

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 Gradbeništvo,
Konstrukcijska smer

Kandidat:

Jernej Markovič

Numerično modeliranje gradnje predorov v anizotropnih mehkih skrilavih kamninah

Diplomska naloga št.: 3054

Mentor:

izr. prof. dr. Janko Logar

Somentor:

asist. dr. Jure Klopčič

Ljubljana, 31. 3. 2009

STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisani JERNEJ MARKOVIČ izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom
»NUMERIČNO MODELIRANJE GRADNJE PREDOROV V ANIZOTROPNIH MEHKIH
SKRILAVIH KAMNINAH«

Izjavljam, da se odpovedujem vsem materialnim pravicam iz dela za potrebe elektronske
separatoteke FGG.

Ljubljana, 10.03.09

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN Z IZVLEČKOM

- UDK:** 519.61/.64:624.19(043.2)
- Avtor:** Jernej Markovič
- Mentor:** doc. dr. Janko Logar, univ.dipl.inž.grad.
- Somentor:** Jure Klopčič, univ.dipl.inž.grad.
- Naslov:** Numerično modeliranje gradnje predorov v anizotropnih mehkih skrilavih kamninah
- Obseg in oprema:** 85 str., 17pregl., 63 slik, 12 en.
- Ključne besede:** anizotropija, mehke skrilave kamnine, konstitutivni materialni model, strižni modul

Izvleček:

V diplomski nalogi je obravnavan vpliv anizotropije tal v mehkih skrilavih kamninah, kjer zaradi gradnje predora pride do spremembe napetostnega stanja in posledično do spremembe deformacij. Problem smo numerično reševali s programom Plaxis 2D, kjer smo uporabili različne konstitutivne materialne modele, s katerimi definiramo odziv temeljnih tal. Izvedli smo parametrično analizo, da smo lahko spoznali, kako posamezni parameter vpliva na obnašanje hribinske mase med gradnjo predora. Analiza je bila razdeljena na dva dela. V prvem delu smo izvedli analizo vpliva gradnje predora v anizotropnih mehkih skrilavih kamninah na pomike na površju nad predorsko cevjo, v drugem pa analizo vpliva na pomike v predorski cevi. Na podlagi tega smo ugotovili, da se lahko z uporabo anizotropnega materialnega modela, z nizkim strižnim modulom materiala vzdolž skrilavosti zelo dobro približamo dejanskemu odzivu hribinske mase. V nadaljevanju smo v povratni analizi obravnavali tri primere predorov: Šentvid, Trojane in Golovec. Ugotovili smo, da je na eni strani uporaba nizkega strižnega modula za predora Šentvid in Golovec v anizotropnem materialnem modelu, v programu Plaxis 2D primerna in dobra v primerjavi z meritvami. Na drugi strani pa za predor Trojane velja uporabiti višji strižni modul in nekoliko nižje elastične

module hribine, da pridemo do podobnih rezultatov, kot so jih dobili z meritvami. Na ta način smo poskušali prikazati uporabo anizotropnega materialnega modela v praksi, kjer bi bilo potrebno predhodno opraviti laboratorijske preiskave mehanskih lastnosti kamnine med ploskvicami – strižna togost vzdolž skrilavosti.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC: 519.61/.64:624.19(043.2)

Author: Jernej Markovič

Supervisor: prof. dr. Janko Logar, univ.dipl.ing.grad.

Assist. Supervisor: Jure Klopčič, univ.dipl.ing.grad.

Title: Numerical modelling of tunnel construction in anisotropic foliated soft rock

Notes: 85 p., 17 tab., 63 fig. 12 eq.

Key words: anisotropy, foliated soft rock mass, constitutive material model, shear module

Abstract:

The present work focuses on the influence on tunnelling in the anisotropic foliated soft rock. The excavation initiates stress redistribution around an opening and thus causes the deformation to occur. The numerical problem of the tunnel excavation was modelled in the Plaxis 2D code using different soil constitutive models for modelling the rock mass behaviour. A parametric study was performed to obtain the model response to alteration of the rock mass parameters. The analysis was divided into two parts. An influence of the excavation of the tunnel in the anisotropic foliated soft rock on the deformation of the surface above the tunnel was studied in the first part. Further on the influence of the foliation on the deformation pattern of the tunnel circumference was analysed. The results indicated that the anisotropic material model with low shear stiffness along foliated soft rock is closed to the actual response of rock mass. Using results from parametric study different cases from the three recently constructed tunnels (Šentvid, Trojane and Golovec) in the foliated soft rock were analysed. Calculation results with obtained low shear stiffness parameter match the measured response in case of the Šentvid tunnel and Golovec tunnel. Not the same parameters gave match for the Trojane tunnel, where a higher shear modulus and slightly lower elastic

modulus of rock mass needed to be applied. According to back analyses results we can conclude that the use of anisotropic material model in calculation of the underground structures in soft, anisotropic rock mass gives appropriate results.

ZAHVALA

Za pomoč in potrpežljivost pri izdelavi diplomske naloge se iskreno zahvaljujem mentorju doc. dr. Janku Logarju, univ.dipl.ing.grad. in somentorju Juretu Klopčiču, univ.dipl.ing.grad.

Prav tako se zahvaljujem sošolcem, zaradi katerih je bil študij bolj zanimiv.

Nazadnje bi se rad zahvalil svoji ženi Ani in njeni ter moji družini, ki so me vseskozi podpirali in vzpodbujali.

KAZALO VSEBINE

STRAN ZA POPRAVKE	I
IZJAVA O AVTORSTVU.....	II
BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN Z IZVLEČKOM	III
BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION	V
ZAHVALA.....	VII
KAZALO VSEBINE.....	VIII
KAZALO PREGLEDNIC.....	X
1 UVOD.....	1
2 TEORETSKE OSNOVE	3
2.1 Metoda kontinuiranega prostora in metoda diskontinuiranega prostora	4
2.2 Anizotropija.....	5
2.3 Materialni modeli temeljnih tal	6
3 PLAXIS	7
3.1 Linearno elastičen model (Linear Elastic)	7
3.2 Mohr – Coulombov model (MC)	9
3.2.1 Parametri	10
3.3 Hardening – Soil model	14
3.3.1 Parametri	17
3.4 Jointed Rock model.....	19
3.4.1 Parametri	21
4 OSNOVNE LASTNOSTI PREDOROV ŠENTVID, TROJANE IN GOLOVEC	26
4.1 Gradnja predorov	26
4.2 Geomehanski opis hribin.....	26

4.3 Podatki o predoru Šentvid	28
4.3.1 Karakterističen geološki profil	28
4.4 Podatki o predoru Trojane	29
4.4.1 Karakterističen geološki profil	29
4.5 Podatki o predoru Golovec	30
4.5.1 Karakterističen geološki profil	30
5 NUMERIČNE ANALIZE	31
5.1 Podatki	31
5.2 Parametrična analiza	36
5.2.1 Pomiki na površju nad predorsko cevjo	36
5.2.2 Pomiki v predorski cevi	48
5.3 Povratne analize	61
5.3.1 Pomiki v predorski cevi	61
5.3.1.1 Predor Šentvid	61
5.3.1.2 Predor Trojane	64
5.3.2 Pomiki na površju nad predorsko cevjo	72
5.3.2.1 Predor Trojane	72
5.3.2.2 Predor Golovec	77
6 ZAKLJUČEK	81
VIRI	83

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Geomehanski podatki za dvopasovni predor Šentvid (Petkovšek in sod., 2000)	27
Preglednica 2: Geomehanski podatki za dvopasovni predor Trojane (Likar, 2004b)	27
Preglednica 3: Geomehanski podatki za dvopasovni predor Golovec (Logar, 1996)	27
Preglednica 4: Geometrijski podatki za dvopasovni predor	33
Preglednica 5: Modelirane faze gradnje	35
Preglednica 6: Geomehanske karakteristike Jointed Rock materialnega konstitutivnega modela za RMT1	37
Preglednica 7: Izhodišči geomehanski podatki za Hardening Soil materialni model za material RMT1	46
Preglednica 8: Geomehanske karakteristike Jointed Rock materialnega modela (RMT1) za predor Šentvid	61
Preglednica 9: Geomehanske karakteristike Jointed Rock materialnega modela za profil A predora Trojane	66
Preglednica 10: Končne geomehanske karakteristike Jointed Rock materialnega modela za profil A predora Trojane	67
Preglednica 11: Geomehanske karakteristike Jointed Rock materialnega modela za profil B predora Trojane	69
Preglednica 12: : Končne geomehanske karakteristike Jointed Rock materialnega modela za profil B predora Trojane	71
Preglednica 13: Geomehanske karakteristike za JR materialni model	74
Preglednica 14: Geomehanske karakteristike za JR materialni model predora Trojane	75
Preglednica 15: Geomehanske karakteristike za Jointed Rock materialni model	78
Preglednica 16: Geomehanske karakteristike za Hardening Soil materialni model	78
Preglednica 17: Geomehanske karakteristike za Jointed Rock materialni model (Klopčič in sod., 2007a)	79

KAZALO SLIK

Slika 1: Vzorec glinastega skrila- vca, vzet iz širšega območja trojanskega odseka na avtocesti Ljubljana – Maribor (Trajanova, Mladenovič, 2006)	5
Slika 2: Mohr – Coulombov kriterij porušitve (Brinkgreve, 2002)	9
Slika 3: Mohrov kriterij porušitve v prostoru ($c = 0$) (Brinkgreve, 2002)	10
Slika 4: Definicija E_0 in E_{50} iz standardnega dreniranega triosnega preizkusa (Brinkgreve, 2002)	11
Slika 5: Definicija kota razmikanja ψ (Brinkgreve, 2002)	12
Slika 6: Ploskve popuščanja v prostoru glavnih napetosti, pri Hardening – Soil modelu (Brinkgreve, 2002)	15
Slika 7: Hiperbolična napetostno – deformacijska odvisnost pri primarni obremenitvi standardnega dreniranega triosnega preizkusa (Brinkgreve, 2002)	16
Slika 8: Definicija edometriškega deformacijskega modula E_{oedref} (Brinkgreve, 2002)	18
Slika 9: Vizualizacija koncepta na katerem temelji Jointed Rock model (Brinkgreve, 2002)	20
Slika 10: Definicija kota in smeri vpada (Brinkgreve, 2002)	23
Slika 11: Definicija deklinacije (Brinkgreve, 2002)	24
Slika 12: Primeri ravnine drsenja za α_1, α_2 in deklinacijo (Brinkgreve, 2002)	25
Slika 13: Karakterističen geološki prerez dvopasovnega predora Šentvid	28
Slika 14: Karakterističen geološki prerez predora Trojane	29
Slika 15: Karakterističen geološki prerez predora Golovec	30
Slika 16: Geometrija izkopa v hribinski masi kategorije C3 dvopasovnega predora Šentvid	32
Slika 17: Geometrijski elementi za dvopasovni predor	33
Slika 18: Numerični model predora za parametrično analizo v programu Plaxis 2D	34
Slika 19: Diagram pomikov na površju nad predorsko cevjo za kot skrila- vosti $\alpha_1 = 0^\circ$	38
Slika 20: Diagram pomikov na površju nad predorsko cevjo za kot skrila- vosti $\alpha_1 = 90^\circ$	39
Slika 21: Diagram pomikov na površju nad predorsko cevjo za kot skrila- vosti $\alpha_1 = 30^\circ$	39
Slika 22: Diagram pomikov na površju nad predorsko cevjo za kot skrila- vosti $\alpha_1 = 60^\circ$	40
Slika 23: Diagram pomikov na površju nad predorsko cevjo za material RMT1 - A	41
Slika 24: Diagram pomikov na površju nad predorsko cevjo za material RMT1 – B	41
Slika 25: Diagram pomikov na površju nad predorsko cevjo za material RMT1 – C	42
Slika 26: Diagram pomikov na površju nad predorsko cevjo za material RMT1 – B, pri kotu skrila- vosti $\alpha_1 = 0^\circ$ za različne kote φ	43
Slika 27: Diagram pomikov na površju nad predorsko cevjo za material RMT1 – B, pri kotu skrila- vosti $\alpha_1 = 30^\circ$ za različne kote φ	43

Slika 28: Diagram pomikov na površju nad predorsko cevjo za material RMT1 – B, pri kotu skrjavosti $\alpha_1 = 30^\circ$ za različne vrednosti strižnega modula G_2	44
Slika 30: Diagram pomikov na površju nad predorsko cevjo za Hardening Soil materialni model za različne vrednosti kohezije c	47
Slika 29: Diagram pomikov na površju nad predorsko cevjo za Hardening Soil materialni model za različne vrednosti strižnega kota φ	47
Slika 31: Primerjava diagramov pomikov na površju nad predorsko cevjo za različne konstitutivne materialne modele	48
Slika 32: Prikaz merskih točk v cevi predora iz programa Plaxis 2D	49
Slika 33: Diagram pomikov v predorski cevi za kot slojevitosti $\alpha_1 = 0^\circ$ (razmerje geometrija : pomik = 1 : 25)	50
Slika 34: Diagram pomikov v predorski cevi za kot slojevitosti $\alpha_1 = 90^\circ$ (razmerje geometrija : pomik = 1 : 25)	50
Slika 35: Diagram pomikov v predorski cevi za kot slojevitosti $\alpha_1 = 30^\circ$ (razmerje geometrija : pomik = 1 : 25)	51
Slika 36: Diagram pomikov v predorski cevi za kot slojevitosti $\alpha_1 = 60^\circ$ (razmerje geometrija : pomik = 1 : 25)	52
Slika 37: Diagram pomikov v predorski cevi za strižni modul $G_2 = 10$ MPa (razmerje geometrija : pomik = 1 : 25)	53
Slika 38: Diagram pomikov v predorski cevi za strižni modul $G_2 = 20$ MPa (razmerje geometrija : pomik = 1 : 25)	53
Slika 39: Diagram pomikov v predorski cevi za strižni modul $G_2 = 50$ MPa (razmerje geometrija : pomik = 1 : 25)	54
Slika 40: Diagram pomikov v predorski cevi za elastični modul $E_1 = 60$ MPa in $E_2 = 30$ MPa (razmerje geometrija : pomik = 1 : 15)	55
Slika 41: Diagram pomikov v predorski cevi za strižni kot $\varphi = 20^\circ$ (razmerje geometrija : pomik = 1 : 25)	56
Slika 42: Diagram pomikov v predorski cevi za strižni kot $\varphi = 30^\circ$ (razmerje geometrija : pomik = 1 : 25)	56
Slika 43: Diagram pomikov v predorski cevi za kohezijo $c = 1000$ kPa (razmerje geometrija : pomik = 1 : 25)	57
Slika 44: Diagram pomikov v predorski cevi za Hardening Soil materialni model, kjer je kohezija $c = 50$ kPa in strižni kot $\varphi = 28^\circ$ (razmerje geometrija : pomik = 1 : 25)	58

Slika 45: Diagram pomikov v predorski cevi za Hardening Soil materialni model, kjer je kohezija $c = 70$ kPa in strižni kot $\varphi = 25^\circ$ (razmerje geometrija : pomik = 1 : 25)	59
Slika 46: Diagram pomikov v predorski cevi za Mohr – Coulombov materialni model, kjer je kohezija $c = 50$ kPa in strižni kot $\varphi = 28^\circ$ (razmerje geometrija : pomik = 1 : 25)	59
Slika 47: Diagram pomikov v predorski cevi za linearno elastični materialni model (Linear Elastic) (razmerje geometrija : pomik = 1 : 25)	60
Slika 48: Diagram primerjave med izračunanimi pomiki za Jointed Rock materialni model in merjenimi pomiki v cevi predora Šentvid (razmerje geometrija : pomik = 1 : 25)	62
Slika 49: Numerični model za predor Šentvid ob uporabi Hardening Soil modela pod predorom v Plaxis 2D	63
Slika 50: Diagram primerjave med izračunanimi pomiki za Jointed Rock materialni model v kombinaciji s Hardening Soil materialnim modelom in merjenimi pomiki v cevi predora Šentvid (razmerje geometrija : pomik = 1 : 25)	63
Slika 51: Prečna profila severne (Profil A) in južne (Profil B) cevi predora Trojane (Schubert in sod., 2005)	64
Slika 52: Numerični model profila A predora Trojane v programu Plaxis 2D	65
Slika 53: Diagram primerjave med izračunanimi pomiki za Jointed Rock materialni model in merjenimi pomiki v profilu A predora Trojane (razmerje geometrija : pomik = 1 :)	66
Slika 54: Diagram primerjave med izračunanimi pomiki za Jointed Rock materialni model in merjenimi pomiki v profilu A predora Trojane (razmerje geometrija : pomik = 1 : 25)	68
Slika 55: Numerični model profila B predora Trojane v programu Plaxis 2D	69
Slika 56: Diagram primerjave med izračunanimi pomiki za JR materialni model in merjenimi pomiki v profilu B predora Trojane(razmerje geometrija : pomik = 1 : 15)	70
Slika 57: Diagram primerjave med izračunanimi pomiki za Jointed Rock materialni model in merjenimi pomiki v profilu B predora Trojane(razmerje geometrija : pomik = 1 : 15)	71
Slika 58: Numerični model profila 80,250 km predora Trojane (Miklavžin, 2004)	73
Slika 59: Točke opazovanja na levi strani profila 80,250 km predora Trojane (Miklavžin, 2004)	74
Slika 60: Primerjava med izračunanimi in izmerjenimi pomiki v prečni smeri (U_x) za predor Trojane	76
Slika 61: Primerjava med izračunanimi in izmerjenimi pomiki v navpični smeri (U_y) za predor Trojane	77
Slika 62: Numerični model predora Golovec v programu Plaxis 2D	78
Slika 63: Diagram primerjave med izračunanim pomiki za Jointed Rock materialna modela (z uporabo ene in treh ravnin diskontinuitet) in merjenimi pomiki na površju nad predorom Golovec	80

1 UVOD

Vsak poseg v temeljna tla vpliva na spremembe napetostnega stanja. Te se odražajo kot spremembe deformacij. Kolikšna bo velikost deformacij, je odvisno predvsem od sestave in lastnosti temeljnih tal, načina gradnje, obtežb in velikosti posega v temeljna tla.

Gradnja predorov je eden izmed zahtevnih gradbenih posegov. Pogoji so toliko slabši, kadar poteka trasa predora skozi hribine, ki so pretežno sestavljene iz drobno skrilavih peščenjakov, meljevcev in glinavcev. Te so bile v svoji geološki zgodovini podvržene tektonskemu delovanju, zaradi katerega je hribinska masa nagubana in pregnetena, z več metrov debelimi tektonskimi conami. Hribinska masa je zelo nehomogena in anizotropna. Prav te lastnosti temeljnih tal so skupne predorom Šentvid, Trojane in Golovec, katere obravnavamo v diplomski nalogi.

Geodetske meritve, ki so bile izvedene v omenjenih predorih, so omogočale spremljanje odziva hribinske mase med gradnjo predora. Meritve so se izvajale tako znotraj predorske cevi, kot tudi na površju nad predorom. Zbrani in obdelani podatki meritev, ki so prikazali različne odzive hribin, saj se je hribinska masa enkrat pomikala vzdolž skrilavosti, drugič pravokotno nanjo, so služili kot povod za numerično analizo.

Naš glavni cilj je bil, narediti numerični model, ki se bo čim bolj približal dejanskemu obnašanju hribinske mase med gradnjo predora. Imeli smo na voljo različne konstitutivne materialne modele: linearno elastičen (Linear Elastic), Mohr – Coulombov, Hardening Soil in Jointed Rock model, s katerimi definiramo odziv temeljnih tal. Največ pozornosti smo posvetili anizotropnemu materialnemu modelu (Jointed Rock model), saj smo se na ta način lahko najbolj približali dejanskemu odzivu tal. Da pa smo do zelenega rezultata prišli, smo predhodno izvedli parametrično analizo z željo, da spoznamo kako posamezni parameter vpliva na obnašanje hribinske mase med gradnjo predora. Prav tako kot so bile meritve ločene

za površje in predor, smo tudi parametrično analizo izvedli ločeno: parametrično analizo vpliva na pomike na površju nad predorsko cevjo in vpliva na pomike v predorski cevi.

Na podlagi pridobljenega znanja smo se lotili numerične analize konkretnih primerov: predora Šentvid, Trojane in Golovec, z namenom, da bi v bodoče lahko na podlagi geoloških in geomehanskih raziskav, z uporabo numerične analize bolje napovedali obnašanje hribinske mase med gradnjo predorov.

2 TEORETSKE OSNOVE

V splošnem je skrilavost hribine poljubno orientirana v prostoru. Numerično reševanje problema gradnje predorov v skrilavi hribini nas bo v splošnem vodilo k uporabi analize v tridimenzionalnem prostoru. To pomeni uporabo računskega modela, ki obravnava prostorsko napetostno stanje. V prostorskem napetostnem stanju imamo 3 glavne napetosti oziroma normalne in 6 strižnih napetosti. Smeri dveh glavnih napetosti tvorita ravnino, ki je vzporedna skrilavosti hribine, tretja pa je nanjo pravokotna.

Primer anizotropnega obnašanja hribine pri gradnji predora lahko poenostavimo. Predpostavimo, da je ena izmed smeri glavnih napetosti, ki je vzporedna skrilavosti hribine, vzporedna z osjo predora. Vemo, da je dolžina predora veliko večja v primerjavi s premerom prečnega profila predora. To pomeni, da se večina sprememb napetostnega stanja zgodi pravokotno na os predora. Tako pogosto predpostavimo, da je deformacija, ki je vzporedna osi predora, enaka nič. Tako smo dobili ravninsko deformacijsko stanje. Ob taki predpostavki lahko rešujemo problem v dvodimenzionalnem prostoru.

Vendar je potrebno opozoriti, da se nezanemarljiv del deformacij tudi v smeri osi predora zgodi ravno v fazi izkopa predora (Klopčič in sod., 2006). Te zaradi narave računa v dvodimenzionalnem prostoru niso neposredno zajete. Zato je potrebno določiti delež spremembe napetosti v trenutku izkopa predora. To lahko zajamemo z določenim faktorjem, s katerim definiramo delež deformacij, ki se zgodi pred izkopom čela predora. Ta je določen empirično in po navadi znaša med 25 in 70 % celotnih deformacij (Klopčič in sod., 2007a).

2.1 Metoda kontinuiranega prostora in metoda diskontinuiranega prostora

Temeljna tla oziroma hribino z lastnostjo anizotropije je mogoče numerično opisati z metodo kontinuiranega prostora ali metodo diskontinuiranega prostora. V primeru metode kontinuiranega prostora se numerični model hribine (na primer sestavljen iz končnih elementov) obravnava kot celoto vključno z vsemi diskontinuitetami hribine. Velja zveza med napetostmi in deformacijami v okviru konstitutivnega materialnega zakona. V numeričnem modelu hribine, pri kateri je potrebno upoštevati lastnost anizotropije, je zajeta odvisnost konstitutivnega materialnega zakona od orientacije diskontinuitete, ne pa od velikosti diskontinuitete. Tako pri metodi kontinuiranega prostora v numeričnem modelu obnašanja hribinske mase zaradi različnih gradbenih posegov ne more priti do pojava tako imenovanih »praznih prostorov«, prav tako ne do relativnega zdrsa dveh enot hribine vzdolž diskontinuitete – deformacije so zvezne.

Pri metodi diskontinuiranega prostora je hribina sestavljena iz blokov. Ti so lahko deformabilni ali pa togi. Vezi med bloki so lahko take, da so ti med seboj povezani oziroma se dotikajo, ali pa niso povezani oziroma se ne dotikajo. Ko pride do spremembe napetostnega stanja, se ti bloki lahko drug od drugega odmaknejo ali pa se kontakti med njimi ponovno vzpostavijo. Vzdolž stikov lahko pride do medsebojnega premika (zdrsa) dveh blokov, ko je ob stiku presežena njegova strižna trdnost.

Odločitev, katera metoda je bolj primerna, je odvisno od vpliva diskontinuitet na obnašanje hribinske mase ob spremembi napetostnega stanja:

- Če je vpliv diskontinuitet na obnašanje hribine prevladujoč, je numerični model metodi diskontinuiranega prostora bolj primeren in realen.
- V nasprotnem primeru ko je vpliv diskontinuitet manjši, lahko uporabimo numerični model, opisan po metodi kontinuiranega prostora. Kot primer take hribine lahko navedemo glinasti skrilavec, prikazan na sliki 1 (Leitner, Pötsch, Schubert, 2006).



Slika 1: Vzorec glinastega skrilašca, vzet iz širšega območja trojanskega odseka na avtocesti Ljubljana – Maribor (Trajanova, Mladenovič, 2006)

2.2 Anizotropija

Gradnja podzemnih objektov je gradbeni poseg v temeljna tla oziroma hribino, ki povzroči spremembo napetostnega stanja in posledično spremembo deformacij. Napetostno stanje in deformacije so odvisne od fizikalnih lastnosti hribine. Kadar so le – te različne v posamezni smeri, pravimo tej lastnosti anizotropija.

Anizotropija je posledica plastnate strukture kamnine. Ta se lahko odraža kot plastovitost, razpokanost ali skrilašost, ki so posledica nastanka in geološke zgodovine posamezne kamninske gmote (sedimentacija, tektonika, metamorfni pojavi, itd.). Anizotropija pomembno vpliva na odziv hribinske mase in običajno vodi k manjši togosti oziroma k večji deformabilnosti hribine. Prav zaradi tega je v takih primerih to potrebno upoštevati pri projektiranju podzemnih objektov.

Kljub temu, da je bilo narejenih kar nekaj študij o obnašanju hribine z anizotropnimi lastnostmi, še vedno ni konkretnih smernic glede projektiranja gradnje podzemnih objektov v teh pogojih (Leitner, Pötsch, Schubert, 2006).

2.3 Materialni modeli temeljnih tal

V splošnem lahko deformacije gradbenih objektov izračunamo dokaj natančno, vendar je izračun odvisen od natančnosti pomikov temeljnih tal. Ta je odvisen od izbranega modela s katerim opišemo obnašanje temeljnih tal.

Temeljna tla so sestavljena iz različno debelih plasti zemljin oziroma hribin, ki se med seboj razlikujejo po deformabilnosti in trdnosti. Posamezna plast se pod različno veliko obtežbo lahko obnaša elastično, elasto – plastično ali plastično (Majes, 2008).

Materialni modeli temeljnih tal:

- Elastičen model: je model, ki se med delovanjem zunanje obtežbe deformira, vendar se po popolni razbremenitvi deformacije povrnejo v prvotno obliko in velikost. Primer elastičnega modela, ki se uporablja v programu Plaxis, je linearno elastičen model (Linear Elastic).
- Elasto – plastičen model: najpogostejši princip modela, kjer se po razbremenitvi del deformacij izgubi, del pa se jih ohrani. Primeri elasto – plastičnega modela, ki se uporabljajo v programu Plaxis, so: Mohr – Coulomb – ov model, Hardening – Soil model, Jointed Rock model, Soft – Soil model.
- Plastičen model: je model, pri katerem se tudi po popolni razbremenitvi ohrani deformirana oblika in velikost.

3 PLAXIS

Plaxis 2D, verzija 8.2, je komercialni programski paket za numerično reševanje problemov, predvsem v geomehaniki. Deluje po metodi končnih elementov. Numerični model gradnje podzemnih objektov oziroma predora lahko pripravimo na več načinov z izbiro različnih konstitutivnih materialnih modelov. V našem primeru smo uporabili štiri različne konstitutivne materialne model, in sicer linearno elastičen (Linear Elastic), Mohr – Coulombov, Hardening Soil in Jointed Rock konstitutivni model. V programu smo lahko upoštevali faznost gradnje, dejansko geometrijo predora in podpornih elementov. Geomehanske karakteristike hribinske mase smo določili na podlagi podatkov iz literature in že prej izvedenih povratnih analiz.

3.1 Linearno elastičen model (Linear Elastic)

V splošnem konstitutivni materialni modeli za zemljine, hribine ali kamnine temeljijo na zvezi med neskončno majhnim prirastkom efektivnih napetosti in neskončno majhnim prirastkom deformacije. Enačba, ki opisuje omenjeno zvezo, je:

$$\underline{\dot{\sigma}}' = \underline{\underline{M}} \underline{\dot{\epsilon}} \quad (1)$$

kjer je $\underline{\underline{M}}$ konstitutivna matrika za podani material. Potrebno je opozoriti, da zveza velja v primeru dreniranega stanja temeljnih tal oziroma za efektivne napetosti v tleh.

Najpreprostejši konstitutivni materialni model v programu Plaxis je linearno elastičen model (Linear Elastic - LE), katerega osnovo predstavlja Hookov zakon za izotropen material pri linearno elastičnem obnašanju. Hookov zakon je podan v obliki enačbe (2).

$$\begin{bmatrix} \dot{\sigma}'_{xx} \\ \dot{\sigma}'_{yy} \\ \dot{\sigma}'_{zz} \\ \dot{\sigma}'_{xy} \\ \dot{\sigma}'_{yz} \\ \dot{\sigma}'_{zx} \end{bmatrix} = \frac{E'}{(1-2\nu')(1+\nu')} \begin{bmatrix} 1-\nu' & \nu' & \nu' & 0 & 0 & 0 \\ \nu' & 1-\nu' & \nu' & 0 & 0 & 0 \\ \nu' & \nu' & 1-\nu' & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}-\nu' & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}-\nu' & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}-\nu' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\epsilon}_{xx} \\ \dot{\epsilon}_{yy} \\ \dot{\epsilon}_{zz} \\ \dot{\gamma}_{xy} \\ \dot{\gamma}_{yz} \\ \dot{\gamma}_{zx} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Oznaka za elastično togostno matriko je pogosto tudi $\underline{\underline{D}}^e$. V linearno elastičnem modelu (Linear Elastic) sta uporabljena dva parametra. Eden je elastični modul E , drugi pa efektivno Poissonovo število ν . Včasih se za simbola E in ν uporablja spodaj napisana oznaka ur , kar pomeni module, ki veljajo za razbremenitev in ponovno obremenitev temeljnih tal. Prav tako se lahko pojavi zgoraj napisana oznaka ref , kar predstavlja referenčno vrednost, ki se nanaša na izbrano referenčno napetostno stanje.

Zveza med elastičnim modulom E in ostalimi togostnimi parametri je:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (3)$$

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (4)$$

$$E_{eod} = \frac{(1-\nu)E}{(1-2\nu)(1+\nu)} \quad (5)$$

S podajanjem vrednosti enega od parov parametrov E in ν ali G in E_{eod} , Plaxis avtomatično izračuna vrednosti za drug par parametrov. Izračun vrednosti parametrov se izvrši po zvezah napisanih v enačbah (3) do (5).

Potrebno je opozoriti, da je za modeliranje tal, ki se obnašajo nelinearno, konstitutivni linearno elastičen materialni model (Linear Elastic) največkrat neprimeren. Namenjen je uporabi pri konstrukcijskih elementih kot so stene in plošče, pri katerih so togostni parametri veliko večji od zemljine in za katere praviloma v postopku dimenzioniranja zagotovimo obnašanje v elastičnem območju (Miklavžin, 2004).

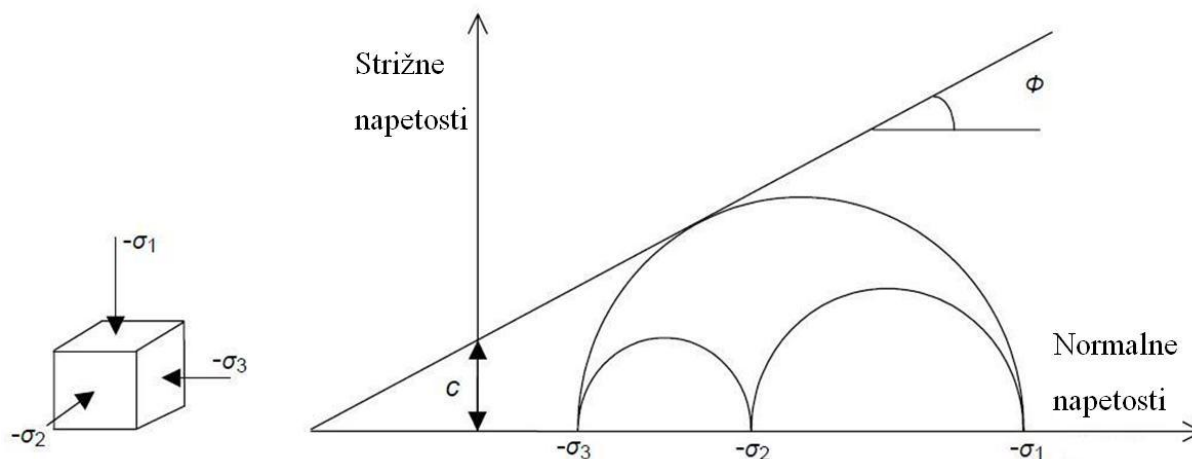
3.2 Mohr – Coulombov model (MC)

Mohr – Coulombov (MC) materialni model je linearno elastičen – idealno plastičen. V splošnem se uporablja za prvo analizo problema, saj so izračuni največkrat hitri, ker je materialni model enostaven. Mohr – Coulombov model lahko služi tudi kot končna rešitev za primere hribin, ki niso podvržene ciklu obremenjevanja in razbremenjevanja, ampak samo obremenjevanja. Za vsako posamezno vrsto zemljine oziroma hribine podajamo merodajno konstantno togost.

Grafično je model predstavljen na sliki 2. Plastične deformacije nastopijo, ko se radij največjega kroga dotakne ovojnice, ki predstavlja ploskev popuščanja. Najbolj enostavna ovojnica je ravna črta – Coulombova enačba:

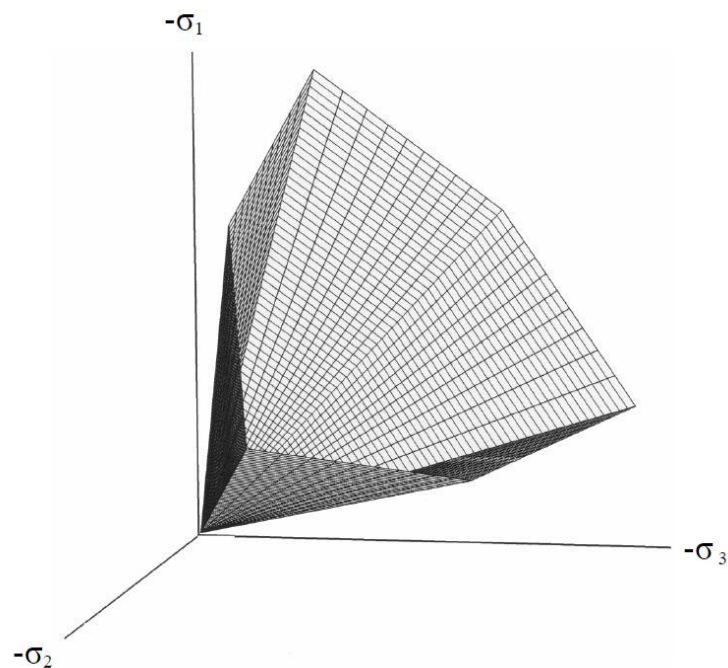
$$\tau = c - \sigma' \tan \phi \quad (6)$$

Enačba predstavlja linearno zvezo med strižno trdnostjo in normalno napetostjo.



Slika 2: Mohr – Coulombov kriterij porušitve (Brinkgreve, 2002)

Mohr – Coulombov porušni kriterij lahko zapišemo za različne možne kombinacije napetostnih stanj v napetostnem prostoru. Kriteriji porušitve določajo v prostoru nepravilno 6 – strano piramido (Slika 3). Znotraj območja 6 – strane piramide je elastično območje, kjer obnašanje določata parametra E in ν , ko pa kombinacija napetosti doseže eno od ravnin popuščanja, nastopijo plastične deformacije. Za koherentne materiale se piramida razteza le malo v področje nateznih napetosti.



Slika 3: Mohrov kriterij porušitve v prostoru ($c = 0$) (Brinkgreve, 2002)

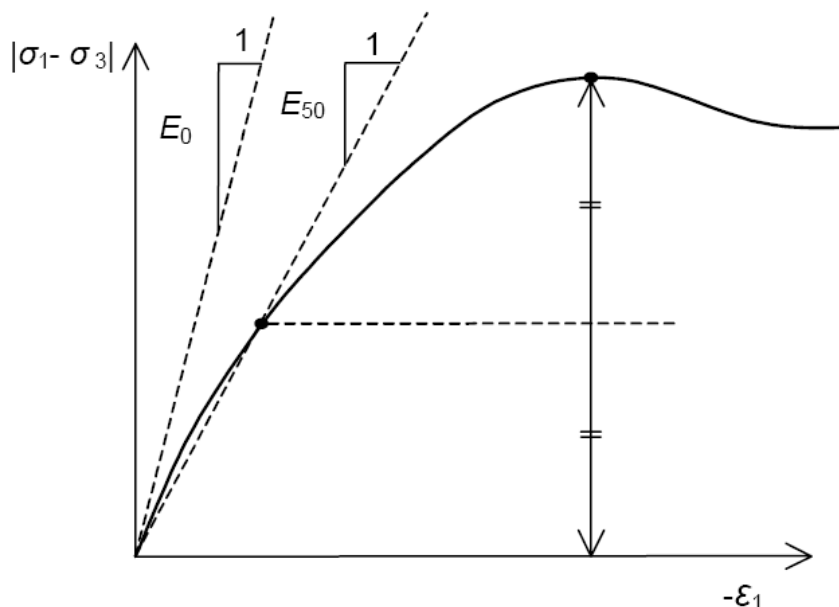
3.2.1 Parametri

Mohr – Coulombov model potrebuje pet vhodnih parametrov. Večinoma jih lahko pridobimo s pomočjo osnovnih laboratorijskih preiskav. Ti parametri so:

- | | | | |
|-------------|---|--------------------|----------------------|
| - E | : | Elastični modul | [kN/m ²] |
| - ν | : | Poissonovo število | |
| - φ | : | Strižni kot | [°] |
| - c | : | Kohezija | [kN/m ²] |
| - ψ | : | Kot razmika | [°] |

E – Elastični modul [kN/m^2]

Elastični modul je po definiciji razmerje med napetostjo σ in deformacijo ε v elastičnem območju. Grafično je prikazan na diagramu $\sigma - \varepsilon$ na sliki 4.



Slika 4: Definicija E_0 in E_{50} iz standardnega dreniranega triosnega preizkusa (Brinkgreve, 2002)

Kot je razvidno iz slike 1, imamo elastični modul E_0 , kateri predstavlja začetni elastični modul in se uporablja za materiale, ki se obnašajo večinoma elastično. Elastični modul E_{50} , kateremu pravimo sekantni modul pri 50% trdnosti vzorca, je primeren za večino zemljin.

Za zemljine velja, da elastična modula E_{50} in E_{ur} (Poglavje 3.3.1) naraščata skupaj z napetostnim stanjem (zgoščenost). Zato praviloma togost narašča z globino zemljine. Prav tako modul elastičnosti narašča v primeru razbremenitve in ponovne obremenitve.

ν – Poissonovo število

Poissonovo število oziroma količnik prečne kontrakcije je definiran kot razmerje med bočno (ε_3) in vertikalno (ε_1) deformacijo. Določamo ga s triosno konsolidirano drenirano preiskavo,

pogosto pa ga ocenimo izkustveno. Za večino hribin upoštevamo vrednosti med 0,3 in 0,4. V primeru razbremenjevanja pa uporabimo manjše vrednosti, med 0,15 in 0,25.

c – Kohezija [kN/m^2]

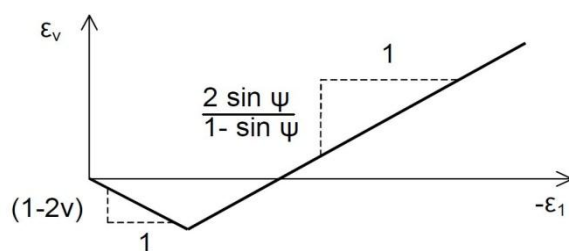
Kohezija ali notranja trdnost materiala je grafično določena kot odsek na ordinati diagrama $\sigma - \tau$ pri $\sigma = 0$ (Slika 2). Dejansko predstavlja strižno trdnost pri ničelni normalni napetosti. Določamo jo z laboratorijskimi strižnimi preiskavami, kot so direktni strižni preizkus in triosne preiskave.

φ – Strižni kot [$^\circ$]

Strižni kot ali kot notranjega trenja je določen z naklonom porušnice po Mohr – Coulombu (Slika 2). Določimo ga iz rezultatov laboratorijskih ali terenskih preiskav.

ψ – Kot razmikanja [$^\circ$]

Kot razmikanja določa razmerje med osno (ε_I) in volumsko deformacijo (ε_v) v območju plastičnega deformiranja (Slika 5) ter tako definira volumske spremembe. V primeru močno prekonsolidiranih in glinenih tal je kot razmikanja približno enak 0 ($\psi \approx 0^\circ$), medtem ko je v peščenih in prodnatih tleh odvisen od napetostnega stanja in strižnega kota tal. V teh primerih lahko za določitev vrednosti kota ψ uporabimo enačbo $\psi \approx \varphi - 30^\circ$. Za strižne kote manjše od 30° velja, da je $\psi = 0^\circ$.



Slika 5: Definicija kota razmikanja ψ (Brinkgreve, 2002)

Koeficient K_0

Koeficient K_0 je definiran kot razmerje med horizontalnimi (σ'_{xx}) in vertikalnimi (σ'_{yy}) efektivnimi napetostmi:

$$K_0 = \frac{\sigma'_{xx}}{\sigma'_{yy}} \quad (8)$$

Za tekočine velja hidrostatsko napetostno stanje, za katerega je značilno, da so napetosti v vseh smereh enake. Torej je v takem primeru koeficient $K_0 = 1$. Za zemljine pa je značilno, da je K_0 v splošnem različen od 1 in odvisen od strižne trdnosti zemljine, naklona površja tal in stopnje prekonsolidacije zemljine.

Za vodoravna in normalno konsolidirana tla ter v primeru drenirane analize se največkrat uporablja Jakyjeva enačba (9). Vse naše analize so potekale v dreniranih razmerah. Te v našem primeru najbolj realno opišejo dejansko stanje hribine. Za prekonsolidirana tla velja enačba (7), za teren, ki je nagnjen za kot β , pa enačba (11).

$$K_0 = 1 - \sin \varphi \quad (9)$$

$$K_0 = (1 - \sin \varphi) \sqrt{OCR} \quad (10)$$

$$K_{0\beta} = K_0(1 + \sin \beta) \quad (11)$$

Program Plaxis računa koeficient K_0 po Jakyjevi enačbi. Imamo pa možnost, da ga podamo poljubno za vsak material posebej. V programu Plaxis generiramo začetno napetostno stanje v dreniranih razmerah s tako imenovanim K_0 postopkom. Ta postopek je primeren le takrat, kadar so sloji zemljine in nivo talne vode vodoravni. V nasprotnem primeru moramo v prvi fazi izračuna napetostno stanje določiti z obremenitvijo lastne teže zemljine, v naslednji fazi pa izničiti pomike iz prve faze. Tako predstavljajo efektivne napetosti iz prve faze začetno napetostno stanje (Miklavžin, 2004).

Povprečne vrednosti koeficienta K_0 za različne vrste zemljin:

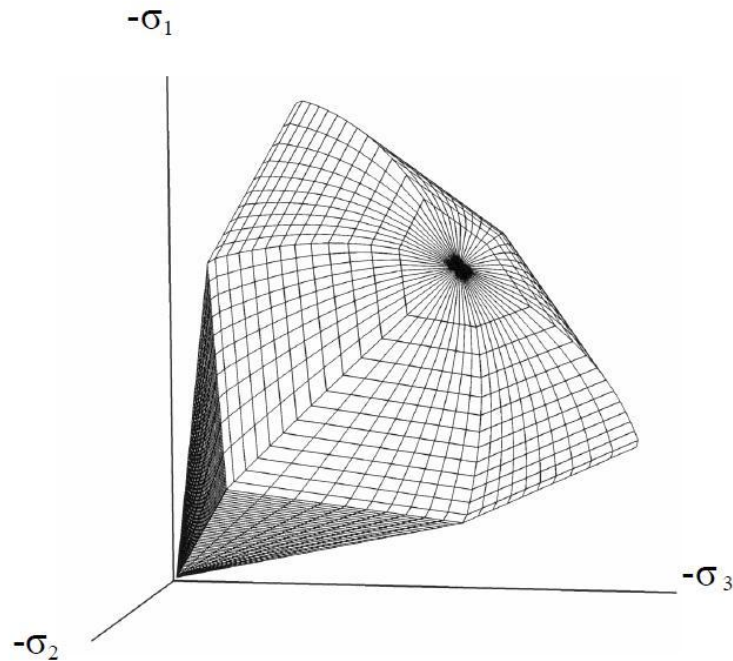
- nekoherentne zemljine: 0,35 – 0,50
- normalno konsolidirane, koherentne zemljine: 0,50 – 0,80

3.3 Hardening – Soil model

Hardening – Soil (HS) materialni model je veliko bolj kompleksen model kot sta linearno elastičen (Linear Elastic) in Mohr – Coulombov modela. Mejno stanje oz. kriterij porušitve ter plastično deformiranje je enako kot pri Mohr – Coulombovem modelu, določeno s tremi parametri: strižnim kotom φ , kohezijo c in kotom razmikanja ψ . Togost zemljine je določena bolj realno in sicer s tremi vhodnimi parametri:

- s triosnim obremenilnim elastičnim modulom E_{50} ,
- s triosnim razbremenilnim elastičnim modulom E_{ur} ,
- z edometriskim obremenilnim modulom E_{oed} .
- s hiperboličnim zakonom (Slika 7)

V napetostnem prostoru je Hardening – Soil model v smeri hidrostatskih napetosti omejen s sferično ploskvijo ali tako imenovano »kapo«, ki razmejuje območje elastičnosti in plastičnosti. Slika 6 prikazuje ploskve popuščanja v prostoru glavnih napetosti. Ploskve popuščanja imajo heksagonalno obliko, ki določa Mohr – Coulombov porušni kriterij, »kapa« pa podaja deformacije pri izotropni kompresiji v odvisnosti od prekonsolidacijske napetosti.



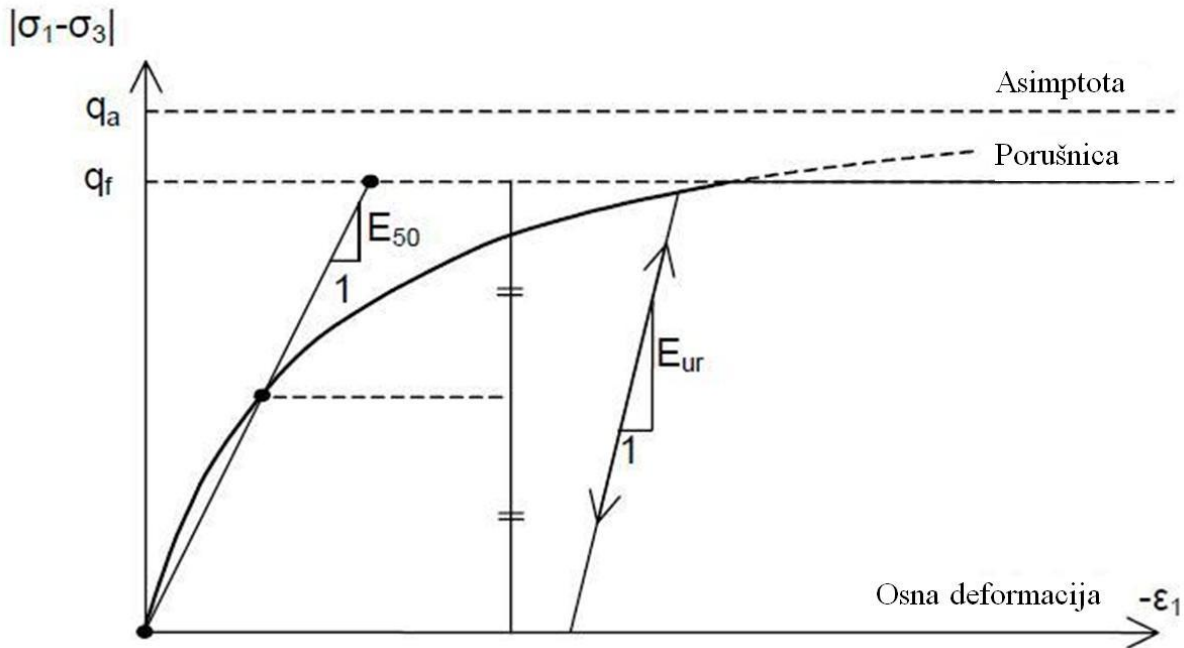
Slika 6: Ploskve popuščenja v prostoru glavnih napetosti, pri Hardening – Soil modelu (Brinkgreve, 2002)

Bistvena lastnost Hardening – Soil modela je, da je utrjevanje oziroma naraščanje togosti odvisno od napetostnega stanja. Model temelji na hiperbolični odvisnosti med osno deformacijo ε_1 in deviatorično napetostjo q , ki jo dobimo pri primarni obremenitvi vzorca (klasična drenirana triosna preiskava) in za katero velja:

$$q = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (9)$$

Ta medsebojna odvisnost je prikazana na sliki 7.

Deviatorične napetosti



Slika 7: Hiperbolična napetostno – deformacijska odvisnost pri primarni obremenitvi standardnega dreniranega triosnega preizkusa (Brinkgreve, 2002)

Pomen oznak:

- q_f – končna distorzijska napetost, pri kateri pride do porušitve (ko je $q_f = q$, nastopi plastično tečenje)
- q_a – asimetrična distorzijska napetost,
- $\sigma_{1,3}$ – glavne efektivne napetosti,
- ε_1 – osna deformacija,
- R_f – količnik porušitve, ki je manjši od 1 (predstavlja razmerje med q_f in q_a),
- E_{50} – deformacijski modul pri 50 odstotni trdnosti kamnine,
- E_{ur} – deformacijski modul pri razbremenjevanju in ponovnem obremenjevanju.

Hardening – Soil model bolj realno opisuje obnašanje hribine glede na Mohr – Coulombov model pri spremembah napetostnega stanja zemljine, kot je na primer obremenitev, razbremenitev in ponovna obremenitev.

Glavne značilnosti Hardening – Soil materialnega modela so:

- napetostno odvisna togost po eksponentnem zakonu: vhodni parameter m ,
- plastično utrjevanje zaradi primarne strižne obremenitve: vhodni parameter E_{50}^{ref}
- plastično utrjevanje zaradi primarne tlačne obremenitve: vhodni parameter E_{oed}^{ref}
- elastična razbremenitev/ ponovna obremenitev: parametra E_{ur}^{ref} , ν_{ur} ,
- strižna porušitev po Mohr – Coulombovem zakonu: parametri c , φ in ψ

3.3.1 Parametri

Parametre razdelimo v tri skupine:

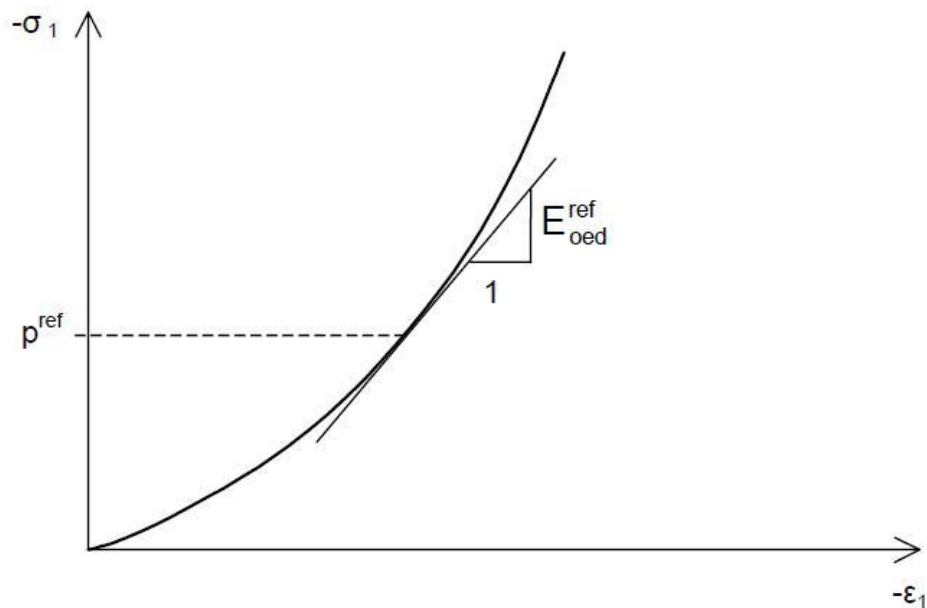
- Porušitveni parametri kot so pri Mohr – Coulombovem modelu:
 - Kohezija (efektivna): c [kN/m²]
 - Strižni kot (efektivni): φ [°]
 - Kot razmikanja: ψ [°]
- Osnovni parametri togosti:
 - Sekantni deformacijski modul: E_{50}^{ref} [kN/m²]
 - Tangentni edometrijski modul pri primarni obremenitvi: E_{oed}^{ref} [kN/m²]
 - Eksponent, ki določa stopnjo odvisnosti deformacijskega modula od napetosti: m [-]
- Dodatni parametri (priporočene so standardne vrednosti):
 - Deformacijski modul pri razbremenitvi in ponovni obremenitvi: E_{ur}^{ref} [kN/m²]
 - Poissonov količnik pri razbremenitvi in ponovni obremenitvi (privzeta vrednost je 0,2, ta vrednost da najbolj realne rezultate): ν_{ur} [-]
 - Referenčna napetost: p^{ref} [kN/m²]
 - Vrednost K_0 za normalno konsolidirane zemljine: K_0^{nc} (izračuna se po Jakyjevi enačbi (6), po potrebi jo lahko spreminjamo) K_0 [-]
 - Porušitveni količnik (navadno 0,9) R_f [-]

E_{50}^{ref} – Deformacijski modul [kN/m²]

Deformacijski modul je odvisen od velikosti sfernih napetosti pri distorzijskem napetostnem stanju. Definiran je pri 50% mobilizirani strižni trdnosti vzorca kot sekantni modul (Slika 7). Navadno je referenčna sferna napetost privzeta pri $p^{ref} = 100$ kPa.

E_{oed}^{ref} – Edometrski modul [kN/m²]

Edometrski modul je podan v odvisnosti od vertikalne obremenitve σ_1 kot tangenti modul (Slika 8) pri referenčni osni napetosti $p^{ref} = 100$ kPa.



Slika 8: Definicija edometriškega deformacijskega modula E_{oed}^{ref} (Brinkgreve, 2002)

E_{ur}^{ref} – Deformacijski modul razbremenitve in ponovne obremenitve [kN/m²]

Za razbremenitev in ponovno obremenitev je uporabljen še en napetostno odvisen modul, ki je prav tako izražen na referenčno napetost $p^{ref} = 100$ kPa. V mnogih praktičnih primerih lahko vzamemo za vrednost $E_{ur}^{ref} = 3 \cdot E_{50}^{ref}$, kar smo upoštevali tudi v naši diplomski nalogi. Grafično je E_{ur}^{ref} prikazan na diagramu hiperbolično napetostno – deformacijske odvisnosti (Sliki 7).

m – Eksponent

Eksponent m je materialni parameter, ki ga je potrebno določiti eksperimentalno iz laboratorijskih preiskav ali s pomočjo povratne analize. Najpogostejše vrednosti so med 0,5 (peski) in 1,0 (gline) (Miklavžin, 2004).

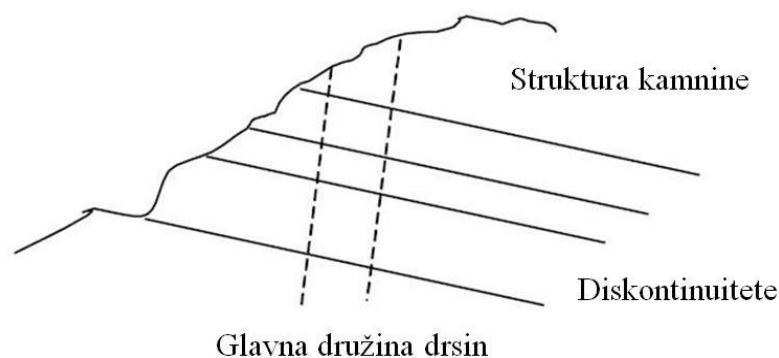
3.4 Jointed Rock model

Jointed Rock (JR) model uporabljamo zato, da z njim modeliramo anizotropne lastnosti hribine. Program Plaxis z uporabo Jointed Rock modela loči elastično in plastično anizotropijo:

- elastična anizotropija se nanaša na elastične togostne lastnosti v različnih smereh,
- plastična anizotropija zajema različne trdnostne karakteristike v različnih smereh.

Jointed Rock model je anizotropen elastičen – idealno plastičen materialni model. Namenjen je modeliranju diskontinuitet, ki se formirajo v intaktni hribini, kot je prikazano na sliki 9. Intaktna hribina je predvidena kot anizotropen elastičen material, katero določimo s petimi parametri in z usmeritvijo diskontinuitet. Za glavne skupine diskontinuitet, ki predstavljajo tako imenovane ravnine, je značilno, da so strižne napetosti na ravninah omejene s

Coulombovim kriterijem. Ko so strižne napetosti v plasteh dosežene, nastopi mehanizem strižnega drsenja.



Slika 9: Vizualizacija koncepta na katerem temelji Jointed Rock model (Brinkgreve, 2002)

V programu Plaxis lahko definiramo največ tri ravnine diskontinuitet. Privzeto je, da prva ravnina pripada smeri elastične anizotropije. Za vsako ravnino posebej lahko določimo strižne trdnostne parametre in natezno trdnost.

Glavne karakteristike Jointed Rock modela:

- anizotropni elastični parametri za intaktno kamnino: $E_1, E_2, \nu_1, \nu_2, G_2$
- strižni porušitveni parametri po Coulombu v treh smereh, i : c_i, ϕ_i, ψ_i
- omejena natezna trdnost: $\sigma_{t,i}$

Elastično obnašanje materiala je v Jointed Rock modelu opisano s konstitutivno matriko $\underline{\underline{D}}^*$. V nasprotju s Hookovim zakonom, je tu matrika $\underline{\underline{D}}^*$ transverzalna. Podamo lahko različno togost tako pravokotno na smer diskontinuitete (ravnina 1), kot tudi v njeni smeri. Smer diskontinuitete po navadi predstavlja smer skrilavosti oziroma smer, v kateri so togostni parametri drugačni od intaktne kamnine.

Vzemimo za primer horizontalno skrilavost, kjer je togostni parameter v horizontalni smeri E_1 različen od togostnega parametra v vertikalni smeri E_2 . Konstitutivne zveze, ki to relacijo opisujejo, veljajo v primeru, ko je smer »ravnine 1« vzporedna ravnini $x - z$:

$$\begin{bmatrix} \dot{\epsilon}_{xx} \\ \dot{\epsilon}_{yy} \\ \dot{\epsilon}_{zz} \\ \dot{\gamma}_{xy} \\ \dot{\gamma}_{yz} \\ \dot{\gamma}_{zx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_2}{E_2} & -\frac{\nu_1}{E_1} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_2}{E_2} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_2}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_1}{E_1} & -\frac{\nu_2}{E_2} & \frac{1}{E_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{2(1+\nu_1)}{E_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\sigma}_{xx} \\ \dot{\sigma}_{yy} \\ \dot{\sigma}_{zz} \\ \dot{\sigma}_{xy} \\ \dot{\sigma}_{yz} \\ \dot{\sigma}_{zx} \end{bmatrix} \quad (10)$$

V enačbi (10) je prikazana zveza, kjer je definirana inverzna konstitutivna matrika $(\underline{\underline{D}}^*)^{-1}$, za anizotropen elastičen material. Matrika $(\underline{\underline{D}}^*)^{-1}$ je simetrična in transformacija v prvotno matriko $\underline{\underline{D}}^*$ je možna samo numerično.

Ravnine drsenja so lahko v prostoru poljubno usmerjene in v splošnem niso vzporedne $x - z$ ravnini. Lego ravnine v prostoru definira lokalni koordinatni sistem (n, s, t) , kjer je ravnina drsenja vzporedna $s - t$ ravnini. Zaradi tega je potrebna transformacija togostne matrike iz lokalnega (n, s, t) v globalni (x, y, z) koordinatni sistem. Nato sledi še transformacija napetosti in deformacij.

3.4.1 Parametri

Večina parametrov je enakih kot pri izotropnemu Mohr - Coulombovem modelu. Razdelimo jih lahko v štiri skupine:

- Elastični parametri kot so pri Mohr - Coulombovem modelu:
 - Elastični modul za intaktno hribino E_1 [kN/m²]
 - Poissonov koeficient za intaktno hribino ν_1 [-]
- Anizotropni elastični parametri za prvo ravnino:
 - Elastični modul prve ravnine: E_2 [kN/m²]
 - Strižni modul prve ravnine: G_2 [kN/m²]
 - Poissonov koeficient prve ravnine: ν_2 [-]
- Trdnostni parametri v smereh razpok (i – ta ravnina, $i = 1, 2, 3$):
 - Kohezija: c_i [kN/m²]
 - Strižni kot: φ_i [°]
 - Kot razmikanja: ψ_i [°]
 - Natezna trdnost: $\sigma_{t,i}$ [kN/m²]
- Parametri, ki definirajo smer vpadanja razpok (i – ta ravnina, $i = 1, 2, 3$):
 - Število različnih razpok – ravnin ($1 \leq n \leq 3$):
 - Kot vpada: $\alpha_{1,i}$ [°]
 - Smer vpada: $\alpha_{2,i}$ [°]

Elastični parametri – E_1 [kN/m²], ν_1 [-], E_2 [kN/m²], ν_2 [-] in G_2 [kN/m²]

Elastična parametra E_1 in ν_1 sta parametra za intaktno hribino.

Togost pravokotno na smer plasti je drugačna od togosti intaktne hribine. To togost podamo s parametroma E_2 in ν_2 . V splošnem velja, da so karakteristike pravokotno na smer ravnine slabše od karakteristik intaktne hribine. Strižni modul G_2 predstavlja strižno togost v smeri ravnine oziroma plastovitosti. Za razliko od strižnega modula elastične intaktne hribine, G_2 ni v enostavni zvezi z elastičnima parametroma E_2 in ν_2 . V primerih, kadar se hribina obnaša povsem izotropno, potem sta parametra E_2 in ν_2 kar enaka E_1 in ν_1 , strižni modul pa določimo po enačbi (1).

Trdnostni parametri - c_i [kN/m²], φ_i [°], ψ_i [°] in $\sigma_{i,i}$ [kN/m²]

Za vsako ravnino drsenja podamo svoje trdnostne parametre. Ti parametri so enaki kot pri Mohr – Coulombovem modelu (Poglavje 3.2.1).

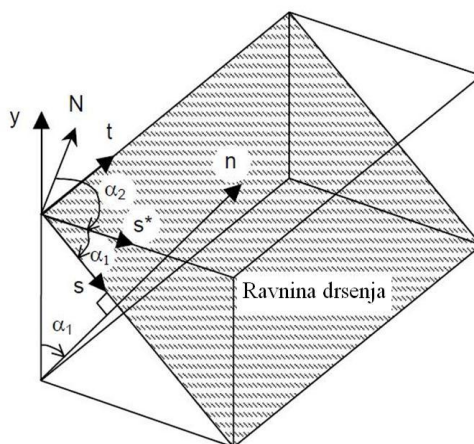
Parametra, ki definirata smer plasti - $\alpha_{1,i}$ [°] in $\alpha_{2,i}$ [°]

Predpostavimo, da smer elastične anizotropije sovpada s smerjo, kjer pride do plastičnega striženja (prva ravnina). Ta smer mora biti vedno določena. V primeru, da je hribina plastovita, ampak brez glavnih smeri razpok, potem je število ravnin enako 1. Za to ravnino je potrebno določiti trdnostne parametre.

Definiramo lahko največ tri skupine ravnin. To so tri najbolj kritične smeri. Definiramo jih z dvema parametroma:

- Kot vpada: $\alpha_{1,i}$ [°]
- Smer vpada: $\alpha_{2,i}$ [°]

Na sliki 10 je prikazana ravnina drsenja. Definiramo jo z dvema vektorjema (s , t). Ta dva vektorja sta oba pravokotna na vektor n , ta je hkrati pravokoten tudi na ravnino drsenja. Smer in položaj vektorjev sta podana na sliki 10.

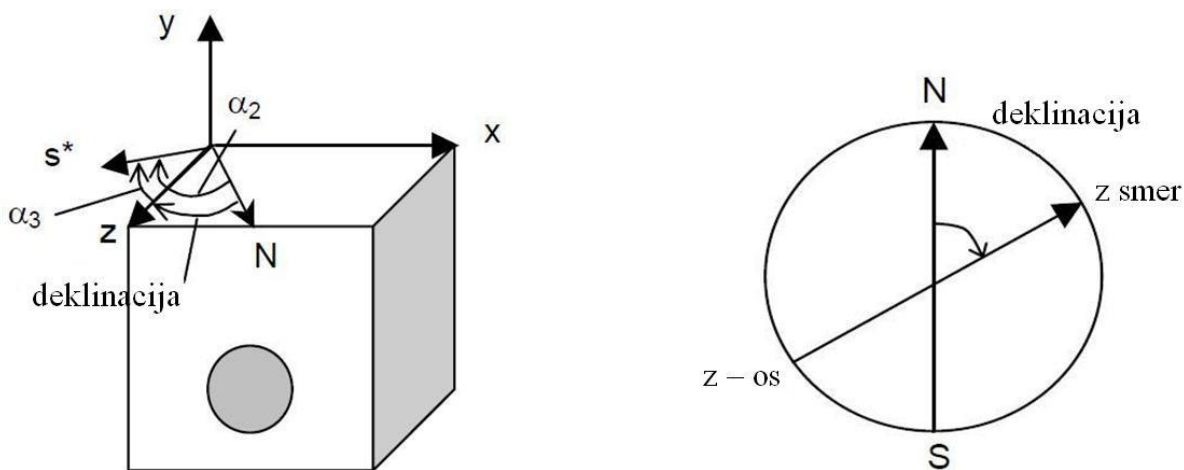


Slika 10: Definicija kota in smeri vpada (Brinkgreve, 2002)

Definicija kota in smeri vpada:

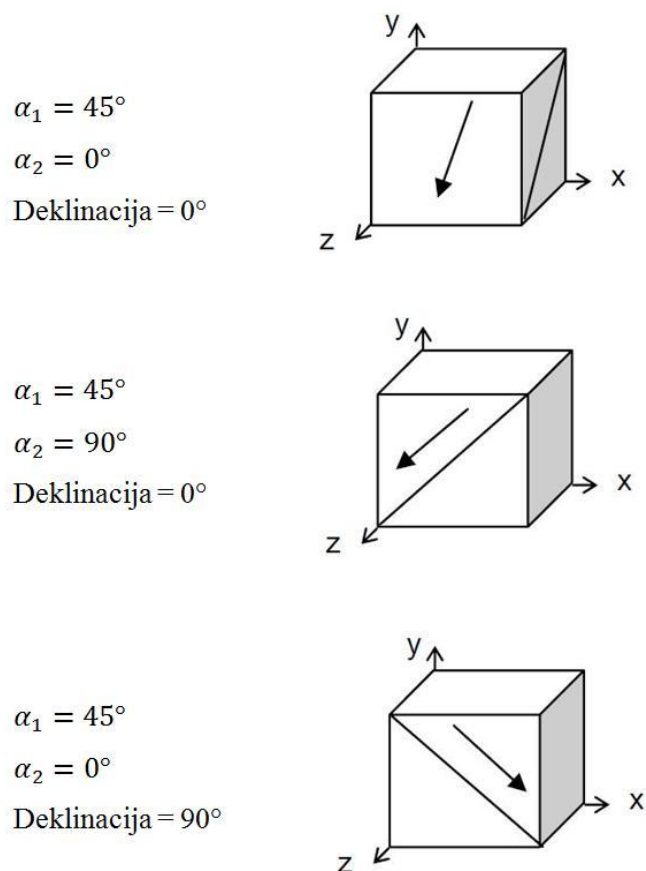
- $\alpha_{1,i}$:
 - je kot med horizontalno ravnino, ki jo definirata vektorja (s^* , t) in ravnino drsenja,
 - je kot med vektorjema s^* in s odmerjen v smeri urinega kazalca od s^* , kadar gledamo v pozitivni smeri vektorja t ,
 - vrednosti kota se gibljejo na intervalu $[0^\circ, 90^\circ]$,
- $\alpha_{2,i}$:
 - je pozitiven kot od smeri severa (N), merjen v smeri urinega kazalca do vektorja s^* ,
 - vrednosti kota se gibljejo na intervalu $[0^\circ, 360^\circ]$,
 - podajamo ga samo v 3D modelu,

Orientacijo ravnine drsenja v prostoru definiramo še z enim parametrom, ki se imenuje deklinacija. To je pozitiven kot od smeri severa (N) proti pozitivni smeri z – smeri v modelu (Slika 11). Deklinacijo lahko podajamo samo, kadar delamo v 3D modelu (Miklavžin, 2004).



Slika 11: Definicija deklinacije (Brinkgreve, 2002)

Na sliki 12 so prikazani primeri ravnine drsenja v 3D modelu za različne vrednosti kota α_1 , α_2 in deklinacije.



Slika 12: Primeri ravnine drsenja za α_1 , α_2 in deklinacijo (Brinkgreve, 2002)

Kot je razvidno iz podanega opisa je za primer ravninskega deformacijskega stanja potrebno definirati samo kot α_1 . V programu Plaxis 2D sta že nastavljeni vrednosti za kot α_2 , ki je enak 90° in deklinacijo, ki je enaka 0° (Brinkgreve, 2002).

4 OSNOVNE LASTNOSTI PREDOROV ŠENTVID, TROJANE IN GOLOVEC

4.1 Gradnja predorov

Gradnja predorov Šentvid, Trojane in Golovec se je izvajala po Novi avstrijski metodi (NATM - New Austrian Tunnelling Method). Ta način gradnje se izvaja v slabše in slabo nosilnih hribinah. Pri tej metodi hribina okoli predora sodeluje, poleg primarne podgradnje, kot podporni element. Prekometerne deformacije lahko delno preprečimo s pravočasno vgradnjo podporja, ki ga dimenzioniramo glede na dopustne deformacije. Dejanske deformacije morajo biti seveda manjše od dopustnih (Marjetič in sod., 2006). Ta način gradnje tako vključuje sprotno mersko, geološko in geotehnično spremljavo, kar omogoča prilagajanje tehnologije gradnje in podpiranja dejanskim hribinskim razmeram – dejanskim deformacijam, ki so prisotne pri izkopu in primarnem podpiranju (Likar, 2004a).

4.2 Geomehanski opis hribin

Območje, kjer potekajo predori Šentvid, Golovec in Trojane, v geološkem pogledu pripada karbonski in permski starosti. Kamnine so v geološki preteklosti doživele velike mehanske spremembe kot posledica tektonskih dogajanj in drugih sprememb, tako da so v pretežni meri močno tektonsko poškodovane z značilnimi vertikalnimi in subvertikalnimi prelomnimi conami debelimi od nekaj decimetrov do več 10 metrov, katere zapolnjuje tektonska glina z nizkimi geotehničnimi karakteristikami. Sestav hribine je iz klastičnih permokarbonskih skrilavih glinavcev, meljevcev in peščenjakov. Na posameznih delih se voda zadržuje nad vodo neprepustnimi zaglinjenimi plastmi. Tu je hribina razmočena (posebno ob večjih količinah padavin) in ob izkopu zaradi odpiranja razpok in vdora vode vanje izgubi vso kohezijo. Na teh mestih se hribina obnaša kot nevezan material brez samonosilnih sposobnosti (Marjetič in sod., 2006).

V preglednicah 1, 2 in 3 so navedeni podatki, dobljeni iz laboratorijskih preiskav za hribine, skozi katere potekajo predori Šentvid, Trojane in Golovec.

Preglednica 1: Geomehanski podatki za dvopasovni predor Šentvid (Petkovšek in sod., 2000)

Parameter	Enota	Preperina	Hribina	Tektonska cona, ki vsebuje glino in zdrobljene delce permokarbonske hribine
γ	[kN/m ³]	23	23	23
c	[kPa]	0	0	0
φ	[°]	20 - 22	20 - 22	20 - 22
E	[MPa]	100,0	100,0	100,0
ν		0,3 - 0,31	0,3 - 0,31	0,3 - 0,31

Preglednica 2: Geomehanski podatki za dvopasovni predor Trojane (Likar, 2004b)

Parameter	Enota	Peščenjak	Meljevec	Glinavec	Tektonska glina	Tekotonsko preoblikovan glinavec in meljevec	Škriljavec in meljevec
γ	[kN/m ³]	25	24	24	24	24	24
c	[kPa]	40	30	30	10	28	25 - 30
φ	[°]	32	32	26	27	26	27 - 28
E	[MPa]	200,0	120,0	65,0	18	8	10
ν		0,25	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33

Preglednica 3: Geomehanski podatki za dvopasovni predor Golovec (Logar, 1996)

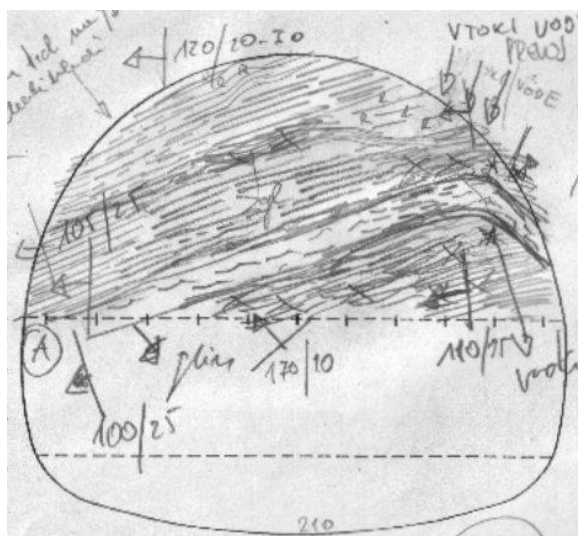
Parameter	Enota	Peščeni melj s kosi peščenjaka	Preperel glinasti in meljasti skrilavec z lamelami peščenjaka	Glinasti in meljasti skrilavec - hribinska osnova
γ	[kN/m ³]	21	22	24
c	[kPa]	0	0	200
φ	[°]	20	20	20
G	[MPa]	2,0	4,0	15,0
ν		0,35	0,32	0,3

4.3 Podatki o predoru Šentvid

Predor Šentvid povezuje gorenjsko avtocesto A2 odsek Šentvid – Koseze na avtocestni križ Slovenije in Ljubljansko obvoznico. Glavna predorska cev, skupne dolžine 1450 m, je sestavljena iz že prej zgrajene galerije Šentvid na severu, dveh novih pokritih vkopov in hribinskega dela predora. Hribinski del predora se deli na štiri poglavitne enote in sicer na dvopasovni del predora s standardnim karakterističnim profilom, priključno kaverno, tropasovni del predora in priključne cevi. Skupna dolžina vseh cevi je približno 3000 m, v različno velikih izkopnih profilih, od 81 m^2 v priključni cevi, do največjega 350 m^2 v priključni kaverni. Za natančno določitev lokacije priključnih kavern so predhodno izvedli raziskovalni rov, ki je vključeval celostni program geološko-geomehanske spremljave (Žigon, Žibert, Jemec, 2004). Največja višina nadkritja je približno 115 m (Klopčič in sod., 2007a).

4.3.1 Karakterističen geološki profil

Na sliki 13 je prikazan značilen geološki profil predora Šentvid. Zanj je značilna subhorizontalna skrilavost z majhnim naklonom proti levi strani predora, če obravnavamo izkop iz severa proti jugu.



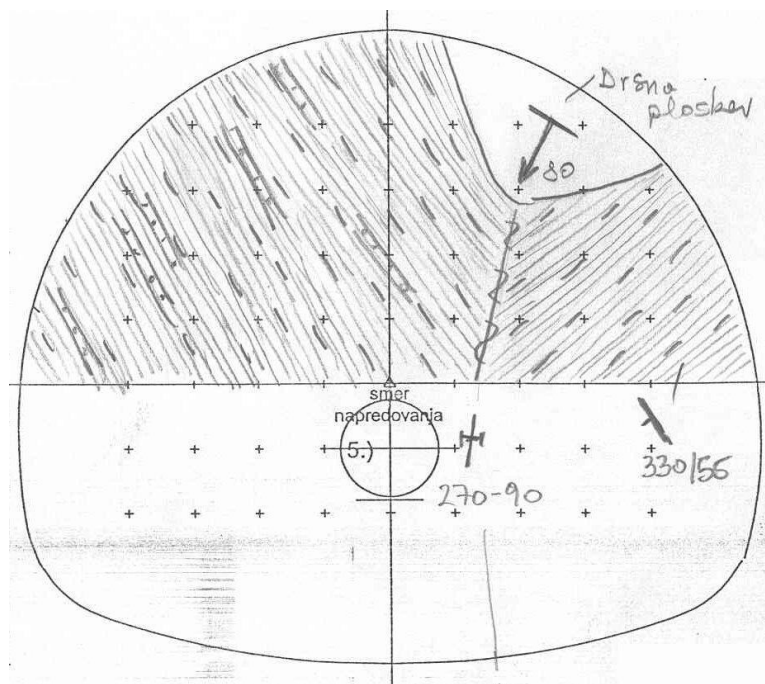
Slika 13: Karakterističen geološki prerez dvopasovnega predora Šentvid

4.4 Podatki o predoru Trojane

Predor Trojane je umeščen v prostor na avtocesti A1, na odseku Ljubljana – Celje. Gradnja predora se je pričela 15. septembra 2000 in se je končala 25. Marca 2004. 2900 m dolg, dvocevni, dvopasovni predor ima prečni presek cevi velikosti 90 m^2 . To je ekvivalentno 11 m premera cevi (Likar, 2004a). Razdalja med obema cevema je od 40 m in do največ 75 m, ravno pod vasjo Trojane. Višina nadkritja obeh cevi je med 2 in 140 m. Zahtevne geotehnične razmere gradnje, majhna višina nadkritja in prisotnost poseljenega območja nad predorskima cevema so dejstva, ki sovpadajo in ki so vplivala na potek gradnje (Klopčič in sod., 2007b).

4.4.1 Karakterističen geološki profil

Na sliki 14 je prikazana značilna geološka zgradba profila, za katerega je značilna vertikalna oziroma subvertikalna plastovitost. Na območju kjer hribinska masa ni bila tako močno tektonsko poškodovana, lahko opazimo majhno inklinacijo hribinske mase proti jugu.



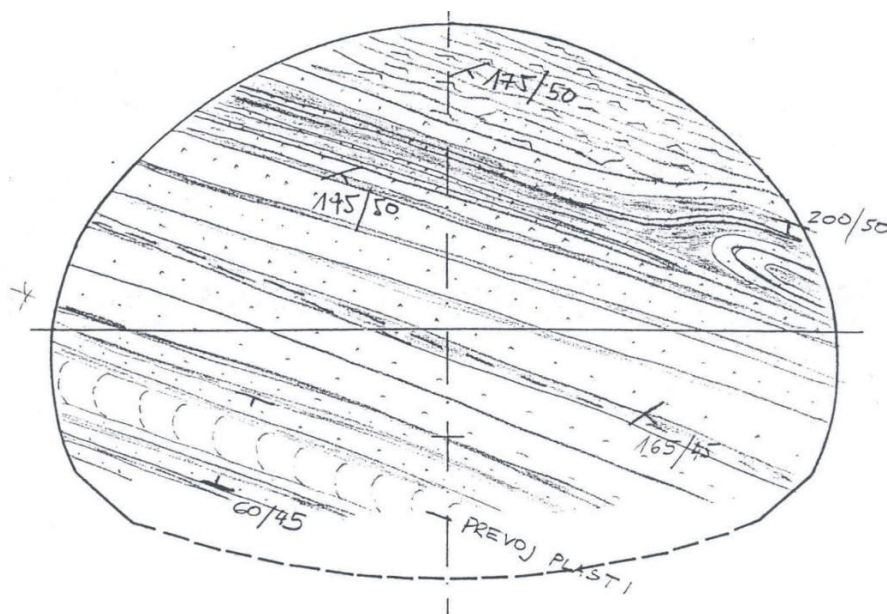
Slika 14: Karakterističen geološki prerez predora Trojane

4.5 Podatki o predoru Golovec

Predor Golovec je prvi tropasovni, dvocevni predor v Sloveniji. Je sestavni del Ljubljanske obvoznice in povezuje severni del Slovenije z jugozahodnim (Koper) in jugovzhodnim delom (Novo mesto) Slovenije. Prečni presek cevi znaša 148 m^2 , z višino $10,5 \text{ m}$ in maksimalnim horizontalnim premerom 14 m . Predor je dolg približno 580 m . Razdalja med obema cevema je več ali manj konstantna in znaša 50 m . Višina nadkritja predora je do 80 m . Gradnja predora je potekala v časovnem intervalu od oktobra 1995 in do marca 1999 (Klopčič in sod., 2007b).

4.5.1 Karakterističen geološki profil

Značilna geološka zgradba v predoru Golovec je prikazana na sliki 3 in prikazuje geološki popis čela predora v smeri izkopa (gledano iz juga proti severu). Skrilavost v prečnem profilu vpada z naklonom 30° v desno (proti vzhodu). Prostorsko gledano je vpad strmejši (50°) v smeri jug – jugo vzhod.



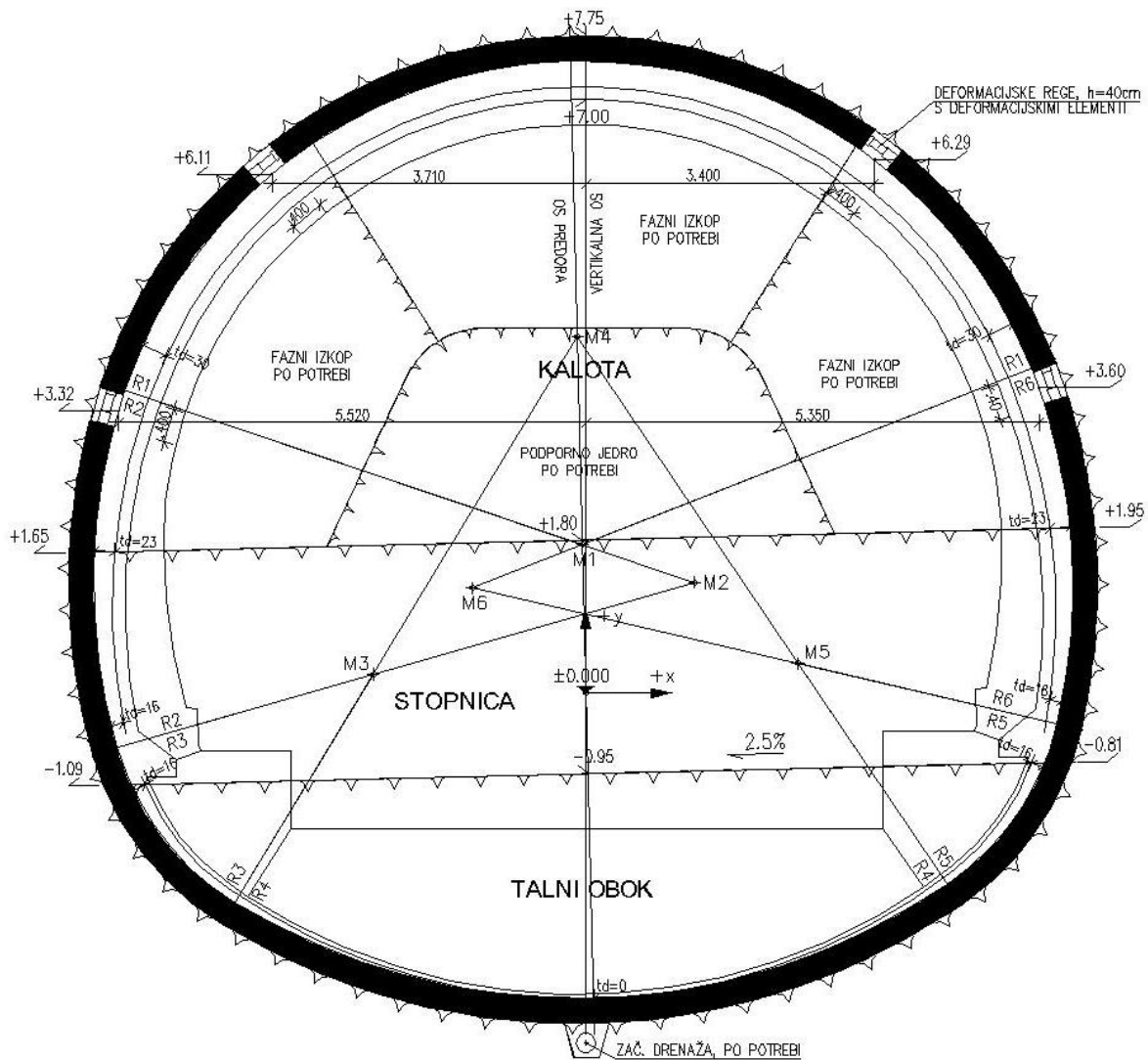
Slika 15: Karakterističen geološki prerez predora Golovec

5 NUMERIČNE ANALIZE

Numerične analize so bile izvedene v programu Plaxis 2D. Ker smo želeli numerično opisati gradnjo predorov Šentvid, Trojane in Golovec, kjer vsi potekajo v anizotropnih mehkih skrilavih kamninah, smo zato uporabili v programu Plaxis 2D materialni model Jointed Rock, saj ta edini upošteva lastnost anizotropije temeljnih tal. Predhodno smo izvedli parametrično analizo, ki prikazuje vpliv anizotropije pri gradnji predora na obnašanje hribine, kjer smo poleg Jointed Rock materialnega modela primerjali tudi ostale materialne modele (linearno elastični (Linear Elastic), Mohr – Coulombov in Hardening Soil materialni model). Na podlagi parametrične analize smo izvedli povratne analize za primere predorov Šentvid, Trojane in Golovec.

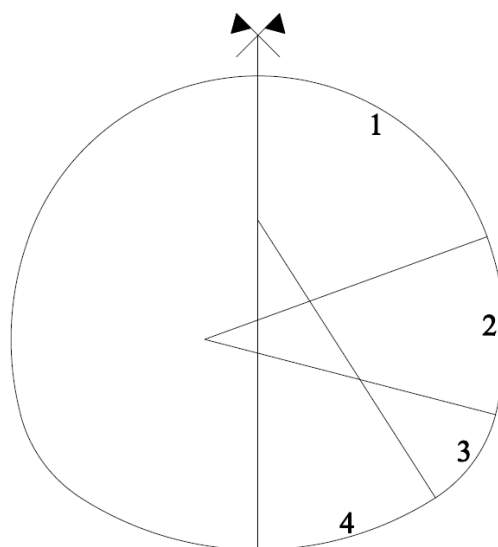
5.1 Podatki

Za numerične analize smo uporabil geometrijo prečnega prereza leve cevi predora Šentvid. Gre za profil dvopasovne predorske cevi v hribinski kategoriji C3 – Slika 16. To velja tako za parametrično analizo, kot tudi za povratne analize, v primerih predora Šentvid in Trojane, kjer gre za dvopasovni predor, med tem ko smo v primeru povratne analize predora Golovec uporabili krožni prerez predorske cevi. Tako smo določili za parametrično analizo tudi višino nadkritja (80m), ki izhaja iz primera predora Šentvid .



Slika 16: Geometrija izkopa v hribinski masi kategorije C3 dvopasovnega predora Šentvid

Geometrijski elementi za obravnavani profil predorske cevi so prikazani na sliki 17, podatki pa so navedeni v Preglednici 4.



Slika 17: Geometrijski elementi za dvopasovni predor

Preglednica 4: Geometrijski podatki za dvopasovni predor

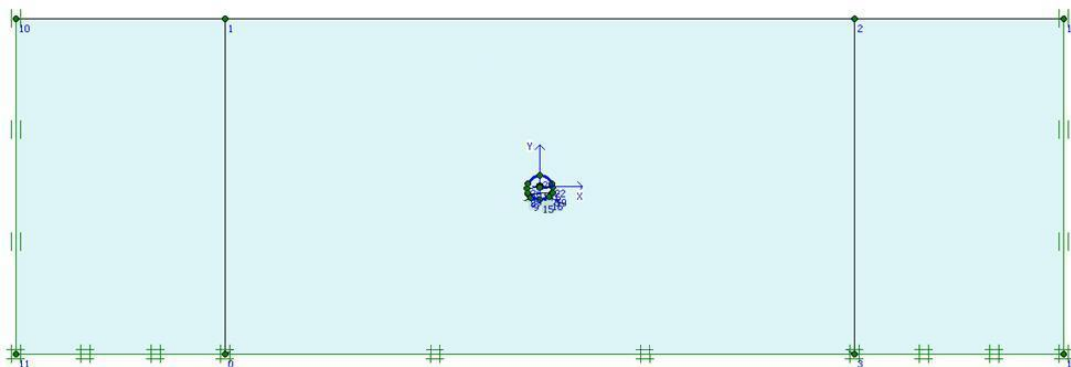
številka elementa	tip elementa	kot [°]	polmer/dolžina [m]
1	lok	70,06	6,00
2	lok	34,43	7,40
3	lok	42,87	3,45
4	lok	32,64	8,10

Omenjeni predori so bili grajeni v zelo podobnih hribinah, vendar se je znotraj tega v praksi uporabilo več razredov hribinske mase. Eden od tipov hribinske mase, katerega smo tudi uporabili v parametrični analizi in zopet izhaja iz premera predora Šentvid, je RMT1, kar pomeni tip hribine 1 (rock mass type). Pod to oznako je po RMR klasifikaciji opredeljena mešanica peščenjakov in meljevcev, kjer prevladujejo peščenjaki. Med osnovne klasifikacijske značilnosti spada razpokanost hribinske mase in razdalja med ploskvami pri skrilavosti, ki je manjša od 150 mm. Poškodbe zaradi tektonskih vplivov so majhne do srednje velike. Za to hribinsko maso je značilna visoka kohezija in dobro zaklinjene (Klopčič in sod., 2008).

Za modeliranje sider sicer imamo v programu Plaxis 2D na voljo element, vendar pa ni najbolj ustrezen. Zato v praksi sidra pogosto upoštevamo tako, da okoli predora podamo nov materialni model z izboljšanimi karakteristikami hribinske mase – običajno višja kohezija od osnovnega materiala. Na ta način se zelo dobro približamo dejanskemu stanju vpliva sider, saj z njihovo uporabo dejansko izboljšamo trdnostne karakteristike hribine. Mi vpliva sider nismo upoštevali, saj smo hoteli prikazati sam odziv hribine.

Kot podporni element v predoru služi brizgani beton debeline 30 cm. Ker vemo, da takoj po vgradnji podporja brizgani beton kljub dodatkom za hitro vezanje ne more doseči končne trdnosti, smo to v računskem modelu tudi upoštevali. Definirali smo dve stanji – mlad beton in star beton. Nižjo trdnost mladega betona smo upoštevali z redukcijo elastičnega modula starega betona za faktor tri, hkrati pa smo upoštevali tudi razpokanost betona tako, da je elastični modul razpokanega betona dvakrat manjši od elastičnega modula nerazpokanega modula. Tako znaša elastični modul $5 \cdot 10^6$ kN/m² za mlad beton in $1,5 \cdot 10^7$ kN/m² za star beton. Ostala dva parametra sta še Poissonov količnik, ki je 0,2 in specifična teža betona, ki je 25 kN/m³ (Klopčič in sod., 2008).

Numerični model predora, kateri je bil uporabljen v parametrični analizi in je prikazan na sliki 18.



Slika 18: Numerični model predora za parametrično analizo v programu Plaxis 2D

Da bi se kar najbolje približali realnemu poteku gradnje, smo v analizi zajeli tri faze izkopa predora in sicer izkop kalote, stopnice in talnega oboka. Ob upoštevanju zgornjih kriterijev smo tako modelirali 9 računskih faz gradnje, ki so prikazane v preglednici 5.

Preglednica 5: Modelirane faze gradnje

Faza 1	izkop kalote	$\sum M_{stage} = 0,5$
Faza 2	vgradnja podporja kalote – mlad beton	$\sum M_{stage} = 0,75$
Faza 3	vgradnja podporja kalote – star beton	$\sum M_{stage} = 1$
Faza 4	izkop stopnice	$\sum M_{stage} = 0,5$
Faza 5	vgradnja podporja stopnice – mlad beton	$\sum M_{stage} = 0,75$
Faza 6	vgradnja podporja stopnice – star beton	$\sum M_{stage} = 1$
Faza 7	izkop talnega oboka	$\sum M_{stage} = 0,5$
Faza 8	vgradnja podporja talnega oboka – mlad beton	$\sum M_{stage} = 0,75$
Faza 9	vgradnja podporja talnega oboka – star beton	$\sum M_{stage} = 1$

Z uporabo faktorja $\sum M_{stage}$ smo omogočili razvoj napetostnega stanja oziroma deformacij v računskem modelu, ki nastanejo kot posledica napredovanja čela v prostoru, saj zaradi pogojev računa v ravnini ti pomiki niso neposredno zajeti (Klopčič in sod., 2008). Delež pomikov, ki se zgodi pred prvo meritvijo merske točke v predoru, znaša nekje med 25 in 70% celotnih pomikov, odvisno od togosti hribinske mase, napredovanja gradnje in časovne zamude med izkopom prereza in prvo meritvijo merske točke v predoru. Tako se v povprečju zgodi približno 50% pomika pred prvo meritvijo merske točke v fazi izkopa. Zato smo v numeričnih izračunih upoštevali vrednost faktorja $\sum M_{stage} = 0,5$ za posamezne faze izkopa (faza izkopa kalote, stopnice in talnega oboka). Pri vgradnji podporja – mlad beton smo upoštevali $\sum M_{stage} = 0,75$ (Klopčič in sod., 2007a).

5.2 Parametrična analiza

S parametrično analizo smo prikazali vpliv posameznih parametrov na obnašanje hribinske mase pri gradnji predora. Sestavljena je iz dveh delov. Prvi del parametrične analize je usmerjen na študij vpliva posameznih parametrov na pomike na površju nad predorsko cevjo, drugi pa na pomike merskih točk v predorski cevi.

Obe analizi smo izvedli s štirimi različnimi konstitutivnimi materialnimi modeli v programu Plaxis 2D:

- Linearno elastičen model (Linear Elastic),
- Mohr – Coulombov model
- Hardening – Soil model,
- Jointed Rock model.

5.2.1 Pomiki na površju nad predorsko cevjo

Za primer hribine RMT1, kjer obstaja v hribini niz vzporednih ploskvic – skrilavost in te razpoke niso zapolnjene z glino ter je njihova medsebojna razdalja majhna, je uporaba Jointed Rock materialnega modela smiselna in upravičena. Tako smo analizirali vplive skrilavosti na pomike na površju nad predorsko cevjo. Obravnavali smo tri materiale, pod oznakami RMT1 – A, RMT1 – B in RMT1 - C, ki so se med seboj razlikovali v razmerju elastičnih modulov E_1 in E_2 , hkrati pa smo vsem trem materialom spreminjali kot skrilavosti α_1 in sicer za vrednosti 0° , 30° , 60° in 90° . Parametri, katere smo uporabili v Jointed Rock materialnem modelu, so prikazani v preglednici 6.

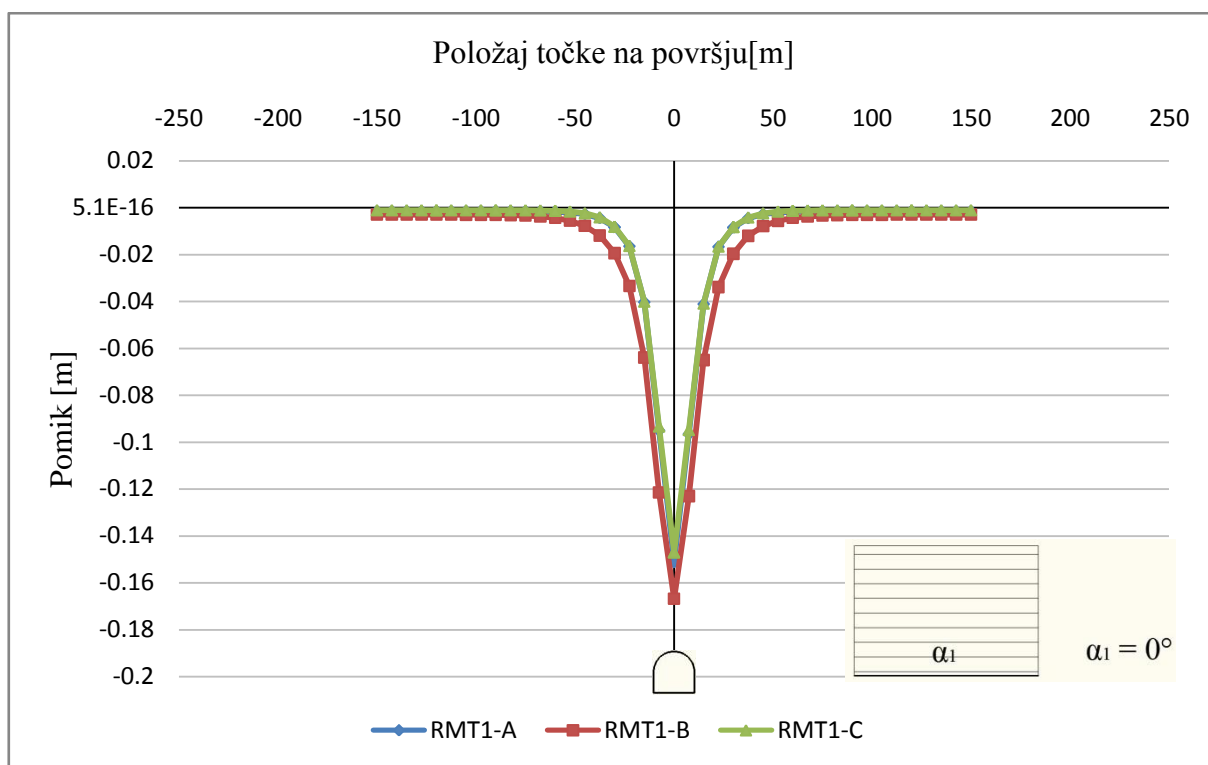
Preglednica 6: Geomehanske karakteristike Jointed Rock materialnega konstitutivnega modela za RMT1

Parameter	Enota	RMT1 - A	RMT1 - B	RMT1 - C
γ	[kN/m ³]	26,5	26,5	26,5
$\nu_1 = \nu_2$		0,25	0,25	0,25
G_2	[MPa]	5,0	5,0	5,0
c_1	[kPa]	50	50	50
φ_1	[°]	25	25	25
E_1	[MPa]	600	600	300
E_2	[MPa]	600	300	600

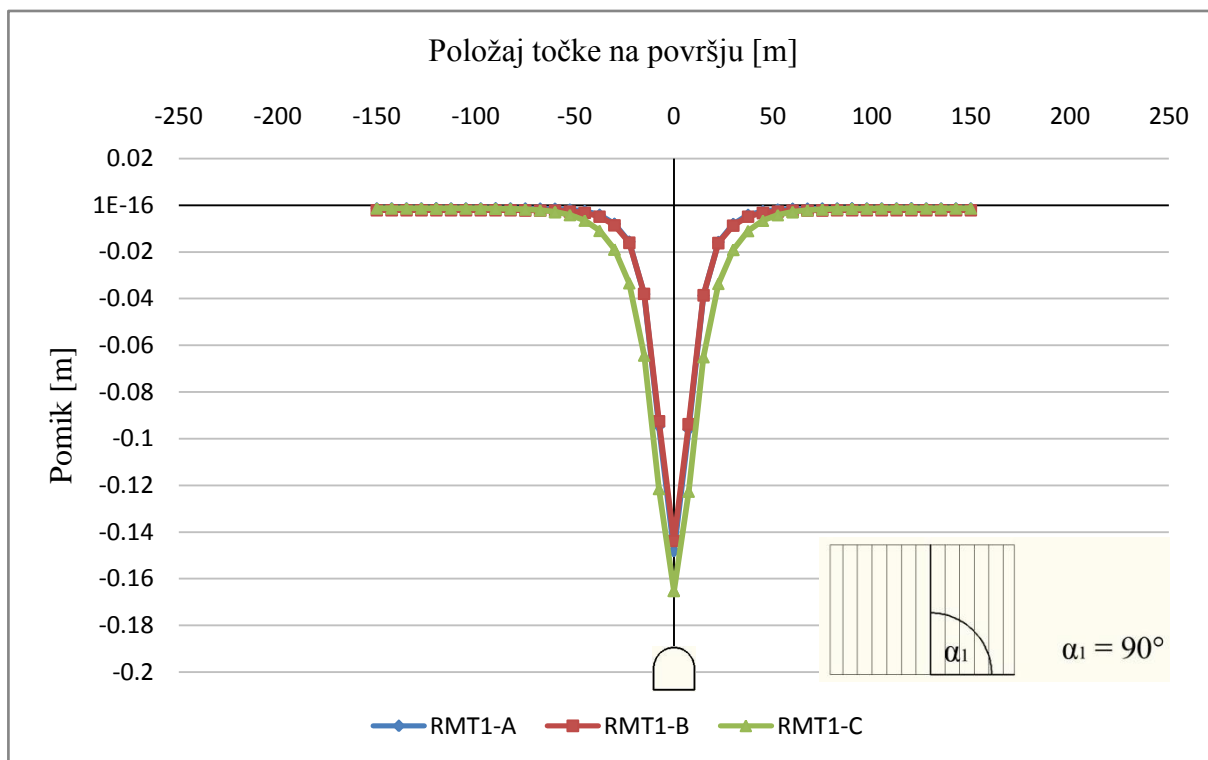
Vrednosti parametrov iz preglednice 6, razen strižnega kota φ_1 , so vzete iz poročila o povratnih numeričnih analizah kaverne predora Šentvid, kjer se je izkazalo, da dokaj visoki elastični moduli v navpični in vodoravni smeri realno opisujejo izmerjene vrednosti togosti kamnine, dokumentirane zdrse po šibkih ploskvah skrilavosti pa so modelirane z relativno nizkim strižnim modulom vzdolž skrilavosti (Klopčič in sod., 2008).

V prvem primeru smo rezultate, dobljene s programom Plaxis 2D, za vse tri materiale (RMT1 – A, RMT1 – B in RMT1 – C), prikazali z diagrami na slikah 19, 20, 21 in 22, ločeno za vsak kot skrilavosti α_1 . Ordinatna os diagrama se ujema z vertikalno središčno osjo profila predorske cevi, abscisna os pa predstavlja površje nad predorom. Na sliki 19 in 20 smo prikazali primerjavo med horizontalno in vertikalno skrilavostjo, kjer je razvidno popolnoma enako obnašanje hribinske mase. Velikostni red pomikov materiala RMT1 – A na sliki 19 je skoraj popolnoma enak materialu RMT1 – A na sliki 20, kar nakazuje na ortogonalno obnašanje hribinske mase v primeru JR materialnega modela. Pri materialih RMT1 – B in RMT1 – C sta velikostna reda pomikov nasprotno obrnjena. Na sliki 19 je velikostni red pomikov RMT1 – B večji od RMT1 – C za toliko, kot je na sliki 20 večji velikostni red pomikov RMT1 – C v primerjavi z RMT1 – B. Opazimo, da pride v primeru horizontalne in vertikalne skrilavosti vedno do največjih deformacij hribinske mase v navpični smeri, vendar zaradi različnih vzrokov. Pri horizontalni skrilavosti pride do upogiba ploskvic hribinske mase, pri vertikalni skrilavosti pa pride do zdrsa hribinske mase med ploskvicami.

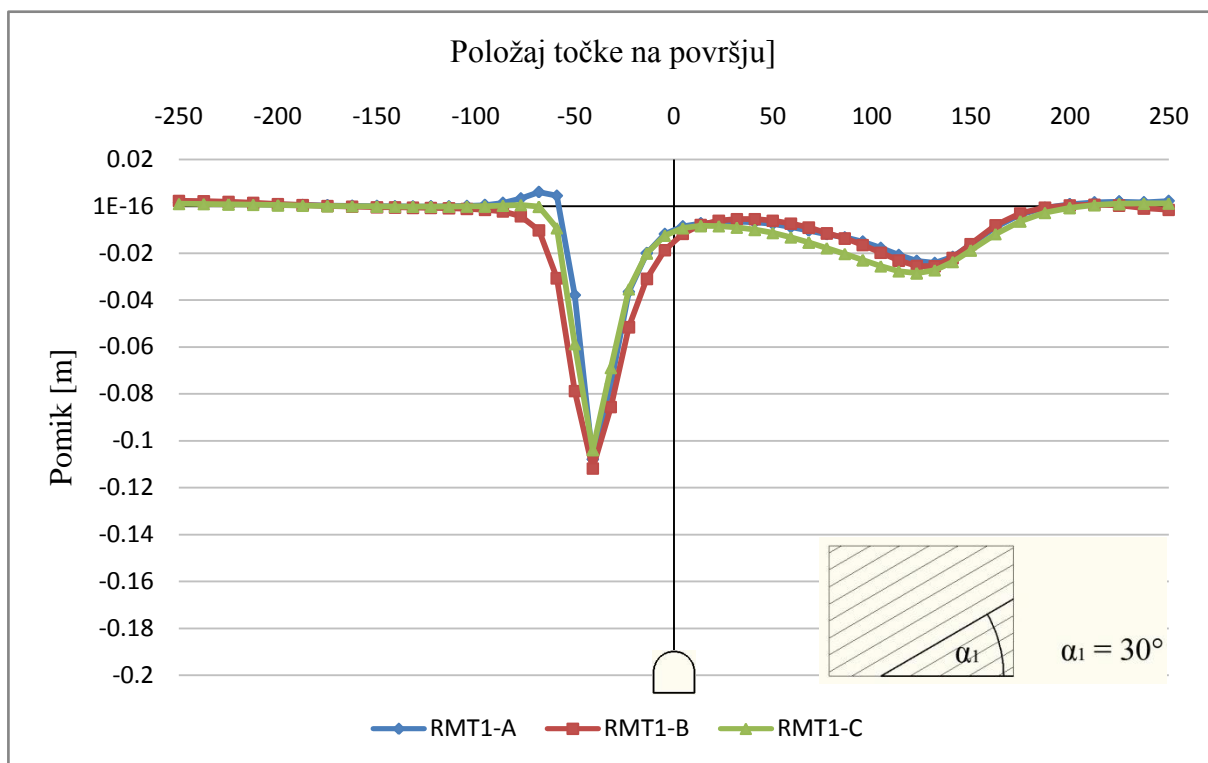
Do podobnega sklepa pridemo, če primerjamo sliki 21 in 22. Do maksimalnih deformacij pride v eni od obeh ortogonalnih smeri. Vendar v tem primeru pride do kombinacije obeh načinov obnašanja hribinske mase – upogib ploskvic in zdrsa med ploskvicami.



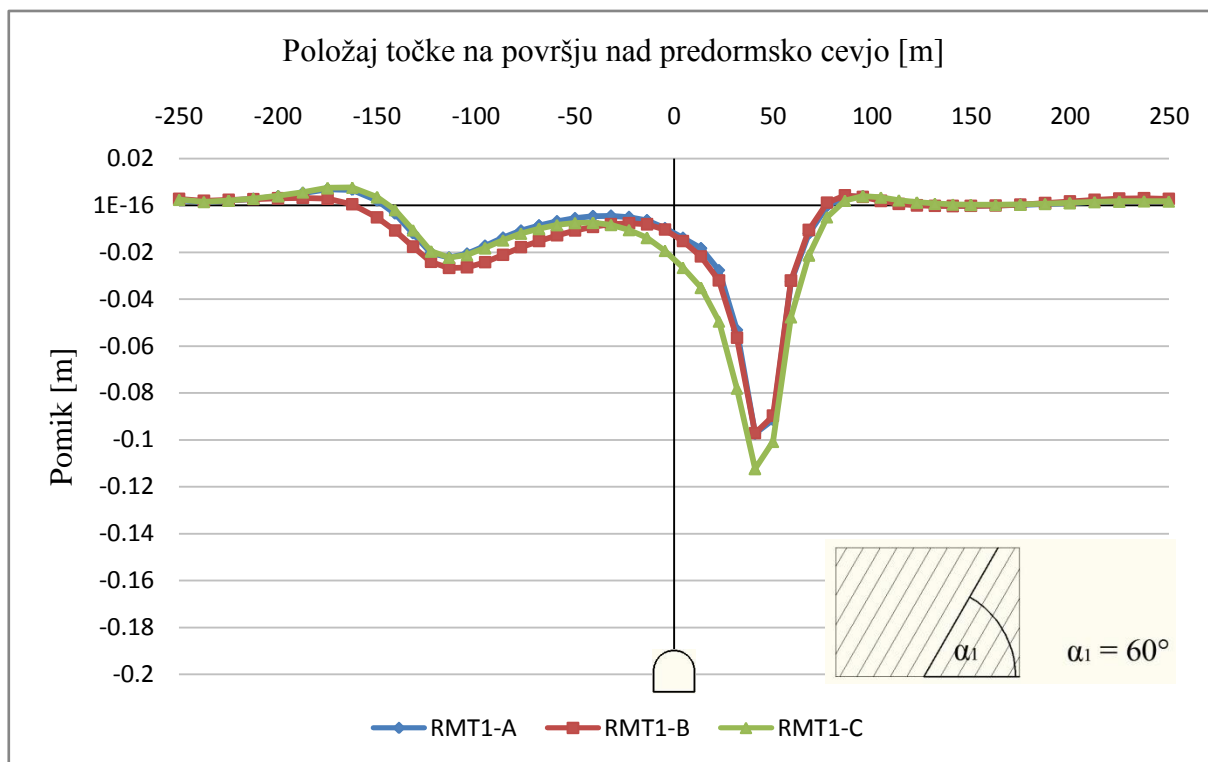
Slika 19: Diagram pomikov na površju nad predorsko cevjo za kot skrilavosti $\alpha_1 = 0^\circ$



Slika 20: Diagram pomikov na površju nad predorsko cevjo za kot skrila-
vosti $\alpha_1 = 90^\circ$

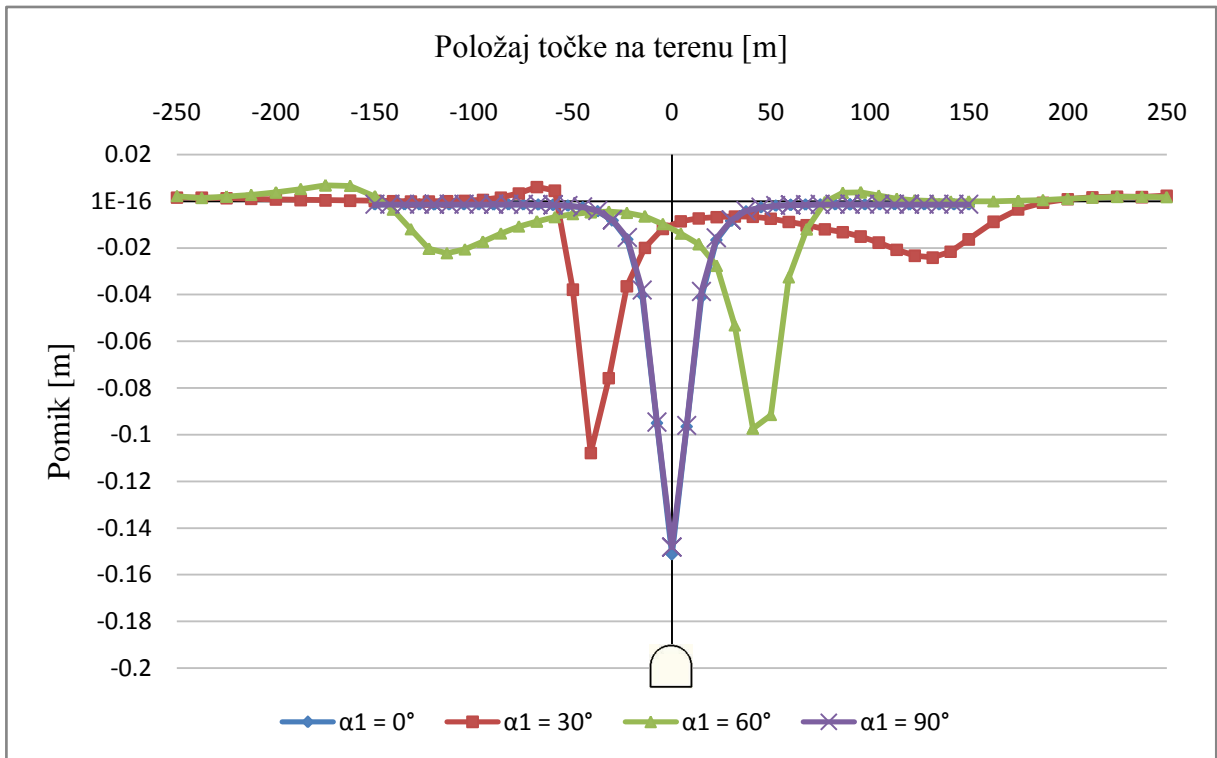


Slika 21: Diagram pomikov na površju nad predorsko cevjo za kot skrila-
vosti $\alpha_1 = 30^\circ$

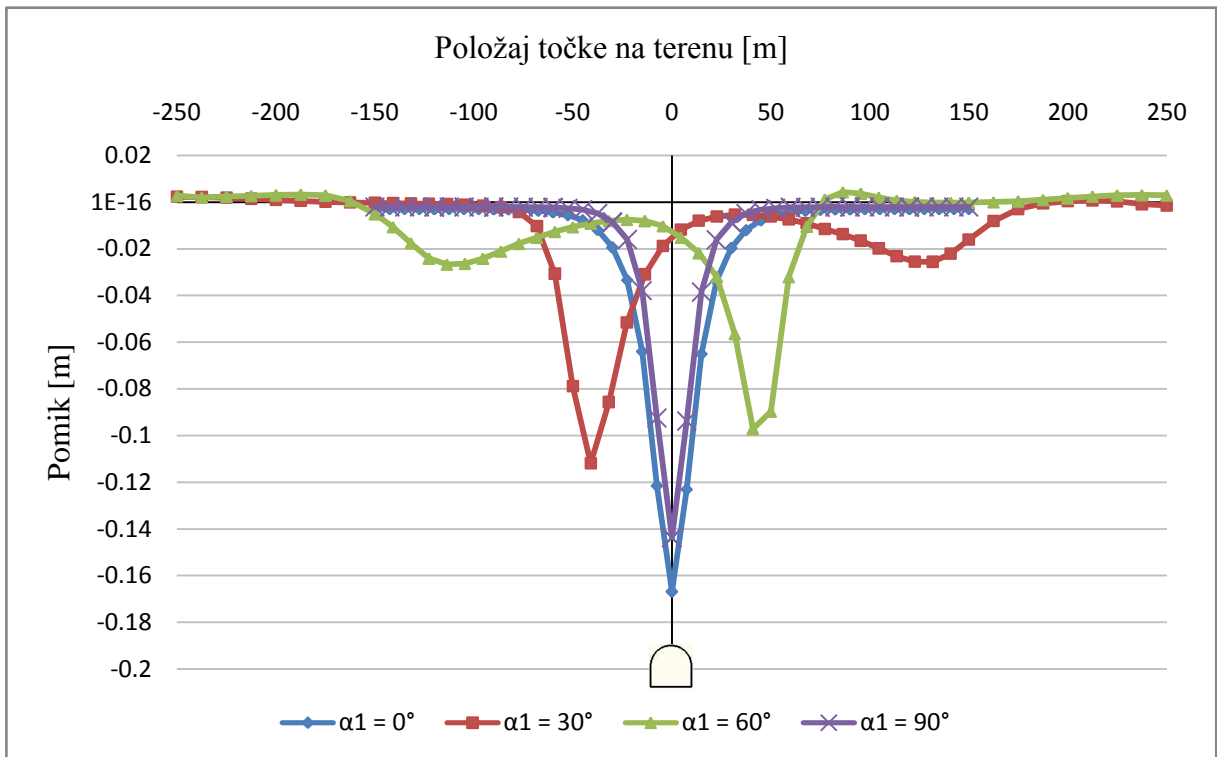


Slika 22: Diagram pomikov na površju nad predorsko cevjo za kot skrilavosti $\alpha_1 = 60^\circ$

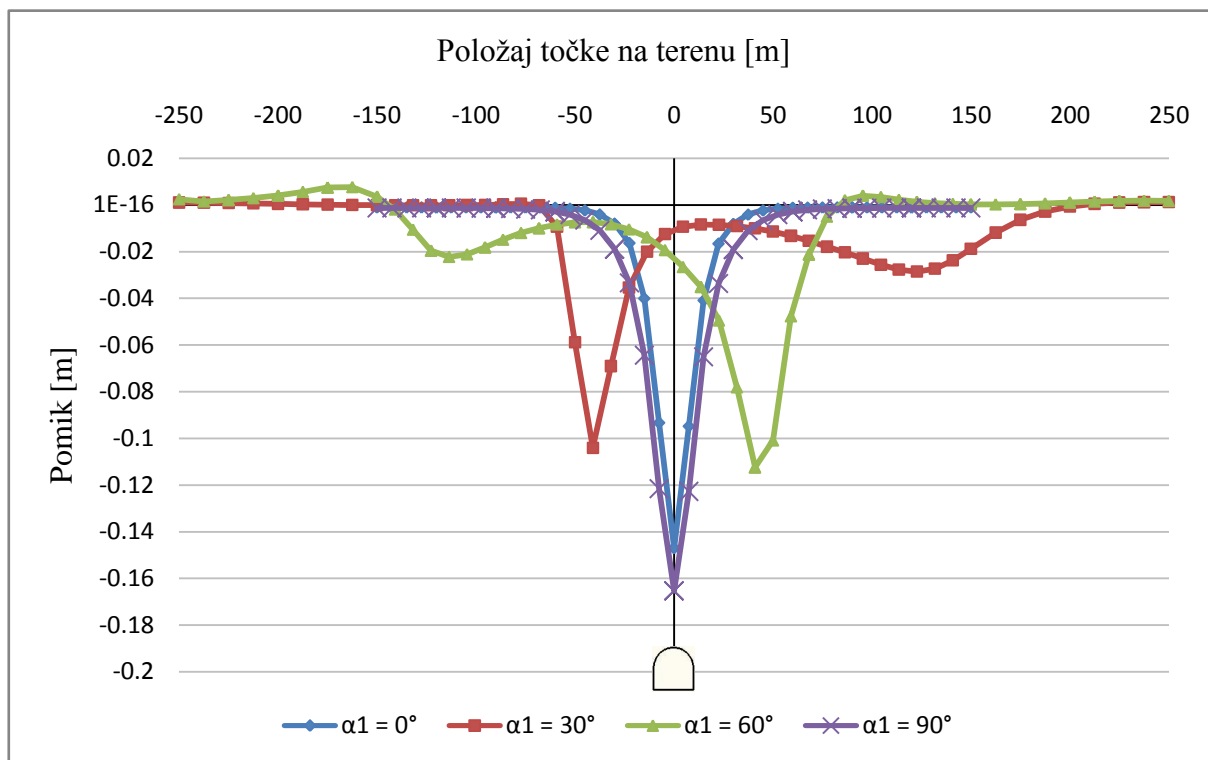
Nadalje smo rezultate prikazali za vse štiri kote skrilavosti α_1 z diagrami na slikah 23, 24 in 25, za vsak material RMT1 – A, RMT1 – B in RMT1 – C ločeno.



Slika 23: Diagram pomikov na površju nad predorsko cevjo za material RMT1 - A



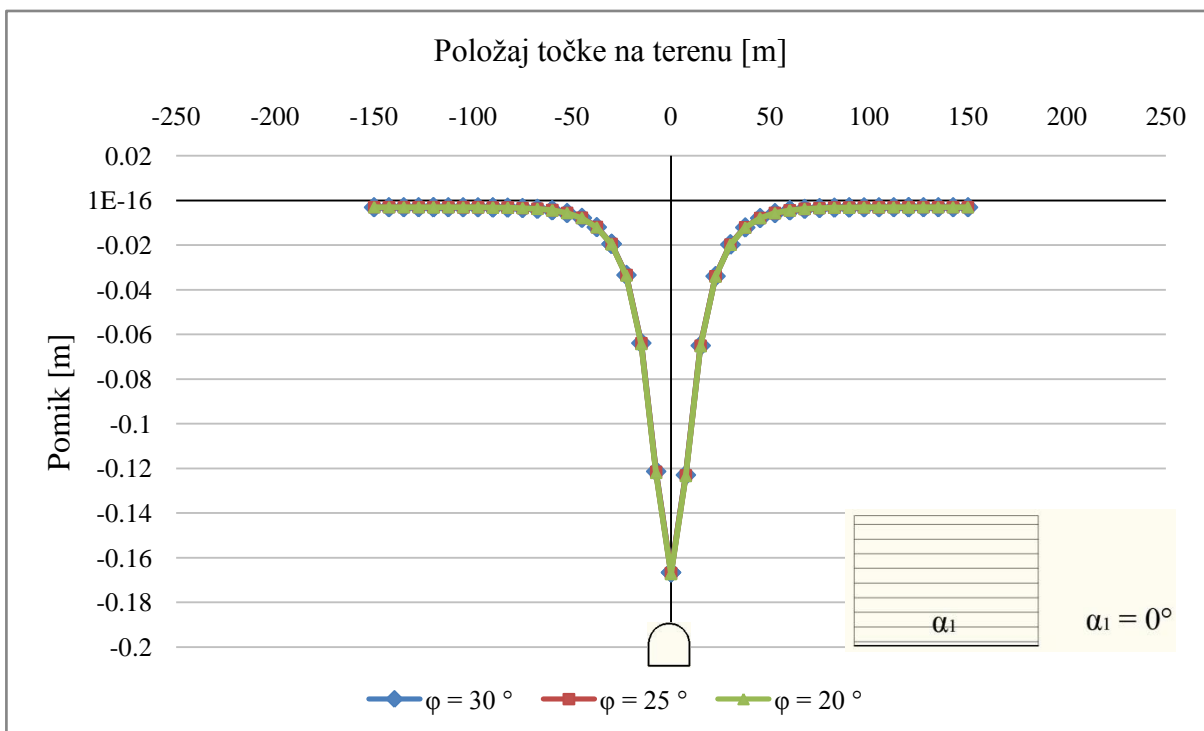
Slika 24: Diagram pomikov na površju nad predorsko cevjo za material RMT1 - B



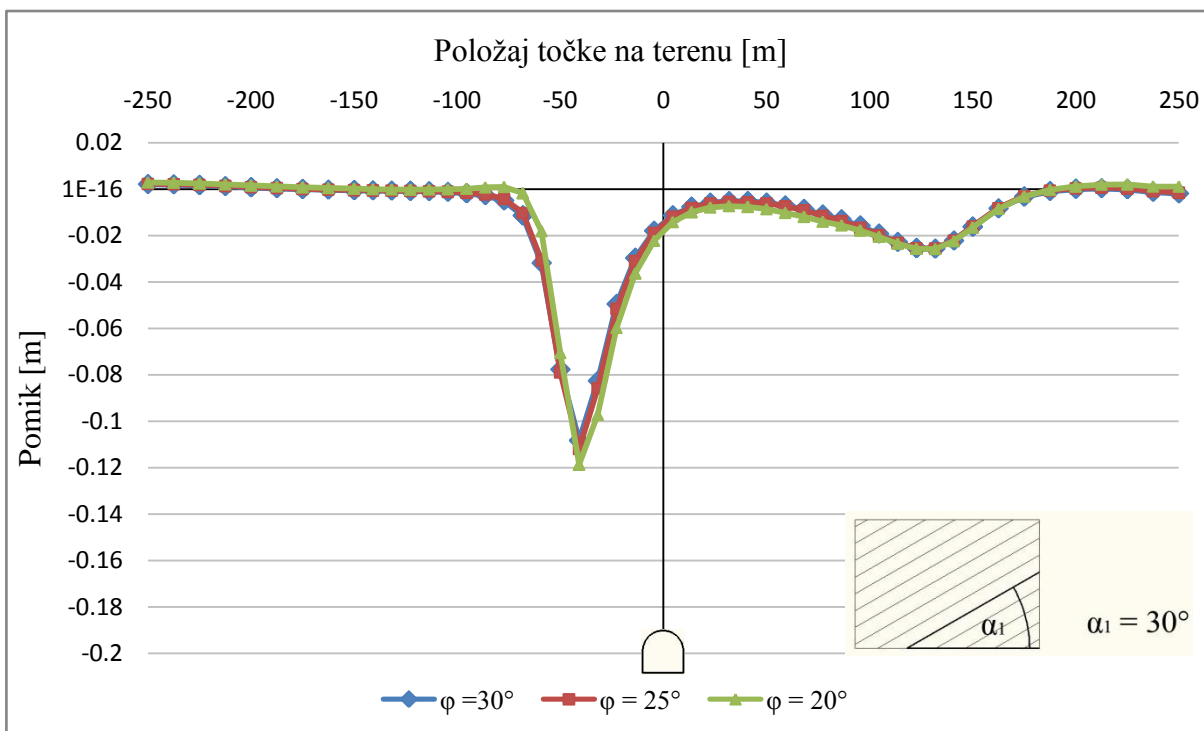
Slika 25: Diagram pomikov na površju nad predorsko cevjo za material RMT1 – C

Iz prikazanih primerov smo ugotovili, da na eni strani sprememba parametra α_1 zelo vpliva na obliko in velikost pomikov površju nad predorsko cevjo. Na drugi strani razmerje elastičnih modulov E_1 in E_2 praktično ne vpliva na obliko pomikov. Viden je le vpliv na velikostni red pomikov.

Podobno smo analizirali vpliv trdnostnih karakteristik hribine, predvsem strižnega kota φ , za dva kota skrilavosti, $\alpha_1 = 0^\circ$ in $\alpha_1 = 30^\circ$. Ostala dva kota skrilavosti, $\alpha_1 = 60^\circ$ in $\alpha_1 = 90^\circ$, izražata simetrijo kotov $\alpha_1 = 0^\circ$ in $\alpha_1 = 30^\circ$, zato ju ni bilo potrebno analizirati. Rezultati, ki so prikazani na sliki 26 in 27, kažejo, da trdnostne karakteristike ne vplivajo bistveno na obnašanje pomikov hribinske mase. Vpliv na velikostni red pomikov je zanemarljivo majhen, pri $\alpha_1 = 0^\circ$ ga praktično ni. Glavna razlika, ki je na strani boljših trdnostnih karakteristik – večji kot je strižni kot φ , krajši je čas izračuna, saj je model bližje linearnemu in je zato tudi konvergenca hitrejša.

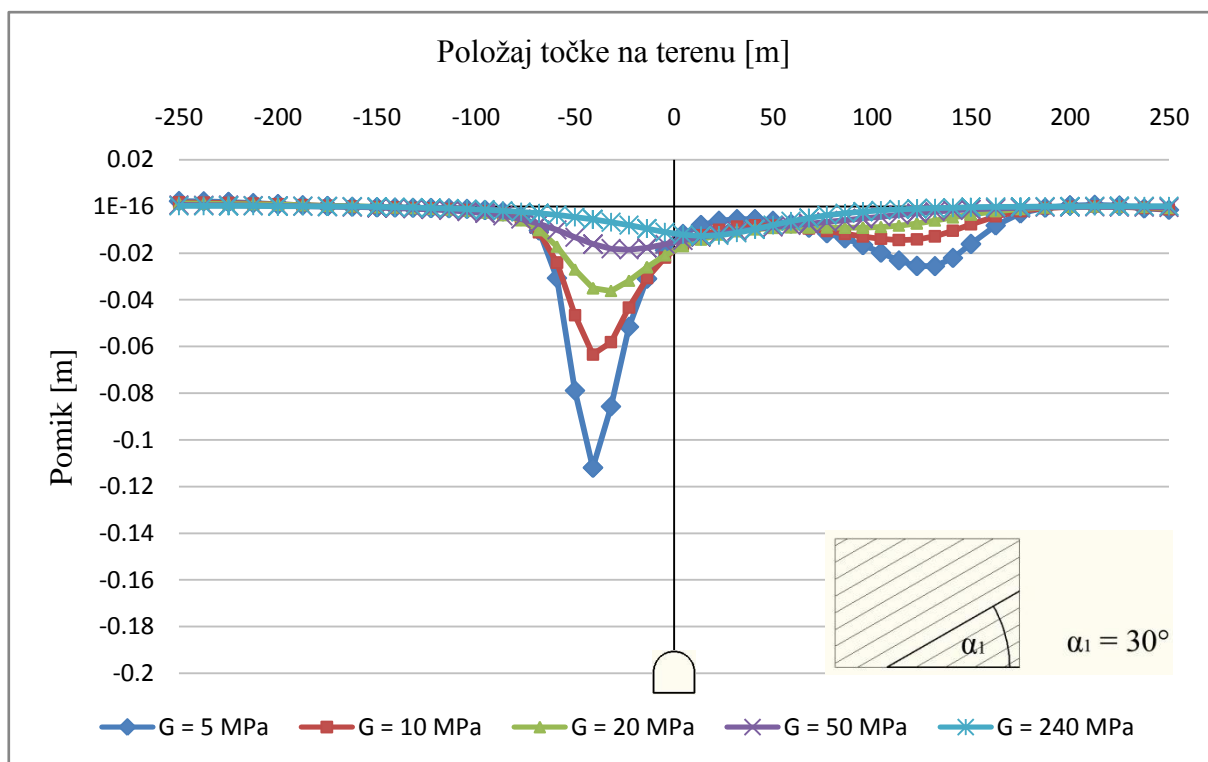


Slika 26: Diagram pomikov na površju nad predorsko cevjo za material RMT1 – B, pri kotu skrilavosti $\alpha_1 = 0^\circ$ za različne kote ϕ



Slika 27: Diagram pomikov na površju nad predorsko cevjo za material RMT1 – B, pri kotu skrilavosti $\alpha_1 = 30^\circ$ za različne kote ϕ

Kot smo že ugotovili, imamo dva načina obnašanja hribinske mase pri Jointed Rock materialnem modelu – upogib ploskvic hribine in zdrsa med ploskvicami hribine. Pri obeh primerih je pomemben strig med ploskvicami. Parameter, ki opisuje razmerje med strižno napetostjo in strižno deformacijo v ravnini ploskvic, je strižni modul G_2 . Analizo smo izvedli na primeru RMT1 – B pri kotu $\alpha_1 = 30^\circ$, saj pride tu do najbolj vidne kombinacije obeh načinov obnašanja hribinske mase. Pri kotu $\alpha_1 = 60^\circ$ bi bila slika simetrična glede na vertikalo. V primeru horizontalne oziroma vertikalne slojevitosti pa ta kombinacija obnašanja hribine ni tako razvidna. V primerjavo smo vzeli tudi strižni modul izračunan po teoriji elastičnosti, $G_2 = \frac{E}{2(1+\nu)} = 240 \text{ MPa}$. Parametrična analiza strižnega modula G_2 je prikazana na sliki 28.



Slika 28: Diagram pomikov na površju nad predorsko cevjo za material RMT1 – B, pri kotu skrilavosti $\alpha_1 = 30^\circ$ za različne vrednosti strižnega modula G_2

Poleg tega, da strižni modul vpliva na velikostni red pomikov, vpliva tudi na obliko krivulje pomikov. Z večanjem vrednosti parametra G_2 , smo vplivali na položaj maksimalnih vrednosti krivulje pomikov. Eden ključnih parametrov pri Jointed Rock konstitutivnem materialnem modelu je torej strižni modul G_2 , seveda poleg kota α_1 .

V analizi smo naredili primerjavo tudi z drugimi tremi konstitutivnimi modeli in sicer Hardening Soil, Mohr – Coulomb in linearno elastičen (Linear Elastic). Primerjava je smiselna, saj Hardening Soil konstitutivni model upošteva razliko med obremenilnim in razbremenilnim modulom E , vendar pa ne moremo podati kota skrilavosti hribine, saj je model izotropen. Prav tako to velja za Mohr – Coulomb materialni model, kateri ne upošteva razlike med obremenilnim in razbremenilnim modulom E . Linearno elastičen konstitutivni model (Linear Elastic) je uporabljen zgolj za primerjavo, saj je obnašanje hribine linearno elastično – Hookov zakon.

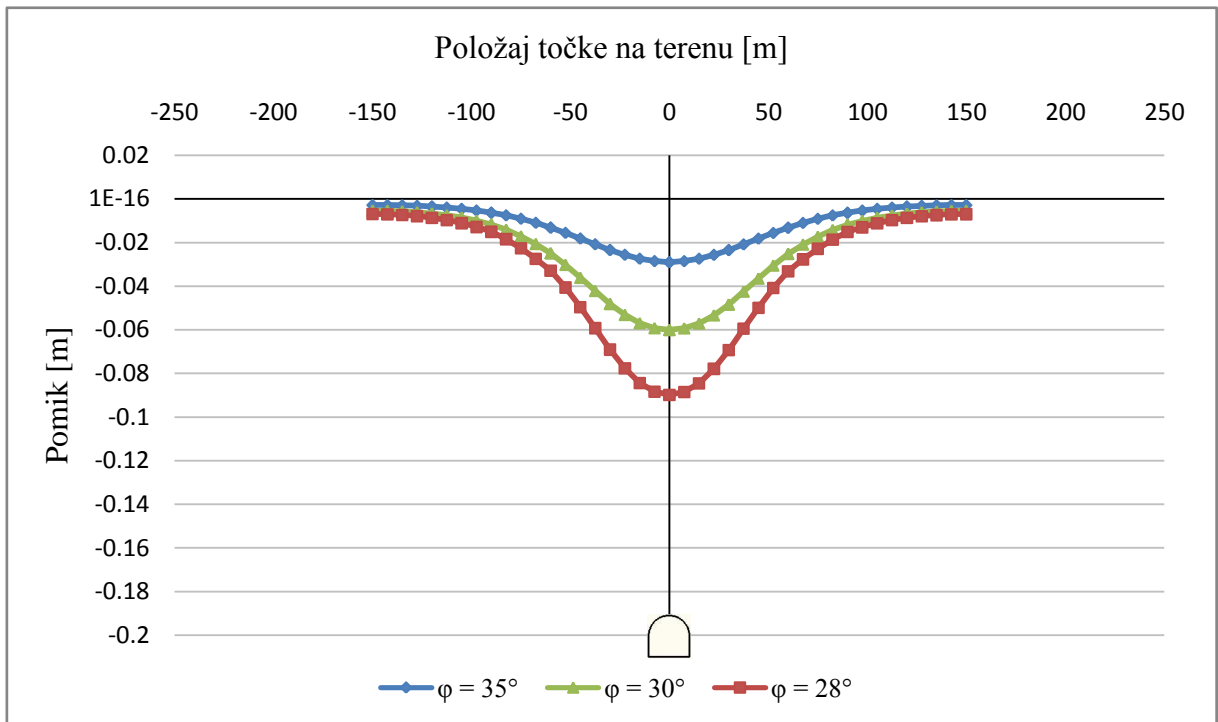
Tako smo v primeru Hardening Soil konstitutivnega modela analizirali vpliv dveh parametrov, strižnega kota φ in kohezije c . Za izhodiščne karakteristike Hardening Soil modela smo vzeli parametre za Jointed Rock konstitutivni model, ki so prikazane v preglednici 7. Sprememba je pri elastičnih modulih, kjer smo naredili poenostavitev in sicer da je tangentni elastični modul E_{oed}^{ref} enak sekantnemu E_{50}^{ref} , oba znašata $1/3$ razbremenilnega modula E_{ur}^{ref} .

Preglednica 7: Izhodišči geomehanski podatki za Hardening Soil materialni model za material RMT1

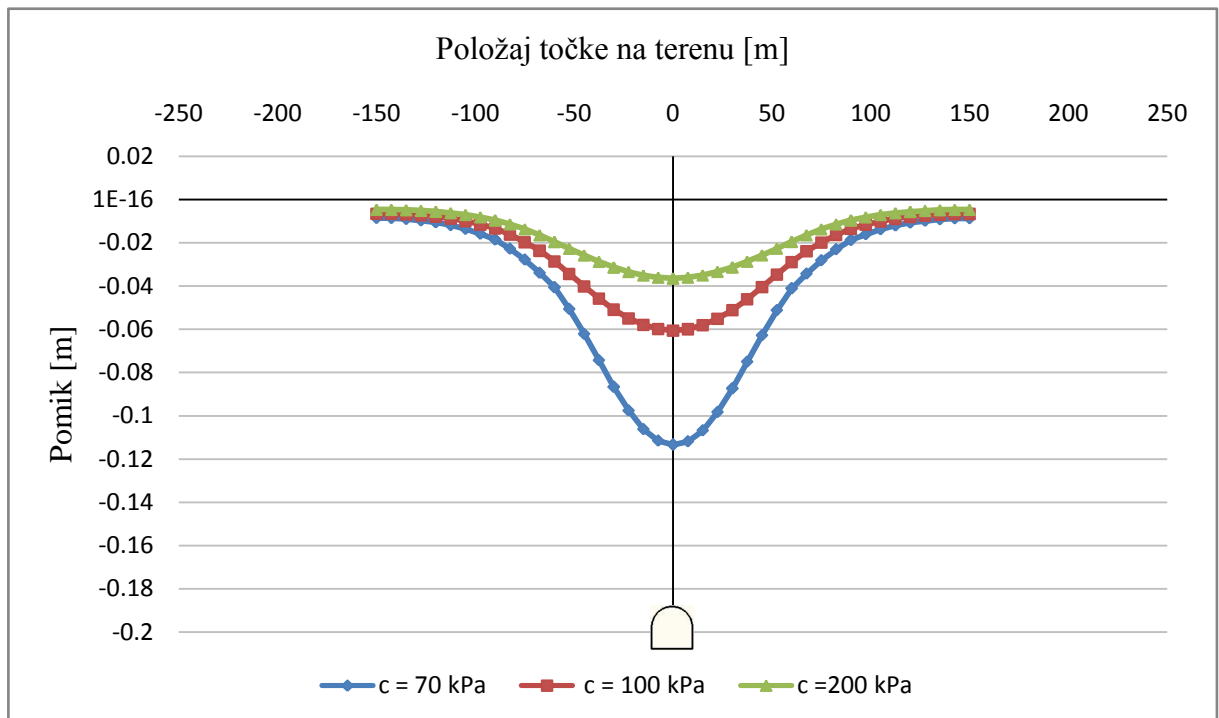
Parameter	Enota	RMT1
γ	[kN/m ³]	26,5
ν		0,25
c_{ref}	[kPa]	50
φ	[°]	25
E_{50}^{ref}	[MPa]	200
E_{oed}^{ref}	[MPa]	200
E_{ur}^{ref}	[MPa]	600
K_0^{nc}		0,577

Izkazalo se je, da se za omenjeni niz parametrov izračun ni izvršil do konca v programu Plaxis 2D, zaradi stabilnostnih težav pri numerični analizi. Posledično smo povečevali vrednosti trdnostnih parametrov. Ločeno vsak parameter posebej, najprej strižni kot φ , nato še kohezijo c . Rezultati so prikazani na sliki 29 in 30. Opazimo lahko, da je v primeru Hardening Soil materialnega modela oblika krivulje posedkov vedno enaka, le velikostni red pomikov se pričakovano zelo razlikuje.

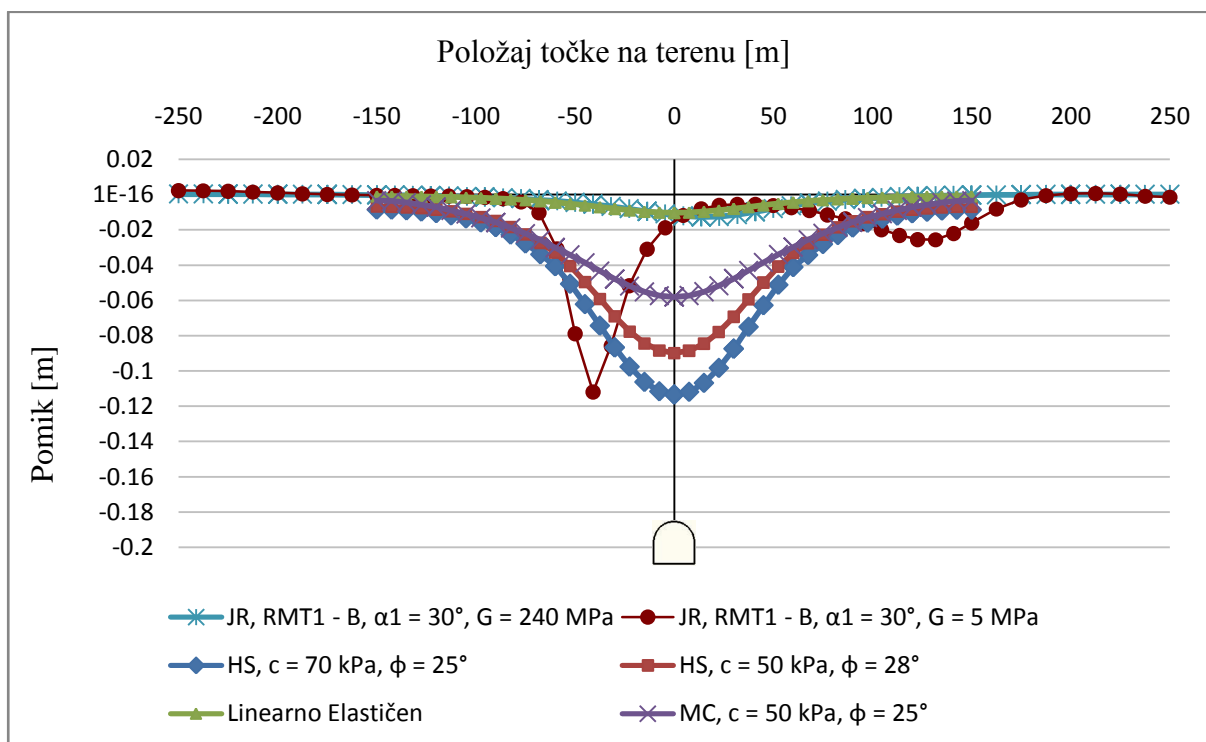
Primerjava pomikov za različne materialne modele (Sliki 31) je bistvena, saj so tako razvidne razlike med posameznimi materialnimi modeli. Prikazana je tudi krivulja pomikov za Mohr – Coulombov in linearno elastičen (Linear Elastic) materialni modeli, kjer smo obema podali vrednosti za elastični modul $E = 300$ MPa in Poissonov količnik $\nu = 0,25$. Za Mohr – Coulombov model smo podali še kohezijo $c = 50$ kPa in strižni kot $\varphi = 25^\circ$.



Slika 29: Diagram pomikov na površju nad predorsko cevjo za Hardening Soil materialni model za različne vrednosti strižnega kota φ



Slika 30: Diagram pomikov na površju nad predorsko cevjo za Hardening Soil materialni model za različne vrednosti kohezije c

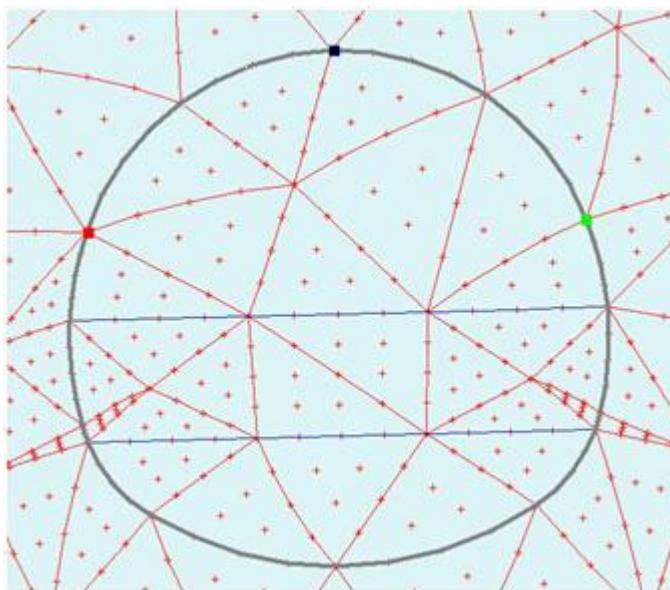


Slika 31: Primerjava diagramov pomikov na površju nad predorsko cevjo za različne konstitutivne materialne modele

5.2.2 Pomiki v predorski cevi

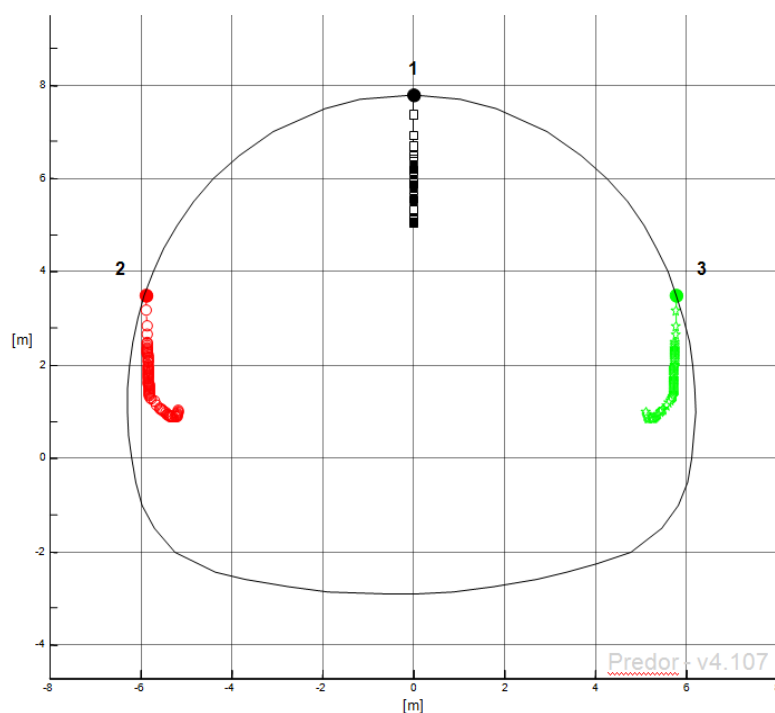
Drugi del parametrične analize se nanaša na vpliv skrilavosti hribine na pomike merskih točk v predorski cevi. Izhajamo iz enakih stališč kot v prvem delu analize (Poglavje 5.2.1), zato je uporaba Jointed Rock materialnega modela tudi tu smiselna in upravičena. V prvem delu analize smo obravnavali tri materiale; RMT1 – A, RMT1 – B in RMT1 – C (Preglednica 6). Tokrat smo uporabili samo en material, saj so rezultati iz prvega dela parametrične analize pokazali, da razmerje med elastičnima moduloma E_1 in E_2 bistveno ne vpliva na obnašanje hribine. Ker v splošnem velja, da je elastični modul E_2 manjši od E_1 (Poglavje 3.4.1), smo zato izbrali material z oznako RMT1 – B (Preglednica 6).

V tem delu analize smo opazovali tri merske točke znotraj predorske cevi. Prva merska točka (točka 1) je črne barve in je postavljena v teme predora, druga (točka 2) je rdeča in je na levem boku kalote predora na višini približno en meter in pol od nivoja kalote, tretja (točka 3) pa je zelena in je na desnem boku kalote predora ter je simetrična točki 2. Pozicija merskih točk je prikazana tudi na sliki 32.

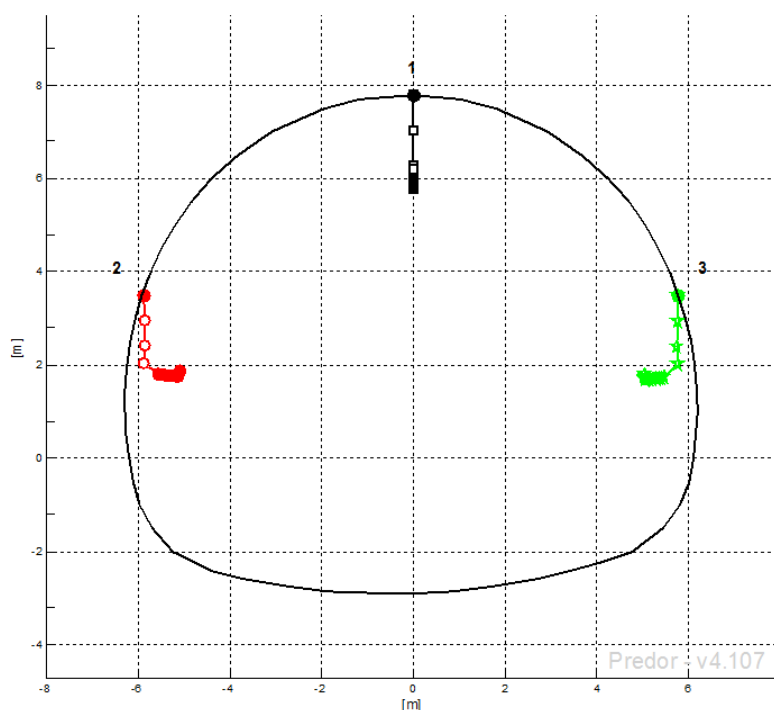


Slika 32: Prikaz merskih točk v cevi predora iz programa Plaxis 2D

Najprej smo v okviru parametrične analize spreminjali kot skrila-
vosti α_1 . Iz krivulj pomikov (sliki 33 in 34) opazimo, da sta si odziva hribinske mase pri kotu skrila-
vosti 0° in 90° , zelo podobna. Velikostni red pomikov je pri kotu 90° nekoliko manjši. Iz diagramov lahko sklepamo, da se v primeru skrila-
vosti pri kotu 0° najprej pojavi upogib ploskvic hribine in nato sledi zdrs med ploskvicami. Za primer skrila-
vosti pri kotu 90° pa lahko rečemo ravno obratno; najprej pride do zdrsa med ploskvicami hribine, nato šele sledi upogib ploskvic. Kot smo že omenili v prvem delu parametrične analize, je pri obnašanju hribine pomemben strig med ploskvicami, ki ga v Jointed Rock modelu opišemo preko strižnega modula G_2 .

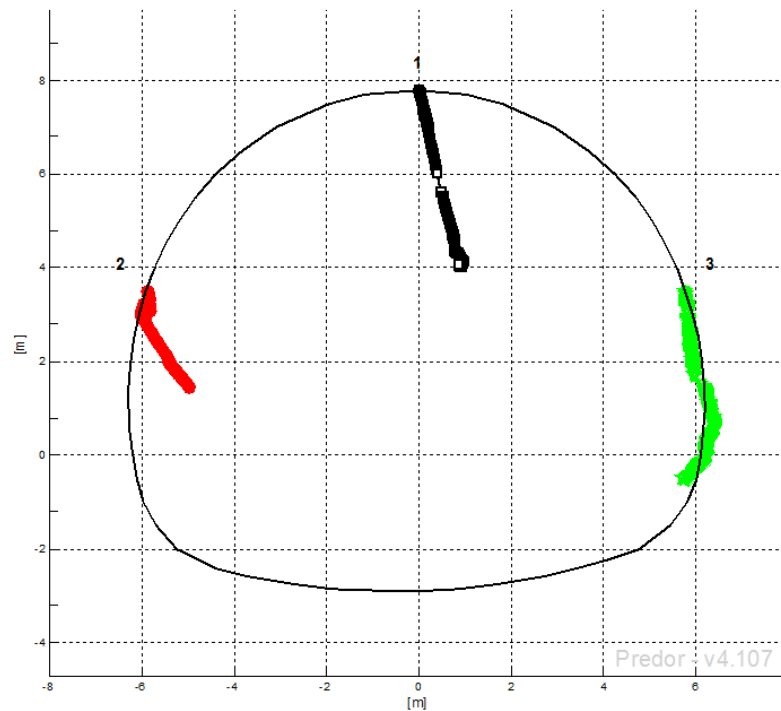


Slika 33: Diagram pomikov v predorski cevi za kot slojevitosti $\alpha_1 = 0^\circ$ (razmerje geometrija : pomik = 1 : 25)

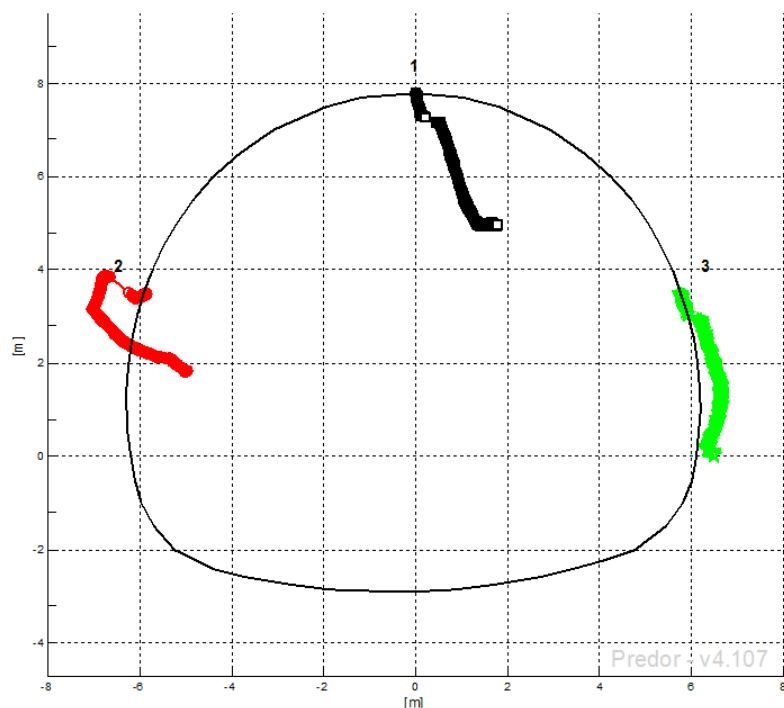


Slika 34: Diagram pomikov v predorski cevi za kot slojevitosti $\alpha_1 = 90^\circ$ (razmerje geometrija : pomik = 1 : 25)

Odziv hribine pri kotu skrjavosti 30° (Slika 35) je lep primer, kjer kažejo krivulje pomikov približno ortogonalno smer glede na orientacijo skrjavosti hribine. Tu ponovno pride do izrazitega upogib ploskvic hribine. Ko povišamo kot skrjavosti na 60° (Slika 36), temu ni tako, saj smeri krivulj pomikov niso več ortogonalne na orientacijo skrjavosti. To kaže, da pride do prepletanja med upogibom in zdrsom ploskvic. Velikost pomikov je v tem primeru manjša.



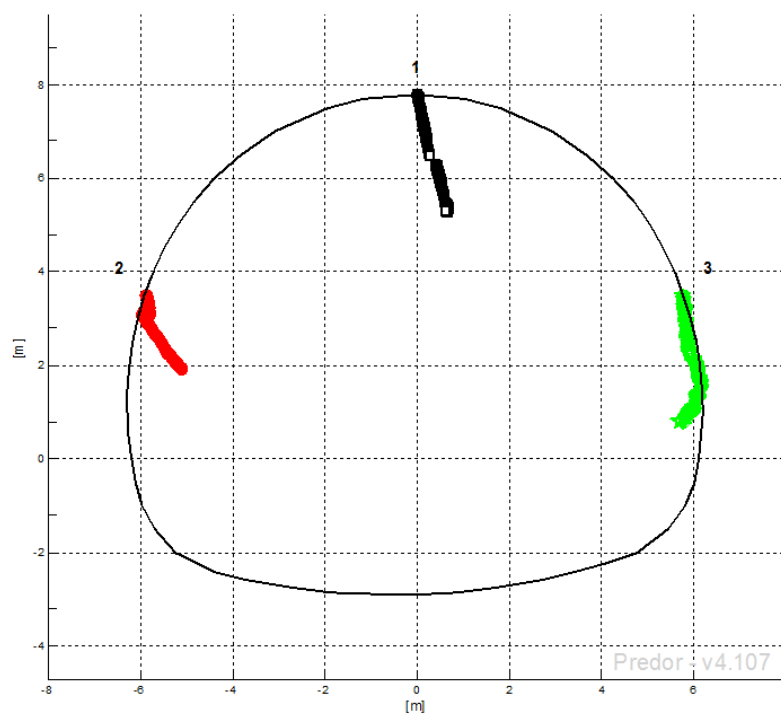
Slika 35: Diagram pomikov v predorski cevi za kot slojevitosti $\alpha_1 = 30^\circ$ (razmerje geometrija : pomik = 1 : 25)



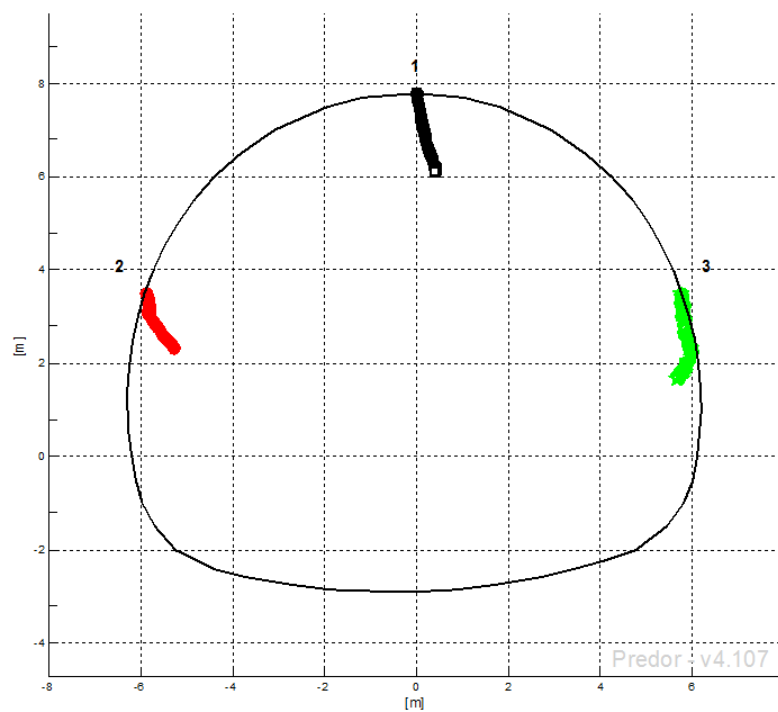
Slika 36: Diagram pomikov v predorski cevi za kot slojevitosti $\alpha_1 = 60^\circ$ (razmerje geometrija : pomik = 1 : 25)

V nadaljevanju smo izbrali numerični model, kjer je podan kot skrilavosti 30° , saj je bil ta najbolj reprezentativen primer za nadaljnjo parametrično analizo.

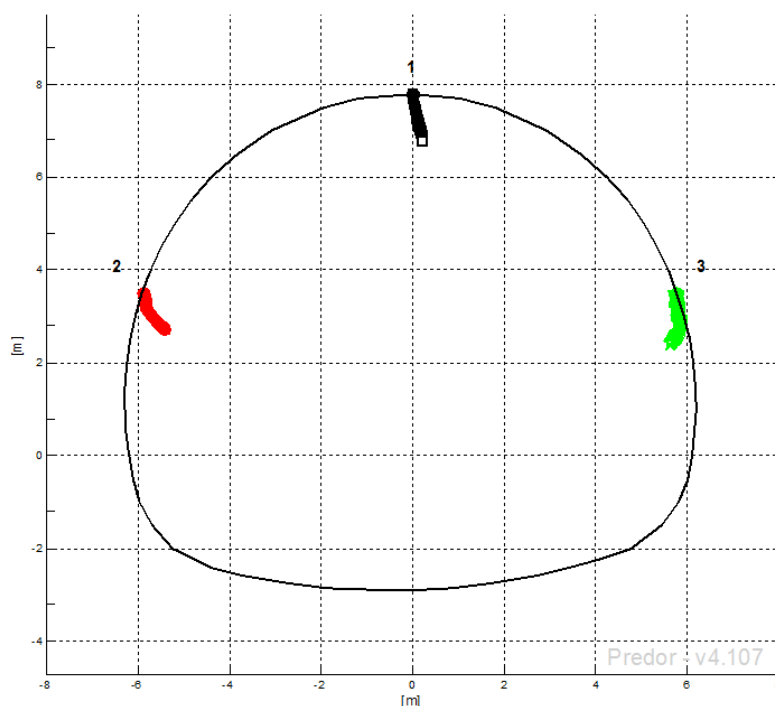
V naslednjem koraku smo zviševali vrednost strižnemu modulu G_2 . Pri izhodiščnem modelu je bila podana vrednost strižnega modula 5 MPa (Preglednica 6). Na slikah 35, 37, 38 in 39 so prikazani diagrami za posamezne vrednosti strižnega modula G_2 , kjer je razvidno, da se velikostni red pomikov manjša, medtem ko strižni modul narašča. Pri tem je zanimivo to, da ni prišlo do sprememb v obliki krivulj pomikov, te so se zgolj pomanjšale.



Slika 37: Diagram pomikov v predorski cevi za strižni modul $G_2 = 10$ MPa (razmerje geometrija : pomik = 1 : 25)

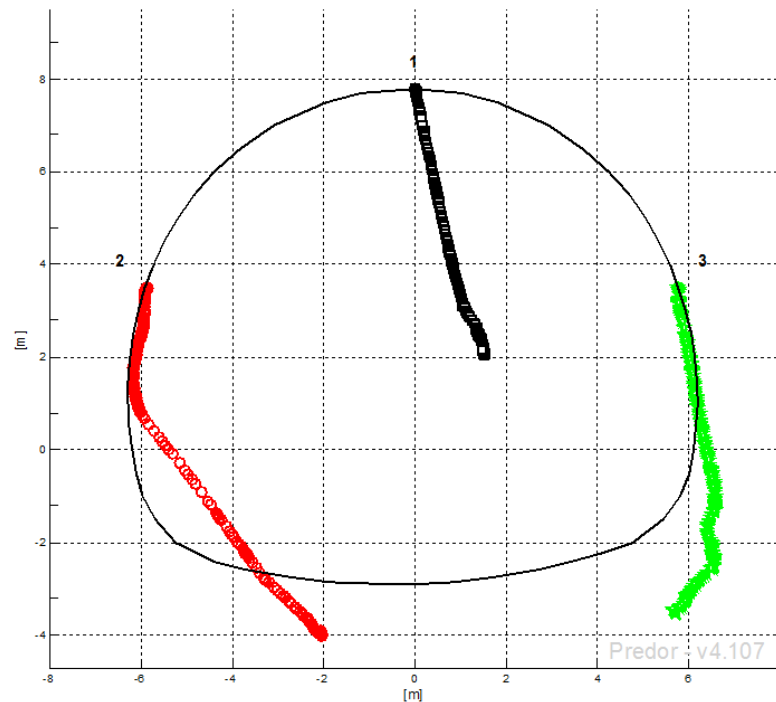


Slika 38: Diagram pomikov v predorski cevi za strižni modul $G_2 = 20$ MPa (razmerje geometrija : pomik = 1 : 25)



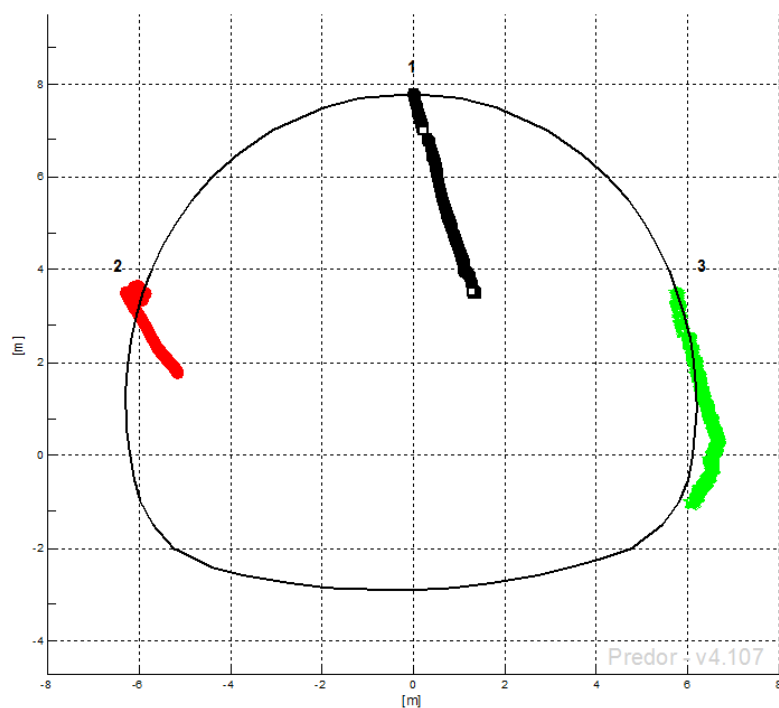
Slika 39: Diagram pomikov v predorski cevi za strižni modul $G_2 = 50$ MPa (razmerje geometrija : pomik = 1 : 25)

Na podlagi rezultatov za strižni modul G_2 smo nadaljevali z analizo elastičnega modula E_1 in E_2 , katerima smo zmanjšali vrednost za faktor deset, lahko pričakovali povečanje pomikov (Sliki 35 in 40). To se je sicer zgodilo, vendar sta bila sedaj pomika v točki 2 in točki 3 večja od pomika točke 1. Razlog za tak odziv hribine je verjetno v tem, da s tem ko smo zmanjšali elastična modula E_1 in E_2 , smo posledično zmanjšali tudi togost hribine. Zaradi izkopa predorske cevi pride do spremembe napetostnega stanja, ki povzroči, da se največje napetosti prenesejo na boke predorske cevi. Ker je togost hribine manjša, se na mestih največje obremenitve zgodijo tudi največje deformacije.

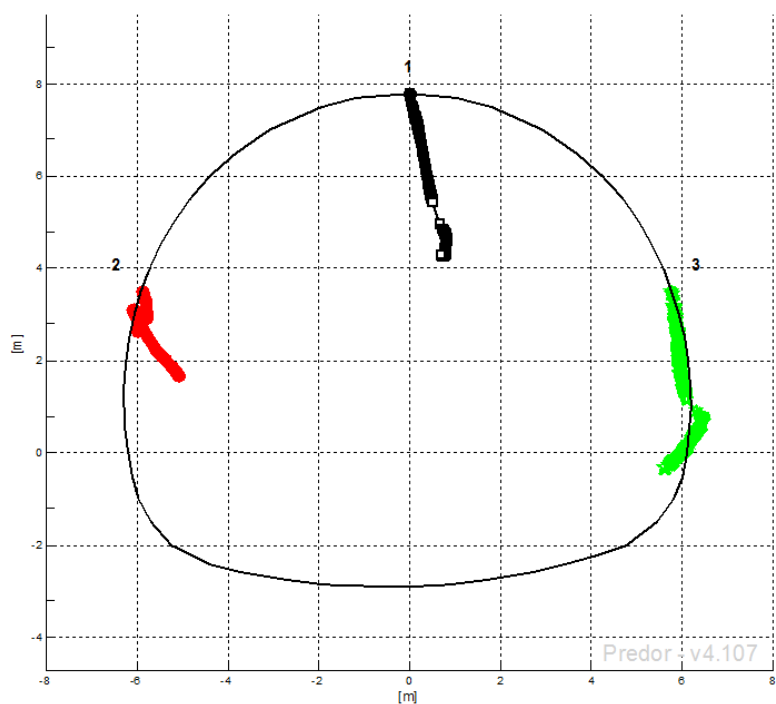


Slika 40: Diagram pomikov v predorski cevi za elastični modul $E_1 = 60$ MPa in $E_2 = 30$ MPa (razmerje geometrija : pomik = 1 : 15)

Nadalje smo analizirali tudi vpliv trdnostnih parametrov. Na slikah 35, 41 in 42 so prikazani diagrami za različne vrednosti strižnega kota φ . Razvidno je, da tudi v tem delu parametrične analize strižni kot φ bistveno ne vpliva na obnašanje hribinske mase.

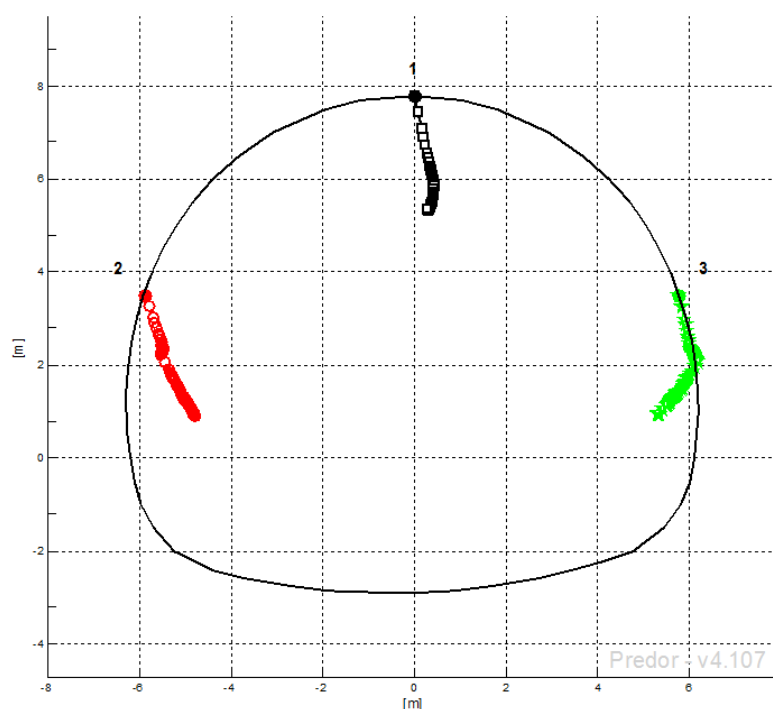


Slika 41: Diagram pomikov v predorski cevi za strižni kot $\varphi = 20^\circ$ (razmerje geometrija : pomik = 1 : 25)



Slika 42: Diagram pomikov v predorski cevi za strižni kot $\varphi = 30^\circ$ (razmerje geometrija : pomik = 1 : 25)

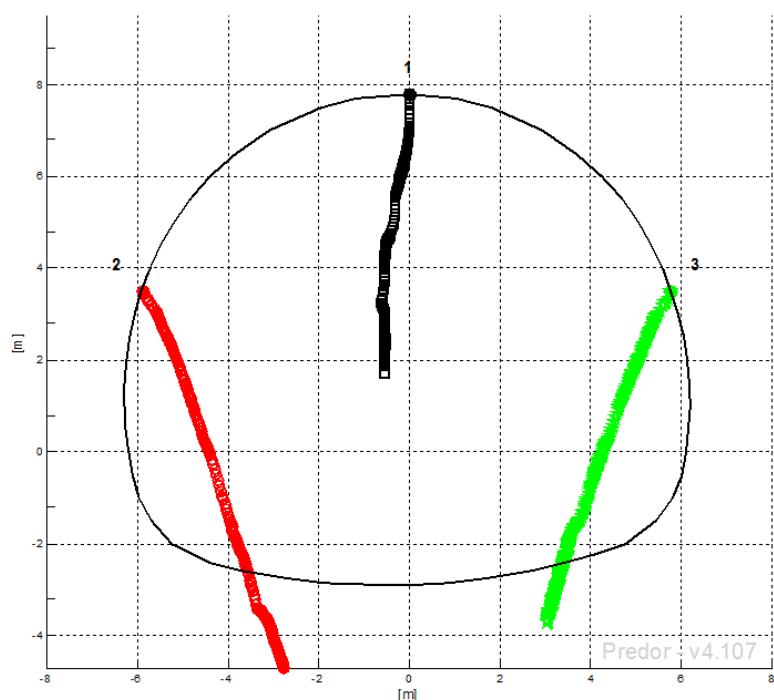
Naslednji trdnostni parameter, katerega vpliv smo prav tako analizirali, je kohezija c . Primerjavo smo izvedli med izhodiščnim numeričnim modelom, kjer smo uporabili vrednost kohezije 50 kPa (Slika 35 in Preglednica 6) in numeričnim modelom, kjer smo uporabili kohezijo 1000 kPa (Slika 43). Zopet lahko rečemo, da sprememba kohezije bistveno ne vpliva na odziv hribinske mase. Zaznali smo zgolj vpliv na hitrost numeričnega izračuna v programu Plaxis 2D.



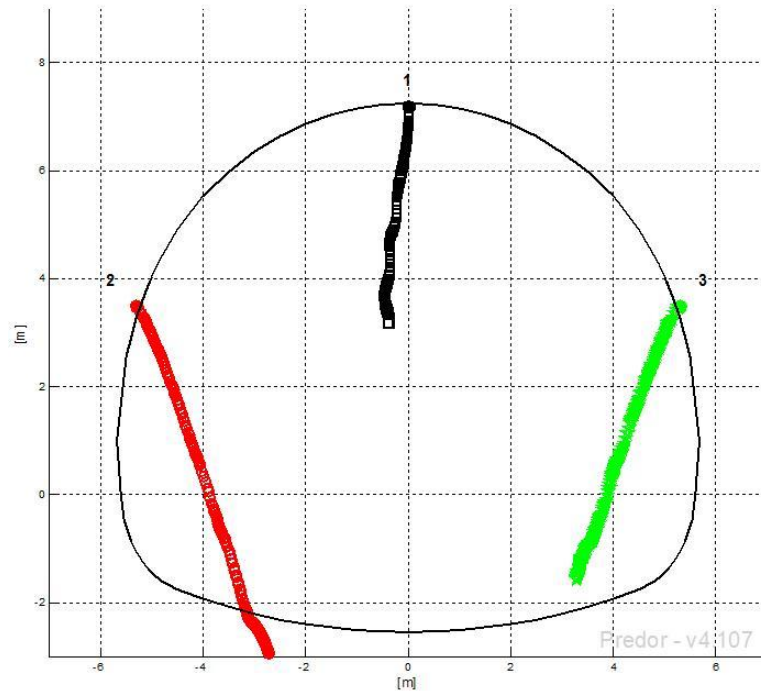
Slika 43: Diagram pomikov v predorski cevi za kohezijo $c = 1000$ kPa (razmerje geometrija : pomik = 1 : 25)

Za primerjavo smo tudi tokrat analizirali primer s Hardening Soil materialnim modelom, kjer smo uporabili podatke iz prvega dela parametrične analize (Preglednica 7). Prav tako smo dodali še Mohr – Coulombov in linearno elastičen (Linear Elastic) materialni model z enakimi podatki kot v prvem delu parametrične analize, zgolj za primerjavo.

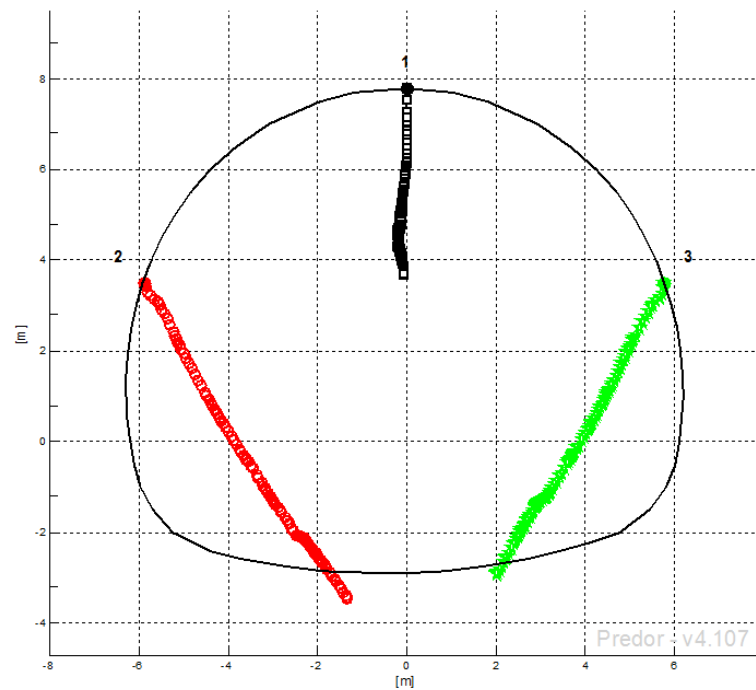
Tako lahko za zadnje štiri primere (slike 44, 45, 46 in 47) rečemo, da je obnašanje hribine pri vseh podobno, razen v primeru linearno elastičnega materialnega modela (Linear Elastic), za katerega vemo, da ni primeren za modeliranje temeljnih tal pri gradnji predora. Za Hardening Soil in Mohr – Coulombov materialni model so opazne razlike zgoj na račun velikostnega reda pomikov, kar je posledica dvižkov, ki so večji v primeru Mohr – Coulombovega materialnega modela, saj ne upošteva večjega elastičnega modula za razbremenitev. Če primerjavo razširimo še na Jointed Rock materialni model, vidimo iz prejšnjih diagramov, da kot skrivalosti α_1 in strižni modul G bistveno vplivata na obnašanje hribinske mase.



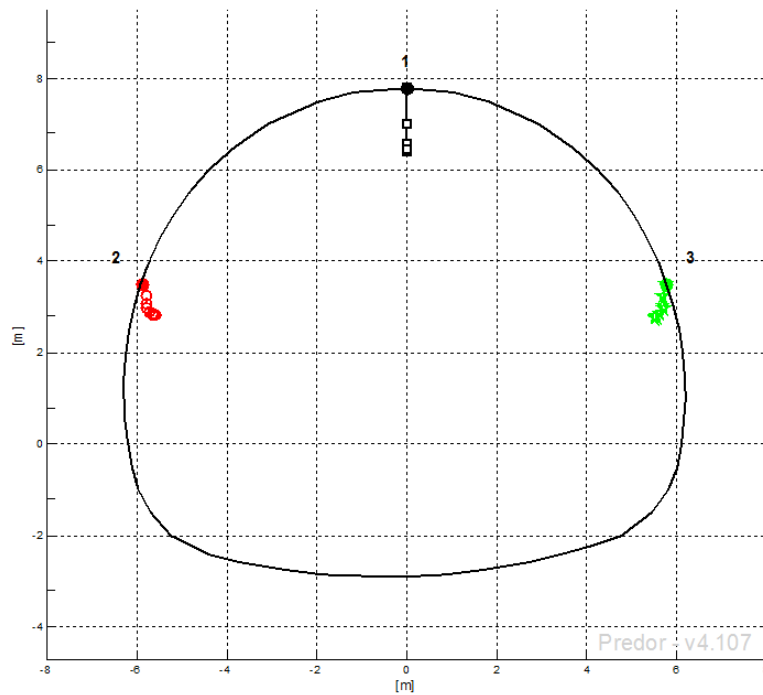
Slika 44: Diagram pomikov v predorski cevi za Hardening Soil materialni model, kjer je kohezija $c = 50$ kPa in strižni kot $\varphi = 28^\circ$ (razmerje geometrija : pomik = 1 : 25)



Slika 45: Diagram pomikov v predorski cevi za Hardening Soil materialni model, kjer je kohezija $c = 70$ kPa in strižni kot $\varphi = 25^\circ$ (razmerje geometrija : pomik = 1 : 25)



Slika 46: Diagram pomikov v predorski cevi za Mohr – Coulombov materialni model, kjer je kohezija $c = 50$ kPa in strižni kot $\varphi = 28^\circ$ (razmerje geometrija : pomik = 1 : 25)



Slika 47: Diagram pomikov v predorski cevi za linearno elastični materialni model (Linear Elastic) (razmerje geometrija : pomik = 1 : 25)

5.3 Povratne analize

Na podlagi rezultatov parametrične analize smo izvedli povratno analizo za predore Šentvid, Trojane in Golovec. Namen povratne analize je primerjava med izračunanimi pomiki in merjenimi pomiki. Za primera povratne analize pomikov v predorski cevi smo obravnavali izbrane merske profile predora Šentvid in Trojane, v primeru povratne analize pomikov na površju nad predorom pa razpoložljive merske profile med predorom Trojane in Golovec. Pozicija računskih točk je enaka poziciji točk, kjer so bili pomiki merjeni.

5.3.1 Pomiki v predorski cevi

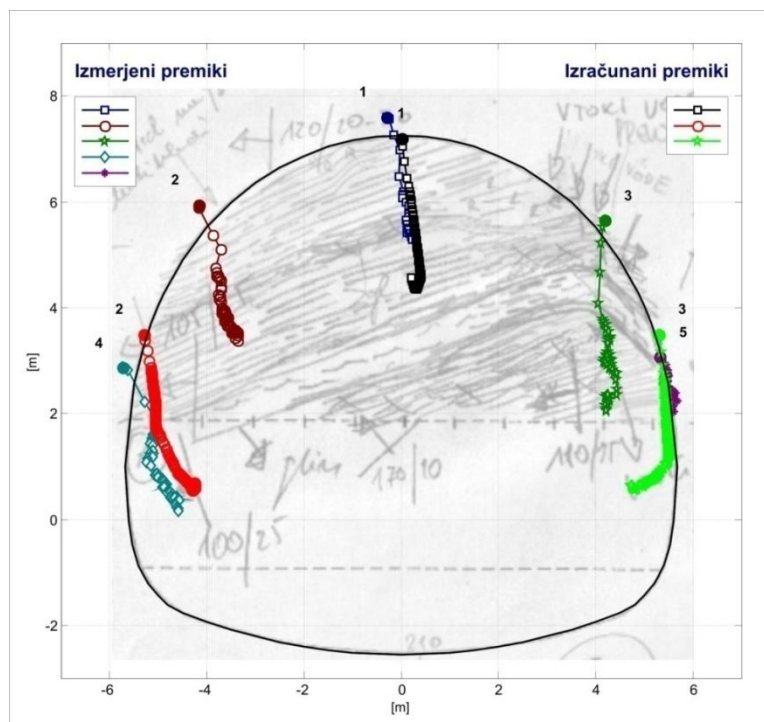
5.3.1.1 Predor Šentvid

Pri povratni analizi za predor Šentvid smo uporabili enak numerični model kot v parametrični analizi, razen nekaterih parametrov, ki definirajo Jointed Rock materialni model. Tako smo na podlagi karakteristik geološke strukture profila (Poglavje 3.2.1, Slika 1), definirali kot skrila-
vosti α_1 (Preglednica 8).

Preglednica 8: Geomehanske karakteristike Jointed Rock materialnega modela (RMT1) za predor Šentvid

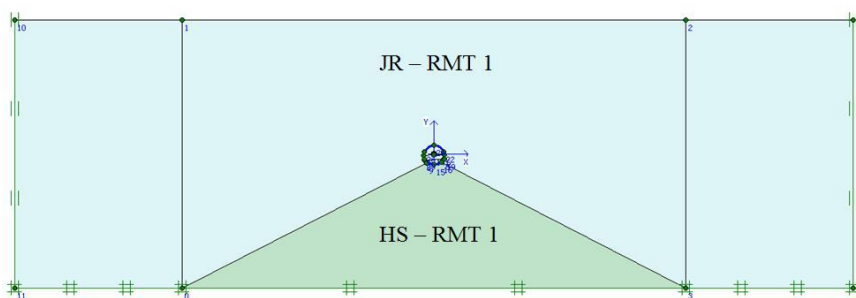
Parameter	Enota	RMT1
γ	[kN/m ³]	26,5
$\nu_1 = \nu_2$		0,25
G_2	[MPa]	5,0
c_1	[kPa]	50
φ_1	[°]	25
E_1	[MPa]	600
E_2	[MPa]	300
α_1	[°]	15

Izračun pomikov za podatke podane iz preglednice 8 je prikazan na sliki 48. Kot je razvidno iz primerjave z merjenimi pomiki, pride do prevelikih dvižkov, kar vpliva na obnašanje hribine zaradi neupoštevanja razbremenilnega elastičnega modula (Jointed Rock materialni model ne razlikuje elastičnih modulov obremenitve in razbremenitve) (Klopčič in sod., 2008).



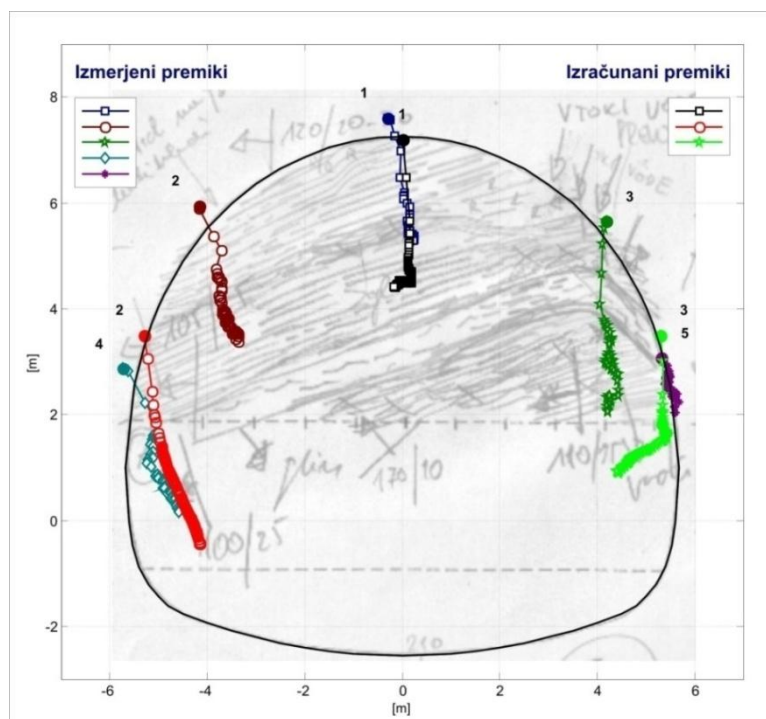
Slika 48: Diagram primerjave med izračunanimi pomiki za Jointed Rock materialni model in merjenimi pomiki v cevi predora Šentvid (razmerje geometrija : pomik = 1 : 25)

Zaradi tega smo za hribino v območju pod predorom (obarvana temno zeleno na sliki 49) uporabili Hardening Soil materialni model s karakteristikami, ki so prikazane v preglednici 7, poglavje 5.2.1 in smo jih tudi uporabili v parametrični analizi.



Slika 49: Numerični model za predor Šentvid ob uporabi Hardening Soil modela pod predorom v Plaxis 2D

Rezultati numerične analize so prikazani na sliki 50, kjer je prikazana primerjava med izračunanimi in merjenimi vrednostmi pomikov. Izkaže se, da je uporaba tako Jointed Rock materialnega modela v kombinaciji s Hardening Soil materialnim modelom dobra, saj smo na ta način vplivali na pomike bočnih točk (točka 2 in 3), predvsem leve točke, medtem ko je odziv temenske točke ostal enak. Tako smo zmanjšali vpliv dvižkov, ki se pojavijo zaradi razbremenitve temeljnih tal po izkopu predora.



Slika 50: Diagram primerjave med izračunanimi pomiki za Jointed Rock materialni model v kombinaciji s Hardening Soil materialnim modelom in merjenimi pomiki v cevi predora Šentvid (razmerje geometrija : pomik = 1 : 25)

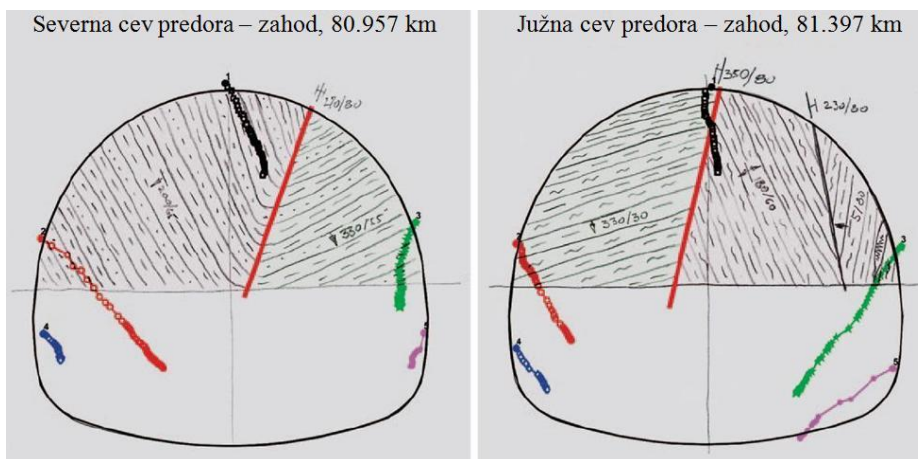
5.3.1.2 Predor Trojane

V primeru predora Trojane smo analizirali dva prečna profila in sicer:

- v severni cevi, prečni profil km 80,957 (Profil A)
- v južni cevi, prečni profil km 81,397 (Profil B).

Oba prečna profila sta prikazana na sliki 51. Zanju je značilno, da potekata skozi lokalni gubi: Profil A skozi sinklinalo, profil B pa skozi antiklinalo. Sinklinala je vbočeni del nagubanih zemeljskih plasti, antiklinala pa izbočeni del.

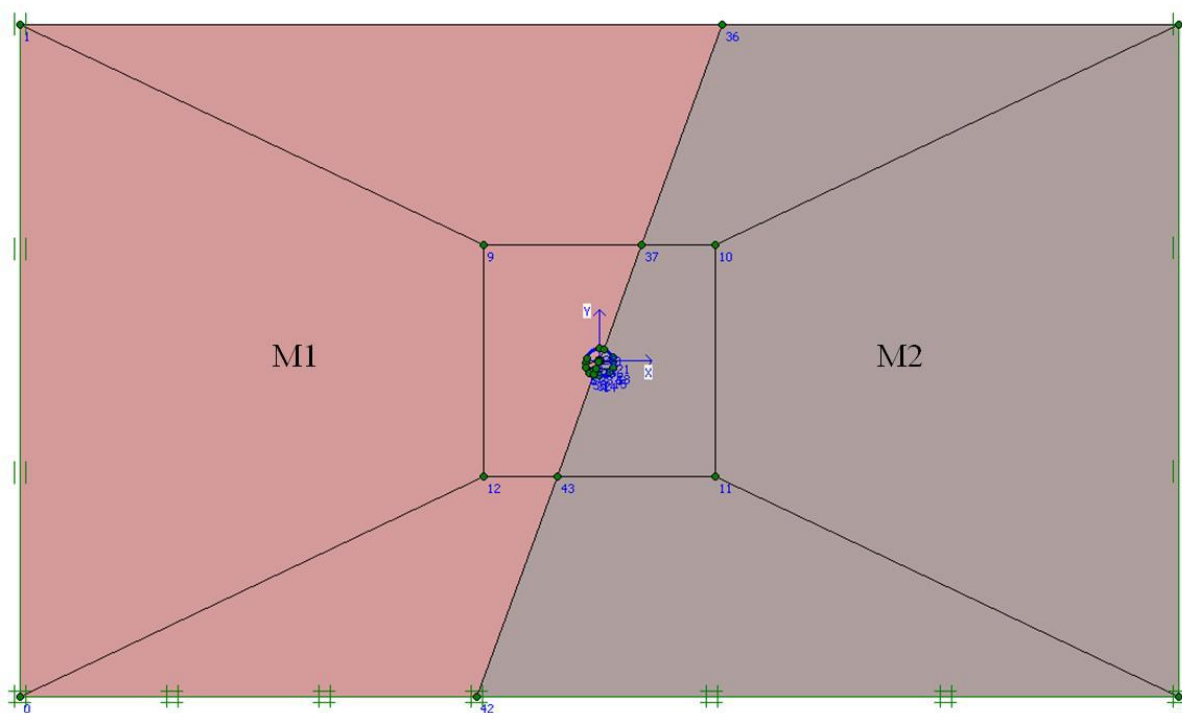
Neposreden razlog za analizo teh dveh profilov je njihova omemba v članku (Schubert in sod., 2006), kjer so avtorji pojasnjevali vzorec merjenih deformacij (Slika 51) s predpostavko, da so krila gub, ki potekajo proti jugu, bolj pretrta zaradi tektonike in zato manj toga, posledica pa je večja deformacija na teh mestih.



Slika 51: Prečna profila severne (Profil A) in južne (Profil B) cevi predora Trojane (Schubert in sod., 2005)

Najprej smo izdelali numerični model profila A predora Trojane (Slika 52). Geometrijske karakteristike prečnega prereza predora Trojane se bistveno ne razlikujejo od dvopasovnega

predora Šentvid, katerega smo že uporabili v parametrični analizi (Sliki 16 in 17). Za profil A predora Trojane smo upoštevali nadkritje v višini 140 m, za profil B pa 40 m. V levem krilu sinklinale, kjer je vidna skrilavost pod kotom $\alpha_l = -65^\circ$, smo upoštevali, da je togost materiala nižja od desnega krila, kjer je skrilavost pod kotom $\alpha_l = 25^\circ$ (Schubert in sod., 2006). To nakazuje odziv hribine, ki je razviden iz slike 51 (Profil A). Tako smo uporabili dva različna materiala (Preglednica 9) v Jointed Rock materialnem modelu, ki sta se razlikovala poleg kota skrilavosti, v elastičnih modulih E_1 in E_2 za faktor 3. Obema materialoma smo podali enako vrednost strižnega modula G_2 , katera je bila že uporabljena za primer predora Šentvid in se je izkazala kot dobra izbira. Oba materiala lahko opišemo kot glinovec. Zanj je značilna zelo skrilava struktura. Na določenih mestih je zaradi intenzivnega tektonskega delovanja material spremenjen v glino. Levemu delu sinklinale pripada oznaka M1, desnemu delu pa M2.

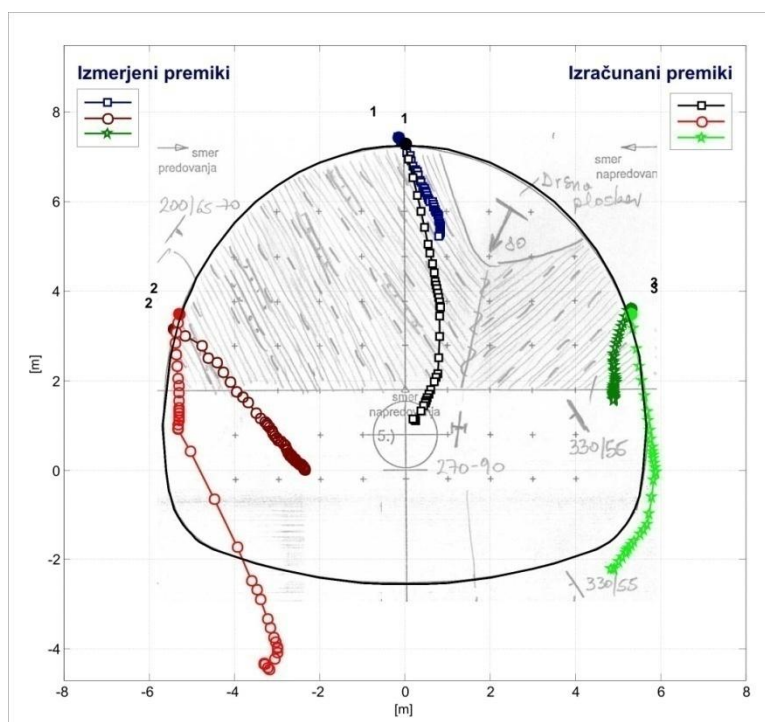


Slika 52: Numerični model profila A predora Trojane v programu Plaxis 2D

Preglednica 9: Geomehanske karakteristike Jointed Rock materialnega modela za profil A predora Trojane

Parameter	Enota	M1	M2
γ	[kN/m ³]	24,5	24,5
$\nu_1 = \nu_2$		0,25	0,25
G_2	[MPa]	5,0	5,0
c_1	[kPa]	50	50
φ_1	[°]	15	15
E_1	[MPa]	100	300
E_2	[MPa]	50	150
α_1	[°]	-65	25

Rezultate numerične analize smo prikazali na sliki 53, kjer je prikazana primerjava z diagramom merjenih pomikov.



Slika 53: Diagram primerjave med izračunanimi pomiki za Jointed Rock materialni model in merjenimi pomiki v profilu A predora Trojane (razmerje geometrija : pomik = 1 : 15)

Vidimo, da je poleg velikostnega reda izračunanih pomikov, ki je za faktor 2 do 3-krat večji od merjenih, tudi obnašanje hribine popolnoma drugačno. Na podlagi rezultatov parametrične analize lahko sklepamo, da v primeru profila A predora Trojane izbira tako nizkega strižnega modula G_2 ni primerna, saj povzroči značilno lomljenje krivulje izračunanih pomikov, ki ga v primeru merjenih pomikov ni. Zato smo v naslednjem koraku določili vrednost strižnega modula G_2 po teoriji elastičnosti:

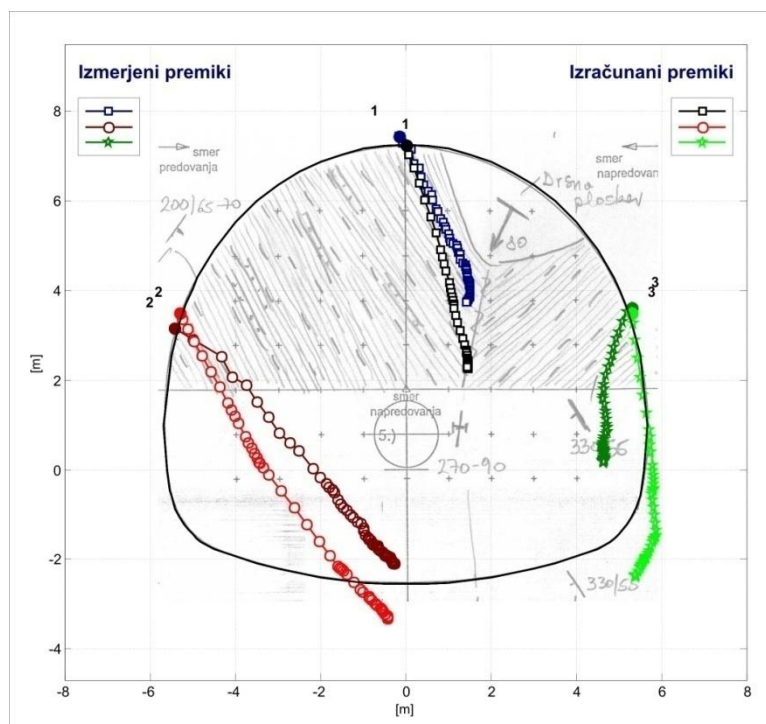
$$\text{- za material M1: } G_2 = \frac{E}{2(1+\nu)} = 27 \text{ MPa} \quad (11)$$

$$\text{- za material M2: } G_2 = \frac{E}{2(1+\nu)} = 80 \text{ MPa} \quad (12)$$

Rezultati ponovnega izračuna so se še vedno razlikovali, vendar ni bilo več zaznati lomljenja krivulje pomikov, ampak velikost le-teh je še vedno odstopala, predvsem v levi točki, ki se nahaja v materialu M1. Zato smo strižni modul G_2 za material M1 povečali na 80 MPa (Preglednica 10). Rezultati zadnjega izračuna so prikazani na Sliki 54.

Preglednica 10: Končne geomehanske karakteristike Jointed Rock materialnega modela za profil A predora Trojane

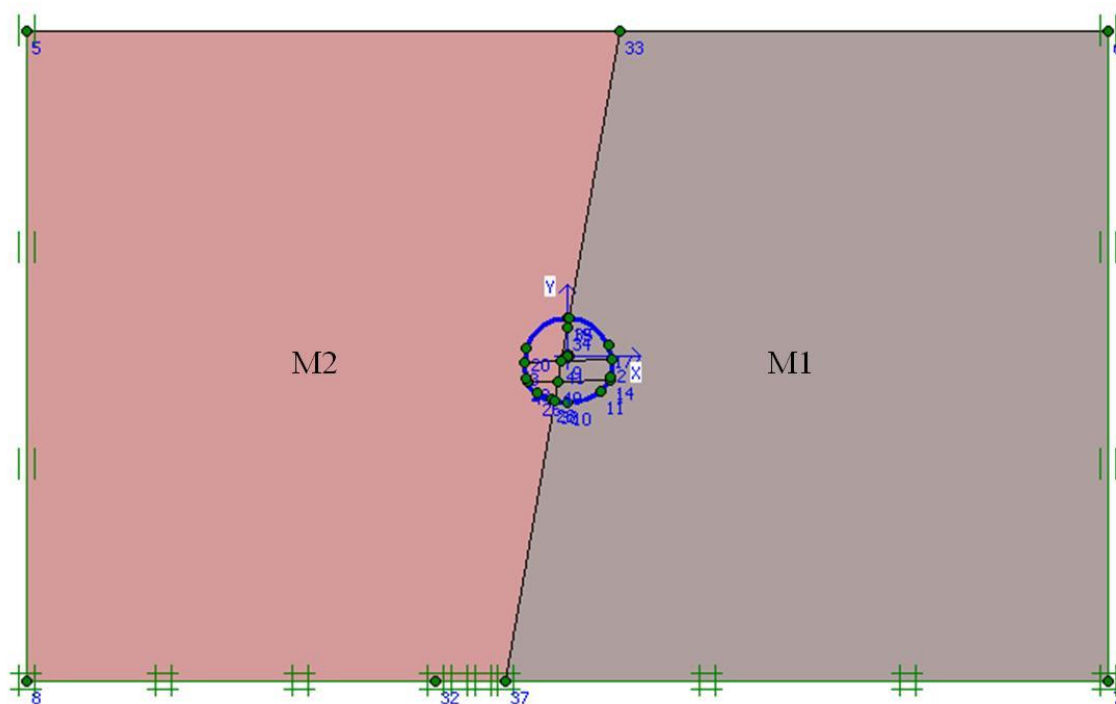
Parameter	Enota	M1	M2
γ	[kN/m ³]	24,5	24,5
$\nu_1 = \nu_2$		0,25	0,25
G_2	[MPa]	80	80
c_1	[kPa]	50	50
φ_1	[°]	15	15
E_1	[MPa]	100	300
E_2	[MPa]	50	150
α_1	[°]	-65	25



Slika 54: Diagram primerjave med izračunanimi pomiki za Jointed Rock materialni model in merjenimi pomiki v profilu A predora Trojane (razmerje geometrija : pomik = 1 : 25)

Tako smo ugotovili, da za primer profila A predora Trojane, ki se nahaja v podobni hribinski masi kot predor Šentvid, ne moremo uporabiti enakih materialnih karakteristik, ki temeljijo predvsem na relativno nizkem strižnem modulu G_2 . Kljub temu pa smo lahko z materialnim modelom Jointed Rock dokaj dobro opisali obnašanje hribinske mase med gradnjo predora v mehkih skrilavih kamninah.

Za numerični model profila B predora Trojane (Slika 55) smo uporabili za izhodišče materialne karakteristike, katere smo kot končne uporabili v primeru profila A (Preglednica 10). Ker rezultati meritev kažejo, da naj bi bil desni del antiklinale bolj deformabilen, tako temu delu pripada oznaka M1 in levemu M2. Poleg tega je potrebno omeniti, da je v levem delu antiklinale skrilavost pod kotom $\alpha_I = 30^\circ$, v desnem delu pa pod kotom $\alpha_I = -60^\circ$ (Preglednica 11).

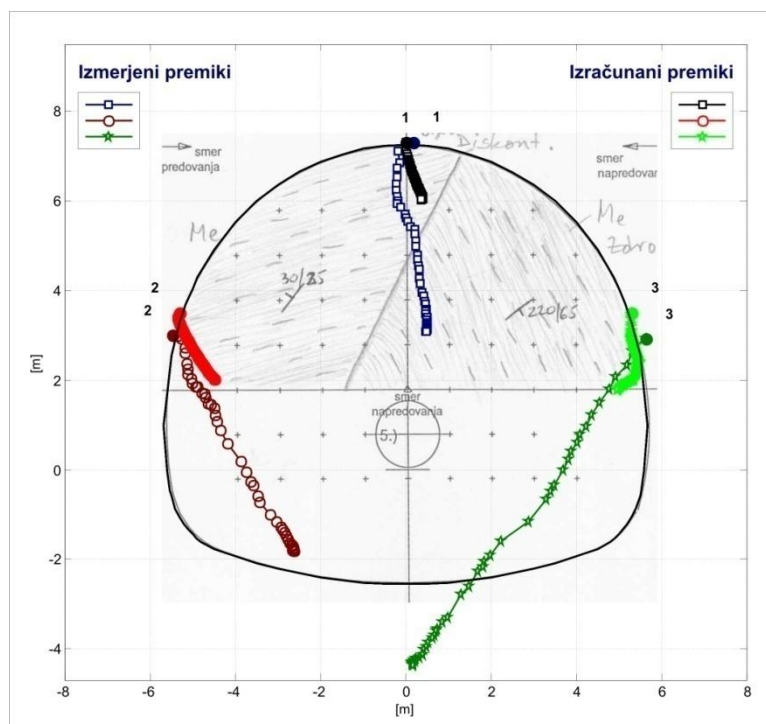


Slika 55: Numerični model profila B predora Trojane v programu Plaxis 2D

Preglednica 11: Geomehanske karakteristike Jointed Rock materialnega modela za profil B predora Trojane

Parameter	Enota	M2	M1
γ	[kN/m ³]	24,5	24,5
$\nu_1 = \nu_2$		0,25	0,25
G_2	[MPa]	80	80
c_1	[kPa]	50	50
φ_1	[°]	15	15
E_1	[MPa]	300	100
E_2	[MPa]	150	50
α_1	[°]	30	-60

Izračunani pomiki numeričnega modela profila B predora Trojane se ne ujemajo z merjenimi (Slika 56) tako po obliki, kot tudi po velikosti.

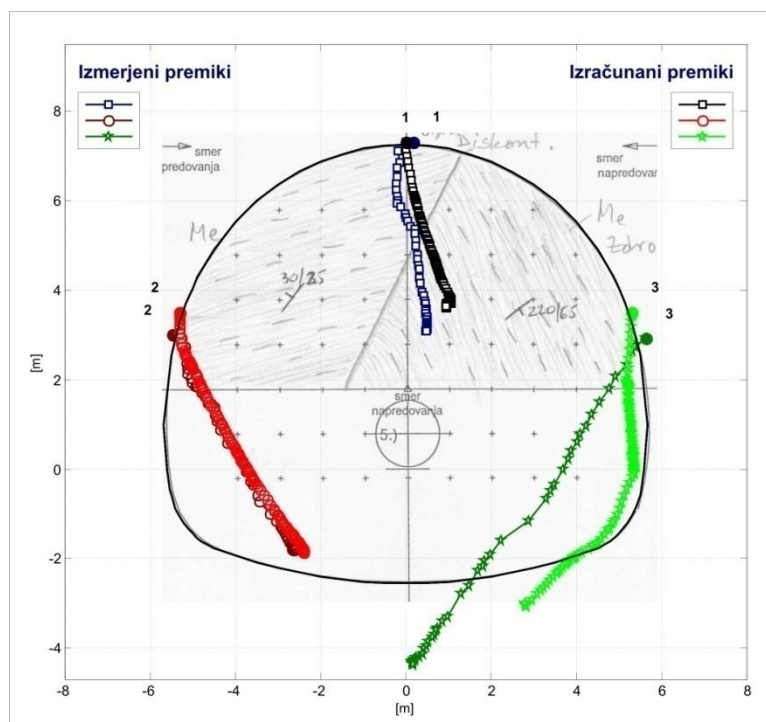


Slika 56: Diagram primerjave med izračunanimi pomiki za JR materialni model in merjenimi pomiki v profilu B predora Trojane (razmerje geometrija : pomik = 1 : 15)

Ker smo zopet imeli problem lomljenja krivulje pomikov in ker bi bilo nerealno dodatno povečati vrednosti strižnega modula G_2 , smo zato v naslednjem koraku v obeh materialih znižali elastični modul E_2 za faktor 2. S tem smo tudi dosegli povečanje izračunanih pomikov. Z izvedenimi spremembami parametrov se še vedno nismo približali dejanskemu odzivu hribine, predvsem je bil problem v velikostnem redu. Potrebno je opozoriti, da je v profilu B predora Trojane nadkritje manjše za 100 m in tako znaša zgolj 40 m. Vemo, da togostni parametri z globino naraščajo, ker so temeljna tla zaradi lastne teže bolj zgoščena, kar opravičuje nadaljnji korak, kjer smo vse togostne parametre iz zadnjega primera (E_1 , E_2 in G_2) reducirali. Velikostni red faktorja redukcije znaša za globino 100 m med 2 in 3. V našem primeru smo izbrali faktor 3. Materialne karakteristike slednjega izračuna so navedene v preglednici 12, rezultati pa so prikazani na sliki 57.

Preglednica 12: : Končne geomehanske karakteristike Jointed Rock materialnega modela za profil B predora Trojane

Parameter	Enota	M2	M1
γ	[kN/m ³]	24,5	24,5
$\nu_1 = \nu_2$		0,25	0,25
G_2	[MPa]	27	27
c_1	[kPa]	50	50
φ_1	[°]	15	15
E_1	[MPa]	100	33
E_2	[MPa]	25	8
α_1	[°]	30	- 60



Slika 57: Diagram primerjave med izračunanimi pomiki za Jointed Rock materialni model in merjenimi pomiki v profilu B predora Trojane (razmerje geometrija : pomik = 1 : 15)

Tako smo za profil B predora Trojane zopet prišli do ugotovitev, da v primeru mehkih skrilavih kamnin, kjer pri odzivu hribinske mase ne pride do lomljenja krivulj pomikov v

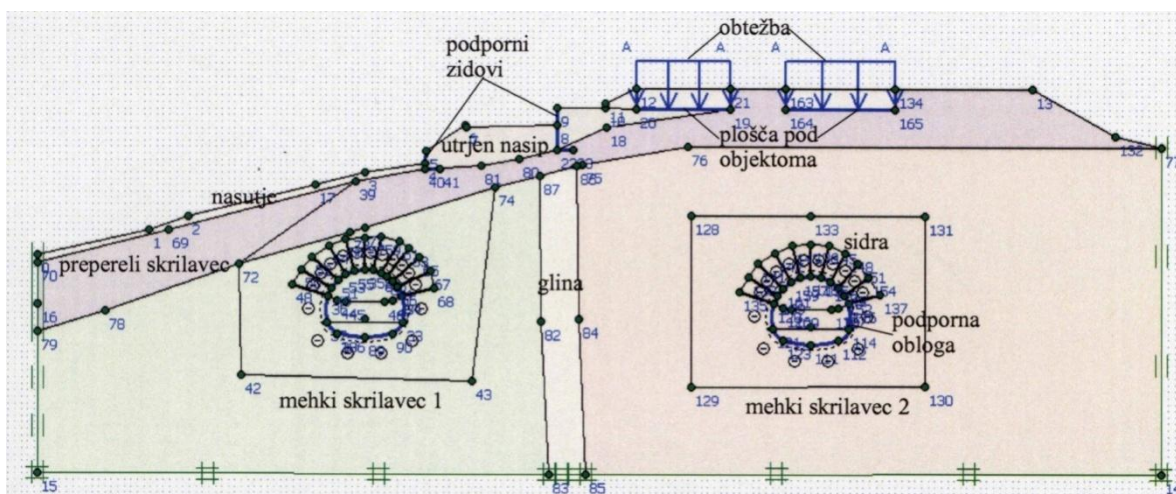
predorski cevi med gradnjo predora, ni primerno modelirati mehanske lastnosti hribine z nizkim strižnim modulom G_2 . Tokrat smo morali upoštevati še dejstvo, da togostni parametri naraščajo z globino, saj je bila razlika v višini nadkritja med profiloma A in B predora Trojane relativno velika.

5.3.2 Pomiki na površju nad predorsko cevjo

5.3.2.1 Predor Trojane

Za povratno analizo pomikov na površju nad predorom Trojane smo uporabili profil 80,250 km. Prav ta primer predora je bil za enak namen že uporabljen v diplomski nalogi avtorice Saše Miklavžin, z naslovom Numerični model predora Trojane v območju nizkega nadkritja pod poseljenim območjem. V diplomski nalogi je bil primer analiziran za tri konstitutivne materialne modele: Mohr – Coulomb, Hardening Soil in Jointed Rock modelom. Nas je predvsem zanimalo obnašanje hribinske mase definirane z Jointed Rock materialnim modelom, ker so v enakih pogojih uporabljeni nekoliko drugačni togostni parametri (Preglednica 11).

Uporabili smo popolnoma enak numerični model (Slika 58), ki je bil narejen na podlagi geometrijskih in geoloških podatkov profila 80,250 km in je že bil uporabljen v omenjeni diplomski nalogi (Miklavžin, 2004).



Slika 58: Numerični model profila 80,250 km predora Trojane (Miklavžin, 2004)

Pri izračunu so bile upoštevane naslednje geološke plasti:

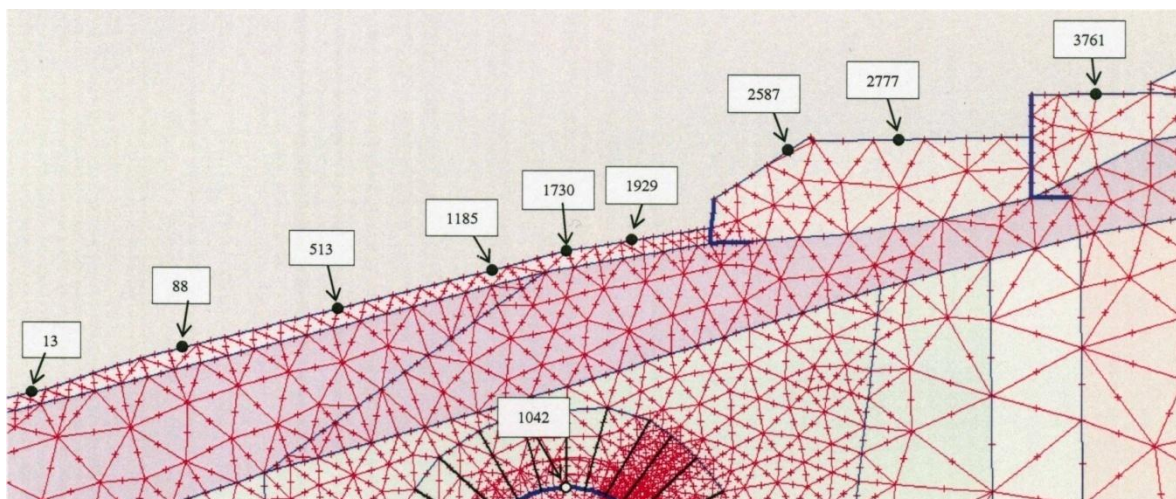
- mehki skrilavec 1 (Jointed Rock materialni model),
- mehki skrilavec 2 (Jointed Rock materialni model),
- prepereli skrilavec (Hardening Soil materialni model),
- nasutje (Hardening Soil materialni model),
- utrjen nasip (Hardening Soil materialni model),
- tektonska glina (Hardening Soil materialni model).

Izhodiščne geomehanske karakteristike mehkega skrilavca 1 in mehkega skrilavca 2, katere so bile uporabljene v diplomski nalogi (Miklavžin, 2004) so prikazane v preglednici 13.

Preglednica 13: Geomehanske karakteristike za JR materialni model

Parameter	Enota	Mehki skrilavec 1	Mehki skrilavec 2
γ	[kN/ m ²]	24,0	24,0
$\nu_1 = \nu_2$		0,25	0,25
G_2	[MPa]	13,0	30,0
c_1	[kPa]	23	30
φ_1	[°]	17	22
E_1	[MPa]	39	81
E_2	[MPa]	33	78
α_1	[°]	-40	-75

Pri analizi smo opazovali 9 točk na površju nad levo predorsko cevjo (Slika 59).



Slika 59: Točke opazovanja na levi strani profila 80,250 km predora Trojane (Miklavžin, 2004)

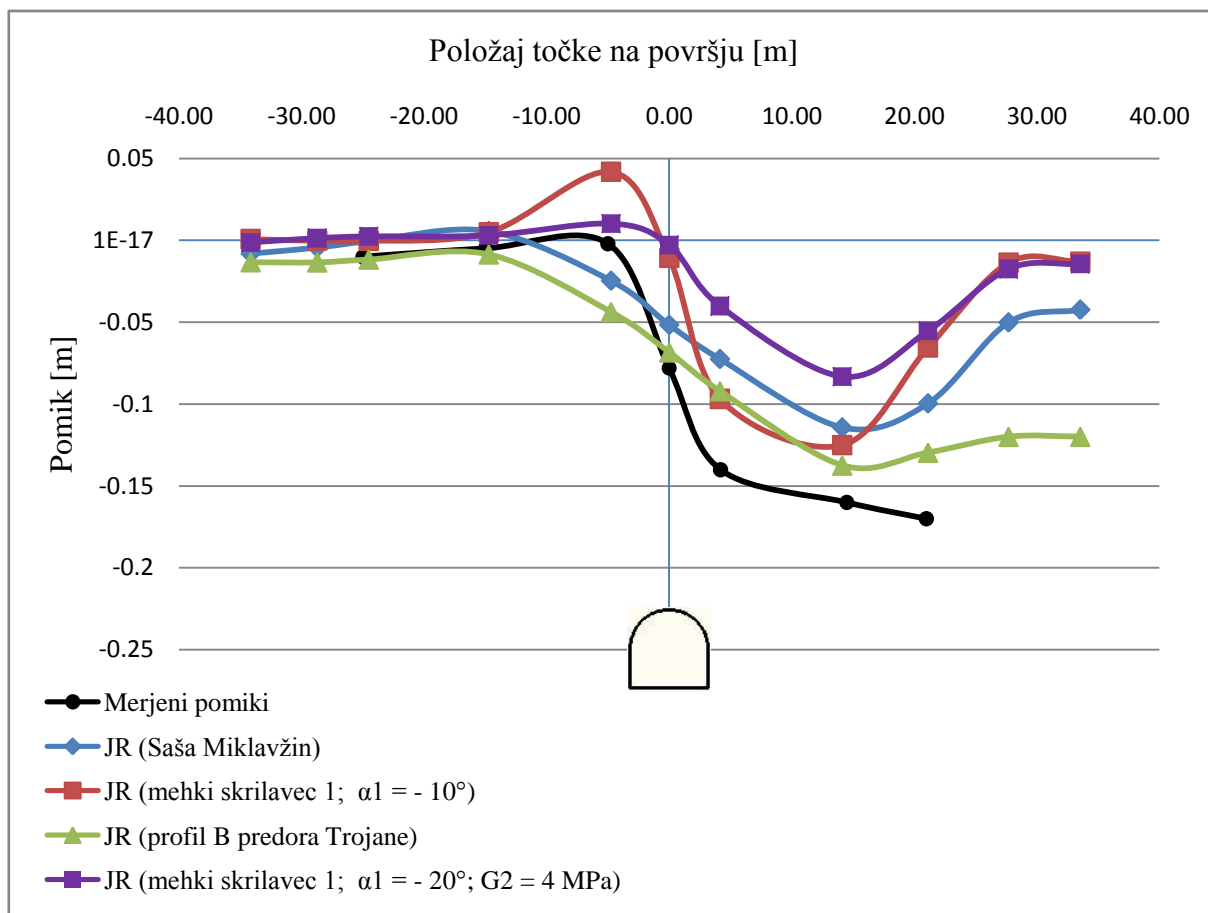
Poleg tega, da smo se pretežni del analize ukvarjali s togostnimi parametri (E_1 , E_2 in G_2), smo se odločili, da spremenimo tudi smer skrilavosti, ki je podana s kotom α_1 . Razlog je v tem, da je bila v geoloških popisih profilov pred in za stacionažo 80,250 km vidna pretežno subhorizontalna (mehki skrilavec 1) in subvertikalna (mehki skrilavec 2) smer skrilavosti. Zato smo uporabili za primer mehkega skrilavca 1 kot skrilavosti $\alpha_1 = -10^\circ$ Za primer mehkega skrilavca 2 pa smo podali kot skrilavosti $\alpha_1 = -90^\circ$ (Preglednica 14).

Končni parametri, do katerih smo prišli preko vrste analiz in so prikazani v preglednici 14, se bistveno ne razlikujejo od izhodiščnih, razen za primer mehkega skrilavca 1, kjer je bil na začetku podan strižni modul $G_2 = 5$ MPa. Z nadaljnjim nižanjem modula G_2 vse do vrednosti 1,1 MPa smo prišli do končnih rezultatov, ki se dokaj dobro ujemajo z merjenimi (Sliki 60 in 61). Nazadnje smo za primerjavo dodali še rezultate pomikov, kjer smo uporabili končne parametre, dobljene za profil B (leva cev) predora Trojane (5.3.1.2).

Preglednica 14: Geomehanske karakteristike za JR materialni model predora Trojane

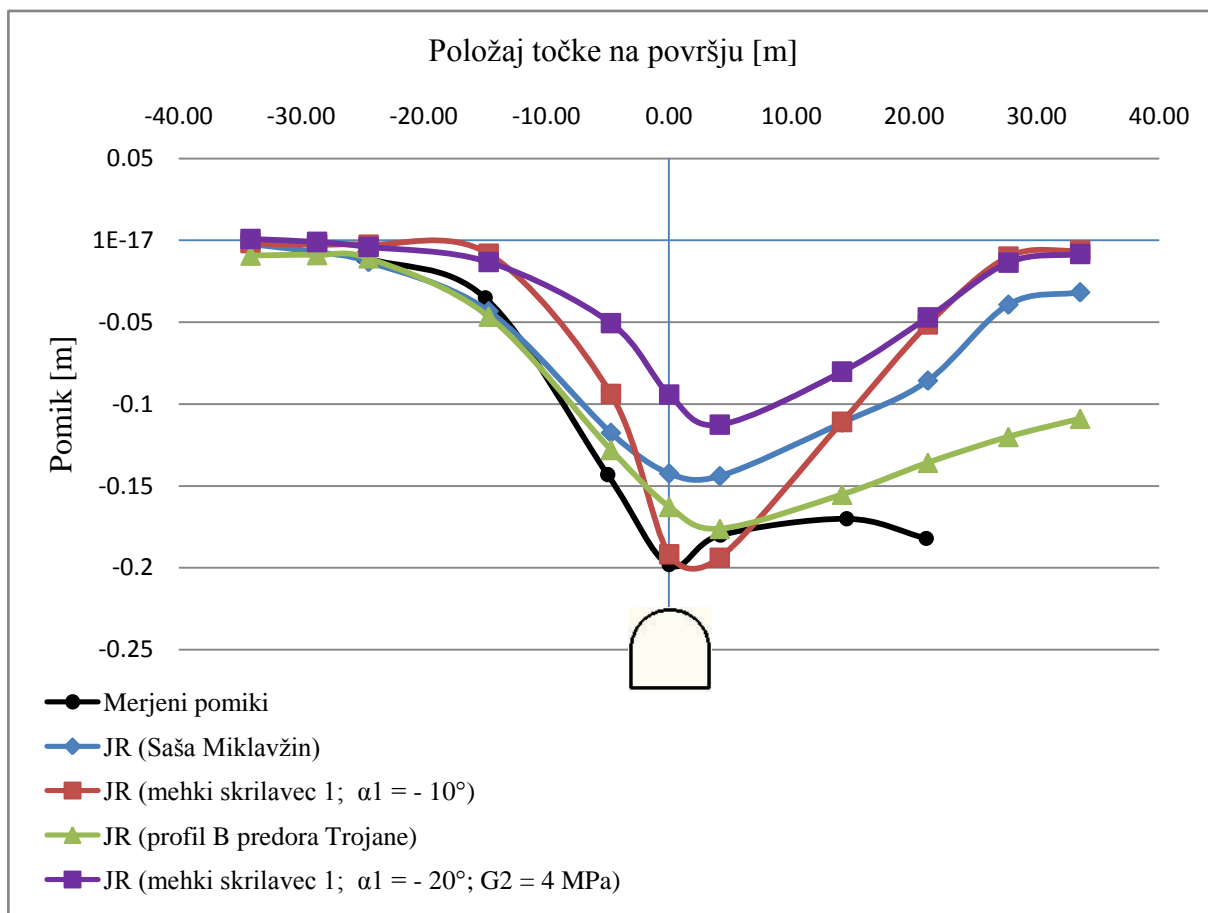
Parameter	Enota	Mehki skrilavec 1	Mehki skrilavec 2
γ	[kN/m ³]	24,0	24,0
$\nu_1 = \nu_2$		0,25	0,25
G_2	[MPa]	1,1	8,0
c_1	[kPa]	23	30
φ_1	[°]	17	22
E_1	[MPa]	300	700
E_2	[MPa]	190	640
α_1	[°]	-10	-90

Na sliki 60, kjer so prikazane krivulje pomikov v prečni smeri U_x za izračunane in merjene vrednosti, se vidi, da smo se v primeru Jointed Rock modela s smerjo skrilavosti $\alpha_1 = -10^\circ$ za mehki skrilavec 1 in $\alpha_1 = -90^\circ$ za mehki skrilavec 2, ob zelo nizkem strižnem modulu $G_2 = 1,1$ MPa za mehki skrilavec 1, relativno dobro približali merjenim vrednostim. Za primer mehkega skrilavca 1, kateremu smo podali strižni modul $G_2 = 4$ MPa, lahko opazimo, da so se pomiki v prečni smeri zmanjšali za približno 50%. Najboljše ujemanje pa prikazuje krivulja pomikov za Jointed Rock model, kjer smo uporabili končne togostne parametre (E_1 , E_2 in G_2) iz povratne analize profila B predora Trojane.



Slika 60: Primerjava med izračunanimi in izmerjenimi pomiki v prečni smeri (U_x) za predor Trojane

Podobno opazimo tudi iz slike 61, ki prikazuje primerjavo med izračunanimi in merjenimi krivuljami pomikov v navpični smeri U_y . Tako lahko zaključimo, da je za predor Trojane primerna uporaba Jointed Rock materialnega modela, tako za prikaz pomikov hribinske mase v predorski cevi, kot tudi za pomike na površju nad njo, vendar ne s tako nizkim strižnim modulom G_2 , kot velja to za predor Šentvid.



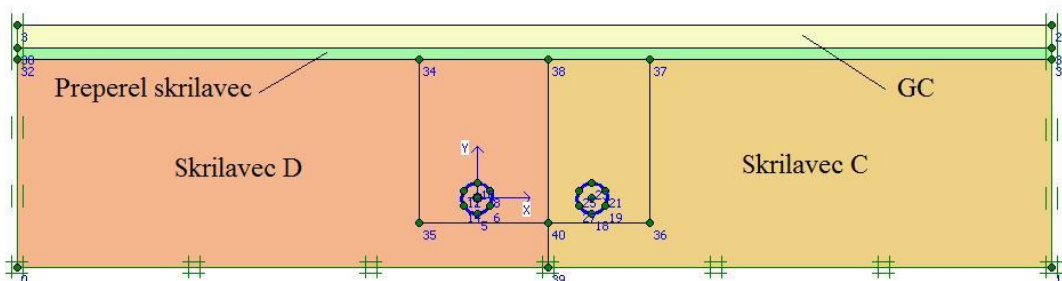
Slika 61: Primerjava med izračunanimi in izmerjenimi pomiki v navpični smeri (U_y) za predor Trojane

5.3.2.2 Predor Golovec

Za razliko od predora Trojane, ni na površju nad predorom Golovec nobenega naselja ali pomembne infrastrukture. Tako so na lokalni cesti na vrhu hriba nad predorom izvajali meritve pomikov površja med gradnjo (profil CS1). Te pomike smo primerjali z izračunanimi pomiki, ki smo jih dobili iz numerične analize za predor Golovec.

Numerični model predora Golovec prikazuje slika 62. Predorski cevi sta oblikovani kot kroga z radijem 6 m, kjer je razdalja med njima 50 m. Višina nadkritja je 70 m. Temeljna tla so

podana z Jointed Rock in Hardening Soil materialnima modeloma. Pri obeh smo definirali dve vrsti materialov, ki so prikazani v preglednicah 15 in 16.



Slika 62: Numerični model predora Golovec v programu Plaxis 2D

Preglednica 15: Geomehanske karakteristike za Jointed Rock materialni model

Parameter	Enota	Skrilavec D	Skrilavec C
γ	[kN/m ³]	23,0	23,0
E_1	[MPa]	50	50
E_2	[MPa]	10	10
G_2	[MPa]	4	5
ν_1		0,20	0,20
c_1	[kPa]	50	50
φ_1	[°]	13	13
α_1	[°]	-30	-30

Preglednica 16: Geomehanske karakteristike za Hardening Soil materialni model

Parameter	Enota	Preperel skrilavec	GC
γ	[kN/m ³]	22,0	22,0
ν		0,20	0,20
c_{ref}	[kPa]	0,1	0,1
φ	[°]	20	20
E_{50}^{ref}	[MPa]	20	15
E_{oed}^{ref}	[MPa]	20	15
E_{ur}^{ref}	[MPa]	100	100
m		0,5	0,6
K_0^{nc}		0,658	0,658

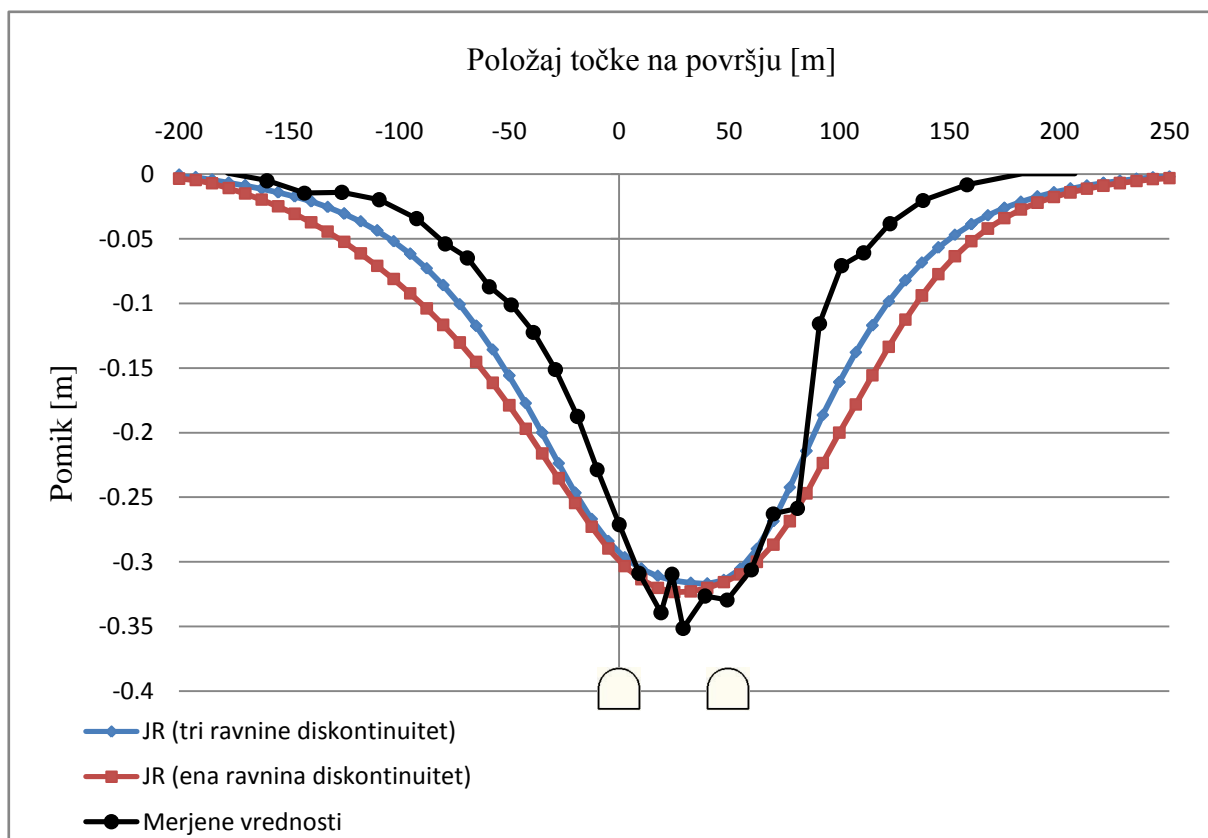
Rezultati numerične analize za predor Golovec so prikazani na sliki 63, kjer je narejena primerjava z merjenimi pomiki. Vidi se, da je obnašanje hribinske mase dokaj podobno. Vrednost pomika nad levo predorsko cevjo je manjša, kot nad desno predorsko cevjo, katera je bila izkopana prva. Glavna razlika med merjenimi in izračunanimi pomiki je v vplivni širini krivulje pomikov na površini.

Prav tako smo v primerjavo všteli še primer (Klopčič in sod., 2007a), ki se razlikuje od našega samo v geomehanskih karakteristikah materiala Skrilavec C in Skrilavec D (Preglednica 17). Tu sta podani še druga in tretja ravnina diskontinuitet, drugačni togostni parametri in drugačni koti skrilaevosti.

Preglednica 17: Geomehanske karakteristike za Jointed Rock materialni model (Klopčič in sod., 2007a)

Parameter	Enota	Skrilavec D	Skrilavec C
γ	[kN/m ³]	23,0	23,0
E_1	[MPa]	70	40
E_2	[MPa]	20	300
G_2	[MPa]	10	40
ν_1		0,20	0,20
c_1	[kPa]	0,0	0,0
φ_1	[°]	13	13
α_1	[°]	45	45
ν_2		0,30	0,30
c_2	[kPa]	0,0	0,0
φ_2	[°]	13	13
α_2	[°]	30	30
c_3	[kPa]	1,0	1,0
φ_3	[°]	30	30
α_3	[°]	- 45	- 45

Krivulja pomikov, ki prikazuje odziv numeričnega modela s tremi ravninami diskontinuitet, se zelo dobro ujema s krivuljo pomikov, kateri smo podali zgolj eno ravnino diskontinuitet. S tem vidimo, da je možnih več vrst kombinacij parametrov, ki opisujejo enako obnašanje hribinske mase. V našem primeru, kjer smo podali samo eno ravnino diskontinuitet, smo obnašanje hribinske mase opisali predvsem z relativno nizko vrednostjo strižnega modula G_2 in smerjo skrilavosti, saj imata ta dva parametra največji vpliv na odziv hribine, podobno kot za predor Šentvid. V primeru, kjer so podane tri ravnine diskontinuitet, od tega ena predstavlja smer skrilavosti, drugi dve pa smeri razpok. Tako je za ta primer, smer skrilavosti definirana s kotom $\alpha_3 = -45^\circ$. Mi smo kot skrilavosti spremenili na -30° , saj se ta pojavljal v večini profilov v območju obravnavanega merskega in računskega profila.



Slika 63: Diagram primerjave med izračunanim pomiki za Jointed Rock materialna modela (z uporabo ene in treh ravnin diskontinuitet) in merjenimi pomiki na površju nad predorom Golovec

6 ZAKLJUČEK

Obnašanje hribinske mase med gradnjo predora v mehkih skrilavih tleh, ki so izrazito anizotropna, se je v praksi pokazalo, da je zelo nepredvidljivo. Najprej se je to videlo med gradnjo predora Golovec (od leta 1997 do 1999). Nato je sledil predor Trojane (od leta 2000 do 2004), kjer je bila geološka sestava hribinske mase podobna (Klopčič in sod., 2007b). Nazadnje se je v enako težkih pogojih gradil še predor Šentvid (od leta 2004 do 2008) (Klopčič in sod., 2007a).

V programu Plaxis 2D, kjer smo izvedli vse potrebne numerične analize, smo videli kako v primeru parametrične analize gradnja predora v mehkih skrilavih tleh vpliva na obnašanje hribinske mase na pomike površja nad predorsko cevjo in na pomike v predorski cevi. Ker smo v parametrični analizi uporabili različne materialne modele, smo iz primerjave opazili, da je izmed vseh materialnih modelov za anizotropno obnašanje mehkih skrilavih kamnin najbolj primeren Jointed Rock materialni model, kjer je odziv hribine izrazito ortotropen. Tu so smeri največjih deformacij vzdolž in pravokotno na smer skrilavosti. Tako smo v primeru horizontalne skrilavosti opazili, da pride do upogiba ploskvic hribinske mase, pri vertikalni skrilavosti pa do zdrsa hribinske mase med ploskvicami. Prav zaradi tega izmed vseh parametrov, ki definirajo anizotropni materialni model, najbolj vplivata na obnašanje temeljnih tal strižni modul vzdolž skrilavosti in naklon skrilavosti.

V prvem delu povratne analize smo numerično modelirali predora Šentvid in Trojane, kjer sta predstavljala primer vpliva gradnje predora na pomike v predorski cevi. Pri predoru Šentvid smo ugotovili, da se z relativno nizkim strižnim modulom G_2 v Jointed Rock materialnem modelu dobro opiše obnašanje hribinske mase med gradnjo predora. To kaže na pomemben vpliv zdrsov med ploskvicami hribinske mase. Preveliki dvižki, ki so se pojavili zaradi izkopa predorske cevi in so se pokazali kot glavna pomanjkljivost Jointed Rock materialnega modela, smo omejili z uporabo Hardening Soil materialnega modela pod predorsko cevjo. Za predor Trojane, kjer leva cev predora poteka skozi antiklinalo hribine, desna pa skozi sinklinalo

hribine, smo do končnih rezultatov prišli z višjim strižnim modulom G_2 , izračunanim po teoriji elastičnosti.

V drugem delu povratne analize smo obravnavali predora Trojane in Golovec za primer vpliva gradnje predora na pomike na površju nad predorsko cevjo. Problem predora Trojane je predstavljalo nizko nadkritje. Prav tako smo se z uporabo Jointed Rock modela v numerični analizi dobro približali dejanskemu odzivu hribine, vendar zopet na račun enako visokega strižnega modula G_2 , izračunanega po teoriji elastičnosti, kot za primer vpliva gradnje predora na pomike v predorski cevi. V primeru predora Golovec, pa smo opazili, da je sicer velikostni red pomikov podoben merjenim, vendar je potrebno opozoriti na širino vplivnega območja pomikov na površju, ki je v primeru numeričnega izračuna prevelika.

Tako smo prikazali, da je uporaba anizotropnega materialnega modela, kot je Jointed Rock model v programu Plaxis 2D, za mehka skrilava tla v primeru gradnje predora smiselna in dobra, saj prikazuje globalno obnašanje te vrste hribinskih mas. Da pa bi lahko numerično analizo anizotropnih mehkih skrilavih kamnin uporabili v vsakodnevni praksi pri gradnji predorov, bi bilo potrebno z laboratorijskimi preiskavami določiti lastnosti stikov med ploskvicami. Vendar pa je potrebno opozoriti, da je geološka struktura mehkih skrilavih tal zelo različna in spreminjajoča, tako da se lahko vsak naslednji meter profila pojavi drugačna geološka struktura – predvsem sprememba smeri skrilavosti, ki narekuje drugačen odziv temeljnih tal.

VIRI

Brinkgreve, R.B.J. 2002. Plaxis : Finite element code for soil and rock analyses : 2D - Version 8 Material Models Manual, Rotterdam, Delft University of Technology & PLAXIS b. v.: ch. 2-5.

<http://www.plaxis.nl/upload/productmanuals/Plaxis%202D%20v9.0%20%204%20Material%20Models.pdf> (09.03.2009)

Klopčič, J., Ambrožič, T., Bogatin, S., Logar, J., Majes, B., Marjetič, A., Štimulak, A. 2006. Geotehnično opazovanje raziskovalnega rova predora Šentvid med izkopom glavnih predorskih cevi. V: Gostinčar, A. (ur.). 8. slovenski kongres o cestah in prometu, Portorož, 25.-27. oktobra 2006. Zbornik referatov. Ljubljana, DRC - Družba za raziskave v cestni in prometni stroki Slovenije, 2006: str. 770-780.

Klopčič, J., Majes, B., Logar, J., Ambrožič, T., Bogatin, S., Marjetič, A., Štimulak, A. 2007a. Rock mass behavior ahead of the tunnel face observed in the exploatory tunnel of the Šentvid tunnel. V: 6. Österreichische Geotechniktagung mit "Vienna - Terzaghi Lecture", 18. und 19. Jänner 2007. Tagungsbeiträge. Wien: Österreichische Ingenieur- und Architekten-Verein, 2007: str. 313-324.

Klopčič, J., Logar, J., Majes, B., Štimulak, A., Popovič, Z. 2007b. Surface displacements above Golovec and Trojane tunnels in carboniferous soft rock conditions = Déplacements extérieurs au-dessus des tunnels de Golovec et de Trojane dans les roches molles carbonifères, Rotterdam, V: Cuéllar, V. (ur.), et al. Geotechnical engineering in urban environments. Rotterdam, Millpress Science Publisher: str. 967-972.

Klopčič, J., Logar, J., Ambrožič, T., Gamse, S., Marjetič, A., Majes, B. 2008. Povratne numerične analize geodetskih meritev v raziskovalnem rovu in izvedenem delu predora

Šentvid. Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za mehaniko tal z laboratorijem: str. 1-17.

Leitner, R., Pötsch, M., Schubert, W. 2006. Aspects on the Numerical Modelling of Rock Mass Anisotropy in Tunnelling, Felsbau 24: str. 59-65

Likar, J. 2004a. Gradnja predora Trojane v časovno odvisnih in nizko nosilnih kamninah = Trojane tunnel construction in time dependet and low bearing rocks, 7. mednarodno posvetovanje o gradnji predorov in podzemnih prostorov, 17.-19. november 2004, Ljubljana, Slovenija = 7th International Symposium on Tunnel Construction and Underground Structures, 17-19th November 2004, Ljubljana, Slovenia. – V Ljubljani : Društvo za podzemne in geotehnične konstrukcije = Society for underground and geotechnical constructions: Univerza v Ljubljani: str. 172-181.

Likar, J. 2004b. Back analysis of time-dependet displacement at the Trojane tunnel construction = Povratna analiza časovno odvisnih pomikov pri gradnji predora Trojane, Acta geotechnica Slovenica: 23 str.

Logar, J. 1996. Vpliv interakcije med zemljino, podporno konstrukcijo in sidrom na obremenitev konstrukcijskih elementov podporne konstrukcije. Razprave drugega posvetovanja slovenskih geoteknikov, Rogla 96, Rogla, 3. do 5. oktobra 1996, Slovensko geotehnično društvo: 56 str.

Majes, B. 2008. Plitvo temeljenje – dimenzioniranje, Fundiranje 1, Študijsko gradivo: str. 33, 34

<http://www.fgg.uni-lj.si/kmtal-gradiva/GR-UNI/F1/PLITVO%20TEMELJENJE.pdf>
(09.03.2009)

Marjetič, A., Ambrožič, T., Bogatin, S., Klopčič, J., Logar, J., Štimulak, A., Majes, B. 2006. Geodetske meritve v predoru Šentvid = Geodetic measurements in tunnel Šentvid, Geodetski vestnik 50, 1: str. 11-24

http://www.geodetski-vestnik.com/50/1/gv50-1_011-024.pdf (09.03.09)

Miklavžin, S. 2004. Numerični model predora Trojane v območju nizkega nadkritja pod poseljenim območjem. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek gradbeništvo, Konstrukcijska smer: str. 42-122

Petkovšek, B. Fifer Bizjak, K., Petrica, R., Budkovič, T., Brenčič, M., Petkovšek, A. 2000. Dopolnilne geološko – geomehanske raziskave za PGD, PZI predora Šentvid: poročilo, Ljubljana, Zavod za gradbeništvo Slovenije: 59 str.

Trajanova, M., Mladenovič, A. 2006. Teksturno-strukturne lastnosti glinastega skrilavca in njegov odziv na točkovni obremenitveni test = Structural and textural characteristics of slate and its response to the point load test, Ljubljana, Geologija 49/2: 261 str.

Žigon, A., Žibert, M., Jemec, P. 2004. Projektiranje predorskega sistema Šentvid = Šentvid tunnel system design, 7. mednarodno posvetovanje o gradnji predorov in podzemnih prostorov, 17.-19. november 2004, Ljubljana, Slovenija = 7th International Symposium on Tunnel Construction and Underground Structures, 17-19th November 2004, Ljubljana, Slovenia. – V Ljubljani : Društvo za podzemne in geotehnične konstrukcije = Society for underground and geotechnical constructions: Univerza v Ljubljani: str. 125-147.