (a) Lambe in Whitman (1969) and (b) Meyerhof (1956, in Maksimović, 2008)

Opis	Relativna gostota <i>Dr (%)</i>	
	(a)	(b)
Zelo rahlo	0 - 15	0 - 20
Rahlo	15 - 35	20 - 40
Srednje gosto	35 - 65	40 - 60
Gosto	65 - 85	60 - 80
Zelo gosto	85 - 100	80 - 100

4.4 Rezultati elektronske vrstične mikroskopije (SEM)

Z vrstičnim elektronskim mikroskopom sem pregledala vzorce vseh treh obravnavanih sader: energetske TET, titanove CC in steklarske SR. Metoda je opisana v poglavju 3.6.

Na spodnji sliki (Slika 4.1) je 350 x povečan vzorec energetske sadre TET iz Termoelektrarne Trbovlje. Zrna energetske sadre TET so enakomerno velika, relativno debela, brez večjih količin drobne frakcije, ob robovih korodirana. Na treh izbranih zrnih (označenih z oznakami Spekter 1-3) je bila izvedena kvalitativna in kvantitativna kemična analiza, katere rezultati so prikazani v preglednici (Preglednica 4.8).



Slika 4.1: Posnetek energetske sadre TET z elektronskim vrstičnim mikroskopom, povečano 350 x

Figure 4.1: SEM micrograph of FGD gypsum TET, mag. 350 ×

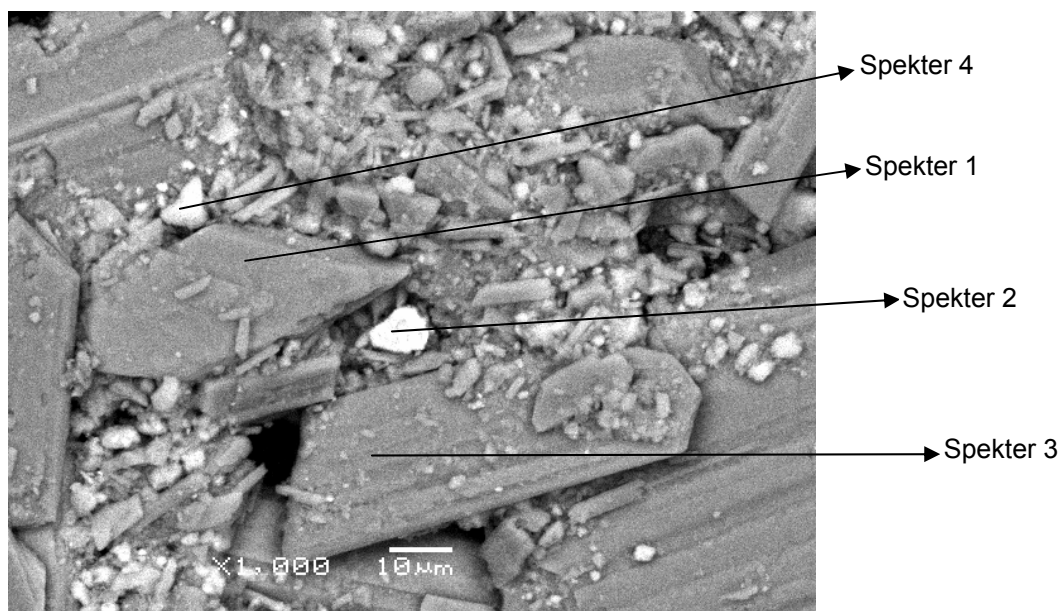
Iz rezultatov kemične analize je razvidno, da gre pri zrnju Spekter 2 za čisti kalcijev sulfat, zrno Spekter 1 je kovinsko zrno z veliko vsebnostjo železa in z nekaj magnezija, silicija ter aluminija, zrno Spekter 3 je nekoliko onesnaženo zrno sadre s pretežno sestavo kalcijevega sulfata, prisotni pa so še magnezij, aluminij in silicij.

Preglednica 4.8: Rezultat kvalitativne in kvantitativne kemične analize treh zrn v vzorcu energetske sadre TET

Table 4.8: Qualitative and quantitative elemental analysis of three grains in TET gypsum sample

Oznaka vzorca	Spekter 1	Spekter 2	Spekter 3
Element (mas %)			
C			2,26
Mg	3,39		3,95
Al	1,48		1,38
Si	2,38		1,77
S	12,15	22,77	18,84
Ca	14,47	30,84	22,67
Fe	27,93		
O	38,21	46,39	49,12

Na spodnji sliki (Slika 4.2) je 1000 x povečan vzorec titanove sadre CC iz Cinkarne Celje. Zrna so podolgovata in ploščata, poleg relativno velikih zrn je tudi precej drobnih zrn. Na štirih izbranih zrnih (označenih z oznakami Spekter 1-4) je bila izvedena kvalitativna in kvantitativna kemična analiza, katere rezultati so prikazani v preglednici (Preglednica 4.9). Zrni Spekter 1 in 3 gradi razmeroma čist kalcijev sulfat, pri zrnju Spekter 2 prevladujeta železo in titan, medtem ko je pri zrnju Spekter 4 poleg kalcijevega sulfata prisotno še precej železa in ogljika ter nekaj magnezija, silicija in titana.



Slika 4.2: Posnetek titanove sadre CC z elektronskim vrstičnim mikroskopom, povečano 1000 x

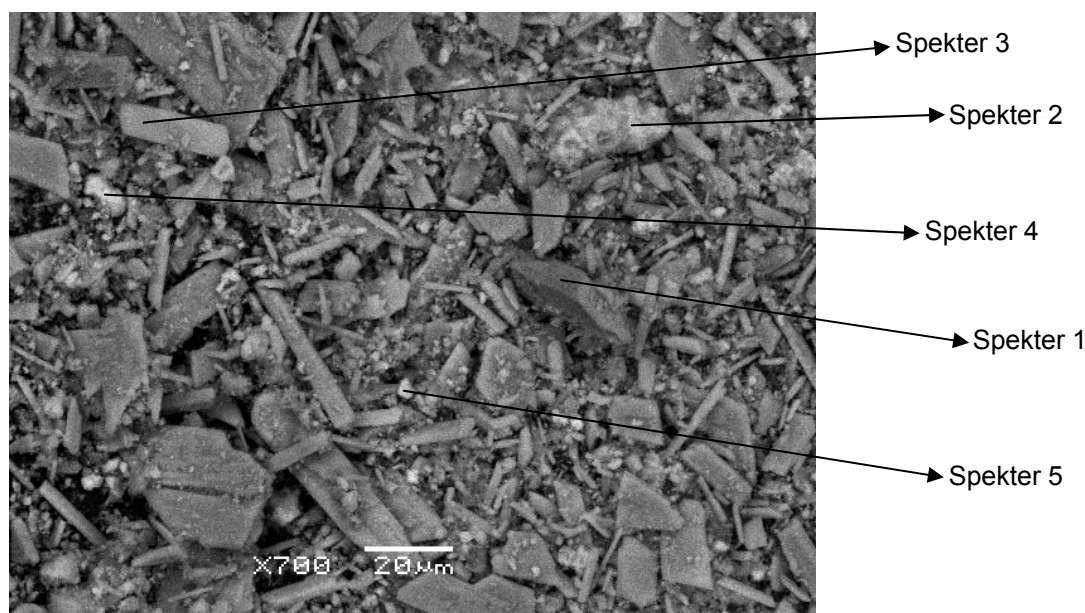
Figure 4.2: SEM micrograph of titanium gypsum CC, mag. 1000 ×

Preglednica 4.9: Rezultat kvalitativne in kvantitativne kemične analize štirih zrn v vzorcu titanove sadre CC

Table 4.9: Qualitative and quantitative elemental analysis of four grains in CC gypsum sample

Oznaka vzorca	Spekter 1	Spekter 2	Spekter 3	Spekter 4
Element (mas %)				
C		1,07	1,15	9,60
Mg	1,03			1,63
Si				0,39
S	21,32	6,27	20,96	10,74
Ca	27,06	9,03	28,83	14,44
Ti		15,62		0,90
Fe	5,60	32,44	2,43	9,92
O	45,00	35,57	46,63	52,38

Na spodnji sliki (Slika 4.3) je vzorec steklarske sadre SR iz Steklarne Rogaška pri 700-kratni povečavi. Zrna so podolgovata in ploščata, različno velika. Na sedmih izbranih zrnih (označenih z oznakami Spekter 1-7) je bila izvedena kvalitativna in kvantitativna elementna analiza, katere rezultati so prikazani v preglednici (Preglednica 4.10).



Slika 4.3: Posnetek steklarske sadre SR z elektronskim vrstičnim mikroskopom, povečano 700 x

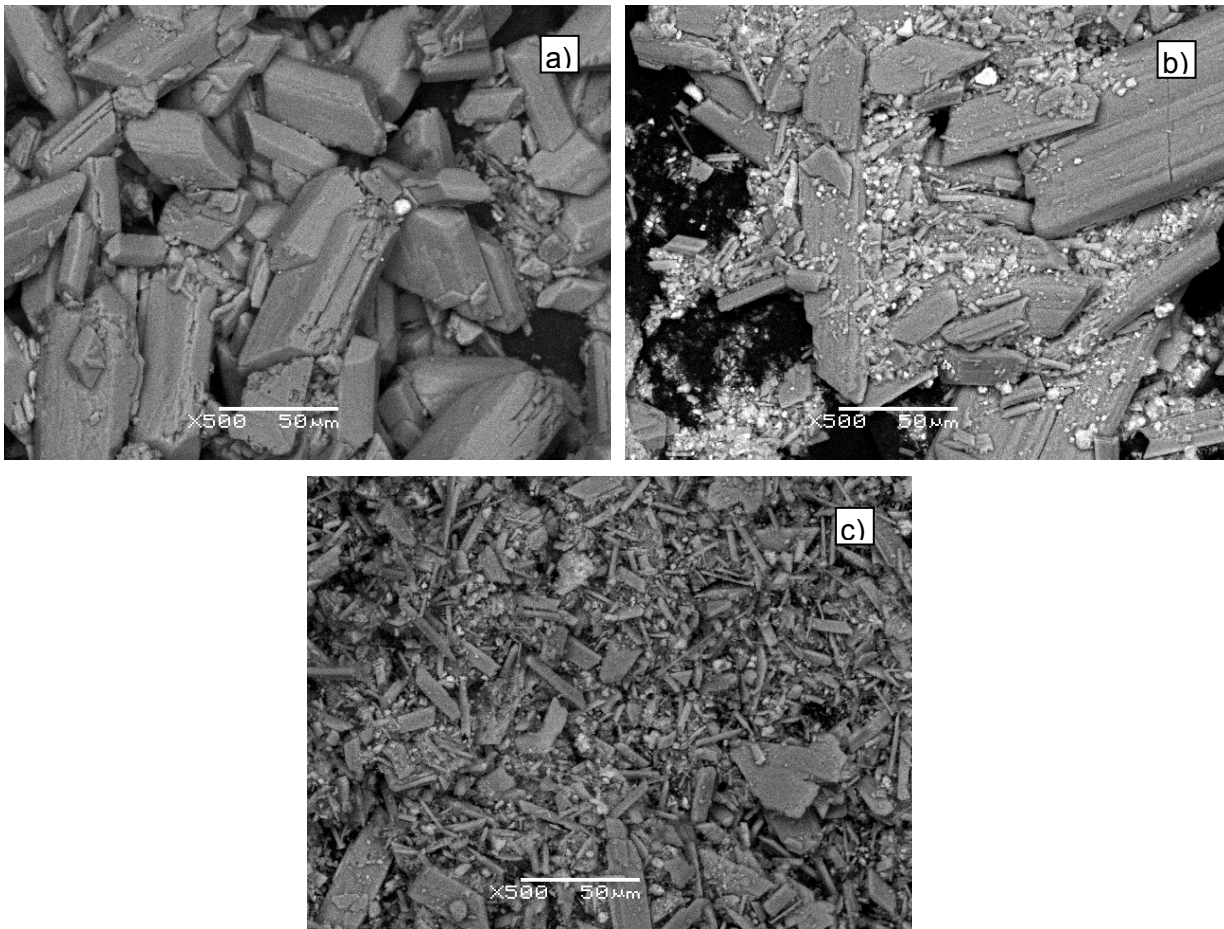
Figure 4.3: SEM micrograph of glass gypsum SR, mag. 700 x

Preglednica 4.10: Rezultat kvalitativne in kvantitativne kemične analize 7 zrn v vzorcu steklarske sadre SR (zrni 6 in 7 sta izven slike - Slika 4.3)

Table 4.10: Qualitative and quantitative elemental analysis of seven grains in SR gypsum sample

Oznaka vzorca	Spekter 1	Spekter 2	Spekter 3	Spekter 4	Spekter 5	Spekter 6	Spekter 7
Element (mas %)							
C		3,36	0,73		0,58		0,52
F	19,53	49,82	21,70	18,07	28,93	19,81	34,75
Mg						1,63	
Al			0,35				
Si	1,31	1,12	2,96	3,34	3,13	8,77	6,72
S	17,05	2,39	12,79	5,80	8,93	8,62	4,67
Ca	25,08	21,10	26,21	43,35	28,54	26,59	26,66
O	37,03	22,22	35,25	29,53	29,88	34,58	26,68

Poleg kalcijevega sulfata je v izbranih zrnih steklarske sadre SR prisotnega še precej fluora ter nekaj silicija in ogljika, mestoma tudi magnezija in aluminija. Na sliki (Slika 4.4) je primerjava vseh treh vrst sadre pri enaki povečavi. Primerjava pokaže, da je velikost zrn najbolj enotna pri energetski sadri TET, ta zrna so tudi najdebelejša in niso tako izrazito podolgovata kot zrna pri preostalih dveh sadra. Steklarska sadra SR je izmed vseh treh najbolj drobnostnata, oblika zrn je ploščata do paličasta, titanova sadra CC pa vsebuje sicer precej drobne frakcije, vsebuje pa tudi velik precejšen delež velikih zrn, ki so izrazito ploščata.

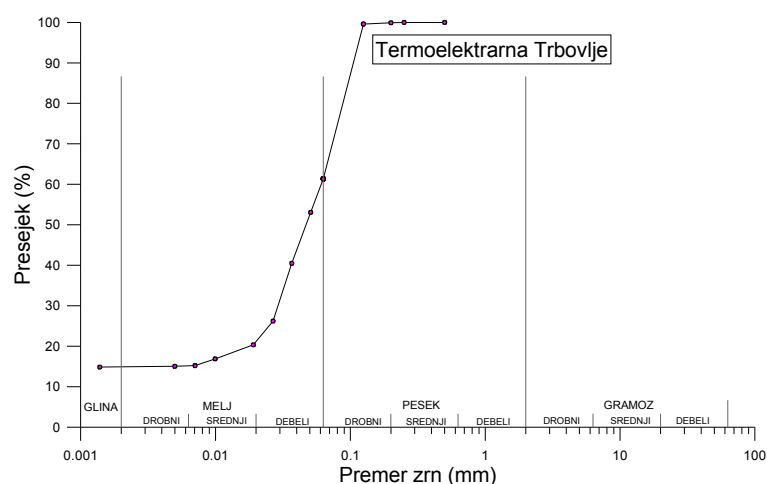


Slika 4.4: Primerjava a) energetske TET, b) titanove CC in c) steklarske SR sadre, povečane 500 ×

Figure 4.4: FGD gypsum TET (a), titanium gypsum CC (b) and glass gypsum SR, mag. 500 ×

4.5 Rezultati določevanja zrnivosti

Zrnavost vseh treh obravnavanih sader sem določala po standardu *SIST-TS CEN ISO/TS 17892-4:2004. Geotehnično preiskovanje in preskušanje - laboratorijsko preskušanje zemljin - 4. del: Ugotavljanje zrnavostne sestave*, kot je opisano v poglavju 3.7. Na sliki (Slika 4.5) je prikazana zrnavostna krivulja energetske sadre TET, ki je bila določena s kombinacijo sejalne in sedimentacijske metode. Zrnavostna analiza energetske sadre TET je pokazala, da je 60,51 % zrn manjših od 0,063 mm. Pretežni premer D_{60} znaša 0,061 mm, 80 % zrn je manjših od 0,019 mm, 100 % zrn pa je manjših od 0,5 mm. Ker se pri sedimentacijski metodi v času preiskave več kot 10 % vzorca še ni posedlo, ni bilo mogoče določiti učinkovitega premera D_{10} , posledično ni bilo mogoče izračunati količnika enakomernosti C_u in količnika ukrivljenosti C_c . Večina zrn energetske sadre TET je velikosti grobozrnatega melja do drobnega peska.



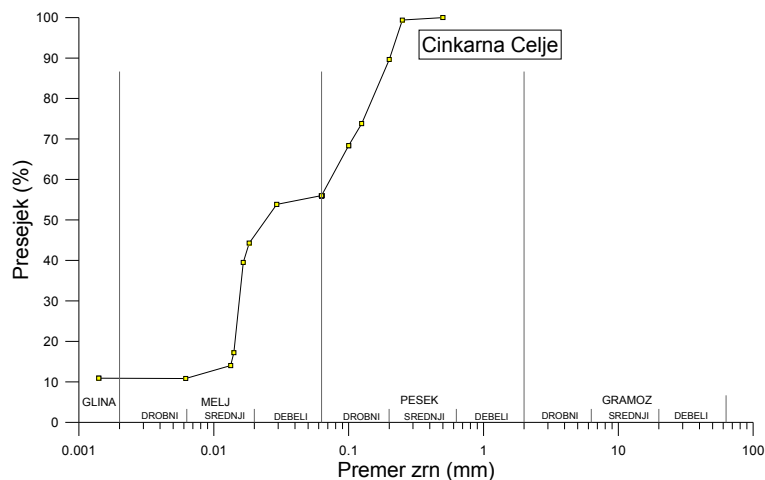
Slika 4.5: Zrnavostna krivulja energetske sadre TET

Figure 4.5: Granulometric curve of FGD gypsum TET

Na sliki (Slika 4.6) je prikazana zrnavostna krivulja titanove sadre CC, s katere je razvidno, da je 56 % zrn manjših od 0,063 mm. Pretežni premer D_{60} znaša 0,072 mm, 80 % zrn je manjših od 0,137 mm, 100 % zrn je manjših od 0,5 mm. Ker se pri sedimentacijski metodi v času preiskave več kot 10 % vzorca še ni posedlo, ni bilo mogoče določiti učinkovitega premera D_{10} , posledično ni bilo mogoče izračunati količnika enakomernosti C_u in količnika ukrivljenosti C_c . Večina zrn titanove sadre CC je velikosti srednjega melja ter drobnega in srednjega peska, frakcija grobozrnatega melja je slabše zastopana.

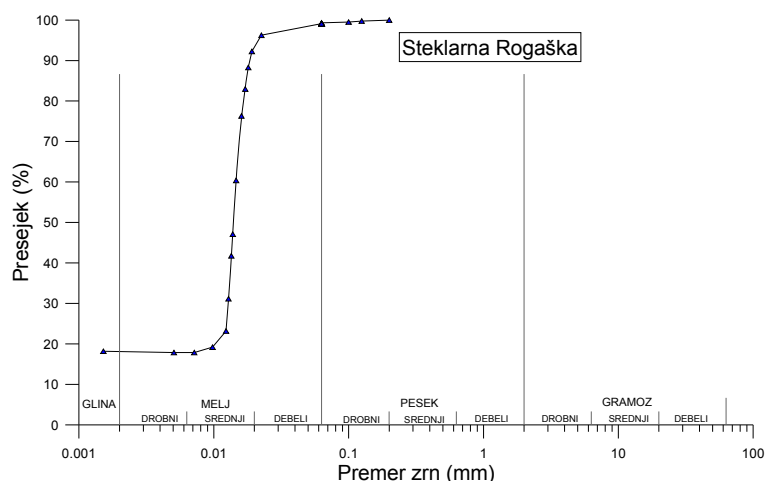
Na sliki (Slika 4.7) je prikazana zrnavostna krivulja steklarske sadre SR, s katere je razvidno, da je 98,10 % zrn manjših od 0,063 mm. Pretežni premer D_{60} znaša 0,015 mm, 80 % zrn je manjših od 0,016 mm, 100 % zrn pa je manjših od 0,5 mm. Učinkovitega premera D_{10} ni bilo

mogoče določiti. Glede na zrnastostno krivuljo je večina zrn steklarske sadre SR velikosti srednjezrnatega melja.



Slika 4.6: Zrnastostna krivulja titanove sadre CC

Figure 4.6: Granulometric curve of titanium gypsum CC

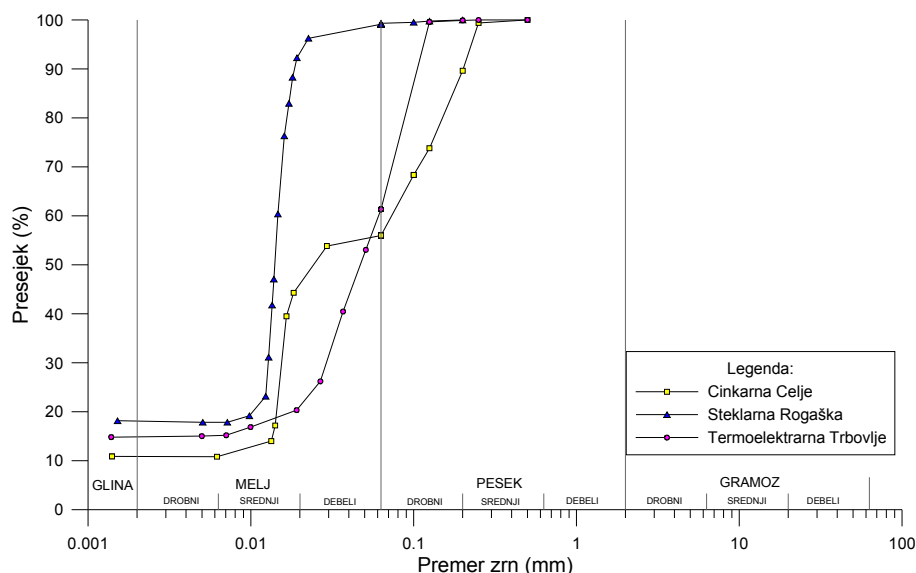


Slika 4.7: Zrnastostna krivulja steklarske sadre SR

Figure 4.7: Granulometric curve of glass gypsum SR

Na sliki (Slika 4.8) je primerjava zrnastostnih krivulj vseh treh obravnavanih sader. Poudariti je potrebno, da pri sedimentacijski metodi po Stokesovem zakonu ugotavljamo premere kroglastih zrn. Če pogledamo sliko (Slika 4.4) v poglavju 4.5, kjer je primerjava posnetkov vseh treh sader z vrstičnim elektronskih mikroskopom, ugotovimo, da zrna kemičnih sader niso okrogla, ampak ploščasta in podolgovata. Še najbližje okrogli obliki so zrna energetske sadre TET, ki so relativno krajša in debelejša od zrn titanove CC in steklarske SR sadre. Po tem bi lahko sklepali, da je del zrnastostne krivulje, ki je bil določen s sedimentacijsko metodo, najbolj realen za energetske sadro TET. S primerjavo zrnastostnih krivulj lahko nadalje ugotovimo, da je krivulja steklarske sadre SR najbolj strma, kar pomeni, da je

enakomerno zrnava, torej da prevladuje ena vrsta frakcije. V primeru steklarske sadre SR je to velikost srednjezrnatega melja. Energetska sadra TET je v primerjavi s steklarsko SR bolj graduirana in bolj debelozrnata, kar potrjuje tudi posnetek z elektronskim vrstičnim mikroskopom (Slika 4.4). Zrnavostna krivulja titanove sadre CC je precej strma na območju



Slika 4.8: Primerjava zrnavostnih krivulja energetske TET, titanove CC in steklarske SR sadre

Figure 4.8: Comparison of granulometric curves of FGD TET, titanium CC and glass SR gypsum

velikosti srednjega melja, na območju debelega melja postane precej položna in zopet strmehjša na območju drobnega in srednjega peska. Videti je, da manjka frakcija debelega melja. Pogled na posnetek z vrstičnim elektronskim mikroskopom bi to lahko potrdil, saj vidimo relativno velika zrna in precej drobnih. Po drugi strani pa je predvsem za titanovo sadro CC značilno, da se manjša zrna lepijo na večja in tvorijo aglomerate. Ti aglomerati pri standardnih postopkih določanja zrnavosti ne razpadejo povsem, torej ne dobimo povsem realne zrnavostne krivulje. Opozoriti je potrebno še na dejstvo, da kemične sadre ne sestavljajo samo minerali sadre, ampak vsebujejo tudi različne primesi, kar lahko prav tako vpliva na obliko zrnavostne krivulje. Od obravnavanih sader največ primesi vsebuje ravno rdeča titanova sadra CC, gre pa v glavnem za železove okside.

Kljub temu, da zrnavostnih krivulj zaradi različnih, zgoraj navedenih razlogov, ne moremo smatrati za povsem realne, se načeloma ujemajo s posnetki vseh obravnavanih sader z elektronskim vrstičnim mikroskopom.

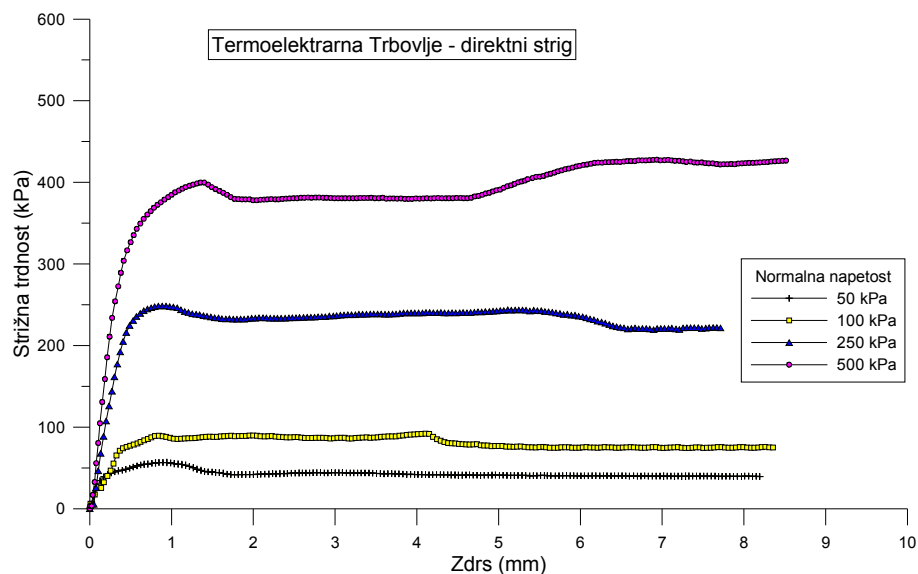
4.6 Vpliv časovne komponente in volumske deformacije na strižno trdnost

4.6.1 Rezultati direktnega striga

Osnovna preiskava, ki sem jo izvajala na vseh treh vrstah kemične sadre, je preiskava direktnega striga. Preiskavo direktnega striga sem izvajala po standardu SIST-TS CEN ISO/TS 17892-10:2004. Podrobnosti izvedbe so opisane v poglavju 3.9.1. Na sliki (Slika 4.9) je prikazana strižna napetost pri izvedbi direktnega striga pri 4 različnih normalnih obremenitvah na vzorcu energetske sadre TET. Graf na sliki (Slika 4.10) prikazuje odvisnost med normalnimi efektivnimi napetostmi in strižno trdnostjo v skladu z Mohr-Coulombovo enačbo $\tau_f = c' + \sigma' \tan \varphi' = c' + (\sigma - u) \tan \varphi'$, (2.7). Naklon premice (ki jo določimo z metodo linearne regresije) je enak tangensu strižnega kota, presečišče z ordinatno osjo pa predstavlja navidezno kohezijo sadre (glede na to, da je odvisnost med normalnimi napetostmi in strižno trdnostjo lahko nelinearna, pri interpretaciji pa sem uporabila linearno funkcijo za premico v skladu z Mohr-Coulombovo enačbo, bom za presečišče z ordinatno osjo uporabljala termin navidezna kohezija). Strižni kot energetske sadre TET, določen pri tem poskusu, je $37,7^\circ$, kohezija pa znaša 25,2 kPa, pri čemer sem za strižno trdnost pri normalni obremenitvi 500 kPa upoštevala vrednost strižne napetosti pri 1,2 mm horizontalne deformacije. Po 5 mm horizontalne deformacije namreč vrednost strižne napetosti prične naraščati in preseže upoštevano vrednost strižne trdnosti, vendar pri tako veliki horizontalni deformaciji meritev ni več zanesljiva.

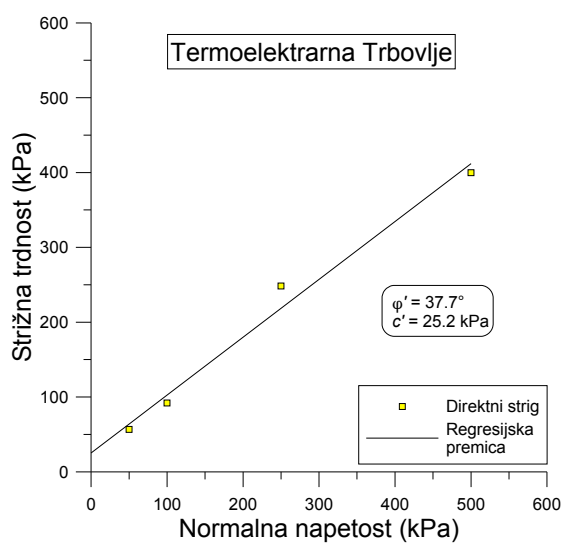
Sliki v nadaljevanju prikazujeta rezultate enakega poskusa še na preostalih dveh obravnavanih sadrah. Slika 4.11 prikazuje strižno napetost pri izvedbi direktnega striga na vzorcu titanove sadre CC, slika Slika 4.12 pa prikazuje odvisnost med normalnimi efektivnimi napetostmi in strižno trdnostjo pri titanovi sadri CC. Sledi prikaz rezultatov direktnega striga na steklarski sadri SR (Slika 4.13 in Slika 4.14). Strižni kot titanove sadre CC znaša $41,3^\circ$, kohezija pa 4,4 kPa. Strižni kot steklarske sadre SR je nekoliko manjši in znaša $37,2^\circ$, kohezija pa 11,9 kPa.

Strižni koti obravnavanih sader so relativno visoki, pri vseh treh vrstah sadre pa lahko tudi opazimo, da se trdnost po prestrigu ne zmanjšuje, torej ni nevarnosti, da bi prišli v fazo rezidualnih trdnosti.



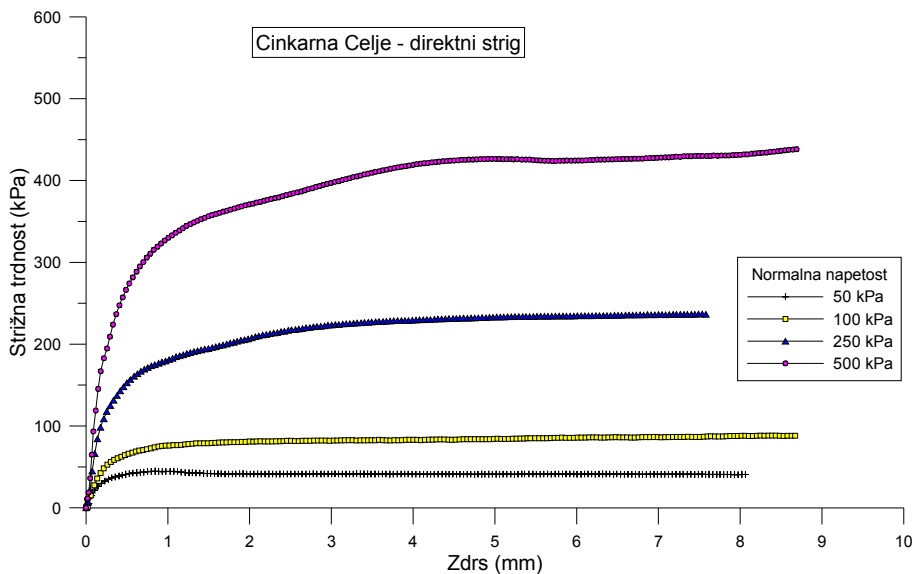
Slika 4.9: Rezultat preiskave direktnega striga na energetski sadri TET pri 4 različnih normalnih obremenitvah

Figure 4.9: Shear stress/displacement curves for FGD gypsum TET specimens under 4 different normal pressures



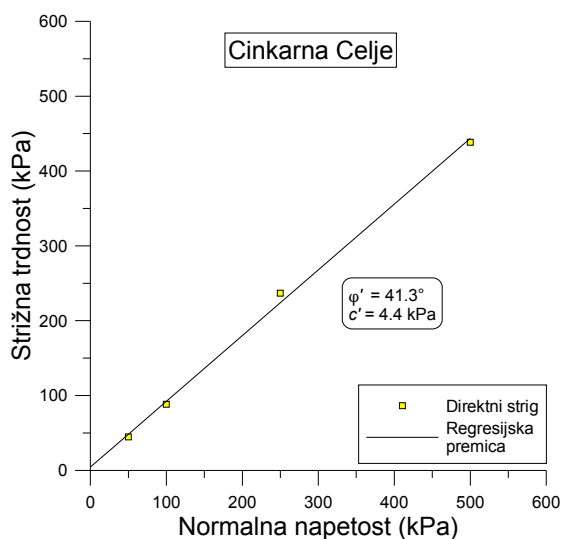
Slika 4.10: Odvisnost med normalno efektivno napetostjo in strižno trdnostjo pri preiskavi direktnega striga na energetski sadri TET

Figure 4.10: Maximum shear stress related to effective normal stress for FGD gypsum TET



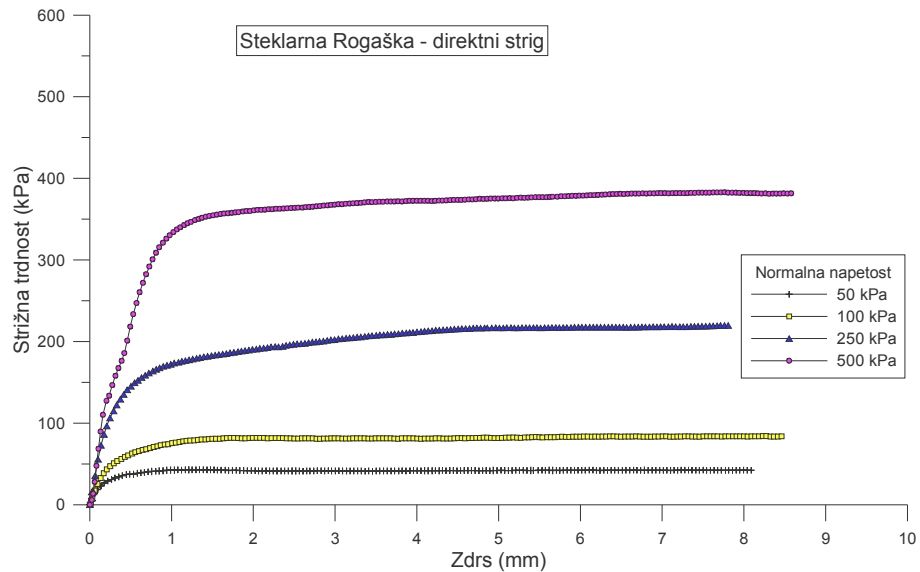
Slika 4.11: Rezultat preiskave direktnega striga na titanovi sadri CC pri 4 različnih normalnih obremenitvah

Figure 4.11: Shear stress/displacement curves for titanium gypsum CC specimens under 4 different normal pressures



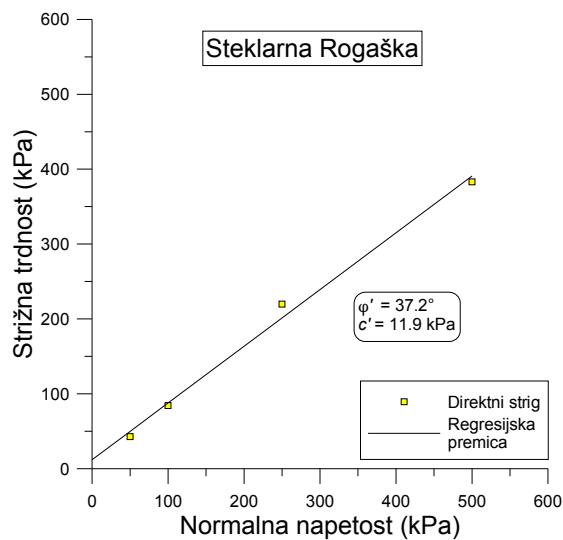
Slika 4.12: Odvisnost med normalno efektivno napetostjo in strižno trdnostjo pri preiskavi direktnega striga na titanovi sadri CC

Figure 4.12: Maximum shear stress related to effective normal stress for titanium gypsum CC



Slika 4.13: Rezultat preiskave direktnega striga na steklarski sadri iz SR pri 4 različnih normalnih obremenitvah

Figure 4.13: Shear stress/displacement curves for glass gypsum SR specimens under 4 different normal pressures



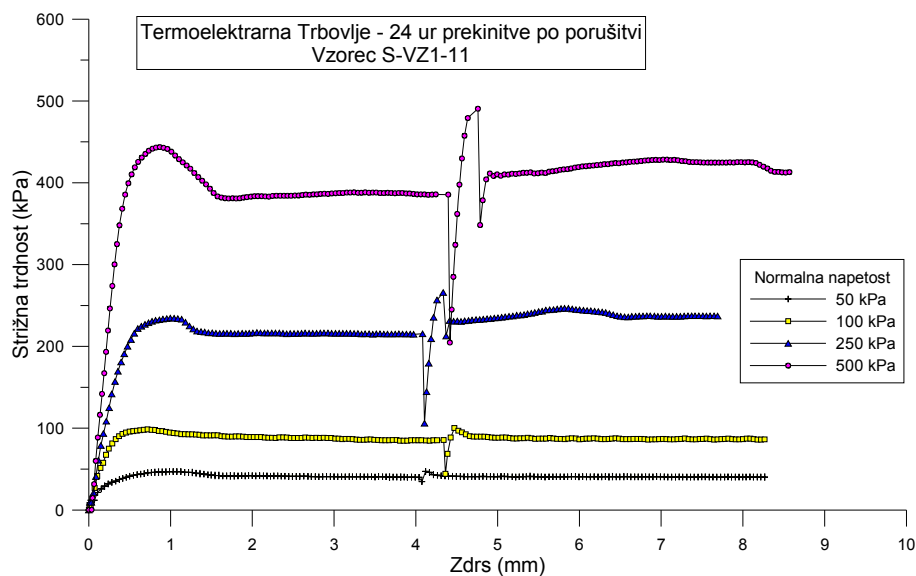
Slika 4.14: Odvisnost med normalno efektivno napetostjo in strižno trdnostjo pri preiskavi direktnega striga na steklarski sadri SR

Figure 4.14: Maximum shear stress related to effective normal stress for glass gypsum SR

4.6.2 Rezultati prekinitve striga

Del preiskav sem izvedla tako, da sem med preiskavo direktnega striga spremljala strižno napetost in horizontalno deformacijo in po poružitvi vzorca (ki se je zgodila običajno nekje pri 4 mm horizontalne deformacije) ustavila striženje. V tem položaju in še vedno v preplavljenem stanju je vzorec miroval 24 ali 72 ur, nakar sem nadaljevala s striženjem, senzorji pa so zopet merili horizontalno deformacijo in strižno napetost. Postopek je podrobneje opisan v poglavju 3.8.4. S serijo preiskav, pri kateri sem prekinila strig za različno dolga časovna obdobja, sem želela preveriti vpliv časovne komponente na strižno trdnost kemičnih sader. Pri striženju se namreč material na strižni ploskvi preoblikuje. V skladu z definicijo tiksotropije (Mitchell, 1976) se pri tem struktura poruši, pri mirovanju pa naj bi se obnovila in s tem bi se strižna trdnost povečala.

V nadaljevanju podajam grafične prikaze preiskav na vseh treh vrstah sadre s 24-urno prekinitvijo striga, grafični prikazi vseh preiskav s prekinitvijo striga po poružitvi pa so v prilogi B. Slika 4.15 prikazuje strižno napetost energetske sadre TET pri preiskavi s prekinitvijo striga po poružitvi za 24 ur pri 4 različnih normalnih obremenitvah. Krivulja, ki predstavlja strižno napetost energetske sadre TET pri normalni obremenitvi 500 kPa, doseže enega od maksimumov (443 kPa) kmalu po začetku striženja, t.j. približno pri 1 mm horizontalne deformacije. Pri nadaljevanju striga strižna napetost pada, po 2 mm horizontalne deformacije pa se ustali nekje pri vrednosti 385 kPa. Med 24-urno prekinitvijo strižna napetost pade zaradi relaksacije, ki je posledica preurejanja zrn. Zmanjšanje strižne napetosti je najmanj izrazito pri normalni napetosti 50 kPa (15 %), pri večjih normalnih napetostih pa znaša od 47-51 %. Pri nadaljevanju striga po 24-urni prekinitvi krivulja doseže nov maksimum (490 kPa), katerega vrednost je višja kot prvič. Pri nadaljevanju pride po kratkotrajnem padcu do ponovne izravnave krivulje na vrednost strižne napetosti med 408 in 420 kPa, kar je prav tako več kot pri prvi izravnavi. Oblika krivulje za vrednost normalne obremenitve 250 kPa je enake oblike kot pravkar opisana, prav tako pride do povečanja strižne napetosti po 24-urni prekinitvi pri manjših vrednostih normalne obremenitve, le da pri teh povečanje ni tako izrazito.

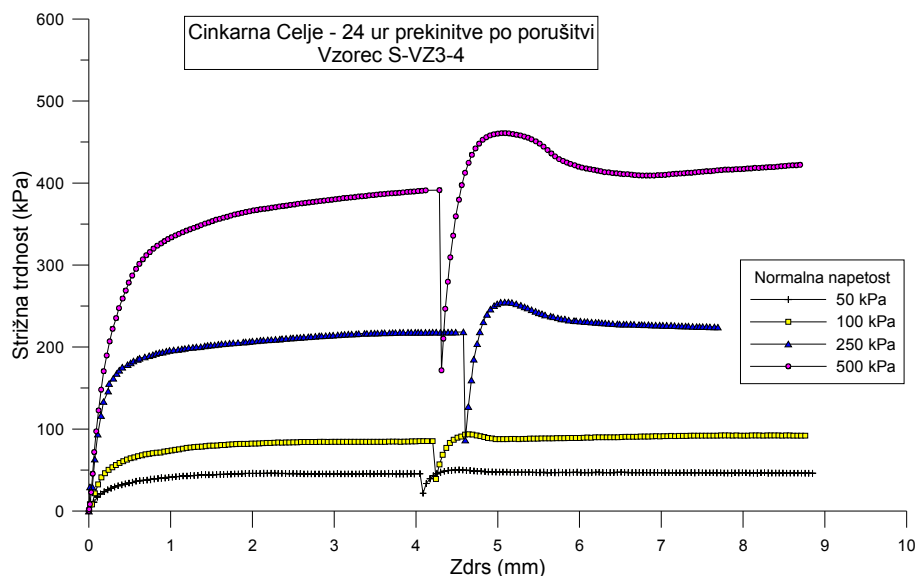


Slika 4.15: Rezultat preiskave direktnega striga, po poružitvi prekinjenega za 24 ur, na energetski sadri TET

Figure 4.15: Shear stress/displacement curves as result of direct shear tests which have been stopped after failure and carried on after 24 hours - FGD gypsum TET

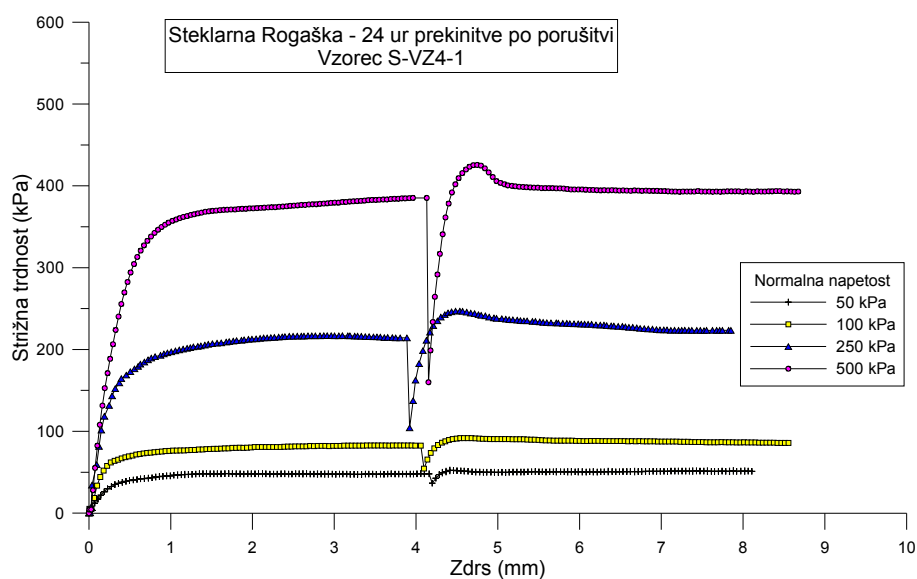
Slika 4.16 prikazuje strižno napetost titanove sadre CC pri enaki preiskavi. Krivulja strižne napetosti pri striženju titanove sadre CC pri normalni obremenitvi 500 kPa tudi še po 4 mm horizontalne deformacije kaže rahel trend naraščanja, vrednost strižne napetosti pri tej deformaciji je 391 kPa. Med 24-urno prekinitvijo pride do zmanjšanja strižne trdnosti, ki je nekoliko manj izrazito pri manjših normalnih obremenitvah, gre pa za vrednosti med 40-61 %. Pri nadaljevanju striga po 24-urni prekinitvi doseže krivulja maksimalno vrednost strižne napetosti 461 kPa, po poružitvi pa pade na vrednost okoli 410 kPa in še vedno rahlo narašča, s čimer se nadaljuje trend, ki se kaže pred prekinitvijo striga. Nekoliko drugače je pri manjših normalnih obremenitvah, kjer se krivulja strižnih napetosti do 4 mm horizontalne deformacije skorajda ustali, po 24-urni prekinitvi doseže maksimum, po poružitvi pa se zopet ustali na vrednosti, ki je nekoliko višja od tiste pred prekinitvijo striga.

Na sliki (Slika 4.17) je prikazana strižna napetost pri preiskavi s 24-urno prekinitvijo striga na steklarski sadri SR. Oblika krivulj strižnih napetosti je zelo podobna tistim pri titanovi sadri CC (Slika 4.16), le da pri steklarski sadri SR pride do izravnave krivulj nekoliko hitreje kot pri titanovi CC, vrednosti strižnih napetosti pa so nekoliko nižje. Zmanjšanje strižne napetosti med 24-urnim mirovanjem se večja z velikostjo normalne obremenitve in znaša od 25 do 58 %.



Slika 4.16: Rezultat preiskave direktnega striga, po porušitvi prekinjenega za 24 ur, na titanovi sadri CC

Figure 4.16: Shear stress/displacement curves as result of direct shear tests which have been stopped after failure and carried on after 24 hours titanium gypsum CC



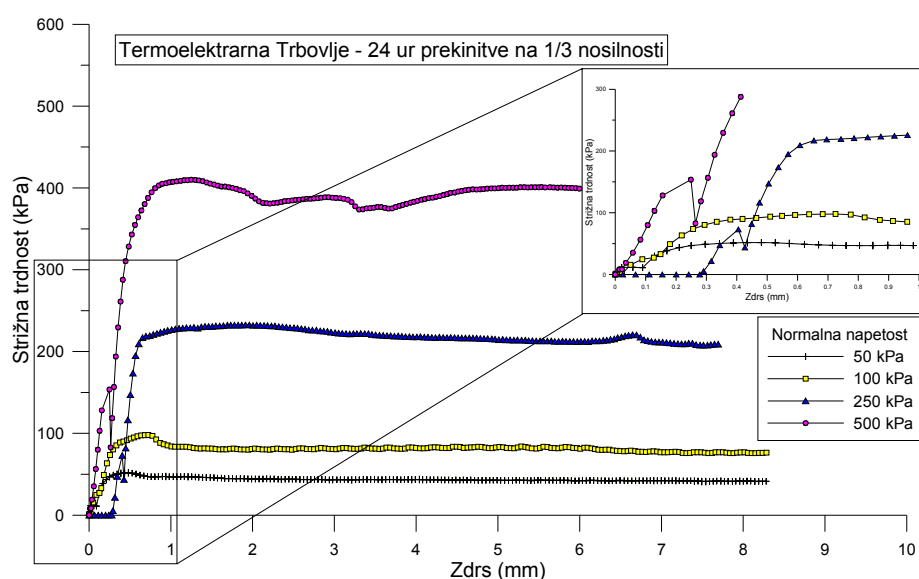
Slika 4.17: Rezultat preiskave direktnega striga, po porušitvi prekinjenega za 24 ur, na steklarski sadri SR

Figure 4.17: Shear stress/displacement curves as result of direct shear tests which have been stopped after failure and carried on after 24 hours - glass gypsum SR

En del preizkusov sem izvedla tako, da sem s pomočjo preiskave direktnega striga za vsako od obravnavanih sader določila strižno trdnost, nato sem pri novi preiskavi direktnega striga le-tega prekinila na 1/3 strižne trdnosti. Po 24 urah sem preizkus nadaljevala. Na ta način

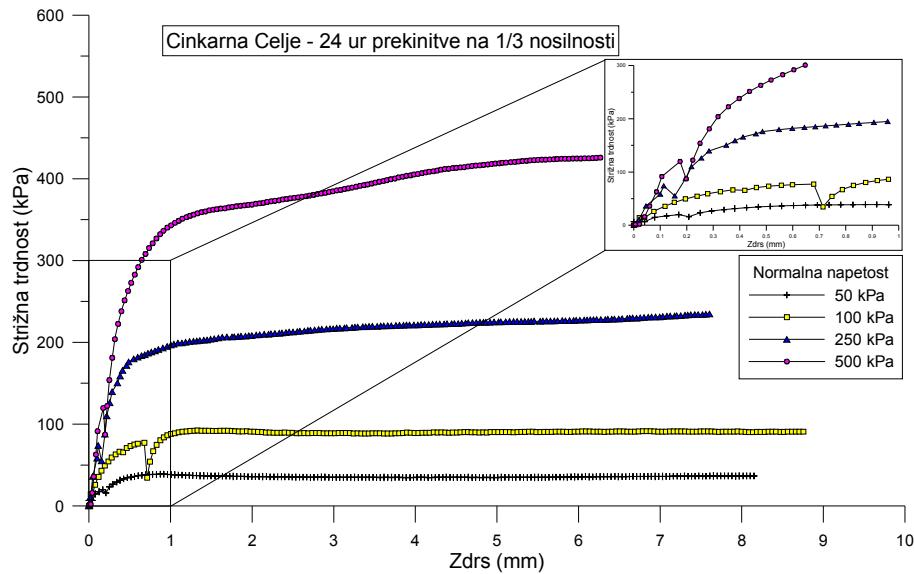
sem želela preveriti, kaj se v času mirovanja zgodi z vzorcem, ki ni bil do konca porušen. Postopek je podrobneje opisan v poglavju 3.8.4.

V nadaljevanju (Slika 4.18, Slika 4.19 in Slika 4.20) podajam grafični prikaz rezultatov preiskave prekinjenega striga na 1/3 strižne trdnosti na vseh treh preiskovanih sadrah. Vsi rezultati teh preiskav so v prilogi B. Primerjava rezultatov direktnega striga in 24-urne prekinitve striga, ko strižna napetost doseže 1/3 strižne trdnosti, pri vseh treh obravnavanih sadrah pokaže, da ta prekinitve ne vpliva na vrednost maksimalne strižne napetosti, ki jo dosežemo pri nadaljevanju striga po 24-ih urah.



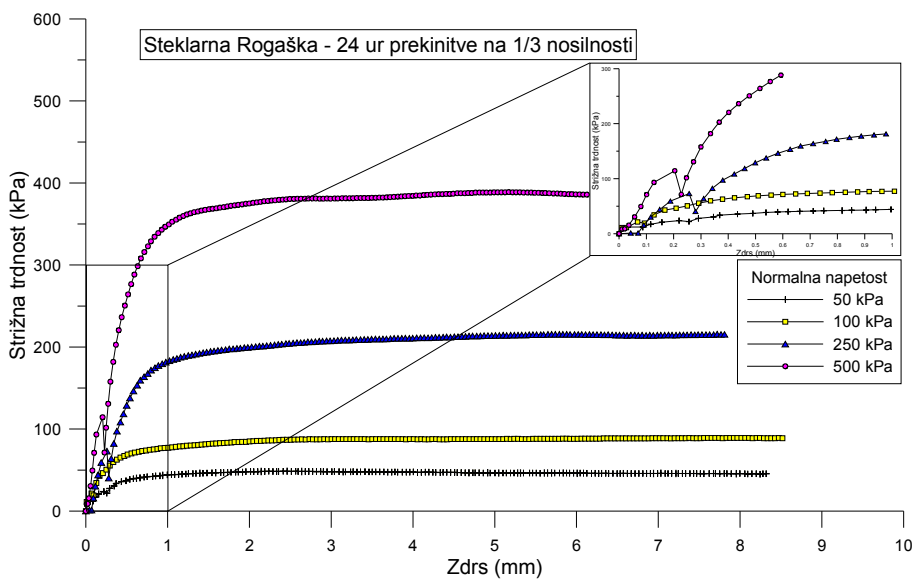
Slika 4.18: Rezultat preiskave direktnega striga, prekinjenega na 1/3 vrednosti strižne trdnosti, na energetske sadri TET pri 4 različnih normalnih obremenitvah

Figure 4.18: Shear stress/displacement curves as result of direct shear tests which have been stopped at value of 1/3 shear strength and carried on after 24 hours - FGD gypsum TET



Slika 4.19: Rezultat preiskave direktnega striga, prekinjenega na 1/3 vrednosti strižne trdnosti, na titanovi sadri CC pri 4 različnih normalnih obremenitvah

Figure 4.19: Shear stress/displacement curves as result of direct shear tests which have been stopped at value of 1/3 shear strength and carried on after 24 hours - titanium gypsum CC

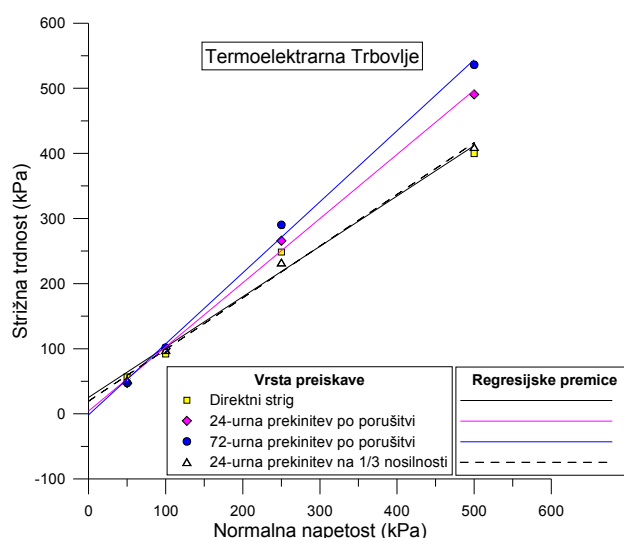


Slika 4.20: Rezultat preiskave direktnega striga, prekinjenega na 1/3 vrednosti strižne trdnosti, na steklarski sadri SR pri 4 različnih normalnih obremenitvah

Figure 4.20: Shear stress/displacement curves as result of direct shear tests which have been stopped at value of 1/3 shear strength and carried on after 24 hours - glass gypsum SR

Zanimiva je primerjava krivulj, ki predstavljajo odvisnost med normalno efektivno napetostjo in strižno trdnostjo, za različne preiskave. Na sliki (Slika 4.21) so poleg preiskave direktnega striga pri štirih različnih normalnih obremenitvah prikazani še rezultati preiskav s prekinitvijo

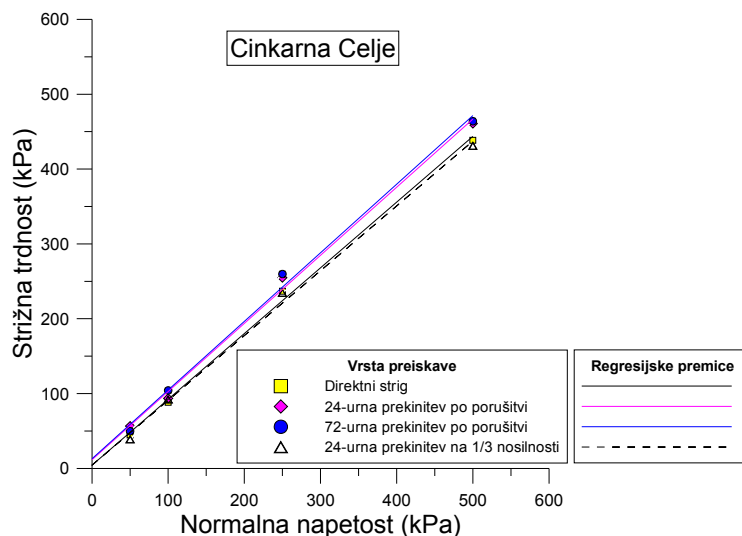
striga po poružitvi za 24 ur in za 72 ur ter s 24-urno prekinitvijo na 1/3 strižne trdnosti za energetsko sadro TET. Z grafa je razvidno, da pri manjših normalnih obremenitvah prekinitev strižne preiskave nima pomembnega vpliva na strižno trdnost energetske sadre TET, razlike pa se pokažejo pri efektivnih normalnih napetostih med 250 in 500 kPa. Pri teh vrednostih normalne efektivne napetosti je bila strižna trdnost po 24-urni prekinitvi večja kot pri direktnem strigu. S podaljševanjem časa prekinitve po poružitvi se strižna trdnost energetske sadre TET še povečuje.



Slika 4.21: Primerjava rezultatov preiskav s prekinitvijo striga na energetski sadri TET

Figure 4.21: Coulomb envelopes from direct shear test and from those shear tests which have been stopped at certain value and then carried on after 24/72 hours - FGD gypsum TET

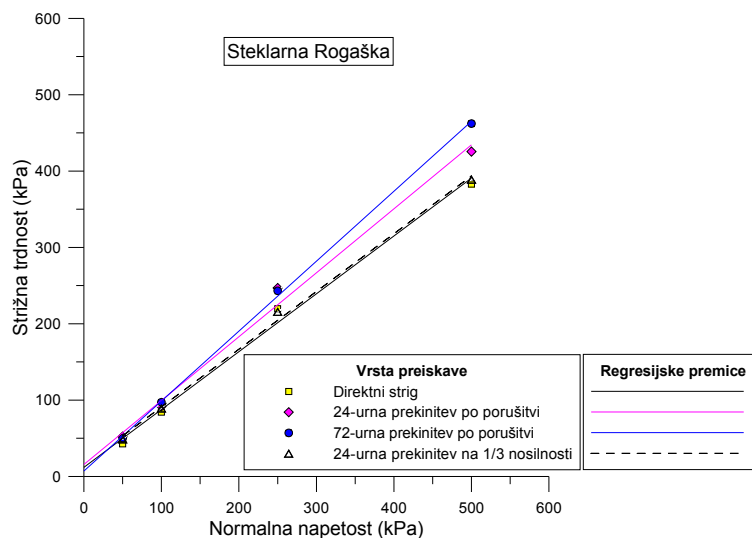
Na sliki (Slika 4.22) so poleg preiskave direktnega striga pri štirih različnih normalnih obremenitvah prikazani še rezultati preiskav s prekinitvijo striga po poružitvi za 24 ur in za 72 ur ter s 24-urno prekinitvijo na 1/3 strižne trdnosti za titanovo sadro CC. Z grafa je razvidno, da je bila strižna trdnost pri preizkusu s 24-urno prekinitvijo po poružitvi večja kot pri direktnem strigu. Rezultat 72-urne prekinitve je praktično identičen tistemu s 24-urno prekinitvijo. Mehanizem, ki vpliva na povečanje strižne trdnosti, se torej konča v približno 24-ih urah. Prekinitve striga na 1/3 strižne trdnosti (določene pri direktnem strigu na enakem materialu), ne vpliva na maksimalno strižno napetost titanove sadre CC.



Slika 4.22: Primerjava rezultatov preiskav prekinitve striga na titanovi sadri CC

Figure 4.22: Coulomb envelopes from direct shear test and from those shear tests which have been stopped at certain value and then carried on after 24/72 hours - titanium gypsum CC

Na sliki Slika 4.23 so poleg preiskave direktnega striga pri štirih različnih normalnih obremenitvah prikazani še rezultati preiskav s prekinitvijo striga po porušitvi za 24 ur in za 72 ur ter s 24-urno prekinitvijo na 1/3 strižne trdnosti za steklarsko sadro SR. Z grafa je razvidno, da je bila strižna trdnost pri preizkusu s 24-urno prekinitvijo po porušitvi večja kot pri direktnem strigu, kar se odraža predvsem pri večjih efektivnih normalnih napetostih. Rezultat 72-urne prekinitve je podoben tistemu s 24-urno prekinitvijo, le da se v primerjavi z njim še poveča strižna trdnost pri efektivni normalni napetosti 500 kPa. Prekinitev striga na 1/3 strižne trdnosti (določene pri direktnem strigu na enakem materialu), ne vpliva na maksimalno strižno napetost steklarske sadre SR.



Slika 4.23: Primerjava rezultatov preiskav prekinitve striga na steklarski sadri SR

Figure 4.23: Coulomb envelopes from direct shear test and from those shear tests which have been stopped at certain value and then carried on after 24/72 hours - glass gypsum SR

Iz prikazanih rezultatov lahko zaključimo, da je pri vseh treh vrstah sadre opazen trend povečane strižne trdnosti po mirovanju. V prilogi C so podane vrednosti maksimalne strižne napetosti pri direktnem strigu in pri preizkusih s prekinitvijo striga na vseh treh preiskovanih sadrah. Spemembe maksimalne strižne napetosti so med drugim odvisne tudi od efektivne normalne napetosti, učinek je namreč večji pri večjih vrednostih. Če primerjamo rezultate preizkusov na vseh treh sadrah pri normalni napetosti 500 kPa, lahko zaključimo, da se najbolj povečajo maksimalne strižne napetosti pri energetski sadri TET. Gre za 22% povečanje strižne trdnosti pri 24-urni prekinitvi striga ter za 34 % povečanje pri 72-urni prekinitvi (povečanje se nanaša na vrednost strižne trdnosti, ki je bila določena pri standardni preiskavi direktnega striga). Sledi ji steklarska sadra SR, pri kateri se pri 24-urni prekinitvi strižna trdnost poveča za 11 %, pri 72-urni prekinitvi pa za 17 %. Pri titanovi sadri CC se pri 24-urni prekinitvi strižna trdnost poveča za 5 %, pri 72-urni prekinitvi pa za 6 %. Zanimivo je, da se pri vseh treh sadrah porušitvene krivulje pri normalni efektivni napetosti 250 kPa prelomijo, kar lahko pomeni, da je odvisnost nelinearna oz. da se efekt prirasta strižne trdnosti zmanjšuje s povečanjem normalne napetosti.

Razmerje med normalno efektivno napetostjo in strižno trdnostjo predstavlja tangens kota notranjega trenja, presečišče premice, ki jo s tem definiramo, z ordinatno osjo pa navidezno kohezijo zemljine. Posledično z večanjem maksimalnih strižnih napetosti se med mirovanjem vzorca poveča tudi kot notranjega trenja pri vseh treh obravnavanih sadrah. Navidezna kohezija pri TET se z večanjem kota notranjega trenja zmanjšuje, kar se pri primerjavi regresijskih premic kaže kot rotacija okoli točke pri vrednosti normalne napetosti 100 kPa

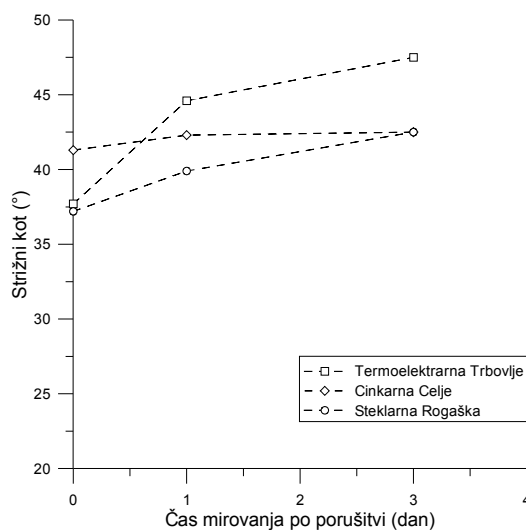
(Slika 4.21). Pri titanovi sadri CC se z večanjem kota notranjega trenja povečuje tudi navidezna kohezija, kar se na grafu (Slika 4.22) odraža v obliki translacije regresijskih premic. Regresijske premice steklarske sadre (Slika 4.23) rotirajo okoli točke na ordinatni osi. V preglednici (Preglednica 4.11) sta prikazana ta dva parametra za vse obravnavane sadre in za vse vrste preiskav, pri katerih sem preučevala vpliv prekinitve preizkusa direktnega striga na strižno trdnost.

Preglednica 4.11: Vrednosti strižnih kotov in navidezne kohezije pri različnih preiskavah na vseh treh preiskovanih sadrah

Table 4.11: Angles of shear resistance (in terms of effective stress) and apparent cohesion values from different shear tests on investigated synthetics

Vrsta preiskave	TET		CC		SR	
	φ' (°)	c' (kPa)	φ' (°)	c' (kPa)	φ' (°)	c' (kPa)
Direktni strig	37,7	25,2	41,3	4,4	37,2	11,9
24-urno mirovanje po poružitvi	44,6	4,2	42,3	11,7	39,9	15,6
72-urno mirovanje po poružitvi	47,5	-1,6	42,5	13,0	42,5	7,1
24-urno mirovanje na 1/3 nosilnosti	38,4	19,4	40,9	4,4	37,1	15,4

Na sliki (Slika 4.24) so prikazane vrednosti strižnega kota v odvisnosti od časa prekinitve striga med preiskavo, podrobnejši podatki so navedeni še v prilogi C. Gre za vrednosti strižnega kota, ki so bile določene pri direktnem strigu posamezne sadre (čas prekinitve 0), pri preiskavi s 24-urnim mirovanjem in pri preiskavi z 72-urnim mirovanjem po poružitvi. Tako iz preglednice (Preglednica 4.11) kot iz grafa (Slika 4.24) je razvidno, da ima mirovanje najmanjši učinek na strižni kot pri titanovi sadri CC. Povečanje strižnega kota titanove CC sadre (glede na vrednost, določeno pri standardni preiskavi direktnega striga) pri 24-urnem mirovanju je 2,4 %, pri 72-urni prekinitvi pa 2,9 %. Predvsem pa je videti, da se proces, ki vpliva na povečanje strižne trdnosti, pri titanovi sadri CC hitro konča, saj ni razlike med časom mirovanja 24 in 72 ur. Torej lahko sklepamo, da proces, ki vpliva na povečanje strižne trdnosti pri titanovi sadri CC, poteče v prvih 24-urah po prekinitvi striga. Pri energetski TET in steklarski SR sadri je vpliv mirovanja vzorca med strižno preiskavo na strižno trdnost večji kot pri titanovi sadri CC in se s trajanjem še povečuje. Tako se pri energetski sadri TET strižni kot pri 24-urnem mirovanju po poružitvi poveča za 18,3 %, pri 72-urnem mirovanju pa za 26,0 %. Pri steklarski sadri gre za 7,3 % povečanje pri 24-urnem in 14,2 % povečanje strižne trdnosti pri 72-urnem mirovanju. Pri energetski sadri TET in steklarski sadri SR poleg povečanja strižnega kota z daljšanjem časa mirovanja opazimo tudi, da se hitrost spremembe s časom zmanjšuje.



Slika 4.24: Odvisnost strižnega kota od časa mirovanja med preiskavo za energetsko TET, titanovo CC in steklarsko SR sadro

Figure 4.24: Angle of shear resistance/resting time after failure curves for FGD gypsum TET, titanium gypsum CC and glass gypsum SR

Pred nadaljevanjem je prav, da se vprašamo, kaj so možni vzroki za povečanje strižne trdnosti med mirovanjem vzorcev kemičnih sader. Eden od možnih vzrokov je tiksotropija, torej med strigom na strižni ploskvi pride do poružitve strukture, med mirovanjem pa se zaradi težnje sistema k ravnovesni legi zrna prerazporedijo v bolj stabilno in posledično bolj togo strukturo, kar pogojuje večje strižne trdnosti. Glede na počasno konsolidacijo in predvsem dolgotrajno sekundarno konsolidacijo kemičnih sader je možno tudi, da se material konsolidira tudi še med strigom in v času mirovanja in je torej povečana strižna trdnost po prekinitvi rezultat dodatne konsolidacije v času mirovanja. Imamo torej dva različna procesa, ki lahko pripeljeta do enakega učinka. Možna je seveda tudi kombinacija obeh, glede na to, da se lahko oba procesa odvijata istočasno. Eden od vzrokov je lahko tudi prehitro striženje in ustvarjanje presežnega pornege tlaka med strigom. Pri nadaljevanju svojega raziskovalnega dela sem se osredotočila na procesa konsolidacije in tiksotropije. Moj cilj je bil, da s poskusi dokazem oziroma ločim njun vpliv na strižno trdnost. Preverila pa sem tudi ponovljivost in vpliv vrste preiskav.

4.6.3 Rezultati preverjanja vpliva konsolidacije na strižno trdnost

V luči navedb iz prejšnjega poglavja o konsolidaciji kot o enem od možnih dejavnikov na povečanje strižne trdnosti je bilo potrebno pogledati, kakšni so bili posedki oz. spremembe količnika por med konsolidacijo pred strigom in kakšne so bile vertikalne deformacije med preiskavami direktnega striga, ki sem jih izvajala na treh sadrah. V ta namen sem med drugim izvedla tudi serijo preiskav s kontrolirano dolžino konsolidacije. Postopek teh preiskav je opisan v poglavju 3.8.5. V prilogi E so podane vrednosti maksimalnih strižnih napetosti pri preiskavah z različnimi dolžinami konsolidacij na treh obravnavanih sadrah. Pri preučevanju vpliva konsolidacije na strižno trdnost sem sicer uporabila rezultate vseh preiskav.

V nadaljevanju najprej podajam analizo posedkov med konsolidacijo za vse preiskovane sadre, nato še analizo vertikalnih deformacij med različnimi strižnimi preiskavami. Sledijo še grafi, ki prikazujejo odvisnost strižne trdnosti preiskovanih sader od količnika por.

V preglednici (Preglednica 4.12) so navedene vrednosti vertikalne deformacije med konsolidacijo, ki je bila izvedena pred strižnimi preiskavami, ki sem jih izvajala na vzorcih vseh treh sader. Negativna vrednost vertikalne deformacije pomeni, da gre za posedke. Za vsako vrsto sadre in vsako uporabljeno velikost normalne obtežbe je izračunana še povprečna vrednost posedkov: najprej povprečje za vse izvedene preiskave, nato samo za preiskave, pri katerih sem testirala vpliv dolžine konsolidacije pred strigom. Ta druga vrednost je bolj relevantna za primerjavo posedkov različnih vrst kemične sadre. Upoštevati je potrebno tudi dejstvo, da je bila vsaka od treh vrst sader vgrajena pri drugačni vlagi, poleg tega se je razlikovala tudi suha gostota, saj sem pri vgradnji težila k temu, da sem se približala maksimalni suhi gostoti, ki pa se za različne vrste kemičnih sader nekoliko razlikuje (glej poglavje 3.8.2). Vzorci titanove CC in steklarske SR sadre so bili vgrajeni pri podobni vlagi in suhi gostoti, vzorci energetske sadre TET pa v primerjavi z njima pri manjši vlagi in večji suhi gostoti.

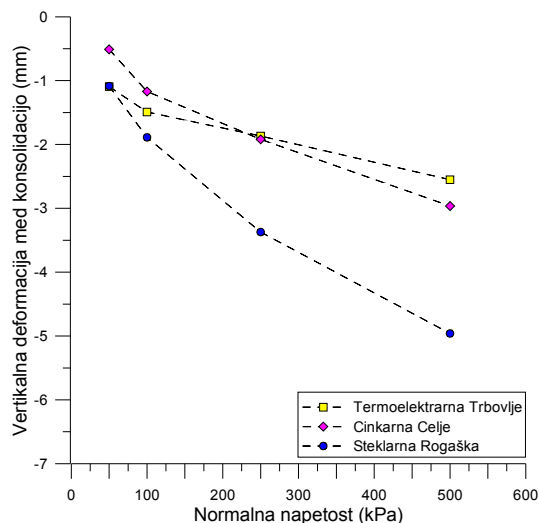
Preglednica 4.12: Vrednosti posedkov med konsolidacijo pred strižnimi preiskavami za vse vrste preiskovanih sadre

Table 4.12: Settlements during consolidation of investigated synthetic gypsums

Vrsta sadre	Oznaka vzorca	Vrsta preiskave	Vertikalna deformacija med konsolidacijo (mm)				
			Normalna obremenitev (kPa)				
			50	100	250	500	
Energetska TET	S-VZ1-13	Direktni strig	-1,328	-1,506	-1,625	-2,765	
	S-VZ1-11	Prekinitiv striga po poružitvi za 24 ur	-0,970	-1,653	/	-2,082	
	S-VZ1-12	Prekinitiv striga po poružitvi za 72 ur	-0,637	-1,256	-1,623	-2,119	
	S-VZ1-14	Prekinitiv striga pri 1/3 strižne trdnosti	-1,272	-1,424	-1,346	-2,685	
	S-VZ2-17	1 dan konsolidacije, direktni strig	-0,935	-1,161	-2,159	-3,054	
	S-VZ1-16	3 dni konsolidacije, direktni strig	-1,032	-1,683	-2,152	-2,379	
	S-VZ2-18	5 dni konsolidacije, direktni strig	-1,475	-1,759	-2,300	-2,775	
	<i>Povprečje posedkov med konsolidacijo pri vseh preiskavah</i>			-1,093	-1,492	-1,868	-2,551
	<i>Povprečje posedkov med konsolidacijo pri preiskavah z določeno dolžino konsolidacije</i>			-1,147	-1,534	-2,204	-2,736
Titanova CC	S-VZ3-7	Direktni strig	-0,246 (?)	-1,130	-1,716	-2,927	
	S-VZ3-4	Prekinitiv striga po poružitvi za 24 ur	-0,463	-1,020	-1,789	-3,029	
	S-VZ3-6	Prekinitiv striga po poružitvi za 72 ur	-0,355	-1,213	-2,049	-2,750	
	S-VZ3-5	Prekinitiv striga pri 1/3 strižne trdnosti	/	/	/	-2,591	
	S-VZ3-11	1 dan konsolidacije, direktni strig	-0,562	-1,199	-2,017	-2,533	
	S-VZ3-10	3 dni konsolidacije, direktni strig	-0,517	-0,980	-1,860	-3,069	
	S-VZ3-12	5 dni konsolidacije, direktni strig	-0,923	-1,481	-2,089	-3,848	
	<i>Povprečje posedkov med konsolidacijo pri vseh preiskavah</i>			-0,511	-1,171	-1,920	-2,964
	<i>Povprečje posedkov med konsolidacijo pri preiskavah z določeno dolžino konsolidacije</i>			-0,667	-1,220	-1,989	-3,150
Steklarska SR	S-VZ4-2	Direktni strig	-0,407	-1,141	-1,920	-3,956	
	S-VZ4-1	Prekinitiv striga po poružitvi za 24 ur	-0,658	-1,393	-2,864	-4,423	
	S-VZ4-3	Prekinitiv striga po poružitvi za 72 ur	-0,838	-1,115 (?)	-3,452	-4,983	
	S-VZ4-4	Prekinitiv striga pri 1/3 strižne trdnosti	-1,004	-1,937	-3,306	-4,908	
	S-VZ4-9	1 dan konsolidacije, direktni strig	-1,501	-3,081	-3,867 (?)	-5,260	
	S-VZ4-8	3 dni konsolidacije, direktni strig	-1,430	-2,257	-3,864	-5,416	
	S-VZ4-10	5 dni konsolidacije, direktni strig	-1,764	-2,293	-4,327	-5,776	
	<i>Povprečje posedkov med konsolidacijo pri vseh preiskavah</i>			-1,086	-1,888	-3,371	-4,960
	<i>Povprečje posedkov med konsolidacijo pri preiskavah z določeno dolžino konsolidacije</i>			-1,565	-2,544	-4,019	-5,484

Opomba: Z oznako (?) so označene vrednosti, ki zaradi težav s senzorji niso popolnoma zanesljive. Oznaka (/) pomeni, da zaradi težav s senzorji ni pridobljenih podatkov o posedku med konsolidacijo.

Na sliki (Slika 4.25) so prikazani povprečni posedki pri posamezni normalni obremenitvi za vse tri vrste sadre. Opazimo lahko, da so velikosti posedkov med konsolidacijo pri vseh normalnih obremenitvah za titanovo CC in energetska TET sadro primerljive, pri steklarski sadri SR pa so posedki precej večji. Ta rezultat je pričakovan, saj je bil količnik por pred konsolidacijo pri steklarske sadri SR večji kot pri ostalih dveh (Preglednica 4.5).



Slika 4.25: Povprečje vertikalnih deformacij med konsolidacijo preiskovanih vzorcev za vse tri vrste kemične sadre

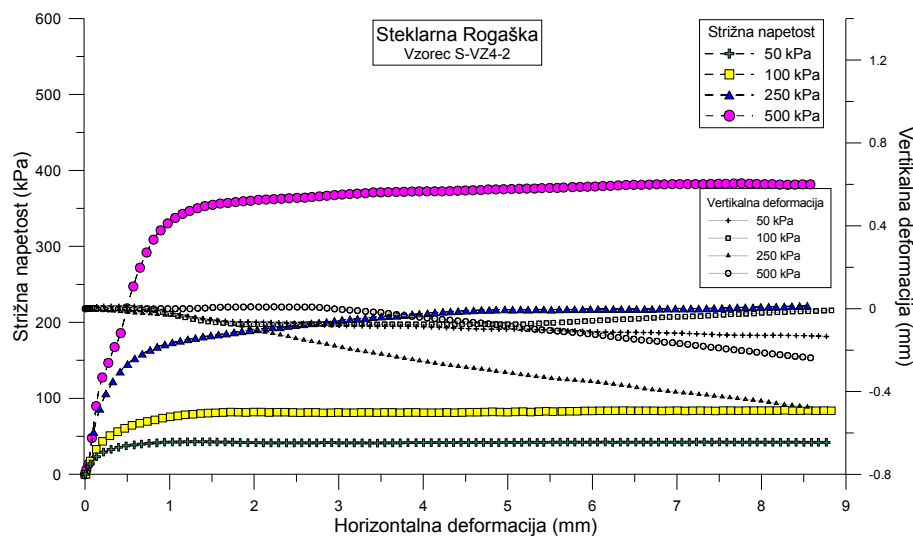
Figure 4.25: Average settlements during consolidation of investigated synthetic gypsums

Če primerjamo posedke vseh treh sader pri normalni obremenitvi 500 kPa z ozirom na začetno višino vzorca 22,4 mm, ugotovimo, da gre pri konsolidaciji steklarske sadre SR za 22 %, pri titanovi sadri CC za 13 % in pri energetski sadri TET za 11 % vertikalno deformacijo (posedek).

Poleg posedkov med konsolidacijo so me zanimale tudi vertikalne deformacije med strižnimi preiskavami, v času mirovanja, ko sem prekinila strig in tudi pri nadaljevanju striga po prekinitvi. V nadaljevanju podajam analizo vertikalnih deformacij pri različnih poskusih in nekaj značilnih grafov. Prikazi vertikalnih deformacij in strižnih trdnosti pri vseh poskusih za vse vrste sadre so podani v prilogi D.

Direktni strig: Titanova sadra CC in steklarska sadra SR sta se med preiskavo direktnega striga posedali, posedki so znašali do 2 % glede na višino vzorca pred konsolidacijo, pri čemer ni jasnega pravila glede velikosti posedkov in velikostjo normalne obremenitve. Pri titanovi sadri CC hkrati z večanjem posedkov opazujemo tudi rast strižne napetosti, kar pa ne velja za steklarsko sadro SR (Slika 4.26), pri kateri je kljub večanju posedkov vrednost strižne trdnosti ostajala konstantna. Pri energetski sadri TET je na splošno pri manjših normalnih obremenitvah (50 in 100 kPa) med direktnim strigom prišlo do posedkov, ki so bili manjši od 0,5 % glede na višino vzorca pred konsolidacijo, pri večjih normalnih (250 in 500 kPa) obremenitvah pa je prišlo do dvižkov (do 0.6 %). Če natančneje pogledamo krivuljo strižnih napetosti pri normalni obremenitvi 500 kPa in jo primerjamo s krivuljo vertikalnih deformacij, lahko opazimo, da je pri horizontalni deformaciji med 2 in 5 mm prišlo do dvižka,

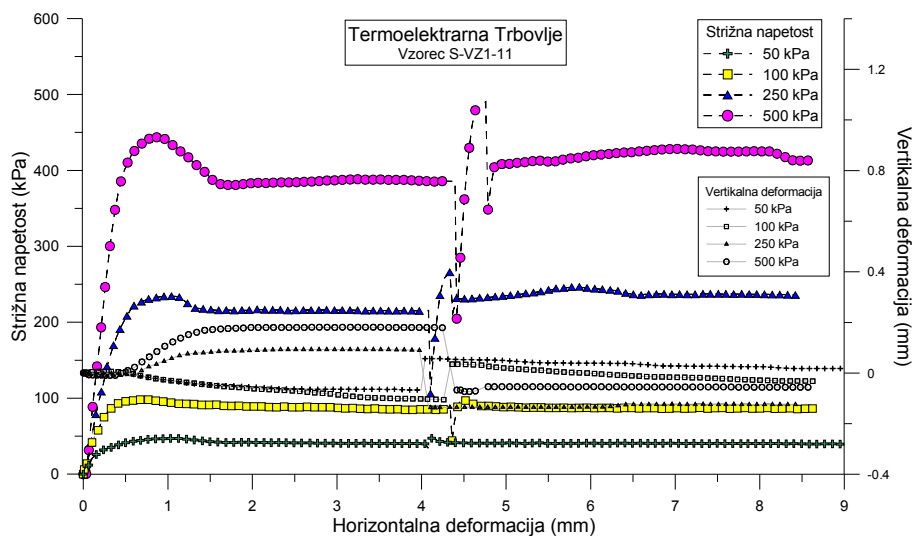
hkrati pa se je po začetnem maksimumu nekoliko zmanjšala strižna napetost. Po 5 mm horizontalne deformacije pa je opazen posedek in hkrati povečanje strižne napetosti.



Slika 4.26: Strižna napetost in vertikalne deformacije pri direktnem strigu steklarske sadre SR

Figure 4.26: Shear stress and vertical strain curves from direct shear tests on glass gypsum SR

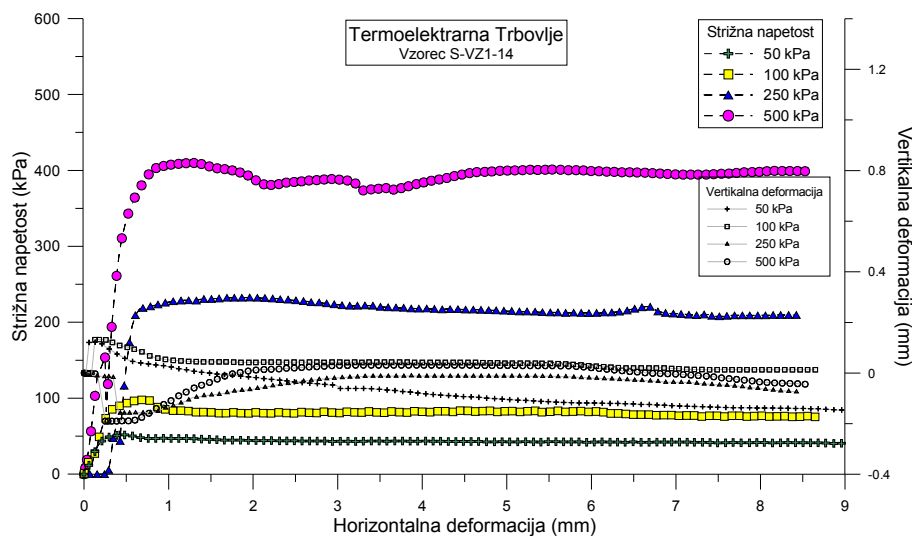
Prekinitev striga po porušitvi za 24 in 72 ur: Zanimivo je pogledati, kako so se vzorci vertikalno deformirali v času mirovanja striga in pri nadaljevanju preizkusa. Pri vzorcih energetske sadre TET (Slika 4.27) je opazna izrazita razlika med vzorci, ki so bili obremenjeni z manjšimi normalnimi obremenitvami (50 kPa in 100 kPa) in tistimi, ki so bili obremenjeni z večjimi normalnimi obremenitvami, že v času pred prekinitvijo. Pri višjih normalnih obremenitvah je pri striženju opaziti najprej dvižke (do 1 %), med mirovanjem pa so se vzorci občutno posedli (do 1,3 %) in pri nadaljevanju zopet nekoliko narasli (do 0,4 %). Pri manjših obremenitvah je situacija ravno obratna: posedanje pred porušitvijo, občuten dvižek med mirovanjem in vnovično posedanje pri nadaljevanju striga. Pri titanovi sadri CC so se načeloma vzorci do porušitve posedali (do 0,9 %), med mirovanjem je prišlo do dvižkov (do 2,2 %), pri nadaljevanju striga pa spet do manjših posedkov (do 0,9 %). Odstopanja od tega trenda je deloma opaziti pri večjih normalnih obremenitvah. Pri steklarski sadri SR so se vzorci v času striženja do prekinitve načeloma posedali (do 0,5 %). V času mirovanja je prišlo do dvižkov (do 1,8 %) pri manjših normalnih obremenitvah in do posedanja (do 1,7 %) pri večjih normalnih obremenitvah. Pri nadaljevanju poskusa so vzorci stagnirali ali pa so se rahlo posedali.



Slika 4.27: Strižna napetost in vertikalne deformacije pri poskusu s 24-urno prekinitvijo striga energetske sadre TET

Figure 4.27: Shear stress and vertical strain curves from direct shear test with 24-hours resting time on FGD gypsum TET

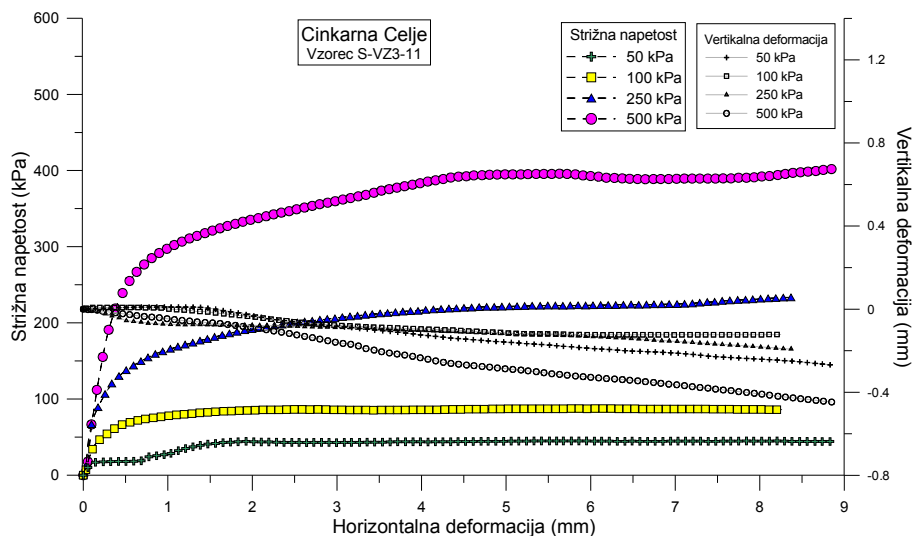
Prekinitev striga za 24 ur na 1/3 nosilnosti: Pri energetske sadri TET (Slika 4.28) je med prekinitvijo striga (potem ko je bila dosežena 1/3 nosilnosti) pri vzorcih z manjšo normalno obremenitvijo prišlo do dvižkov (do 0,7 %), pri vzorcih z večjo normalno obremenitvijo pa do posedkov (do 0,9 %). Pri nadaljevanju preiskav se je trend obrnil, tako da so se do konca preiskave vertikalne deformacije skorajda izenačile in izničile. Izjema je le vzorec pri najmanjši normalni obremenitvi (50 kPa), kjer je bil posedek nekoliko večji, kot pri ostalih vzorcih. Pri titanovi sadri CC je med mirovanjem prišlo do dvižkov vzorcev (do 0,7 %) pri vseh normalnih obremenitvah, razen pri največji (500 kPa). Pri nadaljevanju striga so se vzorci generalno posedali (do 1,6 %). Pri steklarski sadri SR so se vzorci (z izjemo tistih pri normalni obremenitvi 100 kPa) v času mirovanja posedali (do 0,9 %), pri nadaljevanju preiskave pa so stagnirali ali pa se še nadalje posedali (do 1,8 %). Pri nobeni od sader ni opaziti, da bi spreminjanje vertikalnih deformacij bistveno vplivalo na velikost strižnih napetosti.



Slika 4.28: Strižna napetost in vertikalne deformacije pri poskusu s 24-urno prekinitvijo striga na 1/3 strižne trdnosti na energetski sadri TET

Figure 4.28: Shear stress and vertical strain curves from direct shear test with 24-hours resting time on 1/3 of shear strength on FGD gypsum TET

Spreminjanje časa konsolidacije pred direktnim strigom: Vzorci energetske sadre TET so se pri direktnem strigu pretežno posedali, večji posedki (do 1,6 %) so opazni pri vzorcih, ki so se predhodno dlje časa konsolidirali (kar je nekoliko nepričakovano), izjema so posamezni vzorci, pri večjih obremenitvah (250 in 500 kPa), kjer so bili med direktnim strigom izmerjeni tudi dvižki (do 0,6 %). Vzorci titanove sadre CC (Slika 4.29) so se pri direktnem strigu posedali (do 2 %), ne glede na to, koliko dni so se pred tem konsolidirali. Izjema so le posamezni vzorci pri manjših obremenitvah. Hkrati z večanjem posedkov se je večala tudi vrednost strižne napetosti, ki je rahlo narašča do konca preiskave. Pri steklarski sadri SR je ugotovljeno, da med strigom načeloma ne prihaja do večjih vertikalnih deformacij, edino pri največji normalni obremenitvi (500 kPa) je posedek večji in presega 3 % vertikalne deformacije glede na višino vzorca pred konsolidacijo. Pri vzorcih, ki so se konsolidirali najdlje (5 dni), je posedek pri normalni obremenitvi 500 kPa najmanjši, pri normalni obremenitvi 250 kPa pa pride celo do dvižka, kar se pri ostalih vzorcih, kjer sem spreminjala čas konsolidacije, ni pojavljalo. Strižna napetost pri steklarski sadri SR se po približno 4 mm horizontalne deformacije ne spreminja več - ne glede na vertikalne deformacije.



Slika 4.29: Strižna napetost in vertikalne deformacije pri poskusu direktnega striga po 1 dnevu konsolidacije na titanovi sadri CC

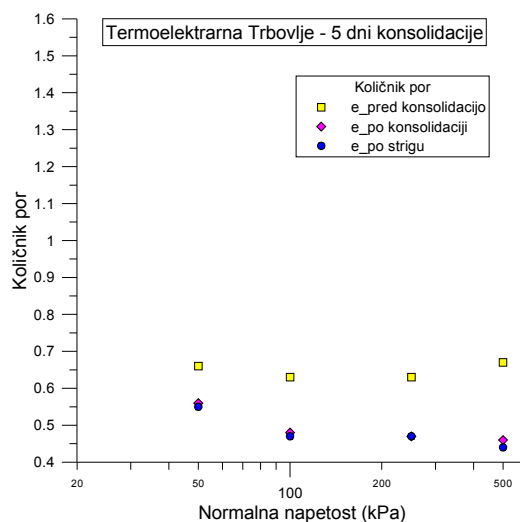
Figure 4.29: Shear stress and vertical strain curves from direct shear test with consolidation lasting one day on titanium gypsum CC

Na podlagi poskusov s prekinitvijo striženja lahko ugotovimo, da se večina vzorcev med mirovanjem ni dodatno konsolidirala, ampak je prihajalo v pretežni meri do dvižkov, torej povečanja strižnih trdnosti ne moremo razlagati (samo) s konsolidacijo. Kar se tiče vertikalnih deformacij med izvedenimi preiskavami, se postavlja vprašanja o vzroku za dvižke. Še vedno pa tudi ostaja odprto vprašanje, kaj je vzrok za povečanje strižne trdnosti. Odgovor na obe vprašanji bi morda lahko bila rekristalizacija ali prerazporejanje zrn, kar je lahko rezultat tiksotropije.

Količnik por je direktno povezan z vertikalno deformacijo. Pri vsaki opravljeni preiskavi sem določila oz. izračunala količnik por po vgradnji (pred konsolidacijo), po konsolidaciji (pred strigom) in po strigu. Metodo določanja količnika por sem opisala v poglavju 3.4. V nadaljevanju podajam prikaz spreminjanja količnika por med preiskavo vseh treh obravnavanih sader pri poskusu s 5 dnevi konsolidacije in direktnim strigom.

Na sliki (Slika 4.30) so prikazani količniki por pri preiskavi direktnega striga energetske sadre TET, pred katero so se vzorci konsolidirali 5 dni. Rumeni kvadratici predstavljajo začetno stanje, t.j. količnike por po vgradnji za 4 vzorce, ki so bili nato obremenjeni s 4 različnimi normalnimi obremenitvami. Idealno bi bilo, da bi bili vsi kvadratici poravnani v vodoravni liniji, vendar je bilo v praksi težko doseči povsem enako začetno stanje (enak količnik por) za vse 4 vzorce. Opazimo lahko, da so spremembe količnika por med direktnim strigom zelo majhne oz. zanemarljive v primerjavi s tistimi v času konsolidacije. Če primerjamo spremembe

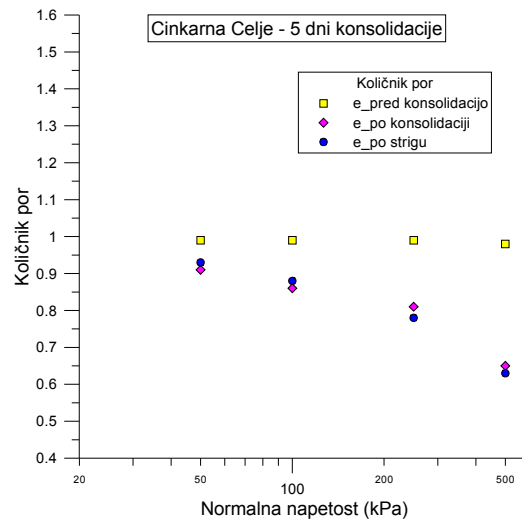
količnika por pri normalni obremenitvi 500 kPa pri vseh treh sadrah, ugotovimo sledeče: med konsolidacijo energetske TET sadre se količnik por zmanjša za 31 % (glede na njegovo vrednost pred konsolidacijo), med strigom pa še za dodatne 3 %. Pri titanovi CC sadri se med konsolidacijo količnik por zmanjša za 34 %, med strigom pa še za dodatna 2 %. Pri steklarski sadri SR je zmanjšanje količnikov por nekoliko večje in sicer 4 % med konsolidacijo in nato še 2 % med strigom.



Slika 4.30: Spremembe količnika por med konsolidacijo in direktnim strigom pri energetski sadri TET

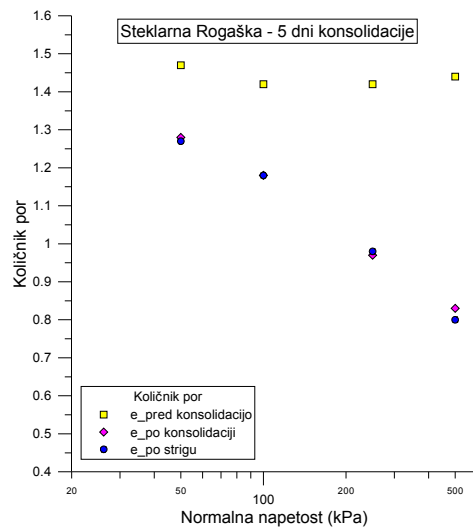
Figure 4.30: Void ratio changes during consolidation and direct shear tests on FGD gypsum TET

Na sliki (Slika 4.31) so prikazani količniki por pri preiskavi direktnega striga titanove sadre CC, na sliki (Slika 4.32) pa še za steklarsko sadro SR. Pri primerjavi vseh treh vrst preiskovanih sader lahko opazimo, da je bil količnik por za strižno preiskavo vgrajenih vzorcev največji pri steklarski sadri SR, najmanjši pa pri energetski TET. Logična posledica tega je, da so bili posedki po 5 dnevih konsolidacije največji pri steklarski sadri SR. Količniki por po konsolidaciji in po končani strižni preiskavi so najmanjši pri energetski sadri TET in največji pri steklarski SR, kar izhaja iz narave materiala. Pri vseh treh vrstah sadre posedki naraščajo z velikostjo normalne obremenitve, vendar je pri energetski sadri TET ta trend najmanj izrazit, kar je pričakovano, saj je ta sadra pri vgradnji dosegala največjo suho gostoto. Prav tako so pri vseh obravnavanih sadrah posedki med konsolidacijo precej večji, kot so vertikalne deformacije med strižno preiskavo, med katero sicer prihaja tudi do dvižkov.



Slika 4.31: Spremembe količnika por med konsolidacijo in direktnim strigom pri titanovi sadri CC

Figure 4.31: Void ratio changes during consolidation and direct shear tests on titanium gypsum CC



Slika 4.32: Spremembe količnika por med konsolidacijo in direktnim strigom pri steklarski sadri SR

Figure 4.32: Void ratio changes during consolidation and direct shear tests on glass gypsum SR

Podatki o količnikih por in strižni napetostih pri različnih preiskavah vseh treh vrst sader so ključni za interpretacijo mojega raziskovalnega dela. Zaradi tega so na različne načine obdelani in prikazani na grafih. Vsi prikazi so podani v prilogi F, v nadaljevanju pa podajam samo najbolj značilne prikaze obnašanja obravnavanih sader. Za prikaze sem uporabila vrednost količnika por po konsolidaciji. Predhodno sem že pokazala, da tudi med strigom

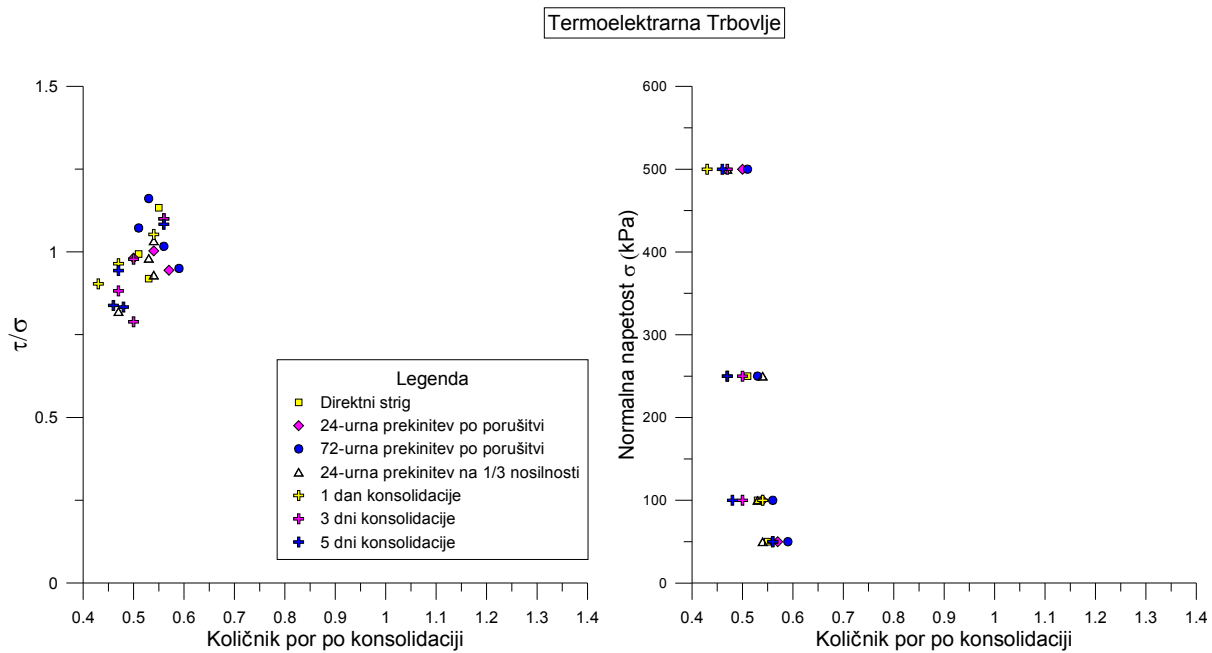
prihaja do vertikalnih deformacij vzorca in s tem do sprememb količnika por. Vendar so te spremembe majhne v primerjavi s tistimi, ki se dogajajo med konsolidacijo, zato lahko količnik por po konsolidaciji v grobem smatramo za tistega, pri katerem je bil vzorec prestrižen.

Na slikah spodaj (Slika 4.33, Slika 4.34 in Slika 4.35) je prikaz razmerja strižne in normalne napetosti v odvisnosti od količnika por pri strižnih preizkusih, ki sem jih izvajala na vseh treh kemičnih sadrah. Razmerje τ/σ predstavlja mero za strižno trdnost, s katero lahko normiramo vrednost strižne trdnosti pri različnih vrednostih normalne napetosti. Strižne preizkuse sem vedno izvajala pri 4 različnih normalnih napetostih, torej 4 točke enake barve na omenjenih grafih predstavljajo en strižni preizkus.

Na sliki (Slika 4.33) je prikazano razmerje τ/σ v odvisnosti od količnika por za energetsko sadro TET. Količniki por so skoncentrirani okrog vrednosti 0,4 - 0,6, največje vrednosti strižnih trdnosti pa so bile dosežene pri poskusih s 72-urno prekinitvijo, pri čemer so bili količniki por večji od 0,5. Pri energetski sadri TET sicer ni jasnega trenda o vplivu količnika por na strižno trdnost.

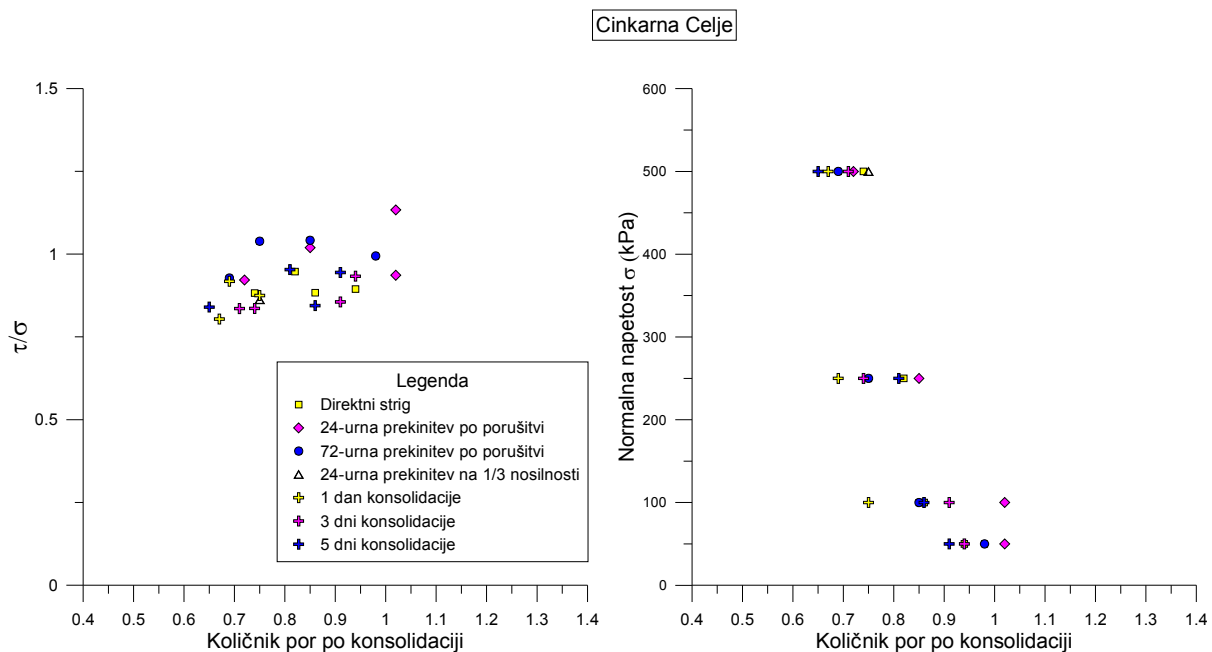
Na sliki (Slika 4.34) je prikazano razmerje τ/σ v odvisnosti od količnika por pri direktnem strigu ter pri poskusih s prekinitvijo striga na titanovi sadri CC. Rezultati kažejo, da vzorci titanove sadre CC po 72 in 24-urni prekinitvi dosegajo višje strižne trdnosti, kot pri direktnem strigu, oz. pri prekinitvi striga delno porušenega vzorca. Videti je, da količnik por pri tem ne igra bistvene vloge. Zanimivo je, da so količniki por po dolgotrajnejši konsolidaciji večji v primerjavo z bolj kratkotrajno. Količniki por so večji kot pri energetski sadri TET, prav tako je večji razpon vrednosti, ki znašajo od 0,6 do 1,1.

Na sliki (Slika 4.35) je prikazano razmerje τ/σ v odvisnosti od količnika por pri poskusih na steklarski sadri SR. Slika je podobna kot pri titanovi sadri CC, le da je razpon količnikov por večji, znaša od 0,6 do 1,3. Strižna trdnost je večja po mirovanju porušenih vzorcev, dolžina konsolidacije in količnik por pa ne vplivata bistveno na strižno trdnost.



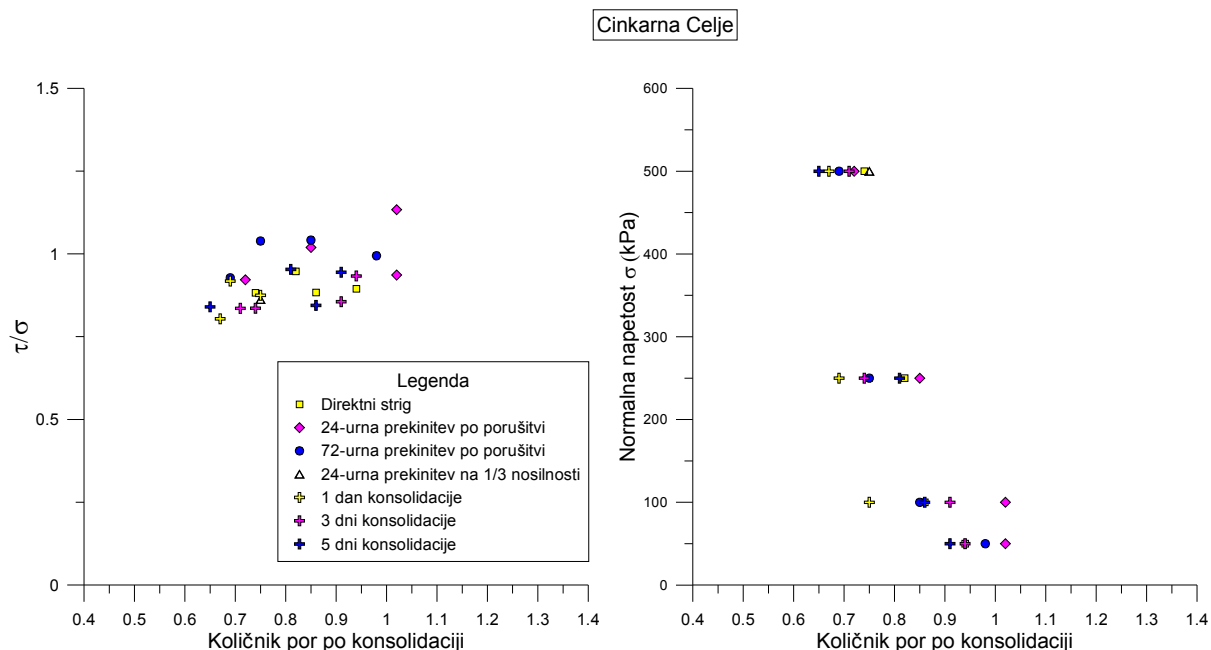
Slika 4.33: Razmerje τ/σ in σ v odvisnosti od količnika por in pri strižnih preizkusih na energetski sadri TET

Figure 4.33: τ/σ ratio and σ against void ratio from direct shear tests on FGD gypsum TET



Slika 4.34: Razmerje τ/σ in σ v odvisnosti od količnika por in pri strižnih preizkusih na titanski sadri CC

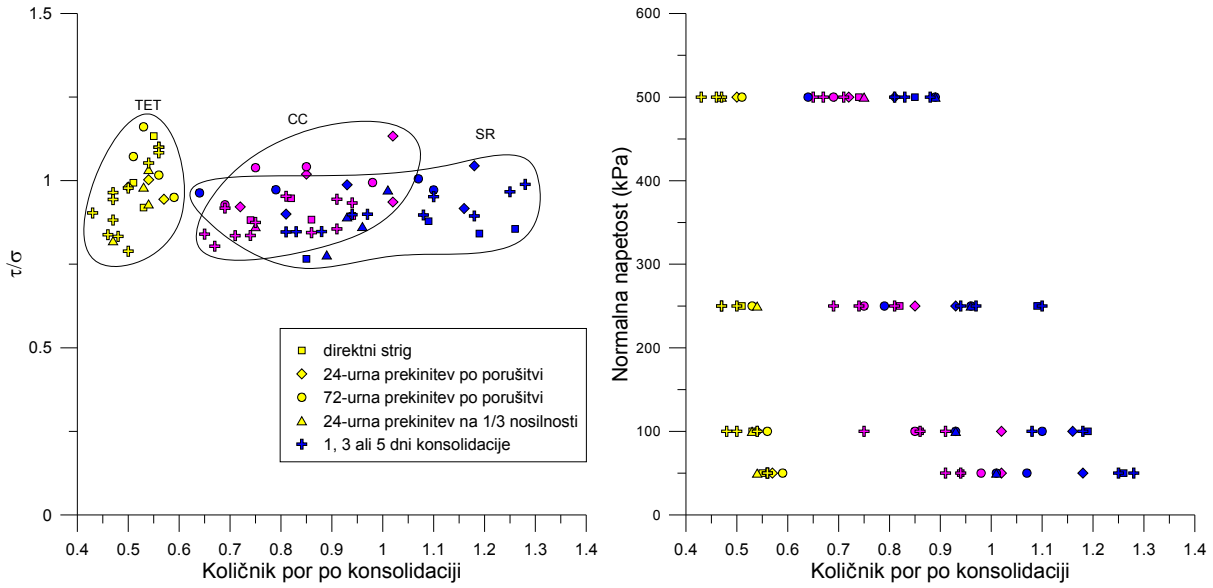
Figure 4.34: τ/σ ratio and σ against void ratio from direct shear tests on titanium gypsum CC



Slika 4.35: Razmerje τ/σ in σ v odvisnosti od količnika por in pri strižnih preizkusih na steklarski sadri SR

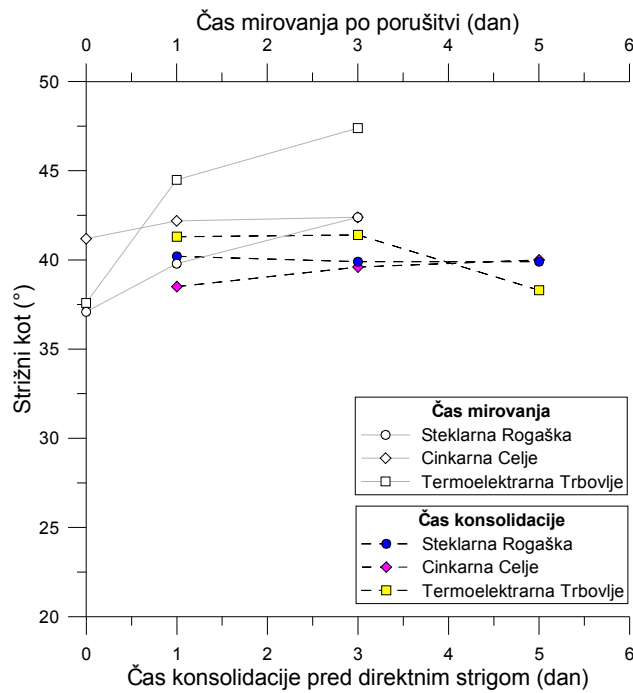
Figure 4.35: τ/σ ratio and σ against void ratio from direct shear tests on glass gypsum SR

Sledi primerjava razmerja τ/σ in normalne napetosti v odvisnosti od količnika por za vse tri obravnavane sadre (Slika 4.36). Primerjamo lahko razpon in raztros vrednosti strižne trdnosti in količnikov por vseh treh obravnavanih kemičnih sader. Vzorci energetske sadre TET so dosegali najmanjše količnike por, tudi njihov razpon je bil najmanjši, vrednosti in razpon strižne trdnosti pa največji. Povprečje strižne trdnosti pri titanovi sadri CC je nekoliko večje kot pri steklarski SR, količniki por pa nekoliko manjši. Na sliki (Slika 4.37) je prikaz strižnih kotov vseh treh vrst obravnavanih sader v odvisnosti od časa konsolidacije pred strižnim preizkusom oziroma od časa mirovanja po poružitvi ter pred nadaljevanjem poskusa. Sledi prikaz razmerja τ/σ za vse tri vrste sader glede na čas konsolidacije oziroma mirovanja.



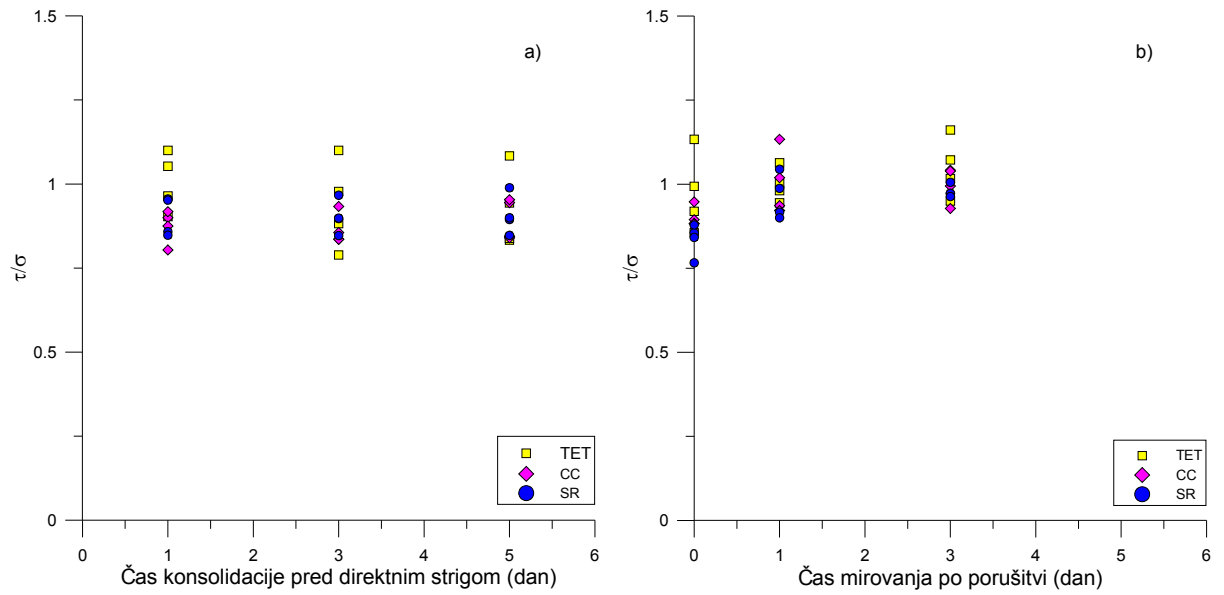
Slika 4.36: Razmerje τ/σ v odvisnosti od količnika por pri poskusih na vseh treh sadrah

Figure 4.36: τ/σ ratio against void ratio from direct shear tests on all three investigated gypsums



Slika 4.37: Primerjava sprememb strižnih kotov za vse tri obravnavane sadre

Figure 4.37: Angles of shear resistance for all investigated gypsums



Slika 4.38: Primerjava razmerja τ/σ vseh treh sadre glede na: a) čas konsolidacije pred direktnim strigom in b) čas mirovanja po poružitvi

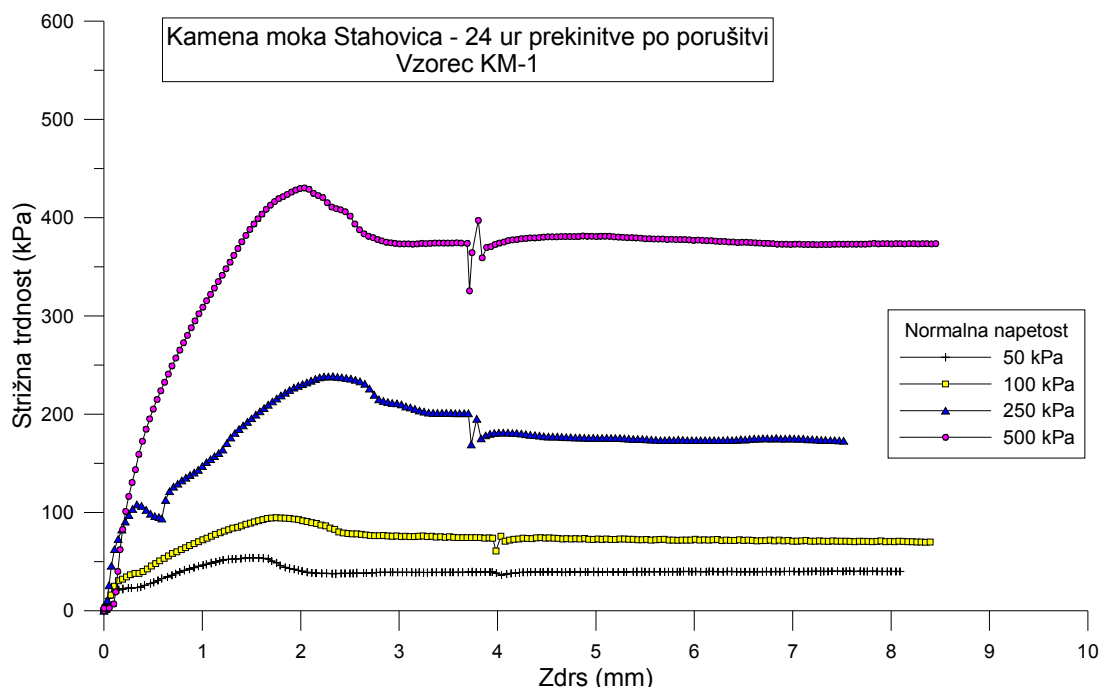
Figure 4.38: τ/σ ratio for all investigated gypsums against: a) consolidation time before direct shear test and b) after failure resting time

4.7 Rezultati preverjanja primerljivosti in ponovljivosti preiskav

4.7.1 Rezultati preverjanja v teku preiskav

V tem poglavju podajam rezultate preiskav, opisanih v poglavju 3.9.1. Preiskave direktnega striga s 24-urno prekinitvijo po poružitvi sem izvedla na kameni moki iz Stahovice. S temi preiskavami sem želela preveriti ali rezultati, ki sem jih dobila pri strižnih preiskavah kemičnih sader, odražajo lastnost materiala ali pa gre za morda za vpliv uporabljene metode in aparata.

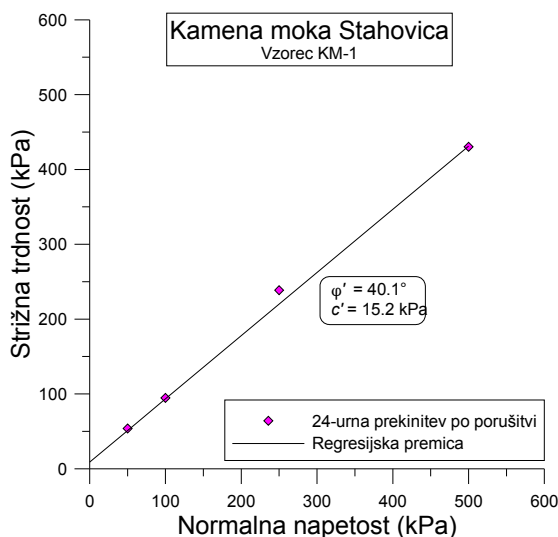
Slika 4.39 prikazuje strižno napetost kamene moke pri preiskavi s 24-urno prekinitvijo striga po poružitvi pri 4 različnih normalnih obremenitvah. Med 24-urnim mirovanjem se strižna napetost zmanjša za 8-18 %, kar so občutno manjše vrednosti, kot so bile opažene pri kemičnih sadrah. Prekinitev sicer nima pomembnega vpliva na strižno napetost pri nadaljevanju striženja. Največja sprememba se zgodi pri normalni napetosti 500 kPa, kjer se takoj po nadaljevanju striga strižna napetost poveča za 6 % glede na vrednost pred prekinitvijo, vendar je to povečanje kratkotrajno. Strižna napetost se nato ustali na vrednosti, kot je bila pred 24-urno prekinitvijo.



Slika 4.39: Rezultat preiskave direktnega striga, po poružitvi prekinjenega za 24 ur, na kameni moki Stahovica

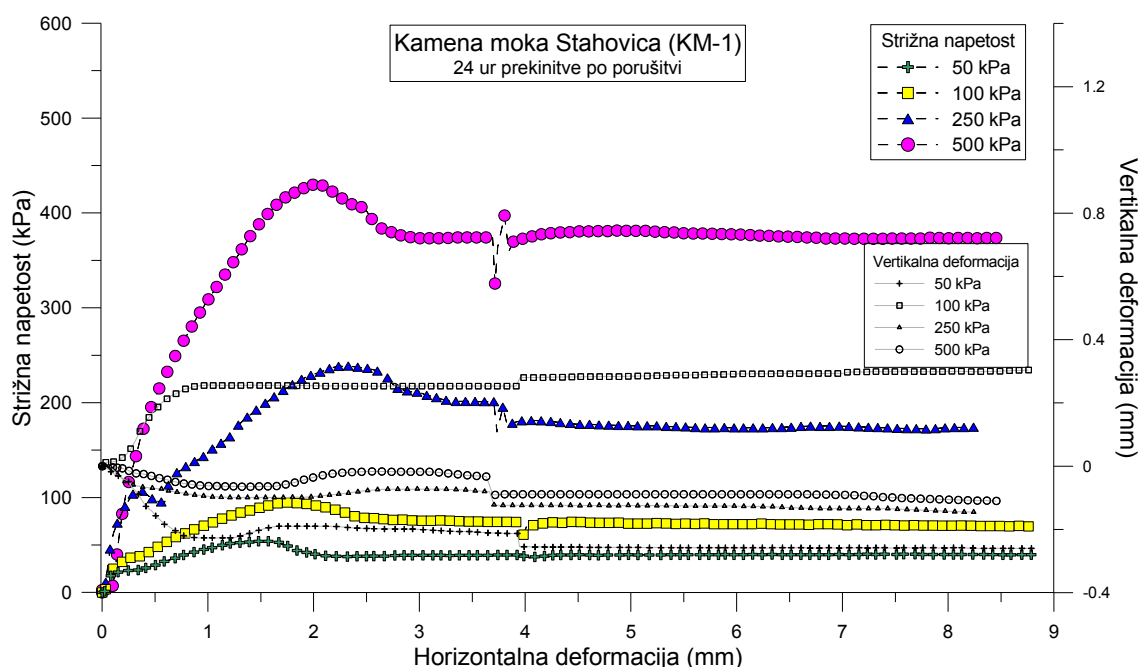
Figure 4.39: Shear stress/displacement curves as resut of direct shear tests which have been stoped after failure and carried on after 24 hours – stone powder Stahovica

Slika 4.40 prikazuje odvisnost med normalnimi efektivnimi napetostmi in strižno trdnostjo pri kameni moki Stahovica. Strižni kot kamene moke znaša $41,1^\circ$, kohezija pa 15,2 kPa.



Slika 4.40: Strižna napetost in vertikalne deformacije pri poskusu s 24-urno prekinitvijo striga na kameni moki Stahovica

Figure 4.40: Maximum shear stress related to effective normal stress for stone powder Stahovica



Slika 4.41: Strižna napetost in vertikalne deformacije pri poskusu s 24-urno prekinitvijo striga na kameni moki Stahovica

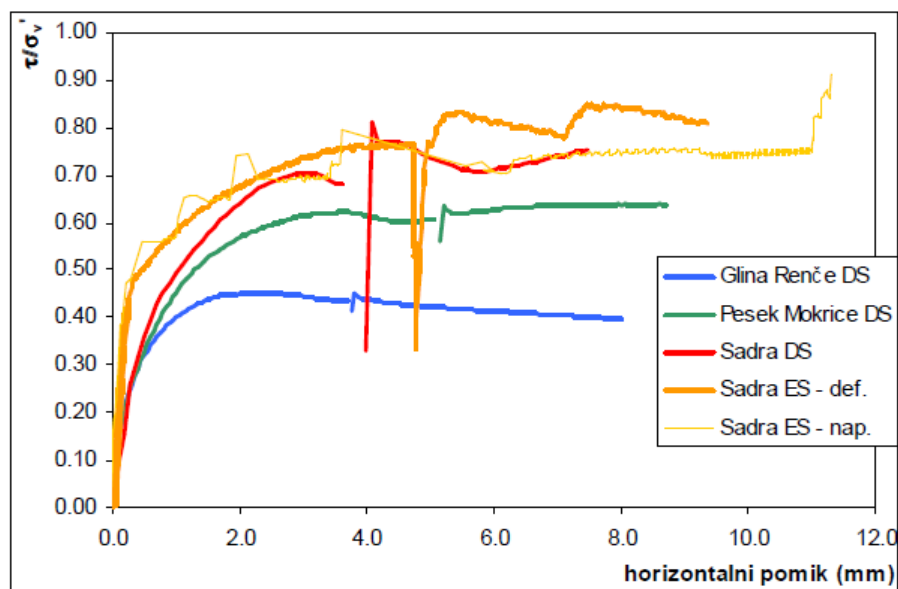
Figure 4.41: Shear stress and vertical strain curves from direct shear test with 24-hours resting time on stone powder Stahovica

Slika 4.41 prikazuje strižne napetosti in vertikalne deformacije pri poskusu s 24-urno prekinitvijo striga na kameni moki Stahovica. Vzorci so se med striženjem in med mirovanjem pretežno posedali, izjema je le vzorec, ki je bil obremenjen z normalno napetostjo 100 kPa.

4.7.2 Rezultati neodvisnega preverjanja

V tem poglavju navajam rezultate kontrolnih testov, ki so jih Maček in drugi (2013) izvedli na Katedri za mehaniko tal z laboratorijem Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani. Preiskave, ki so jih izvajali, so opisane v poglavju 3.9.2.

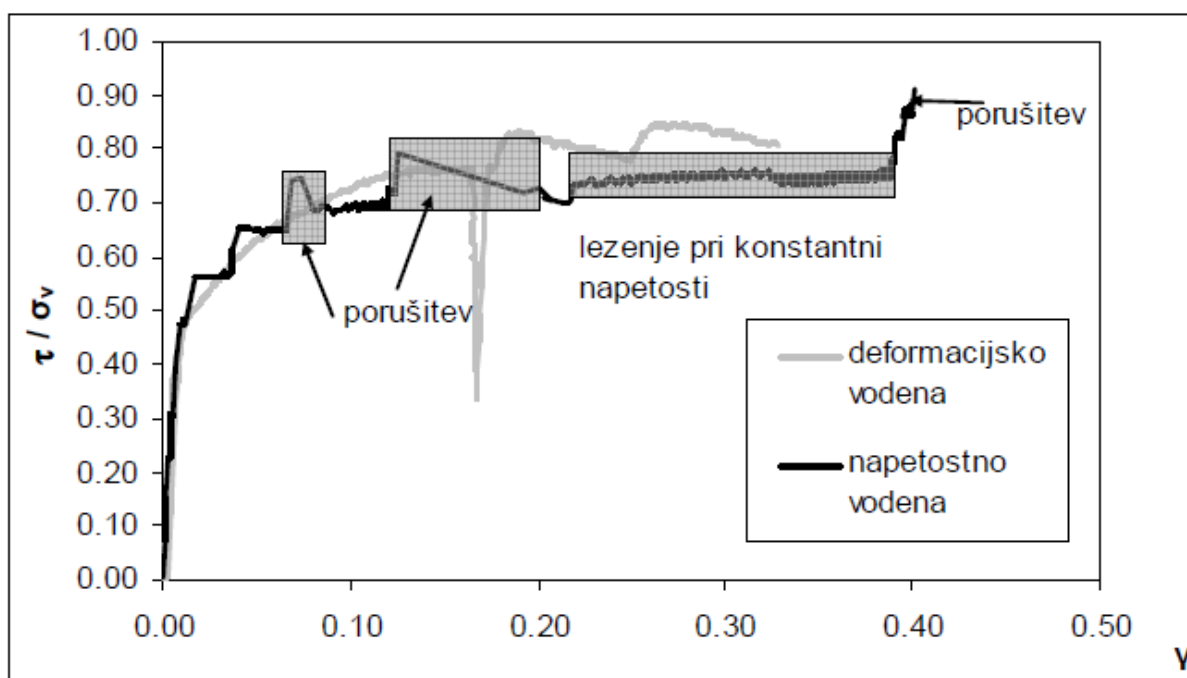
Na sliki (Slika 4.42) vidimo upad strižne napetosti na energetski sadri, glini in pesku pri preiskavi na direktnem strižnem aparatu (DS). V glini je strižna napetost upadla za 6 %, v pesku za 8 %, v sadri pa kar za 51 %. Sadra je imela torej približno 10 × večjo relaksacijo po prekinitvi striženja kot zemljine. Pri utrjevanju zemljine opazimo, da se največja strižna napetost v glini in pesku pri ponovnem striženju ne poveča bistveno glede na največjo strižno napetost pri prvi fazi striga. Povečanje strižne trdnosti, glede na stanje po prvem striženju, znaša do 5 %. Nasprotno pa se v sadri največja strižna trdnost poveča za 15% (razen pri obremenitvi 50 kPa) oziroma za 20 % glede na strižno trdnost po prvem striženju. Vsem preiskanim materialom je skupno togo obnašanje pri ponovnem strigu.



Slika 4.42: Primerjava med testi, opravljenimi na različnih zemljinah in v različnih napravah (Maček in drugi, 2013)

Figure 4.42: Test results from different investigations made on different materials (Maček et al, 2013)

Da bi preverili vpliv vrste preiskave, so vzorce sadre vgradili v enostavni strižni aparat. V enostavnem strižnem aparatu je bilo zmanjšanje napetosti v sadri enako kot v direktnem strižnem aparatu, povečanja strižne trdnosti pa ni bilo opaziti oziroma se je izgubilo v nenatančnosti naprave pri velikih deformacijah. Togo obnašanje pri ponovnem strigu je primerljivo s togostjo sadre pri popolni razbremenitvi in ponovni obremenitvi. Ko so dosegli 95 % strižne trdnosti, so vzorec sadre pustili lesti 24 ur pri konstantni strižni in vertikalni obremenitvi (Slika 4.43). V tem času se je deformacija povečala za 17 %. Po 24 urah so ponovno pričeli strižno obremenjevati sadro in pri tem dobili vidno povečanje strižne trdnosti.



Slika 4.43: Primerjava med napetostno in deformacijsko vodenim enostavnim strižnim preizkusom na energetski sadri TET (Maček in drugi, 2013)

Figure 4.43: Stress and strain controlled measurements on simple shear device - FGD gypsum TET (Maček et al, 2013)

5 DISKUSIJA IN ZAKLJUČKI

V nalogi so prikazani rezultati raziskav, ki sem jih v geomehanskem laboratoriju opravila na treh vrstah kemičnih sader, proizvedenih v Sloveniji. Kemične sadre same ali v kombinaciji z drugimi gradivi predstavljajo potencial za uporabo pri gradnji cest in drugih zemeljskih objektov. Po zrnastosti sestavi so ti materiali melji in peski in jih kot take lahko obravnavamo s podobnimi merili kot geološke materiale, pri tem pa se moramo zavedati njihovih specifičnih lastnosti, ki so posledica njihovega nastanka. Ker nastajajo v suspenziji pri različnih industrijskih procesih, vsebujejo različne primesi in imajo izrazito usmerjeno rast zrn. Sadra je v vodi topna (ca 2 g/l). Podolgovata zrna sadre pogojujejo razmeroma rahlo strukturo, ki je zelo občutljiva na zunanje obremenitve. Petkovšek in drugi (2008) navajajo, da je bila tiksotropija opažena pri vseh kemičnih sadrah, ki se proizvajajo v Sloveniji. Pod normalnimi obremenitvami se kemične sadre deformirajo. Proces je dolgotrajen in je posledica viskoznega lezenja.

V svojem raziskovalnem delu sem poskusila določiti vpliv konsolidacije (volumnske deformacije) in mirovanja na strižno trdnost treh kemičnih sader, proizvedenih v Sloveniji. Preiskave strižne trdnosti sem izvedla z aparatom za direktne strižne preiskave. Indeksne lastnosti sadre sem določila z elektronskim vrstičnim mikroskopom, določila zrnastosti, vlage in relativne gostote.

Vlažnost posamezne kemične sadre je pogojena z njenim nastankom. Rezultati določanja vlage so pokazali, da je imela pri vgradnji energetska sadra TET najnižjo povprečno vlago, sledila ji je titanova sadra CC, nato pa steklarska sadra SR. Na podlagi izračunov količnika por in stopnje zasičenosti sem ugotovila, da so bili vzorci po konsolidaciji in prav tako po strigu polno zasičeni, največje količnike por po strigu je imela steklarska sadra SR.

Vzorci so bili vgrajeni v gostem do zelo gostem stanju, med konsolidacijo pa je večina vzorcev dosegla zelo gosto stanje.

Preiskave direktnega striga sem izvedla po standardu *SIST-TS CEN ISO/TS 17892-10:2004. Geotehnično preiskovanje in preskušanje - Laboratorijsko preskušanje zemljin - 10. del: Neposredni strižni preskus*, sam potek preiskave pa sem prilagajala.

En del preiskav sem izvedla tako, da sem prekinila striženje na 1/3 strižne trdnosti za 24 ur, nato sem striženje nadaljevala. Na ta način sem želela preveriti, kaj se v času mirovanja

zgori z vzorcem, ki ni do konca porušen. Izkazalo se je, da takšna prekinitiv ne vpliva na vrednost maksimalne strižne napetosti, ki jo dosežemo pri nadaljevanju striga.

Po splošni definiciji tiksotropije (Mitchell, 1976) sem predpostavila, da se pri mirovanju ustvari določena metastabilna struktura, ki se pri striženju poruši. Prosta energija takšnega sistema je večja. Spontane reakcije v sistemu težijo k vzpostavitvi ravnotežja, torej k nizko energijski strukturi, kar vodi k temu, da se delci v prostoru naključno razporedijo. Takšna struktura je bolj toga in pogojuje večjo strižno trdnost. Za opazovanje tega pojava pri direktnem strigu kemičnih sader sem striženje po porušitvi prekinila, ga po določenem času nadaljevala in pri tem opazovala razvoj strižne trdnosti, opazovala pa sem tudi vertikalne deformacije med konsolidacijo in med strižno preiskavo. Med mirovanjem vzorcev je prišlo do relaksacije kot posledica preurejanja zrn. Zmanjšanje strižne napetosti med mirovanjem je odvisno od vrste kemične sadre, nivoja normalne napetosti in od dolžine časa mirovanja. Zmanjšanje strižne napetosti je najmanj izrazito pri normalni napetosti 50 kPa (11-53 %), pri večjih normalnih napetostih pa znaša od 28-85 %. Z daljšanjem časa mirovanja se povečuje upad strižne napetosti. Pri nadaljevanju striga se strižna napetost poveča in preseže maksimalno strižno napetost, doseženo pri prvi fazi striga.

Pri preiskavah s prekinitivjo striga sem raziskovala vpliv časa mirovanja na strižno trdnost. Postavlja se vprašanje, kateri procesi se odvijajo v času prekinitve striga in kakšen je njihov vpliv na strižno trdnost. Med možnimi procesi so konsolidacija, tiksotropno otrjevanje, rekristalizacija in drugi. Vzorec je tudi med mirovanjem obremenjen z enako normalno napetostjo kot med strigom. Ugotavljam, da je pri kemični sadri zelo izražen proces sekundarne konsolidacije, za katerega težko z gotovostjo trdimo, kdaj je povsem zaključen, torej se lahko odvija tudi med strigom in prav tako med njegovo prekinitivjo. Želela sem določiti, v kolikšni meri konsolidacija vpliva na povečanje strižne trdnosti kemičnih sader in ali lahko s preiskavami direktnega striga dokažemo njihove tiksotropne lastnosti. Vpliv konsolidacije na strižno trdnost sem testirala tako, da sem vzorce sader vgradila na enak način, nato sem jih konsolidirala različno dolgo: 1, 3 ali 5 dni. Po tem času sem na vzorcih izvedla preiskavo direktnega striga. Med konsolidacijo in med strigom sem merila vertikalne deformacije, da sem lahko kasneje izračunala spremembe količnika por.

Pri poskusih s prekinitivjo striženja sem ugotovila, da se večina vzorcev med mirovanjem ni dodatno konsolidirala, ampak je v pretežni meri prihajalo celo do manjših dvižkov, torej povečanja strižnih trdnosti ne moremo razlagati (samo) s konsolidacijo. Že pri določanju relativne gostote vzorcev sem ugotovila, da so bili ti pred strigom zelo zbiti. Dvižki to tudi potrjujejo, zato v času mirovanja ni moglo priti do občutnega dodatnega zgoščanja. Analiza

sprememb količnikov por pri direktnih strižnih preizkusih, pred katerimi sem vzorce konsolidirala različno dolgo, pokaže, da so pri vseh obravnavanih sadrah posedki med konsolidacijo precej večji, kot so vertikalne deformacije med strižno preiskavo. Razmerje τ/σ v odvisnosti od količnika por pokaže, da je strižna trdnost večja po mirovanju porušeni vzorcev, dolžina časa konsolidacije in sprememba količnika por v tem času pa ne vplivata bistveno na strižno trdnost. V tem smislu je energetska sadra TET najbolj tipičen material. Pri njej opazimo najmanjše nihanje količnika por, razlike v strižni trdnosti pa so največje.

Primerjava strižnih kotov, določenih pri različnih preiskavah, pokaže, da ima na velikost strižnih kotov oz. trdnost materiala večji vpliv čas mirovanja po poružitvi kot dolžina časa konsolidacije pred strižnim preizkusom. Iz tega lahko sklepamo, da se v času mirovanja porušeni vzorcev poleg konsolidacije dogajajo še drugi procesi. Če upoštevamo Mitchellovo definicijo o tiksotropiji (1976) in njegovo hipotezo o vzrokih tiksotropnega obnašanja ter dejstvo, da je bila tiksotropija pri kemičnih sadrah že opažena in tudi opisana v strokovni literaturi, je verjetno, da je povečanje strižne trdnosti v času mirovanja povezano s tiksotropijo. Vendar bi v tem primeru pričakovali največje učinke pri steklarski sadri SR, ki velja za najbolj tiksotropno, kar pa ne drži. Pri strižnih preiskavah s prekinitvijo se je najbolj povečala strižna trdnost energetske sadre TET, ki je najbolj prepustna, kar pa pogojuje hitrejšo konsolidacijo.

S kontrolnimi preiskavami na kameni moki proizvajalca Calcit d.o.o. iz Stahovice sem preverila morebitni vpliv postopkov preiskovanja ali aparata na rezultate preiskav. Pri preiskavi kamene moke s 24-urno prekinitvijo striga je med mirovanjem prišlo do zmanjšanja strižne napetosti za 8-18 %, kar so občutno manjše vrednosti kot pri kemičnih sadrah. Prav tako je učinek prekinitve striga na strižne napetosti pri nadaljevanju striženja zanemarljiv. S temi preiskavami sem potrdila, da rezultati strižnih preiskav s prekinitvijo striga na kemičnih sadrah odražajo lastnost materiala in niso posledica napake postopka ali aparata.

Maček in drugi (2013) so izvedli kontrolne raziskave na energetski sadri TET, na glini iz Renč ter na pesku z območja Mokric. Preiskave so izvajali v direktnem strižnem aparatu ter v enostavnem strižnem aparatu, ki omogoča napetostno in deformacijsko voden strižni preizkus. Rezultati so potrdili specifično deformacijsko obnašanje kemičnih sader v smislu lezenja. Prav tako so potrdili primerljivost rezultatov, pridobljenih z direktnim strižnim aparatom in tistih, pridobljenih v enostavnem strižnem aparatu.

Ključne ugotovitve mojega raziskovalnega dela so sledeče:

- V času po mirovanju porušenih vzorcev kemičnih sader je prišlo ob ponovnem strigu do povečanja strižne trdnosti, ki ni samo posledica zgoščanja, ampak se v tem času odvijajo tudi drugi procesi.
- Strižna trdnost se v primeru prekinitve poveča samo pri porušenih vzorcih, ne pa tudi pri delno porušenih. Razlago za to lahko najdemo na nivoju mikrostrukture. Pojem mikrostruktura se v tiksotropnih sistemih nanaša večinoma na usmerjenost in prostorsko razporeditev podolgovatih delcev. V kolikor je tiksotropija eden od vzrokov za povečanje strižne trdnosti pri porušenih vzorcih, lahko sklepamo, da pri delno porušenih vzorcih prosta energija sistema ni bila dovolj velika, da bi sprožila regeneracijo strukture.
- Vzorci porušene kemične sadre v času mirovanja "okrevajo". Takšen pojav (razen pri tiksotropnih glinah) pri zemljinah ni običajen. Možnih vzrokov za takšno povečanje strižne trdnosti je več: konsolidacija (pri kemičnih sadrah močno izražena sekundarna konsolidacija oziroma lezenje), tiksotropno otrjevanje (pojav, ki je značilen za kemične sadre), raztapljanje ter posledično rast novih kristalov in s tem spreminjanje strukture (sadra je v vodi delno topna), presežni porni tlaki (kot posledica prehitrega striženja) in drugi. Verjetno je, da gre za kombinacijo več dejavnikov, vendar jih z uporabljenimi metodami ni bilo mogoče nedvoumno dokazati in ovrednotiti.

Pri svojem raziskovalnem delu sem na vsaki od treh obravnavanih kemičnih sader opravila 7 različnih strižnih preiskav. Pri vsakem strižnem preizkusu sem uporabila štiri različne vrednosti normalne obtežbe in sicer 50, 100, 250 in 500 kPa. Pri izbiri vrednosti normalnih obremenitev sem upoštevala vrednost prostorninske teže kemičnih sader in potencialno višino nasipov, zgrajenih iz njih. Tako na primer normalna obremenitev 50 kPa ustreza 3 m visokemu nasipu, normalna obremenitev 250 kPa pa 15 m visokemu nasipu. Vrednost strižnega kota, določenega z direktnim strigom, znaša $37,7^\circ$ za energetska sadro TET, $41,3^\circ$ za titanovo sadro CC in $37,2^\circ$ za steklarsko sadro SR. Vrednost strižnega kota po 24-urnem mirovanju porušenega vzorca naraste za 18 % pri energetska sadri TET, za 2 % pri titanovi sadri CC in za 7 % pri steklarski sadri SR. Pri energetska TET in pri steklarski SR sadri je vpliv mirovanja porušenega vzorca večji kot pri titanovi CC sadri in se s časom še povečuje, vendar se z daljšanjem časa mirovanja zmanjšuje hitrost spremembe.

Vrednosti strižnih kotov, ki sem jih določila na kemičnih sadrah pri svojem raziskovalnem delu, so visoke, če jih primerjamo z vrednostmi, značilnimi za zemljine primerljive zrnivosti. Vendar je pri načrtovanju uporabe tega materiala napr. za gradnjo nasipov potrebna previdnost, saj običajni postopki, ki jih sicer uporabljamo za tradicionalne gradbene

materiale, pri tako specifičnem materialu ne zadoščajo, kar se je izkazalo tudi že v praksi. Kljub temu so rezultati mojega raziskovalnega dela prispevek k razumevanju mehanskega obnašanja kemične sadre in rezultati raziskav prispevajo v bazo podatkov o kemičnih sadrah.

Sadro sem preiskovala s postopki, ki se sicer uporabljajo na zemljinah. Ker je kemična sadra specifičen material (topnost, tiksotropija, primesi, spreminjanje strukture zaradi raztapljanja, prekristalizacija, lezenje itd), je pri interpretaciji rezultatov potrebna posebna previdnost. Strižno trdnost sem določevala v dreniranih pogojih, smiselno bi bilo preučiti obnašanje sadre še v nedreniranih pogojih. Zaradi neizrazite primarne in dolgotrajne sekundarne konsolidacije kemičnih sader je težko določiti ustrezno hitrost striženja, ki bi omogočala sukcesivno disipacijo presežnih pornih tlakov. Ker v direktnem strižnem aparatu ni mogoče meriti pornih tlakov, ne moremo zagotovo vedeti, ali je preiskava zares potekala dovolj počasi, torej v dreniranih pogojih. V kolikor prihaja do presežnih pornih tlakov, se le-ti lahko odražajo v rezultatih preiskav, ne moremo pa kvantitativno ovrednotiti njihovega vpliva. Kljub navedenim omejitvam se je izkazalo, da so meritve v direktnem strižnem aparatu primerljive s tistimi v enostavnem strižnem aparatu. Postopek s prekinitvijo direktne strižne preiskave po porušitvi bi lahko uporabljali za testiranje materialov (predvsem industrijskih), saj je močno izražena relaksacija med mirovanjem in povečanje strižne napetosti pri nadaljevanju striga indikacija, da gre za posebne lastnosti, ki zahtevajo nadaljnje preiskave.

Titanova sadra CC je kohezivna zaradi precejšnje vsebnosti železovih koloidov. Pri raziskavah sem izmerila nepričakovano visoke vrednosti navidezne kohezije tudi pri ostalih dveh obravnavanih sadrah. Vzrok za to je lahko ali v prehitrem striženju, v prekonsolidaciji ali pa v nelinearni obliki porušnice.

Preiskovanje kemične sadre zaradi njenih specifičnih lastnosti zahteva interdisciplinarni pristop (geotehnika, kemija, reologija, mineralogija itd). Menim, da je potrebno pri nadaljnjih raziskavah nameniti posebno pozornost topnosti sadre in kemiji pornih vod, ki so prav tako lahko vzrok za spreminjanje strukture in torej tudi za spremembo strižne trdnosti. Znano je, da tiksotropija značilna za materiale s povišanimi vsebnostmi soli ali elektrolitov v porni vodi. Kemične sadre nastajajo pri različnih industrijskih procesih, zato so njihove lastnosti različne.

V kolikor bi lastnosti kemičnih sader ocenjevali samo na osnovi klasičnega strižnega preizkusa, bi sadre lahko ocenili kot material z visokim kotom notranjega trenja in znatnim deležem kohezije. Intenzivno popuščanje strižnih napetosti v času mirovanja ter hipni prirast ob ponovnem strigu pa kažejo, da strižna trdnost, merjena po klasičnih postopkih, ki so bili

razviti za inertne zemljine, pri kemični sadri ne more biti relevanten kazalnik njene uporabnosti v zemeljskih objektih. Časovno pogojeno deformacijsko obnašanje pod konstantnimi vertikalnimi obremenitvami je v obravnavanih materialih odločujočega pomena. S svojimi raziskavami nisem uspela pojasniti, kateri procesi se odvijajo v sadri v času mirovanja po poružitvi. Pri nadaljnjih preiskavah bi kazalo preučiti, ali prihaja pri strigu do lomljenja zrn na robovih in v času mirovanja do pospešenega raztapljanja odlomljenih zrn ali zgolj do njihovega zaklinjanja. Visoka topnost sadre vpliva tudi na fizikalne lastnosti s sulfati zasičene porne vode. Prav tako še nimamo odgovora na vprašanje, ali gostota porne vode vpliva na hitrost disipacije presežnih pornih tlakov.

6 POVZETEK

Kemične sadre nastajajo kot stranski produkt v kemičnih tovarnah in v energetskih objektih. V Sloveniji se velike količine sadre odlagajo na odlagališčih kot nenevaren odpadek. Sadre kot zemljini podoben material same ali v kombinaciji z drugimi materiali predstavljajo potencial za uporabo pri gradnji zemeljskih objektov. Za razliko od naravnih zemljin je pri alternativnih materialih potrebno upoštevati, da so nastali v proizvodnih obratih in da v njih še vedno lahko potekajo različni kemični procesi, ki posredno vplivajo na njihove geotehnične lastnosti. Glavne značilnosti kemične sadre so visoka strižna trdnost, dolgotrajna konsolidacija, visoka topnost ter tiksotropno obnašanje.

Raziskovalno delo je bilo zasnovano na hipotezi, da je kemična sadra primeren material za gradnjo različnih nasipov, pri čemer se moramo zavedati njenih posebnosti in omejitev. V nalogi so predstavljeni rezultati raziskav, katerih cilj je bil določiti nekatere trdnostne in deformacijske lastnosti kemičnih sader, proizvedenih v Sloveniji. Raziskovalni izziv so bili vpliv časa in konsolidacije ter z njima povezanih volumnskih deformacij na pridobivanje oz. izgubo strižne trdnosti materiala.

Preiskovali smo energetsko sadro iz Termoelektrarne Trbovlje, titanovo sadro iz Cinkarne Celje in steklarsko sadro iz Steklarne Rogaška. Na vsaki od preiskovanih sader je bilo izvedenih 7 različnih strižnih preiskav pri 4 različnih normalnih obtežbah. Za potrebe raziskovalnega dela smo preiskavo direktnega striga prilagodili tako, da smo striženje pri določeni strižni napetosti ali pri določeni horizontalni deformaciji prekinili, nato pa nadaljevali s strigom. Pri preiskavi smo opazovali razvoj strižnih napetosti ter vertikalnih deformacij. Opazovali smo tudi vpliv dolžine prekinitve striga na strižno trdnost. Vrednost strižnega kota, določenega z direktnim strigom, znaša $37,7^\circ$ za energetsko sadro iz Termoelektrarne Trbovlje, $41,3^\circ$ za titanovo sadro iz Cinkarne Celje in $37,2^\circ$ za steklarsko sadro iz Steklarne Rogaška. Upad strižne napetosti med 24-urnim mirovanjem pri energetski sadri znaša do 51 %, pri titanovi sadri do 61 %, pri steklarski sadri pa do 58 %. Vrednost strižnega kota po 24-urnem mirovanju porušenega vzorca naraste za 18 % pri energetski sadri, za 2 % pri titanovi sadri in za 7 % pri steklarski sadri. Pri energetski in pri steklarski sadri je vpliv mirovanja porušenega vzorca večji kot pri titanovi sadri in se s časom še povečuje, vendar se z daljšanjem časa mirovanja zmanjšuje hitrost spremembe.

Pri preiskavah direktnega striga smo ugotovili, da v času mirovanja porušeni vzorci kemičnih sadre pride do povečanja strižne trdnosti, ki ni samo posledica zgoščanja, ampak se v tem času odvijajo še drugi procesi. Poleg lezenja so možni vzroki za takšno povečanje

še tiksotropno otrjevanje, rekristalizacija in drugi. Verjetno gre za kombinacijo več dejavnikov, ki pa jih z uporabljenimi postopki ni bilo mogoče nedvoumno dokazati in ovrednotiti. Strižna trdnost se v času prekinitve poveča samo pri porušenih vzorcih, ne pa tudi pri delno porušenih. Razlago za to lahko najdemo na mikrostrukturnem nivoju.

S kontrolnimi preiskavami smo izločili vpliv napake postopkov in aparature. Vzoredne preiskave na enostavnem strižnem aparatu so primerljive s tistimi na direktnem strižnem aparatu. Le-ta ima določene omejitve, saj ne omogoča spremljave volumskih sprememb in sprememb pornih tlakov med strižno preiskavo in kot tak ni primeren za preučevanje lezenja in tiksotropije. Lahko pa rezultat metode direktnega striga s prekinitvijo striženja služi kot indikacija posebnih lastnosti materialov (predvsem alternativnih), ki zahtevajo dodatne raziskave.

Trdnost kemične sadre, izražena s parametroma efektivnega strižnega kota φ' in efektivne kohezije c' , je visoka, če jo primerjamo z zemljinami primerljive zrnastne sestave. Po porušitvi na kemičnih sadrah ne opazujemo izrazitega prehoda iz vrhunske v rezidualno trdnost, temveč z naraščajočimi deformacijami trdnost po porušitvi ostaja bolj ali manj konstantna.

7 SUMMARY

Chemical or synthetic gypsum is generally a by-product from power utilities and acid neutralization. In Slovenia large quantities of FGD and other types of chemical gypsum have to be disposed of. Synthetic gypsum (also in combination with other materials) could be a suitable fill material for road embankments or earth dams, but we must consider its special geotechnical properties, which are a consequence of its origin. In soil-like materials, there is the possibility that there are still chemical, mineralogical, and other diagenetic processes going on inside them at the time of their geotechnical treatment, which can have an important influence on the mechanical properties of the material. High shear strength, long term creep, thixotropic hardening, and high solubility are the main characteristics of chemical gypsum.

The thesis was based on the hypothesis that chemical gypsum is a suitable material for the construction of various dams, but we must be aware of its characteristics and limitations. The paper presents the results of research aimed at defining some of the strength and deformation properties of some chemical gypsums produced in Slovenia. The test emphasizes the following parameters: influence of time, consolidation, and related volume deformations on shear strength.

Within the scope of the thesis three different chemical gypsums have been investigated: FGD gypsum from Termoelektrarna Trbovlje, titanium gypsum from Cinkarna Celje and glass gypsum from Steklarna Rogaška. On each of three investigated gypsums seven different shear tests using 4 different normal pressures were performed. To observe the special geotechnical properties, direct shear test was adapted. Direct shear tests have been stopped at a defined value of shear stress or after failure and carried on after 24 or 72 hours. During all tests shear stress and vertical deformations have been observed. Direct shear test results in the angle of shear resistance (in terms of effective stress) of $37,7^\circ$ for FGD gypsum, $41,3^\circ$ for titanium gypsum, and $37,2^\circ$ for glass gypsum. During the 24-hour resting period after failure we detected a considerable decrease of shear stress: up to 51 % for the FGD gypsum, up to 61 % for the titanium gypsum, and up to 58 % for the glass gypsum. After 24-hours the shear test was resumed shear stress increased and exceeded values before resting. Angles of shear resistance from this kind of tests in comparison to those from standard direct shear tests are higher: 18 % for FGD gypsum, 2 % for titanium gypsum, and 7 % for glass gypsum. The influence of resting period after failure is larger for FGD and glass gypsum and has increased over time but the rate of change decreased with time.

In direct shear tests we found that during the resting period the chemical gypsum samples increased their shear strength, which is not only a result of compaction, but also other processes that take place in this time. Possible causes for this increase besides creep are thixotropic hardening, recrystallization, and others. It is probably a combination of several factors, but the methods we used did not allow a clear demonstration and evaluation. Shear strength in the resting period increases only on the razed samples, but not in the partially collapsed. The explanation for this can be found at the microstructure level.

We performed control tests to exclude errors because of methods or apparatus. Test results from parallel investigations on the simple shear device are comparable to those from the direct shear device. The direct shear device has some limitations, for example it does not allow for observation of volume changes and changes in pore pressure during shear investigation and is thus not suitable for the study of creep or thixotropy. The method using rest periods during direct shear test may serve as an indication of the special properties of materials (primarily soil-like) that require further research.

Shear strength of chemical gypsum defined by effective stress parameters φ' and c' is high when compared to soils with comparable granulation. After the failure we do not observe an explicit transition from the peak to the residual shear strength, shear strength after failure remains more or less constant with increasing deformations.

8 VIRI

Ackermann, E. 1950. Thixotropy and Flow properties of fine grained Soils. Ottawa, National Research Council of Canada: 58 str.

ASTM D 4253-00:2000 - Standard Test Methods for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table.

ASTM D 4254-00:2000 - Standard Test Methods for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density.

Atkinson, J.H., Bransby, P.L. 1978. The Mechanics of Soils: An Introduction to Critical State Soil Mechanics, London idr., McGraw-Hill Book Company Limited: 371 str.

Barnes, H.A. 1997. Thixotropy – a review. Journal of Non-Newtonian Fluid Mech., 70 (1997) 1-33.

Billberg, P. 2006. Form Pressure Generated by Self-Compacting Concrete – Influence of Thixotropy and Structural Behaviour at Rest. Doctoral Thesis. Stockholm, Royal Institute of Technology, Division of Concrete Structures, School of Architecture and the Built Environment: 91str.

Brezovnik, A. 2007. Model reševanja problematike odpadnih snovi v Steklarni Rogaška d.d.: diplomsko delo. Univerza v Mariboru, Fakulteta za organizacijske vede, Kranj, (A. Brezovnik): 68 str.

Büchel, K. H., Moretto, H.-H., Woditsch, P. 2000. Industrial Inorganic Chemistry. Weinheim et al, Wiley-VCH: 667 str.

Chang, W. F., Chin, D. A. 1989. Phosphogypsum for secondary Road Construction. Florida, Florida Institute of Phosphate Research: 173 str.

Chapman, G. 1949. The Thixotropy and Dilatancy of a Marine Soil. Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom, 28, 1: 123-140.

Das, B. M. 2008. Advanced Soil Mechanics (Third edition). London and New York, Taylor & Francis Group: 567 str.

Dawson, A (ur.) 2008. Water in Road Structures - Movement, Drainage and Effect. Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering, vol. 5, Nottingham, Springer, str. 12.

Gorle, D. 1978. Experimental embankment in phosphogypsum. Brussels, The Belgian Road Research Center: 28 str.

Head, K.H. 1994. Manual of Soil Laboratory Testing, Volume 2: Permeability, Shear Strength and Compressibility Tests. Second Edition. New York, Toronto, John Wiley & Sons, Inc.: 188 str.

Kočevár, H. 1991. Vpliv pepela z odlagališča Termoelektrarne Trbovlje na okolje. Magistrska naloga. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za naravoslovje in tehnologijo: 124 str.

Ljubičič Mlakar, T., Reščič, L., Pešič, T., Lazar, S., Podpečan, D., Stergaršek, A. 2000. Uporaba kemičnih sader v proizvodnji cementa. Materiali in tehnologije, 34, 3-4: 187-192.

Maček, M., Petkovšek, A. 2013. Obnašanje zemljin po 24 urni prekinitvi striženja v neposrednem in enostavnem strižnem aparatu. Poročilo o laboratorijskih preiskavah. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za mehaniko tal z laboratorijem: 21 str.

Maksimović, M. M. 2008. Mehanika tla - četrto izdanje. Beograd, AGM knjiga: 517 str.

Mazurek, M. 2010. Raziskave volumskih deformacij zemljin zaradi zmrzovanja in tajanja. Diplomaska naloga, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana: 111 str.

Mewis, J., Wagner, N.J. 2009. Thixotropy. Advanced in Colloid and Interface Science 147-148, 214-227.

Mitchell, J. K. 1960. Fundamental Aspect of Thixotropy of Soils. Journal of the Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 86, No. SM3, Proc. Paper 2522, June, 1960, p. 19.

Mitchell, J.K. 1976. Fundamental of Soil Behavior. New York , John Wiley & Sons: 437 str.

Petkovšek, A. 2003. CCP Utilization in Geotechnical and Road Engineering in Slovenija. X. Jubileuszowa Międzynarodowa Konferencja Popioly z energetyki. Warsazawa, 223-238.

Petkovšek, A. 2004. Vloga geotehnike pri prepoznavanju in odpravljanju tveganj, ki jih v okolju predstavljajo odpadne snovi – nekaj primerov iz Slovenije. V: Trauner, L. (ur.), Dolinar, B. (ur.). 5 Šukljetovi dnevi: Zbornik referatov. Ljubljana, Slovensko geotehniško društvo: str. 35-71.

Petkovšek, A., Majes, B., Mladenovič, A. 2008. The influence of the mineralogical and physical properties of chemical gypsum on the compaction behavior and stability of the gypsum mono-landfill bodies – a case study from Slovenia. V: Telekes, G. (ur.), Imre, E. (ur.), Witt, K.J. (ur.), Ramke, H.G. (ur.). Proceedings of the 1ST Midle European Conference on Landill Technology, Budapest, Organizing Committee of the Midle European Conference on Landill Technology 2008, str. 257-264.

Petkovšek, A. 2010. Tehnološki načrt izgradnje poskusnega nasipa iz ožete titanske sadre. UL Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za mehaniko tal z laboratorijem, Ljubljana, 13. str.

Petkovšek, A., Mladenovič, A., Majes, B. 2012. Sintetične sadre v Sloveniji - kako in kam z njimi. V: Petkovšek, A. (ur.), Klopčič, J. (ur). Zbornik referatov 13. Šukljetovih dnevov, Lipica, junij 2012, Slovensko geotehnično društvo, str. 277-288.

Pogačnik, M. 2007. Vplivi odlagališča elektrofiltrskega pepela Termoelektrarne Trbovlje na okolje. Diplomsko delo, Filozofska fakulteta, Univerza v Ljubljani, Ljubljana, 85 str.

Renko, E. 2006. Sadra – stranski produkt razžveplanja dimnih plinov. Utrinki – glasilo Termoelektrarne Trbovlje, št. 24, str.6.

Saylak, D. 1996. Design, Construction and Evaluation of Experimental Stabilized Gypsum Roadbases. Proceedings of the Phosphogypsum Fact-finding Forum. Florida, Florida Institute of Phosphphate Research: str. 93-98.

SIST-TS CEN ISO/TS 17892-4:2004. Geotehnično preiskovanje in preskušanje – Laboratorijsko preskušanje zemljin – 4. del: Ugotavljanje zrnastostne sestave. Slovenski inštitut za standardizacijo: 30 str.

SIST-TS CEN ISO/TS 17892-10:2004. Geotehnično preiskovanje in preskušanje – Laboratorijsko preskušanje zemljin – 10. del: Neposredni strižni preskus. Slovenski inštitut za standardizacijo: 16 str.

Smith, L.M., Kawam, A., Whitcraft, M.S., Larew, H.G., McCormick, F., Rude, L.C. 1975. Technology for using sulfate waste in highway construction". Maryland, Gillette Research Institute: 190 str.

Smith, G.N., Smith, I.G.N. 1998. Element of Soil Mechanics, Seventh Edition. Oxford et al., Blackwell Science: 494 str.

Tao, M., Zhang, Z. 2005. Enhanced Performance of Stabilized By-product Gypsum. Journal of materials in civil engineering: 17, 6, str. 617-623.

Tesárek, P., Černý, R. 2007. Effect of Drying Temperature on Properties of Hardened Gypsum. V: Leja, J. (ur.). Thermophysics 2007, Meeting of the Thermophysical Society., Bratislava, Vydavateľstvo STU: str. 56-61.

Zupančič Valant, A. 2007. Uvod v reologijo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo: 98 str.

ELEKTRONSKI VIRI:

Vrstična elektronska mikroskopija – pogled v mikrosvet materialov.

<http://www.zag.si/dl/lablist/mikroskopija.pdf> (pridobljeno 13. 2. 2012)

<http://www.eurogypsum.org> (pridobljeno 23. 4. 2012)

<http://www.webmineral.com> (pridobljeno 18.1.2011)

<http://www.chemistrydaily.com> (pridobljeno 28.1.2011)

<http://www.tet.si> (pridobljeno 11.1.2013)

<http://www.cinkarna.si> (pridobljeno 20.4.2011)

<http://www.hse.si> (pridobljeno 2.5.2013)

Mehanika tal, Laboratorijske vaje – lastnosti zemljin, 5.vaja: strižna trdnost zemljin

<http://www.fgg.uni-lj.si> (pridobljeno 2.5.2013)

<http://www.calcit.si/> (pridobljeno 4.5.2013)

A: REZULTATI DOLOČEVANJA VLAGE VZORCEV KEMIČNIH SADER

Preglednica A.1: Vlaga vzorcev energetske sadre TET pred in po strižni preiskavi

Table A.1: Water content of FGD gypsum TET before and after direct shear tests

Oznaka vzorca	Normalna obremenitev (kPa)	Vrsta preiskave	Vlaga pri vgradnji (%)	Vlaga po strigu (%)
S-VZ1-11	50	24-urna prekinitve med striženjem	16,73	27,04
	100			26,65
	250			24,46
	500			22,43
S-VZ1-12	50	72-urna prekinitve med striženjem	16,56	25,25
	100			25,26
	250			23,95
	500			22,01
S-VZ1-13	50	Direktni strig brez prekinitve	17,31	26,47
	100			24,43
	250			22,71
	500			23,14
S-VZ1-14	50	Prekinitve striga na 1/3 vrhunske trdnosti za 24 ur	17,40	25,31
	100			24,22
	250			24,13
	500			22,90
S-VZ2-17	50	1 dan konsolidacije, direktni strig	15,35	24,30
	100			24,04
	250			23,87
	500			21,86
S-VZ2-16	50	3 dni konsolidacije, direktni strig	17,40	25,15
	100			24,03
	250			23,64
	500			22,03
VZ-2-18	50	5 dni konsolidacije, direktni strig	15,94	25,36
	100			24,87
	250			23,45
	500			23,30

Preglednica A.2: Vlaga vzorcev titanove sadre CC pred in po strižni preiskavi

Table A.2: Water content of titanium gypsum CC before and after direct shear tests

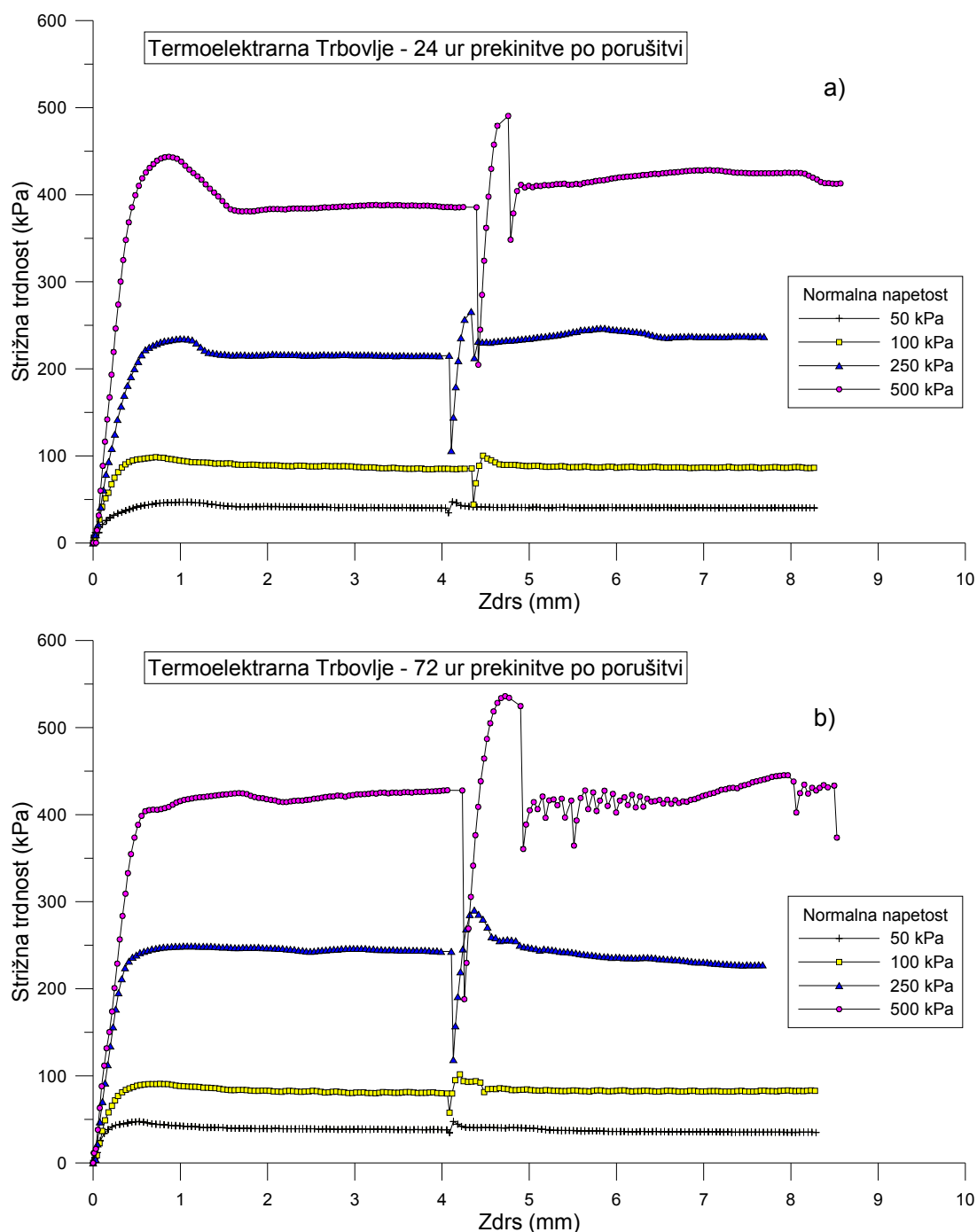
Oznaka vzorca	Normalna obremenitev (kPa)	Vrsta preiskave	Vlaga pri vgradnji (%)	Vlaga po strigu (%)
S-VZ3-4	50	24-urna prekinitiv med striženjem	36,10	47,19
	100			45,21
	250			39,11
	500			34,95
S-VZ3-5	50	Prekinitiv striga na 1/3 vrhunske trdnosti za 24 ur	35,47	35,74
	100			30,87
	250			30,32
	500			/
S-VZ3-6	50	72-urna prekinitiv med striženjem	32,79	41,48
	100			38,73
	250			31,59
	500			29,94
S-VZ3-7	50	Direktni strig brez prekinitve	34,88	40,86
	100			39,34
	250			36,61
	500			35,30
S-VZ3-11	50	1 dan konsolidacije, direktni strig	35,69	44,13
	100			30,46
	250			29,69
	500			27,88
S-VZ3-10	50	3 dni konsolidacije, direktni strig	35,69	43,33
	100			44,22
	250			32,61
	500			34,73
S-VZ3-12	50	5 dni konsolidacije, direktni strig	36,05	44,31
	100			42,32
	250			37,05
	500			35,01

Preglednica A.3: Vlaga vzorcev steklarske sadre SR pred in po strižni preiskavi

Table A.3: Water content of glass gypsum SR before and after direct shear tests

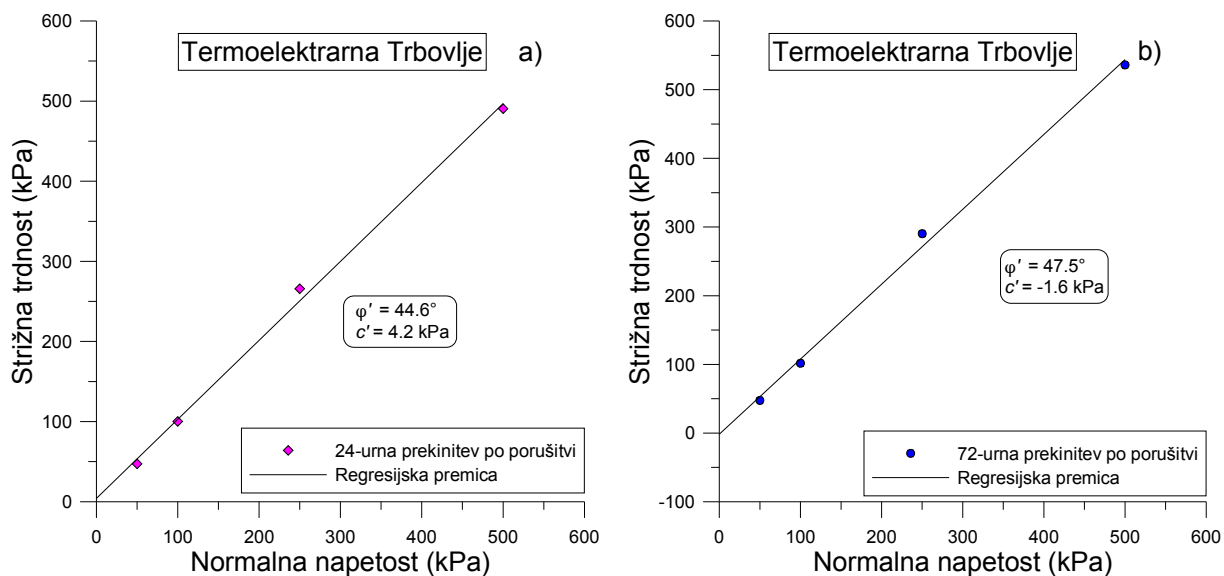
Oznaka vzorca	Normalna obremenitev (kPa)	Vrsta preiskave	Vlaga pri vgradnji (%)	Vlaga po strigu (%)
S-VZ4-1	50	24-urna prekinitiv med strigom	43,85	48,65
	100			48,04
	250			37,57
	500			/
S-VZ4-2	50	Direktni strig brez prekinitve	47,64	53,90
	100			50,94
	250			46,65
	500			39,26
S-VZ4-3	50	72-urna prekinitiv med striženjem	50,19	40,07
	100			40,58
	250			28,62
	500			/
S-VZ4-4	50	Prekinitiv striga na 1/3 vrhunske trdnosti za 24 ur	48,67	37,43
	100			33,70
	250			39,83
	500			38,73
S-VZ4-9	50	1 dan konsolidacije, direktni strig	54,24	/
	100			/
	250			46,33
	500			42,08
S-VZ4-8	50	3 dni konsolidacije, direktni strig	56,58	53,86
	100			43,93
	250			38,95
	500			42,98
S-VZ4-10	50	5 dni konsolidacije, direktni strig	57,50	56,40
	100			52,80
	250			46,01
	500			40,74

B: REZULTATI PREISKAV S PREKINITVIJO STRIGA NA VZORCIH KEMIČNIH SADER



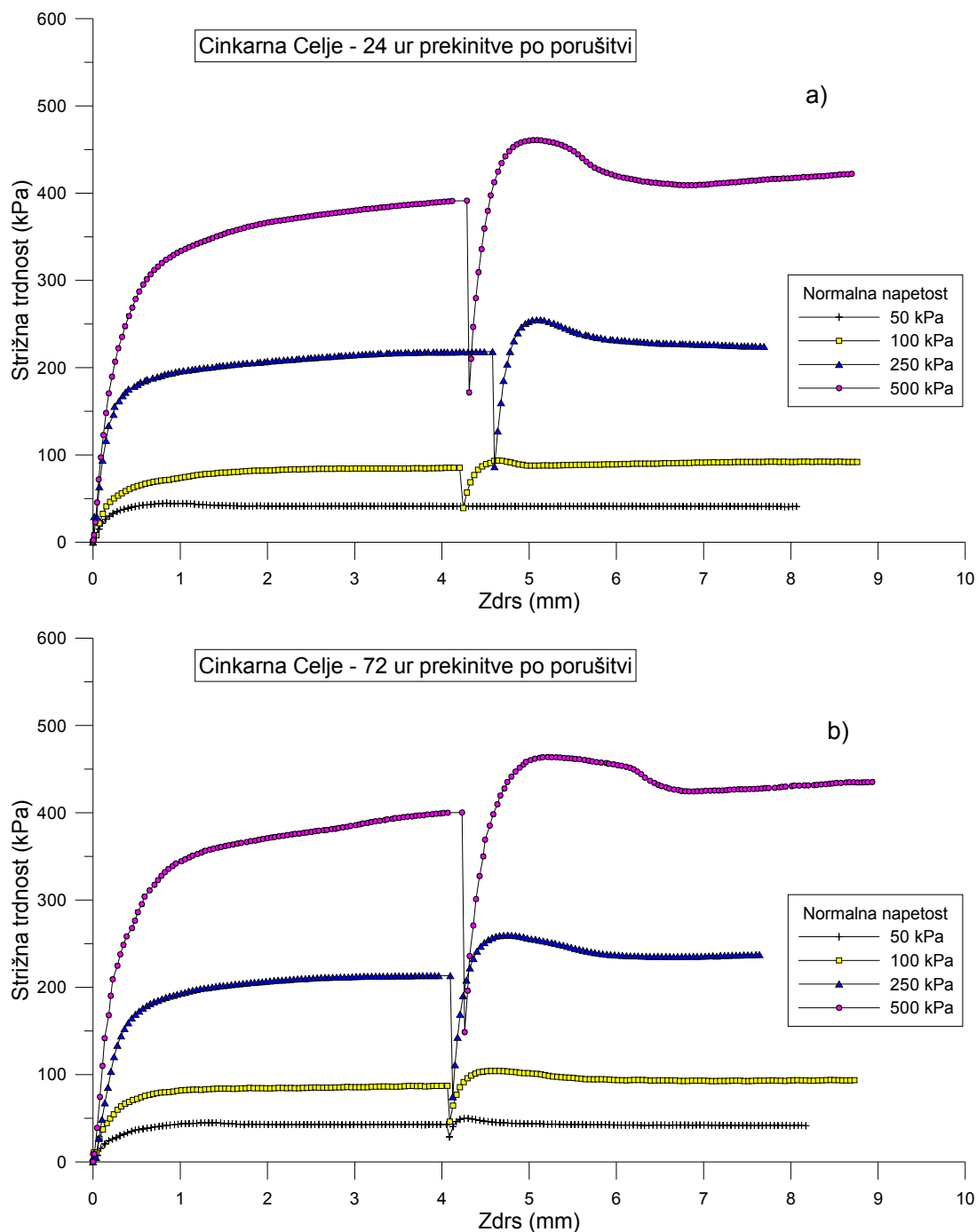
Slika B.1: Rezultat preiskave direktnega striga, po porušitvi prekinjenega za a) 24 ur in b) 72 ur, na energetski sadri TET pri 4 različnih normalnih obremenitvah

Figure B.1: Shear stress/displacement curves as result of direct shear tests with a) 24-hours and b) 72-hours resting time after failure on FGD gypsum TET



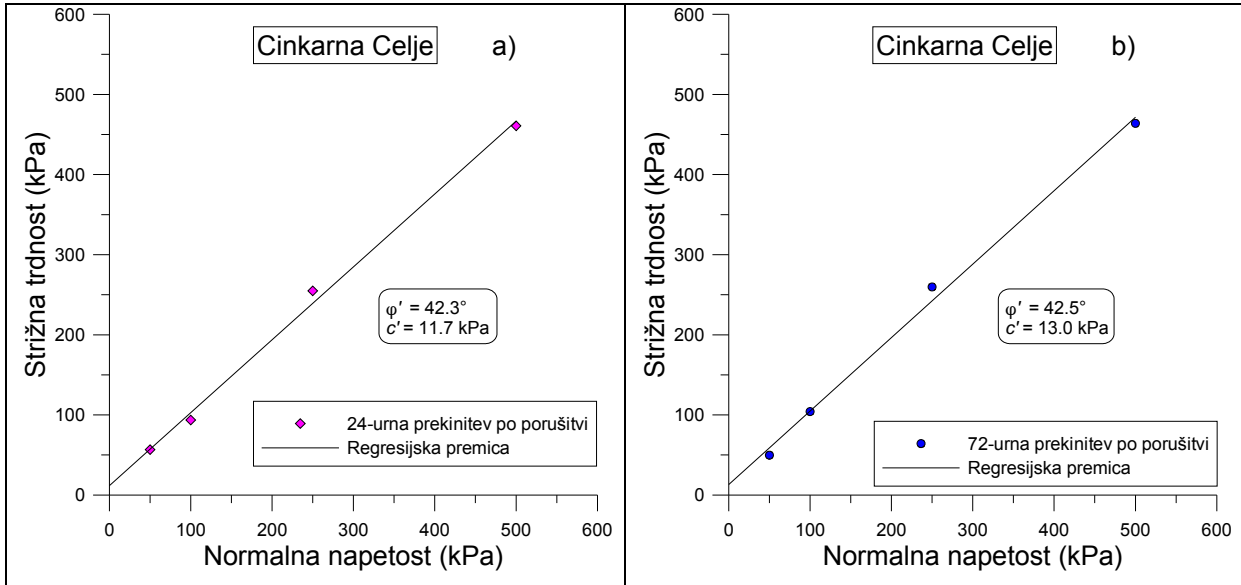
Slika B.2: Odvisnost med normalno efektivno napetostjo in strižno trdnostjo pri preiskavi direktnega striga, prekinjeni za a) 24 ur in za b) 72 ur, na energetski TET

Figure B.2: Coulomb envelopes from direct shear test with a) 24-hours and b) 72-hours resting time after failure on FGD gypsum TET



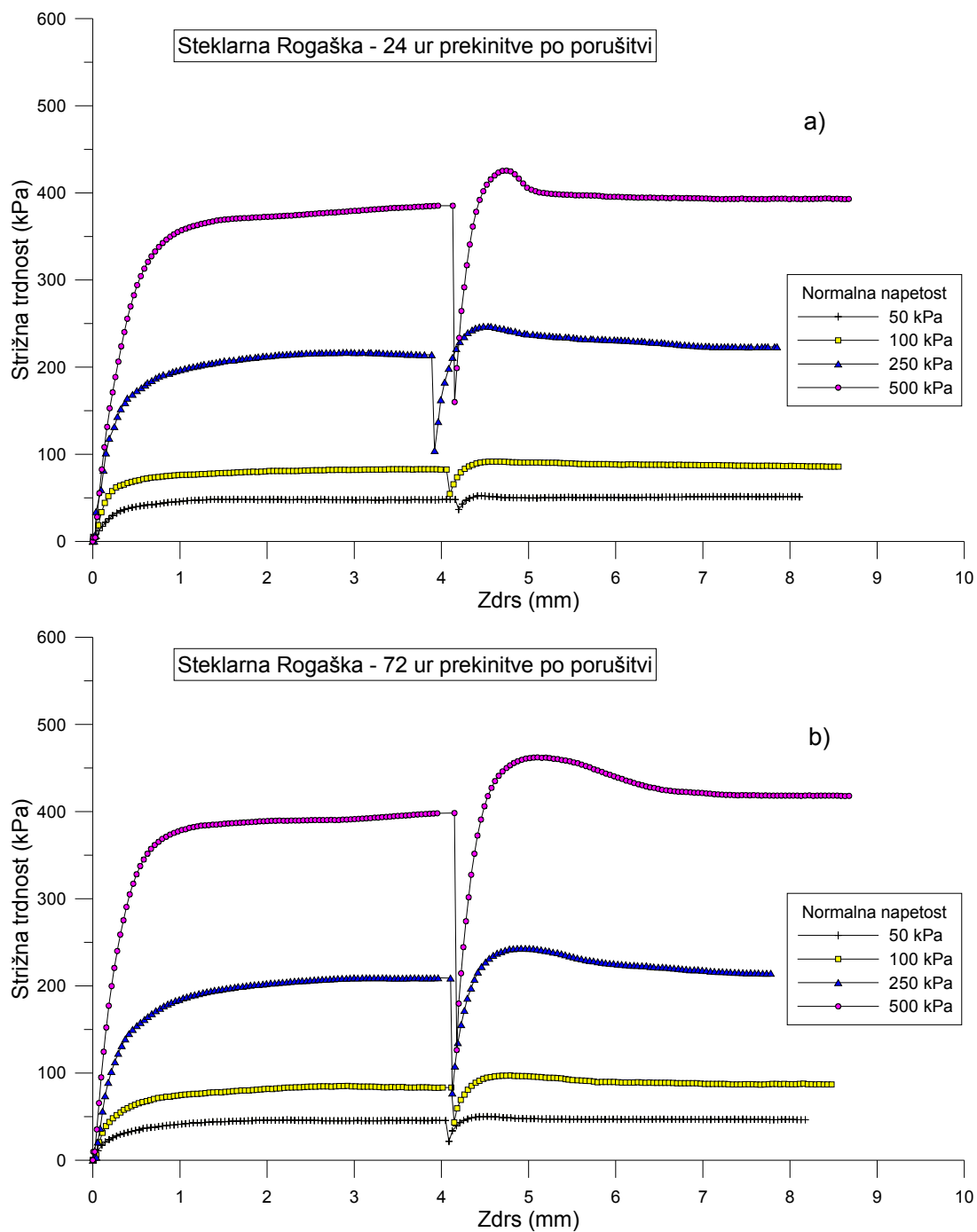
Slika B.3: Rezultat preiskave direktnega striga, po poružitvi prekinjenega za a) 24 ur in b) 72 ur, na titanovi sadri CC pri 4 različnih normalnih obremenitvah

Figure B.3: Shear stress/displacement curves as result of direct shear tests with a) 24-hours and b) 72-hours resting time after failure on titanium gypsum CC



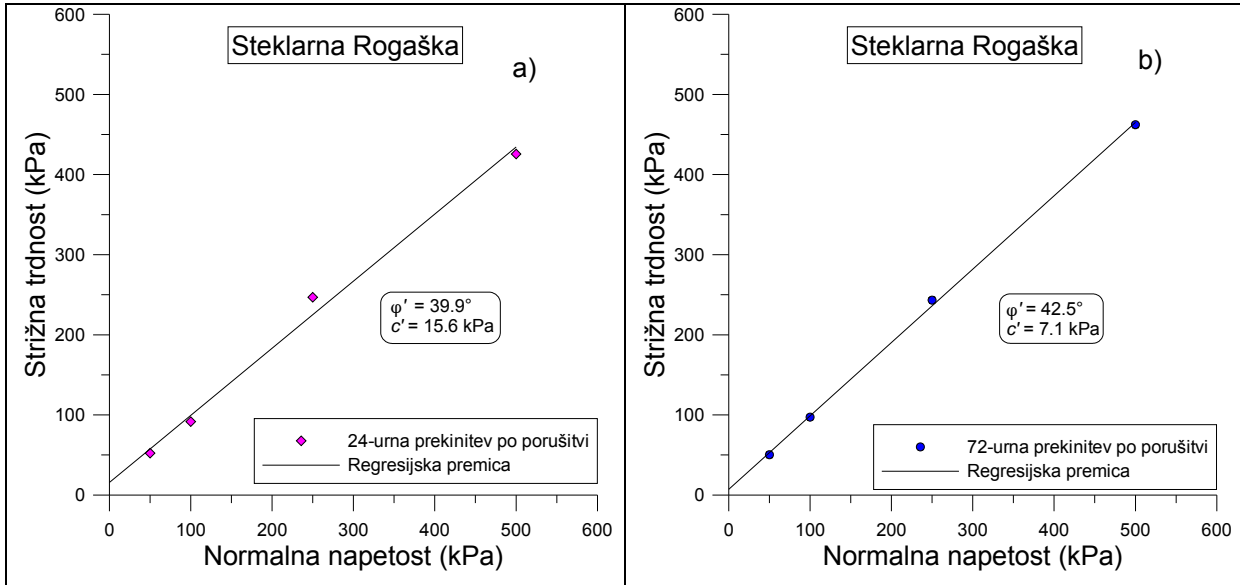
Slika B.4: Odvisnost med normalno efektivno napetostjo in strižno trdnostjo pri preiskavi direktnega striga, prekinjeni za a) 24 ur in za b) 72 ur, na titanovi sadri CC

Figure B.4: Coulomb envelopes from direct shear test with a) 24-hours and b) 72-hours resting time after failure on titanium gypsum CC



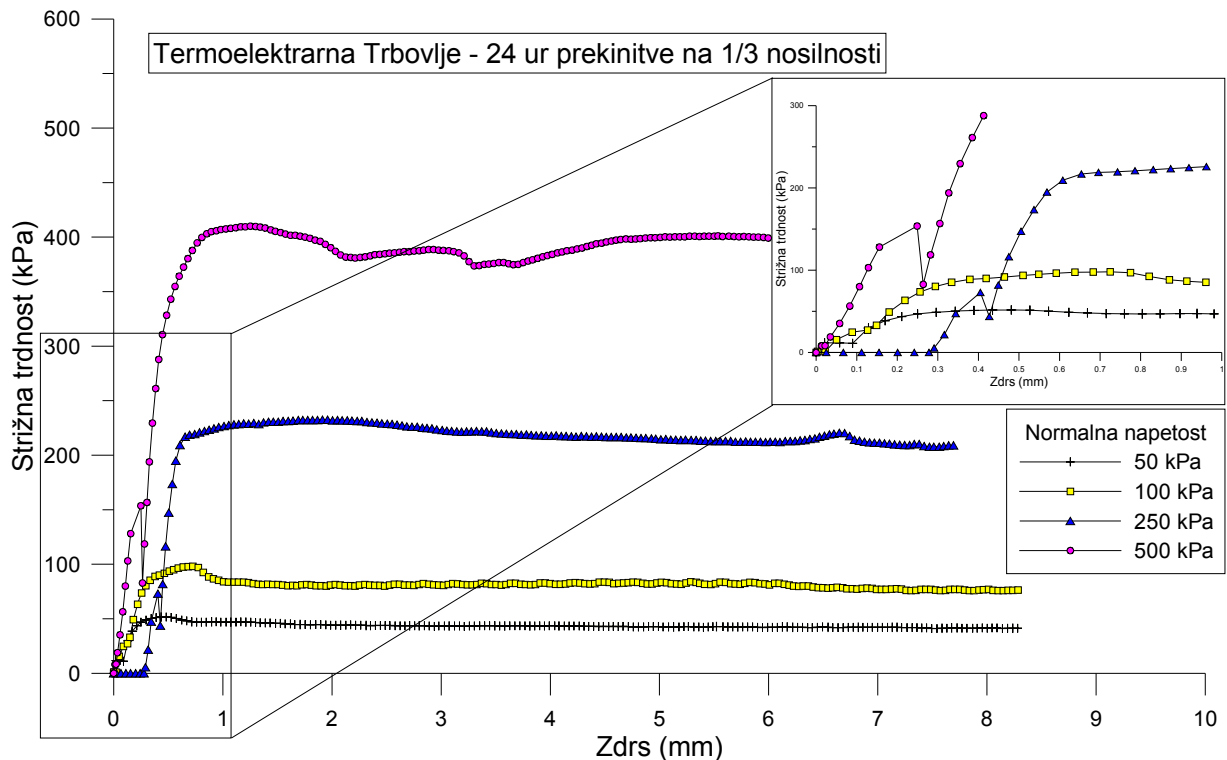
Slika B.5: Rezultat preiskave direktnega striga, po poružitvi prekinjenega za a) 24 ur in b) 72 ur, na steklarski sadri SR pri 4 različnih normalnih obremenitvah

Figure B.5: Shear stress/displacement curves as result of direct shear tests with a) 24-hours and b) 72-hours resting time after failure on glass gypsum SR



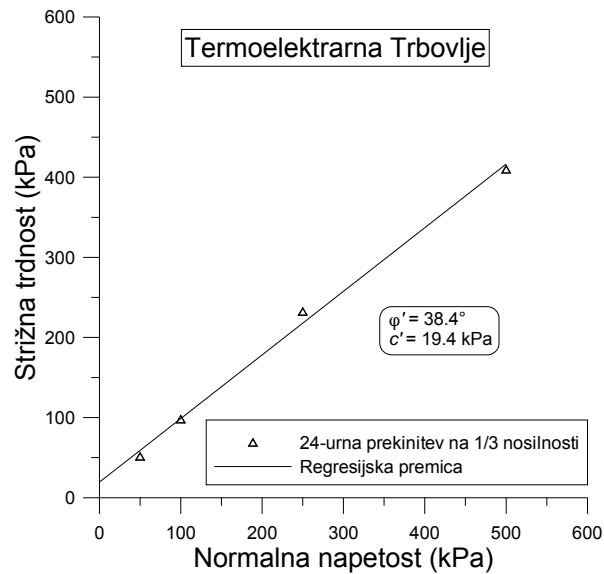
Slika B.6: Odvisnost med normalno efektivno napetostjo in strižno trdnostjo pri preiskavi direktnega striga, prekinjeni za a) 24 ur in b) 72 ur, na steklarski sadri SR

Figure B.6: Coulomb envelopes from direct shear test with a) 24-hours and b) 72-hours resting time after failure on glass gypsum SR

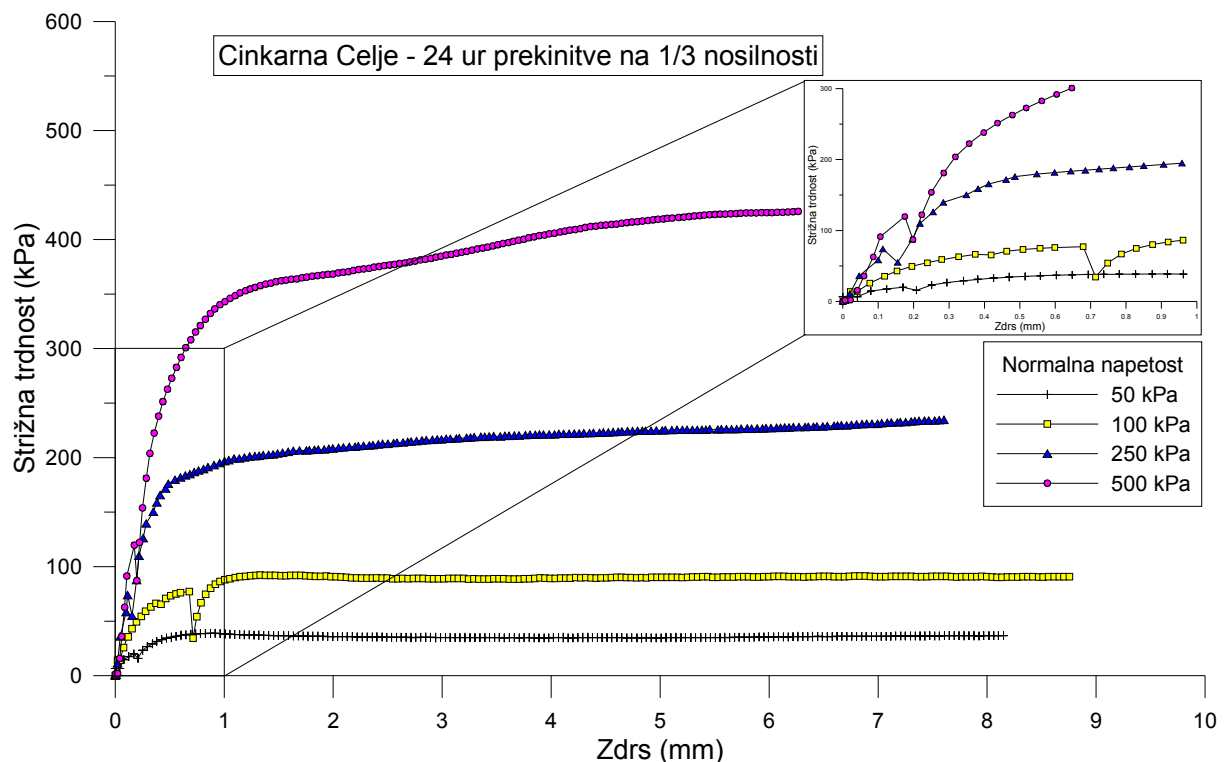


Slika B.7: Rezultat preiskave direktnega striga, prekinjenega na 1/3 vrednosti strižne trdnosti, na energetski sadri TET pri 4 različnih normalnih obremenitvah

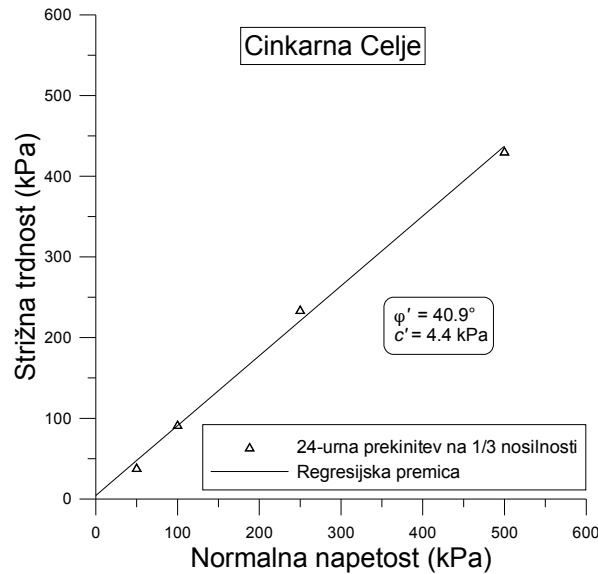
Figure B.7: Shear stress/displacement curves as result of direct shear tests which have been stopped at value of 1/3 shear strenght and carried on after 24 hours - FGD gypsum TET



Slika B.8: Odvisnost med normalno efektivno napetostjo in strižno trdnostjo pri preiskavi direktnega striga, prekinjeni na 1/3 vrednosti strižne trdnosti na energetski sadri TET
Figure B.8: Coulomb envelopes from direct shear tests which have been stopped at value of 1/3 shear strength and carried on after 24 hours - FGD gypsum TET

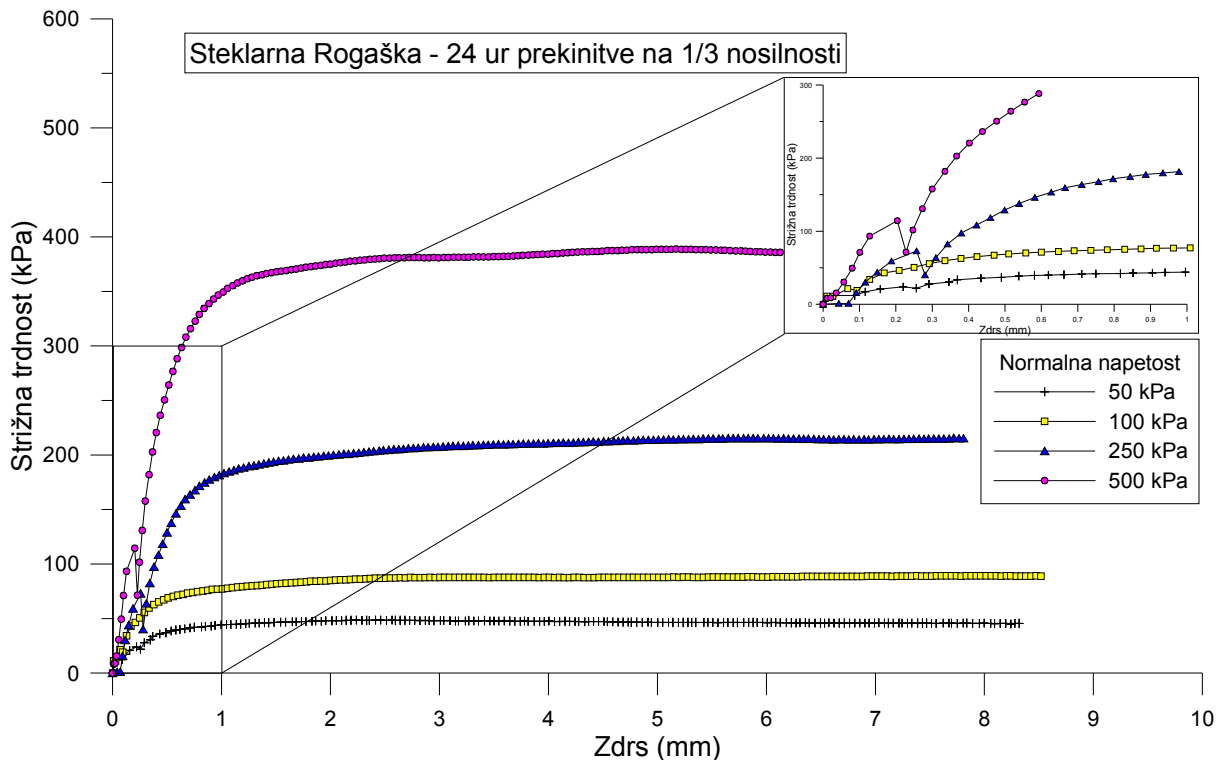


Slika B.9: Rezultat preiskave direktnega striga, prekinjenega na 1/3 vrednosti strižne trdnosti, na titanovi sadri CC pri 4 različnih normalnih obremenitvah
Figure B.9: Shear stress/displacement curves as result of direct shear tests which have been stopped at value of 1/3 shear strength and carried on after 24 hours - titanium gypsum CC



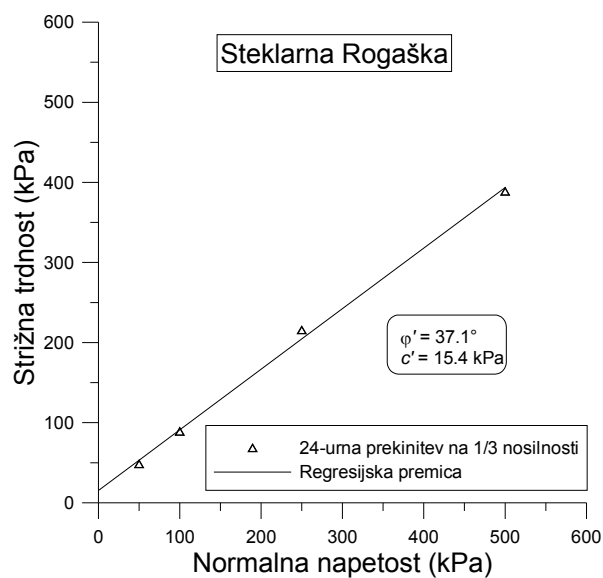
Slika B.10: Odvisnost med normalno efektivno napetostjo in strižno trdnostjo pri preiskavi direktnega striga, prekinjeni na 1/3 vrednosti strižne trdnosti na titanovi sadri CC

Figure B.10: Coulomb envelopes from direct shear tests which have been stopped at value of 1/3 shear strength and carried on after 24 hours - titanium gypsum CC



Slika B.11: Rezultat preiskave direktnega striga, prekinjenega na 1/3 vrednosti strižne trdnosti, na steklarski sadri SR pri 4 različnih normalnih obremenitvah

Figure B.11: Shear stress/displacement curves as result of direct shear tests which have been stopped at value of 1/3 shear strength and carried on after 24 hours - glass gypsum SR



Slika B.12: Odvisnost med normalno efektivno napetostjo in strižno trdnostjo pri preiskavi direktnega striga, prekinjeni na 1/3 vrednosti strižne trdnosti na steklarski sadri SR

Figure B.12: Coulomb envelopes from direct shear tests which have been stopped at value of 1/3 shear strength and carried on after 24 hours - glass gypsum SR

C: VREDNOSTI MAKSIMALNE STRIŽNE NAPETOSTI PRI RAZLIČNIH STRIŽNIH PREIZKUSIH NA KEMIČNIH SADRAH

Preglednica C.1: Vrednosti maksimalne strižne napetosti pri različnih strižnih preizkusih na energetski sadri TET

Table C.1: Maximum shear resistance from different shear tests on FGD gypsum TET

Direktni strig		24-urna prekinitev po poružitvi		72-urna prekinitev po poružitvi		24-urna prekinitev na 1/3 strižne trdnosti	
Normalna napetost (kPa)	Maksimalna strižna napetost (kPa)	Maksimalna strižna napetost (kPa)	Sprememba maksimalne strižne napetosti (%)	Maksimalna strižna napetost (kPa)	Sprememba maksimalne strižne napetosti (%)	Maksimalna strižna napetost (kPa)	Sprememba maksimalne strižne napetosti (%)
50	56,67	47,22	-16,67	47,50	-16,18	51,67	-8,82
100	91,94	100,28	9,06	101,67	10,57	98,06	6,65
250	248,42	265,83	7,01	290,28	16,85	232,53	-6,40
500	399,72	490,56	22,73	536,11	34,12	410,00	2,57

Opomba: sprememba maksimalne strižne napetosti se nanaša na rezultat direktnega striga

Preglednica C.2: Vrednosti maksimalne strižne napetosti pri različnih strižnih preizkusih na titanovi sadri CC

Table C.2: Maximum shear resistance from different shear tests on titanium gypsum CC

Direktni strig		24-urna prekinitev po poružitvi		72-urna prekinitev po poružitvi		24-urna prekinitev na 1/3 strižne trdnosti	
Normalna napetost (kPa)	Maksimalna strižna napetost (kPa)	Maksimalna strižna napetost (kPa)	Sprememba maksimalne strižne napetosti (%)	Maksimalna strižna napetost (kPa)	Sprememba maksimalne strižne napetosti (%)	Maksimalna strižna napetost (kPa)	Sprememba maksimalne strižne napetosti (%)
50	44,72	56,67	26,71	49,72	11,18	38,89	-13,04
100	88,33	93,61	5,97	104,17	17,92	92,22	4,40
250	236,81	254,83	7,61	259,72	9,68	234,67	-0,90
500	438,33	460,83	5,13	463,89	5,83	431,11	-1,65

Opomba: sprememba maksimalne strižne napetosti se nanaša na rezultat direktnega striga

Preglednica C.3: Vrednosti maksimalne strižne napetosti pri različnih strižnih preizkusih na steklarski sadri SR

Table C.3: Maximum shear resistance from different shear tests on glass gypsum SR

Direktni strig		24-urna prekinitev po poružitvi		72-urna prekinitev po poružitvi		24-urna prekinitev na 1/3 strižne trdnosti	
Normalna napetost (kPa)	Maksimalna strižna napetost (kPa)	Maksimalna strižna napetost (kPa)	Sprememba maksimalne strižne napetosti (%)	Maksimalna strižna napetost (kPa)	Sprememba maksimalne strižne napetosti (%)	Maksimalna strižna napetost (kPa)	Sprememba maksimalne strižne napetosti (%)
50	42,78	52,22	22,08	50,28	14,92	48,61	13,64
100	84,17	91,67	8,91	97,22	13,43	89,17	5,94
250	219,69	246,89	12,38	243,22	9,67	215,72	-1,81
500	383,06	425,56	11,09	462,22	17,13	388,89	1,52

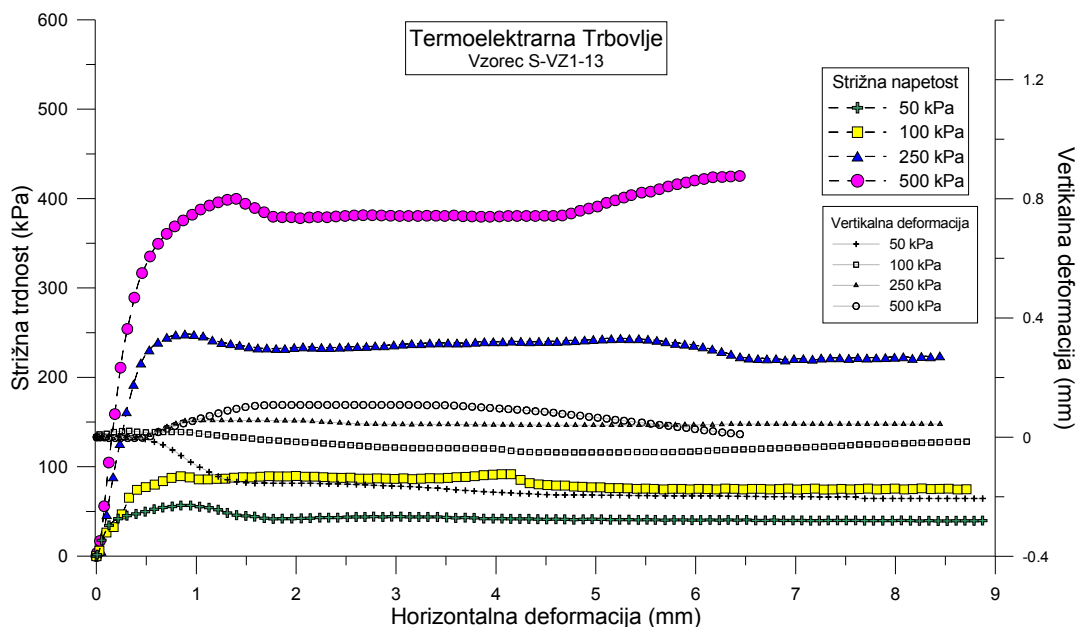
Opomba: sprememba maksimalne strižne napetosti se nanaša na rezultat direktnega striga

Preglednica C.4: Vrednosti strižnih kotov pri različnih strižnih preizkusih na kemičnih sadrah
Table C.4: Angles of shear resistance (in terms of effective stress) from different shear tests
on investigated synthetic gypsums

Vrsta sadre	TET		CC		SR	
Vrsta preiskave	φ' (°)	Sprememba strižnega kota (%)	φ' (°)	Sprememba strižnega kota (%)	φ' (°)	Sprememba strižnega kota (%)
Direktni strig	37,7		41,3		37,2	
24-urno mirovanje po poružitvi	44,6	18,3	42,3	2,4	39,9	7,3
72-urno mirovanje po poružitvi	47,5	26,0	42,5	2,9	42,5	14,2
24-urno mirovanje na 1/3 nosilnosti	38,4	1,9	40,9	-1,0	37,1	-0,3

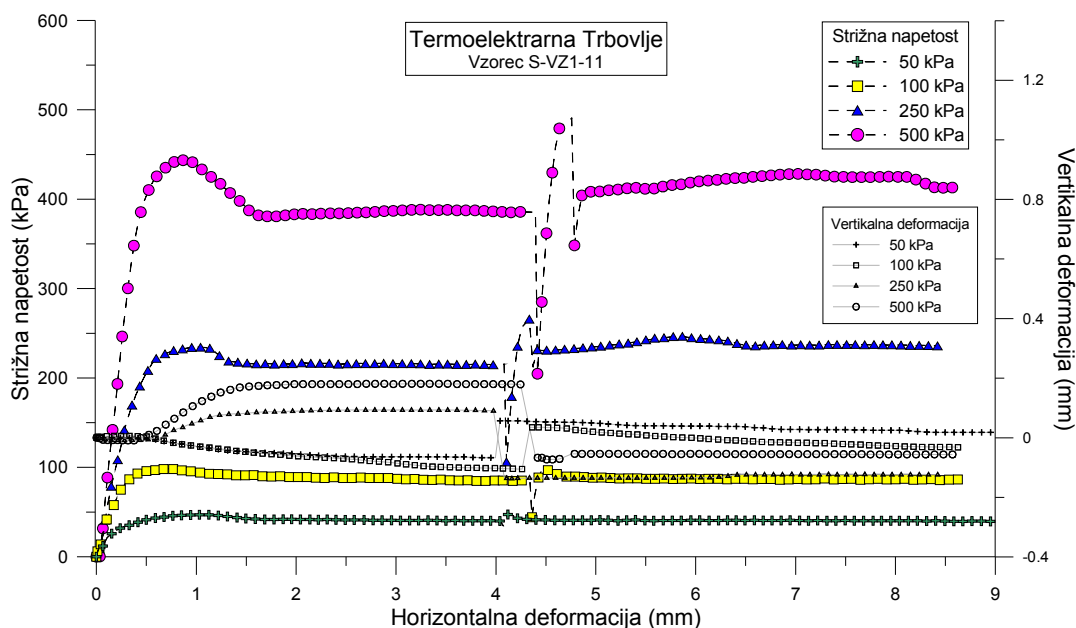
Opomba: sprememba strižnega kota se nanaša na rezultat direktnega striga

D: STRIŽNA TRDNOST IN VERTIKALNE DEFORMACIJE PRI STRIŽNIH PREIZKUSIH NA KEMIČNIH SADRAH



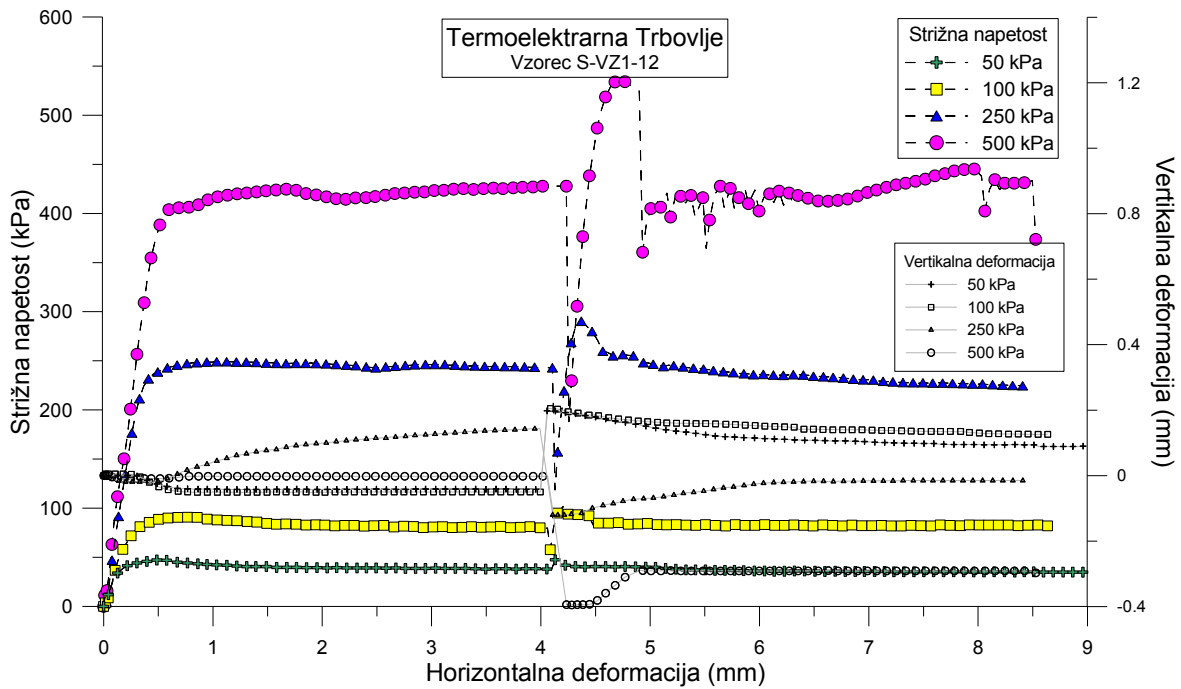
Slika D.1: Strižna napetost in vertikalne deformacije pri direktnem strigu energetske sadre TET

Figure D.1: Shear stress and vertical strain curves from direct shear tests on FGD gypsum TET



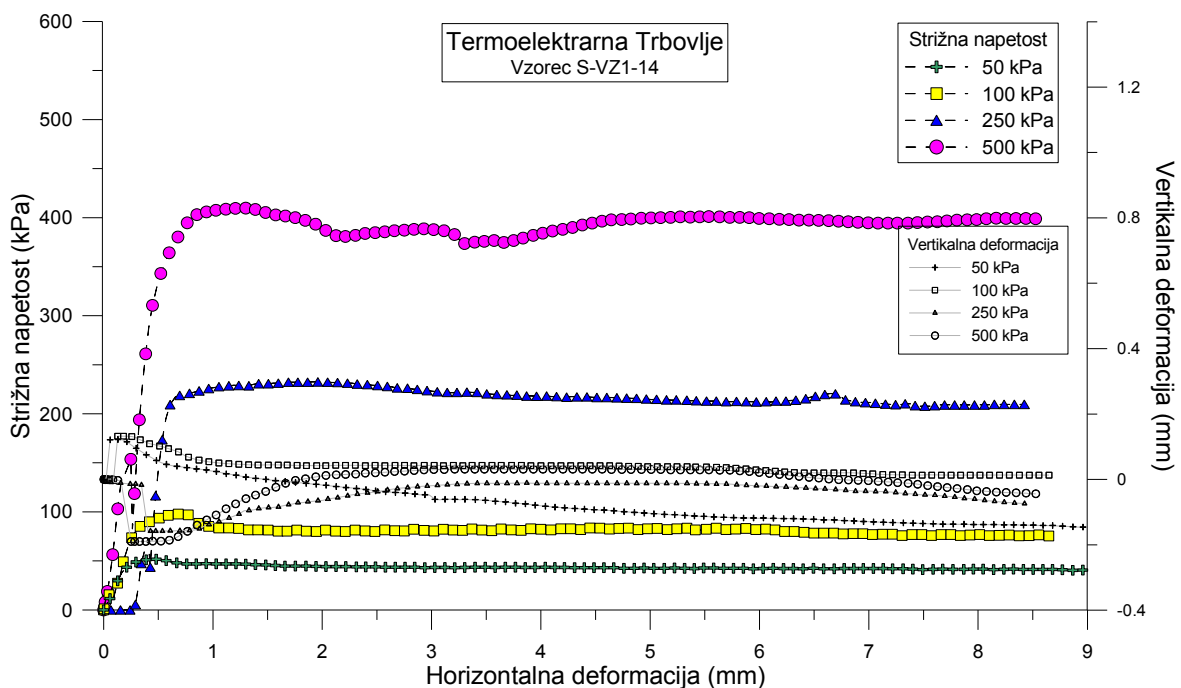
Slika D.2: Strižna napetost in vertikalne deformacije pri poskusu s 24-urno prekinitvijo striga energetske sadre

Figure D.2: Shear stress and vertical strain curves from direct shear test with 24-hours resting time after failure on FGD gypsum TET



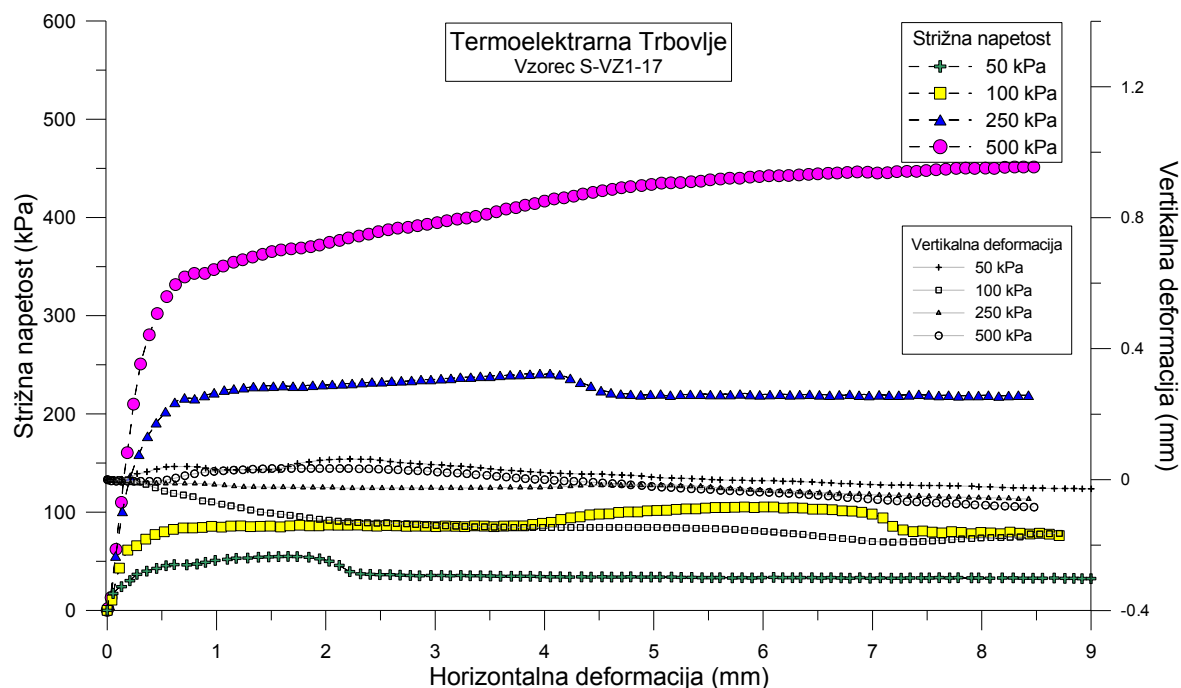
Slika D.3: Strižna napetost in vertikalne deformacije pri poskusu z 72-urno prekinitvijo striga energetske sadre TET

Figure D.3: Shear stress and vertical strain curves from direct shear test with 72-hours resting time after failure on FGD gypsum TET



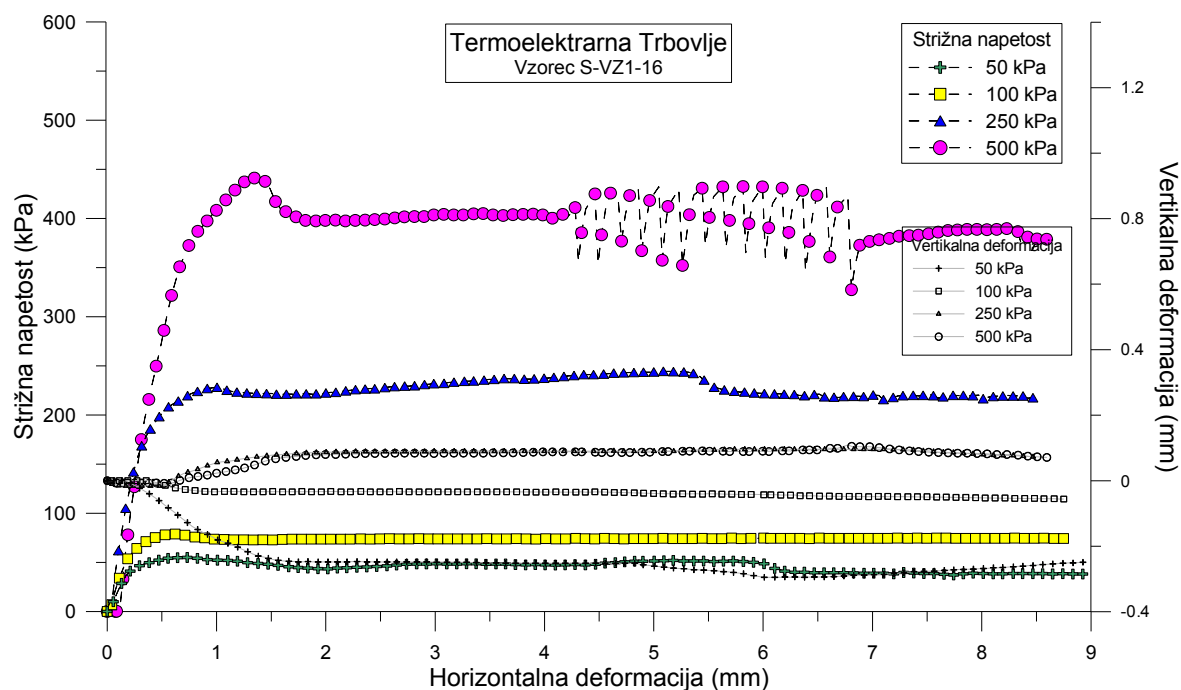
Slika D.4: Strižna napetost in vertikalne deformacije pri poskusu s 24-urno prekinitvijo striga na 1/3 strižne trdnosti energetske sadre TET

Figure D.4: Shear stress and vertical strain curves from direct shear test with 24-hours resting time on 1/3 of shear strength on FGD gypsum TET



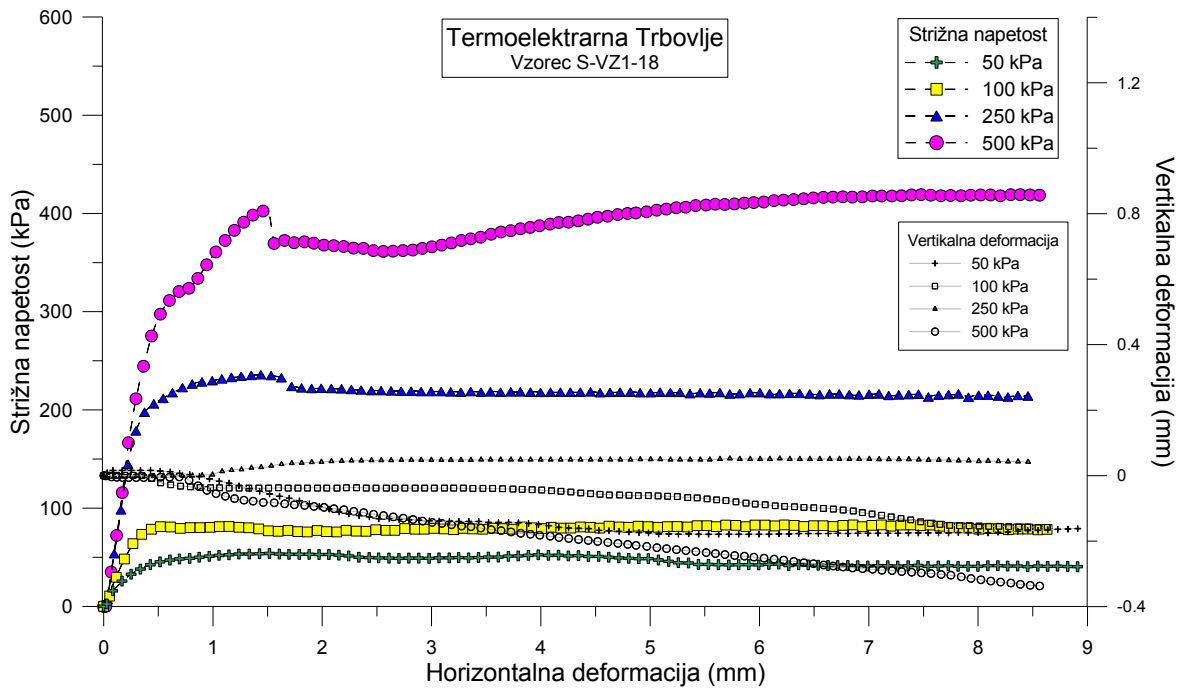
Slika D.5: Strižna napetost in vertikalne deformacije pri poskusu direktnega striga z 1 dnevom konsolidacije na energetski sadri TET

Figure D.5: Shear stress and vertical strain curves from direct shear test with consolidation lasting one day on FGD gypsum TET



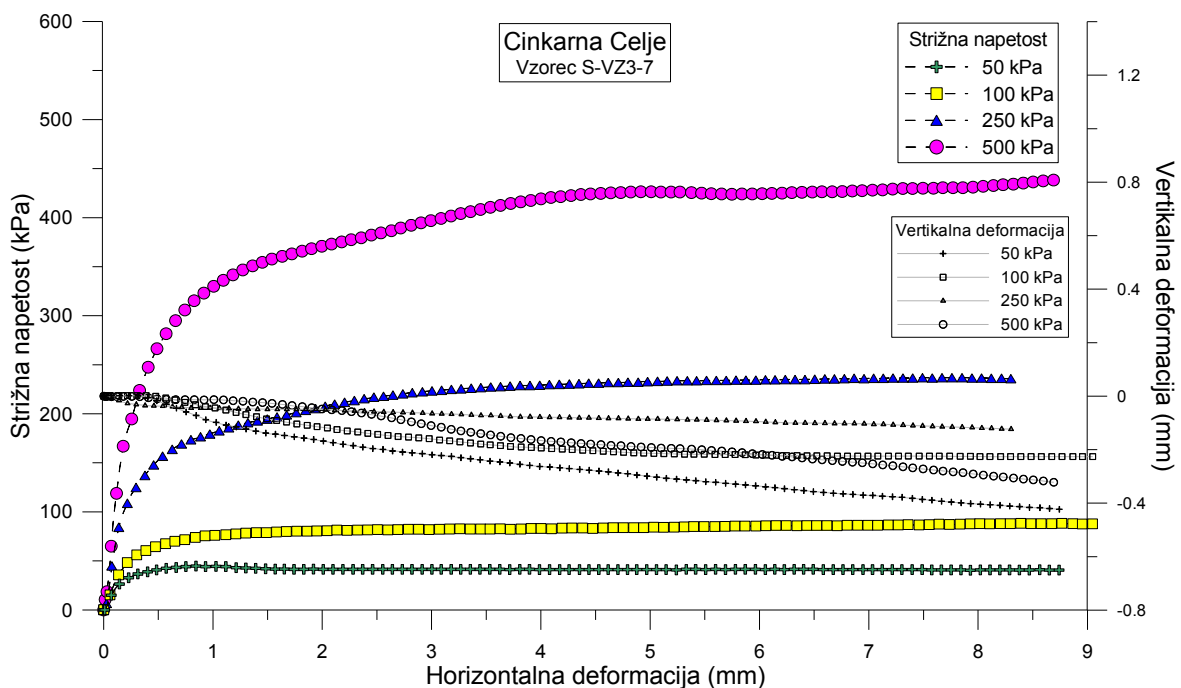
Slika D.6: Strižna napetost in vertikalne deformacije pri poskusu direktnega striga s 3 dnevi konsolidacije na energetski sadri TET

Figure D.6: Shear stress and vertical strain curves from direct shear test with consolidation lasting three days on FGD gypsum TET



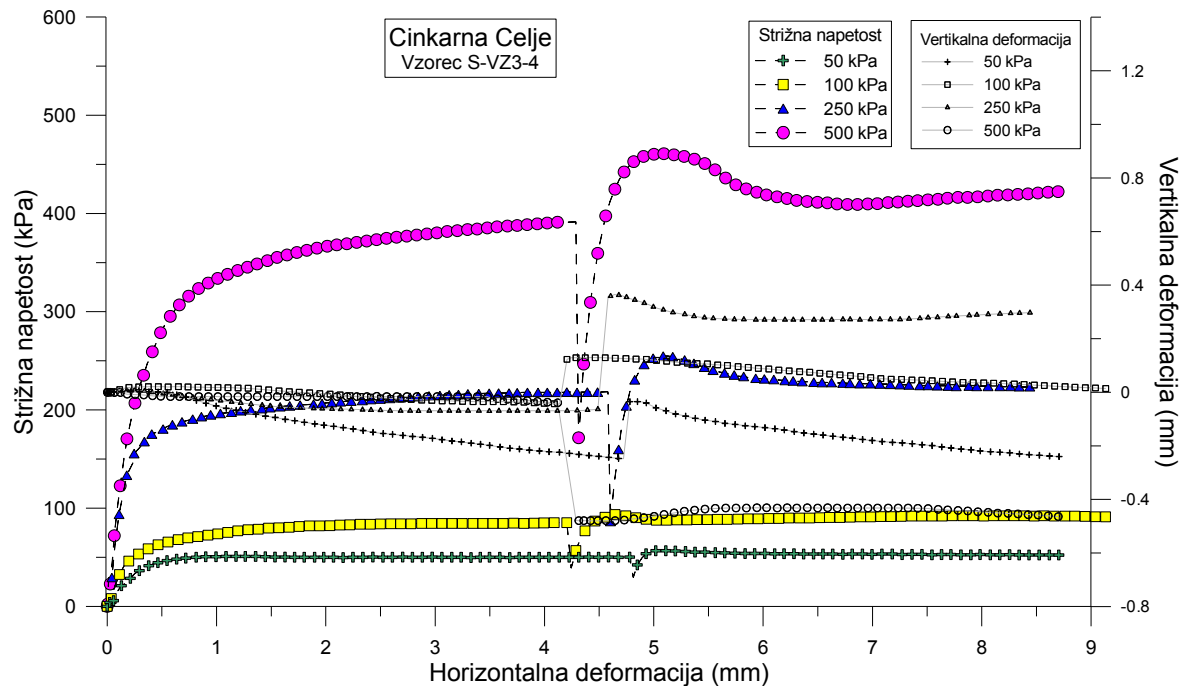
Slika D.7: Strižna napetost in vertikalne deformacije pri poskusu direktnega striga s 5 dnevi konsolidacije na energetski sadri TET

Figure D.7: Shear stress and vertical strain curves from direct shear test with consolidation lasting five days on FGD gypsum TET



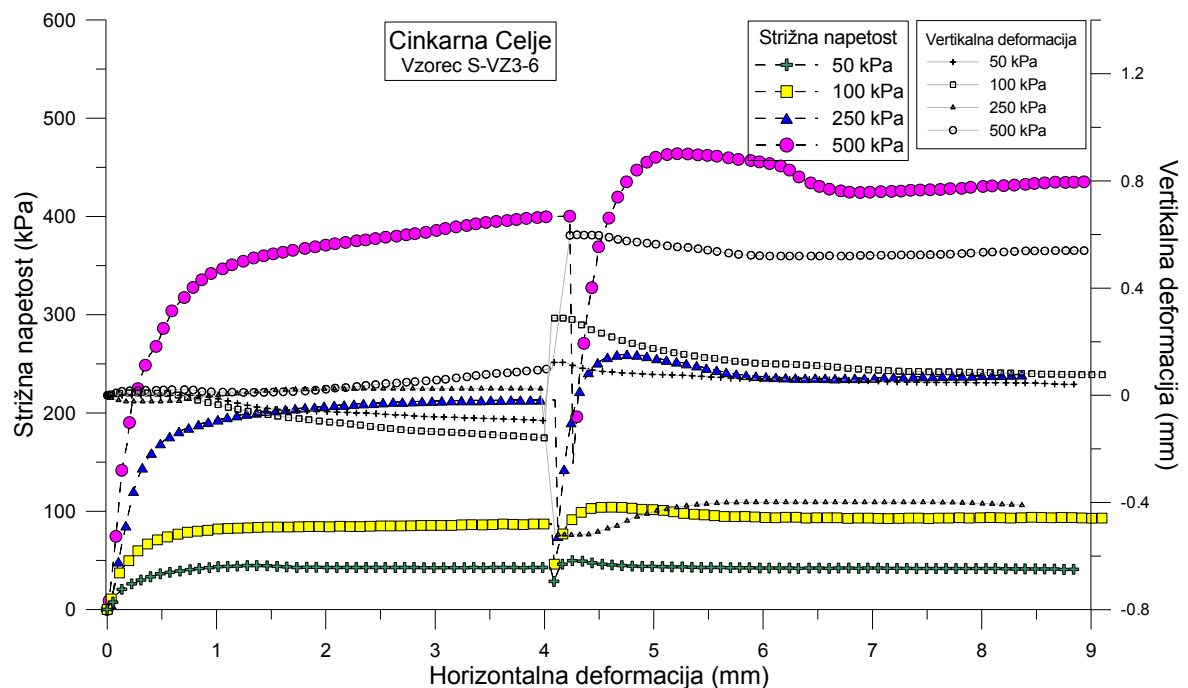
Slika D.8: Strižna napetost in vertikalne deformacije pri direktnem strigu titanove sadre CC

Figure D.8: Shear stress and vertical strain curves from direct shear tests on titanium gypsum CC



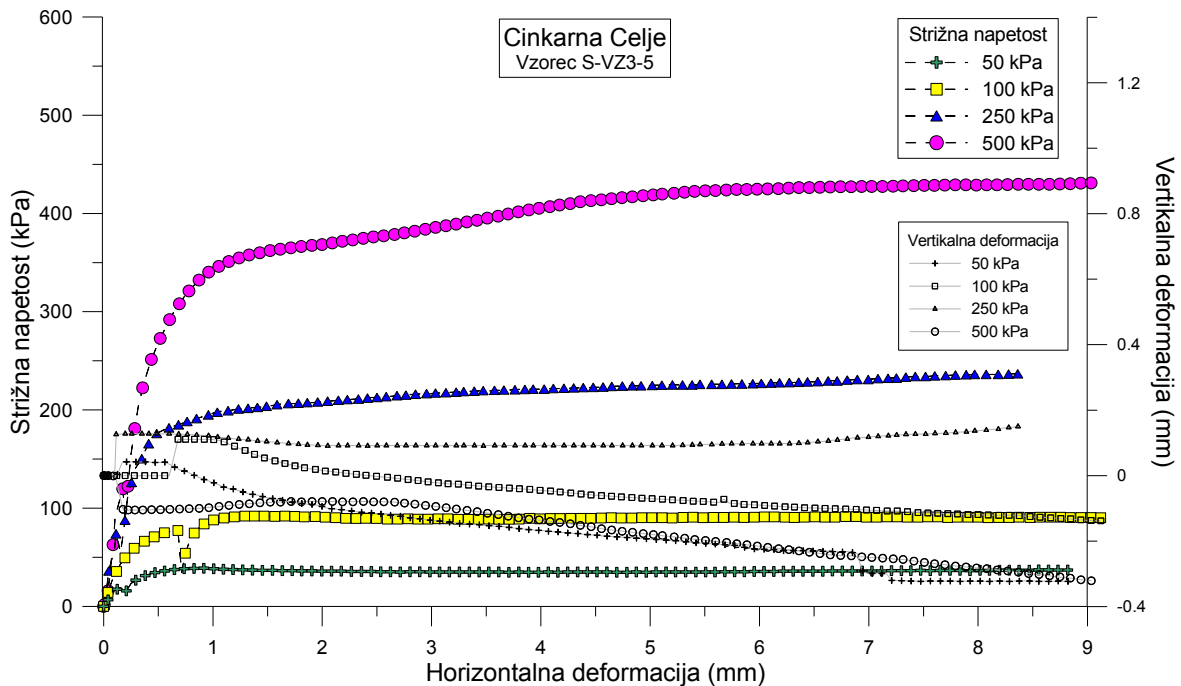
Slika D.9: Strižna napetost in vertikalne deformacije pri poskusu s 24-urno prekinitvijo striga titanove sadre CC

Figure D.9: Shear stress and vertical strain curves from direct shear test with 24-hours resting time after failure on titanium gypsum CC



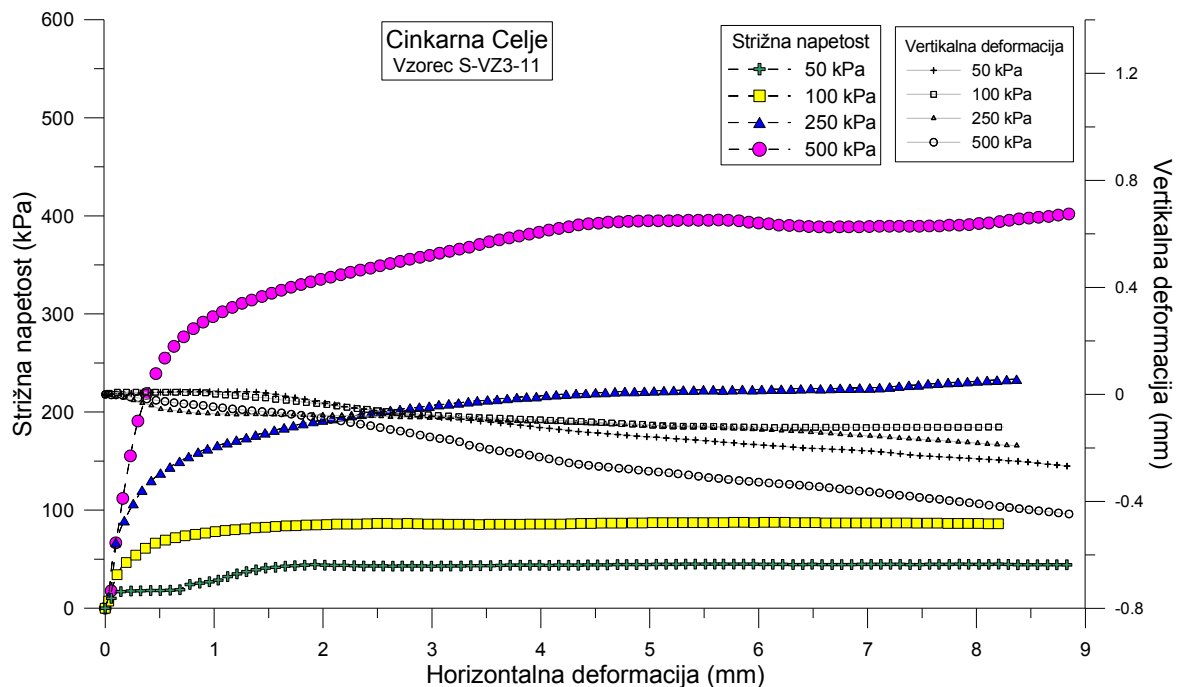
Slika D.10: Strižna napetost in vertikalne deformacije pri poskusu s 72-urno prekinitvijo striga titanove sadre CC

Figure D.10: Shear stress and vertical strain curves from direct shear test with 72-hours resting time after failure on titanium gypsum CC



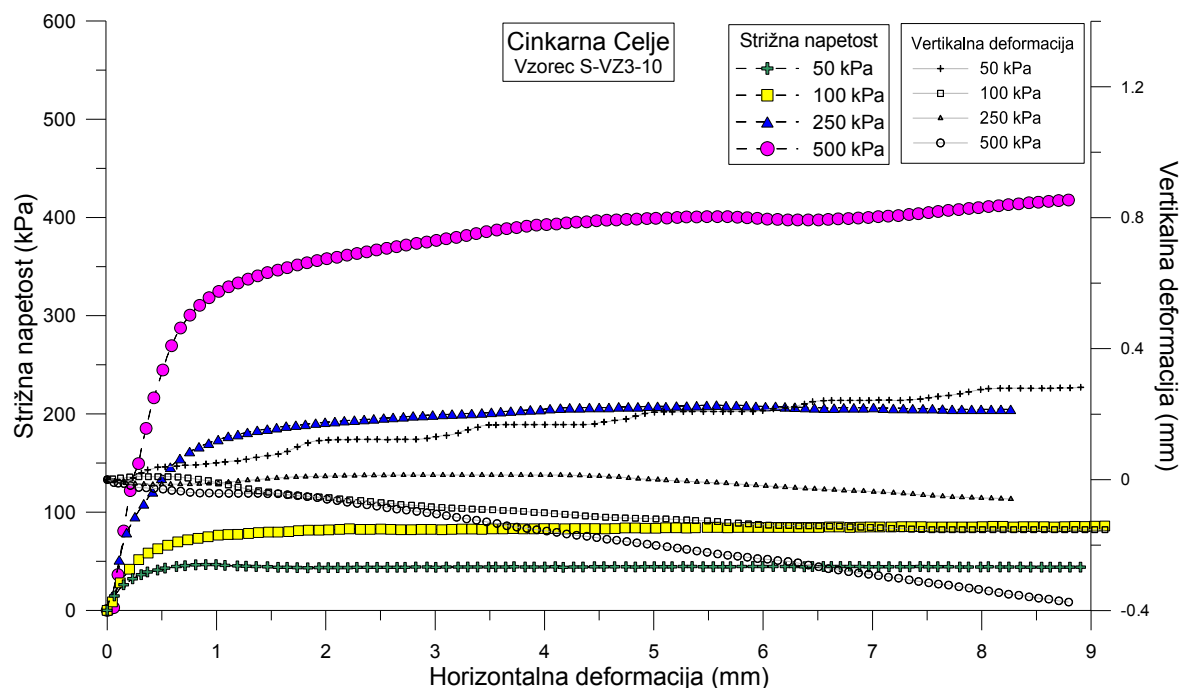
Slika D.11: Strižna napetost in vertikalne deformacije pri poskusu s 24-urno prekinitvijo striga na 1/3 strižne trdnosti titanove sadre CC

Figure D.11: Shear stress and vertical strain curves from direct shear test with 24-hours resting time on 1/3 of shear strength on titanium gypsum CC



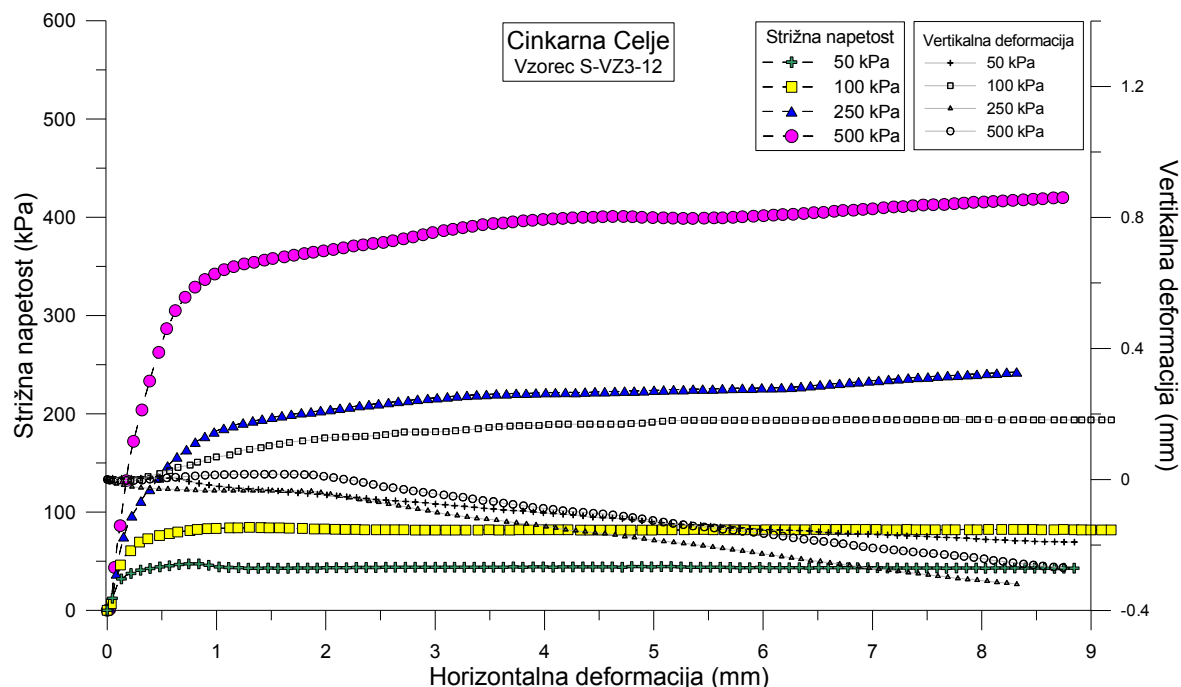
Slika D.12: Strižna napetost in vertikalne deformacije pri poskusu direktnega striga z 1 dnevom konsolidacije na titanovi sadri CC

Figure D.12: Shear stress and vertical strain curves from direct shear test with consolidation lasting one day on titanium gypsum CC



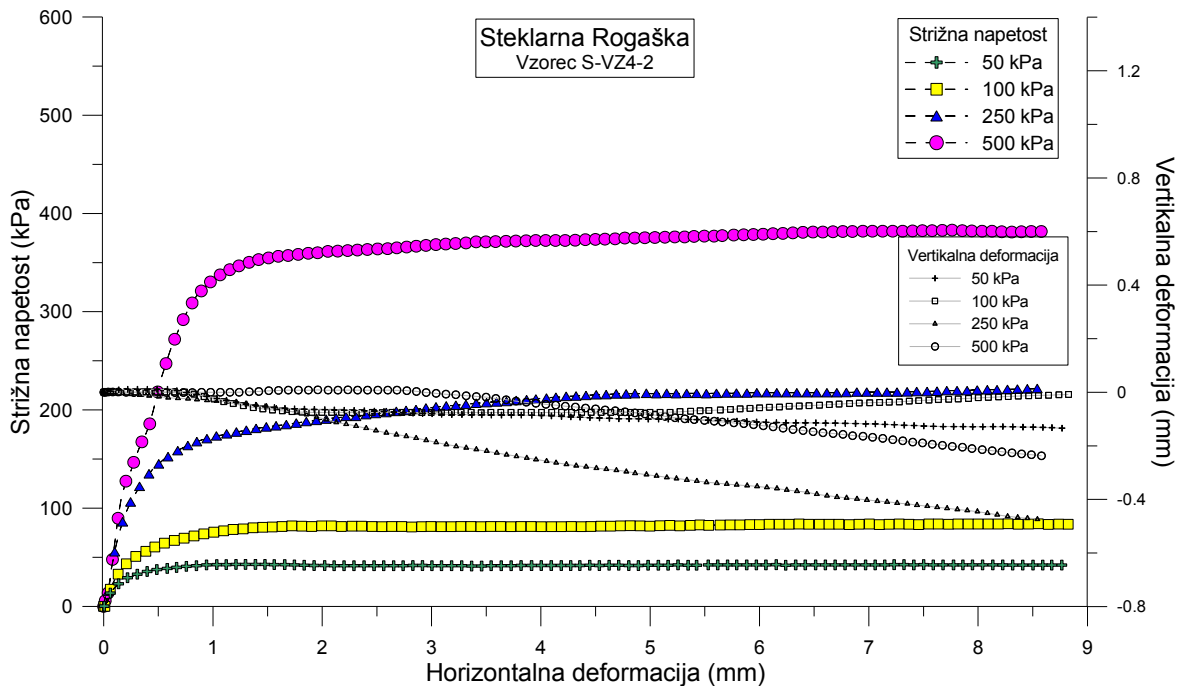
Slika D.13: Strižna napetost in vertikalne deformacije pri poskusu direktnega striga s 3 dnevi konsolidacije na titanovi sadri CC

Figure D.13: Shear stress and vertical strain curves from direct shear test with consolidation lasting three days on titanium gypsum CC



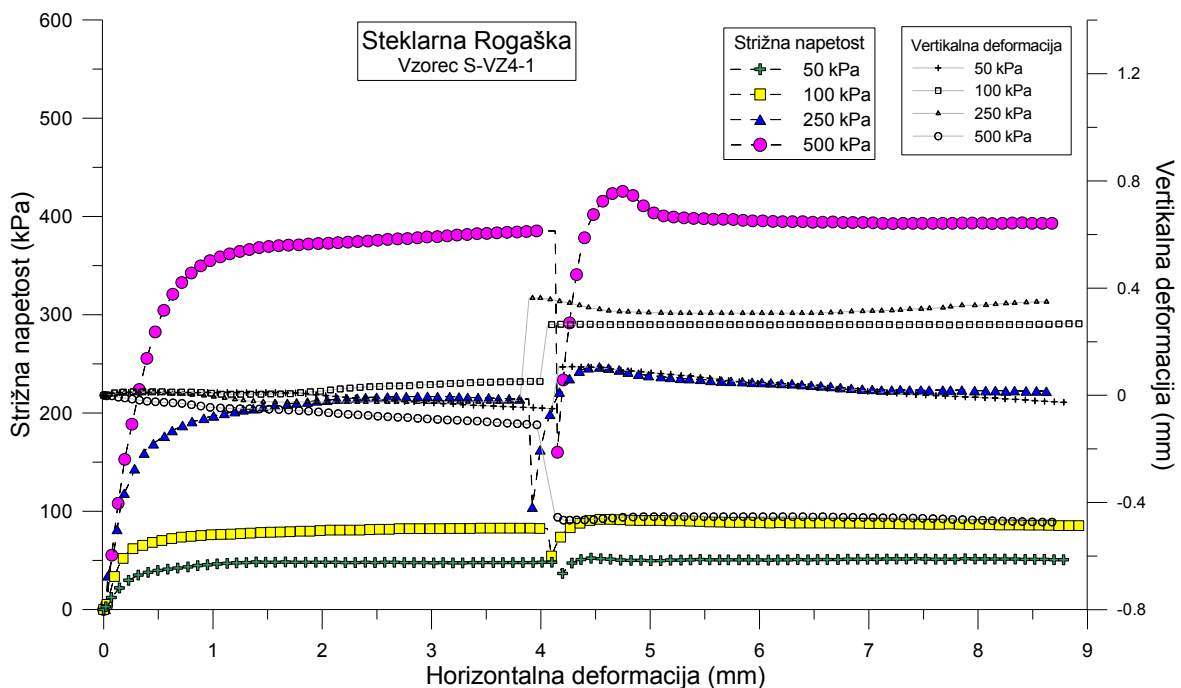
Slika D.14: Strižna napetost in vertikalne deformacije pri poskusu direktnega striga s 5 dnevi konsolidacije na titanovi sadri CC

Figure D.14: Shear stress and vertical strain curves from direct shear test with consolidation lasting five days on titanium gypsum CC



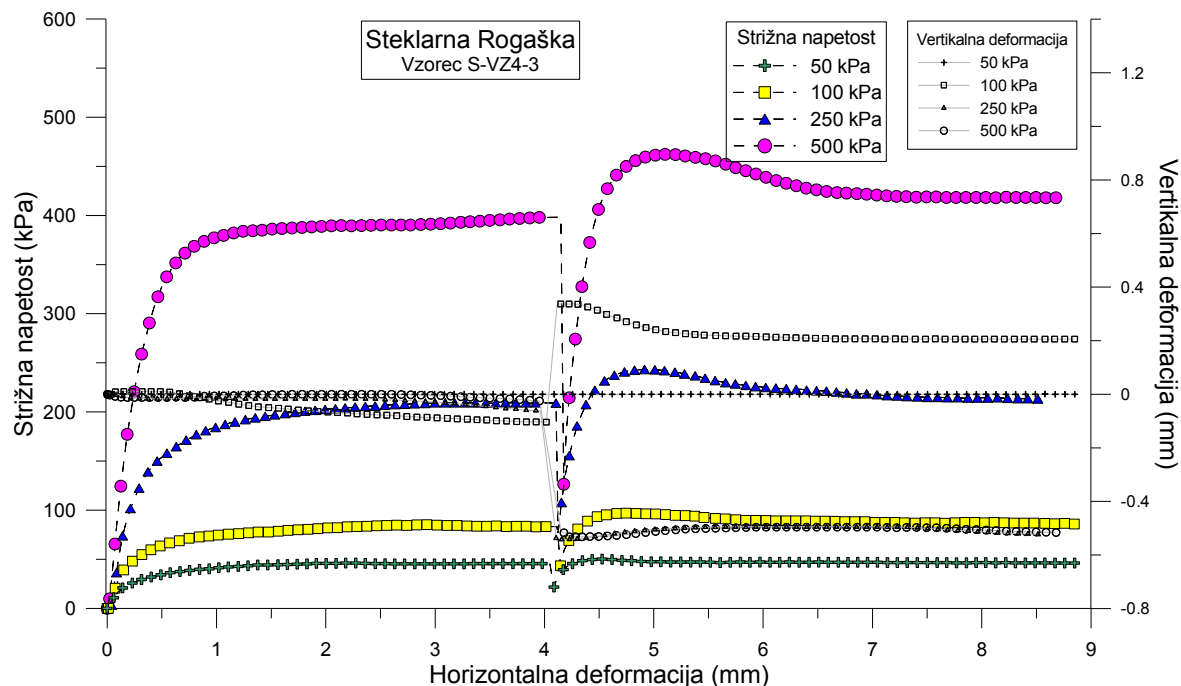
Slika D.15: Strižna napetost in vertikalne deformacije pri direktnem strigu steklarske sadre SR

Figure D.15: Shear stress and vertical strain curves from direct shear tests on glass gypsum SR



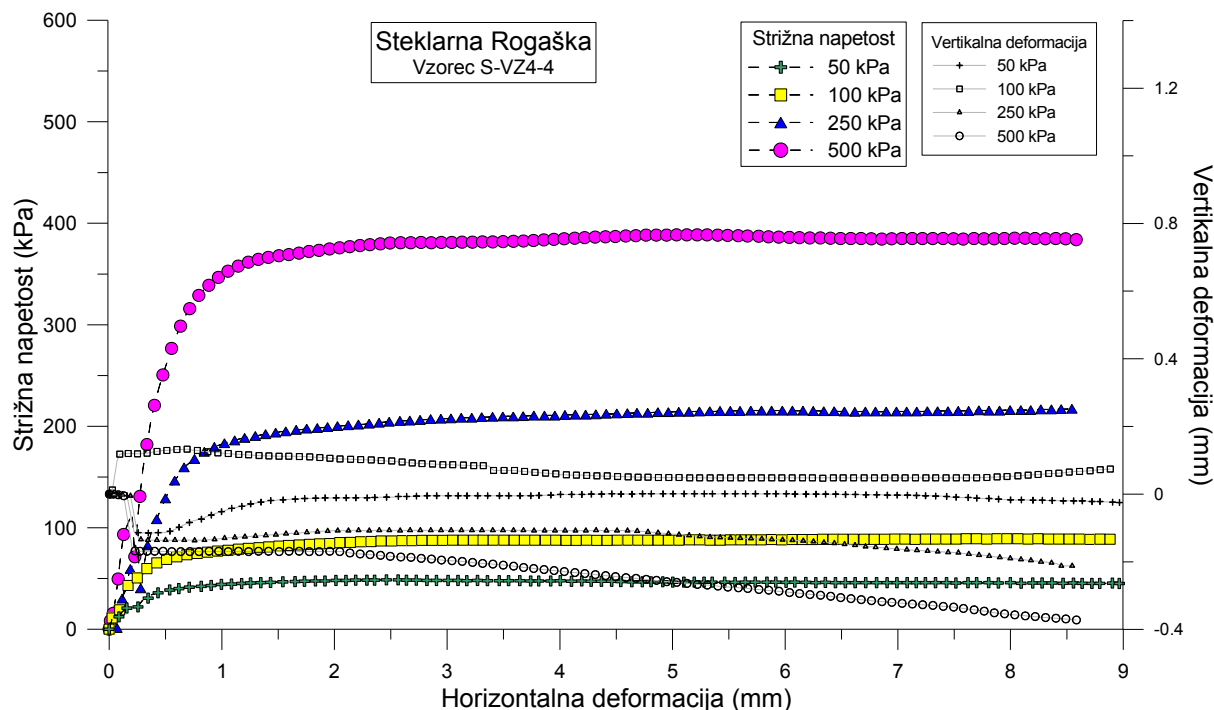
Slika D.16: Strižna napetost in vertikalne deformacije pri poskusu s 24-urno prekinitvijo striga steklarske sadre SR

Figure D.16: Shear stress and vertical strain curves from direct shear test with 24-hours resting time after failure on glass gypsum SR



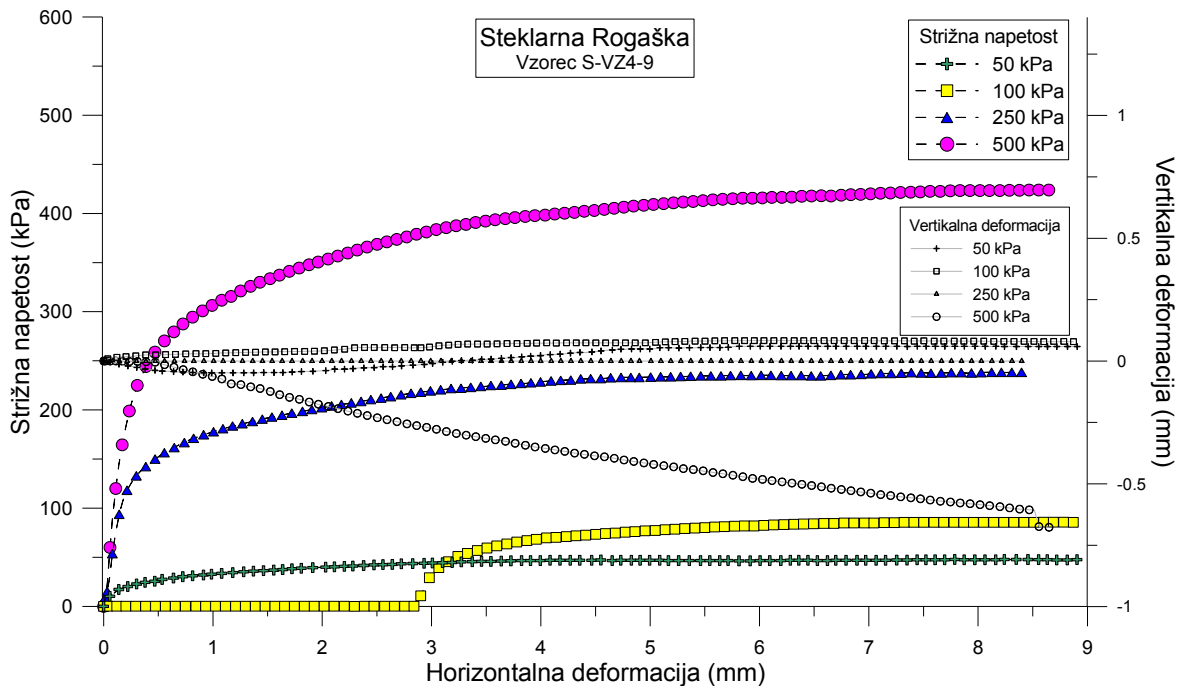
Slika D.17: Strižna napetost in vertikalne deformacije pri poskusu s 72-urno prekinitvijo striga steklarske sadre SR

Figure D.17: Shear stress and vertical strain curves from direct shear test with 72-hours resting time after failure on glass gypsum SR



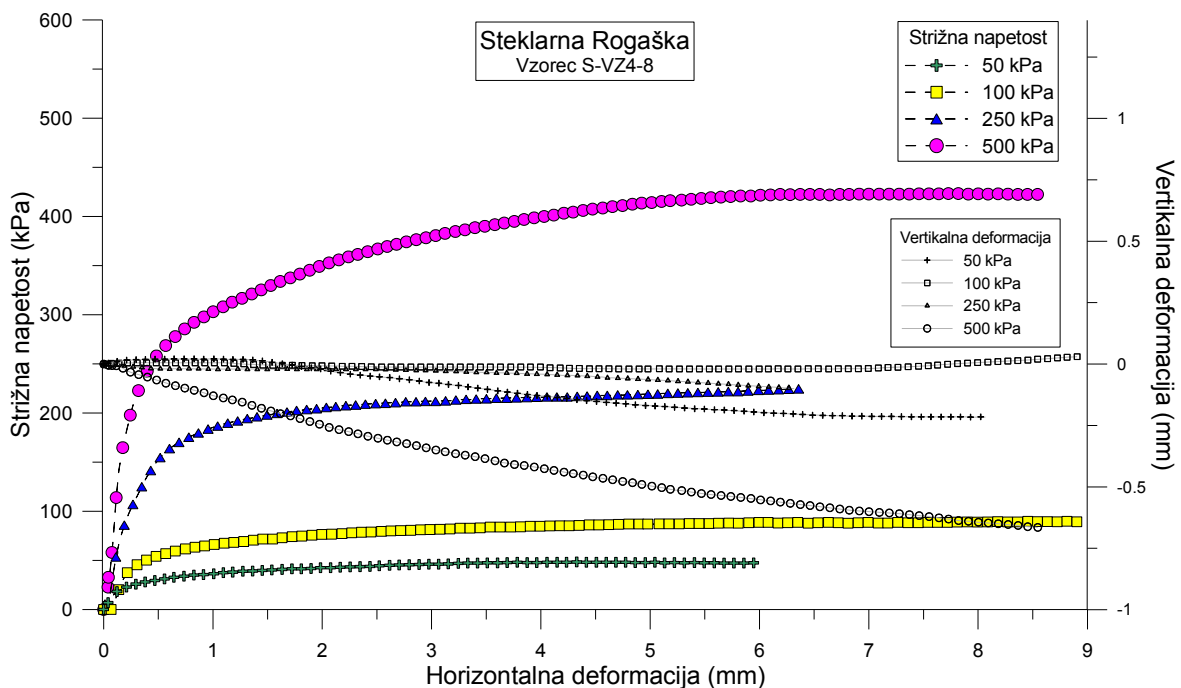
Slika D.18: Strižna napetost in vertikalne deformacije pri poskusu s 24-urno prekinitvijo striga na 1/3 strižne trdnosti steklarske sadre SR

Figure D.18: Shear stress and vertical strain curves from direct shear test with 24-hours resting time on 1/3 of shear strength on glass gypsum SR



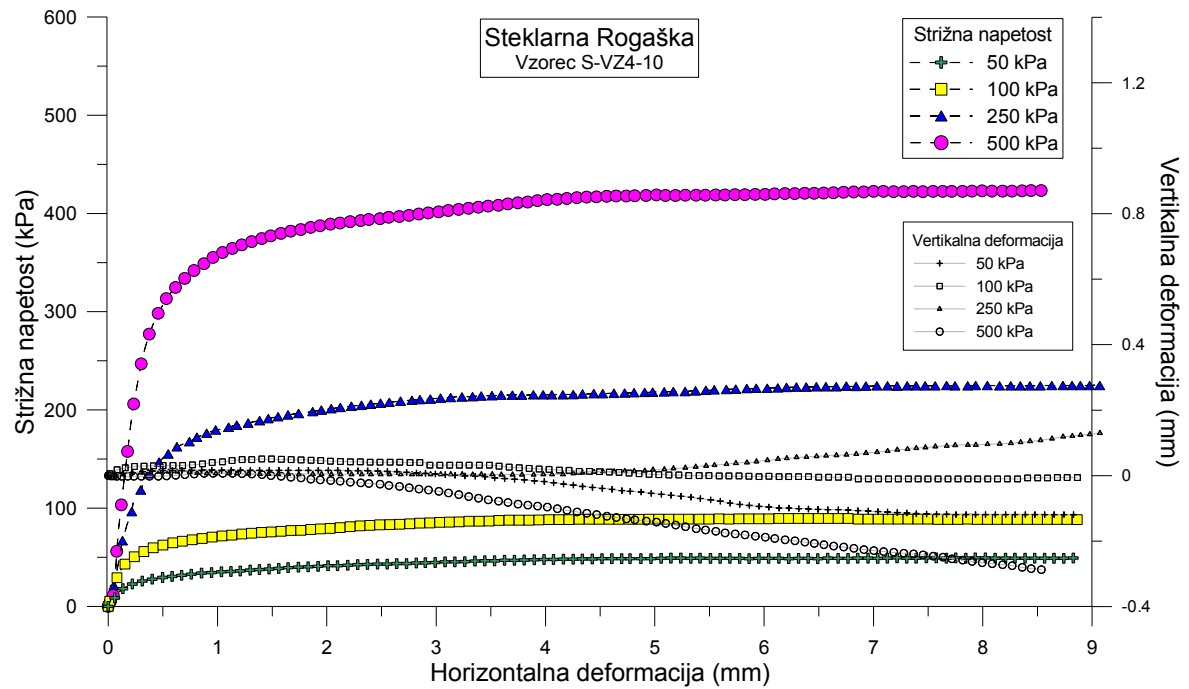
Slika D.19: Strižna napetost in vertikalne deformacije pri poskusu direktnega striga z 1 dnevom konsolidacije na steklarski sadri SR

Figure D.19: Shear stress and vertical strain curves from direct shear test with consolidation lasting one day on glass gypsum SR



Slika D.20: Strižna napetost in vertikalne deformacije pri poskusu direktnega striga s 3 dnevi konsolidacije na steklarski sadri SR

Figure D.20: Shear stress and vertical strain curves from direct shear test with consolidation lasting three days on glass gypsum SR



Slika D.21: Strižna napetost in vertikalne deformacije pri poskusu direktnega striga s 5 dnevi konsolidacije na steklarski sadri SR

Figure D.21: Shear stress and vertical strain curves from direct shear test with consolidation lasting five days on glass gypsum SR

E: VREDNOSTI MAKSIMALNE STRIŽNE NAPETOSTI PRI STRIŽNIH PREIZKUSIH Z RAZLIČNO DOLGO KONSOLIDACIJO NA KEMIČNIH SADRAH

Preglednica E.1: Vrednosti maksimalne strižne napetosti pri preizkusih z različno dolgo konsolidacijo na energetski sadri TET

Table E.1: Maximum shear resistance from shear tests with different consolidation time on FGD gypsum TET

Normalna napetost (kPa)	1 dan konsolidacije		3 dni konsolidacije		5 dni konsolidacije	
	Maksimalna strižna napetost (kPa)	Maksimalna strižna napetost (kPa)	Sprememba maksimalne strižne napetosti (%)	Maksimalna strižna napetost (kPa)	Sprememba maksimalne strižne napetosti (%)	
50	55	55	0,00	54,17	-1,51	
100	105,28	78,89	-25,07	83,33	-20,85	
250	241,08	244,44	1,39	235,89	-2,15	
500	451,67	441,11	-2,34	402,50	-10,89	

Opomba: sprememba maksimalne strižne napetosti se nanaša na rezultat testa z 1 dnem konsolidacije

Preglednica E.2: Vrednosti maksimalne strižne napetosti pri preizkusih z različno dolgo konsolidacijo na titanovi sadri CC

Table E.2: Maximum shear resistance from shear tests with different consolidation time on titanium gypsum CC

Normalna napetost (kPa)	1 dan konsolidacije		3 dni konsolidacije		5 dni konsolidacije	
	Maksimalna strižna napetost (kPa)	Maksimalna strižna napetost (kPa)	Sprememba maksimalne strižne napetosti (%)	Maksimalna strižna napetost (kPa)	Sprememba maksimalne strižne napetosti (%)	
50	45,00	46,67	3,70	47,22	4,94	
100	87,50	85,56	-2,22	84,44	-3,49	
250	229,47	209,00	-8,92	238,33	3,86	
500	401,94	417,78	3,94	420,00	4,49	

Opomba: sprememba maksimalne strižne napetosti se nanaša na rezultat testa z 1 dnem konsolidacije

Preglednica E.3: Vrednosti maksimalne strižne napetosti pri preizkusih z različno dolgo konsolidacijo na steklarski sadri SR

Table E.3: Maximum shear resistance from shear tests with different consolidation time on glass gypsum SR

Normalna napetost (kPa)	1 dan konsolidacije		3 dni konsolidacije		5 dni konsolidacije	
	Maksimalna strižna napetost (kPa)	Maksimalna strižna napetost (kPa)	Sprememba maksimalne strižne napetosti (%)	Maksimalna strižna napetost (kPa)	Sprememba maksimalne strižne napetosti (%)	
50	47,78	48,33	1,16	49,44	3,49	
100	85,83	89,72	4,53	89,44	4,21	
250	238,03	224,58	-5,65	224,89	-5,52	
500	423,89	423,33	-0,13	423,61	-0,07	

Opomba: sprememba maksimalne strižne napetosti se nanaša na rezultat testa z 1 dnem konsolidacije

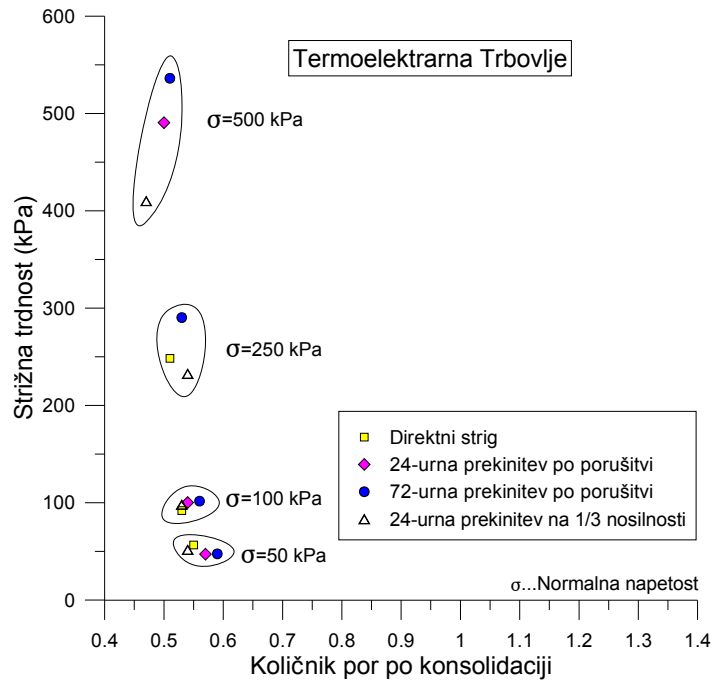
Preglednica E.4: Vrednosti strižnih kotov pri preiskavah z določeno dolžino časa konsolidacije

Table E.4: Angles of shear resistance (in terms of effective stress) values from shear tests with different consolidation time on investigated synthetic gypsums

	TET		CC		SR	
	φ' (°)	Sprememba strižnega kota (%)	φ' (°)	Sprememba strižnega kota (%)	φ' (°)	Sprememba strižnega kota (%)
1 dan konsolidacije	41,3		38,5		40,2	
3 dni konsolidacije	41,4	0,24	39,6	2,86	39,9	-0,75
5 dni konsolidacije	38,3	-7,26	40	3,90	39,9	-0,75

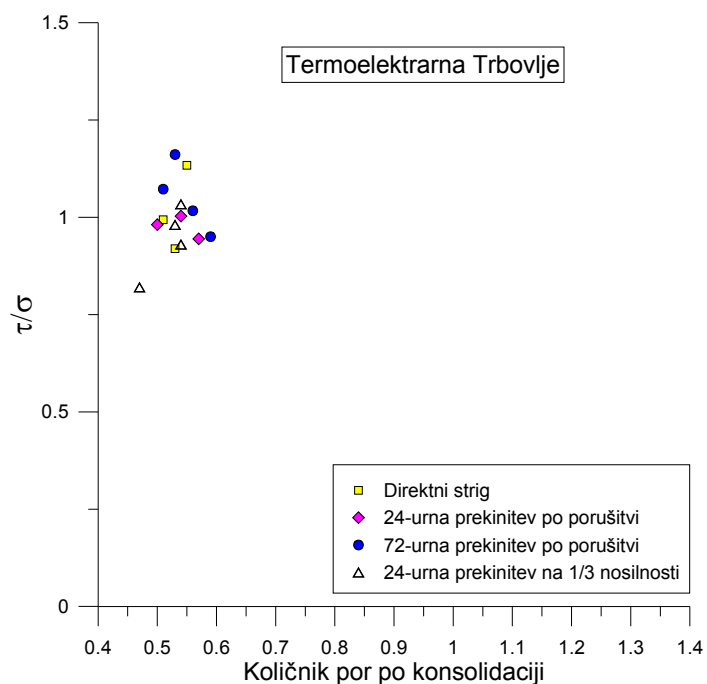
Opomba: sprememba strižnega kota se nanaša na rezultat testa z 1 dnem konsolidacije

F: PRIKAZ VREDNOSTI STRIŽNIH NAPETOSTI IN KOLIČNIKOV POR PRI STRIŽNIH PREIZKUSIH NA KEMIČNIH SADRAH



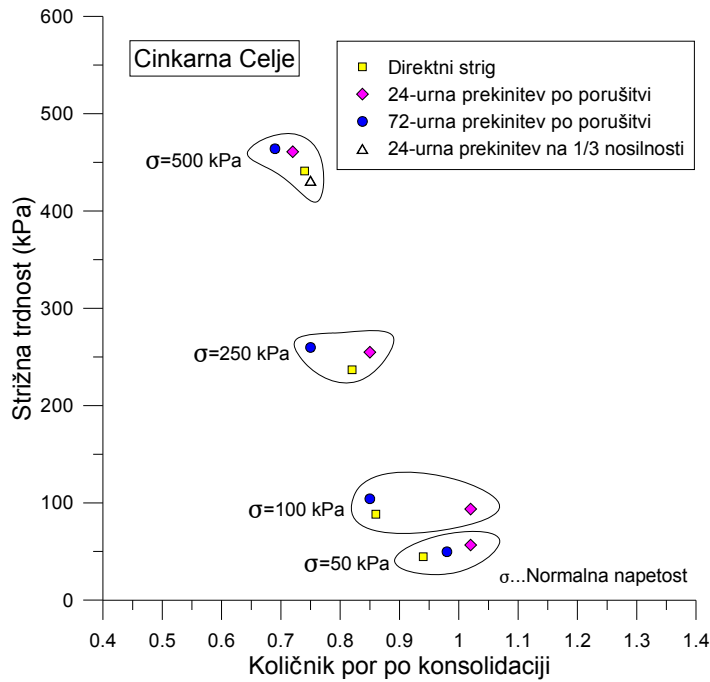
Slika F.1: Odvisnost strižne trdnosti od količnika por (pred strigom) pri preiskavah energetske sadre TET

Figure F.1: Shear strength against void ratio before shear tests on FGD gypsum TET



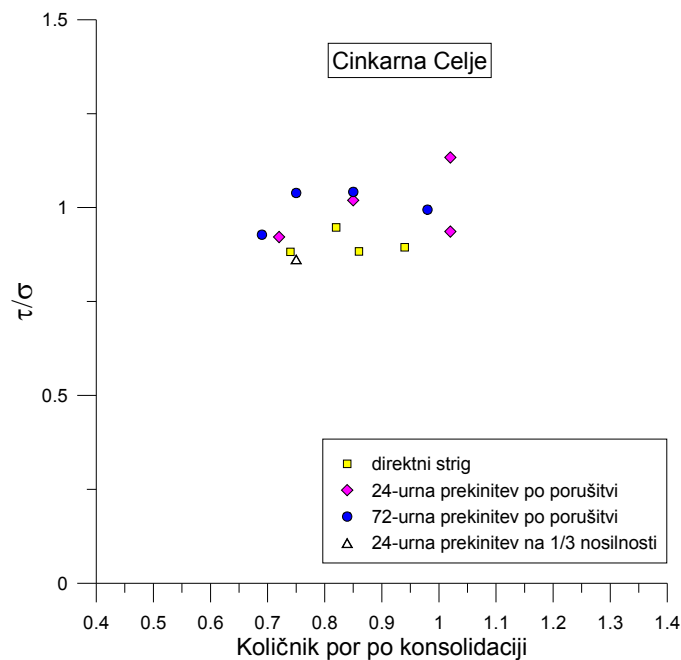
Slika F.2: Razmerje τ/σ v odvisnosti od količnika por pri poskusih na energetski sadri TET

Figure F.2: τ/σ ratio against void ratio from shear tests on FGD gypsum TET



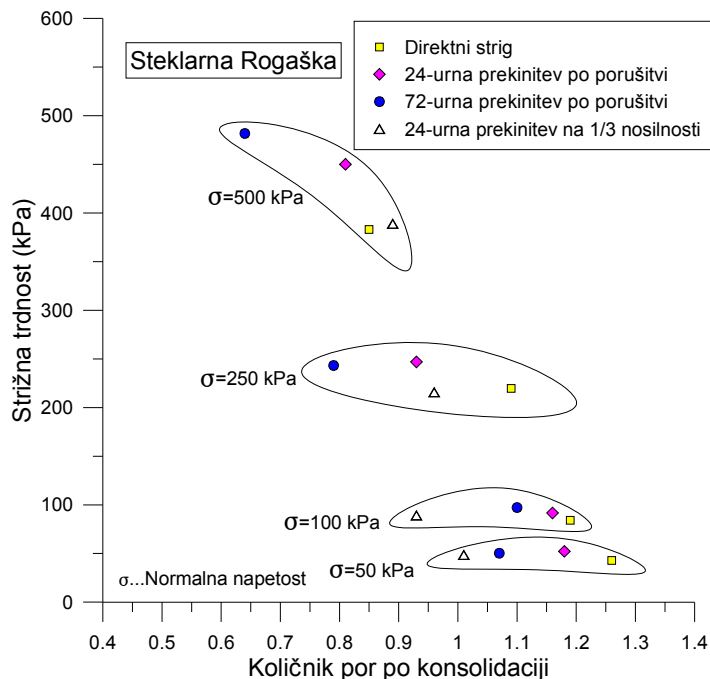
Slika F.3: Odvisnost strižne trdnosti od količnika por (pred strigom) pri preiskavah titanove sadre

Figure F.3: Shear strength against void ratio before shear tests on titanium gypsum CC



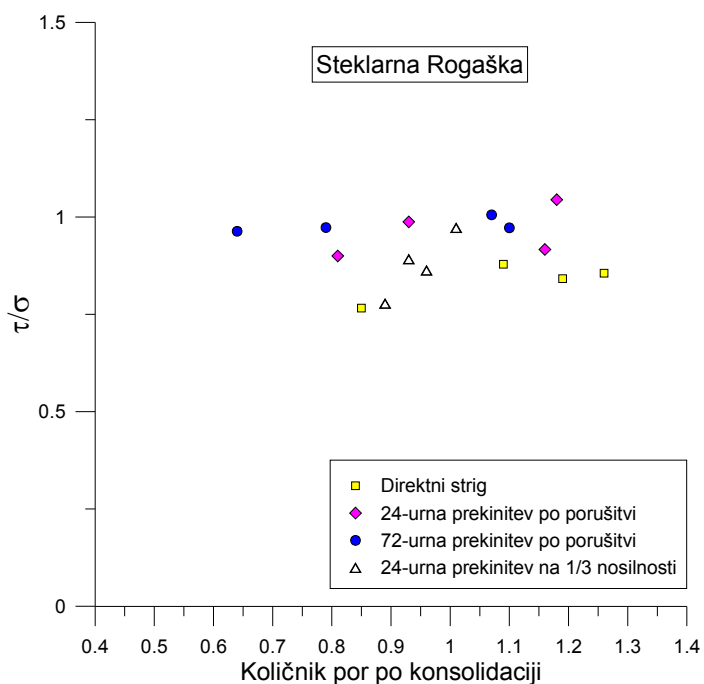
Slika F.4: Razmerje τ/σ v odvisnosti od količnika por pri poskusih na titanovi sadri CC

Figure F.4: τ/σ ratio against void ratio from shear tests on titanium gypsum CC



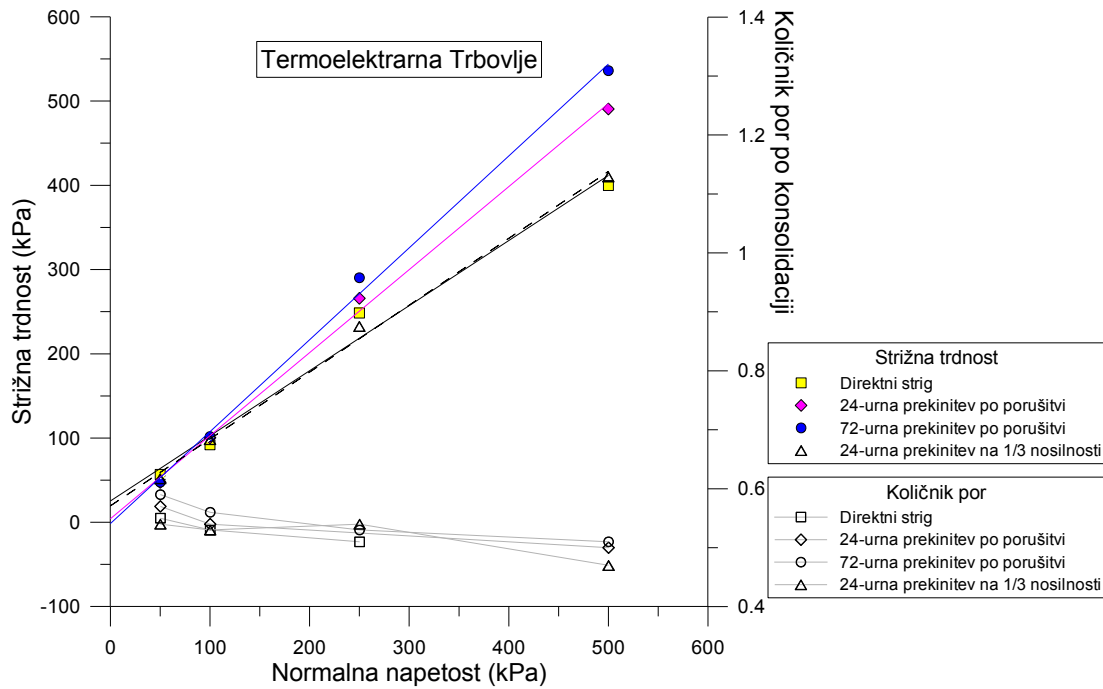
Slika F.5: Odvisnost strižne trdnosti od količnika por (pred strigom) pri preiskavah steklarske sadre SR

Figure F.5: Shear strength against void ratio before shear tests on glass gypsum SR



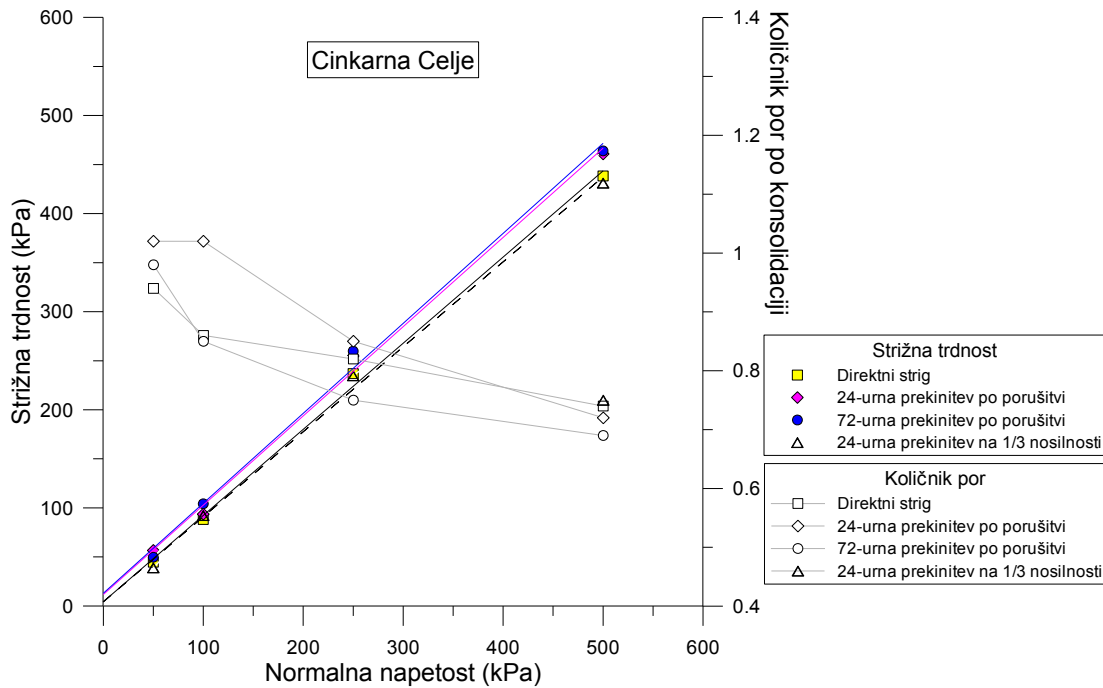
Slika F.6: Razmerje τ/σ v odvisnosti od količnika por pri poskusih na steklarski sadri SR

Figure F.6: τ/σ ratio against void ratio from shear tests on glass gypsum SR



Slika F.7: Odnos med porušnicami in količniki por pri energetski sadri TET

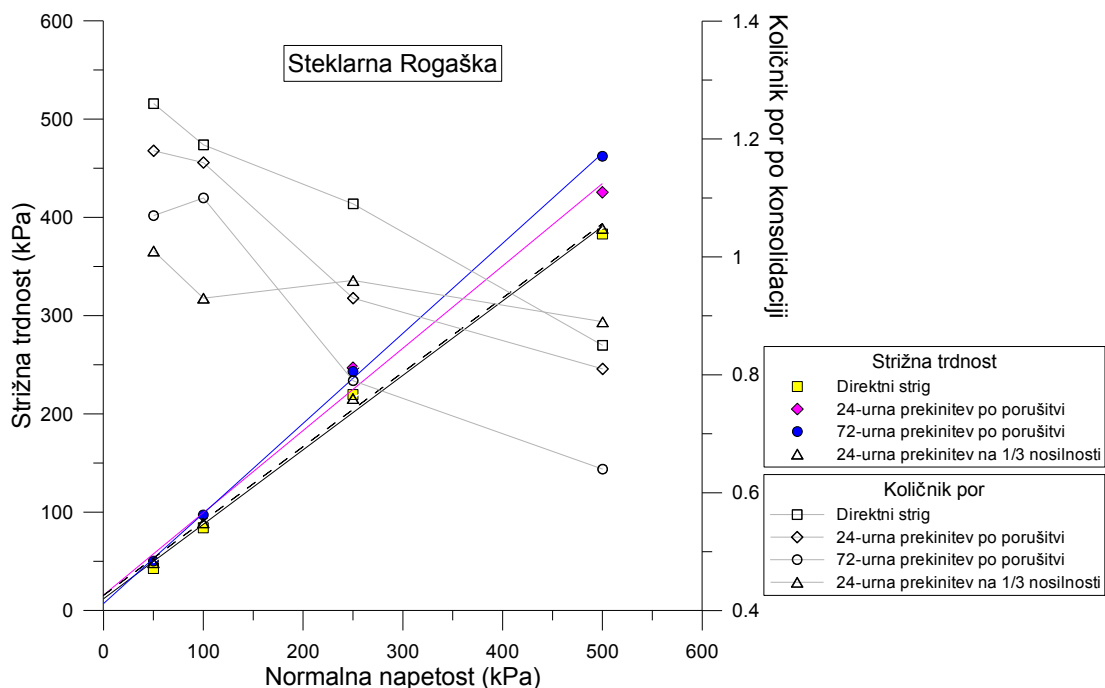
Figure F.7: Coulomb envelopes and void ratio values from shear tests on FGD gypsum TET



Slika F.8: Odnos med porušnicami in količniki por pri titanovi sadri CC

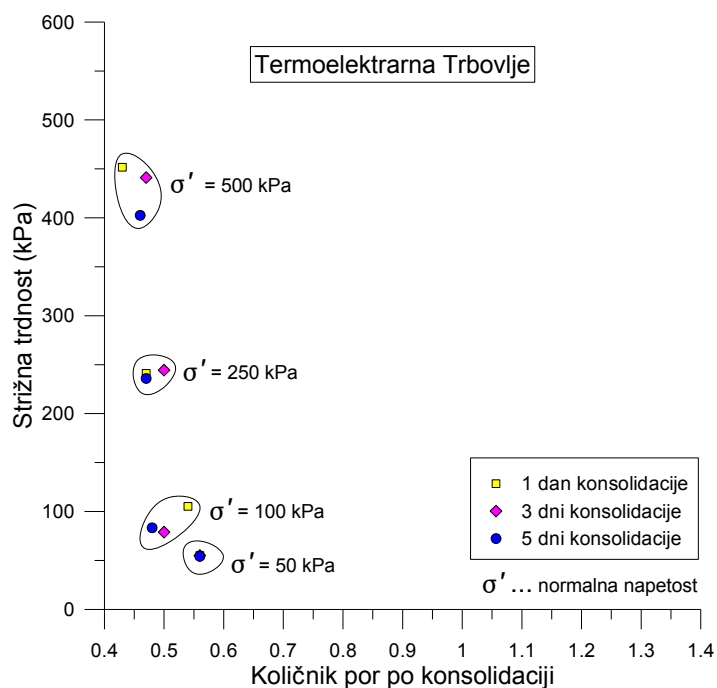
Figure F.8: Coulomb envelopes and void ratio values from shear tests on titanium gypsum CC

CC



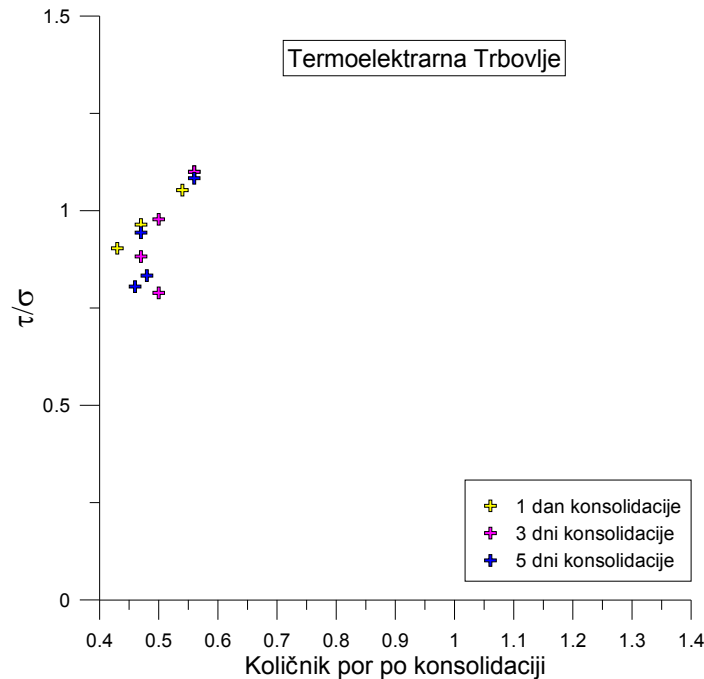
Slika F.9: Odnos med porušnicami in količniki por pri steklarski sadri SR

Figure F.9: Coulomb envelopes and void ratio values from shear tests on glass gypsum SR



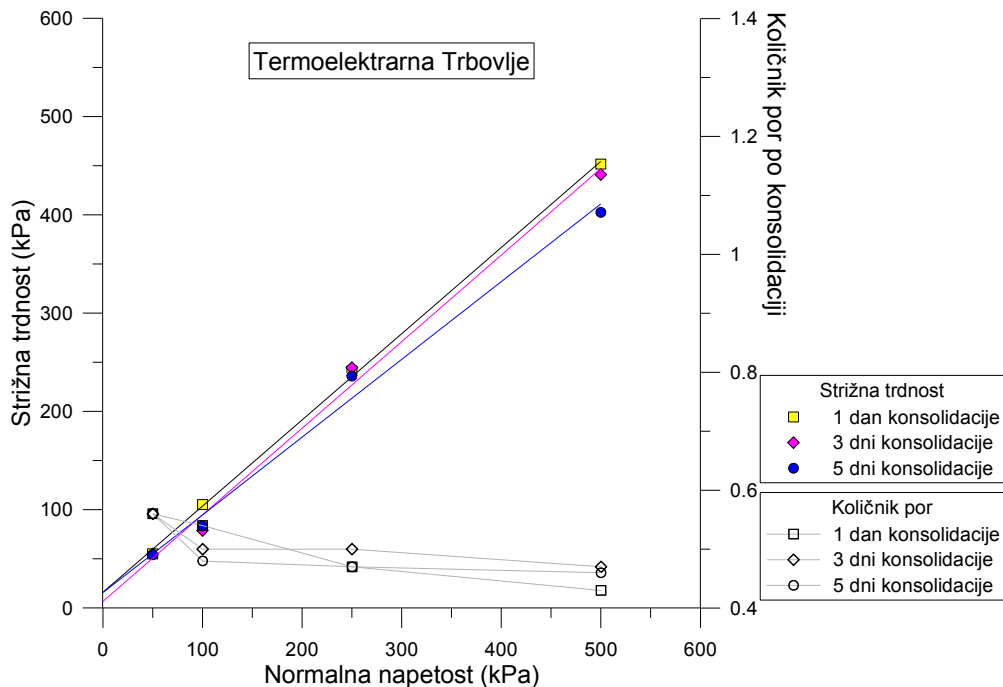
Slika F.10: Količniki por po konsolidaciji različno dolgo konsolidiranih vzorcev energetske sadre TET

Figure F.10: Shear strength against void ratio before shear tests with different consolidation time on FGD gypsum TET



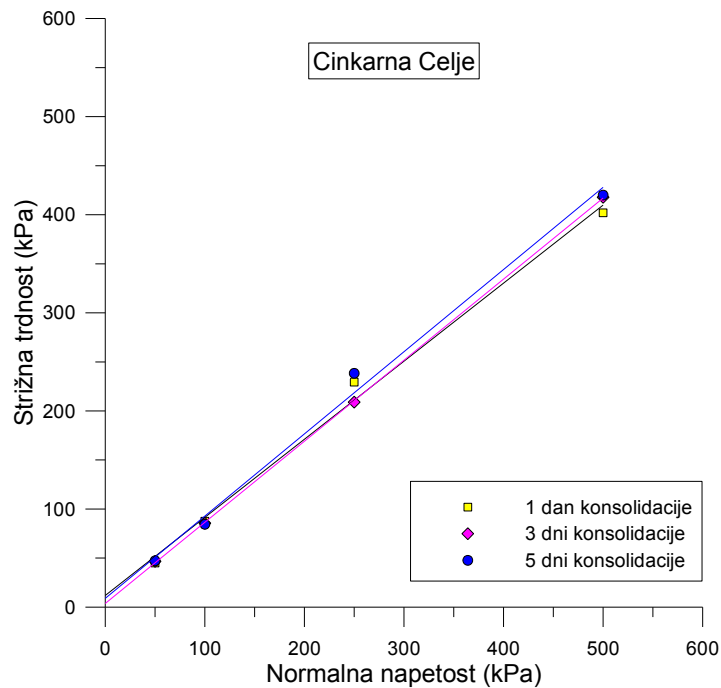
Slika F.11: Razmerje τ/σ v odvisnosti od količnika por pri poskusih z različno dolgo konsolidacijo na energetski sadri TET

Figure F.11: τ/σ ratio against void ratio from shear tests with different consolidation time on FGD gypsum TET



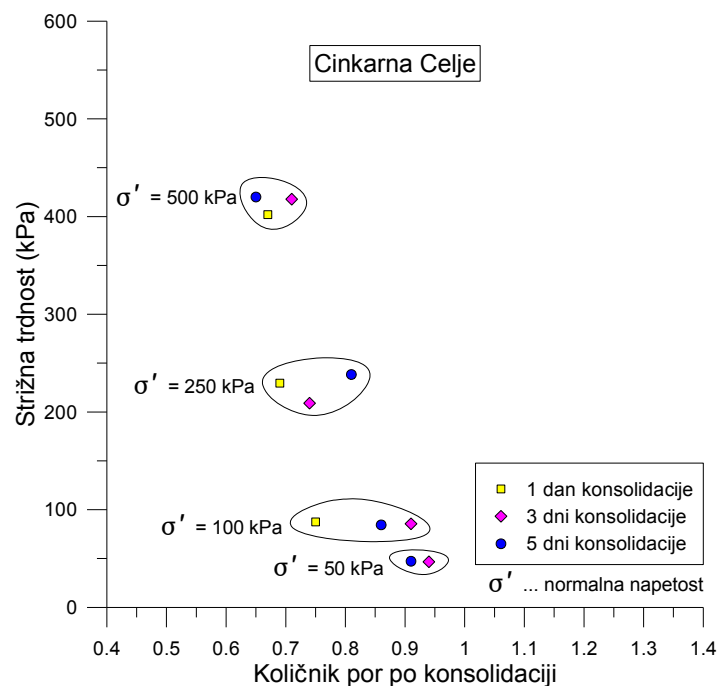
Slika F.12: Porušnice in količniki por (po konsolidaciji) različno dolgo konsolidiranih vzorcev energetske sadre TET

Figure F.12: Coulomb envelopes and void ratio values from shear tests with different consolidation time on FGD gypsum TET



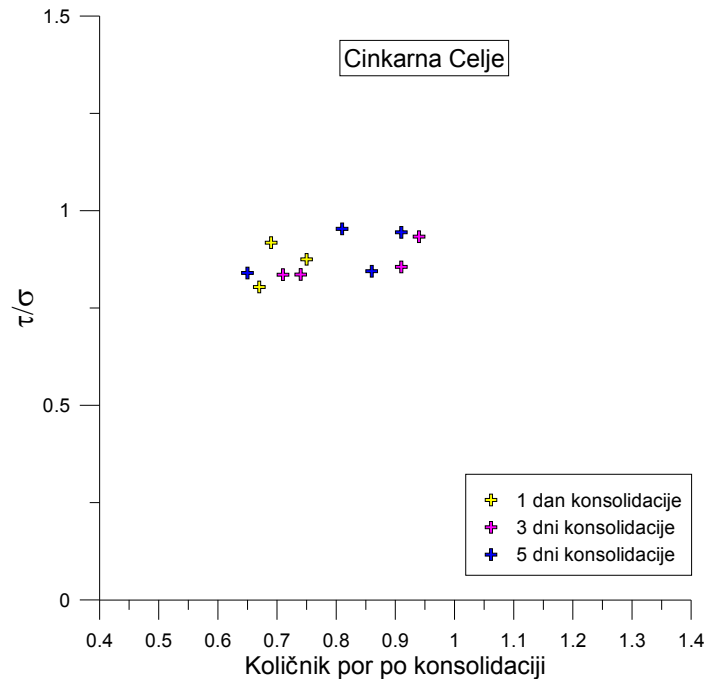
Slika F.13: Primerjava porušnic različno dolgo konsolidiranih vzorcev titanove sadre CC

Figure F.13: Coulomb envelopes from shear tests with different consolidation time on titanium gypsum CC



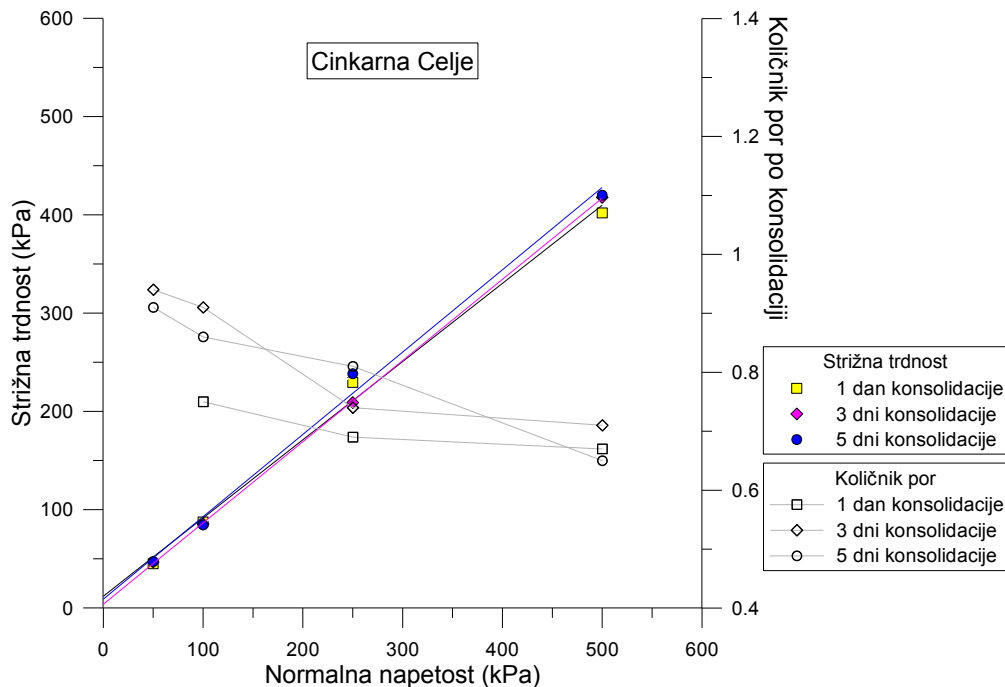
Slika F.14: Količniki por po konsolidaciji različno dolgo konsolidiranih vzorcev titanove sadre

Figure F.14: Shear strength against void ratio before shear tests with different consolidation time on titanium gypsum CC



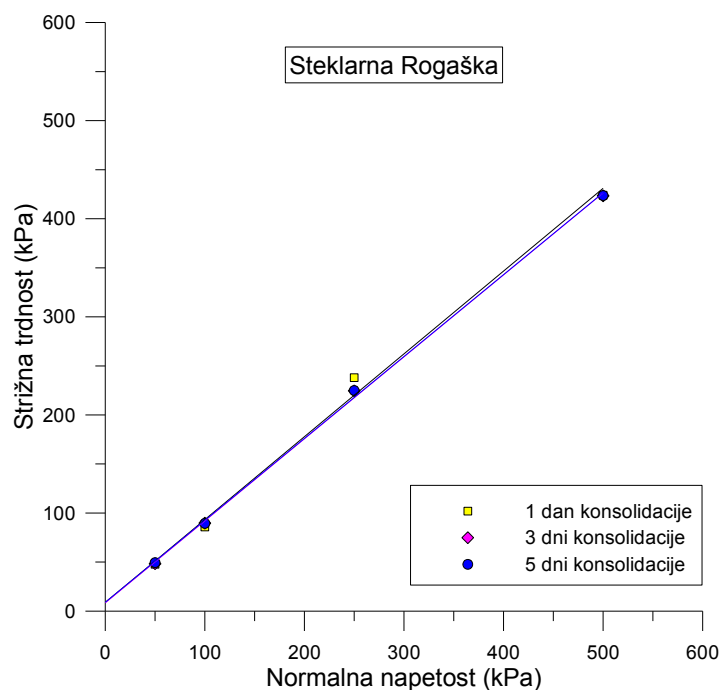
Slika F.15: Razmerje τ/σ v odvisnosti od količnika por pri poskusih z različno dolgo konsolidacijo na titanovi sadri CC

Figure F.15: τ/σ ratio against void ratio from shear tests with different consolidation time on titanium gypsum CC



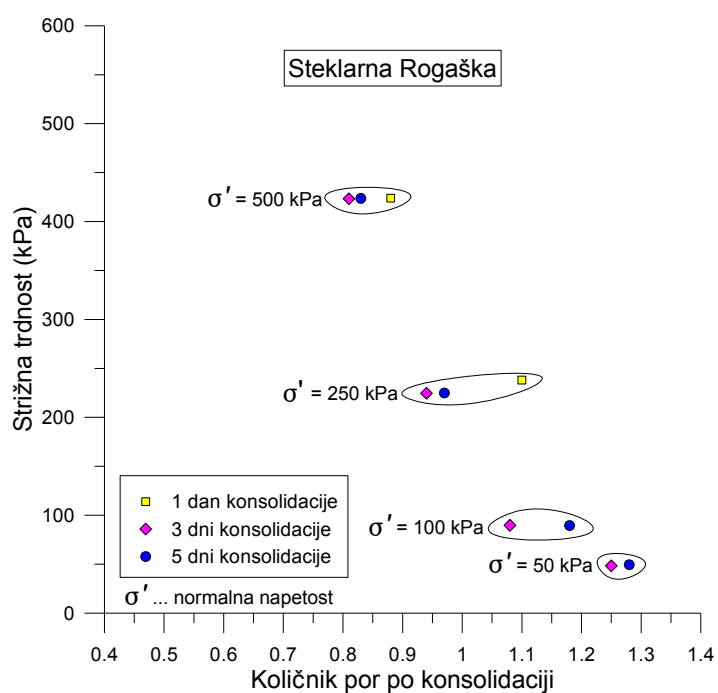
Slika F.16: Porušnice in količniki por (po konsolidaciji) različno dolgo konsolidiranih vzorcev titanove sadre CC

Figure F.16: Coulomb envelopes and void ratio values from shear tests with different consolidation time on titanium gypsum CC



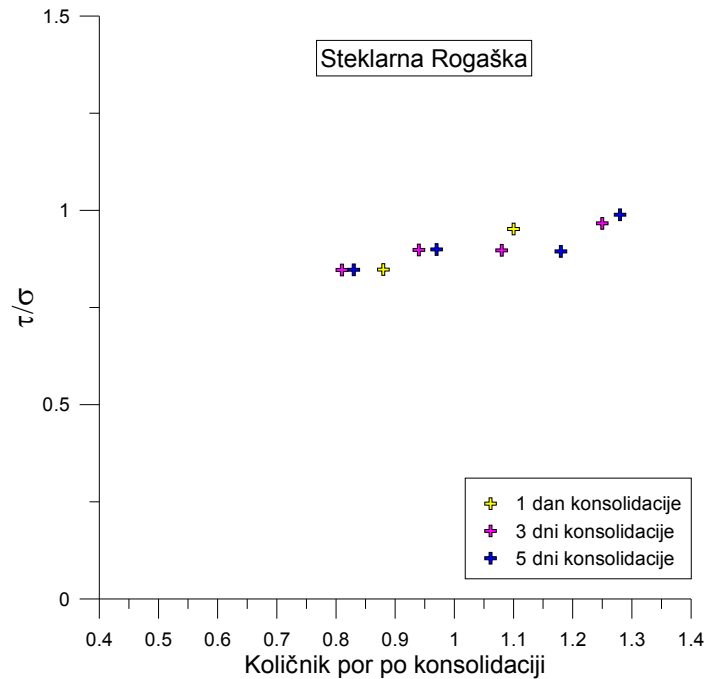
Slika F.17: Primerjava porušnic različno dolgo konsolidiranih vzorcev steklarske sadre SR

Figure F.17: Coulomb envelopes from shear tests with different consolidation time on glass gypsum SR



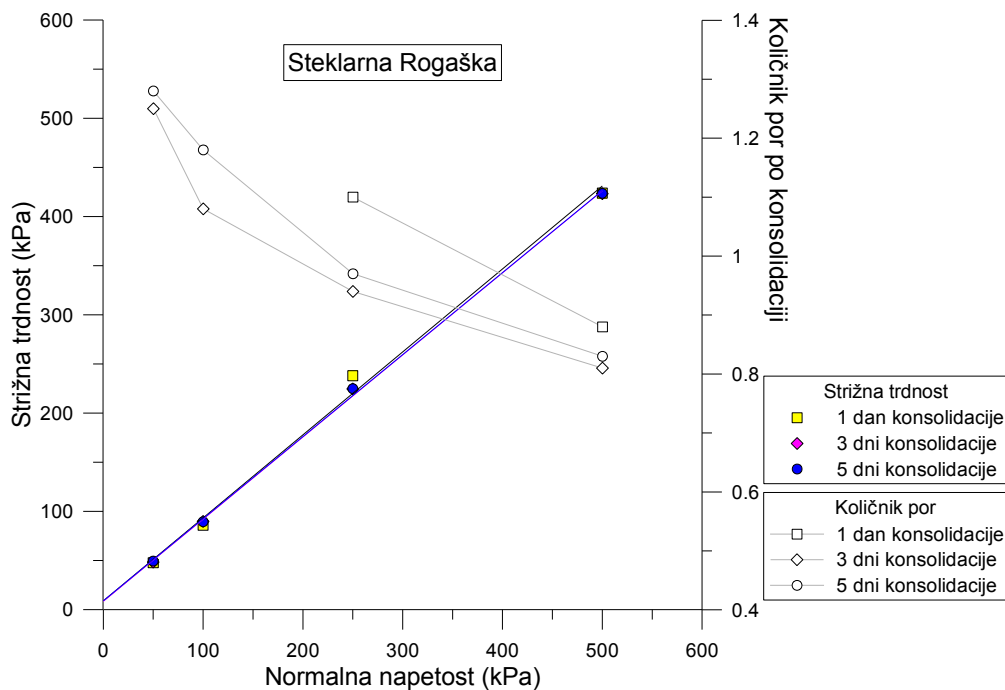
Slika F.18: Količniki por po konsolidaciji različno dolgo konsolidiranih vzorcev steklarske sadre SR

Figure F.18: Shear strength against void ratio before shear tests with different consolidation time on glass gypsum SR



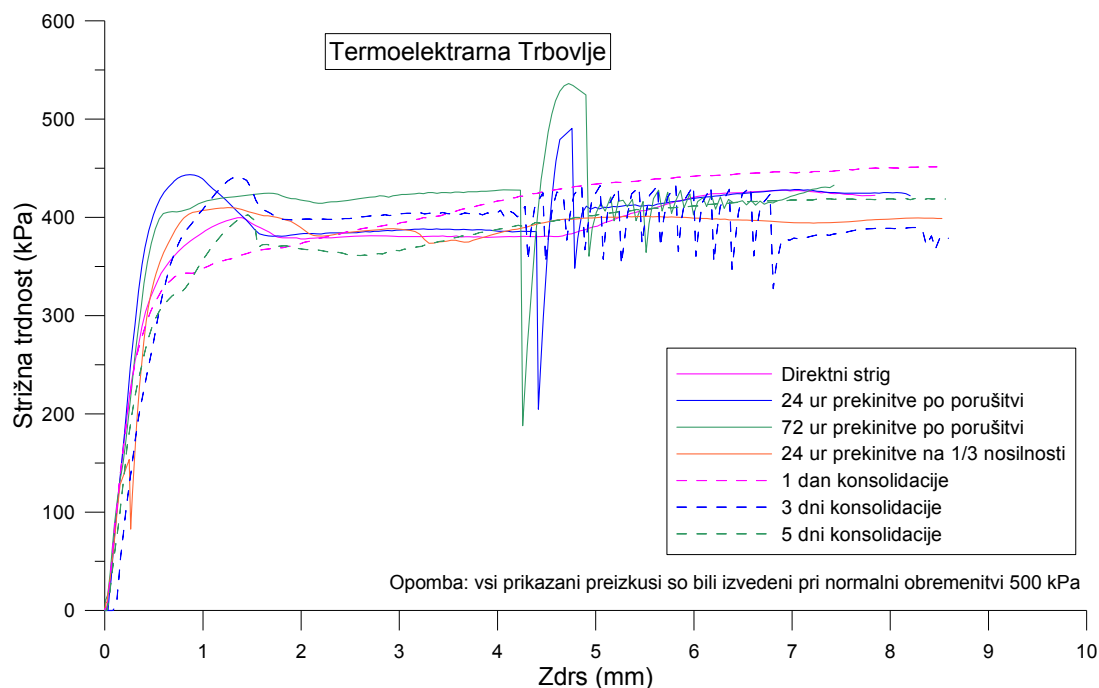
Slika F.19: Razmerje τ/σ v odvisnosti od količnika por pri poskusih z različno dolgo konsolidacijo na steklarski sadri SR

Figure F.19: τ/σ ratio against void ratio from shear tests with different consolidation time on glass gypsum SR



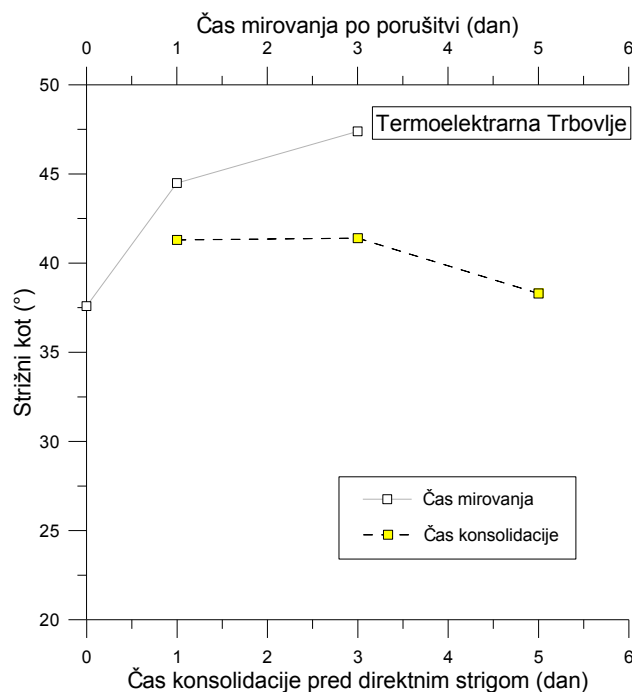
Slika F.20: Porušnice in količniki por (po konsolidaciji) različno dolgo konsolidiranih vzorcev steklarske sadre SR

Figure F.20: Coulomb envelopes and void ratio values from shear tests with different consolidation time on glass gypsum SR



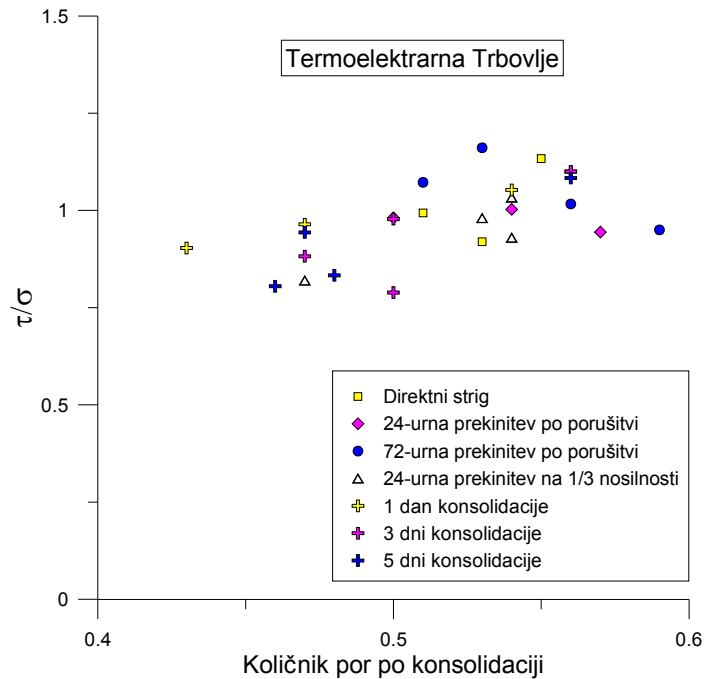
Slika F.21: Primerjava rezultatov različnih preiskav na vzorcih energetske sadre TET pri normalni obremenitvi 500 kPa

Figure F.21: Shear stress/displacement curves from different shear tests on FGD gypsum TET (normal stress = 500 kPa)



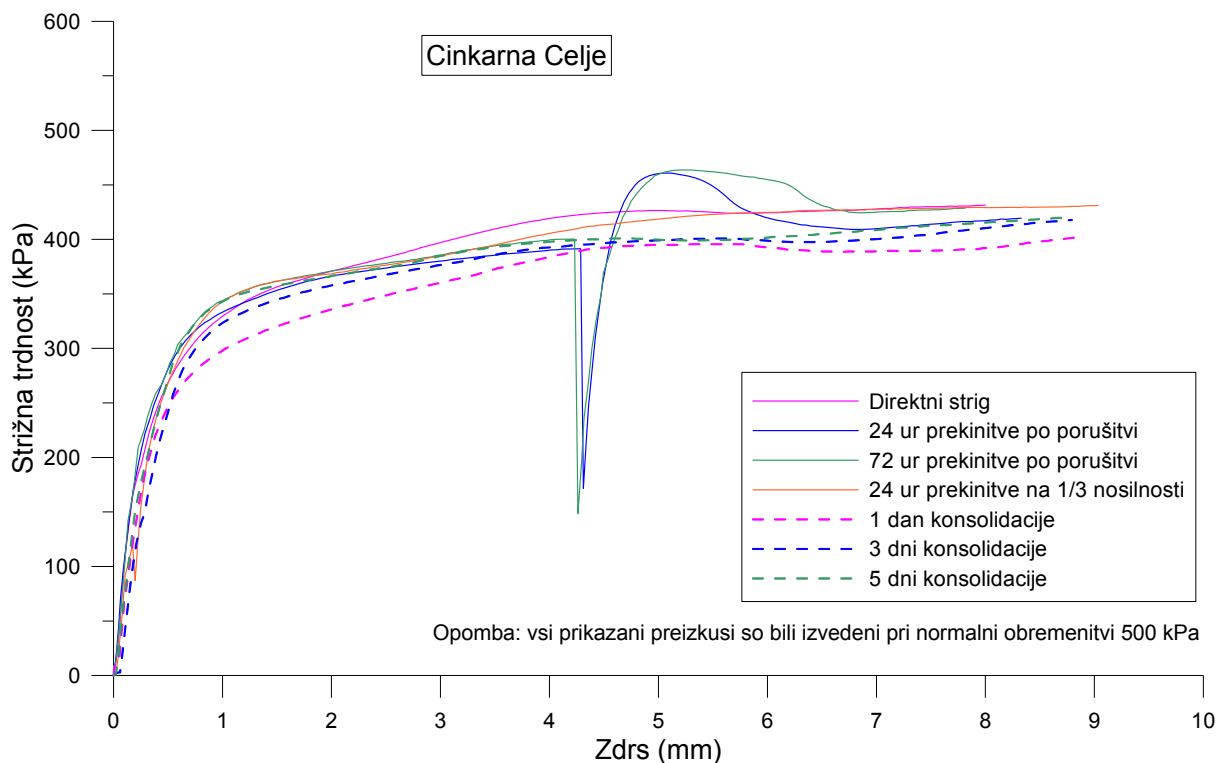
Slika F.22: Primerjava strižnih kotov, pridobljenih pri različnih preiskavah energetske sadre TET

Figure F.22: Angels of shear resistance from different shear tests on FGD gypsum TET



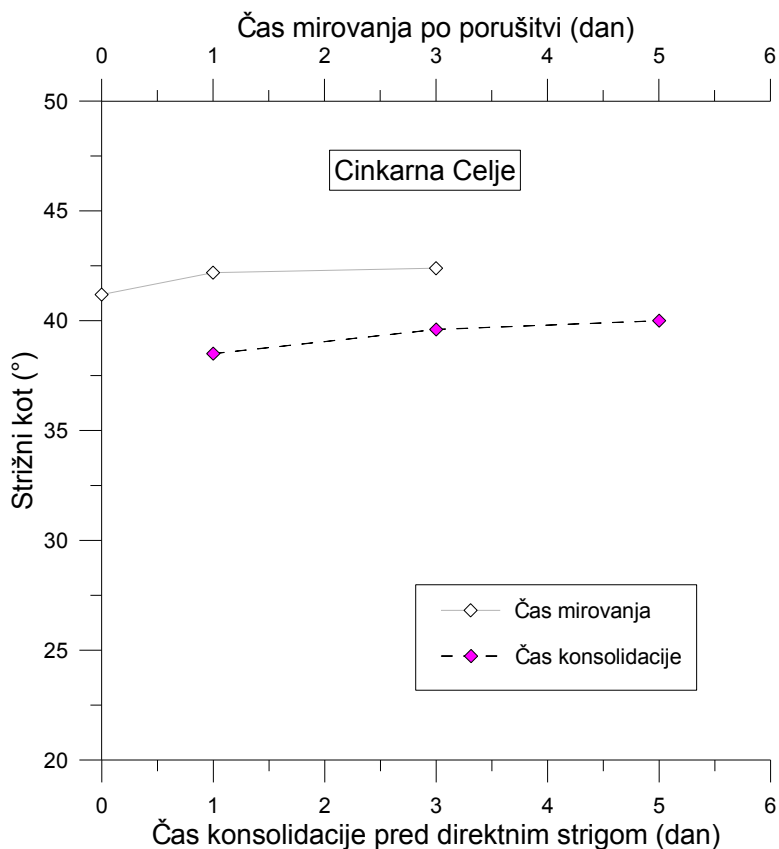
Slika F.23: Razmerje τ/σ v odvisnosti od količnika por pri vseh poskusih na energetski sadri TET

Figure F.23: τ/σ ratio against void ratio from different shear tests on FGD gypsum TET



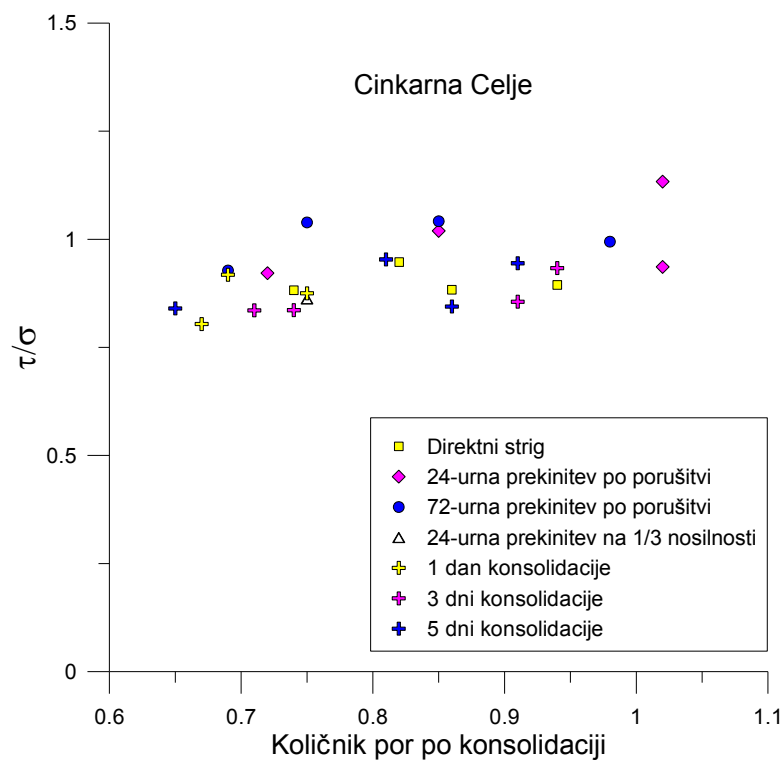
Slika F.24: Primerjava rezultatov različnih preiskav na vzorcih titanove sadre CC pri normalni obremenitvi 500 kPa

Figure F.24: Shear stress/displacement curves from different shear tests on titanium gypsum CC (normal stress = 500 kPa)



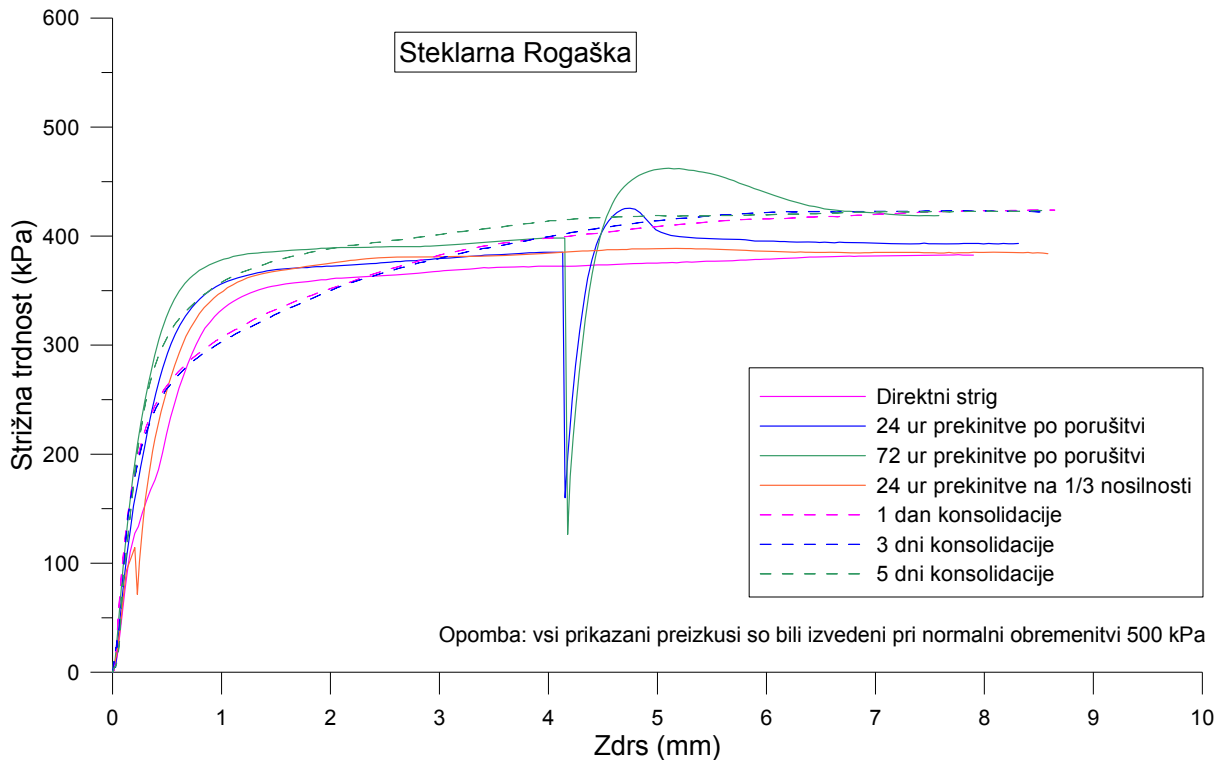
Slika F.25: Primerjava strižnih kotov, pridobljenih pri različnih preiskavah titanove sadre CC

Figure F.25: Angels of shear resistance from different shear tests on titanium gypsum CC



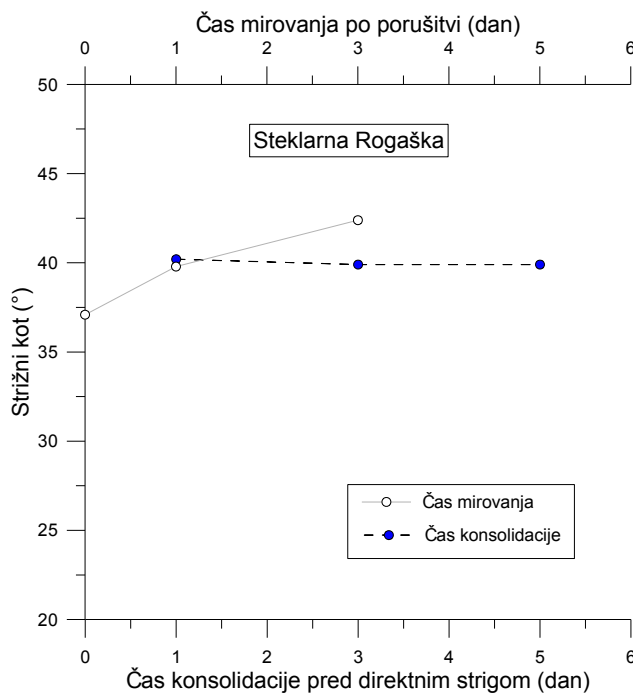
Slika F.26: Razmerje τ/σ v odvisnosti od količnika por pri vseh poskusih na titanovi sadri CC

Figure F.26: τ/σ ratio against void ratio from different shear tests on titanium gypsum CC



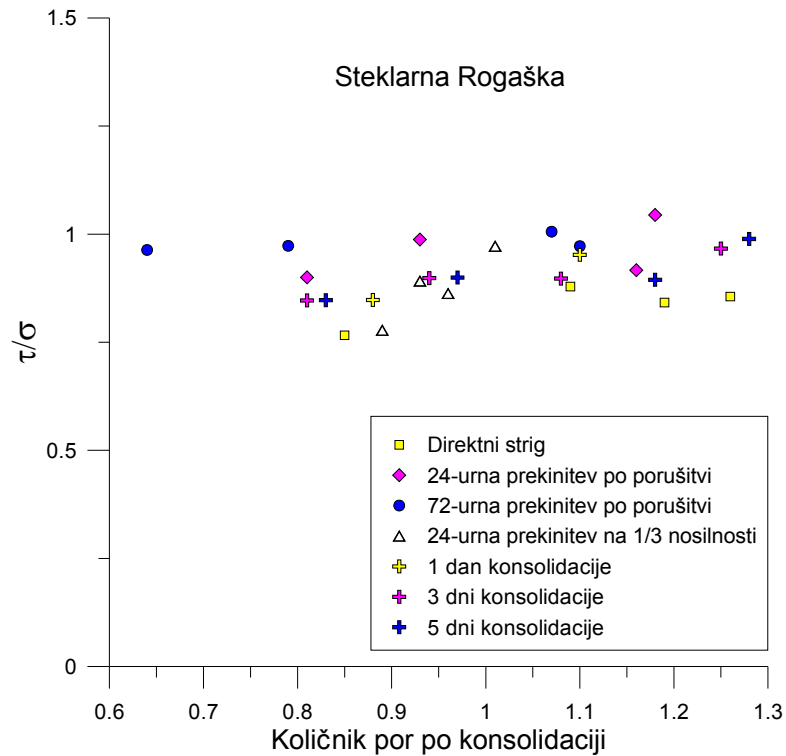
Slika F.27: Primerjava rezultatov različnih preiskav na vzorcih steklarske sadre SR pri normalni obremenitvi 500 kPa

Figure F.27: Shear stress/displacement curves from different shear tests on glass gypsum SR (normal stress = 500 kPa)



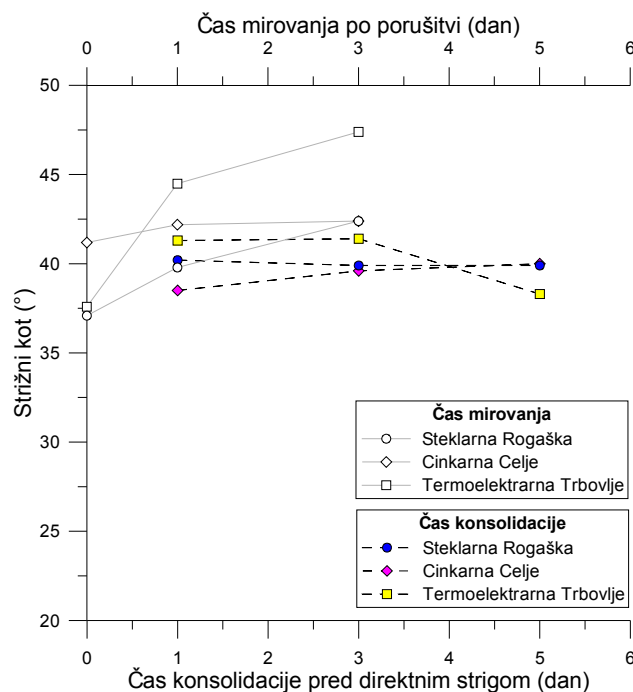
Slika F.28: Primerjava strižnih kotov, pridobljenih pri različnih preiskavah steklarske sadre SR

Figure F.28: Angles of shear resistance from different shear tests on glass gypsum SR



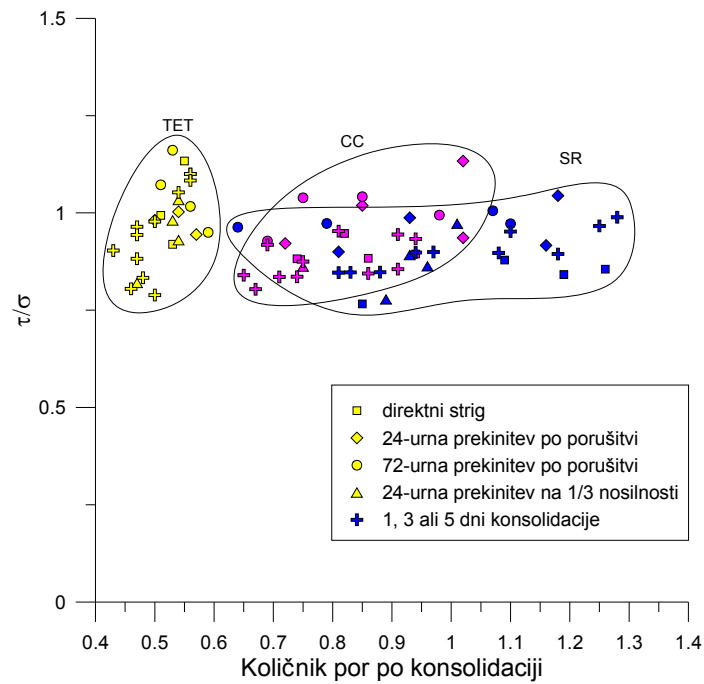
Slika F.29: Razmerje τ/σ v odvisnosti od količnika por pri vseh poskusih na steklarski sadri SR

Figure F.29: τ/σ ratio against void ratio from different shear tests on glass gypsum SR



Slika F.30: Primerjava sprememb strižnih kotov za vse tri obravnavane sadre

Figure F.30: Angles of shear resistance from different shear tests on all three investigated gypsums



Slika F.31: Razmerje τ/σ v odvisnosti od količnika por pri poskusih na vseh obravnavanih kemičnih sadrah

Figure F.31: τ/σ ratio against void ratio from direct shear tests on all three investigated gypsums