

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
za gradbeništvo
in geodezijo

Janova 2
1000 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si



Univerzitetni program Geodezija,
smer Geodezija

Kandidatka:

Mojca Jošt

Optimizacija opazovanj v raziskovalnem rovu predora Šentvid

Diplomska naloga št.: 692

Mentor:

izr. prof. dr. Tomaž Ambrožič

Ljubljana, 27. 9. 2006

STRAN ZA POPRAVKE**Stran z napako****Vrstica z napako****Namesto****Naj bo**

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisana **Mojca Jošt** izjavljam, da sem avtorica diplomske naloge z naslovom:
»**Optimizacija opazovanj v raziskovalnem rovu predora Šentvid**«

Izjavljam, da prenašam vse materialne avtorske pravice v zvezi z diplomsko nalogo na UL,
Fakulteto za gradbeništvo in geodezijo.

Ljubljana, 20. 09. 06

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN

UDK:	528.48:624.19 (043.2)
Avtor:	Mojca Jošt
Mentor:	doc. dr. Tomaž Ambrožič
Naslov:	Optimizacija opazovanj v raziskovalnem rovu predora Šentvid
Obseg in oprema:	97 str., 41 pregl., 18 sl.
Ključne besede:	raziskovalni rov, izravnava koordinat stojišča, optimizacija geodetske mreže, metoda direktne rešitve, Taylor – Karmanova matrika kriterija, Helmertov elipsoid pogreškov

Povzetek

V raziskovalnem rovu so bila geodetska opazovanja izvedena z namenom ugotavljanja prostorskih premikov kontrolnih (detajlnih) točk v rovu zaradi vpliva gradnje glavnega predora Šentvid na sam raziskovalni rov. Da bi dobili čimbolj optimalne premike v raziskovalnem rovu, je pomembno, da tudi položaj stojišča instrumenta določimo optimalno natančno. Diplomaska naloga s tem namenom obravnava optimizacijo opazovanj v raziskovalnem rovu predora Šentvid. V geodeziji optimizacijo opazovanj izvajamo, da zagotovimo določene kriterije, ki si jih postavimo. Kriterij in s tem osnovni cilj te naloge je določitev takšnih uteži opazovanj, ki bodo po vključitvi v izravnavo omogočile kot rezultat izravnave takšno natančnost določitve stojišča, da bo elipsoid pogreškov stojišča postal krogl. S tem namenom je bila s programom Matlab 7.0 izvedena izravnava koordinat stojišča in optimizacija drugega reda z metodo direktne rešitve, katere osnovna značilnost je uporaba matrike kriterija. Dodatno je bila izvedena optimizacija tudi za določitev stojišča v glavnem predoru. Pri določanju optimalnih koordinat stojišča za raziskovalni rov in glavni predor pridemo do spoznanja, da imajo kotna opazovanja pri meritvah večjo pomembnost kot dolžinska in opazovanja na točke blizu stojišča so bolj pomembna, kot pa opazovanja na od stojišča bolj oddaljene točke. Hkrati z optimizacijo je opisana še osnovna delitev predorov, splošne značilnosti predora Šentvid, klasifikacija kamnin, NATM metoda gradnje, izvedba in obdelava geodetskih meritev v raziskovalnem rovu in kvaliteta geodetskih mrež.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC: 528.48:624.19 (043.2)
Author: Mojca Jošt
Supervisor: Assist. Prof. dr. Tomaž Ambrožič
Title: Optimisation of measurements in exploratory gallery of Šentvid tunnel
Notes: 97 p., 41 tab., 18 fig.
Key words: exploratory gallery, adjustment of station coordinates, optimisation of geodetic network, direct solution method, Taylor – Karman structured criterion matrix, Helmert's elipsoid

Abstract

The geodetic measurements in exploratory gallery of Šentvid tunnel were carried out with the intention of finding out the movements of control (detail) points, which are caused by main tunnel excavations. To get optimal movements of the control points it is important to define the station point with optimal precision. For this purpose thesis work is dealing with optimisation of geodetic measurements. In surveying the optimisation of measurements is carried out to assure some criteria. The criterion and the basic aim of thesis is to define such measurements' weights that their inclusion in adjustment causes the ellipsoid of station point to become a sphere. Therefore with a programme Matlab 7.0 adjustment of station coordinates and second order optimisation were carried out. For optimisation a method of direct solution was chosen which basic characteristic is criterion matrix. In the end the optimisation of measurements of the main tunnel was added. In both - exploratory gallery and main tunnel - determinations of optimal station coordinates we came to a conclusion that angle measurements have greater importance during measuring than measurements of length. Another important ascertainment was that the points near station point are more important than points far from station point. With optimisation some other contents are included in thesis: division of tunnels, basic characteristics of Šentvid tunnel, rock mass classification, New Austrian Tunnelling Method, realization and processing with geodetic measurements and quality of geodetic networks.

ZAHVALA

Za pomoč pri izdelavi diplomske naloge se želim najprej zahvaliti mojemu mentorju doc. dr. Tomažu Ambrožiču. Zahvaljujem se mu za vso dobljeno literaturo, napotke in za pomoč, ki mi jo je izkazal pri nastajanju te naloge.

Zahvaljujem se tudi doc. dr. Janku Logarju, ki je pregledal del diplomske naloge, ki spada v gradbeno stroko.

Posebna zahvala gre tudi Jaki Prhavcu, ki je posredoval geodetske meritve iz raziskovalnega rova in glavnega predora Šentvid, kar je omogočilo izvedbo praktičnega dela diplomske naloge.

Prav tako se zahvaljujem svojim staršem, bratu, fantu in prijateljem, ki so me tako med ustvarjanjem diplomske naloge, kakor tudi med celotnim študijem, podpirali in dajali veliko spodbude, da bi uspešno zaključila študij.

KAZALO VSEBINE

1	UVOD.....	1
1.1	Oprelitev področja raziskovanja in opis problema	1
1.2	Namen in cilji naloge	2
1.3	Predpostavke in omejitve naloge.....	3
1.4	Metode dela	3
2	DELITEV PREDOROV	4
2.1	Glede na oviro/lego predora	4
2.2	Glede na namen uporabe	4
2.2.1	Prometni predori:.....	4
2.2.2	Hidrotehnični predori.....	4
2.2.3	Rudarski predori oz. rovi	5
2.2.4	Predori za posebne namene	5
2.3	Glede na dolžino.....	5
2.4	Glede na površino prereza profila	5
2.5	Glede na globino predora.....	5
2.6	Glede na obliko osi.....	6
2.7	Glede na težavnost izgradnje (geološka sestava tal).....	6
2.8	Glede na tehnologijo gradnje.....	6
2.9	Umestitev predora Šentvid glede na zgornje delitve	7
3	SPLOŠNO O PREDORU ŠENTVID	9
3.1	Gradnja avtocestnega sistema v Sloveniji	9
3.2	Trasa avtoceste in predora.....	11
3.3	Vzroki za gradnjo predora	13
3.4	Raziskovalni rov	13
3.4.1	Razlogi za gradnjo raziskovalnega rova predora Šentvid	14
3.4.2	Trasa raziskovalnega rova.....	15
3.4.3	Tektonske razmere	17

3.4.4	Klasifikacija kamnin	18
3.4.4.1	RQD klasifikacija	19
3.4.4.2	RMR klasifikacija	20
3.4.4.3	GSI indeks.....	21
3.4.4.4	Avstrijski standard ÖNORM za raziskovalni rov Šentvid	26
3.4.4.5	Avstrijski standard ÖNORM za dvopasovni predor Šentvid	27
3.4.5	NATM metoda gradnje	30
4	TEHNIČNO OPAZOVANJE PRI GRADNJI PREDOROV	34
4. 1	Geodetske meritve v raziskovalnem rovu.....	35
4. 2	Izbira območja in način stabilizacije točk v rovu	37
4.3	Izvedba geodetskih meritev	40
4.3.1	Izbira časovnega intervala	40
4.3.2	Izbira geodetskega instrumentarija in dodatne opreme.....	41
4.3.3	Izbira metode izmere.....	44
4.4	Obdelava geodetskih meritev.....	45
4.4.1	Določitev koordinat stojišča.....	45
4.4.2	Praktičen primer določitve koordinat stojišča	46
4.4.2.1	Opazovanja	46
4.4.2.2	Posredna izravnava	48
4.4.2.3	Rezultati izravnave.....	57
5	KVALITETA GEODETSKIH MREŽ	60
5. 1	Mere natančnosti geodetskih mrež.....	60
5.1.1	Lokalne mere natančnosti geodetskih mrež	60
5.1.2	Matrika kriterija kot mera natančnosti geodetske mreže	63
5.1.2.1	Oblikovanje matrike kriterija	64
5.1.2.2	Oblikovanje matrike kriterija za stojiščno točko v raziskovalnem rovu	66
6	OPTIMIZACIJA GEODETSKE MREŽE.....	68
6. 1	Postopki optimizacije geodetske mreže	68

6. 2	Cilji optimizacije geodetske mreže.....	69
6. 3	Reševanje problemov optimizacije geodetskih mrež.....	70
6. 4	Metode optimizacije drugega reda.....	70
6.4.1	Metoda direktne rešitve.....	71
6.4.1.1	Khatri – Rao produkt.....	72
6. 4	Praktični primer optimizacije opazovanj za raziskovalni rov	73
6.4.1	Enotska matrika kriterija.....	74
6.4.1.1	Vhodni podatki.....	74
6.4.1.2	Izračun	74
6.4.1.3	Rezultati prve optimizacije	75
6.4.2	Diagonalna matrika kriterija.....	77
6.4.2.1	Vhodni podatki.....	77
6.4.2.2	Izračun	78
6.4.2.3	Rezultati prve optimizacije	78
6.4.2.4	Rezultati druge optimizacije	80
6.4.3	Rezultati optimizacije za diagonalno in enotsko matriko kriterija skupaj	81
6. 5	Dodatni primer optimizacije opazovanj za glavni predor	84
6.5.1	Kreiranje kombinacij s tremi danimi točkami.....	84
6.5.2	Rezultati kombinacij 2, 3 in 8	86
7	ZAKLJUČEK	91
	VIRI	95

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Klasifikacija po RQD	19
Preglednica 2: Klasifikacija po RMR.....	21
Preglednica 3: Klasifikacija po RMR (za predor Šentvid).....	21
Preglednica 4: Odčitavanje GSI indeksa	22
Preglednica 5: Odčitavanje Hoekovega in Brownovega parametra za kamnine.....	23
Preglednica 6: Odčitavanje enosne tlačne trdnosti vzorcev	23
Preglednica 7: Mehanske lastnosti hribine v trasi predora Šentvid na podlagi indeksa GSI ...	26
Preglednica 8: Hribinska kategorizacija raziskovalnega rova (standard ÖNORM).....	26
Preglednica 9: Hribinska kategorizacija glavnega predora (standard ÖNORM)	27
Preglednica 10: Dodatne hribinske kategorije (standard ÖNORM).....	28
Preglednica 11: Tehnični podatki za elektronski tahimeter Leica TCRP1201 R300	42
Preglednica 12: Opazovanja izvedena s Konzole 1.....	46
Preglednica 13: Sredine opazovanj za 1. girus	48
Preglednica 14: Dane točke	51
Preglednica 15: Približne vrednosti neznank stojišča	51
Preglednica 16: Vpliv koordinatnih razlik na velikost smernega kota.....	53
Preglednica 17: Rezultati izravnave: izravnana opazovanja	57
Preglednica 18: Rezultati izravnave: vrednost neznank stojišča po izravnavi.....	57
Preglednica 19: Rezultati izravnave: natančnost določitve stojišča	58
Preglednica 20: Odčitane meje iz χ^2 porazdelitve za globalni test modela.....	59
Preglednica 21: Rezultati: glavne osi in smerni koti elipsoida pogreškov stojišča.....	63
Preglednica 22: Postopki optimizacije	68
Preglednica 23: Rezultati prve optimizacije: optimizirane uteži.....	75
Preglednica 24: Rezultati prve optimizacije: natančnost določitve stojišča.....	76
Preglednica 25: Odčitane meje iz χ^2 porazdelitve za globalni test modela.....	76
Preglednica 26: Rezultati prve optimizacije: krogl.....	77
Preglednica 27: Rezultati prve optimizacije: optimizirane uteži.....	78
Preglednica 28: Rezultati prve optimizacije: natančnost določitve stojišča.....	79
Preglednica 29: Rezultati prve optimizacije: krogl.....	80
Preglednica 30: Rezultati druge optimizacije: optimizirane uteži.....	80

Preglednica 31: Združeni rezultati optimizacije.....	81
Preglednica 32: Primerjava koordinat stojišča	83
Preglednica 33: Natančnost opazovanj.....	83
Preglednica 34: Koordinate točk v glavnem predoru	84
Preglednica 35: Opazovanja v glavnem predoru.....	85
Preglednica 36: Začetne kombinacije v glavnem predoru.....	85
Preglednica 37: Rezultati kombinacije 2.....	86
Preglednica 38: Rezultati kombinacije 3	87
Preglednica 39: Rezultati kombinacije 8.....	88
Preglednica 40: Izločevanje opazovanj	89
Preglednica 41: Natančnosti opazovanj za kombinacijo 2, 3 in 8.....	90

KAZALO SLIK

Slika 1: Avtocestno omrežje v Sloveniji	10
Slika 2: Celotna trasa avtocestnega odseka Šentvid – Koseze	11
Slika 3: Predvidena trasa raziskovalnega rova	15
Slika 4: Dejanska trasa raziskovalnega rova	16
Slika 5: Tektonske luske	17
Slika 6: Razdelitev profila na kaloto in stopnico	31
Slika 7: Izbiranje območij za stabilizacijo	38
Slika 8: Stabiliziranje detajlnih točk	38
Slika 9: Stabilizacija stojišča s konzolo	39
Slika 10: Pogled iz raziskovalnega rova proti čelu glavnega predora	39
Slika 11: Pogled s čela predora v raziskovalni rov.	40
Slika 12: Elektronski tahimeter Leica TCRP1201 R300	41
Slika 13: Reflektorji, na katere lahko viziramo z instrumentom	44
Slika 14: Prikaz vizur na dane točke v raziskovalnem rovu	46
Slika 15: Tlorisna skica opazovanj v raziskovalnem rovu	49
Slika 16: Prikaz točk	51
Slika 17: Shema optimizacije	73
Slika 18: Razporeditev točk v glavnem predoru Šentvid	84

1 UVOD

1.1 Opredelitev področja raziskovanja in opis problema

Pri gradnji cest, železnic, vodnih kanalov in drugih prometnih komunikacij nam gradnjo pogosto otežujejo naravne ovire kot so gore, hribi, reke, morja ipd. V takih slučajih prometne poti najpogosteje speljemo preko premostitvenih objektov (mostov) ali pa skozi predore. Slednji so podzemni objekti v obliki cevi, ki so z obeh strani odprti in služijo za povezavo dveh komunikacij, ki sta ločeni z oviro.

Pred gradnjo predora je dobro učinkovito in celostno poznati značilnosti okolne hribinske mase predora. Vse napovedi in projektne rešitve v predorogradnji vsebujejo neko stopnjo tveganja. Zato se v nekaterih primerih izgradnje predorov predhodno odločimo za izkop **raziskovalnega rova**, ki kljub njegovi dragi izvedbi, zmanjša omenjeno stopnjo tveganja. Razlogi za izkop raziskovalnega rova so lahko: želja zadostno spoznati geološko sestavo okolne hribinske mase, pridobivanje podatkov o hidrogeologiji in tektoniki v hribini, natančno določanje optimalne lokacije kasneje zgrajenih delov predora, ugotavljanje prostorskih pomikov izbranih točk v izkopanem raziskovalnem rovu z namenom obveščanja graditeljev predora o optimalnih podpornih ukrepih ipd. Raziskovalni rov tako omogoča, da na podlagi geološke in geotehnične spremljave, ki se izvajata v rovu, pridobimo podatke za kasnejšo izgradnjo glavnega predora.

V tej diplomski nalogi se področje raziskovanja nanaša na geotehnično spremljavo v raziskovalnem rovu predora Šentvid. V njem so bila izvedena geodetska opazovanja z namenom ugotavljanja prostorskih pomikov izbranih točk v rovu zaradi vpliva gradnje glavnega predora Šentvid na sam raziskovalni rov. Na podlagi dobljenih rezultatov o premikih izbranih točk v raziskovalnem rovu se graditelji odločajo za optimalno podpiranje hribine pri gradnji glavnega predora Šentvid. Ker je želja nas geodetov, da pri tem pridobimo čim bolj zanesljive rezultate pomikov, se pri obdelavi meritev poslužujemo optimizacije opazovanj. Pri optimizaciji iščemo optimalne uteži opazovanj, ki jih vključimo v izravnavo opazovanj in kot

njen rezultat pridobimo optimalno natančnost koordinat stojišča in izbranih točk v raziskovalnem rovu. S tem pa so posledično tudi premiki izbranih točk v steni raziskovalnega rova optimalno določeni.

Težava, ki se pri optimizaciji opazovanj pojavlja in bo tudi predstavljena v nadaljevanju diplomskega dela, je določitev najboljših možnih uteži opazovanj.

1.2 Namen in cilji naloge

Raziskovalni rovi se dandanes pri gradnjah predorov bolj redko izvajajo. Razlog je predvsem v finančni plati, saj tovrstni rovi veliko stanejo. Odločitev za gradnjo raziskovalnega rova mora zato imeti tehtne razloge. V primeru predora Šentvid so se za gradnjo raziskovalnega rova odločili predvsem zaradi nepoznane pestre geološke sestave Šentviškega hriba in zaradi določitve natančne lokacije kavern, v katerih se priključevalni cevi priključita na glavni predorski cevi. Šentviški raziskovalni rov je prvi raziskovalni rov v Sloveniji. Iz tega razloga se nam zdi obravnavanje tovrstne teme po eni strani dokaj aktualno, po drugi pa bomo morda v prihodnje glede na razgibanost in geološko pestrost naše države pri gradnji predorov pričala še kakšnemu raziskovalnemu rovu. Z gradnjo novih avtocest bo v Sloveniji potrebno zgraditi še okoli 15 kilometrov predorov. Z geodetskega vidika bi reševanje problema optimizacije opazovanj v tem diplomskem delu lahko bila neke vrste pomoč naslednjim generacijam, ki bi se ukvarjali s tovrstnimi izzivi v predorih.

Glavni cilj diplomske naloge je pridobiti takšne najboljše možne uteži opazovanj, da se z vključitvijo le teh v izravnavo pridobi takšne natančnosti koordinat stojišča, da bo elipsoid pogreškov stojišča postal krogla. Hkrati s tem ciljem pa pridobiti vpogled nad geodetskim delom v raziskovalnem rovu, kakor tudi predstavitev nekaj splošnih karakteristik predora Šentvid.

1.3 Predpostavke in omejitve naloge

Besedna zveza »gradnja predora« skriva v sebi veliko delovnih faz. V diplomski nalogi je na začetku sicer podane nekaj splošne vsebine o delitvi predorov, vendar smo se v nadaljevanju poskušali omejiti predvsem na eno izmed delovnih faz: na raziskovalni rov Šentvid in vlogo geodeta v njem ter predvsem na optimizacijo uteži opazovanj.

Predpostavljamo, da je literatura, pridobljena v knjižnicah, na spletu in iz zapiskov s predavanj, pravilna.

1.4 Metode dela

Pred pisanjem naloge je bilo potrebno najti in zbrati ustrezno literaturo v knjižnicah, kjer gre omeniti predvsem knjižnico Fakultete za gradbeništvo in geodezijo in Centralno tehniško knjižnico v Ljubljani. Precej literature mi je priskrbel tudi sam mentor, ostalo literaturo pa sem črpala s spleta in iz zapiskov s predavanj. Nato je sledilo pregledovanje literature in oblikovanje diplomske naloge.

Naloga poleg teoretičnega dela vsebuje tudi praktični del izravnave in optimizacije opazovanj, ki je bil izveden s programom Matlab. Na podlagi meritev iz raziskovalnega rova so bile najprej izračunane izravnane prostorske koordinate stojišča inštrumenta in natančnost določitve stojišča ter Helmertov elipsoid pogreškov stojišča. Nato so se z optimizacijo, v kateri sta bili uporabljeni enotska in diagonalna matrika kriterija, pridobile uteži opazovanj, ki so bile nadalje vključene v ponovno izravnavo. Iz ponovne izravnave smo pridobili novo natančnost določitve stojišča, na podlagi katere se je izračunal nov Helmertov elipsoid pogreškov. V primeru, da smo kot rezultat prvotne optimizacije pridobili nekatere uteži opazovanj negativne, smo opazovanje z negativno utežjo odstranili iz nadaljnjih izračunov in izvedli optimizacijo, izravnavo in izračun Helmertovega elipsoida še enkrat. Dodatno smo izvedli optimizacijo uteži opazovanj za določitev stojišča v glavnem predoru. Za ta dodatek smo se odločili zato, ker je velikost glavnega predora neprimerno večja od raziskovalnega rova in s tem posledično je geometrija opazovanj v rovu in predoru popolnoma drugačna.

2 DELITEV PREDOROV

Predore lahko delimo (Koler, 2005):

2.1 Glede na oviro/lego predora

- gorski predori (skozi hibe, gorske masive),
- podvodni predori (pod vodo),
- mestni predori (pod naselji),
- razvodniški predori (razdvajajo dve reki),
- dolinski predori (kadar ima dolina vmes oviro).

2.2 Glede na namen uporabe

2.2.1 Prometni predori:

- cestni predori,
- železniški predori,
- predori na plovnih kanalih,
- metroji in predori za mestne železnice,
- predori za pešce.

2.2.2 Hidrotehnični predori

- predori pri hidrotehničnih napravah (dovodni, odvodni, obtočni predori),
- komunalni predori (vodovodni, kanalizacijski, PPT predori),
- predori za melioracijo (namakanje, izsuševanje).

2.2.3 Rudarski predori oz. rovi

2.2.4 Predori za posebne namene

- podzemne garaže, skladišča, zaklonišča,
- podzemni industrijski oddelek,
- hangarji za letala in zaklonišča za podmornice,
- pospeševalniki v jedrski fiziki (predori v obliki kroga z majhnim presekom).

2.3 Glede na dolžino

- kratki predori (do 50 m),
- srednje dolgi predori (od 50 – 500 m),
- dolgi predori (od 500 – 4000 m),
- zelo dolgi predori (več kot 4000 m).

2.4 Glede na površino prereza profila

- rovi (do 5 m²),
- majhni predorski profili (od 5 m² do 20 m²),
- srednji predorski profili (od 20 m² do 60 m²),
- veliki predorski profili (od 60 m² do 75 m²),
- zelo veliki predorski profili (več kot 75 m²).

2.5 Glede na globino predora

- plitvi (nadkritje do 20 m) in
- globoki (več kot 20 m nadkritja).

2.6 Glede na obliko osi

- predor v premi,
- prema s krivinami na vstopu v in izstopu iz predora,
- krivina na celotni dolžini predora,
- v spirali (za gorske železnice).

2.7 Glede na težavnost izgradnje (geološka sestava tal)

- lahki predori (ugodna geološka sestava, kompaktna kamnina, ni izvirov vode in podzemnih jezer, hribinski pritiski na cev so minimalni, ni potrebno podpirati, dovolj je že sekundarna obloga),
- težki predori (močni hribinski pritiski na cev, vdori vode v predorsko cev, med kopanjem predora moramo sproti vgrajevati podporne ukrepe),
- zelo težki predori (zelo močni hribinski pritiski na cev, ni možnosti odtekanja podtalnice).

2.8 Glede na tehnologijo gradnje

- NATM (ang. New Austrian Tunnelling Method) ni metoda, temveč koncept izdelave izkopa, ki omogoča sprotno prilagajanje lokalnim geomehanskim pogojem s široko izbiro posebnih postopkov za posamezne, na kraju samem ugotovljene pogoje. Hribina okrog območja izkopa se obravnava hkrati kot breme (obtežba) in kot nosilni obroč, ki to breme tudi nosi.
- TBM (ang. Tunnel Boring Machine) je metoda gradnje predorov, pri kateri se uporabljajo veliki vrtni stroji. Uporablja se lahko npr. v dolgih predorih v relativno homogenih geoloških pogojih. Oblika prečnega prereza predora je krožna.
- C&C (ang. Cut & Cover) je metoda gradnje predorov, ki ji rečemo pokriti vkop. Uporablja se lahko npr. pri nizkem nadkritju in v poseljenem okolju. Oblika prečnega prereza predora je pogosto pravokotna, lahko tudi podkvasta.

2.9 Umestitev predora Šentvid glede na zgornje delitve

- a) Glede na oviro/lego predora ga umestimo kot predor, ki ga ovira Šentviški hrib.
- b) Glede na namen uporabe gre za cestni prometni predor, v katerem bo potekala gorenjska avtocesta A2.
- c) Glede na dolžino gre za predor, ki bo imel levo cev dolgo 1033 m in desno 1060 m, torej ga uvrstimo med dolge predore.
- d) Glede na površino prereza profila ga umestimo glede na prereze na različnih mestih v predoru:
 - **Severni portal**¹ – **Šentvid** (dvopasovni predor s prerezom 90 m²),
 - **Priključna kaverna**² (od 300 m² do 330 m²; projektiran prerez je 300 m², ponekod zaradi težav izkopljejo 330 m² prereza),
 - **Južni portal – Koseze** (tripasovni predor od 140 do 150 m²; projektiran prerez je 140 m², ponekod zaradi težav izkopljejo 150 m² prereza),
 - **Priključne cevi** (od 81 m² do 90 m²; zahodna-vstopna priključna cev bo prereza 81 m², vzhodna-izstopna priključna cev pa bo navaden dvopasovni predor s prerezom 90 m²),
 - **Raziskovalni rov** (do 13 m²).

Razen raziskovalnega rova, ki spada med majhne predorske profile, ostale prereze umestimo med zelo velike predorske profile.

- e) Glede na globino predora ga uvrstimo med globoke predore, saj je povprečno nadkritje večje od 20 m. Debelina nadkritja nad celotnim predorom je od 5 do 107 m. Pri tem

¹ *Portal* je začetek oziroma konec predora na prehodu v odprto traso. V širšem pomenu predstavlja portalno območje tisti del odprte trase pred predorom, kjer so nameščeni objekti, oprema in naprave, potrebne za nemoteno in varno uporabo predora.

² *Kaverna* je razširjen odsek v predoru, kjer gre v našem primeru za združitev priključnih cevi z avtocesto.

imata severni in južni portal manjše nadkritje (od 5 do 15 m) kot pa srednji del predora.

- f) Glede na obliko osi sta leva in desna cev predora v krivini na celotni dolžini.
- g) Glede na težavnost izgradnje predor Šentvid umestimo med težje izgradljive predore, kar pogojujejo predvsem geološke razmere, ki so opisane v nadaljevanju.
- h) Glede na tehnologijo gradnje je predor Šentvid grajen po NATM, pretežno s strojnim izkopom, mestoma pa z miniranjem.

3 SPLOŠNO O PREDORU ŠENTVID

3.1 Gradnja avtocestnega sistema v Sloveniji

V Sloveniji se avtoceste gradijo od leta 1970. Prvi avtocestni odsek dolg 32 km je bil zgrajen od Vrhnike do Postojne in bil odprt za promet 1972. Od 1970 do 1994 je bilo skupaj zgrajenih 198.8 km štiripasovnih in dvopasovnih avtocest.

Nacionalni program izgradnje avtocest (v nadaljevanju NPIA) Slovenija uresničuje od 1994 pa do danes. Tako je od 1994 do avgusta 2005 zgradila 359 km avtocest, hitrih cest in drugih cest iz NPIA. Z izgradnjo vseh načrtovanih avtocestnih povezav iz NPIA bo Slovenija imela okoli 660 km avtocest in hitrih cest. Z večino avtocest in hitrih cest v Sloveniji upravlja DARS d. d. (Družba za avtoceste v RS).

Sedanje slovensko avtocestno omrežje, ki pa še ni v celoti zgrajeno, obsega (povzeto po DARS, 2006):

- Avtocesta A1 (v smeri jugozahod - severovzhod): Šentilj – Maribor – Ljubljana – Koper (Z drugimi evropskimi cestami v transevropski prometni mreži TEN sestavlja avtocesta A1 V. panevropski koridor, ki povezuje Barcelono, Lyon, Milano, Benetke, Trst, Koper, Postojno, Ljubljano, Celje, Maribor, Lendavo, Budimpešto in Kijev)
- Avtocesta A3 (odcep iz A1 proti Italiji): Gabrk pri Divači – Fernetiči
- Avtocesta A4 (odcep iz A1 proti Hrvaški): Slivnica pri Mariboru – Gruškovje
- Avtocesta A5 (odcep iz A1 proti Madžarski): Pesnica pri Mariboru – Vučja vas – Beltinci – Pince
- Avtocesta A2 (v smeri sever - jug): Predor Karavanke – Ljubljana – Obrežje (Z drugimi evropskimi cestami v transevropski prometni mreži TEN sestavlja avtocesta A2 X. panevropski koridor, ki povezuje Salzburg, Ljubljano, Zagreb, Beograd, Niš, Skopje, Veles, Thessaloniki in Solun)

Hitre ceste v Sloveniji:










- H2 – hitra cesta skozi Maribor
- H3 – severna obvoznica v Ljubljani
- H4 – Podnanos – Vrtojba
- H5 – Škofije – Srmin

Če se omejimo samo na avtocesto A2 in sicer na del od Kranja do Ljubljane, naletimo na še manjkajoč avtocestni odsek med Šentvidom in Kosezami. Konec leta 2007 naj bi izgradnja tega odseka povezala gorenjski avtocestni krak z ljubljanskim cestnim obročem, kar bo razbremenilo sedaj zelo obremenjeno Celovško cesto. Del odseka Šentvid – Koseze leži v dvocevnem predoru Šentvid. V predoru je v obeh ceveh projektirana združitev avtoceste s priključkom na Celovško cesto.



Slika 1: Avtocestno omrežje v Sloveniji

Legenda:

	zgrajene avtoceste in hitre ceste, 13.12.2005
	avtocestni odseki v gradnji, ki bodo v letu 2006 predani prometu (22.3 km)
	avtocestni odseki v gradnji, na katerih se bo v letu 2006 z gradnjo nadaljevalo
	avtocestni odseki, na katerih se bo v letu 2006 z gradnjo začelo
	avtocestni odseki, na katerih se bodo izvajala pripravljalna dela pred začetkom gradnje
	avtocestni odseki v gradnji po letu 2006
	avtocestni odseki iz t.i. "dodatnega programa"
	variantno priključevanje
	odseki hitrih cest iz t.i. "dodatnega programa"

3.2 Trasa avtoceste in predora

Predor Šentvid – Koseze je ključna vez pri navezavi gorenjske avtoceste A2 na ljubljansko obvoznico in s tem na avtocestni križ Slovenije (Žigon, 2006, str. 126). Po priključku Brod, do katerega že poteka gorenjska avtocesta, se trasa avtoceste razmakne v dva kraka in se pred Šentvidom spusti pod teren v že obstoječo galerijo Šentvid in tako poteka pod gorenjsko železniško progo, urbanim naseljem ter se nato dvigne na nivo Celovške ceste, na katero se tudi priključi. Predvidena nova trasa avtoceste pa naj bi v prihodnje potekala skozi že izgrajeno podaljšano galerijo Šentvid pod Celovško cesto, predrila Šentviški hrib in izstopila na Pržanju, od koder bo pot nadaljevala do Kosez. Opisani glavni trasi avtoceste se pri vstopu v Šentviški hrib priključita še vstopna in izstopna cev, s katerima se omogoči vstop iz Celovške ceste na glavno traso Šentvid – Koseze ali pa izstop iz nje na Celovško cesto. Trasa pada od juga proti severu (Koseze višje, Šentvid nižje).



Slika 2: Celotna trasa avtocestnega odseka Šentvid – Koseze

Dolžina celotne trase, ki znaša 5550 m, se deli na tri enote:

- Brod – Severni portal (660 m),
- Predor Šentvid (1450 m) in
- Južni portal – Koseze (3440 m).

V osnovi pa se predor razdeli na urbani in klasični predorski del, katera se razlikujeta v pristopu načrtovanja in izvedbe. Urbani del tako zajema predel od že obstoječe galerije Šentvid do roba Šentviškega hriba, ki zajema razvejano prometno infrastrukturo: železnico, cestno vpadnico ter kolesarsko pot in pešpot. Urbani del razdelimo na:

- že leta 1982 zgrajeno »Galerijo³ Šentvid« (250 m)
- leta 2005 zgrajen »Pokriti vkop⁴ Šentvid«, ki poteka od že prej obstoječe galerije do Celovške ceste (140 m).

Urbani del predora s predorskim delom bo povezal t.i. »Vezni del« (zopet v obliki pokritega vkopa) od Celovške ceste do Šentviškega hriba. S to vezjo se bo »Pokriti vkop Šentvid« navezal na klasičen predorski dvocevni predor, ki poteka do južnega portala na Pržanju.

Hribinski del predora se deli na štiri enote:

- dvopasovni del predora s standardnim karakterističnim profilom,
- priključno kaverno,
- tropasovni del predora in
- priključne cevi.

Skupna dolžina vseh cevi je okoli 3000 m. Cevi so različnih velikosti izkopnih profilov: od 81 m² v priključnih ceveh do največjega profila 300 m² v priključni kaverni.

³ Galerija je gradbeni objekt v trasi ceste, praviloma pravokotne oblike, ki se ga izvede na mestih, ki so lavinsko (sneg, kamenje) posebej ogrožena in je izveden po sistemu odprte gradnje ter kasneje zasut z nagnjenim prekritjem. V posebnih primerih se namesto zasutja objekta lahko izvede tudi drugačna zaščita krovne površine.

⁴ Pokriti vkop je podzemni gradbeni objekt v trasi ceste, obokane ali pravokotne oblike, ki se ga izvede v odprti gradbeni jami in kasneje zasuje.

3.3 Vzroki za gradnjo predora

Na prvem mestu gre za negotovanje ljudi nad neurejeno navezavo gorenjske avtoceste na osnovni slovenski avtocestni križ (Žigon, 2006, str. 125). Tu gre predvsem za nezadovoljstvo vsakodnevnih migrantov, evropskih turistov, prevoznikov in samih prebivalcev. Ti so v jutranjih in popoldanskih urah na Celovški cesti deležni prometnih zastojev. Pot jih vodi preko več kot deset semaforiziranih križišč, mimo gosto naseljenih ljubljanskih sosesk do ljubljanske obvoznice, katere namen je razbremenjevanje prometa v mestu. Vzrok za povečanje prometa na severozahodni vpadnici prestolnice je predvsem posledica povečane osebne rabe vozil, naraščajočega trenda preseljevanja prebivalstva na mestni rob in povezovanje Slovenije v evropski prostor. Povprečni letni dnevni promet (PDLP) za Celovško cesto znaša 60.000 vozil dnevno. Prometno tehnične študije pa za v prihodnje napovedujejo, da se bo ta prometna žila po izgradnji navezave razbremenila, saj bo zadostovala le še prebivalcem, ki živijo neposredno ob njej.

3.4 Raziskovalni rov

Raziskovalni rov (ang. »exploratory gallery« ali »pilot tunnel«, nem. »Richtstollen«) še drugače lahko imenujemo tudi sondažni, pilotni ali smerni rov majhnega izkopnega profila. S takšnimi rovi pridobimo natančne geološke in geotehnične informacije in s tem zmanjšamo tveganja in stroške pri kasnejši izgradnji glavnega predora. Govorimo o začasni konstrukciji, ki je med izkopom glavnega predora odstranjena (Žigon, 2006, str. 127).

Raziskovalni rovi so uporabni predvsem iz spodnjih vidikov (povzeto po EFLHD, 2006):

- izpostavijo zaporedje geoloških plasti (npr. peščenjaka, apnenca, skrilavca, ...) vzdolž glavnega predora,
- izpostavijo votline z majhnimi vodnimi tokovi v geoloških plasteh,
- pomagajo pri določitvi metode izkopa in določitvi tehnike podpiranja predora, ki se bosta uporabili pri gradnji glavnega tunela,
- odkrijejo pomembne vire podzemne vode,

- ugotovijo prisotnost eksplozivnih plinov,
- izpostavijo prisotnost in količino okolju nevarnih snovi in metode za njihovo odstranitev.

Raziskovalni rovi pomagajo napovedati odziv narave pri gradnji kasnejšega glavnega predora.

3.4.1 Razlogi za gradnjo raziskovalnega rova predora Šentvid

Razloga za gradnjo raziskovalnega rova sta bila predvsem dva: potreba po bolj podrobnem poznavanju geološke sestave Šentviškega hriba glede na načrtovano zahtevno podzemno priključevanje cest in optimalna umestitev kasneje zgrajene priključne kaverne v prostor (Žigon, 2006, str. 133). Ker raziskovanje s površja hribine ni dalo zadovoljivih rezultatov glede iskanja optimalne lokacije predora, so se odločili za izgradnjo raziskovalnega rova. Ker je raziskovalni rov brez mehanizacije in v njem ni strupenih in zadušljivih plinov, je primeren za geološko – geomehanske raziskave, od tod izhaja tudi ime raziskovalni rov. Naloga raziskovalnega rova je, da zagotovi čimveč podatkov in meritev na bodoči trasi glavnega predora.

Prednosti raziskovalnega rova:

- izdelava natančnejših projektov z boljšo predikcijo,
- popisi del in s tem ponudbena in izvedbena cena je znana,
- zmanjša se tveganje pri gradnji,
- zmanjša se tveganje nekontroliranega naraščanja stroškov in časa izvedbe,
- izvajalec se lahko pripravi, saj v vsakem koraku dobro ve, kaj pričakuje.

Slabosti raziskovalnega rova:

- velik strošek,
- težki pogoji dela pri geološki in geotehnični spremljavi (tema, slab zrak, vdiranje vode).

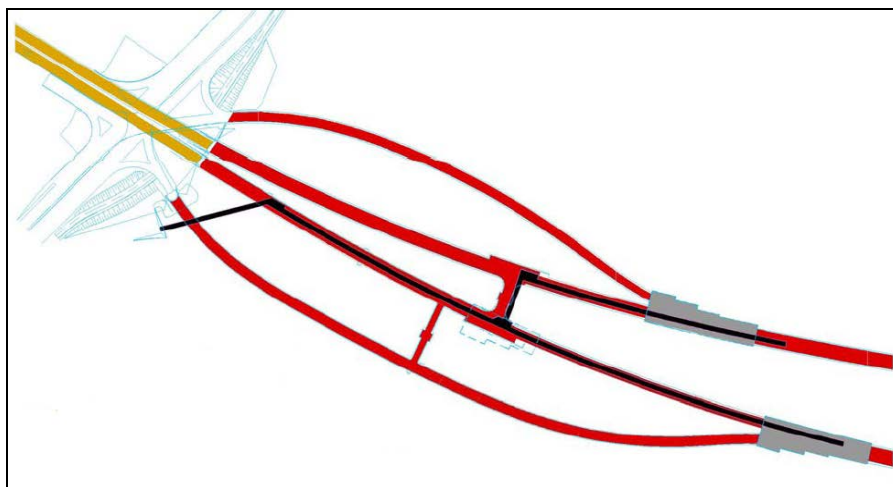
3.4.2 Trasa raziskovalnega rova

Rov je razdeljen na tri dele (Žigon, 2006, str. 134):

- a) **Dostopni rov**, ki služi za povezavo severnega portala z rovom v trasi desne osi bodoče avtoceste. Dostopni rov poteka v premi z dolžino 90 m.
- b) **Desni rov** služi ugotavljanju optimalne lokacije kaverne v desni cevi. Ta rov poteka v trasi desne osi bodoče avtoceste. Njegova dolžina v radiju 1500 m znaša 475 m.
- c) **Levi rov** služi ugotavljanju optimalni lokaciji kaverne v levi cevi. Ta rov poteka v trasi leve osi bodoče avtoceste. Njegova dolžina v radiju 1500 m znaša 252 m.

Levi rov se na desni rov navezuje preko prečnega **povezovalnega rova** dolžine 40 m.

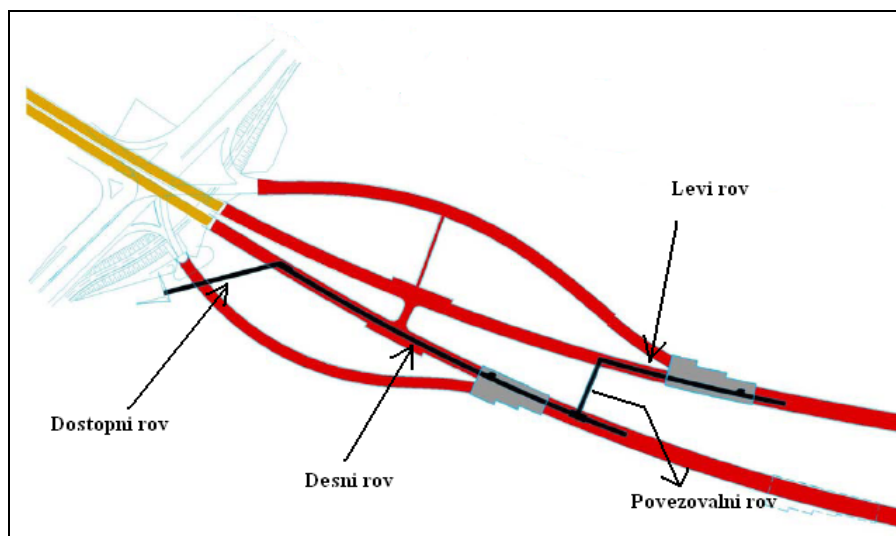
Predvidena dolžina celotnega raziskovalnega rova brez upoštevanja povezovalnega rova ima tako dolžino cca. 820 m.



Slika 3: Predvidena trasa raziskovalnega rova

Trasa raziskovalnega rova pa z razpisom ni bila fiksno določena, temveč je bila odvisna od trenutnih geoloških razmer in zahtev naročnika po izvedenih raziskavah. Tako se je izvajalec prilagodil zahtevam naročnika in spreminjal traso izkopa glede na naročnikove zahteve po raziskavah. Na koncu je bila dejanska dolžina raziskovalnega rova precej krajša od predvidenih 820 m in je znašala okrog 575 m. K temu je pripomogla nekoliko bolj ugodna

geologija kot pa so jo predvidevali sprva. S tem se je bistveno spremenila lokacija desne kaverne in s tem tudi potek trase desne priključne cevi. Lokacija leve kaverne pa se bistveno ni spremenila.



Slika 4: Dejanska trasa raziskovalnega rova

Načeloma je velikost prečnega prereza raziskovalnega rova približno 15 m^2 , kar zadovoljuje potrebno velikost svetlega profila⁵ za namestitev in uporabo predorske gradbene opreme, za obratovanje predorskega prometa in stransko namestitev transportne poti za izkopani material. Ponekod pa je bil profil razširjen v velikost od 25 do 50 m^2 , kjer gre za mesta, ki so namenjena geološko-geomehanskim raziskavam.

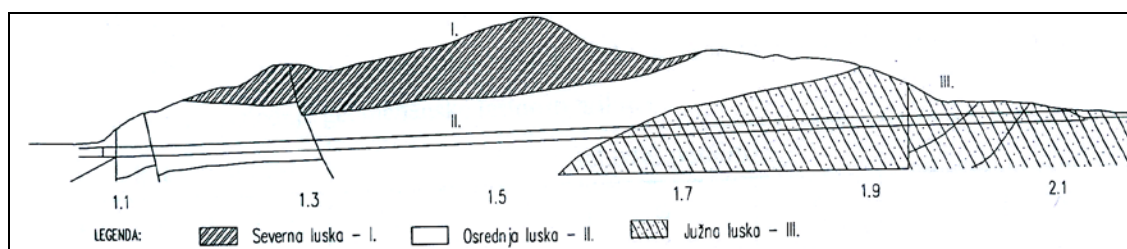
Na podlagi vseh dobljenih podatkov pri izkopavanju raziskovalnega rova so prišli do spoznanja, da je projektirani dvopasovni predor, ki se razširi v kaverno in nato nadaljuje kot tripasovni predor, možno zgraditi.

⁵ Prosti (svetli) profil ceste je omejena, na smer ceste pravokotna ravnina, katere črto določajo točke koordinatnega sistema s sečiščem v presečišču vertikalne osi ceste z ravnino vozišča. Definirana je z velikostjo prometnega profila (prostor za gibanje vozil), povečanega za zaščitno višino in širino (zaščitni prostor).

3.4.3 Tektonske razmere

Območje predora Šentvid se nahaja v bližini narivne ploskve trnovskega pokrova na hrušiški pokrov (Fifer Bizjak, 2002, str. 38). Narivna ploskev trnovskega pokrova poteka po podatkih geološke literature nekaj 100 m južneje od južnega portala predora v Pržanju, ob vznožju Šentviškega hriba. Po podatkih regionalnih tektonskih raziskav naj bi narivanje potekalo od severa proti jugu.

Trasa predora poteka po močno deformirani gubi (verjetno sinklinali⁶) permokarbonskih plasti, ki je zaradi narivanja od severa proti jugu razpadla na tri narivne tektonske enote (luske). Luske si sledijo od severa proti jugu kot prikazuje spodnja slika:



Slika 5: Tektonske luske

Narivne ploskve lusk bolj ali manj vzporedno padajo proti severu-zahodu in potekajo poševno na smer predora. Glede na lego v prostoru jih poimenujemo severna, srednja in južna luska. Predpostavljamo, da so vse tri luske del večje narivne enote, bodisi litijskega ali dolskega pokrova.

Znotraj narivnih enot so med narivanjem nastale sekundarne gube s poleglimi in prevrnjenim krili. Zaradi močne tektonske deformiranosti hribine se natančnejše lege posameznih gub ne da določiti.

⁶ Sinklinala je vbočeni del gube, njeno nasprotje je antiklinala.

3.4.4 Klasifikacija kamnin

Če primerjamo kamnine in zemljine, so kamnine v primerjavi z zemljinami bolj trdne in manj deformabilne. Kamnine pa so velikokrat razpokane, plastovite ali skrilave. Kadar gre za takšne pojave v gmoti kamnine, govorimo o oslabljenih conah v kamninski gmoti (diskontinuitete). Za kamnine moramo tako poznati dva niza parametrov: značilnosti monolitne⁷ kamnine in značilnosti diskontinuitet (Logar, 2006, str. 1).

Najpomembnejše značilnosti monolitne kamnine so enoosna tlačna trdnost, natezna trdnost in elastični modul. Omenjene lastnosti ugotavljamo z laboratorijskimi preiskavami.

Bistvene značilnosti diskontinuitet pa so smer in vpad, hrapavost, valovitost, medsebojna oddaljenost (gostota), tesnost ali odprtost, obseg (kontinuiranost), zaplnitev in lastnosti materiala v razpokah. Med diskontinuitete tako prištevamo razpoke, plastovitost (meje med plastmi kamnine) in skrilavost. Značilnosti diskontinuitet ugotavljamo pretežno s terenskim kartiranjem.

Kamnine so torej zaradi razpokanosti izrazito heterogene in anizotropne ter zato problematične za natančnejše mehanske analize. Zato so se za potrebe inženirskega obravnavanja kamnin razvili številni sistemi klasificiranja kamnin za določene potrebe, med katerimi je tudi predorogradnja. Najbolj pogosti sistemi klasificiranja kamnin so:

- RQD (ang. Rock Quality Designation)
- RMR (ang. Rock Mass Rating) - Bieniawski
- Q (Bartonova klasifikacija)
- GSI (ang. Geological Strength Index)
- Avstrijska klasifikacija za predorogradnjo

⁷ *Monolit* (ang. monolith) je geološka ali tehnološka oblika kot npr. gora ki je sestavljena iz enega samega kamna ali skale. Takšne forme, ki so najpogosteje sestavljene iz trde in homogene metamorfne kamnine, razkrije erozija. Trenutno največji monolit na Zemlji je Mount Augustus v Avstraliji.

Geotehnične parametre hribine pri predoru Šentvid so določevali s pomočjo GSI indeksa. Hribino pa so klasificirali po dveh neodvisnih sistemih: avstrijskem standardu ÖNORM in RMR klasifikaciji. Iz tega razloga se bomo v nadaljevanju omejili samo na te tri sisteme in dodatno na RQD klasifikacijo, ki nastopa v RMR klasifikaciji.

3.4.4.1 RQD klasifikacija

RQD (ang. Rock Quality Designation) beležimo pri popisu jedra vrtine (Logar 2006, str. 3). Izberemo odsek vrtine in RQD izračunamo kot razmerje med dolžino jedra v kosih, ki so daljši od 10 cm (L_{10}), glede na celotno dolžino jedra na tem odseku (L):

$$RQD = \frac{L_{10}}{L}$$

Glede na izmerjeno vrednost RQD delimo kamnine na:

Preglednica 1: Klasifikacija po RQD

Kakovost kamnine	RQD (%)
Zelo slaba kamnina	0 – 25
Slaba kamnina	25 – 50
Srednja kamnina	50 – 75
Dobra kamnina	75 – 90
Odlična kamnina	90 – 100

RQD nam poda informacijo o kakovosti monolitne kamnine in o gostoti razpok. Povsem zdrobljena kamnina ima RQD enak nič, medtem ko ima kvalitetna kamnina z redkimi razpokami RQD enak sto. Na izmerjeno vrednost RQD vpliva kakovost vrtnjanja in usmerjenost vrtine glede na smeri razpok.

3.4.4.2 RMR klasifikacija

RMR (ang. Rock Mass Rating system) sistem je razvil Bieniawski med 1972 – 1973 (Logar, 2006, str. 4). Uporablja se v predorih, rudnikih, pri temeljenju itd. RMR sistem se sklicuje na šest parametrov, na podlagi katerih se točkuje in klasificira kamnino v razrede:

1. trdnost monolita kamnine,
2. RQD,
3. medsebojna oddaljenost razpok,
4. stanje razpok,
5. pogoji podtalnice,
6. usmerjenost razpok

Spodnja preglednica prikazuje sistem točkovanja kamninske gmote (Logar, 2006, str.6):

Parameter		Vrednosti				
1	Trdnost monolita	>8 MPa	4-8 MPa	2-4 MPa	1-2 MPa	Potrebna preiskava q_u
	Točkovni trdnostni indeks					
	Enosna tlačna trdnost	>200 MPa	100-200 MPa	50-100 MPa	25-50 MPa	10-25 MPa 3-10 MPa 1-3 MPa
	Točkovanje	15	12	7	4	2 1 0
2	RQD	90-100%	75-90%	50-75%	25-50%	<25%
	Točkovanje	20	17	13	8	3
3	Medsebojna oddaljenost razpok	>300cm	100-300 cm	30-100cm	5-30cm	<5cm
	Točkovanje	30	25	20	10	5
4	Stanje razpok	Zelo hrapave površine; prekinjene; zaprte; kamnina ob stiku je trdna	Nekoliko hrapave površine; odprte do 1 mm; kamnina ob stiku je trdna	Nekoliko hrapave površine; odprte <1mm; kamnina ob stiku je zmehčana	Gladke površine ali zapolnjene z glino do 5 mm ali odprte 1-5 mm; neprekinjene	Zapolnjene z mehko glino >5mm ali odprte >5mm; neprekinjene
	Točkovanje	25	20	12	6	0
5	Talna voda	Pogoji	Povsem suho	Vlažno	Voda pod zmernimi tlaki	Voda povzroča resne probleme
	Točkovanje		10	7	4	0
		Za račun trdnostnih parametrov iz RMR vzamemo 10 točk. Vodo upoštevamo v analizi stabilnosti.				
6	Orientacija razpok	Zelo ugodna	Ugodna	Zmerna	Neugodna	Zelo neugodna
	Točkovanje	0	-2	-7	-15	-25
		Za račun trdnostnih parametrov vzamemo 0 točk. Orientacijo upoštevamo v analizi stabilnosti.				

Končni RMR predstavlja vsota vseh šestih točkovanj glede na šest zgoraj naštetih parametrov, po katerih ocenjujemo kakovost kamnine. Seštevek vseh šestih točkovanj nam pove, v kateri razred od petih uvrstimo kamnino. Razrede predstavlja spodnja preglednica:

Preglednica 2: Klasifikacija po RMR

Kakovost kamnine	RMR
Zelo slaba kamnina	0 – 20
Slaba kamnina	21 – 40
Srednja kamnina	41 – 60
Dobra kamnina	61 – 80
Zelo dobra kamnina	81 – 100

RMR klasifikacija za predor Šentvid (Fifer Bizjak, 2002, str. 40):

Plast 1: Temno-siv muljevec in glinasti skrilavec

Plast 2: Svetlo-siv drobnozrnati kremenov peščenjak in temno-siv sljudast meljevec z lisami glinovca

Plast 3: Tektonska glina in tektonski zdrob

Preglednica 3: Klasifikacija po RMR (za predor Šentvid)




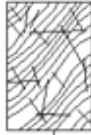


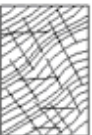


Plast	RMR
1	35 točk (Slaba kamnina)
2	42 točk (Srednja kamnina)
3	Zelo slaba kamnina

3.4.4.3 GSI indeks




GSI indeks (ang. Geological Strength Index) pomeni Geološki trdnostni indeks, katerega sta razvila Hoek in Marinos (Logar, 2006, str. 6). Klasifikacija kamnin poteka po preglednici 4 (prevod Jure Klopčič). Za razvrščanje kamnin je potrebno poznati:

- generalno strukturo kamninske gmote (vrstice levo: sestava in struktura) in
- površinsko stanje razpok (stolpci desno: stanje površine diskontinuitet).

Preglednica 4: Odčitavanje GSI indeksa

SESTAVA IN STRUKTURA		STANJE POVRŠINE DISKONTINUITET				
		ZELO DOBRO	DOBRO	UGODNO	SLABO	ZELO SLABO
	A. Tanko plastovit, manj razpokan peščenjak. Vpliv pelitičnih prevlek na površinah plasti je minimiziran glede na velikost izpostavljene hribinske mase. V plitvah predorih ali brežinah lahko te prevlečene plasti povzročijo strukturno kontrolirano nestabilnost.	70	60			
	B. Peščenjak s tankimi vložki meljevca.		50			
	C. Peščenjak in meljavec v podobnem razmerju.		40			
	D. Meljavec ali skrilavi glinovec s plastmi peščenjaka.			30		
	E. Slab meljavec ali zaglinjen glinovec s plastmi peščenjaka.				20	
C, D, E in G so lahko bolj ali manj manj nagubani kot prikazano, toda to ne spremeni trdnosti. Tektonske deformacije, prelomi in nezveznost prestavijo te kategorije v F in H.						
	F. Tektonsko deformiran, intenzivno naguban/prelomljen, zaglinjen glinovec in meljavec z razpokanimi in deformiranimi plastmi peščenjaka, ki tvorijo skoraj kaotično strukturo.					
	G. Neporušen meljast ali zaglinjen glinovec z nekaj zelo tankimi plastmi peščenjaka ali brez.					
	H. Tektonsko deformiran meljast ali zaglinjen glinovec, ki tvori kaotično strukturo z žepi gline. Tanke plasti peščenjaka so transformirane v manjše koščke.					
 PORUŠENOST HRIBINSKE MASE ZARADI TEKTONIKE						

Legenda:

	Plast 1	GSI: 35-45
	Plast 2	GSI: 37-47
	Plast 3	GSI: 13-23

Hoek in Marinos sta pripravila posebne tabele za heterogene kamnine. Določanje GSI iz takšnih tabel je preprosto in ne želi biti preveč natančno. Mnogo bolje je podajati interval vrednosti kot pa »natančno« posamezno vrednost. Tako je npr. bolje, da navedemo npr. GSI med 20-25 kot pa GSI je 22.5.

Potek določanja GSI indeksa in izračun geomehanskih parametrov:

1. Odčitamo GSI iz preglednice 4 na podlagi poznavanja strukture kamninske gmote in površinskega stanja razpok.
2. Določimo enosno tlačno trdnost vzorcev Q_u in Hoekov parameter m_i iz laboratorijskih testov ali pa ju odčitamo iz preglednic, kot sta spodnji:

Preglednica 5: Odčitavanje Hoekovega in Brownovega parametra za kamnine

Kamnina	m_i	Kamnina	m_i
Konglomerat	22	Marmor	9
Peščenjak	19	Filit	10
Meljevec	9	Metamorfni skrilavci	4 - 9
Glinavec	4	Granit	33
Apnenec	8 - 10	Diorit	28
Breča	20	Bazalt	17
Gnajs	33	Tuf	15

Preglednica 6: Odčitavanje enoosne tlačne trdnosti vzorcev

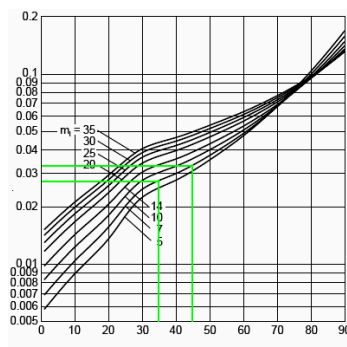
Brownov razred	Trdnost kamnine	Q_u [MPa]	Opis trdnosti vzorca kamnine	Primeri kamnin
R6	Izredno močna	>250	Vzorec lahko odkrušimo le z geološkim kladivom.	Novi bazalt, kremenjak, diabas, gnajs, granit, kremenovec.
R5	Zelo močna	100 – 250	Vzorec lahko zlomimo le z več udarci geološkega kladiva.	Peščenjak, bazalt, gabro, gnajs, apnenec, marmor, tuf.
R4	Močna	50 – 100	Vzorec lahko zlomimo z malo več kot enim udarcem geološkega kladiva.	Apnenec, marmor, peščenjak, škriljevec, skrilavec.
R3	Srednje močna	25 – 50	Vzorec ni mogoče zdrobiti z žepnim nožem, vzorec lahko zlomimo z enim udarcem geološkega kladiva.	Glina, premog, beton, škriljevec, skrilavec, mulj.
R2	Šibka	5 – 25	Vzorec se z žepnim nožem s težavo lušči, z udarci konice kladiva lahko ustvarimo površinsko nazobčanost.	Kreda, kamena sol, kalijev karbonat.
R1	Zelo šibka	1 – 5	Vzorec se drobi že pri udarcih s konico geološkega kladiva in se lušči z žepnim nožem.	Stara kamnina ali kamnina od močnimi vremenskimi vplivi.
R0	Izredno šibka	0.25 – 1	Vzorec lahko nazobčamo z nohtom.	Drobna, zrnata, zdrobljena kamnina (ang. fault gouge), ki nastane ob prelomnici.

3. Na podlagi zgornjih vhodnih podatkov (GSI , Q_u in m_i) za razpokano hribino kot celoto izračunamo geomehanske parametre:

- kohezijo c ⁸

⁸ Kohezija je sila lepljenja med zrni oziroma je sila, ki privlači dele iste celote. Voda z izpiranjem povzroča padec kohezije.

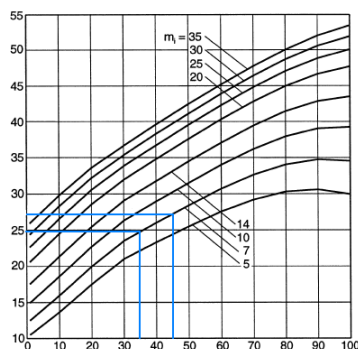
Kohezijo c lahko izračunamo iz spodnjega grafa (Hoek, 1998, str.153) in sicer iz razmerja $\frac{c}{Q_u}$ (ordinata), ki ga odčitamo na podlagi znanega indeksa GSI (abscisa) in parametra m_i (krivulje v grafu).



Konkretno za naš primer: Plast 1 ima GSI med 35 in 45 in $m_i = 8$ (v grafu upoštevamo krivuljo $m_i = 7$). Iz grafa odčitamo razmerje $\frac{c}{Q_u} = 0.027-0.033$. Ker poznamo tudi enoosno tlačno trdnost $Q_u = 17$ MPa, lahko izračunamo kohezijo $c = 0.4$ MPa.

- strižni kot φ ⁹,

Strižni kot φ (ordinata) lahko neposredno odčitamo iz spodnjega grafa (Hoek, 1998, str.153) na podlagi znanega indeksa GSI (abscisa) in parametra m_i (krivulje v grafu).



Konkretno za naš primer: Plast 1 ima GSI med 35 in 45 in $m_i = 8$ (v grafu upoštevamo krivuljo $m_i = 7$). Iz grafa odčitamo strižni kot $\varphi = 25 - 28^\circ$.

⁹ Strižni kot je trenje med zmi, ki tvorijo osnovni skelet zemljine.

- elastični modul E^{10} ,

Elastični modul E izračunamo po spodnjih enačbah (Logar, 2006, str. 9):

$$E(\text{GPa}) = 10^{\left(\frac{GSI-10}{40}\right)} \text{ za } Q_u > 100\text{MPa}$$

$$E(\text{GPa}) = \sqrt{\frac{Q_u}{100}} \cdot 10^{\left(\frac{GSI-10}{40}\right)} \text{ za } Q_u < 100\text{MPa}$$

Ker je v našem primeru za Plast 1 $Q_u = 17 \text{ MPa}$, upoštevamo enačbo:

$$E(\text{GPa}) = \sqrt{\frac{17\text{MPa}}{100}} \cdot 10^{\left(\frac{35-10}{40}\right)} = 1.7 \text{ GPa}$$

$$E(\text{GPa}) = \sqrt{\frac{17\text{MPa}}{100}} \cdot 10^{\left(\frac{45-10}{40}\right)} = 3.1 \text{ GPa}$$

Izračunati se da še rezidualni strižni kot φ_{rez} , Poissonovo število ν^{11} in enosno tlačno trdnost Q_{uh} za razpokano hribino kot celoto, vendar se v izračun teh vrednosti nismo posebej poglobljali, ker niso del obravnavane teme diplomske naloge.

GSI indeks in izračun geomehanskih parametrov za predor Šentvid (Fifer Bizjak, 2002, str. 40):

GSI indeks omogoča natančnejšo klasifikacijo hribine in na tej osnovi boljše pot do izračuna njenih geomehanskih parametrov.

¹⁰ *Elastični modul* je fizikalna količina, določena pri raztezanju in stiskanju teles kot razmerje med mehansko napetostjo (silo na enoto preseka) in relativnim raztežkom v Hookovem zakonu.

¹¹ *Poissonovo število* je določeno kot absolutna vrednost razmerja med relativnim skrčkom v prečni smeri (kontrakcija) in relativnim raztežkom v vzdolžni smeri (dilatacija) pri nateznih obremenitvah snovi oziroma med relativnim raztežkom v prečni smeri in relativnim skrčkom v vzdolžni smeri pri tlačnih obremenitvah snovi.

Preglednica 7: Mehanske lastnosti hribine v trasi predora Šentvid na podlagi indeksa GSI

Vhodni podatki				Izhodni podatki					
Plast	GSI	Q_u [MPa]	m_i	c [MPa]	φ [°]	E [GPa]	φ_{rez} [°]	ν	Q_{uh} [MPa]
1	35-45	17	8	0.4	25-28	1.7-3.1	22-25	0.26-0.27	1.6-2.0
2	37-47	24	9.6	0.36-0.46	27-30	2.1-4.1	24-27	0.25-0.26	2.5-3.3
3	13-23	1	8	0.0	18-22	0.11-0.21	15-19	0.29-0.31	0.04-0.06

3.4.4.4 Avstrijski standard ÖNORM za raziskovalni rov Šentvid

Za gradnjo predorov je hribinska kategorizacija povzeta po avstrijskem nacionalnem standardu ÖNORM (Jemec, 2006, str. 19).

Hribinska kategorizacija raziskovalnega rova izhaja iz razredov A, B, C in PC:

Preglednica 8: Hribinska kategorizacija raziskovalnega rova (standard ÖNORM)

Hribinska kategorija	Kratek opis
A	Hribina podvržena manjšim porušitvam
B	Močno strukturno poškodovana hribina
C	Hribina pod povečanim napetostnim stanjem
PC	Območje portalov
B2 razširitev TIP1	Močno strukturno poškodovana hribina
B2 razširitev TIP2	Isto kot B2 TIP1, vendar enostranska razširitev
C2 razširitev TIP1	Hribina pod povečanim napetostnim stanjem
C2 razširitev TIP2	Isto kot C2 TIP1, vendar enostranska razširitev

Hribinska kategorizacija upošteva lastnosti hribin po celotnem območju prečnega prereza na posameznem delu predora. Omogoča oceno pričakovanih deformacij glede na posamezno hribinsko kategorijo. Vzdolžni prerez predora lahko tako razdelimo na izkopne odseke, dolžino teh odsekov in razpored posameznih korakov napredovanja.

Hribinska kategorizacija po standardu ÖNORM 2208 za raziskovalni rov Šentvid (Žigon, 2006, str. 135):

V grobem izkop raziskovalnega rova razdelimo na dostopni rov in rov znotraj trase predora.

Dostopni rov povezuje severni portal z rovom v trasi desne osi bodoče avtoceste. Najprej dostopni rov poteka v zaglinjenem pobočnem grušču, ki je mestoma podvržen izpiranju meteorske vode, in v delno pregnetenem glinovcu. Ob spuščanju rova do trase desne osi se pojavijo plasti drobnozrnatega peščenjaka, ki preide v tektonsko cono. Zaradi takšne pestre sestave geomehansko neugodnih plasti in majhnega nadkritja, hribino dostopnega rova uvrščamo po standardu ÖNORM v PC kategorijo.

Rov znotraj trase predora se izkopava večinoma v plasteh sivega peščenjaka, meljevca, skrilavega glinovca in delno preko tektonskih con. Na mestih, kjer ni tektonskih con, izkop poteka v hribinskih kategorijah A in B. Na prehodih skozi tektonske cone pa se uporabi kategorija C.

3.4.4.5 Avstrijski standard ÖNORM za dvopasovni predor Šentvid

Hribinska kategorizacija dvopasovnega predora po standardu ÖNORM B 2203 (Jemec, 2006, str. 24):

Preglednica 9: Hribinska kategorizacija glavnega predora (standard ÖNORM)

Hribinska kategorija	Kratek opis
A1	Stabilni hribinski pogoji
A2	Hribina podvržena manjšim porušitvam
B1	Delno navezana in razpokana hribina
B2	Močno strukturno poškodovana hribina
B3	Navezana hribina z nizko kohezijo
C1	Hribina podvržena hribinskim udarom
C2	Hribina pod povečanim napetostnim stanjem
C3	Hribina pod močno povečanim napetostnim stanjem
C4	Mehke, iztisljive in hribine podvržene tečenju
C5	Hribine podvržene nabrekanju

Za načrtovanje posameznih podpornih ukrepov pa obstajajo še dodatne kategorije:

Preglednica 10: Dodatne hribinske kategorije (standard ÖNORM)

Hribinska kategorija	Kratek opis
PC	Območje portalov
SCC	Območje nizkega nadkritja
CA	Izkop predora pod prej izdelanim betonskim obokom
SWG	Izkop predora s stranskimi galerijami

Hribinska kategorizacija po standardu ÖNORM B 2203 za dvopasovni predor Šentvid (Žigon, 2006, str. 143):

Severni in južni portal sta po standardu ÖNORM uvrščena v območje portalov PC. Hribina v osrednjem delu predora pa spada v C2 kategorijo. Na mestih, kjer je hribina tektonsko bolj pretrta, jo uvrstimo v C3 kategorijo. V močnih tektonskih conah pa hribino uvrstimo v C4 hribinsko kategorijo.

Standard ÖNORM nato še razčlenjuje posamezno od hribinskih kategorij na njene lastnosti, način izkopa v njej in na potek in čas vgradnje podpornih elementov v njej. Te razčlenitve v diplomu niso zajete, saj so bolj stvar gradbeništva in ne geodezije.

Opomba: Pravzaprav takšna poglobitev v geološke razmere in klasifikacijo kamnin z geodetskega vidika v nalogi ne bi bila potrebna, vendar se nam je zdela zanimiva, saj imajo velik vpliv na premike v steni raziskovalnega rova poleg drugih dejavnikov tudi geološke razmere v hribini. Po drugi strani pa naj bi geolog in geodet pri delovanju v rovu nekako sodelovala in je dobro, da geodet pozna vsaj malo geološkega jezika za dobro razumevanje z geologom.

Sklep glede tektonskih razmer in klasifikacije kamnin:

Z vidika tektonskih razmer se zaradi treh naravnih lusk v permokarbonskih klastitih pričakujejo težave pri izkopu in varovanju predora.

Glede klasifikacije kamnin lahko ugotovimo, da so tri izbrane plasti po RMR klasifikaciji točkovane v srednje dobro, slabo in zelo slabo kamnino. Po odčitku GSI indeksa glede na poznavanje površinskega stanja razpok (brez upoštevanja generalne strukture kamninske gmote) je situacija dokaj podobna: glede na preglednico 4 (Odčitavanje GSI indeksa) lahko trdimo, da največji delež kategoriziranih plasti pade v območje ugodnega, slabega in zelo slabega površinskega stanja razpok (stanje površine diskontinuitet), minimalen delež kategoriziranih plasti 1 in 2 pa pade tudi v območje dobrega in zelo dobrega površinskega stanja razpok. Če pogledamo še avstrijski standard ÖNORM za raziskovalni rov, ta hribino dostopnega rova umešča v območje portalov (PC), medtem ko se hribina rova znotraj trase predora na mestih, kjer ni tektonskih con, umešča v hribino podvrženo manjšim porušitvam (A) in v močno strukturno poškodovano hribino (B). Na prehodih skozi tektonske cone pa se hribina rova znotraj trase predora umešča v hribino s povečanim napetostnim stanjem (C). Hribinska kategorizacija dvopasovnega predora po standardu ÖNORM pa razvršča severni in južni portal v območje portalov (PC), osrednji del predora pa kategorizira v hribino pod povečanim napetostnim stanjem (C2). Kjer je hribina tektonsko bolj pretrta, jo razvršča v hribino pod močno povečanim napetostnim stanjem (C3). V močnih tektonskih conah pa hribino dvopasovnega predora uvrsti v mehko, iztisljivo in hribino podvrženo tečenju (C4).

Na podlagi zgornjih klasifikacij hribine lahko sklenemo, da so geološke razmere za gradnjo zelo neugodne, saj je le malo govora o trdnih in nosilnih kamninah in o stabilnih hribinskih pogojih. Dodatno težavo predstavlja tudi velika bližina predorskih cevi na severnem delu trase (le 2 m kamnine je predvidene med obema cevema), ki izvajalca sili v močno omejevanje deformacij. Ravno tako lahko na severnem portalu probleme povzroča tudi pričakovana tektonska cona takoj na začetku predora. Na južnem delu trase obstaja nevarnost splazitve zaradi gradbenih del.

Po opravljenih raziskavah je na podlagi zgoraj navedenih razlogov za predor Šentvid prišlo do zaključka, da bo to ponovno eden izmed avtocestnih predorov, kakršnih je bilo v okolici Ljubljane izdelano že več, in katerega gradnja ne bo lahka. Zato so se pri izbiri metode gradnje odločili za Novo avstrijsko metodo gradnje podzemnih objektov NATM (ang. New Austrian Tunneling Method), ki omogoča prilagodljivo gradnjo v zahtevnih geotehničnih pogojih.

3.4.5 NATM metoda gradnje

Dandanes se podzemni objekti izdelujejo v najrazličnejših geotehničnih pogojih, ki so lahko manj zahtevni ali pa zelo zahtevni. Zahtevne geotehnične pogoje lahko premostimo z uporabo sodobnih tehnoloških postopkov, vendar pa se moramo v takem primeru soočiti z visokimi stroški, ki pri tem nastanejo. Glavne smernice pri gradnji predorov so industrializacija izgradnje s konstantnimi napredki in vnaprej določenimi časi ter stroški izdelave. NATM je Nova avstrijska metoda gradnje podzemnih objektov v zahtevnih geotehničnih pogojih. Njena značilnost je postopno izkopavanje z možnostjo hitrega prilagajanja spremenljivim pogojem (Likar, 2002, str. 41 – 43). Zaradi dobre prilagodljivosti različnim geotehničnim razmeram so se principi NATM v preteklih desetletjih pri nas uspešno uveljavili pri gradnji različnih podzemnih objektov za potrebe cestne in železniške infrastrukture ter drugih podzemnih objektov v rudnikih.

Cilj NATM je doseči tehnično učinkovito, varno in ekonomično načrtovanje in izgradnjo.

Značilnosti:

- NATM ni metoda, ki ima vnaprej predpisano zaporedje delovnih operacij, temveč je koncept izdelave izkopa, ki omogoča sprotno prilagajanje lokalnim geomehanskim pogojem s široko izbiro posebnih postopkov za posamezne, na kraju samem ugotovljene pogoje.
- Hribina okrog območja izkopa se obravnava hkrati kot breme (obtežba) in kot nosilni obroč, ki to breme tudi nosi. Po tej značilnosti se NATM loči od ostalih načinov načrtovanja predorov, ki hribino okrog podzemnega prostora obravnavajo le kot breme, ki ga nosi obloga v predoru.

Učinkovitost metode se doseže z naslednjimi dejavniki:

- a) **Profil oz. oblika prereza podzemnega prostora:** Pri izbiri profila moramo upoštevati primarno napetostno stanje in samonosilnost hribine ter okoliščine, ki vplivajo na

zmanjšanje nosilnosti. Z obliko profila lahko zagotovimo, da ne pride do koncentracij napetosti.

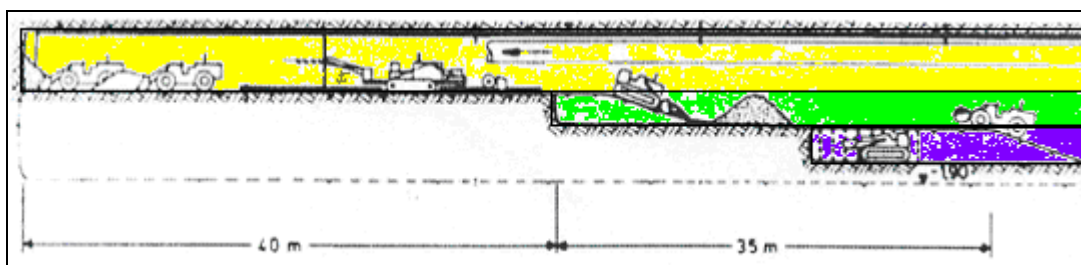
- b) **Hitrost izvajanja izkopa profila:** izkop profila se izvaja postopoma, da se čim manj deformira hribina in posledično ohranja njena trdnost. Izkopavamo kaloto, stopnico in po potrebi talni obok.

KALOTA je zgornje območje predorske cevi. Najprej izkopljemo kaloto in podpremo obok v njenem delu.

STOPNICA je osrednji del izkopa predorske cevi. Nahaja se pod kaloto in nad talnim obokom.

TALNI OBOK se izkoplje in podpira zadnji. Nahaja se na tleh oziroma dnu predora.

ČELO IZKOPA je še neizkopani del predora, ki se nahaja neposredno pred stroji, ki izvajajo izkop.



Slika 6: Razdelitev profila na kaloto in stopnico

(rumeno – kalota, zeleno – stopnica, vijolično – talni obok)

- c) **Podporni ukrepi:** Podporne ukrepe določimo na podlagi predhodnih raziskav in kategorizacije hribine v ustrezne razrede vzdolž trase podzemnega objekta.
- d) **Vgrajevanje podpornih elementov:** Vgradnja mora biti časovno optimalna in postopna, da ne pride do večjih deformacij hribine. Med podporne elemente štejemo predvsem jeklene loke, armaturne mreže, brizgani beton in hribinska sidra. Vsi naštetih podporni elementi se lahko med samo gradnjo prilagajajo spremenljivim geotehničnim razmeram vzdolž objekta.

e) **Primarna ali osnovna obloga in sekundarna ali notranja obloga:**

Primarna obloga, katere sestavni deli so posamezni podporni elementi, je upoštevana kot sestavni del celotnega podpornega sistema predora. Primarna obloga naj bo takšna, da zagotavlja trajno stabilnost predora. Vgrajena je takoj ali zelo hitro po izkopu. Njena naloga je, da ustrezno stabilizira hribinske deformacije.

Sekundarna ali notranja obloga, ki še dodatno poveča stabilnost in varnost podzemnega prostora, pa daje predorski cevi enoten videz in gladko površino, omogoča namestitve različnih vodov, izboljša nepropustnost za vodo, omogoča boljši pretok zraka, boljšo vidljivost in lažje vzdrževanje (čiščenje/pranje predora). Za popolno nepropustnost za vodo se med primarno in sekundarno oblogo vgradi sloj hidroizolacije.

f) **Deformacije pri izkopu:** Kadar pri izkopavanju pride do večjih deformacij, je potrebno vgraditi dodatne podporne ukrepe. Deformacije primarne obloge se ugotavljajo na osnovi sprotih geodetskih meritev, ki določajo intenzivnost podpiranja in način izkopa. Statični izračuni¹² so izvedeni v fazi načrtovanja. Če pa se geotehnični pogoji bistveno spremenijo, pa statične izračune izvajamo tudi med gradnjo. Merjenje deformacij je integralen del NATM-ja. Deformacije se merijo v smislu varnosti predora in za preverjanje projektnih rešitev pred vgradnjo končne notranje (sekundarne) obloge. Navadno inštrumentarij sestoji iz elektronskih tahimetrov z odbojnimi prizmami za 3D merjenje premikov za določitev deformacij v primarni oblogi, ekstenzometrov¹³ za vrednotenje obnašanja hribine okoli izkopa, merilnih celic, inklinometrov¹⁴, merilcev deformacij, nivelirjev, itd.

g) **Hidrogeološki pogoji:** Hidrogeološki pogoji morajo biti posebej analizirani, ker lahko visoki tlaki hribinske vode bistveno spremenijo potek gradnje podzemnega prostora in vplivajo na samonosilnost hribine. Če nastopa hribinska voda pod visokimi pritiski, jo je

¹² *Statični izračun* v gradbeništvu pomeni izračun vrst, smeri in velikosti sil, ki delujejo v zgradbah.

¹³ *Ekstenzometer* je merilna naprava za merjenje majhnih statičnih in dinamičnih deformacij. Meri dolžinske spremembe (posedanje, dviganje). Pogosto je nameščen z vrtanjem v tla gradbišča ali pa v hribino. Uporablja se predvsem pri temeljenju, gradnji v predorih in skalah.

¹⁴ *Inklinometer* je naprava za merjenje premikov tal na gradbišču. V tla se namesti fleksibilna cev, ki se lahko deformira skupaj s tlemi. S pomočjo inklinometra se lahko izračuna položaj, naklon in preoblikovanje cevi in s tem tal.

potrebno ustrezno drenirati, da se zmanjšajo pritiski in negativen vpliv na lastnostih hribine.

Pri NATM metodi je predviden aktiven projektantski pristop in tesno sodelovanje med projektanti in izvajalci del, saj se projektiranje ne zaključuje z izdelavo projekta za razpis, temveč je potrebno projekt ažurirati skladno z napredovanjem izkopa.

Raziskovalni rov in glavni predor Šentvid sta se gradila v skladu s principi in filozofijo NATM. Izkop raziskovalnega rova se je izvajal v štirih kategorijah prirejenih standardnim kategorijam A, B, C in PC (portalna kategorija), ter izredni kategoriji za izkop v židki hribini.

4 TEHNIČNO OPAZOVANJE PRI GRADNJI PREDOROV

V Uredbi o tehničnih normativih in pogojih za projektiranje cestnih predorov v RS je v XIII. poglavju navedeno, da se tehnična opazovanja nanašajo na tehnične meritve, ki se izvajajo pred, med in po izgradnji predora za potrebe preverjanja statične ustreznosti podpornih ukrepov in deformacijskega obnašanja predora ter portalnih zgradb ali objektov ter s tem povezane varnosti (Uradni list RS, 2005, 87. člen). Meritve, povezane z uporabo predorov (onesnaženost zraka, hitrost vožnje, ...), ne prištevamo med tehnična opazovanja.

Med tehnično opazovanje za potrebe projektiranja in gradnje predorov štejemo:

- geološko spremljavo izkopa portalov in predora,
- geotehnične meritve na portalnih območjih in na poseljenih območjih, (meritve na površini) in
- **geotehnične meritve v predoru.**

Predmet opazovanja pri gradnji predora so:

- gospodarski, stanovanjski in infrastrukturni objekti v vplivnem območju gradnje predora ter temeljna tla teh objektov,
- portalna območja z vgrajenimi opornimi ukrepi in/ali konstrukcijami,
- **predorska obloga**, vgrajeni podporni ukrepi in hribina v okolici predorske cevi.

Med zgoraj navedenimi tremi tehničnimi opazovanji, se bomo omejili le na geotehnične meritve v predoru. V 90. členu Uredbe je navedeno, da je namen izvajanja geotehničnih meritev v predoru predvsem kontrola ustreznosti podpornih ukrepov v danih pogojih gradnje predora. Na osnovi rezultatov meritev je mogoče:

- sprejeti odločitve o spremembi kategorije izkopa in podgradnje,
- pravočasno in utemeljeno odločati o dodatnih podpornih ukrepih,
- ugotavljati učinke morebitnih sprememb tehnologije gradnje in podpornih ukrepov na obnašanje predora,
- sprejeti odločitev o primernem času izdelave notranje obloge predora,

- ugotoviti odstopanja od pričakovanega obnašanja predora med uporabo.

Vrste meritev v predoru so predvsem:

- **3D geodetske meritve premikov točk, vgrajenih v predorsko oblogo,**
- ekstenzometriške meritve premikov,
- inklinometriške meritve pomikov
- meritve konvergenč s tračnimi ekstenzometri,
- meritve tlakov in količin talne vode,
- meritve sidrnih sil,
- meritve napetosti v hribini in predorski oblogi,
- meritve razpok v predorski oblogi,
- vizualni pregledi stanja predorske obloge in vgrajenih podpornih ukrepov.

V predoru naj bodo merska mesta razporejena v posameznih merskih profilih. Lokacije merskih profilov in vrste meritev, ki se v posameznem merskem profilu izvajajo, kakor tudi frekvenco meritev določa projekt. Največja razdalja med merskimi profili za 3D geodetske meritve premikov točk v zahtevnih geotehničnih pogojih ne sme presegati velikosti enega premera predora. Frekvenca teh meritev je najmanj enkrat dnevno do umiritve premikov v posameznem merskem prerezu.

Glede na zgornje navedene postavke iz Uredbe se bomo v nadaljevanju seznanili predvsem z 3D geodetskimi meritvami premikov točk, vgrajenih v predorsko oblogo raziskovalnega rova.

4. 1 Geodetske meritve v raziskovalnem rovu

Dela na rovu so bila razčlenjena na tri dele:

- gradbena dela na izkopu
- geološke raziskave v rovu in s površja
- kontinuirano geološko kartiranje in dnevna geomehanska spremljava pomikov in njihova interpretacija

V raziskovalnem rovu se izvajata geološka in geotehnična spremljava z namenom pridobivanja ključnih podatkov za kasnejšo izvedbo predora Šentvid. Tekom izvedbe raziskovalnega rova se v skladu z NATM izvajajo meritve konvergence izkopnega profila¹⁵. Meritve izvaja izvajalec geotehnične spremljave, obdelava in interpretacija meritev pa je prepuščena projektantu predora. Interpretacije meritev se dnevno usklajujejo z geološkim modelom in posredujejo naročniku v pregled. Rezultati meritev služijo za optimiranje podpornih ukrepov in delovnih faz ter za kontrolo uporabljene hribinske klasifikacije. Meritve deformacij so bile izvedene v glavnih ceveh raziskovalnega rova vključujoč povezovalni rov.

Eno izmed geotehničnih meritev predstavlja tudi geodetsko merjenje prostorskih premikov merskih točk. V raziskovalnem rovu Šentvid se je izvajala spremljava vpliva odkopavanja glavnega predora na hribino pred čelom predora, torej vpliv odkopavanja na sam raziskovalni rov. Predčasno izkopani raziskovalni rov je sprva služil za pridobivanje podatkov o lokalnih tektonskih conah, geologiji, vplivih vode in drugih podatkov, nato pa še za geodetske in druge meritve pri spremljanju vpliva odkopavanja na hribino pred čelom glavnega predora. Pri tem sta bila primerno izbrana način stabilizacije točk in stojišča inštrumenta ter metoda izmere. Izračun koordinat stojišča se je računal z metodo prostorskega notranjega ureza z izravnavo nadštevilnih opazovanj. Za izračun koordinat detajlnih točk pa se je uporabila metoda polarne detajlne izmere. Tak način določitve stojišča je bil izbran zaradi daleč segajočega vpliva odkopavanja glavnega predora na hribino pred čelom glavnega predora (Marjetič, 2006, str. 11).

Pri metodi NATM moramo neugodne napetosti in deformacije preprečiti s pravočasno vgradnjo podpornih elementov. Podporni elementi se dimenzionirajo glede na dopustne deformacije. Dejanske deformacije, ki morajo biti seveda manjše od dopustnih, določimo na več načinov. Eden izmed takih načinov je tudi iz izmerjenih premikov kontrolnih (detajlnih) točk, ki so stabilizirane v oblogi predora. Geodetske meritve so torej sestavni del NATM.

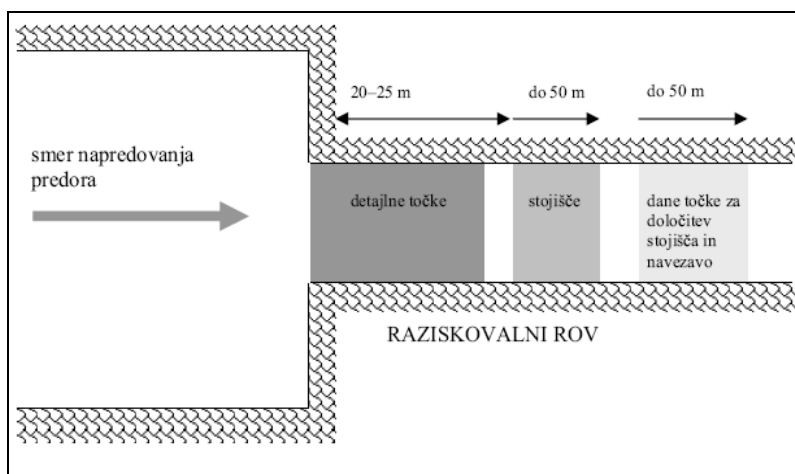
¹⁵ *Meritve konvergence izkopnega profila* so meritve, ki se izvajajo na merska sidra, ki so vgrajena v primarni oblogi predora. Izkopni profil je profil odkopane hribine. Hribina pa se nato po NATM takoj zabrizga z brizganim betonom in armira z armaturno mrežo, ki skupaj predstavljata primarno oblogo. Meritve konvergence se tako ne izvajajo v sami hribini, temveč v primarni oblogi.

4. 2 Izbira območja in način stabilizacije točk v rovu

Za periodično spremljanje premikov točk v raziskovalnem rovu se je bilo potrebno najprej odločiti, na kakšen način se bo določal prostorski položaj točk. Izbrana je bila metoda polarne izmere, za katero potrebujemo stojišče z znanim horizontalnim položajem (y_{stoj} , x_{stoj}) in višino (H_{stoj}). Glavni problem je torej bil, kako določiti položaj stojiščne točke instrumenta (Marjetič, 2006, str. 12).

Ena izmed rešitev bi bila, da bi stojišče določili z geodetskimi meritvami iz točk oziroma na točke geodetske mreže, ki so stabilizirane vzdolž celotnega glavnega predora do čela glavnega predora. Vendar bi imel ta način naslednje pomanjkljivosti:

- Na čelu izkopa potekajo intenzivna gradbena dela, ki bi onemogočala viziranje na detajlne točke v raziskovalnem rovu. To ima za posledico, da bi stojišče instrumenta moralo biti v raziskovalnem rovu.
- Detajlne točke za spremljanje premikov hribine morajo biti locirane čim bližje čelu glavnega predora (od 0 do 20 – 25 m v notranjost raziskovalnega rova), kar pomeni, da bi morala biti oddaljenost instrumenta od čela približno 50 m.
- Ker stojišče na takšni oddaljenosti od čela glavnega predora (blizu vpliva izkopavanja) ni nujno stabilno, je treba za vsako ponovno določitev položajev detajlnih točk ponovno določiti položaj stojišča.
- Če za vsak časovni trenutek določamo položaj stojišča ponovno in če je onemogočena vizura na dane točke v glavnem predoru, je treba zagotoviti nekaj stabilnih točk v notranjosti raziskovalnega rova, ki bodo omogočale določitev stojišča in hkrati navezavo za določitev detajlnih točk.



Slika 7: Izbiranje območij za stabilizacijo

(stabilizacija detajlnih točk, stojišča in danih točk za navezavo v raziskovalnem rovu)

Sprejeta rešitev: Na podlagi zgornjih dejstev je bila sprejeta odločitev, da bodo spremljali vpliv izgradnje glavnega predora na hribino v okolici raziskovalnega rova pred čelom glavnega predora tako, da se bodo v *območju vpliva* oziroma v *območju detajlnih točk* v posameznih profilih, med seboj oddaljenih dva metra, vgradili nosilce za prizme in nanje postavili prizme (Slika 8). V primarno oblogo raziskovalnega rova se izvrti luknjo in vanjo zabije nosilec za prizmo. Nosilci so palice rebrastega železa (\varnothing 16 mm), ki se končajo z nastavkom za prizmo. Nekaj čelu bližnjih detajlnih točk je potrebno zavarovati z zaščito pred brizganim betonom.



Slika 8: Stabiliziranje detajlnih točk

(foto: A. Marjetič)

Levo – na nosilec pritrjena prizma z zaščito pred brizganim betonom

Desno – vgrajeni nosilec za prizmo

Prostorske koordinate detajlnih točk se bodo določile s polarno metodo s stojišča, ki ga bomo stabilizirali na konzoli v *območju stojišče* (Slika 7). Pritrdišče konzole je preko krogelnega zgloba povezano z roko konzole, na kateri je na navoju privit instrument. Konzola ima tudi mehansko zaščito za instrument, ki ga varuje pred manjšimi delci, ki padajo s sten in stropa raziskovalnega rova.



Slika 9: Stabilizacija stojišča s konzolo

(foto: A. Marjetič, avtor izvedbe konzole: Matjaž Koželj, Premogovnik Velenje)

Prostorski položaj stojišča se bo določil z meritvami na dane točke, ki so stabilizirane v *območju dane točke za določitev stojišča in navezavo* (Slika 7).



Slika 10: Pogled iz raziskovalnega rova proti čelu glavnega predora

(foto: J. Klopčič)

(vidne so svetleče detajlne točke na posameznem profilu (ena na stropu, ena na tleh in dve v boku); v ozadju potekajo dela na čelu predora)



Slika 11: Pogled s čela predora v raziskovalni rov.

(foto: G. Turk)

(v ospredju so vidne detajlne točke z zaščitami, v ozadju pa tri svetleče dane točke, na katere se izvaja navezava)

4.3 Izvedba geodetskih meritev

4.3.1 Izbira časovnega intervala

Izgradnja glavnega predora poteka 24 ur na dan, kar zahteva permanentno – neprekinjeno spremljanje premikov točk v raziskovalnem rovu. Zaradi velikih količin izkopanega materiala v dokaj kratkem času (napredek je približno en meter na dan), se vplivi izkopavanja na hribino dokaj hitro spreminjajo. Iz tega razloga je izbrani časovni interval ponovitve meritev oziroma ponovne določitve koordinat detajlnih točk ena ura. Vse meritve (za določitev koordinat stojišča in koordinat detajlnih točk) je treba torej izvajati vsako uro. Tako imamo za posamezen dan 24 določitev prostorskih položajev detajlnih točk. Z analizo časovnega spreminjanja položajev detajlnih točk lahko nato ugotovljamo vplive izkopavanja na premikanja celotne hribine pred čelom glavnega predora (Marjetič, 2006, str. 15).

4.3.2 Izbira geodetskega instrumentarija in dodatne opreme

Permanentno urno izvajanje geodetskih meritev na klasičen način izvajanja z operaterjem bi bilo fizično in tudi finančno prezahtevno in v končni fazi tudi prenevarno. Rešitev, ki se je uporabila, je bila uporaba elektronskega tahimetra Leica TCRP1201 R300. Gre za najnovejši instrument, ki omogoča avtomatsko viziranje in merjenje horizontalnih smeri, zenitnih razdalj in dolžin na različne predhodno definirane merske objekte:

- na standardne, mini ali 360° odbojne prizme,
- odbojne nalepke in
- neposredno na površino objekta.

Instrument lahko izvaja meritve brez prisotnosti vidne svetlobe. Poleg tega je poglobitna prednost tega instrumenta za uporabo v nalogi geodetskega merjenja v predoru ta, da lahko sam ponavlja meritve v vnaprej določenih časovnih trenutkih, torej se lahko sam vklopi, izvede meritve in se ponovno izklopi do naslednje ponovitve.

Nekaj osnovnih tehničnih značilnosti instrumenta podaja spodnja preglednica (HAW, 2006):



Slika 12: Elektronski tahimeter Leica TCRP1201 R300

Preglednica 11: Tehnični podatki za elektronski tahimeter Leica TCRP1201 R300

Merjenje horizontalnih smeri in zenitnih razdalj	-Natančnost: 1" (DIN 18723) -Nosilna valovna dolžina 0.780 μm -Frekvenca preciznega merjenja 100 MHz
Merjenje dolžin	- <u>Merjenje na reflektor:</u> Natančnost: 2 mm + 2 ppm ¹⁶ / 1s. - <u>Sledenje:</u> Natančnost: 5 mm + 2ppm/ 0.3s. - <u>Hitro sledenje:</u> Natančnost: 10mm + 2ppm/ <0.15s. - <u>Merjenje brez reflektorja:</u> Natančnost: 3 mm+2 ppm
Doseg na standardne prizme	-slabi pogoji: 1800 / 2300 m -srednji pogoji: 3000 / 4500 m -zelo dobri pogoji: 3500 / 5400 m
Doseg pri merjenju brez reflektorja	Do 300 m.
Velikost udarne površine žarka pri merjenju brez reflektorja	-20 m: 0.7 x 1.4 cm -100 m: 1.5 x 3.0 cm -200 m: 3.0 x 6.0 cm
Povečava daljnogleda	30x / pokončen
Premer objektiva	40 mm
Najkrajša oddaljenost do cilja	1.7 m
Kompenzator	Dvoosni tekočinski kompenzator Območje uravnovešenja: 0.7 ¹⁷ gon Natančnost: 0.5 mgon
Lasersko grezilo	Natančnost: < 0.8 mm pri višini instrumenta 1.5 m Premer točke, ki jo naredi laser: 2.5 mm / 1.5 m
Teža	5148 g (vključno s podnožjem, brez baterij)
Temperaturni pogoji	-20°C do 50°C

Kratek opis: Elektronski tahimeter visoke natančnosti, ki ima sposobnost dvokoaksialnega merjenja razdalj: infrardeče za merjenje z reflektorjem in rdečo lasersko svetlobo za merjenje brez reflektorja. Instrument je motoriziran, ima sistem ATR (Automatic Target Recognition), ki omogoča samodejno precizno viziranje. Vsebuje pa tudi sistem PowerSearch, kar pomeni samodejno iskanje prizme.

¹⁶ **ppm** (ang. part(s) per million) je tehnični podatek instrumenta, na podlagi katerega lahko izračunamo natančnost opazovanih dolžin. V našem primeru bi natančnost posameznih dolžin d , ki bi bile merjene s sledenjem, izračunali na podlagi podane natančnosti dolžin za sledenje, ki jo dobimo iz zgornje preglednice (5 mm + 2 ppm). Parametre natančnosti ustrezno vstavimo v enačbo za izračun natančnosti opazovanih dolžin in dobimo: $\sigma_{d[mm]} = \sqrt{(5mm)^2 + (2 \cdot d_{[km]})^2}$.

¹⁷ **Gon** je enota, ki je enaka gradu. Polni kot 360° meri 400 gonov oz. gradov.

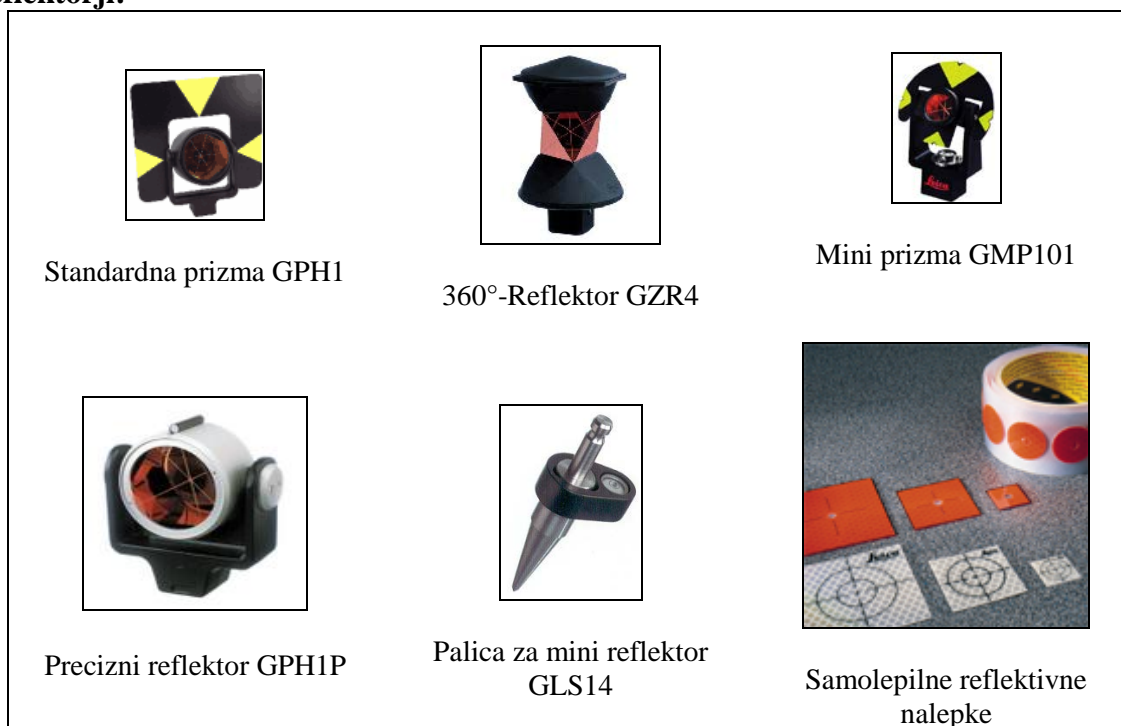
Sistem ATR omogoča, da prizmo samo grobo naviziramo in sprožimo meritev. Instrument nato sam opravi vse ostalo: precizno viziranje, merjenje in shranjevanje podatkov. Iz daljnogleda izhaja infra-rdeči žarek, ki se odbije od prizme, ATR pa ga v trenutku analizira. Instrument obrne daljnogled, precizno navizira center prizme in opravi meritev. Ker operaterju ni potrebno precizno vizirati niti fokusirati, so meritve z ATR mnogo hitrejše in neutrujajoče.

Sistem PowerSearch najde prizmo v nekaj sekundah, ne glede na to, kje se le-ta nahaja. Ko aktiviramo PowerSearch, se instrument zavrti okoli navpične osi in odda vertikalni laserski snop. Takoj, ko snop zadane v prizmo, se tahimeter preneha vrteti, precizno viziranje pa prevzame sistem ATR.

Integrirani programi:

- Upravljanje s koordinatami
- Stacioniranje na znani točki
- Prosto stacioniranje
- Zakoličevanje
- Višinski prenos
- Merjenje nedostopnih točk
- Avtomatsko shranjevanje
- COGO¹⁸-Računske funkcije

¹⁸ COGO (ang. Coordinate geometry) je zbirka programskih orodij za pripravo in obdelavo geodetskih podatkov. COGO je metoda vnašanja podatkov opazovanj in inženirskih podatkov v GIS, CAD ali kartografski software. Ti podatki se lahko dobijo z običajnimi geodetskimi metodami in instrumenti, ali pa so pridobljeni iz že obstoječih kart, zemljišč, inženirskih načrtov, risb ali listin.

Reflektorji:

Slika 13: Reflektorji, na katere lahko viziramo z instrumentom

Kot dodatna oprema so bile izbrane standardne odbojne prizme, saj sistem ATR ni primeren za viziranje na odbojne nalepke, ki pa so mnogo cenejše.

4.3.3 Izbira metode izmere

Za merjenje horizontalnih kotov je bila izbrana girusna metoda (zaradi eliminacije instrumentalnih pogreškov) (Marjetič, 2006, str. 16). Sočasno z merjenjem horizontalne smeri se je merila še zenitna razdalja in poševna dolžina do opazovane točke. Girus se je najprej začel opazovati na tri dane točke in nato nadaljeval z opazovanji na detajlne točke (največ 27). Najprej instrumentu pokažemo, katere točke naj meri. Pri tem je bilo potrebno med opazovanjem tako dane kot detajlne točke osvetljevati z dodatno lučjo, saj je bila v raziskovalnem rovu tema. V levi krožni legi se je točka približno navizirala in podalo se ji je njeno ime. S pritiskom na gumb se je nato izvedlo samodejno precizno viziranje, ki ga instrument izvede s sistemom ATR (Automatic Target Recognition). Instrument je po viziranju in opravljenih meritvah vseh treh količin na eno točko samodejno shranil rezultate

meritev v pomnilnik. Po opravljenih meritvah vseh točk v levi krožni legi se je s pritiskom na gumb sprožilo samodejno viziranje, merjenje in shranjevanje rezultatov meritev vseh opazovanih točk v desni krožni legi. Po opravljenih meritvah v enem girusu je bilo potrebno podati še začetek naslednje meritve – naslednjega girusa (vedno podan naslednjo polno uro) in časovni interval (ena ura). Instrument je nato samodejno brez prisotnosti operaterja opravil meritve, kot je bilo zahtevano – vsako uro je opravil girusno meritev na vse točke (na dan je opravil 24 girusnih meritev, po en girus na uro).

Vsak dan je bilo potrebno na pomnilniško kartico prepisati merske podatke, ki so bili nato v pisarni naknadno obdelani. Njihova obdelava bo v nadaljevanju tudi opisana. Instrument je moral biti za nadaljevanje meritev oskrbljen s polnimi baterijami, saj količina energija notranje in zunanje baterije ni zadoščala za več kot en dan in pol meritev z izbranim intervalom meritev na izbranim številom točk.

4.4 Obdelava geodetskih meritev

4.4.1 Določitev koordinat stojišča

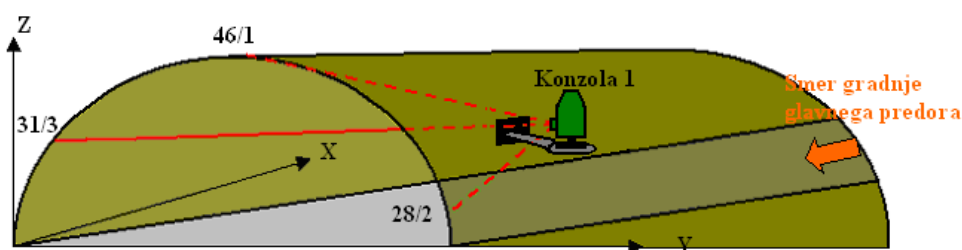
Če določamo položaj stojišča geodetskega instrumenta z notranjimi meritvami, to je meritvami geodetskih količin iz stojišča proti znanim točkam, lahko koordinate stojišča instrumenta določimo na različne načine. Različne metode določevanja koordinat stojiščne točke delimo glede na to, katero prostorsko komponento položaja določamo. Za določitev horizontalnega položaja lahko uporabimo notranji urez ali pa ločni presek. Za določitev vertikalnega položaja oziroma višine uporabljamo trigonometrično višinomerstvo. Za določitev prostorskega položaja pa lahko uporabimo:

- prostorski notranji urez,
- prostorski ločni presek,
- kombinirani urez.

S sodobnimi elektronskimi tahimetri, s katerimi lahko merimo horizontalne, vertikalne kote in poševne dolžine »istočasno«, določamo horizontalni položaj in višino hkrati. Tako uporabimo kombinirani prostorski notranji urez za določitev 3D-položaja stojiščne točke.

4.4.2 Praktičen primer določitve koordinat stojišča

4.4.2.1 Opazovanja



Slika 14: Prikaz vizur na dane točke v raziskovalnem rovu

V raziskovalnem rovu desne cevi glavnega predora so bile s Konzole 1 opazovane horizontalne smeri, zenitne razdalje in poševne dolžine proti trem danim točkam 46/1, 28/2 in 31/3.

Preglednica 12: Opazovanja izvedena s Konzole 1

Girus	Krožna lega	Točka	Horizontalna smer [grad]	Zenitna razdalja [grad]	Poševna dolžina[m]
1.	I	28/2	369.11420	100.92540	11.2700
	I	46/1	384.35790	97.47440	47.5890
	I	31/3	387.83900	100.15030	16.9450
	II	31/3	187.84390	299.84830	16.9450
	II	46/1	184.36210	302.52670	47.5890
	II	28/2	169.11840	299.07620	11.2710

Zgornja opazovanja bodo uporabljena pri nadaljnjih izračunih v programu Matlab. Zanj je značilno, da kote računa v radianih. Ker so kotna opazovanja horizontalnih smeri in zenitnih razdalj podana v merski enoti grad, jih pretvorimo v radiane na podlagi spodnje zveze:

$$Kot_{[RAD]} : 2\pi = Kot_{[GRAD]} : 400$$

$$Kot_{[RAD]} = \frac{Kot_{[GRAD]} \cdot \pi}{200}$$

Iz opazovanj je potrebno poračunati sredine horizontalnih smeri, zenitnih razdalj in poševnih dolžin iz prve in druge krožne lege. Sredine so podatki, ki jih kasneje uporabimo v posredni izravnavi.

Sredina za horizontalne smeri:

$$\bar{s} = \frac{(s_I - 180^\circ) + s_{II}}{2},$$

kjer sta :

s_I ...horizontalna smer izmerjena v prvi krožni legi in

s_{II} ...horizontalna smer izmerjena v drugi krožni legi.

Sredina za zenitne razdalje:

$$\bar{z} = \frac{(z_I - z_{II}) + 360^\circ}{2},$$

kjer sta :

z_I ...zenitna razdalja izmerjena v prvi krožni legi in

z_{II} ... zenitna razdalja izmerjena v drugi krožni legi.

Sredina za poševne dolžine:

$$\bar{d} = \frac{d_I + d_{II}}{2},$$

kjer sta :

d_I ...poševna dolžina izmerjena v prvi krožni legi in

d_{II} ... poševna dolžina izmerjena v drugi krožni legi.

Opomba: V nadaljevanju bodo opazovanja na dane točke 46/1, 28/2 in 31/3 označena z 1, 2, in 3.

Sredine opazovanj za prvi girus so:

Preglednica 13: Sredine opazovanj za 1. girus

Horizontalne smeri		Zenitne razdalje		Poševne dolžine	
	165°55'26"	z_1	87°43'35"		47.5890 m
s_2	152°12'17"	z_2	90°49'56"	d_2	11.2705 m
s_3	169°03'26"	z_3	90°08'09"		16.9450 m

Ker je opazovanih (merjenih) količin več, kot je nujno potrebno za enolično določitev stojišča Konzole 1, izvedemo izravnavo po metodi najmanjših kvadratov.

4.4.2.2 Posredna izravnava

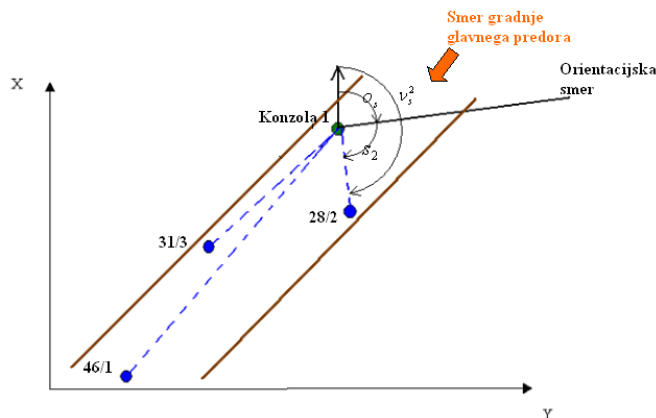
Imamo $n = 9$ vseh opazovanj, ki jih predstavljajo sredine iz preglednice 13. Minimalno število opazovanj za enolično določitev stojišča Konzole 1 bi jih bilo $u = 4$ (y_s , x_s , H_s in o_s). Tako imamo $r = 5$ nadštevilnih opazovanj, zato izvedemo izravnavo.

$$n = 9(s_1, s_2, s_3, z_1, z_2, z_3, d_1, d_2, d_3)$$

$$u = 4(y_s, x_s, H_s, o_s)$$

$$r = n - u = 5$$

Sestaviti moramo devet enačb popravkov, od katerih mora vsaka vsebovati eno opazovanje. V enačbah popravkov posredne izravnave nastopajo neznanke, konstante in opazovanja. Pri nastavitvi enačb popravkov si pomagamo s spodnjo tlorisno skico:



Slika 15: Tlorisna skica opazovanj v raziskovalnem rovu

Sestavimo torej devet enačb popravkov, vsaka mora vsebovati eno opazovanje:

$$F_1 \equiv s_1 + v_{s_1} + o_s - v_s^1 = s_1 + v_{s_1} + o_s - \arctan \frac{y_1 - y_s}{x_1 - x_s} = 0$$

$$F_2 \equiv s_2 + v_{s_2} + o_s - v_s^2 = s_2 + v_{s_2} + o_s - \arctan \frac{y_2 - y_s}{x_2 - x_s} = 0$$

$$F_3 \equiv s_3 + v_{s_3} + o_s - v_s^3 = s_3 + v_{s_3} + o_s - \arctan \frac{y_3 - y_s}{x_3 - x_s} = 0$$

$$F_4 \equiv d_1 + v_{d_1} - \sqrt{(x_1 - x_s)^2 + (y_1 - y_s)^2 + (H_1 - H_s)^2} = 0$$

$$F_5 \equiv d_2 + v_{d_2} - \sqrt{(x_2 - x_s)^2 + (y_2 - y_s)^2 + (H_2 - H_s)^2} = 0$$

$$F_6 \equiv d_3 + v_{d_3} - \sqrt{(x_3 - x_s)^2 + (y_3 - y_s)^2 + (H_3 - H_s)^2} = 0$$

$$F_7 \equiv z_1 + v_{z_1} - \arccos\left(\frac{H_1 - H_s}{\sqrt{(x_1 - x_s)^2 + (y_1 - y_s)^2 + (H_1 - H_s)^2}}\right) = 0$$

$$F_8 \equiv z_2 + v_{z_2} - \arccos\left(\frac{H_2 - H_s}{\sqrt{(x_2 - x_s)^2 + (y_2 - y_s)^2 + (H_2 - H_s)^2}}\right) = 0$$

$$F_9 \equiv z_3 + v_{z_3} - \arccos\left(\frac{H_3 - H_s}{\sqrt{(x_3 - x_s)^2 + (y_3 - y_s)^2 + (H_3 - H_s)^2}}\right) = 0$$

kjer so:

- s_i - opazovana horizontalna smer na dano točko i
- d_i - opazovana poševna dolžina do dane točke i
- z_i - opazovana zenitna razdalja na dano točko i
- v_{s_i} - popravek opazovane horizontalne smeri na dano točko i

- v_{d_i} - popravek opazovane poševne dolžine do dane točke i
- v_{z_i} - popravek opazovane zenitne razdalje na dano točko i
- o_s - orientacijski kot na stojišču
- v_s^i - smerni kot s stojišča na dano točko i
- y_i, x_i, H_i - prostorske koordinate dane točke i
- y_s, x_s, H_s - prostorske koordinate stojišča (konzole)

Matematični model posredne izravnave se glasi: $\mathbf{v} + \mathbf{B} \mathbf{\Lambda} = \mathbf{f}$, kjer so:

- \mathbf{v} ($n \times 1$) ...vektor popravkov opazovanj,
- \mathbf{B} ($n \times u$) ...matrika koeficientov ob neznankah v enačbah popravkov (v nelinearnih enačbah popravkov matrika \mathbf{B} vsebuje vrednosti parcialnih odvodov po vseh opazovanjih),
- $\mathbf{\Lambda}$ ($u \times 1$) ...vektor popravkov približnih vrednosti neznank,
- \mathbf{f} ($n \times 1$) ...vektor odstopanj.

Matematični model posredne izravnave po metodi najmanjših kvadratov zapišemo:

$$\begin{bmatrix} v_{s_1} \\ v_{s_2} \\ v_{s_3} \\ v_{d_1} \\ v_{d_2} \\ v_{d_3} \\ v_{z_1} \\ v_{z_2} \\ v_{z_3} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial o_s} & \frac{\partial F_1}{\partial y_s} & \frac{\partial F_1}{\partial x_s} & 0 \\ \frac{\partial F_2}{\partial o_s} & \frac{\partial F_2}{\partial y_s} & \frac{\partial F_2}{\partial x_s} & 0 \\ \frac{\partial F_3}{\partial o_s} & \frac{\partial F_3}{\partial y_s} & \frac{\partial F_3}{\partial x_s} & 0 \\ 0 & \frac{\partial F_4}{\partial y_s} & \frac{\partial F_4}{\partial x_s} & \frac{\partial F_4}{\partial H_s} \\ 0 & \frac{\partial F_5}{\partial y_s} & \frac{\partial F_5}{\partial x_s} & \frac{\partial F_5}{\partial H_s} \\ 0 & \frac{\partial F_6}{\partial y_s} & \frac{\partial F_6}{\partial x_s} & \frac{\partial F_6}{\partial H_s} \\ 0 & \frac{\partial F_7}{\partial y_s} & \frac{\partial F_7}{\partial x_s} & \frac{\partial F_7}{\partial H_s} \\ 0 & \frac{\partial F_8}{\partial y_s} & \frac{\partial F_8}{\partial x_s} & \frac{\partial F_8}{\partial H_s} \\ 0 & \frac{\partial F_9}{\partial y_s} & \frac{\partial F_9}{\partial x_s} & \frac{\partial F_9}{\partial H_s} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \delta o_s \\ \delta y_s \\ \delta x_s \\ \delta H_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{s_1} \\ f_{s_2} \\ f_{s_3} \\ f_{d_1} \\ f_{d_2} \\ f_{d_3} \\ f_{z_1} \\ f_{z_2} \\ f_{z_3} \end{bmatrix}$$

Vhodni podatki za posredno izravnavo so tako:

- a) sredine opazovanj prvega girusa,
- b) dane točke:

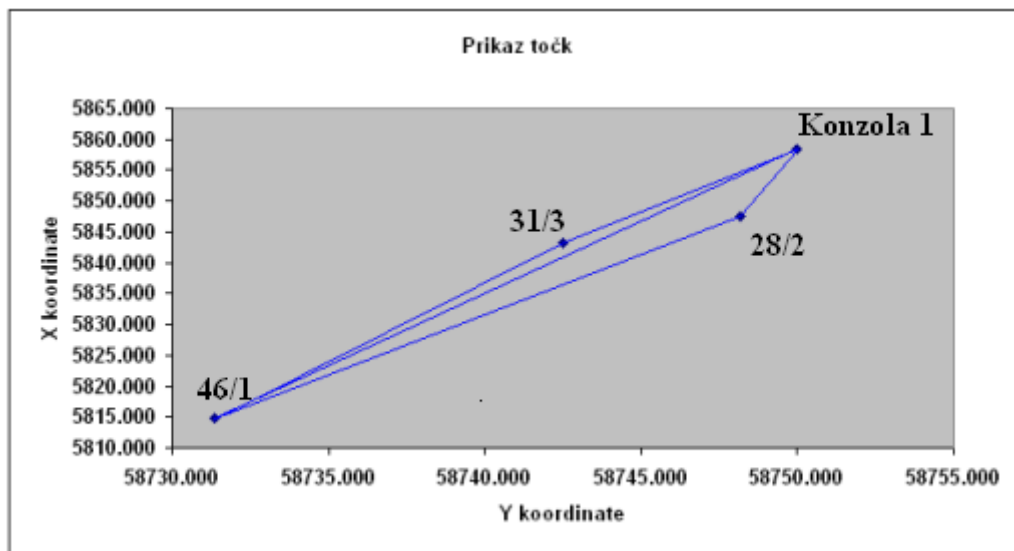
Preglednica 14: Dane točke

Točka	y_i [m]	x_i [m]	H_i [m]
46/1	58731.359	5814.774	316.012
28/2	58748.153	5847.407	313.966
31/3	58742.504	5843.321	314.098

- c) parcialni odvodi enačb popravkov po neznankah u v matriki **B**. Parcialne odvode izračunamo na podlagi podanih točk 46/1, 28/2 in 31/3 ter približnih vrednosti neznank stojišča:

Preglednica 15: Približne vrednosti neznank stojišča

Točka	y_s^0 [m]	x_s^0 [m]	H_s^0 [m]
konzola, stojišče	58749.982	5858.527	314.131



Slika 16: Prikaz točk

Parcialni odvodi so:

Za $k = 1,2,3$ in $i = 1,2,3$ velja:

$$\frac{\partial F_k}{\partial o_s} = 1$$

$$\frac{\partial F_k}{\partial y_s} = - \left(- \frac{1}{1 + \left(\frac{y_i - y_s^0}{x_i - x_s^0} \right)^2} \cdot \frac{1}{(x_i - x_s^0)} \right) = \left(\frac{x_i - x_s^0}{(y_i - y_s^0)^2 + (x_i - x_s^0)^2} \right)$$

$$\frac{\partial F_k}{\partial x_s} = - \left(\frac{1}{1 + \left(\frac{y_i - y_s^0}{x_i - x_s^0} \right)^2} \cdot \frac{(y_i - y_s^0)}{(x_i - x_s^0)^2} \right) = - \left(\frac{y_i - y_s^0}{(y_i - y_s^0)^2 + (x_i - x_s^0)^2} \right)$$

$$\frac{\partial F_k}{\partial H_s} = 0$$

Za $k = 4, 5, 6$ in $i = 1, 2, 3$ velja:

$$\frac{\partial F_k}{\partial y_s} = - \left(- \frac{1}{2d^0} 2(y_i - y_s^0) \right) = \frac{y_i - y_s^0}{d^0}$$

$$\frac{\partial F_k}{\partial x_s} = - \left(- \frac{1}{2d^0} 2(x_i - x_s^0) \right) = \frac{x_i - x_s^0}{d^0}$$

$$\frac{\partial F_k}{\partial H_s} = - \left(- \frac{1}{2d^0} 2(H_i - H_s^0) \right) = \frac{H_i - H_s^0}{d^0}$$

kjer je $d^0 = \sqrt{(y_i - y_s^0)^2 + (x_i - x_s^0)^2 + (H_i - H_s^0)^2}$ približna poševna dolžina med stojiščem in i -to dano točko.

Za $k = 7, 8, 9$ in $i = 1, 2, 3$ velja:

$$\frac{\partial F_k}{\partial y_s} = - \left(- \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{H_i - H_s^0}{d^0} \right)^2}} (H_i - H_s^0) \left((d^0)^2 \right)^{\frac{3}{2}} \left(- \frac{1}{2} \right) 2(y_i - y_s^0)(-1) \right) = \frac{(y_i - y_s^0)(H_i - H_s^0)}{(d^0)^2 \sqrt{(y_i - y_s^0)^2 + (x_i - x_s^0)^2}}$$

$$\frac{\partial F_k}{\partial x_s} = \left(- \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{H_i - H_s^0}{d^0}\right)^2}} (H_i - H_s^0) \left((d^0)^2\right)^{\frac{3}{2}} \left(-\frac{1}{2}\right) 2(x_i - x_s^0)(-1) \right) = \frac{(x_i - x_s^0)(H_i - H_s^0)}{(d^0)^2 \sqrt{(y_i - y_s^0)^2 + (x_i - x_s^0)^2}}$$

$$\frac{\partial F_k}{\partial H_s} = \left(- \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{H_i - H_s^0}{d^0}\right)^2}} \cdot \frac{-\sqrt{(d^0)^2} + (H_i - H_s^0) \frac{1}{2\sqrt{(d^0)^2}} 2(H_i - H_s^0)}{(d^0)^2} \right) = - \frac{(y_i - y_s^0)(x_i - x_s^0)}{(d^0)^2 \sqrt{(y_i - y_s^0)^2 + (x_i - x_s^0)^2}}$$

d) Orientacijski kot stojišča o_s

Orientacijski kot izračunamo kot razliko med smernim kotom iz stojišča na točko 28/2 in horizontalnim kotom na točko 28/2.

$$o_s = \nu_s^2 - s_2 = \arctan \frac{y_2 - y_s}{x_2 - x_s} - s_2$$

Pri tem moramo biti pazljivi pri računanju smernega kota in upoštevati predznak koordinatnih razlik. Velikost smernega kota je namreč odvisna od predznaka koordinatnih razlik dy in dx .

Preglednica 16: Vpliv koordinatnih razlik na velikost smernega kota

	I.	II.	III.	IV.
dy	+	+	-	-
dx	+	-	-	+
ν	ν	$+180^\circ$	$+180^\circ$	$+360^\circ$

Z namenom, da bi se znebili orientacijskega kota iz enačb popravkov, izvedemo **Gaußovo eliminacijo** (Mihailović 1981, str. 340). Orientacijski kot bi v izravnavi načeloma lahko nastopal. Ker pa gredo v nadaljnje računanje samo popravki koordinatnih neznank (ne pa tudi popravki orientacijskega kota) in kovariančna matrika (matrika kofaktorjev) samo koordinatnih neznank, moramo neznanko zaradi orientacije eliminirati v času izravnave.

Orientacijski kot v našem primeru nastopa le v enačbah popravkov za horizontalne smeri F_1 , F_2 in F_3 . Zato najprej izračunamo vsoto parcialnih odvodov po posameznih neznankah v enačbah popravkov F_1 , F_2 in F_3 :

$$\sum_{i=1}^3 \frac{\partial F_i}{\partial o_s}, \sum_{i=1}^3 \frac{\partial F_i}{\partial y_s}, \sum_{i=1}^3 \frac{\partial F_i}{\partial x_s} \text{ in } \sum_{i=1}^3 \frac{\partial F_i}{\partial H_s}.$$

Od zgoraj navedenih vsot v nadaljnjih izračunih nastopata le vsota parcialnih odvodov po koordinati y_s in x_s , medtem ko vsota parcialnih odvodov po orientacijskem kotu o_s in po višini H_s , ki ne nastopa v enačbah popravkov za horizontalne smeri, ne nastopata v nadaljnjih izračunih.

Nato izračunamo vsoto prvih treh vrstic v vektorju odstopanj f :

$$\sum_{i=1}^3 f_{s_i} = f_{s_1} + f_{s_2} + f_{s_3}$$

Sledi izračun novih vrednosti prvih treh vrstic vektorja f :

$$f_{s_1} = f_{s_1} - \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 f_{s_i}$$

$$f_{s_2} = f_{s_2} - \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 f_{s_i}$$

$$f_{s_3} = f_{s_3} - \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 f_{s_i}$$

Izvedemo lahko tudi kontrolo izračunanih novih vrednosti za vektor f , katerih vsota mora biti enaka nič:

$$\sum_{i=1}^3 f_{s_i} = 0$$

Posledica eliminacije orientacijskega kota je zmanjšanje dimenzije matrike \mathbf{B} oz. brisanje njenega stolpca parcialnih odvodov po orientacijskem kotu. Zato se v matriki \mathbf{B} spremenijo vrednosti v prvih treh vrsticah na mestih, kjer nastopajo parcialni odvodi po koordinati y_s in

x_s . Tu se prvotna vrednost parcialnega odvoda zmanjša za tretjino vsote parcialnih odvodov po neznanki y_s oziroma za tretjino vsote parcialnih odvodov po neznanki x_s v enačbah popravkov F_1 , F_2 in F_3 .

Sistem posredne izravnave je tako naslednji:

$$\begin{bmatrix} v_{s_1} \\ v_{s_2} \\ v_{s_3} \\ v_{d_1} \\ v_{d_2} \\ v_{d_3} \\ v_{z_1} \\ v_{z_2} \\ v_{z_3} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial y_s} - \frac{\sum_{i=1}^3 \frac{\partial F_i}{\partial y_s}}{3} & \frac{\partial F_1}{\partial x_s} - \frac{\sum_{i=1}^3 \frac{\partial F_i}{\partial x_s}}{3} & 0 \\ \frac{\partial F_2}{\partial y_s} - \frac{\sum_{i=1}^3 \frac{\partial F_i}{\partial y_s}}{3} & \frac{\partial F_2}{\partial x_s} - \frac{\sum_{i=1}^3 \frac{\partial F_i}{\partial x_s}}{3} & 0 \\ \frac{\partial F_3}{\partial y_s} - \frac{\sum_{i=1}^3 \frac{\partial F_i}{\partial y_s}}{3} & \frac{\partial F_3}{\partial x_s} - \frac{\sum_{i=1}^3 \frac{\partial F_i}{\partial x_s}}{3} & 0 \\ \frac{\partial F_4}{\partial y_s} & \frac{\partial F_4}{\partial x_s} & \frac{\partial F_4}{\partial H_s} \\ \frac{\partial F_5}{\partial y_s} & \frac{\partial F_5}{\partial x_s} & \frac{\partial F_5}{\partial H_s} \\ \frac{\partial F_6}{\partial y_s} & \frac{\partial F_6}{\partial x_s} & \frac{\partial F_6}{\partial H_s} \\ \frac{\partial F_7}{\partial y_s} & \frac{\partial F_7}{\partial x_s} & \frac{\partial F_7}{\partial H_s} \\ \frac{\partial F_8}{\partial y_s} & \frac{\partial F_8}{\partial x_s} & \frac{\partial F_8}{\partial H_s} \\ \frac{\partial F_9}{\partial y_s} & \frac{\partial F_9}{\partial x_s} & \frac{\partial F_9}{\partial H_s} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \delta y_s \\ \delta x_s \\ \delta H_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{s_1} \\ f_{s_2} \\ f_{s_3} \\ f_{d_1} \\ f_{d_2} \\ f_{d_3} \\ f_{z_1} \\ f_{z_2} \\ f_{z_3} \end{bmatrix}$$

Izvedemo lahko tudi kontrolo izračunanih novih vrednosti za matriko **B**. Pri tem mora veljati:

$$\left(\frac{\partial F_1}{\partial y_s} - \frac{\sum_{i=1}^3 \frac{\partial F_i}{\partial y_s}}{3} \right) + \left(\frac{\partial F_2}{\partial y_s} - \frac{\sum_{i=1}^3 \frac{\partial F_i}{\partial y_s}}{3} \right) + \left(\frac{\partial F_3}{\partial y_s} - \frac{\sum_{i=1}^3 \frac{\partial F_i}{\partial y_s}}{3} \right) = 0 \quad \text{in}$$

$$\left(\frac{\partial F_1}{\partial x_s} - \frac{\sum_{i=1}^3 \frac{\partial F_i}{\partial x_s}}{3} \right) + \left(\frac{\partial F_2}{\partial x_s} - \frac{\sum_{i=1}^3 \frac{\partial F_i}{\partial x_s}}{3} \right) + \left(\frac{\partial F_3}{\partial x_s} - \frac{\sum_{i=1}^3 \frac{\partial F_i}{\partial x_s}}{3} \right) = 0$$

e) Referenčna varianca a priori

Ponavadi jo izberemo tako, da je enaka referenčni varianci, ki ima utež enako 1.

$$\sigma_0^2 = \sigma_i^2 \Leftrightarrow p_i = 1$$

Ni pa nujno, da to velja za neko naše opazovanje. V našem primeru je vrednost referenčne variance a priori enaka: $\sigma_0^2 = 1$.

f) Matrika uteži je enotska matrika $\mathbf{P} = \mathbf{I}$.

V Matlabu izvedemo posredno izravnavo s tremi danimi točkami z enačbami:

$\mathbf{N} = \mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{B}$... matrika normalnih enačb,

$\mathbf{t} = \mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{f}$... vektor desne strani normalnih enačb,

$\Delta = \mathbf{N}^{-1} \mathbf{t}$... vektor ocenjenih neznank,

$\mathbf{v} = \mathbf{f} - \mathbf{B} \Delta$... vektor popravkov opazovanj,

$\mathbf{l}_Z = \mathbf{l} + \mathbf{v}$... izravnana opazovanja.

Poleg določitve ocene koordinatnih neznank stojišča izvedemo še oceno natančnosti izravnanih vrednosti koordinatnih neznank:

$\mathbf{Q}_{\Delta\Delta} = \mathbf{N}^{-1}$... matrika kofaktorjev neznank,

$\Sigma_{\Delta\Delta} = \hat{\sigma}_0^2 \cdot \mathbf{Q}_{\Delta\Delta}$... kovariančno-variančna matrika neznank,

$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{\mathbf{v}^T \mathbf{P} \mathbf{v}}{n - u}$... a posteriori referenčna standardna varianca.

4.4.2.3 Rezultati izravnave

a) Popravki opazovanj in izravnana opazovanja:

Preglednica 17: Rezultati izravnave: izravnana opazovanja

Opazovanje	Merjeno	Popravki opazovanj	Izravnano
s_1	165°55'26"	-0°00'01"	165°55'26"
s_2	152°12'17"	0°00'11"	152°12'28"
s_3	169°03'26"	-0°00'10"	169°03'16"
d_1	47.5890 m	-0.0004 m	47.5886 m
d_2	11.2705 m	0.0001 m	11.2706 m
d_3	16.9450 m	0.0003 m	16.9453 m
z_1	87°43'35"	0°00'28"	87°44'03"
z_2	90°49'56"	0°00'17"	90°50'13"
z_3	90°08'09"	-0°01'32"	90°06'37"

b) Popravki približnih vrednosti neznank stojišča δy_s , δx_s in δH_s , pridobljeni iz vektorja Δ in vrednost neznank po izravnavi:

Preglednica 18: Rezultati izravnave: vrednost neznank stojišča po izravnavi

Neznanka	Približna vrednost	Popravki približnih vrednosti neznank	Izravnana vrednost
y_s	58749.982 m	-0.0004 m	58749.982 m
x_s	5858.527 m	0.0002 m	5858.527 m
H_s	314.131 m	-0.0001 m	314.131 m

c) Natančnost, s katero lahko v danih pogojih določimo položaj stojišča, izračunamo iz kovariančno-variančne matrike neznank $\Sigma_{\Delta\Delta}$:

Preglednica 19: Rezultati izravnave: natančnost določitve stojišča

Natančnost določitve stojišča	
σ_{y_s}	1.29 mm
σ_{x_s}	0.49 mm
σ_{H_s}	2.66 mm

d) Globalni test modela:

Po izravnavi izvedemo še globalni test modela, kjer testiramo vrednost referenčne variance a posteriori $\hat{\sigma}_0^2$, glede na izbrano vrednost referenčne variance a priori σ_0^2 . S tem testom preverjamo prisotnost grobih pogreškov v opazovanjih.

$$\text{Referenčna varianca a posteriori: } \hat{\sigma}_0^2 = \frac{\mathbf{v}^T \mathbf{P} \mathbf{v}}{n - u}$$

$$\text{Referenčna varianca a priori: } \sigma_0^2 = 1.$$

Testna statistika Y , ki se porazdeljuje po χ^2 porazdelitvi, je podana kot: $Y = \frac{r \cdot \hat{\sigma}_0^2}{\sigma_0^2}$,

kjer je $r = n - u = 5$.

Pri testiranju si postavimo **ničelno** in **alternativno** hipotezo:

$$H_0 : \sigma_0^2 = \hat{\sigma}_0^2$$

$$H_1 : \sigma_0^2 \neq \hat{\sigma}_0^2$$

Interval zaupanja, v katerem naj bi se nahajala vrednost testne statistike Y , ima meji:

$$\chi_{1-\frac{\alpha}{2}, r}^2 < Y < \chi_{\frac{\alpha}{2}, r}^2 \quad \text{ozioroma} \quad \frac{\chi_{1-\frac{\alpha}{2}, r}^2}{r} < \frac{\hat{\sigma}_0^2}{\sigma_0^2} < \frac{\chi_{\frac{\alpha}{2}, r}^2}{r}.$$

Ob poznani stopnji značilnosti $\alpha = 0.05$ in številu nadštevilnih opazovanj $r = 5$ meji odčitamo iz tabele za χ^2 porazdelitev (Stopar, 2005):

Preglednica 20: Odčitane meje iz χ^2 porazdelitve za globalni test modela

$\chi^2_{1-\frac{\alpha}{2}, r} = \chi^2_{0.975, 5}$	Meja (odčitana): 12.8
$\chi^2_{\frac{\alpha}{2}, r} = \chi^2_{0.025, 5}$	Meja (odčitana): 0.831

Interval zaupanja testne statistike Y je: $0.1662 < \frac{\hat{\sigma}_0^2}{\sigma_0^2} < 2.56$

Testna statistika $Y = \frac{\hat{\sigma}_0^2}{\sigma_0^2} = 9.18 \cdot 10^{-8}$

Testna statistika Y se ne nahaja med mejama 0.1662 in 2.56, zato zavrnemo ničelno hipotezo in s stopnjo zaupanja 0.95 ne moremo trditi, da je vrednost referenčne variance a priori enaka vrednosti referenčne variance a posteriori.

Če je globalni test sprejet, lahko trdimo, da sta matematični ter stohastični model pravilno definirana in v opazovanjih ne nastopajo grobi pogreški. V našem primeru globalni test modela ni sprejet, za kar je najverjetnejši razlog v slabo določenih variancah opazovanj (če izključimo grobe pogreške in napake v sestavi matematičnega modela).

5 KVALITETA GEODETSKIH MREŽ

Kvaliteta geodetske mreže je odvisna od naloge, ki jo mora mreža opravljati. Za mrežo v raziskovalnem rovu je kriterij kvalitete določitev položaja stojišča z milimetrsko natančnostjo. Kvaliteto mreže presojujemo na podlagi natančnosti, zanesljivosti in občutljivosti mreže ter na podlagi cene vzpostavitve mreže (Stopar, 1995).

Natančnost, zanesljivost in cena mreže sta pomembni za vsako geodetsko mrežo, medtem ko se občutljivost nanaša predvsem na geodetske mreže za posebne namene. V tej nalogi se bomo omejili le na kriterij natančnosti geodetske mreže in sicer na lokalne mere natančnosti in na matriko kriterija kot mero natančnosti geodetske mreže.

5.1 Mere natančnosti geodetskih mrež

Natančnost kot kriterij kvalitete geodetske mreže obravnavamo različno glede na namen geodetske mreže. V uporabi so različne mere natančnosti. Vse mere natančnosti pa so izpeljane iz kovariančne matrike ocenjenih koordinat točk mreže:

$$\Sigma_{\Delta\Delta} = \hat{\sigma}_0^2 \cdot Q_{\Delta\Delta}$$

Kovariančno matriko v tridimenzionalni mreži običajno razdelimo na blok podmatrik velikosti 3x3, ki se nanašajo na točko ali pa na par točk. S pomočjo teh podmatrik uvedemo lokalne mere natančnosti, ki se nanašajo na eno točko ali na par točk.

5.1.1 Lokalne mere natančnosti geodetskih mrež

Lokalne mere natančnosti nam dajo podatek o natančnosti določitve posameznih točk oziroma parov točk v mreži:

- a) Standardna deviacija ocenjenih koordinat točk

Standardne deviacije ocenjenih položajev točk v mreži dobimo, če korenimo diagonalne elemente matrike $\Sigma_{\Delta\Delta}$.

b) Absolutni elipsoid pogreškov ocenjenih položajev točk v mreži

Natančnost točk v tridimenzionalni mreži lahko prikažemo z elipsoidom pogreškov ali z elipsoidom zaupanja. Elipsoide obravnavamo kot absolutne, če se nanašajo na eno točko in relativne, če se nanašajo na pare točk. Za predstavitev natančnosti položaja stojišča smo izbrali Helmertov srednji elipsoid pogreškov (triosni elipsoid v prostoru).

- Velikost treh glavnih osi elipsoida izračunamo (Wolf, 1994):

$$A^2 = \hat{\sigma}_0^2 \lambda_1,$$

$$B^2 = \hat{\sigma}_0^2 \lambda_2,$$

$$C^2 = \hat{\sigma}_0^2 \lambda_3,$$

kjer so:

λ_1 , λ_2 in λ_3 - pripadajoče lastne vrednosti matrike kofaktorjev $\mathbf{Q}_{\Delta\Delta}$.

Izračun lastnih vrednosti lahko izvedemo z numeričnimi metodami, vgrajenimi v različne matematične programske pakete, ali pa se izračuna lotimo z reševanjem karakterističnega polinoma $\det(\mathbf{Q}_{\Delta\Delta} - \lambda \mathbf{I}) = 0$ (Wolf, 1994).

$$\lambda_1 = 2\sqrt{-\frac{p}{3} \cos \varphi - \frac{a}{3}},$$

$$\lambda_2 = 2\sqrt{-\frac{p}{3} \cos(\varphi + 120^\circ) - \frac{a}{3}},$$

$$\lambda_3 = 2\sqrt{-\frac{p}{3} \cos(\varphi + 240^\circ) - \frac{a}{3}},$$

kjer so:

$$\varphi = \frac{1}{3} \arccos \left(-\frac{q}{2\sqrt{-\left(\frac{p}{3}\right)^3}} \right),$$

$$p = b - \left(\frac{a^2}{3}\right),$$

$$q = c - \frac{ab}{3} + \frac{2a^3}{27},$$

$$a = -(q_{yy} + q_{xx} + q_{HH}),$$

$$b = q_{yy}q_{xx} + q_{HH}q_{yy} + q_{xx}q_{HH} - q_{yx}^2 - q_{yH}^2 - q_{xH}^2,$$

$$c = q_{yy}q_{xH}^2 + q_{xx}q_{yH}^2 + q_{HH}q_{yx}^2 - q_{yy}q_{xx}q_{HH} - 2q_{yx}q_{yH}q_{yH}.$$

V parametrih a , b in c nastopajo elementi kovariančne matrike stojišča:

$$\Sigma_{\Delta\Delta} = \begin{bmatrix} q_{yy}^2 & q_{yx} & q_{yH} \\ q_{yx} & q_{xx}^2 & q_{xH} \\ q_{yH} & q_{xH} & q_{HH}^2 \end{bmatrix}$$

- Tri smerne kote za posamezno os izračunamo:

$$\cos \alpha_j = \frac{M_j}{W_j}, \quad \cos \beta_j = \frac{N_j}{W_j}, \quad \cos \gamma_j = \frac{T_j}{W_j} \quad \text{za } j = A, B, C$$

kjer so:

$$M_j = q_{yH} (q_{xx} - \lambda_j) - q_{yx}q_{xH},$$

$$N_j = q_{xH} (q_{yy} - \lambda_j) - q_{yx} q_{yH},$$

$$T_j = q_{yx}^2 - (q_{yy} - \lambda_j) - (q_{xx} - \lambda_j),$$

$$W_j^2 = M_j^2 + N_j^2 + T_j^2.$$

Preglednica 21: Rezultati: glavne osi in smerni koti elipsoida pogreškov stojišča

Polos	Dolžina polosi	α	β	γ
A	2.68 mm	96°52'21"	88°02'14"	172°51'01"
B	0.18 mm	70°24'41"	19°35'40"	90°27'12"
C	1.34 mm	159°08'47"	70°30'44"	82°51'53"

c) Relativni elipsoid pogreškov

Absolutni elipsoidi pogreškov položaja točke imajo to slabost, da ne upoštevajo korelacije med točkami. Ta pomanjkljivost je deloma odpravljena z relativnim elipsoidom pogreškov, ki predstavlja relativno natančnost dveh točk. V našem primeru relativnega elipsoida pogreškov ne računamo, saj imamo za neznanko samo eno točko (stojišče).

Opomba: Poleg lokalnih mer natančnosti geodetskih mrež poznamo še globalne mere, ki pa jih ne bomo podrobneje predstavili, temveč samo našteji: srednja varianca, srednji položajni pogrešek točke, generalizirana varianca in največja lastna vrednost matrike Σ_{AA} .

5.1.2 Matrika kriterija kot mera natančnosti geodetske mreže

Natančnost geodetske mreže lahko izračunamo tudi tako, da primerjamo kovariančno matriko ocenjenih vrednosti neznank Σ_{AA} z umetno ustvarjeno kovariančno matriko neznank v mreži, ki jo imamo za idealno glede na nalogo, ki jo rešujemo. Tako matriko imenujemo matrika kriterija C_x (Stopar, 1995). Za določitev matrike kriterija uporabljamo različne postopke. Edina zahteva je, da postopek, ki ga uporabimo, ustrezno predstavlja zahteve, ki jih mora mreža izpolniti.

5.1.2.1 Oblikovanje matrike kriterija

Pri oblikovanju matrike kriterija se upošteva predpostavko, da naj bi bila struktura geodetske mreže, ki je namenjena splošni rabi, homogena¹⁹ in izotropna²⁰ (Stopar, 1995).

Grobi približek tej predpostavki bi bila matrika kriterija oblike $\mathbf{C}_x = \sigma^2 \mathbf{I}$, kjer je σ^2 varianca vseh koordinat točk v mreži. Ta matrika popolnoma izpolnjuje zahteve o homogeno izotropni strukturi mreže. Vendar taka oblika matrike kriterija ne ustreza realnosti, ker zanemarja vedno prisotno korelacijo med koordinatami točk. Če želimo vzpostaviti mrežo s homogeno in izotropno variančno kovariančno situacijo, moramo določiti kovariančno matriko kriterija \mathbf{C}_x , ki tej zahtevi v celoti ustreza in primerjati kovariančno matriko realne mreže $\Sigma_{\Delta\Delta}$ s to matriko.

Eden od postopkov oblikovanja matrike kriterija, ki bo opisan v nadaljevanju, ima naslednje značilnosti:

- zagotavlja homogeno izotropno razporeditev pogreškov v geodetski mreži,
- absolutni elipsoidi pogreškov so krogle,
- kovarianca med točkama P_i in P_j je dana s primerno kovariančno funkcijo.

E. Grafarend in B. Schaffrin (Stopar, 1995) sta pokazala, da ima kovariančna matrika, ki pripada položajem točk idealno homogeno izotropne geodetske mreže, nujno "Taylor – Karmanovo strukturo". Splošna oblika kovariančne matrike homogeno izotropne mreže naj bi imela naslednjo obliko (Teke, 2005):

$$\mathbf{C}_x = \begin{bmatrix} \Sigma_m(s) & 0 & 0 \\ 0 & \Sigma_m(s) & 0 \\ 0 & 0 & \Sigma_m(s) \end{bmatrix} + [\Sigma_l(s) - \Sigma_m(s)] \begin{bmatrix} \frac{\Delta x}{s^2} & \frac{\Delta x \Delta y}{s^2} & \frac{\Delta x \Delta z}{s^2} \\ \frac{\Delta x \Delta y}{s^2} & \frac{\Delta y}{s^2} & \frac{\Delta y \Delta x}{s^2} \\ \frac{\Delta x \Delta z}{s^2} & \frac{\Delta y \Delta z}{s^2} & \frac{\Delta z}{s^2} \end{bmatrix},$$

¹⁹ Homogena mreža zagotavlja enako velike elipsoide pogreškov.

²⁰ Izotropna mreža zagotavlja rotacijsko simetrične elipsoide pogreškov.

V primeru, ko naj bi bila mreža homogena in izotropna, naj bi lokalni elipsoidi pogreškov postali krogle z enakim radijem, saj morata zahteva homogenosti in izotropnosti veljati istočasno.

kjer je:

- $\Sigma_l(s)$...dolžinska korelacijska funkcija
- $\Sigma_m(s)$...širinska korelacijska funkcija
- s ...razdalja med točkama $P_i(x_i, y_i, z_i)$ in $P_j(x_j, y_j, z_j)$
- $\Delta x = x_i - x_j$
- $\Delta y = y_i - y_j$
- $\Delta z = z_i - z_j$

Prednost matrike kriterija: Struktura matrike kriterija je neodvisna od predvidenega tipa opazovanj v geodetski mreži.

Dolžinska in širinska korelacijska funkcija se izračunata (Stopar, 1995):

$$\Sigma_l(s) = \frac{4d^2}{s^2} + 2K_0\left(\frac{s}{d}\right) + \frac{4d}{s}K_1\left(\frac{s}{d}\right) + \frac{2s}{d}K_1\left(\frac{s}{d}\right)$$

$$\Sigma_m(s) = \frac{4d^2}{s^2} - 2K_0\left(\frac{s}{d}\right) - \frac{4d}{s}K_1\left(\frac{s}{d}\right),$$

kjer so:

- $s = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2}$...razdalja med točkama P_i in P_j
- d ...karakteristična razdalja v mreži, ki naj bi bila krajša od najkrajše dolžine v mreži, presegati pa ne bi smela $\frac{1}{10}$ najdaljše dolžine v mreži. Ker lahko d poljubno izberemo, je to edina količina, s katero lahko vplivamo na vrednost korelacijskih funkcij $\Sigma_l(s)$ in $\Sigma_m(s)$ ter s tem na samo vrednost elementov v matriki kriterija \mathbf{C}_x .
- K_0 ...modificirana Besselova funkcija druge vrste ničelnega reda
- K_1 ...modificirana Besselova funkcija druge vrste prvega reda

Zgornji modificirani Besselovi funkciji druge vrste ν - tega reda, sta eni izmed rešitev spodnje modificirane Besselove diferencialne enačbe (Matlab Help):

$$z^2 \frac{d^2 y}{dz^2} + z \frac{dy}{dz} - (z^2 + \nu^2)y = 0$$

Rešitev zgornje diferencialne enačbe in s tem izračun za K_0 in K_1 se zapiše:

$$K_\nu(z) = \left(\frac{\pi}{2}\right) \frac{I_{-\nu}(z) - I_\nu(z)}{\sin(\nu\pi)},$$

kjer $I_\nu(z)$ in $I_{-\nu}(z)$ formirata rešitve modificirane Besselove enačbe:

$$I_\nu(z) = \left(\frac{z}{2}\right)^\nu \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\left(\frac{z^2}{4}\right)^k}{k! \Gamma(\nu + k + 1)},$$

kjer je:

- $\Gamma(a)$... γ - funkcija (ang. Gamma function)
- ν ... ne celo število (ang. noninteger)

V Matlab-u se lahko K_0 in K_1 izračunata z vgrajeno funkcijo **besselk**, funkcija $I_\nu(z)$ pa po vgrajeni funkciji **besseli**. Pri oblikovanju matrike kriterija \mathbf{C}_x za stojiščno točko v raziskovalnem rovu naletimo na problem, kako takšno matriko sestaviti, saj imamo na voljo le eno točko (stojišče) in ne dveh, kolikor bi jih za sestavo matrike kriterija potrebovali po zgoraj navedeni teoriji. Do rešitve problema bomo prišli z nekaj lastnostmi korelacijskih funkcij, ki veljajo v določenih slučajih.

5.1.2.2 Oblikovanje matrike kriterija za stojiščno točko v raziskovalnem rovu

Ker imamo za oblikovanje matrike kriterija \mathbf{C}_x na voljo le eno točko, predpostavimo, da točki P_i in P_j sovpadata in s tem "umetno" pridelamo eno točko. V slučaju, ko točki P_i in P_j

sovpadata, pa za dolžinsko in širinsko korelacijsko funkcijo velja, da imata enake vrednosti (Bae, 2005):

$$\Sigma_l(0) = \Sigma_m(0) = \sigma^2,$$

kjer je σ^2 pričakovana oziroma želena varianca ocenjenih koordinat mreže, ki za našo mrežo v raziskovalnem rovu znaša 1 mm^2 .

Kadar pa sta dolžinska in širinska korelacijska funkcija enakih vrednosti ($\Sigma_l(s) = \Sigma_m(s)$), postane struktura kovariančne matrice naslednja:

$$\mathbf{C}_x = \begin{bmatrix} \Sigma_m(s) & 0 & 0 \\ 0 & \Sigma_m(s) & 0 \\ 0 & 0 & \Sigma_m(s) \end{bmatrix}$$

Če sedaj upoštevamo še sovpadanje P_i in P_j , lahko v zgornji matriki namesto $\Sigma_m(s)$ pišemo σ^2 :

$$\mathbf{C}_x = \begin{bmatrix} \sigma^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1\text{mm}^2 & 0 & 0 \\ 0 & 1\text{mm}^2 & 0 \\ 0 & 0 & 1\text{mm}^2 \end{bmatrix}$$

S tem smo pridelali diagonalno matriko kriterija \mathbf{C}_x , ki jo bomo v nadaljevanju uporabili pri izračunu optimizacije opazovanj drugega reda. Korelacija v matriki kriterija za naš primer ne nastopa. Le ta bi nastopala v primeru, če bi poleg ocenjene točke stojišča v mreži imeli po posredni izravnavi ocenjen položaj še katere druge točke iz mreže. Ker pa imamo v naši mreži ocenjeno le eno točko (preostale tri točke so bile dane), korelacije med točkami v mreži ne moramo izračunati.

Poleg diagonalne matrice kriterija pa smo sestavili za stojišče tudi enotsko matriko kriterija. Pri tem smo izhajali iz predpostavke, da je grobi približek, ki izpolnjuje zahteve o homogeni in izotropni strukturi mreže, matrika kriterija oblike $\mathbf{C}_x = \sigma^2 \mathbf{I}$. Varianco vseh koordinat točk v mreži σ^2 smo nastavili na ena in s tem pridobili enotsko matriko kriterija.

6 OPTIMIZACIJA GEODETSKE MREŽE

Pojem "optimizacija" izhaja iz latinske besede "optimus" in pomeni "bolj ali manj najboljši". Optimizacija geodetske mreže predstavlja izdelavo plana geodetske mreže, ki bo optimalen v določenem smislu, najpogosteje v smislu kvalitete mreže. Geodetske mreže morajo izpolnjevati različne kriterije (zahteve), ki niso absolutni, zato ločimo med optimizacijo mreže za posebne (inženirske) namene in optimizacijo mreže namenjeno splošni rabi (Stopar, 1995).

6.1 Postopki optimizacije geodetske mreže

Postopke optimizacije geodetskih mrež razdelimo v rede, kakor jih je predlagal E. Grafarend (Stopar, 1995):

Preglednica 22: Postopki optimizacije

Optimizacija	Opis	Dani parametri	Iskani parametri
Ničelni red	Izbira optimalnega datuma geodetske mreže oziroma koordinatnega sistema, na katerega se mreža nanaša.	B, P	Δ , $Q_{\Delta\Delta}$
Prvi red	Optimalna izbira položajev točk v geodetski mreži oziroma določitev optimalne konfiguracije geodetske mreže, pod predpostavko, da poznamo natančnost predvidenih opazovanj. (vpliv geometrije danih točk in stojišča na natančnost določitve koordinat stojišča)	P, $Q_{\Delta\Delta}$	B
Drugi red	Določitev uteži opazovanj v izbrani obliki geodetske mreže. (vpliv natančnosti opazovanj proti danim točkam na natančnost določitve koordinat stojišča)	B, $Q_{\Delta\Delta}$	P
Tretji red	Optimalno izboljšanje ali zgostitev obstoječe geodetske mreže. (premikanje stojišča in danih točk)	$Q_{\Delta\Delta}$	B, P (delno)

V zgornji tabeli nastopajo:

- **B**...matrika koeficientov enačb popravkov
- **P**...matrika uteži opazovanj
- $Q_{\Delta\Delta}$...matrika ocenjevanih koordinatnih neznank Δ v mreži

Splošna zveza med gornjimi tremi količinami v izravnavi po metodi najmanjših kvadratov se glasi:

$$Q_{\Delta\Delta} = (B^T P B)^{-1}$$

Tip inverzije v zgornji enačbi je odvisen od izbranega datuma geodetske mreže. V tem primeru gre za psevdoinverzijo²¹ (\cdot).

Pri reševanju problemov optimizacije se pokaže, da dana teoretična delitev na rede povzroča težave, saj v postopku optimizacije geodetske mreže pogosto prihaja do prekrivanja posameznih nalog optimizacije geodetske mreže.

6. 2 Cilji optimizacije geodetske mreže

V splošnem definirajo optimizacijo geodetske mreže trije kriteriji oziroma zahteve (Stopar, 1995):

- natančnost
- zanesljivost in
- cena vzpostavitve geodetske mreže.

Optimizacija minimira ali pa maksimira funkcije, ki jih predstavljajo zgornji trije kriteriji. Na kvaliteto geodetske mreže se nanašata natančnost in zanesljivost, v realnosti pa je poleg teh dveh kriterijev zelo pomembna tudi cena vzpostavitve mreže.

Zgornji kriteriji v splošnem predstavljajo geodetsko mrežo, ki bo optimalna v smislu želene, v naprej postavljene natančnosti v geodetski mreži ocenjevanih količin in bo glede na ceno vzpostavitve mreže in količino potrebnih opazovanj optimalna.

Kriteriji so si v splošnem nasprotujoči: višja natančnost in večja zanesljivost geodetske mreže navadno povzročita višjo ceno vzpostavitve mreže. Zato so bili za optimalno ceno geodetske

²¹ *Psevdoinverzija* je oblika inverzije, ki jo uporabimo takrat, kadar bi radi izračunali inverzno matriko matrike, ki je po obliki skoraj singularna, kar pomeni, da je determinanta te matrike blizu nič, zato je ne moremo invertirati z navadno inverzijo. Invertiranje singularnih matrik nam omogoča psevdoinverzija (v Matlabu funkcija *pinv()*). Singularnost matrike ugotavljamo z rangom matrike: matrika \mathbf{Z} dimenzije ($z \times z$) je singularna, če je njen rang (oz. število med seboj linearno neodvisnih vektorjev v matriki \mathbf{Z}) manjši od njene dimenzije z , kar zapišemo: $\text{rang}(\mathbf{Z}) < z$.

mreže izpeljani nekateri matematični postopki, po katerih se rešuje problem optimalne cene geodetske mreže.

6. 3 Reševanje problemov optimizacije geodetskih mrež

Optimizacija je odvisna od kriterijev, ki si jih izberemo za optimizacijo geodetske mreže. Iz tega razloga je tudi način reševanja problema optimizacije odvisen od zahtevanih kriterijev. Osnovna ideja optimizacije geodetske mreže je v tem, da lahko ocenimo kvaliteto mreže znane oblike, preden v mreži opravimo kakršnokoli opazovanje. Tako lahko geodetsko mrežo že v fazi planiranja podrobno analiziramo in po potrebi predvideni osnutek mreže izboljšamo. Analizo natančnosti in zanesljivosti geodetske mreže lahko opravimo kar z računalniškimi programi za izravnavo opazovanj v geodetski mreži.

6. 4 Metode optimizacije drugega reda

Metode optimizacije drugega reda v splošnem razdelimo v dve skupini (Stopar, 1995). Za prvo skupino velja, da geodetsko mrežo optimiziramo na podlagi skalarnih mer natančnosti, pri čemer določimo funkcije neznank, ki jih lahko minimiziramo ali maksimiziramo. Pri drugi skupini pa je reševanje problema omejeno na določanje vrednosti elementov matrike **P**. V tem primeru morata biti dani matrika koeficientov enačb popravkov **B** in matrika kofaktorjev neznank \mathbf{Q}_{AA} . Dane moramo torej imeti:

- konfiguracijo geodetske mreže (oblika geodetske mreže),
- tip in razporeditev opazovanj v geodetske mreži (predviden plan opazovanj),
- matriko kriterija neznank v geodetske mreži.

Obe skupini imata svoje prednosti in slabosti. Mi se bomo odločili za drugo skupino optimizacije drugega reda in sicer zaradi prednosti optimiranja z matriko kriterija, saj je njena struktura neodvisna od predvidenega tipa opazovanj.

Druga skupina, ki predstavlja metode optimizacije drugega reda na osnovi matrike kriterija, vsebuje več metod optimizacije. V nalogi se bomo omejili na metodo, ki daje glede na matriko kriterija v skoraj vseh praktičnih primerih zanesljive in v praksi uporabne rezultate (Stopar, 1995). To je **metoda direktne rešitve** na osnovi inverzne matrike kriterija.

6.4.1 Metoda direktne rešitve

Z metodo direktne rešitve skušamo v najboljši možni meri aproksimirati inverzno matriko kriterija, ki smo jo predhodno definirali za izbrano konfiguracijo in datum geodetske mreže.

Pri tej metodi vzpostavimo funkcijsko zvezo med:

- matriko koeficientov enačb popravkov \mathbf{B} dimenzije $(n \times u)$,
- diagonalno matriko uteži \mathbf{P} dimenzije $(n \times n)$ in
- inverzno matriko kriterija \mathbf{C}_x^+ dimenzije $(u \times u)$.

Kjer sta:

n ...število opazovanj

u ...število (koordinatnih) neznank

Zvezo lahko zapišemo z matrično enačbo (Stopar, 1995):

$$\mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{B} = \mathbf{C}_x^+$$

V zgornji zvezi imamo poznani matriki \mathbf{B} in \mathbf{C}_x^+ , določamo pa diagonalno matriko uteži opazovanj \mathbf{P} .

Matrika kriterija predstavlja želeno variančno kovariančno situacijo v geodetski mreži, ki se nanaša samo na koordinatne neznanke. Druge neznanke (orientacijske, faktorji merila, ...) niso vključeni v matriko kriterija, ker lahko matriko kriterija zadovoljivo sestavimo samo za koordinatne neznanke.

Gornjo matrično enačbo lahko zapišemo tudi v obliki:

$$(\mathbf{B}^T \odot \mathbf{B}^T)\mathbf{p} = \mathbf{q},$$

kjer je:

- \odot ... simbolna oznaka za Khatri – Rao produkt
- \mathbf{p} ... v obliki vektorja zapisana matrika diagonalna matrika \mathbf{P}
- \mathbf{q} ... v obliki vektorja zapisana matrika \mathbf{C}_x^+

Rešitve gornje enačbe lahko v splošnem zapišemo v obliki:

$$\mathbf{p} = (\mathbf{B}^T \odot \mathbf{B}^T)^+ \mathbf{q},$$

Rešitev te enačbe je vektor uteži opazovanj \mathbf{p} , oziroma diagonalna matrika uteži \mathbf{P} .

Pomembno je poudariti, da v praksi uteži ne izračunamo kar direktno po tej enačbi, temveč moramo v matriki (v nadaljevanju je označena kot matrika \mathbf{U}), ki jo dobimo z Khatri – Rao produktom $(\mathbf{B}^T \odot \mathbf{B}^T)$, odstraniti vrstice, ki so enake nič in vrstice, ki se v matriki ponavljajo. Takšno reduciranje matrike \mathbf{U} lahko storimo, saj ostane rešitev sistema enaka.

6.4.1.1 Khatri – Rao produkt

Če računamo uteži po gornji enačbi \mathbf{p} , moramo poznati pomen \odot , ki je simbol za Khatri – Rao produkt. Khatri – Rao produkt je sestavljen iz Kroneckerjevih produktov, ki jih označimo s simbolom \otimes .

Imamo dve matriki (Hazan, 2006): matriko \mathbf{G} dimenzije $(d_1 \times k)$ in matriko \mathbf{H} dimenzije $(d_2 \times k)$:

$$\mathbf{G} = [\mathbf{g}_1, \dots, \mathbf{g}_k] \text{ in } \mathbf{H} = [\mathbf{h}_1, \dots, \mathbf{h}_k].$$

Khatri – Rao produkt dveh matrik $\mathbf{G} \odot \mathbf{H}$ je sestavljen iz Kroneckerjevih produktov, kar zapišemo:

$$\mathbf{G} \odot \mathbf{H} = [\mathbf{g}_1 \otimes \mathbf{h}_1, \dots, \mathbf{g}_k \otimes \mathbf{h}_k], \text{ dimenzije } (d_1 \cdot d_2 \times k).$$

Kroneckerjeve produkte v praksi izračunamo tako, da vsak element iz matrike \mathbf{G} množimo s stolpci v matriki \mathbf{H} , kar prikazuje spodnja shema:

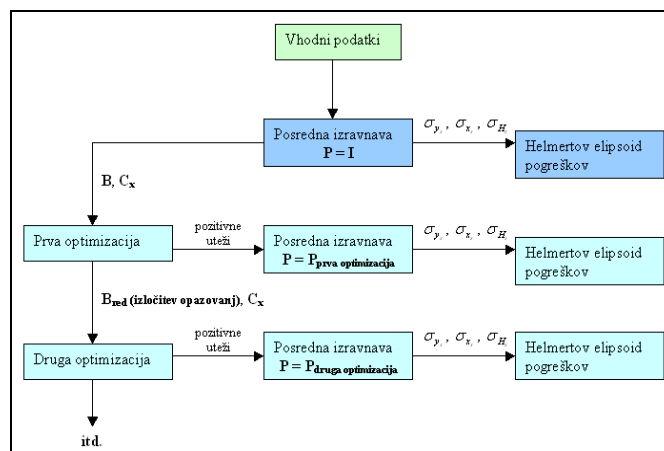
$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} \\ g_{21} & g_{22} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \\ h_{31} & h_{32} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{G} \odot \mathbf{H} = \begin{bmatrix} g_{11} \cdot h_{11} & g_{12} \cdot h_{12} \\ g_{11} \cdot h_{21} & g_{12} \cdot h_{22} \\ g_{11} \cdot h_{31} & g_{12} \cdot h_{32} \\ g_{21} \cdot h_{11} & g_{22} \cdot h_{12} \\ g_{21} \cdot h_{21} & g_{22} \cdot h_{22} \\ g_{21} \cdot h_{31} & g_{22} \cdot h_{32} \end{bmatrix}$$

Praktičen primer Khatri – Rao produkta prikazuje spodnja shema (Sidiropoulos, 2002):

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 3 & 4 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{H} = \begin{bmatrix} 5 & 10 \\ 15 & 20 \\ 25 & 30 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{G} \odot \mathbf{H} = \begin{bmatrix} 5 & 20 \\ 15 & 40 \\ 25 & 60 \\ 15 & 40 \\ 45 & 80 \\ 75 & 120 \end{bmatrix}$$

Za naš primer imamo matriko \mathbf{B}^T dimenzije $(u \times n)$, zato bo dimenzija Khatri – Rao produkta $\mathbf{B}^T \odot \mathbf{B}^T$ enaka $(u^2 \times n)$, kar konkretno pomeni (9×9) .

6. 4 Praktični primer optimizacije opazovanj za raziskovalni rov



Slika 17: Shema optimizacije

6.4.1 Enotska matrika kriterija

6.4.1.1 Vhodni podatki

- matrika kriterija \mathbf{C}_x ($u \times u$) je enotska matrika:

$$\mathbf{C}_x = \begin{bmatrix} \sigma^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

- matrika koeficientov enačb popravkov \mathbf{B} dimenzije ($n \times u$) iz že izračunane posredne izravnave.
- vektor \mathbf{q} je v obliki vektorja zapisana inverzna matrika kriterija \mathbf{C}_x^+ (iz inverzne matrike kriterija \mathbf{C}_x^+ prepisemo desne člene od diagonale):

$$\mathbf{q} = [1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1]^T.$$

6.4.1.2 Izračun

Najprej izračunamo Khatri – Rao produkt, ki ga označimo z matriko \mathbf{U} dimenzije ($u^2 \times n$), kar konkretno pomeni (9×9):

$$\mathbf{U} = (\mathbf{B}^T \odot \mathbf{B}^T)$$

Sedaj iz matrike \mathbf{U} brišemo vrstice, ki se ponavljajo, ali pa so enake 0. V našem primeru se ponavljajo vrstice 4, 7 in 8, zato jih brišemo iz matrike \mathbf{U} . Matrika \mathbf{U} je sedaj dimenzije (6×9).

Nato izračunamo optimizirane uteži po metodi direktne rešitve:

$$\mathbf{p} = (\mathbf{B}^T \odot \mathbf{B}^T)^+ \mathbf{q}$$

Nato izvedemo še kontrolo:

$$\mathbf{C}_{xK} = (\mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{B})^-$$

Kontrolna matrika \mathbf{C}_{xK} mora biti enaka vhodni matriki \mathbf{C}_x .

6.4.1.3 Rezultati prve optimizacije

a) Optimizirane uteži:

Preglednica 23: Rezultati prve optimizacije: optimizirane uteži

Uteži opazovanj	
p_{s_1}	485.8076
p_{s_2}	381.2283
p_{s_3}	6.2191
p_{d_1}	-0.0046
p_{d_2}	1.1547
p_{d_3}	-0.1903
p_{z_1}	-5.3679
p_{z_2}	146.8104
p_{z_3}	-44.0513

b) Nato naredimo še kontrolo s kontrolno matriko kriterija \mathbf{C}_{xK} , ki jo izračunamo iz dobljenih optimiziranih uteži. Kontrolna \mathbf{C}_{xK} mora priti enaka vhodni matriki \mathbf{C}_x .

$$\mathbf{C}_{xK} = \begin{bmatrix} 1.0000 & -0.0000 & 0.0000 \\ -0.0000 & 1.0000 & -0.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & 1.0000 \end{bmatrix}$$

c) Potem optimizirane uteži vnesemo v posredno izravnavo, naredimo ponovno izravnavo in dobimo novo natančnost določitve stojišča. Pri tem v posredno izravnavo vnesemo samo uteži, ki so pozitivne. Uteži z negativnim predznakom pa naj ne bi nastopale v postopku optimizacije. Če pogledamo rezultate prve optimizacije, lahko opazimo, da je imajo opazovanja d_1 , d_3 , z_1 in z_3 negativne uteži. Zato ta opazovanja odstranimo iz nadaljnjih izračunov. Od vhodnih podatkov za ponovno izravnavo se spremeni samo matrika koeficientov enačb popravkov \mathbf{B} , ki se ji zaradi izločitve štirih opazovanj zmanjša dimenzija na (5 x 3).

Preglednica 24: Rezultati prve optimizacije: natančnost določitve stojišča

Natančnost določitve stojišča (P = I)	Natančnost določitve stojišča (P = optimizirana)
$\sigma_{y_s} = 1.29 \text{ mm}$	$\sigma_{y_s} = 0.73 \text{ mm}$
$\sigma_{x_s} = 0.49 \text{ mm}$	$\sigma_{x_s} = 0.69 \text{ mm}$
$\sigma_{H_s} = 2.66 \text{ mm}$	$\sigma_{H_s} = 0.69 \text{ mm}$

Natančnost je po ponovni izravnavi približno isto velika pri vseh koordinatah stojišča.

d) Globalni test modela ni sprejet:

Ker se je z odstranitvijo opazovanj d_1 , d_3 , z_1 in z_3 zmanjšalo število opazovanj na $n = 5$, se spremeni tudi število nadštevilnih opazovanj $r = n - u = 1$, zato moramo spremeniti meji intervala zaupanja, v katerem naj bi se nahajala testna statistika Y .

Ob poznani stopnji značilnosti $\alpha = 0.05$ in številu nadštevilnih opazovanj $r = 1$ meji odčitamo iz tabele za χ^2 porazdelitev (Stopar, 2005):

Preglednica 25: Odčitane meje iz χ^2 porazdelitve za globalni test modela

$\chi^2_{1-\frac{\alpha}{2}, r} = \chi^2_{0.975, 1}$	Meja (odčitana): 5.02
$\chi^2_{\frac{\alpha}{2}, r} = \chi^2_{0.025, 1}$	Meja (odčitana): 0.0010

Interval zaupanja testne statistike Y je: $0.001 < \frac{\hat{\sigma}_0^2}{\sigma_0^2} < 5.02$

Testna statistika $Y = \frac{\hat{\sigma}_0^2}{\sigma_0^2} = 5.52 \cdot 10^{-7}$

Testna statistika Y se ne nahaja med mejama 0.001 in 5.02, zato zavrnamo ničelno hipotezo in s stopnjo zaupanja 0.95 ne moremo trditi, da je vrednost referenčne variance a priori enaka vrednosti referenčne variance a posteriori.

- e) Nato novo pridobljeno natančnost določitve stojišča upoštevamo še pri izračunu Helmertovega elipsoida pogreškov in dobimo:

Preglednica 26: Rezultati prve optimizacije: krogla

Polos	P = I	P = optimizirana
A	2.68 mm	0.74 mm
B	0.18 mm	0.68 mm
C	1.34 mm	0.69 mm

Opazimo lahko, da je na novo izračunan Helmertov elipsoid pogreškov krogla z radijem 0.7 mm.

Ker smo zavrnili ničelno hipotezo, moramo izračun ponoviti pri novi vrednosti referenčne variance a priori, kar dosežemo z diagonalno matriko kriterija.

6.4.2 Diagonalna matrika kriterija

6.4.2.1 Vhodni podatki

- matrika kriterija C_x ($u \times u$) je diagonalna matrika, kjer upoštevamo želeno varianco ocenjenih koordinat mreže, ki za našo mrežo v raziskovalnem rovu znaša 1 mm^2 :

$$C_x = \begin{bmatrix} \sigma^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.001^2 m^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0.001^2 m^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0.001^2 m^2 \end{bmatrix}$$

- matrika koeficientov enačb popravkov B dimenzije ($n \times u$) iz že izračunane posredne izravnave,
- vektor q je v obliki vektorja zapisana inverzna matrika kriterija C_x (iz inverzne matrike kriterija C_x prepisemo desne člene od diagonale).

$$q = [1000000 \ 0 \ 0 \ 1000000 \ 0 \ 1000000]^T$$

6.4.2.2 Izračun

Najprej izračunamo Khatri – Rao produkt, ki ga označimo z matriko \mathbf{U} dimenzije $(u^2 \times n)$, kar konkretno pomeni (9×9) :

$$\mathbf{U} = (\mathbf{B}^T \odot \mathbf{B}^T)$$

Sedaj iz matrike \mathbf{U} brišemo vrstice, ki se ponavljajo, ali pa so enake 0. V našem primeru se ponavljajo vrstice 4, 7 in 8, zato jih brišemo iz matrike \mathbf{U} . Matrika \mathbf{U} je sedaj dimenzije (6×9) . Matrika \mathbf{U} je enaka matriki \mathbf{U} v primeru računanja uteži za enotsko matriko kriterija, saj je \mathbf{U} odvisna le od matrike \mathbf{B} , ki pa je za enotsko in diagonalno matriko kriterija enaka.

Nato izračunamo optimizirane uteži po metodi direktne rešitve:

$$\mathbf{p} = (\mathbf{B}^T \odot \mathbf{B}^T)^+ \mathbf{q}$$

Nato izvedemo še kontrolo:

$$\mathbf{C}_{\mathbf{xK}} = (\mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{B})^{-1}$$

Kontrolna matrika $\mathbf{C}_{\mathbf{xK}}$ mora biti enaka vhodni matriki $\mathbf{C}_{\mathbf{x}}$.

6.4.2.3 Rezultati prve optimizacije

a) Optimizirane uteži:

Preglednica 27: Rezultati prve optimizacije: optimizirane uteži

Uteži opazovanj	
p_{s_1}	485807553.578
p_{s_2}	381228259.217
p_{s_3}	6219108.166
p_{d_1}	-4575.691
p_{d_2}	1154663.180
p_{d_3}	-190333.724
p_{z_1}	-5367889.454
p_{z_2}	146810385.103
p_{z_3}	-44051305.741

- b) Nato naredimo še kontrolo s kontrolno matriko kriterija C_{xK} , ki jo izračunamo iz dobljenih optimiziranih uteži. Kontrolna C_{xK} mora priti enaka vhodni matriki C_x .

$$C_{xK} = \begin{bmatrix} 0.000001 & -0.0000 & 0.0000 \\ -0.0000 & 0.000001 & -0.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.000001 \end{bmatrix}$$

- c) Potem pozitivne optimizirane uteži vnesemo v posredno izravnavo, naredimo ponovno izravnavo in dobimo na podlagi petih opazovanj novo natančnost določitve stojišča:

Preglednica 28: Rezultati prve optimizacije: natančnost določitve stojišča

Natančnost določitve stojišča (P = I)	Natančnost določitve stojišča (P = optimizirana)
$\sigma_{y_s} = 1.29$ mm	$\sigma_{y_s} = 0.73$ mm
$\sigma_{x_s} = 0.49$ mm	$\sigma_{x_s} = 0.69$ mm
$\sigma_{H_s} = 2.66$ mm	$\sigma_{H_s} = 0.69$ mm

Natančnost je po ponovni izravnavi približno isto velika pri vseh koordinatah stojišča.

- d) Globalni test modela je sprejet:

Interval zaupanja testne statistike Y je: $0.001 < \frac{\hat{\sigma}_0^2}{\sigma_0^2} < 5.02$

Testna statistika $Y = \frac{\hat{\sigma}_0^2}{\sigma_0^2} = 0.552$

Testna statistika Y se nahaja med mejama 0.001 in 5.02, zato ne moremo zavrniti ničelne hipoteze in s stopnjo zaupanja 0.95 lahko trdimo, da je vrednost referenčne variance a priori enaka vrednosti referenčne variance a posteriori.

- e) Nato novo pridobljeno natančnost določitve stojišča upoštevamo še pri izračunu Helmertovega elipsoida pogreškov in dobimo:

Preglednica 29: Rezultati prve optimizacije: kroglja

Polos	P = I	P = optimizirana
A	2.68 mm	0.74 mm
B	0.18 mm	0.68 mm
C	1.34 mm	0.69 mm

Opazimo lahko, da je na novo izračunan Helmertov elipsoid pogreškov kroglja z radijem 0.7 mm.

6.4.2.4 Rezultati druge optimizacije

Postopek je enak kot pri enotski matriki kriterija. Ker uteži z negativnim predznakom naj ne bi nastopale v postopku optimizacije, jih iz druge optimizacije izločimo.

- a) Optimizirane uteži druge optimizacije:

Preglednica 30: Rezultati druge optimizacije: optimizirane uteži

Uteži opazovanj	
p_{s_1}	635960258.900
p_{s_2}	205305475.428
p_{s_3}	-155201998.583
p_{d_2}	1000000.000
p_{z_2}	127022003.760

- b) Nato naredimo še kontrolo s kontrolno matriko kriterija C_{xK} , ki jo izračunamo iz dobljenih optimiziranih uteži. Kontrolna C_{xK} mora priti enaka vhodni matriki C_x .

$$C_{xK} = \begin{bmatrix} 0.000001 & -0.0000 & 0.0000 \\ -0.0000 & 0.000001 & -0.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.000001 \end{bmatrix}$$

- c) Potem pozitivne optimizirane uteži druge optimizacije vnesemo v posredno izravnavo, z namenom narediti ponovno izravnavo in dobiti novo natančnost določitve stojišča.

Vendar tu nastopi težava, saj se v posredni izravnavi izključi še opazovanje s_3 , tako da v izravnavi nastopajo le še štiri opazovanja: s_1 , s_2 , d_2 in z_2 . To ima za posledico, da število nadštevilnih opazovanj postane enako nič ($r = n - u = 0$). V nadaljevanju izračuna natančnosti določitve stojišča, ki jo izračunamo iz kovariančno-variančne matrike neznanek $\Sigma_{\Delta\Delta}$, ne moremo opraviti. Število nadštevilnih opazovanj je enako nič, kar v izračunu a posteriori variance povzroči deljenje z nič, zato natančnosti določitve stojišča ne moremo izračunati (označeno z *). Postopek optimizacije se zato tukaj zaključi.

6.4.3 Rezultati optimizacije za diagonalno in enotsko matriko kriterija skupaj

Preglednica 31: Združeni rezultati optimizacije

46/1 (točka 1) 28/2 (točka 2) 31/3 (točka 3)		P=I	Enotska matrika kriterija		Diagonalna matrika kriterija	
			Prva optimizacija	Druga optimizacija	Prva optimizacija	Druga optimizacija
Optimizirane uteži	p_{s_1}	1	485.8076	NI	485807553.578	635960258.900
	p_{s_2}	1	381.2283	NI	381228259.217	205305475.428
	p_{s_3}	1	6.2191	NI	6219108.166	-155201998.583
	p_{d_1}	1	-0.0046	NI	-4575.691	/
	p_{d_2}	1	1.1547	NI	1154663.180	1000000.000
	p_{d_3}	1	-0.1903	NI	-190333.724	/
	p_{z_1}	1	-5.3679	NI	-5367889.454	/
	p_{z_2}	1	146.8104	NI	146810385.103	127022003.760
	p_{z_3}	1	-44.0513	NI	-44051305.741	/
Natančnost določitve stojišča	σ_{y_s} [mm]	1.29	0.73	NI	0.73	*
	σ_{x_s} [mm]	0.49	0.69	NI	0.69	*
	σ_{H_s} [mm]	2.66	0.69	NI	0.69	*
Helmertov elipsoid pogreškov	A [mm]	2.68	0.74	NI	0.74	*
	B [mm]	0.18	0.68	NI	0.68	*
	C [mm]	1.34	0.69	NI	0.69	*
Globalni test modela	Interval zaupanja	[0.166, 2.56]	[0.001, 5.02]	NI	[0.001, 5.02]	*
	Test	$9.18 \cdot 10^{-8}$	$5.52 \cdot 10^{-7}$	NI	0.552	*
	Zavrnitev	DA	DA	NI	NE	*

(znak * pomeni, da rezultata nismo mogli izračunati)

Komentar rezultatov:

Opaziti je, da ima kroglja stojišča v primeru, ko izvajamo optimizacijo z enotsko ali pa z diagonalno matriko kriterija, vedno enak radij, ki je 0.7 mm. Natančnost je tako homogeno razporejena po vseh treh oseh Helmertovega elipsoida. Pred optimizacijo pa o homogenosti nismo mogli govoriti.

Globalni test modela je sprejet samo v primeru, ko računamo uteži opazovanj z diagonalno matriko kriterija. Ko vnesemo optimirane uteži prve optimizacije enotske matrike kriterija v ponovno izravnavo, globalni test modela ni sprejet. Zato se odločimo, da ne izvajamo nadaljnje druge optimizacije za enotsko matriko kriterija, temveč izračun ponovimo pri novi vrednosti referenčne variance a priori, ki jo dosežemo z diagonalno matriko kriterija.

Velika utež nekega opazovanja pomeni, da je to opazovanje bolj pomembno, mala utež pa ravno obratno. Uteži opazovanj si po velikosti od največje do najmanjše sledijo po naslednjem vrstnem redu: horizontalni smeri s_1 in s_2 , zenitna razdalja z_2 in poševna dolžina d_2 .

Optimizacija je izločila daljši dolžini d_1 in d_3 , v izračunih pa je ostala najkrajša dolžina d_2 . Pri zenitnih razdaljah sta bili podobno izločeni z_1 in z_3 , ostala pa je z_2 . Od smernih kotov pa je bil izločen s_3 , ostala pa sta s_1 in s_2 . Ugotovitve optimizacije narekujejo, da so opazovanja na točke blizu stojišča bolj pomembna, kot pa opazovanja na točke daleč stran od stojišča.

Pri diagonalni matriki kriterija smo optimalno rešitev uteži opazovanj dosegli tako, da smo optimirali toliko časa, da nismo imeli več nadštevilnih opazovanj v ponovni izravnavi. Zato lahko namesto primerjave natančnosti določitve koordinat stojišča pred in po optimizaciji primerjamo le koordinate stojišča pred in po optimizaciji, saj natančnosti določitve koordinat stojišča po optimizaciji nismo mogli izračunati. S primerjavo koordinat vidimo, da se ne razlikujejo veliko. Za 1 mm se razlikujeta y koordinati in H koordinati.

Preglednica 32: Primerjava koordinat stojišča

Neznanka	Izravnana vrednost	Diagonalna matrika kriterija
y_s	58749.982 m	58749.981 m
x_s	5858.527 m	5858.527 m
H_s	314.131 m	314.130 m

Iz uteži za diagonalno matriko kriterija v preglednici 31 smo poračunali tudi natančnosti opazovanj, ki jih prikazuje preglednica 33.

Preglednica 33: Natančnost opazovanj

Natančnost opazovanj	Tehnični podatki	P=I	Diagonalna matrika kriterija
			Druga optimizacija
σ_{s_1}	1"	1"	0°00'20"
σ_{s_2}	1"	1"	0°00'23"
σ_{s_3}	1"	1"	0°02'58"
σ_{d_1}	2.0 mm	1.0 mm	/
σ_{d_2}	2.0 mm	1.0 mm	2.0 mm
σ_{d_3}	2.0 mm	1.0 mm	/
σ_{z_1}	1"	1"	/
σ_{z_2}	1"	1"	0°00'37"
σ_{z_3}	1"	1"	/

Pri tem smo privzeli kot natančnost, ki smo jo zmožni zagotoviti, tisto, ki nam jo narekujejo tehnični podatki za instrument Leica TCRP1201 R300 iz preglednice 11 in sicer:

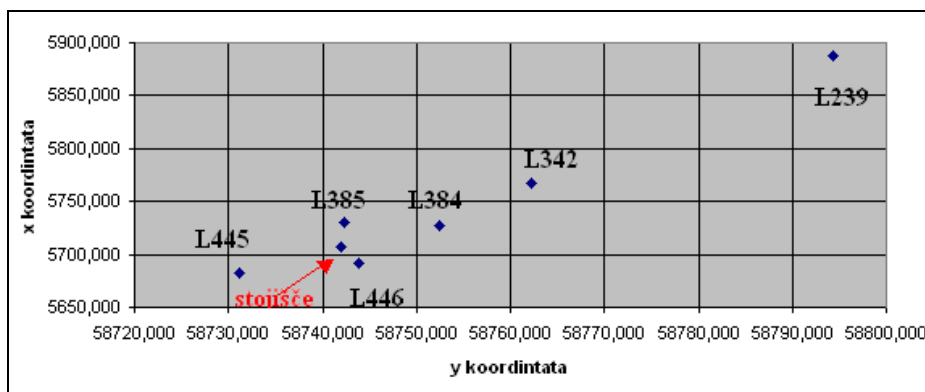
- Natančnost merjenja dolžin za reflektor: $\sigma_{d[mm]} = \sqrt{(2mm)^2 + (2 \cdot d_{[km]})^2}$
- Natančnost merjenja kotov: 1"

Natančnosti opazovanj pa smo izračunamo z izrazom $\sigma = \sqrt{\frac{k}{p}}$, pri čemer smo izbrali koeficient k takšen, da smo uskladili natančnost kotnih in dolžinskih opazovanj. Opazimo lahko, da natančnosti (standardne deviacije) opazovanj v primeru diagonalne matrike kriterija v praksi lahko zagotovimo, saj nam takšno natančnost zagotavlja uporabljen instrumentarij.

6. 5 Dodatni primer optimizacije opazovanj za glavni predor

6.5.1 Kreiranje kombinacij s tremi danimi točkami

Potem smo dodatno poskusili izvesti optimizacijo opazovanj še za glavni predor Šentvid. V glavnem predoru so se izvajale meritve iz stojišča na šest danih točk, na podlagi katerih smo kreirali kombinacije po tri dane točke. Iz šestih točk smo želeli izbrati takšno kombinacijo treh točk, ki bi zagotavljala najboljše rezultate natančnosti določitve stojišča. Spodnja slika prikazuje razporeditev šestih danih točk in stojišča v glavnem predoru Šentvid (opazovanja so bila izvedena s stojišča na točko 342, 384, 446, 445, 385 in na 239 v prvi krožni legi, v drugi krožni legi pa v nasprotnem vrstnem redu).



Slika 18: Razporeditev točk v glavnem predoru Šentvid

Preglednica 34: Koordinate točk v glavnem predoru

Točka	y [m]	x [m]	H [m]
L342	58762,222	5767,321	318.151
L384	58752,530	5727,126	316.391
L385	58742,295	5729,858	316.483
L239	58794,379	5887,432	310.427
L446	58743,919	5691,441	318.475
L455	58731,189	5682,310	320.796
stojišče	58742,035	5707,458	315,160

Preglednica 35: Opazovanja v glavnem predoru

Girus	Krožna lega	Točka	Horizontalna smer [dms]	Zenitna razdalja [dms]	Poševna dolžina [m]
1.	I	342	18.38250	87.17220	63.2500
	I	384	28.05220	86.50360	22.3330
	I	446	173.18260	78.23150	16.4600
	I	455	203.19250	78.22220	27.9560
	I	385	0.40520	86.37180	22.4450
	I	239	16.12590	91.26550	187.5010
	II	239	196.12590	268.33210	187.5010
	II	385	180.40540	273.23020	22.4450
	II	455	23.19380	281.37570	27.9560
	II	446	353.18190	281.37010	16.4600
	II	384	208.05150	273.09400	22.3320
	II	342	198.38260	272.42490	63.2510

Sestavili smo osem kombinacij po tri točke, za vsako kombinacijo s posredno izravnavo izračunali izravnane koordinate stojišča ter natančnost določitve stojišča. Pri tem smo se odločili, da kombinacije 4, 5 in 6 v nadaljevanju ne bomo optimirali, saj so si te kombinacije podobne s kombinacijami 1, 2 in 3, le točki desnega boka predora 385 in 455 sta zamenjani.

Preglednica 36: Začetne kombinacije v glavnem predoru

Kombinacija	Točke	Vizure
Kombinacija 1	385, 239, 342	Dolga vizura na 239, kratki na 385 in 342.
Kombinacija 2	385, 239, 384	Dolga vizura na 239, kratki na 385 in 384.
Kombinacija 3	385, 239, 446	Dolga vizura na 239, kratki na 385 in 446.
Kombinacija 4	455, 239, 342	Dolga vizura na 239, kratki na 455 in 342.
Kombinacija 5	455, 239, 384	Dolga vizura na 239, kratki na 455 in 384.
Kombinacija 6	455, 239, 446	Dolga vizura na 239, kratki na 455 in 446.
Kombinacija 7	385, 342, 384	Kratke vizure na 385, 342 in 384.
Kombinacija 8	385, 342, 446	Kratke vizure na 385, 342 in 446.

Kombinacijo 1, 2, 3, 7 in 8 smo nato optimirali s prvo optimizacijo. Na podlagi izkušnje zavrnitve globalnega testa modela v primeru uporabe enotske matrike kriterija v raziskovalnem rovu smo se odločili, da bomo optimizacijo za glavni predor izvajali le z diagonalno matriko kriterija. Tako smo za kombinacijo 1 po prvi optimizaciji dobili podoben primer, kot za raziskovalni rov, kjer smo zaradi pet negativnih uteži opazovanj s_1 , d_1 , d_3 , z_1 in z_3 dobili število nadštevilnih opazovanj enako nič, zato za kombinacijo 1 ni bilo možno izračunati natančnost določitve stojišča. Za kombinacijo 2 smo dobili negativno utež

opazovanja d_3 . Pri kombinaciji 3 in 8 so bile po prvi optimizaciji vse uteži opazovanj pozitivne. Pri kombinaciji 7 pa smo dobili dve negativni uteži opazovanj d_1 in z_1 . V nadaljnje izračune smo vzeli samo še kombinacije 2, 3 in 8.

6.5.2 Rezultati kombinacij 2, 3 in 8

Preglednica 37: Rezultati kombinacije 2

Kombinacija 2 384 (točka 1) 385 (točka 2) 239 (točka 3)		P=I	Diagonalna matrika kriterija	
			Prva optimizacija	Druga optimizacija
Optimizirane uteži	p_{s_1}	1	327155336.969	261583105.546
	p_{s_2}	1	314396863.871	246908402.270
	p_{s_3}	1	1299798192.324	1332690492.991
	p_{d_1}	1	495682.639	497160.849
	p_{d_2}	1	499196.377	501754.618
	p_{d_3}	1	-11191.684	/
	p_{z_1}	1	248583405.314	247929093.667
	p_{z_2}	1	252464495.192	252744368.650
	p_{z_3}	1	352505.6134	26179655.065
Natančnost določitve stojišča	σ_{y_s} [mm]	3.27	0.78	0.72
	σ_{x_s} [mm]	1.17	0.77	0.72
	σ_{H_s} [mm]	12.27	0.78	0.72
Helmertov elipsoid pogreškov	A [mm]	3.37	0.78	0.72
	B [mm]	0.67	0.77	0.72
	C [mm]	12.28	0.78	0.72
Globalni test modela	Interval zaupanja	[0.1662, 2.56]	[0.121, 2.775]	[0.121, 2.775]
	Test	$1.29 \cdot 10^{-6}$	0.603	0.513
	Zavrnitev	DA	NE	NE

Preglednica 38: Rezultati kombinacije 3

Kombinacija 3 446 (točka 1) 385 (točka 2) 239 (točka 3)	P=I	Diagonalna matrika kriterija		
		Prva optimizacija	Druga optimizacija	
Optimizirane uteži	p_{s_1}	1	207392121.454	NI
	p_{s_2}	1	127853979.892	NI
	p_{s_3}	1	8707317.471	NI
	p_{d_1}	1	610365.880	NI
	p_{d_2}	1	391949.923	NI
	p_{d_3}	1	1778.317	NI
	p_{z_1}	1	165343578.013	NI
	p_{z_2}	1	196326228.504	NI
	p_{z_3}	1	6135037.757	NI
Natančnost določitve stojišča	σ_{y_s} [mm]	2.46	0.89	NI
	σ_{x_s} [mm]	0.05	0.89	NI
	σ_{H_s} [mm]	3.57	0.89	NI
Helmertov elipsoid pogreškov	A [mm]	3.82	0.89	NI
	B [mm]	0.39	0.89	NI
	C [mm]	2.08	0.89	NI
Globalni test modela	Interval zaupanja	[0.1662, 2.56]	[0.1662, 2.56]	NI
	Test	$4.26 \cdot 10^{-7}$	0.790	NI
	Zavrnitev	DA	NE	NI

Preglednica 39: Rezultati kombinacije 8

Kombinacija 8 342 (točka 1) 446 (točka 2) 385 (točka 3)		P=I	Diagonalna matrika kriterija	
			Prva optimizacija	Druga optimizacija
Optimizirane uteži	p_{s_1}	1	828454.712	NI
	p_{s_2}	1	189839775.768	NI
	p_{s_3}	1	139349762.150	NI
	p_{d_1}	1	12507.638	NI
	p_{d_2}	1	574860.524	NI
	p_{d_3}	1	418246.521	NI
	p_{z_1}	1	60136388.733	NI
	p_{z_2}	1	155440561.003	NI
	p_{z_3}	1	207213945.693	NI
Natančnost določitve stojišča	σ_{y_s} [mm]	0.38	0.62	NI
	σ_{x_s} [mm]	0.07	0.62	NI
	σ_{H_s} [mm]	0.56	0.62	NI
Helmertov elipsoid pogreškov	A [mm]	0.62	0.62	NI
	B [mm]	0.06	0.62	NI
	C [mm]	0.27	0.62	NI
Globalni test modela	Interval zaupanja	[0.166,2.56]	[0.166, 2.56]	NI
	Test	$9.31 \cdot 10^{-9}$	0.385	NI
	Sprejetje	NE	DA	NI

Komentar rezultatov kombinacij:

Radija krogle stojišča za kombinacijo 2 je 0.78 mm, za kombinacijo 3 meri 0.89 mm in za kombinacijo 8 meri 0.62 mm. Iz velikosti radijev lahko ugotovimo, da je kombinacija 8 tista kombinacija treh točk, ki zagotavlja največjo natančnost določitve stojišča. Rezultat za radij krogle pri kombinaciji 2 pa potrjuje namen pridobitve čim boljše natančnosti določitve stojišča z optimizacijo, saj pri drugi optimizaciji dobimo manjši radij krogle (0.72 mm) kot pa po prvi optimizaciji (0.78 mm).

Glede na velikost uteži opazovanj so rezultati kombinacij glavnega predora podobni rezultatom raziskovalnega rova. Izkaže se namreč, da so tudi pri glavnem predoru uteži kotnih opazovanj večje kot pa uteži dolžinskih opazovanj.

Če pogledamo rezultate po prvi optimizaciji, kjer še nastopata kombinaciji 1 in 7, lahko ugotovimo, da kombinacija 1 izloči opazovanja (jim pridela negativne uteži), ki se nanašajo na točke, ki so bolj stran od stojišča (opazovanja na točki 239 in 342). Medtem ko opazovanja na stojišču bližnjo točko 385 ne izloči. Podobno se zgodi pri kombinaciji 2, kjer zopet izloči opazovanje na od stojišča najbolj oddaljeno točko 239. In ravno tako kombinacija 7 izloči opazovanja na od stojišča najbolj oddaljeno točko, ki jo v kombinaciji 7 predstavlja točka 342. Iz tega lahko podobno kot pri raziskovalnem rovu zaključimo, da so opazovanja na točke blizu stojišča bolj pomembna, kot pa opazovanja na točke daleč stran od stojišča.

Dodatno komentirajmo izvajanje geodetskih meritev v praksi. Od izvajalca geodetskih meritev smo izvedeli, da pri določanju prostega stojišča uporabijo horizontalne smeri, poševne dolžine in zenitne razdalje na bližnje točke, na oddaljeno pa točko pa uporabijo le horizontalno smer. Naši izračuni potrjujejo »pravilo« iz prakse.

Preglednica 40: Izločevanje opazovanj

Kombinacija	Točke	Negativne uteži	
		Prva optimizacija	Druga optimizacija
Kombinacija 1	342 (točka 1) 385 (točka 2) 239 (točka 3)	s_1, d_1, d_3, z_1 in z_3	Ne nastopa
Kombinacija 2	384 (točka 1) 385 (točka 2) 239 (točka 3)	d_3	Vse uteži opazovanj pozitivne
Kombinacija 3	446 (točka 1) 385 (točka 2) 239 (točka 3)	Vse uteži opazovanj pozitivne	NI
Kombinacija 7	342 (točka 1) 384 (točka 2) 385 (točka 3)	d_1 in z_1	Ne nastopa
Kombinacija 8	342 (točka 1) 446 (točka 2) 385 (točka 3)	Vse uteži opazovanj pozitivne	NI

Na koncu analize ugotavljamo, da smo dobili logične rezultate. Pogrešek dolge dolžine je zaradi težavnih atmosferskih razmer večji kot je pogrešek krajše dolžine. Pogrešek višinske razlike, ki jo izračunamo po enačbah trigonometričnega višinomerstva, je zaradi vertikalne refrakcije in težavnih atmosferskih razmer večji pri daljših dolžinah kot pri krajših. Pogrešek opazovanih smeri pa je zaradi pogreška viziranja (horizontalna refrakcija je zanemarljiva) manjši pri daljših vizurah kot pri krajših.

Iz preglednice 41 opazimo, da lahko z razpoložljivim instrumentarijem zagotovimo tudi natančnost opazovanj v glavnem predoru, saj iz optimiranih uteži izračunane natančnosti opazovanj niso manjše od natančnosti, izračunane na podlagi tehničnih podatkov.

Preglednica 41: Natančnosti opazovanj za kombinacijo 2, 3 in 8.

Natančnost opazovanj	Tehnični podatki	P=I	Kombinacija 2	Kombinacija 3	Kombinacija 8
			Druga optimizacija	Prva optimizacija	Prva optimizacija
σ_{s_1}	1"	1"	0°00'18"	0°00'18"	0°04'18"
σ_{s_2}	1"	1"	0°00'19"	0°00'22"	0°00'17"
σ_{s_3}	1"	1"	0°00'08"	0°01'26"	0°00'20"
σ_{d_1}	2.0 mm	1.0 mm	2 mm	2 mm	10 mm
σ_{d_2}	2.0 mm	1.0 mm	2 mm	2 mm	2 mm
σ_{d_3}	2.0 mm	1.0 mm	/	29 mm	2 mm
σ_{z_1}	1"	1"	0°00'18"	0°00'20"	0°00'30"
σ_{z_2}	1"	1"	0°00'18"	0°00'18"	0°00'19"
σ_{z_3}	1"	1"	0°00'57"	0°01'42"	0°00'16"

7 ZAKLJUČEK

Kar nekaj let je bila izgradnja odseka Šentvid – Koseze trd oreh za projektante. Izgradnja odseka je bila prometno potrebna in upravičena, vendar je obstajal dvom, da bo odsek v predoru tehnično neizvedljiv in stroškovno neupravičen. Da bi se prepričali o izvedljivosti izgradnje predora, so v predoru izvedli raziskovalni rov, ki je pomagal pri ugotovitvi geološko geomehanskih razmer v predoru.

Predčasno izkopani raziskovalni rov je sprva služil za pridobivanje podatkov o lokalnih tektonskih conah, geologiji, vplivih vode in drugih podatkov, nato pa še za geodetske in druge meritve pri spremljanju vpliva odkopavanja na hribino pred čelom glavnega predora. V raziskovalnem rovu se tako vrši geološka in geotehnična spremljava, s pomočjo katerih pridobimo podatke za kasnejšo izgradnjo glavnega predora.

Z geološko spremljavo in nadaljnjo klasifikacijo kamnin po GSI indeksu, RMR in ÖNORM klasifikaciji je bilo ugotovljeno, da so geološke razmere za gradnjo predora zelo neugodne, saj je bilo le malo govora o trdnih in nosilnih kamninah in o stabilnih hribinskih pogojih. Neugodna geologija vpliva tudi na geotehnične pogoje gradnje. Zato so se pri izbiri metode gradnje raziskovalnega rova in glavnega predora odločili za Novo avstrijsko metodo gradnje podzemnih objektov NATM, ki omogoča prilagodljivo gradnjo v zahtevnih geotehničnih pogojih.

Geotehnična spremljava v raziskovalnem rovu predora Šentvid je bila med drugim izvedena tudi z geodetskimi opazovanji z namenom ugotavljanja prostorskih premikov kontrolnih (detajlnih) točk v rovu zaradi vpliva gradnje glavnega predora Šentvid na sam raziskovalni rov. Na podlagi dobljenih rezultatov o premikih kontrolnih točk v raziskovalnem rovu se graditelji odločijo za optimalno podpiranje hribine pri gradnji glavnega predora Šentvid. Geodetske meritve so tako sestavni del NATM. Geodetske meritve izvedemo po stabilizaciji detajlnih točk, stojišča in danih točk v oblogo raziskovalnega rova, hkrati pa moramo imeti pred izvedbo meritev pripravljen časovni interval ponovitve meritev, instrumentarij z dodatno opremo in metodo izmere. Elektronski tahimeter Leica TCRP1201 R300 je s konzole brez

prisotnosti operaterja sam ponavljal geodetske meritve vsako uro z merjenjem horizontalnih smeri, zenitnih razdalj in poševnih dolžin na tri dane in nato še na detajlne točke. Po opravljenih opazovanjih je sledila obdelava geodetskih meritev v pisarni, kjer se dobijo rezultati premikov kontrolnih (detajlnih) točk. Na podlagi premikov kontrolnih točk se določijo dejanske deformacije v oblogi raziskovalnega rova. Na podlagi dejanskih deformacij, ki morajo biti seveda manjše od dopustnih deformacij, se dimenzionirajo podporni elementi za optimalno podpiranje hribine pri gradnji glavnega predora Šentvid. Da bi dobili čimbolj optimalne premike in s tem dejanske deformacije v raziskovalnem rovu, je pomembno, da tudi položaj stojišča instrumenta določimo optimalno natančno.

Izračun koordinat stojišča se je računal z metodo prostorskega notranjega ureza z izravnavo nadštevilnih opazovanj. V posredni izravnavi smo sprva izbrali za vsako opazovanje utež enako ena. Cilj naloge pa je bil v nadaljevanju najti takšne uteži opazovanj, ki bodo v ponovni izravnavi podale natančnost določitve stojišča takšno, da bo elipsoid pogreškov stojišča krogla, ki zagotavlja homogeno izotropno strukturo mreže. Če smo želeli izračunati optimalne uteži opazovanj, smo morali izvesti optimizacijo drugega reda. Ena izmed metod optimizacije drugega reda, katero smo tudi uporabili v tej diplomski nalogi, je metoda direktne rešitve. Za izračun uteži opazovanj po tej metodi potrebujemo matriko kriterija. V nalogi smo najprej optimizacijo izvedli z enotsko matriko kriterija, nato pa samo še z diagonalno matriko kriterija. Pri kreiranju enotske matrike kriterija smo izhajali iz predpostavke, da je grobi približek, ki izpolnjuje zahteve o homogeni in izotropni strukturi mreže, matrika kriterija oblike $\mathbf{C}_x = \sigma^2 \mathbf{I}$. Varianco vseh koordinat točk v mreži σ^2 smo nastavili na ena in s tem pridobili enotsko matriko kriterija. Vendar taka oblika matrike kriterija ne ustreza realnosti, ker zanemara vedno prisotno korelacijo med koordinatami točk. Ker pa smo imeli neznan le stojiščno točko, korelacija z drugimi točkami v enotski matriki kriterija ne nastopa, saj so bile preostale tri točke dane. Korelacija bi nastopala, če bi poleg stojišča iskali koordinate še kakšni drugi neznani točki. Ob spoznanju, da pri uporabi enotske matrike kriterija vedno zavrnamo globalni test modela, smo v nadaljevanju uporabljali v izračunih samo še diagonalno matriko kriterija. Pri kreiranju diagonalne matrike kriterija smo izhajali iz matrike kriterija, ki ima Taylor – Karmanovo strukturo. Taylor – Karmanovo strukturo matrike kriterija smo poenostavili s predpostavko, da dve točki, ki ju po teoriji potrebujemo za

kreiranje takšne matrike, sovpadata in s tem pridelali le eno točko. Takšno predpostavko smo bili prisiljeni izbrati, saj smo imeli na voljo le eno neznano točko stojišča. Pri diagonalni matriki kriterija smo upoštevali varianco ocenjenih koordinat mreže, ki za naš primer znaša 1 mm^2 .

Rezultati optimizacije z direktno metodo rešitve za raziskovalni rov so z uporabo enotske, kakor tudi z uporabo diagonalne matrike kriterija, zagotovili, da je Helmertov elipsoid pogreškov postal krogla in s tem je bil cilj naše naloge dosežen. Z optimizacijo smo prišli do pomembnih dveh zaključkov: uteži kotnih opazovanj so pri meritvah v raziskovalnem rovu večje kot uteži dolžinskih in opazovanja na dane točke blizu stojišča so bolj pomembna, kot pa opazovanja na dane točke daleč stran od stojišča. Ob vprašanju, katera od uporabljenih matrik kriterija je bolj realna in bolj uporabna v optimizaciji, se sklicujemo na globalni test modela. Pri enotski matriki kriterija globalni test nikoli ni sprejet, zato enotsko matriko označimo kot nerealno in jo ne uporabljamo v nadaljnjih izračunih. Pri diagonalni matriki kriterija pa je globalni test modela vedno sprejet. Pri rezultatih optimizacije za raziskovalni rov smo naleteli na nepričakovan, vendar logičen rezultat, da je za eno neznano točko najbolj optimalen rezultat uteži takrat, ko imamo toliko meritev, kolikor jih je tudi nujno potrebnih. Skratka z optimizacijo izločamo opazovanja toliko časa, dokler število opazovanj, ki nam še ostanejo po izločanju, ni enako število nujno potrebnih opazovanj. Takrat nimamo več nadštevilnih opazovanj. Izkazalo se je tudi, da imamo na voljo dovolj precizen instrument, da lahko natančnosti opazovanj, izračunane iz optimiranih uteži opazovanj, zagotovimo na terenu.

Nato smo dodatno izvedli še poskus optimizacije za glavni predor Šentvid. Razlika med izračunom optimizacije za raziskovalni rov in za glavni predor je bila samo ta, da smo pri glavnem predoru morali izbrati najboljšo kombinacijo treh točk izmed šestih, ki bo zagotovila najboljšo možno natančnost stojišča. Zato smo imeli pri iskanju najboljših možnih kombinacij malo več dela kot pri raziskovalnem rovu, kjer smo imeli kombinacijo treh točk določeno že na začetku. Rezultati optimizacije in ugotovitve so podobni rezultatom in ugotovitvam pri raziskovalnem rovu.

Do sedaj so bili v Sloveniji zabeleženi trije predori, katerih gradnja je potekala v izredno zahtevnih pogojih. Mednje umeščamo predor Golovec, predor V Zideh in predor Trojane. K skupini se bo priključil tudi predor Šentvid in v prihodnosti še nekaj sedaj še nezgrajenih predorov, katerih geološki in geotehnični pogoji so že sedaj ocenjeni za slabe (npr. predor Barnica in Tabor na odseku Razdrto – Vipava, predor Vodole na odseku Slivnica - Pesnica). Geodetske meritve so bile pomemben del pri vseh zgoraj omenjenih že zgrajenih predorih in bodo pomemben del pri gradnji predorov tudi v prihodnosti, saj lahko imajo na hitrost gradnje velik vpliv. Kakršenkoli bo že ta vpliv pri gradnji predora Šentvid, bo odsek Šentvid – Koseze v primeru, da bodo dela potekala v skladu s predvidenim planom, konec leta 2007 še en na novo izgrajen in pomemben del avtocestnega omrežja Slovenije. Njegova izgradnja bo povezala gorenjski avtocestni krak z ljubljanskim cestnim obročem, kar bo razbremenilo sedaj zelo obremenjeno Celovško cesto. S tem bo avtocesta A2, ki z drugimi evropskimi cestami v transevropski prometni mreži TEN sestavlja X. panevropski koridor, pridobila pomemben avtocestni odsek, ki bo hkrati z razbremenitvijo Celovške ceste omogočil tudi povezovanje Slovenije v evropski prostor.

VIRI

Avtoceste in hitre ceste. 2006. Ljubljana, Družba za avtoceste v Republiki Sloveniji (DARS).

<http://www.dars.si/index.php?id=40> (3. 7. 2006).

Bae, T. 2005. Optimized Network of Ground Stations for LEO Orbit Determination.

http://geodesy.eng.ohio-state.edu/GPSlab/ION_NT_M_2005_Bae.pdf#search=%22Optimized%20Network%20of%20Ground%20Stations%20for%20LEO%20Orbit%20Determination%22 (8.5.2006)

Fifer Bizjak, K. 2002. Geološke in geomehanske raziskave za predor Šentvid. 6. mednarodno posvetovanje o gradnji predorov in podzemnih prostorov. Ljubljana, Univerza v Ljubljani: 37 – 44 str.

HAW. Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg. 2006. Leica TCRP1201 R300.

http://www.haw-hamburg.de/geo/departement/inst/instrumentenkunde/leica_tcrp1201_beschr.htm (15.8.2006)

Hazan, T., Polak, S., Shashua, A. 2006. Sparse Image Coding using a 3D Non-negative Tensor Factorization.

<http://www.cs.huji.ac.il/~simonp/NTF-iccv05.pdf> (22. 5. 2006)

Hoek, E., Marinos, P., Benissi, M. 1998. Applicability of the geological strength index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses.

<http://users.ntua.gr/marinos/downloads/applicability.pdf> (21. 7. 2006)

Jemec, P. 2006. Vpliv raziskovalnega rova na gradnjo dvopasovnega predora Šentvid. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, FGG: 190 str.

Koler, B. 2005. Zapiski iz predavanj Geodezija v inženirstvu II. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, FGG.

Likar, J., Hann, D. 2002. Uporabnost dveh metod gradnje predorov v zahtevnih geotehničnih pogojih. 6. slovenski kongres o cestah in prometu. Portorož. Ljubljana, Družba za raziskave v cestni in prometni stroki Slovenije: 41 – 48/2 str.

Logar, J. 2006. Stabilnost vkopov v kamninah.

<http://www.fgg.uni->

[lj.si/KMTal/Gradiva%20za%20vec%20predmetov/Skripta%20Janko%20Logar/stabilnost%20%20v%20kamninah.pdf](http://www.fgg.uni-lj.si/KMTal/Gradiva%20za%20vec%20predmetov/Skripta%20Janko%20Logar/stabilnost%20%20v%20kamninah.pdf) (9.7.2006)

Marjetič, A., Ambrožič, T., Bogatin, S., Klopčič, J., Logar, J., Štimulak, A., Majes, B. 2006. Geodetske meritve v predoru Šentvid. Geodetski vestnik, 50/1.

Mihailović, K. 1981. Geodezija II. D. 1. Beograd. Univerzitet u Beogradu.

Ninkov, T. 1989. Optimizacija projektovanja geodetskih mreža. Beograd, Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet.

Sidiropoulos, N. 2002. Khatri – Rao produkt.

www.ftw.at/ftw/events/telekommunikationsforum/WS2002/WS02docs/021025.pdf (22. 5. 2006)

Stopar, B. 1995. Sanacija astrogeodetske mreže v Sloveniji z GPS meritvami. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, FGG: 132 str.

Stopar, B. 2005. Zapiski iz predavanj in vaj Izravnalni račun III. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, FGG.

Teke, K., Yalçınkaya, M. 2005. Survey schedule optimization of GPS networks with criterion matrices.

http://www.hkmo.org.tr/resimler/etkinlikbildirileri/118_ek.pdf#search=%22Yal%C3%A7%C4%B1nkaya%2C%20Survey%20schedule%20optimization%20of%20GPS%20networks%20%22 (22. 5. 2006)

Uradni list RS. 2005. Uredba o tehničnih normativih in pogojih za projektiranje cestnih predorov v Republiki Sloveniji.

<http://www.uradni-list.si/1/ulonline.jsp?urlid=200648&dhid=82561> (28.6.2006)

US Department of Transportation. Eastern Federal Lands Highway Division (EFHLD). 2006. Exploring the inner mountain.

<http://www.efl.fhwa.dot.gov/projects/cumgap/tunnel.htm> (14. 7. 2006)

Wikipedija, prosta enciklopedija. 2006. Slovensko avtocestno omrežje.

<http://sl.wikipedia.org/wiki/Avtocesta> (3. 7. 2006).

Wolf, H. 1994. Ausgleichungsrechnung I. Bonn: Ferd. Dümmlers Verlag.

Žigon, A., Žibret, M., Jemec, P. 2004. Projektiranje predorskega sistema Šentvid.

http://www.neuron.at/KoD_MaS_KrD_article.pdf (12. 6. 2006)