

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*



Visokošolski program Gradbeništvo,  
Prometnotehnična smer

Kandidat:

**Goran Despotović**

**Numerične analize predora Trojane v območju  
nizkega nadkritja pod poseljenim območjem s  
programom PHASE 2**

**Diplomska naloga št.: 208**

**Mentor:**

izr. prof. dr. Janko Logar

**Somentor:**

asist. dr. Jure Klopčič

Ljubljana, 20. 12. 2005

## **IZJAVA O AVTORSTVU**

Podpisani **GORAN DESPOTOVIĆ** izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom: **»NUMERIČNE ANALIZE PREDORA TROJANE V OBMOČJU NIZKEGA NADKRITJA POD POSELJENIM OBMOČJEM S PROGRAMOM PHASE<sup>2</sup>«**.

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

Ljubljana, XX.XX.2005

## **IZJAVE O PREGLEDU NALOGE**

Nalogo so si ogledali učitelji konstrukcijske smeri:

## **BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK**

<b>UDK:</b>	<b>004.42:624.195(043.2)</b>
<b>Avtor:</b>	<b>Goran Despotović</b>
<b>Mentor:</b>	<b>doc. dr. Janko Logar univ. dipl. inž. grad</b>
<b>Naslov:</b>	<b>Numerične analize predora Trojane v območju nizkega nadkritja pod poseljenim območjem s programom Phase<sup>2</sup></b>
<b>Obseg in oprema:</b>	<b>77 str., 10 pregl., 104 sl.</b>
<b>Ključne besede:</b>	<b>numerična analiza, faze izkopa, deformacije</b>

### **Izvleček**

Diplomsko delo obsega numerične analize dveh geoloških profilov predora Trojane in sicer profila v km 80+300 in profila v km 80+250, ki se nahajata v območju gostišča Trojane. Numerične analize za oba geološka profila so bile izvedene po metodi končnih elementov s programom Phase2 v. 6.0. Uporabljen je bil Mohr – Coulombov konstitutivni materialni model. V uvodnem delu naloge je predstavljen predor Trojane, povzeti so rezultati izvedenih geološko-geotehničnih raziskav na območju predora, opisana je tehnologija gradnje predora Trojane in postopki geotehničnih meritev, ki so spremljale gradnjo.

Prvi sklop numeričnih analiz je bil izveden z namenom čim boljše približati izmerjenim pomikom v profilu 80+300. Z dobljenimi karakteristikami zemljin in kamnin, ki najbolj opišejo dejanske pomike v profilu 80+300, je bil v drugem sklopu analiziran še profil 80+250, ki ima nekoliko drugačno geometrijo. Dobljeni rezultati so primerjani z izmerjenimi premiki in z rezultati, dobljenimi v okviru diplomske naloge Saše Miklavžin s programom Plaxis.



## **BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION**

<b>UDK:</b>	<b>004.42:624.195(043.2)</b>
<b>Author:</b>	<b>Goran Despotović</b>
<b>Supervizor:</b>	<b>doc. dr. Janko Logar univ. dipl. inž. grad</b>
<b>Title:</b>	<b>Numerical analysis of the Trojanje tunnel in the low construction area below the inhabited area with the programme Phase<sup>2</sup></b>
<b>Notes:</b>	<b>77 p., 10 tab., 104 fig.</b>
<b>Key words:</b>	<b>numerical analysis, phases of excavation, deformation</b>

### **Abstract**

The diploma work presents the results of analysis of two geological cross sections of the Trojane tunnel: the cross section 80+300 in km and the cross section 80+250 in km, both located in the area near the Trojane restaurant. The numerical analysis of both geological cross sections was carried out by the finite element method with the programme Phase 2 v.6.0 using the Mohr-Coulomb's constitutive material model.

At the beginning of the diploma work the tunnel Trojane is presented, the results of the actual geological-geotechnical research on the area of the tunnel are summarized, the technology for the construction of the Trojane tunnel is described, and the procedure of geotechnical measurements accompanying the construction is presented.

The first part of the numerical analysis was carried out with the purpose of closely approaching the measurement deviation in the profile of 80+300. By taking into account the characteristics of soil and rock which best describe the actual deviations in the profile 80+300, the second part analysed also the profile 80+250 with a bit different geometry. The achieved results are compared with measured deviations reached by Saša Miklavžin's diploma work using the programme Plaxis.

## ZAHVALA

*Za vse posvečene ure pri izdelavi diplomske naloge  
ter za strokovno pomoč se iskreno zahvaljujem  
mentorju doc. dr. Janku LOGARJU ter  
somentorju Juretu KLOPČIČU.*

*Zahvaljujem se tudi g. Igorju AJDIČU (DDC) ter  
g. Andreju ŠTIMULAKU (DDC), ki sta mi posredovala  
potrebne podatke za nastanek diplomske naloge.*

*Posebej bi se rad zahvalil mami Miri, očetu Stanku ter  
sestri Dragani, ker so mi ves čas študija stali ob strani, me  
spodbujali in podpirali ter kar je najbolj pomembno,  
verjeli vame, da bom študij tudi končal.*

*Zahvala gre tudi Mladenu GOLIČU,  
ko mi je leta 2000 duševno pomagal, da sem  
zopet začel z študijem.*

*Iskreno hvala še svoji puncici Tanji,  
ki mi je stala ob strani še najbolj tedaj, ko ni šlo vse tako  
kot bi moralo.*

## KAZALO

<b>1</b>	<b>UVOD.....</b>	<b>1</b>
1.1	Namen diplomske naloge .....	3
<b>2</b>	<b>SPLOŠNI PODATKI IN RAZISKOVALNA DELA PREDORA TROJANE.....</b>	<b>4</b>
2.1	Terenska dela .....	8
2.1.1	Raziskovalna vrtanja in sondažni izkopi .....	8
2.1.2	Geofizikalne meritve .....	9
2.1.3	Geotehnične meritve.....	10
2.1.4	Hidrogeološke meritve.....	10
2.1.5	Inženirsko geološko kartiranje terena.....	10
2.2	Laboratorijske preiskave hribin in zemljin .....	11
2.2.1	Laboratorijske preiskave hribin .....	11
2.2.2	Laboratorijske preiskave zemljin.....	11
2.3	Rezultati geološko geotehničnih raziskav.....	12
2.3.1	Geomorfološki opis terena.....	12
2.3.2	Geološka zgradba širšega območja.....	13
2.3.3	Geotehnični opis kamnin v območju predora Trojane .....	13
2.4	Prognoza geotehničnih razmer.....	15
<b>3</b>	<b>TEHNOLOGIJA GRADNJE .....</b>	<b>16</b>
3.1	Kategorizacija hribine.....	16
3.2	Tehnologija gradnje v predoru Trojane.....	20
3.2.1	Način izvajanja del v hribinski kategoriji SCC II tip 7 .....	22
3.3	Geotehnična spremljava gradnje .....	26
3.3.1	V predorski cevi.....	26
3.3.2	Na površini.....	28
<b>4</b>	<b>NUMERIČNE ANALIZE S PROGRAMOM PHASE<sup>2</sup> .....</b>	<b>33</b>
4.1	Vpliv mreže .....	33
4.2	Začetne napetosti .....	35
4.3	Porušni mehanizem Mohr - Coulomb .....	35

<b>4.4</b>	<b>Prikaz izkopa predora.....</b>	<b>36</b>
<b>4.5</b>	<b>Profil 80+300 .....</b>	<b>37</b>
4.5.1	Točke opazovanja pomikov v matematičnem modelu .....	39
<b>4.6</b>	<b>Vpliv posameznih parametrov na izračunane pomike.....</b>	<b>39</b>
4.6.1	Zmanjševanje modula elastičnosti (znotraj predora).....	40
4.6.2	Vpliv rezidualne kohezije na posedke za material "skrilavec 1" .....	42
4.6.3	Vpliv rezidualnega strižnega kota na posedke za material "skrilavec 1" .....	43
4.6.4	Vpliv prvotnih horizontalnih napetosti .....	45
4.6.5	Vpliv ujetih napetosti.....	47
4.6.6	Vpliv Poissonovega količnika $\nu$ .....	49
4.6.7	Vpliv modula elastičnosti .....	49
4.6.8	Lastnosti hribine v matematičnem model.....	50
4.6.9	Končni primer profila 80+300.....	51
<b>4.7</b>	<b>Profil 80+250 .....</b>	<b>60</b>
4.7.1	Točke opazovanja pomikov v modelu.....	62
4.7.2	Končni primer profila 80+250.....	62
<b>4.8</b>	<b>Vpliv mehčanja materiala.....</b>	<b>72</b>
<b>5</b>	<b>ZAKLJUČEK.....</b>	<b>75</b>

## KAZALO PREGLEDNIC

PREGLEDNICA 1: Hribinska klasifikacija .....	16
PREGLEDNICA 2: Podporna kategorija .....	16
PREGLEDNICA 3: Geomehanske karakteristike za MC materialni model.....	40
PREGLEDNICA 4: Končni pomiki zaradi spreminjanja rezidualne kohezije.....	43
PREGLEDNICA 5: Končni pomiki zaradi spreminjanja rezidualnega strižnega kota .....	44
PREGLEDNICA 6: Karakteristike zemljin za profil 80+300 .....	50
PREGLEDNICA 7: Primerjava vrednosti notranjih sil med PHASE <sup>2</sup> in PLAXIS-om .....	57
PREGLEDNICA 8: Karakteristike zemljin za profil 80+250 .....	60
PREGLEDNICA 9: Primerjava vrednosti notranjih sil med PHASE <sup>2</sup> in PLAXIS-om .....	70
PREGLEDNICA 10: Vhodni podatki .....	73

## KAZALO SLIK

SLIKA 1: Vzdolžni prerez avtocestnega odseka Vransko – Blagovica .....	1
SLIKA 2: Situacija predora Trojane.....	1
SLIKA 3: Potek trase predora Trojane v naselju Trojane [9].....	2
SLIKA 4: Razlika med Mohr-Coulombovim modelom v Plaxis-u in Phase <sup>2</sup> .....	3
SLIKA 5: Splošni prečni prerez predora .....	4
SLIKA 6: Vzhodni portal v času gradnje .....	5
SLIKA 7: Zahodni portal v času gradnje.....	6
SLIKA 9: Prikaz dodatnih raziskovalnih vrtin na območju gostišča Trojane, izvedene leta 03.....	8
SLIKA 10: Letalski posnetek širšega območja naselja Trojane [9] .....	12
SLIKA 11: Popis hribine na čelu predora pred pričetkom izkopa za stacionažo 80+300.....	18
SLIKA 12: Popis hribine na čelu predora pred pričetkom izkopa za stacionažo 80+250.....	19
SLIKA 13: Podporni sistem v hribinski kategoriji C5 [3].....	20
SLIKA 14: Princip prenosa obremenitve na predorsko oblogo .....	21
SLIKA 15: Prikaz cevnega ščita.....	23
SLIKA 16: Prikaz cevnega ščita v predoru Trojane.....	23
SLIKA 18: Shema izkopa v hribinski kategoriji SCC II, tip 7 v vzdolžni smeri .....	25
SLIKA 19: Faze dela v hribinski kategoriji SCC II, tip 7 v vzdolžni smeri .....	26
SLIKA 20: Merski profil MS I ter prikaz jeklenega cevnega ščita in mesto namestitve horizontalnih inklinometrov .....	27
SLIKA 21: Posedek površja v osi leve predorske cevi za profil 80+300.....	28
SLIKA 22: Letalski posnetek območja Trojan z prikazom osi leve predorske cevi [9] .....	29
SLIKA 23: Prikaz vertikalnih pomikov v profilu MS V/7E .....	29
SLIKA 24: Prikaz horizontalnih pomikov v profilu MS V/7E .....	30
SLIKA 25: Posedek površja v osi leve predorske cevi za profil 80+250.....	30
SLIKA 26: Prikaz vertikalnih pomikov v profilu MS V/7C .....	31
SLIKA 27: Prikaz horizontalnih pomikov v profilu 80+250 .....	31
SLIKA 28: Razpored merskih mest na površini nad predorsko cevjo .....	32
SLIKA 29: Prikaz 3 in 6 vozliščnega trikotnega elementa .....	34
SLIKA 30: Prikaz natančnosti izračuna .....	34
SLIKA 31: Prikaz dialoga field stress properties .....	35
SLIKA 32: MC kriterij porušitve .....	35
SLIKA 33: Potek izkopa po fazah.....	37
SLIKA 34: Geometrija profila 80+300 .....	37
SLIKA 35: Geološka struktura profila 80+300 .....	38
SLIKA 36: Matematični model profila 80+300 .....	38
SLIKA 37: Merske točke in točke v katerih sem spremljal rezultate računske analize .....	39

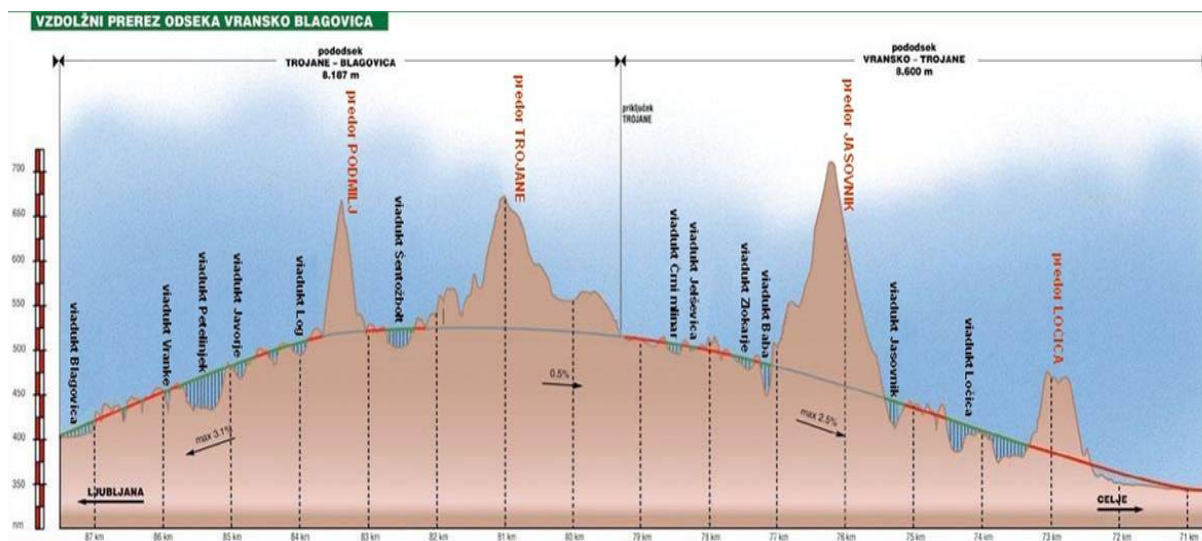
SLIKA 38: Okno za vnašanje vhodnih podatkov za program Phase <sup>2</sup> .....	40
SLIKA 39: Prikaz vertikalnih pomikov površja zaradi zmanjševanja modula elastičnosti znotraj predora.....	41
SLIKA 40: Prikaz vertikalnih pomikov površja zaradi zmanjševanja modula elastičnosti .....	41
SLIKA 41: Prikaz vpliva rezidualne kohezije na vertikalni pomik.....	42
SLIKA 42: Prikaz vpliva strižnega kota rezidualno na vertikalni pomik na površju.....	43
SLIKA 43: Prikaz vpliva zmanjševanja rezidualnega strižnega kota in kohezije .....	44
SLIKA 44: Prikaz vertikalnih pomikov zaradi spreminjanja parametra Ko .....	45
SLIKA 45: Plastični elementi-Ko = 0, levo začetna faza, desno končna faza .....	45
SLIKA 46: Plastični elementi -Ko = 0.2, levo začetna faza, desno končna faza .....	46
SLIKA 47: Plastični elementi -Ko = 0.4, levo začetna faza, desno končna faza .....	46
SLIKA 48: Plastični elementi -Ko = 0.6, levo začetna faza, desno končna faza .....	46
SLIKA 49: Plastični elementi -Ko = 0.8, levo začetna faza, desno končna faza .....	46
SLIKA 50: Plastični elementi -Ko = 1, levo začetna faza, desno končna faza .....	47
<b>SLIKA 51:</b> Plastični elementi -Ko = 2, levo začetna faza, desno končna faza .....	47
SLIKA 52: Prikaz vpliva ujetih napetosti v ravnini na vertikalne pomike .....	48
SLIKA 53: Prikaz vpliva ujetih napetosti izven ravnine na vertikalne pomike .....	48
SLIKA 54: Prikaz vpliva Poissonovega količnika .....	49
SLIKA 55: Prikaz zmanjševanja modula elastičnosti na vertikalne pomike.....	50
SLIKA 56: Primerjava izračunanih vertikalnih pomikov (PHASE <sup>2</sup> in PLAXIS) z izmerjenimi vertikalnimi pomiki v profilu 80+300.....	51
SLIKA 57: Primerjava izračunanih horizontalnih pomikov (PHASE <sup>2</sup> in PLAXIS) z izmerjenimi horizontalnimi pomiki v profilu 80+300.....	51
SLIKA 58: Polje pomikov po končanem izkopu izračunano s programom PHASE <sup>2</sup> .....	52
SLIKA 59: Polje pomikov po končanem izkopu izračunano s programom PLAXIS.....	52
SLIKA 60: Levo pomik dobljen s programom PHASE <sup>2</sup> , desno dobljen s programom PLAXIS .....	53
SLIKA 61: Prikaz opazovanih točk pri analizi.....	53
SLIKA 62: Vertikalni pomik po fazah v točki A .....	54
SLIKA 63: Horizontalni pomik po fazah v točki A .....	54
SLIKA 64: Vertikalni pomik po fazah v točki B.....	55
SLIKA 65: Horizontalni pomik po fazah v točki B.....	55
SLIKA 66: Levo, osna sila dobljena s PHASE <sup>2</sup> , desno s PLAXIS-om.....	56
SLIKA 67: Levo, strižna sila dobljena s PHASE <sup>2</sup> , desno s PLAXIS-om .....	56
SLIKA 68: Levo, moment dobljen s PHASE <sup>2</sup> , desno s PLAXIS-om .....	56
SLIKA 69: Točke opazovanja napetosti okrog leve predorske cevi ter prikaz glavnih napetosti .....	57
SLIKA 70: Prikaz glavnih napetosti sigma 1 .....	58
SLIKA 71: Prikaz vrednosti sigma 3.....	58
SLIKA 72: Prikaz vrednosti sigma Z .....	58
SLIKA 73: Totalne napetosti dobljene s programom PHASE <sup>2</sup> .....	59

SLIKA 74: Totalne napetosti dobljene s programom PLAXIS.....	59
SLIKA 75: Geometrija profila 80+250 .....	60
SLIKA 76: Geološka struktura profila 80+250 .....	61
SLIKA 77: Matematični model profila 80+250 .....	61
SLIKA 78: Merske točke in točke v katerih sem spremljal rezultate računske analize .....	62
SLIKA 79: Primerjava izračunanih vertikalnih pomikov (PHASE <sup>2</sup> in PLAXIS) z izmerjenimi vertikalnimi pomiki v profilu 80+250.....	63
SLIKA 80: Primerjava izračunanih horizontalnih pomikov (PHASE <sup>2</sup> in PLAXIS) z izmerjenimi horizontalnimi pomiki v profilu 80+250.....	63
SLIKA 81: Prikaz naraščanja vertikalnih pomikov na površju ko so se z izkopi približevali profiloma .....	64
SLIKA 82: Prikaz naraščanja vertikalnih pomikov na površju.....	64
SLIKA 83: Polje pomikov po končanem izkopu dobljeno s programom PHASE <sup>2</sup> .....	65
SLIKA 84: Polje pomikov po končanem izkopu dobljeno s programom PLAXIS .....	65
SLIKA 85: Levo, pomik dobljen s programom PHASE <sup>2</sup> , desno dobljen s programom PLAXIS .....	66
SLIKA 86: Prikaz opazovanih točk pri analizi.....	66
SLIKA 87: Vertikalni pomik po fazah v točki A .....	67
SLIKA 88: Horizontalni pomik po fazah v točki A .....	67
SLIKA 89: Vertikalni pomik po fazah v točki B.....	68
SLIKA 90: Horizontalni pomik po fazah v točki B.....	68
SLIKA 91: Levo, osna sila dobljena s PHASE <sup>2</sup> , desno dobljena s PLAXIS-om.....	69
SLIKA 92: Levo, strižna sila dobljena s PHASE <sup>2</sup> , desno dobljeno s PLAXIS-om .....	69
SLIKA 93: Levo, moment dobljen z PHASE <sup>2</sup> , desno dobljeno s PLAXIS-om.....	69
SLIKA 94: Točke opazovanja okrog leve predorske cevi za profil 80+250.....	70
SLIKA 95: Prikaz glavnih napetosti sigma 1 .....	71
SLIKA 96: Prikaz glavnih napetosti sigma 3 .....	71
SLIKA 97: Prikaz glavnih napetosti sigma Z.....	71
SLIKA 98: Totalne napetosti dobljene s programom PHASE <sup>2</sup> .....	72
SLIKA 99: Totalne napetosti dobljene s programom PLAXIS.....	72
SLIKA 100: Vertikalni pomiki na površju za profil 80+300 .....	73
SLIKA 101: Horizontalni pomiki na površju za profil 80+300 .....	73
SLIKA 102: Po izkopu desne predorske cevi.....	74
SLIKA 103: Po izkopu kalote v levi predorski cevi.....	74
SLIKA 104: Po izkopu obeh predorskih cevi.....	74

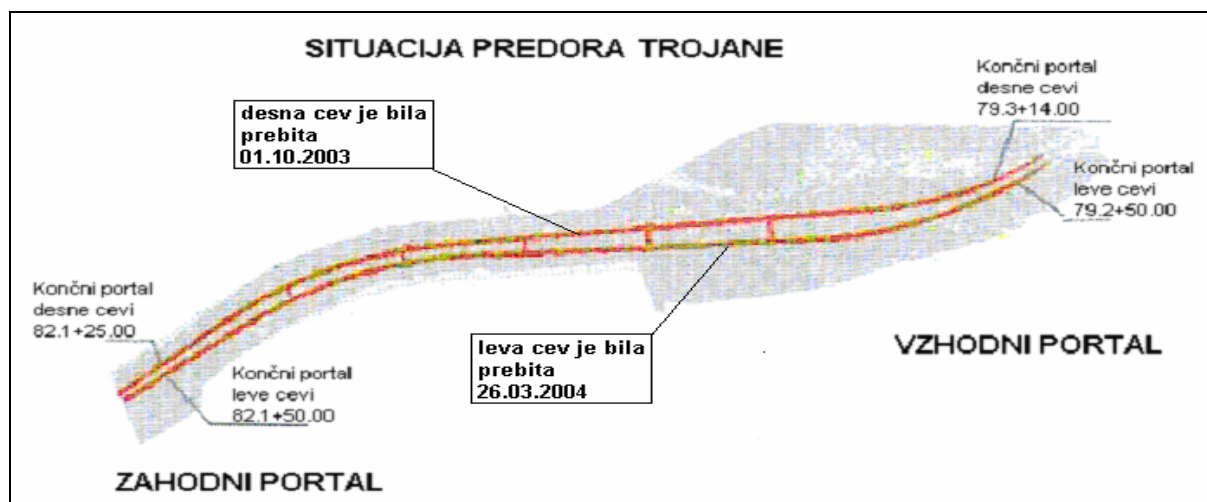


## 1 UVOD

Predor Trojane je najdaljši izmed štirih predorov, zgrajenih na avtocesti Ljubljana – Celje, na odseku med Vranskim in Blagovico. To je tretji zaporedni dvopasovni predor, gledano v smeri Celje – Ljubljana, ki ga sestavljata dve vzporedni cevi.



SLIKA 1: Vzdolžni prerez avtocestnega odseka Vranksko – Blagovica

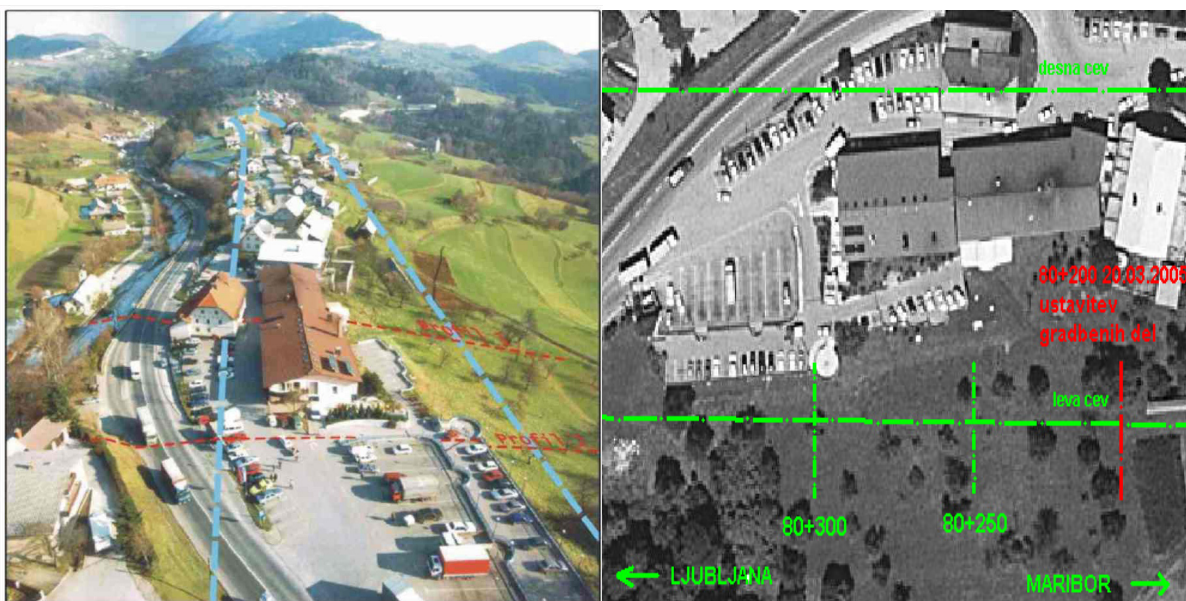


SLIKA 2: Situacija predora Trojane

Trasa avtoceste je na območju Trojan speljana tako, da je prilagojena zahtevanim prometno tehničnim in okoljevarstvenim pogojem, v manjši meri pa upošteva geološko-geotehnične

razmere v smislu iskanja manj zahtevnih pogojev gradnje. Območje, kjer je v prostor umeščen dvocevni dvopasovni predor Trojane, ki je dolg okrog 2900 metrov, je gričevnato in hribovito. V pretežni meri ga gradijo kamnine karbonske in permske starosti (345 – 280 milijon let / era: paleozoik). To sta pretežno meljevec in glinovec, v manjšem deležu pa še peščenjaki, ki so bili v geološki zgodovini podvrženi več tektonskim fazam preoblikovanja. V geotehničnem smislu lahko hribinsko maso na celotnem območju predora ocenimo kot nizkonosilno.

Predorski cevi imata ekvivalentni premer okrog 11 m, gradnja pa je potekala ob upoštevanju principov nove avstrijske metode (NATM). Zahtevne geotehnične razmere, majhna debelina nadkritja in prisotnost poseljenega območja nad predorskima cevema so najpomembnejša dejstva, ki so vplivala na potek gradnje. Tako je prišlo dne 20.03.03 na stacionaži 80+200, (leva predorska cev) do ustavitve gradbenih del zaradi prevelikega vpliva izkopa predora na objekte na površini.



**SLIKA 3:** Potek trase predora Trojane v naselju Trojane [9]

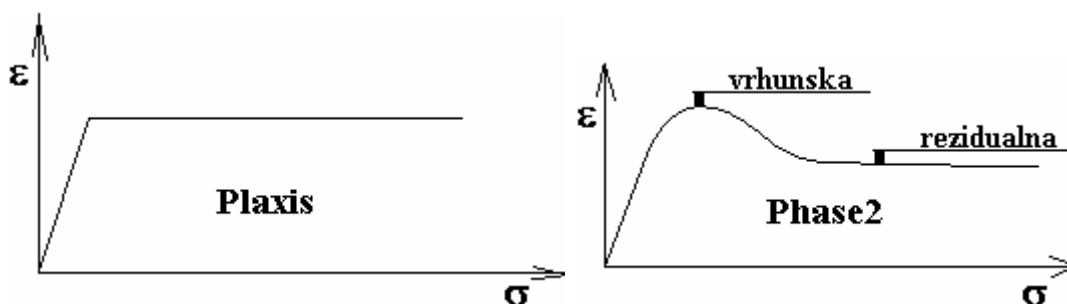
Široko zastavljen opazovalni sistem, ki je bil postavljen na vseh ključnih objektih na površini, kot so ceste, stanovanjski in gospodarski objekti, plinovod, električne napeljave itd., je omogočal kontrolo deformacij, ki so nastale zaradi gradnje predora. Sistem opazovanj v predoru in na površini sta omogočala določitev deformacijskega polja nad predorom.

## 1.1 Namen diplomske naloge

Na osnovi že napisane diplomske naloge [1] s programom Plaxis želim prikazati razlike med programom Phase<sup>2</sup>, ki ga bom uporabljal za analize svojih primerov in Plaxis-om. Pri izračunu bom upošteval vhodne podatke za Mohr Coulomb-ov materialni model, ki so bili uporabljeni pri analizi s programom Plaxis, prav tako, pa bom upošteval isto število faz izkopov.

Programa Plaxis in Phase<sup>2</sup> sta oba namenjena analizam geotehničnih problemov z metodo končnih elementov za ravninska deformacijska stanja ob upoštevanju nelinearnih odnosov med napetostmi in deformacijami. Uporabljata trikotne končne elemente z različnimi stopnjami interpolacije pomikov po elementu.

Poglavitne razlike med programoma Phase<sup>2</sup> in Plaxis so v načinu definiranja začetnega napetostnega stanja, v načinu simulacije 3D razmer ob čelu izkopa in v podrobnostih Mohr-Coulombovega materialnega modela. V programu Plaxis je Mohr-Coulombov model idealno elastoplastičen brez utrjevanja, medtem ko je v programu Phase<sup>2</sup> dodana lastnost mehčanja materiala, kot je prikazano na spodnji sliki (Slika 4).



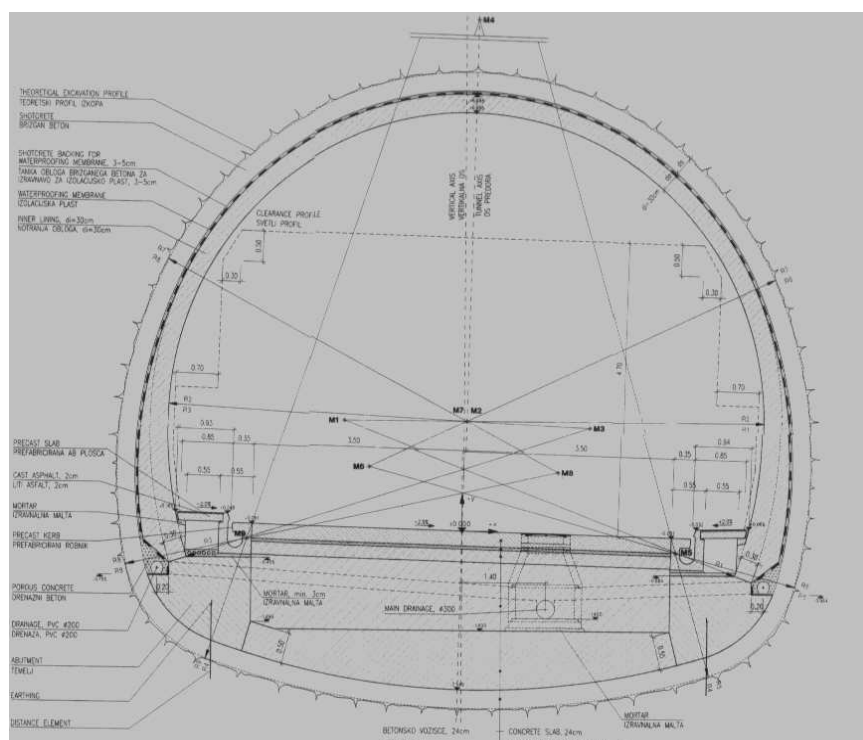
**SLIKA 4:** Razlika med Mohr-Coulombovim modelom v Plaxis-u in Phase<sup>2</sup>

Plaxis omogoča modeliranje 3 dimenzionalnega problema izkopa predora z  $\beta$ -metodo, kar pomeni, da za posamezno računsko fazo povemo, kolikšen delež celotne obtežbe naj se izvrši v dani fazi.

Pri programu Phase<sup>2</sup> neposredna uporaba  $\beta$ -metode ni mogoča, zato sem uporabljal  $\alpha$ -metodo, kar pomeni, da deformacije pred vgradnjo podporja omogočimo tako, da zmanjšamo modul elastičnosti materialu znotraj predora. Tako z  $\beta$ -metodo, kot z  $\alpha$ -metodo simuliramo deformacije, ki se zgodijo pred čelom izkopa.

## 2 SPLOŠNI PODATKI IN RAZISKOVALNA DELA PREDORA TROJANE

Dvopasovni in dvocevni predor Trojane (odsek Vransko – Blagovica) je bil z dolžino 2900 m leve cevi, eden najtežjih avtocestnih objektov v Sloveniji, saj dolino z nadmorsko višino do 400 m oklepajo hribi in gore nadmorske višine od 700 do 900 m. To je najdaljši predor v sklopu avtocestne povezave med Ljubljano in Celjem. Celotna trasa je bila načrtovana tako, da avtocesta preko Trojan prevzame funkcijo sedanje glavne ceste G1-10 oziroma evropske ceste E 57. Največja nadmorska višina predora znaša 529 m, prečni presek predora je 90 m<sup>2</sup>, višina svetlega voznega profila 4,7 m, širina vozišča 7,70 m, vzdolžni nagib vozišča od +0,5% do -0,5%, prečni nagib vozišča 2,5% in minimalni horizontalni radij 1500 m oziroma 1200 m (leva oziroma desna cev).



SLIKA 5: Splošni prečni prezek predora

Geotehnični pogoji gradnje so bili zahtevni, predor poteka skozi karbonskopermske kamnine, ki se sestojte pretežno iz skrilavih glinovcev, meljevcev in v manjšem obsegu peščenjakov. Traso predora seka več prelomnih con, v okolici katerih je hribina tektonsko poškodovana (razlomljena in/ali pregnetena), poleg tega pa je hribinska masa podvržena preperevanju. Kot



za vse predore v sklopu izgradnje slovenskega avtocestnega križa se je tudi za predor Trojane uporabljala nova avstrijska metoda gradnje predorov.

### **Podatki o trasi, predoru in portalih**

- o V prvem kilometru, gledano iz smeri vzhod – zahod, teče predor pod relativno majhnim nadkritjem, od 25 do 35 m (površina nad njim je poseljena s stanovanjskimi hišami in drugimi objekti). V naslednjem kilometru globina predora po večini zraste na maksimalnih 130 m, zadnjih 700 m pa teče predor pod nadkritjem 20 – 40 m, s tem, da se na enem odseku dolžine cca 85 m povsem približa površini, tako da nadkritja praktično ni.
- o Razmik med osema obeh predorskih cevi je 40 do 70 m.
- o Podporni sistem v predoru se spreminja glede na hribinske razmere.

### Vzhodni portal

Območje vzhodnega portala je zgrajeno iz temnosivega skrilavega meljevca s plastmi laminiranega drobnnozrnatega peščenjaka in črnega glinastega skrilavca.



**SLIKA 6:** Vzhodni portal v času gradnje

### Zahodni portal

Območje zahodnega portala je zgrajeno iz temno sivega glinastega skrilavca, s plastmi skrilavega meljevca in drobnnozrnatega peščenjaka.



**SLIKA 7:** Zahodni portal v času gradnje

**Potem se je zgodilo.**

## Dnevnik

Četrtek, 2.10.2003

### Predor Trojane včeraj prebit

Romana Špende



**SLIKA 8:** Prebitje predorske cevi

**TROJANE** - Včeraj malo po 13. uri je v predoru Trojane završalo. Množica delavcev, ki vrtajo najdaljši dvocevni predor v Sloveniji, je z navdušenjem pozdravila njegovo prebitje. Po vseh zapletih, ki so spremljali gradnjo enega najdražjih objektov na slovenskih avtocestah, so si v italijanski družbi Grassetto, ki s podizvajalci hiti vrtati v negostoljubno zemljino, lahko začasno oddahnili. Do konca, rok za dokončanje vsega odseka s predorom vred se izteče spomladi 2005, njih pa čaka še veliko dela.

**Kako se je začelo ?**



Za potrebe projektiranja predora so bile izvedene geološko geotehnične raziskave in sicer v dveh fazah. V prvi fazi je bil izdelan idejni projekt (leto 1995). V drugi fazi je bil izdelan projekt za gradbeno dovoljenje (leto 1999). Gradnja predora Trojane se je začela jeseni leta 2000. Gradbena dela na portalih pa so se pričela izvajati že leto prej.

## 2.1 Terenska dela

### 2.1.1 Raziskovalna vrtanja in sondažni izkopi

Raziskovalna vrtanja na trasi predora Trojane so potekala od 18.11.1994 do 01.01.1995. Izvrtanih je bilo sedem vrtin, skupne dolžine 354 m (T-1, T-2, T-3, T-4, T-5, T-6, T-2a). Vrtine so bile v celoti jedrovane, razen vrtine T-4, ki ni bila jedrovana.

Na odseku med stacionažo 80+200 in 80+400 so naknadno, ko je prišlo do velikih deformacij na objektih, naredili še podrobnejšo analizo terena. Izvrtane so bile še štiri geološke vrtine (T-8, T-9, T-10, in T-11), dve geomehanski vrtini (V-1, V-2) ter sondažni jašek (K-4) (Slika 9).

Spremljavo vrtanja je obsegala geološki popis jedra, meritve nagiba skrilavosti in plastovitosti, gostote razpok, vzorčenje vzorcev za geomehanske in petrografske preiskave, registracijo pojavljanja vode in izgubljanje izplake, ter stalne meritve možnih pojavov metana.



**SLIKA 9:** Prikaz dodatnih raziskovalnih vrtin na območju gostišča Trojane, izvedene leta 03



## 2.1.2 Geofizikalne meritve

Geofizikalne meritve so zajemale:

- o seizmične down hole meritve v vrtnah T-2 in T-2a
- o karotažne meritve v vrtini T-4 in
- o geoelektrične meritve zveznega upornostnega sondiranja.

### Seizmične down hole meritve

Te meritve so bile izvedene na razcevljenih vrtnah T-2 (do globine 44 m) in T-2a (do globine 40 m). Za sprejem seizmičnih valov je bila uporabljena trikomponentna geofonska sonda. Rezultati down-hole meritve predstavljajo izračunane povprečne in intervalne hitrosti P in S valov. Na podlagi intervalnih hitrosti P in S valov ter podatkov o gostoti kamnine so bili izračunani naslednji dinamični-elastični parametri:

- o Poissonov količnik.....(  $\nu$  )
- o Youngov modul.....( E )
- o strižni modul.....( G )
- o kompresijski modul.....( K )

### Karotažne meritve

Karotažne meritve so bile izvedene do globine 57 m v vrtini T-4.

S to meritvijo so bili merjeni naslednji parametri:

- o lastni potencial
- o normalna električna specifična upornost
- o premer vrtine (caliper)
- o naravni gama

Z meritvijo lastnega potenciala in normalne električne specifične upornosti na stenah vrtine se določi litološko različne odseke z različno trdnostjo (razpokanost, skrjavost, plastovitost,...). Z gama karotažo pa se določi vsebnost glinaste frakcije. Na podlagi vseh karotažnih podatkov je bila izvedena vizuelna interpretacija litološke zgradbe z opisom.

### Geoelektrične meritve zveznega upornostnega sondiranja

Te meritve so bile izvedene na 595 m dolgem profilu, od 20 do 100 m južno od leve cevi predora. Profil ni potekal po trasi predora zaradi poseljenosti ozemlja in s tem prisotnosti

podzemnih instalacij in drugih virov električnih šumov. Namen te meritve je bila določitev lege prelomne cone, ki naj bi potekala po dolini v smeri severozahod-jugovzhod.

### **2.1.3 Geotehnične meritve**

Geotehnične meritve v raziskovalnih vrtinah so:

- o presiometerske meritve v vrtinah T-1, T-2, T-3 in T-4
- o meritve SPT (standardni penetracijski test)

### **2.1.4 Hidrogeološke meritve**

Hidrogeološke meritve zajemajo:

- o nalivalne preizkuse v vrtinah
- o merjenje nivoja vode in dotokov med vrtnjem
- o meritve izgubljanja izplake med vrtnjem
- o meritve nivoja vode v piezometru po končanem vrtnju
- o meritve dotokov vode na izviroh
- o odvzem vzorcev vode za laboratorijske preiskave agresivnosti za beton

### **2.1.5 Inženirsko geološko kartiranje terena**

Območje predora Trojane so inženirsko-geološko kartirali že leta 1994. Celotno ozemlje, ki so ga kartirali, sestavljajo večinoma mehki, mehansko malo odporni paleozojski klastiti. Zaradi debele preperine je malo izdankov. Ti se večinoma nahajajo v grapah in strugah potokov. Problem pri kartiranju predstavlja tudi polzenje glinastega skrilavca na površini, kar dostikrat onemogoča korektne meritve strukturnih elementov.

Pri evidentiranju litostratigrafskih podatkov so ločevali drobno zrnate klastite (glinast skrilavec, skrilav meljevec) od bolj debelo zrnatih (drobno in srednje zrnatega peščenjaka). Pri zbiranju tektonskih podatkov so posebej pazili na gube, prelome in pregnetene cone. Pri kartiranju so zbrali tudi dosti podatkov o plazovih, močilih in izviroh. Plazovi se pogosto pojavljajo na glinastem skrilavcu in skrilavem meljevcu, ker obstaja na teh dveh litoloških členih debel preperinski pokrov, ki je močno plazljiv. Pojavljanje izvirov in močil opozarja na prisotnost vodonosnih plasti in tektonskih con.

## **2.2 Laboratorijske preiskave hribin in zemljin**

### **2.2.1 Laboratorijske preiskave hribin**

Laboratorijske preiskave odvzetih vzorcev so bile opravljene v geomehanskem laboratoriju IRGO. Odvzetih je bilo 17 vzorcev hribine. Z ozirom na to, da je bilo mogoče odvzeti relativno malo vzorcev za laboratorijske geomehanske preiskave, je izvajalec preiskav prilagodil svoj program tako, da je dobil maksimalno število podatkov iz pridobljenih vzorcev.

Vzorčeni so bili naslednji tipi hribine:

- temnosiva tektonska glina (z glinastim skrilavcem)
- glinasti skrilavec in meljevec
- močno skrilavi glinasti skrilavec in pregneteni glinasti skrilavec
- sivi drobnozrnati peščenjak

V laboratoriju so bile ugotovljene naslednje fizikalne lastnosti vzorcev:

- naravna vlažnost in
- prostorninska teža

poleg njih pa še trdnostne lastnosti in sicer:

- enoosna tlačna trdnost
- natezna trdnost
- strižna trdnost (preiskana v Cassagrandejevem strižnem aparatu).

Deformacijske lastnosti hribine so bile merjene med preiskavami enoosne tlačne trdnosti. Rezultati mineraloških preiskav vzorcev glinastega skrilavca so pokazali, da ta kamnina vsebuje tudi nabrekliivi mineral montmorillonit. Zaradi tega so dali v laboratorij preiskati še nabreklijivost te kamnine.

### **2.2.2 Laboratorijske preiskave zemljin**

Laboratorijske preiskave zemljin so bile opravljene na vzorcih iz vrtine T-6. Določene pa so naslednje fizikalne lastnosti zemljine:

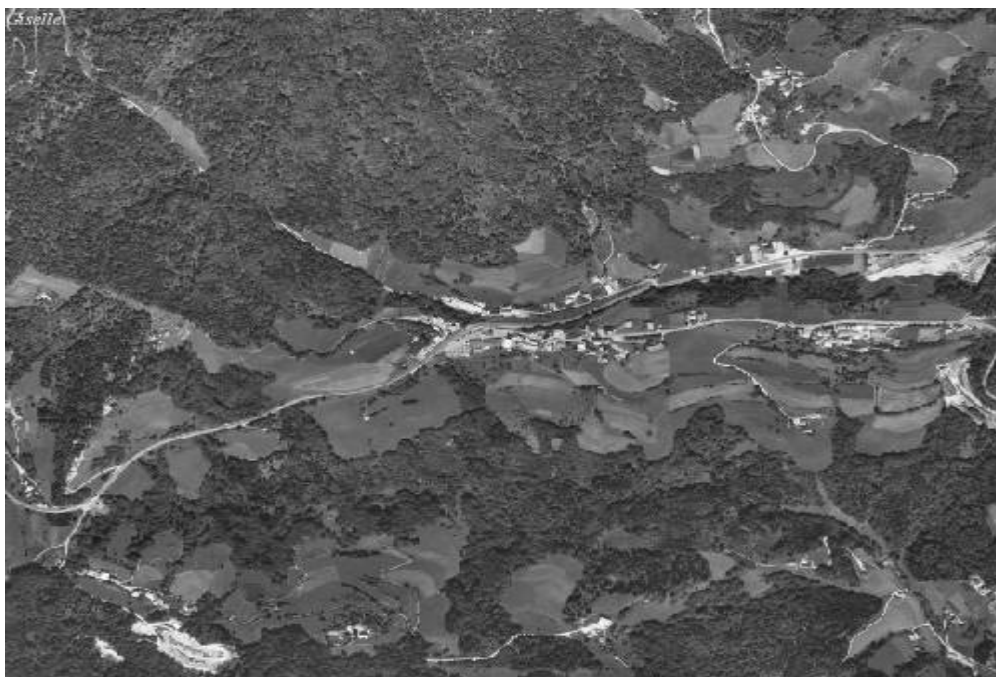
- naravna vlažnost
- suha prostorninska teža
- naravna prostorninska teža in
- klasifikacija vzorca.

Poleg tega je bila preiskana tudi strižna trdnost vzorca z direktno strižno preiskavo.

## 2.3 Rezultati geološko geotehničnih raziskav

### 2.3.1 Geomorfološki opis terena

Ozemlje Trojan, pod katerim je načrtovan bodoči predor, leži na prehodu med Ljubljansko in Celjsko kotlino. Trojane ležijo med 500 in 700 metri nadmorske višine. Ker je področje sestavljeno večinoma iz manj odpornih kamnin, nikjer ne najdemo zelo strmih pobočij. Vzhodni del bodočega predora poteka pod zaobljeni grebenom, ki se na nadmorski višini 570 metrov razteza od zaselka "V Zideh" do gostišča Trojane, na nadmorski višini okoli 570 metrov. Severni del grebena med potokom Bolsko in cesto Trojane-Zagorje je večinoma poraščen z gozdom. Južno pobočje je večinoma pokrito z njivami in travniki. Sam greben je precej gosto pozidan z družinskimi hišami ter z večjo stavbo gostišča Trojane.[1]



**SLIKA 10:** Letalski posnetek širšega območja naselja Trojane [9]

Osrednji del bodočega predora poteka nato pod hribom Šipek (688 m), ki predstavlja zahodni podaljšek trojanskega grebena. Zahodni del predora nato prečka dolino pod Učakom in poteka pod gozdnatim pobočjem južno in jugozahodno od Šentožbolta, kjer se nahaja tudi zahodni portal predora. Na območju bodočega predora se pojavljata dva večja vodotoka. Na vzhodnem delu bodoče trase je potok Bolska, ki teče severno od njega proti Savinjski dolini, na zahodnem delu pa teče potok Radomlja, mimo Šentožbolta proti Ljubljanski kotlini. Oba potoka sta hudourniška.

### **2.3.2 Geološka zgradba širšega območja**

Območje bodočega predora Trojane leži v tektonski enoti Kozjaškega nariva. V čelu Kozjaškega nariva je antiklinala z inverznim južnim krilom. Nariv se razteza v obliki nekaj kilometrov širokega pasu pretežno paleozojskih plasti, v smeri vzhod-zahod. Na območju Trojan vpadajo plasti večinoma na sever. Preko območja predora gredo tako štirje močnejši dinarsko usmerjeni subvertikalni prelomi in sicer: Zagorski prelom vzhodno od zaselka V Zideh, Orehovški prelom v bližini gostišča Trojane, ki seka tudi traso predora, neimenovani prelom nekoliko zahodneje od Orehovškega in Škocijanski prelom vzhodno od Šentožbolta. Med posameznimi prelomi slemenijo plasti v dinarski smeri in ne v smeri vzhod-zahod, te plasti so nagubane v gube.

### **2.3.3 Geotehnični opis kamnin v območju predora Trojane**

V okolici predora Trojane nastopajo predvsem permokarbonski klastiti. V njih nastopajo glinasti skrilavec, skrilavi meljevca in drobno do srednje zrnati peščenjak. Na tem območju Trojan imamo menjavanje več deset metrov do več kot sto metrov debelih horizontov peščenjaka, skrilavca in meljevca.

#### **Temno siv do črn glinast skrilavec**

Občasno vsebuje lamine, leče in pole svetlejšega, bolj sljudnega meljevca. Kamnina je delno metamorfozirana. Zaradi slabe mehanske odpornosti je glinasti skrilavec pogosto naguban. V večjih prelomih je pregneten in spremenjen v tektonsko glino. Glinast skrilavec je zelo plastična kamnina, ki pod vplivom vode in atmosferskih vplivov zelo hitro prepereva in razpada. Ob stiku z vodo se mu trdnostne lastnosti drastično zmanjšajo, zato ga je potrebno v najkrajšem času zaščititi z oblogo. Hitro razpadanje glinastega skrilavca pripisujemo njegovi

vsebnosti nabreklih mineralov glin. Glinast skrilavec in skrilavi meljevec, ki je od njega le nekoliko trdnjši in krhkejši, sicer pa mu je v lastnostih zelo podoben, navadno ga najdemo drugega ob drugem, zato ju pri podajanju geotehničnih lastnosti jemljemo v skupnem paketu. Meljevec je proti vodi in atmosferskim vplivom nekoliko bolj odporen. Geomehanske laboratorijske preiskave so dale naslednje podatke iz te hribine:

- naravna vlažnost od 6,6 do 8,6% (kadar tektonsko ni močneje poškodovan) in
- 10,6 do 12,8% v prelomnih conah.
- spremenjen v tektonsko glino se mu naravna vlažnost dvigne do 13,7%.
- prostorninska teža te hribine znaša okrog 24 kN/m<sup>3</sup>.
- enosna tlačna trdnost je zelo nizka 584 kPa (najvišja izmerjena vrednost).
- strižni preizkus je dal vrednosti za glinasti skrilavec in skrilavi meljevec  
od  $c = 30$  kPa in  $\varphi = 19,5^\circ$  do  $c = 42$  kPa in  $\varphi = 23^\circ$ .

Modul elastičnosti, pridobljen z terenskimi meritvami z elastometrom dajo vrednosti

- za tektonsko glino 200 MPa.
- za tektonsko močno poškodovani glinasti skrilavec s polami peščenjaka 1300 MPa.
- za skrilavi meljevec 800 MPa.

Meritve hitrosti širjenja seizmičnih valov v tej hribini so dale naslednje intervalne hitrosti:

- $V_s = 0,55$  do  $1,47$  km/s,  $V_p = 1,1$  do  $2,52$  km/s in iz njih so izračunani dinamični parametri:  $E_{din} = 1,7$  do  $13,0$  GPa,  $\nu = 0,36$  do  $0,22$ .

### **Siv do temno siv kremenov peščenjak**

Največkrat je sive do temno sive barve, drobno do srednje zrnat. Kremenov peščenjak je mehansko odpornejša kamnina malo občutljiva na vodo in atmosferske vplive. V odvisnosti od njegove razpokanosti je tudi njegova vodoprepustnost. Kremenov peščenjak je abraziven, vsebuje okrog 60% kremen. Peščenjak na Trojanah je slabše kakovosti, vsebuje več glinencev in je skrilav, ter zato anizotropen, z nižjo tlačno trdnostjo od običajne.

Preiskave modula elastičnosti z elastometrom so dale rezultate, ki kažejo na to, da znaša modul elastičnosti hribine z vključki peščenjaka 1,3 GPa.

Intervalne seizmične hitrosti so ob prisotnosti peščenjaka močno narasle:

$$V_s = 1,38 \text{ km/s,}$$

$$V_p = 2,38 \text{ km/s iz tega sledi da je } E_{din} = 14,7 \text{ GPa in } \nu = 0,29.$$

## Preperinski pokrov

Preperinski pokrov pretežno sestavlja rjava glina, peščena, srednje gnetna do poltrdne konsistence, z drobcami skrilavca in peščenjaka.

- naravna prostorninska teža od 21,6 kN/m<sup>3</sup> do 22,6 kN/m<sup>3</sup>
- strižni kot od 21° do 27° ter
- kohezija od 5 do 9 kPa
- enoosna tlačna trdnost je od 50 do 400 kPa.

Ta debelina preperinskega pokrova je pomembna zaradi nizkega nadkritja nad cevema ter za oceno stabilnosti na portalih. Giblje se od 1 do 5 m po trasi z nizkim nadkritjem, medtem ko se na zahodnem portalu poveča na okoli 8 m in je nestabilna.

## 2.4 Prognoza geotehničnih razmer

V tej prognozi je podan komentar samo za odsek, ki ga obravnavam (obravnavam stacionažo 80+300 in 80+250).

Komentar, k inženirsko geološkemu profilu.

**Odsek od 79+955 do 80+450** leva cev (južna)

**Odsek med 79+810 in 80+350** desna cev (severna)

To je bil najzahtevnejši del predora. Trasa poteka po tektonsko pregnetem permokarbonskem glinastem skrilavcu in skrilavem meljevcu, večji del pod stanovanjskimi objekti, ki so tik nad traso, na vertikalni oddaljenosti od 24 do 27 m od kalote predora. V tej coni so bili možni občasni pojavi vode vendar do tega ni prišlo. Prisotnost vode bi še zmanjšala že tako nizke trdnostne lastnosti pregnetenega in pogosto v tektonsko glino spremenjenega glinastega skrilavca. V zadnjem delu tega odseka teče trasa predora cca 35 m pod obstoječo magistralno cesto Ljubljana – Celje.

Skozi ta odsek ni bilo mogoče graditi predora brez posebnih varovalnih postopkov. Najslabšim geološkim razmeram je tukaj dodano še relativno majhno nadkritje in pogoj, da vpliv izkopavanja na površini ne smejo preseči vrednosti nekaj centimetrov.

Potreben je stalni monitoring deformacij v predoru in na površini v času gradnje.

### 3 TEHNOLOGIJA GRADNJE

#### 3.1 Kategorizacija hribine

Pri projektiranju predora Trojane so si projektanti pomagali s hribinsko klasifikacijo povzeto iz novega avstrijskega standarda ÖNORM B 2203.[6]

**PREGLEDNICA 1: Hribinska klasifikacija**

<b>HRIBINSKA KATEGORIJA</b>	<b>KRATEK OPIS</b>
<b>A1</b>	Stabilni hribinski pogoji
<b>A2</b>	Hribina podvržena majhnim porušitvam
<b>B1</b>	Delno nevezana in razpokana hribina
<b>B2</b>	Močno strukturno poškodovana hribina
<b>B3</b>	Nevezana hribina z nizko kohezijo
<b>C1</b>	Hribina podvržena hribinskim udarom
<b>C2</b>	Hribina pod povečanim napetostnim stanjem
<b>C3</b>	Hribina pod močno povečanim napetostnim stanjem
<b>C4</b>	Mehke, iztisljive in hribine podvržene tečenju
<b>C5</b>	Hribine podvržene nabrekanju

Dodatno so bile določene še tri podporne kategorije za načrtovanje standardnih podpornih ukrepov.

**PREGLEDNICA 2: Podporna kategorija**

<b>PODPORNA KATEGORIJA</b>	<b>KRATEK OPIS</b>
<b>PC</b>	Območje portalov
<b>SCC</b>	Območje majhnega nadkritja
<b>SWG</b>	Območje majhnega nadkritja z minimalnimi dovoljenimi deformacijami

Glede na hribinsko kategorijo se določi podporni sistem in način izkopa. Slika (Slika 13 in 17) prikazujeta dva različna načina podpiranja.

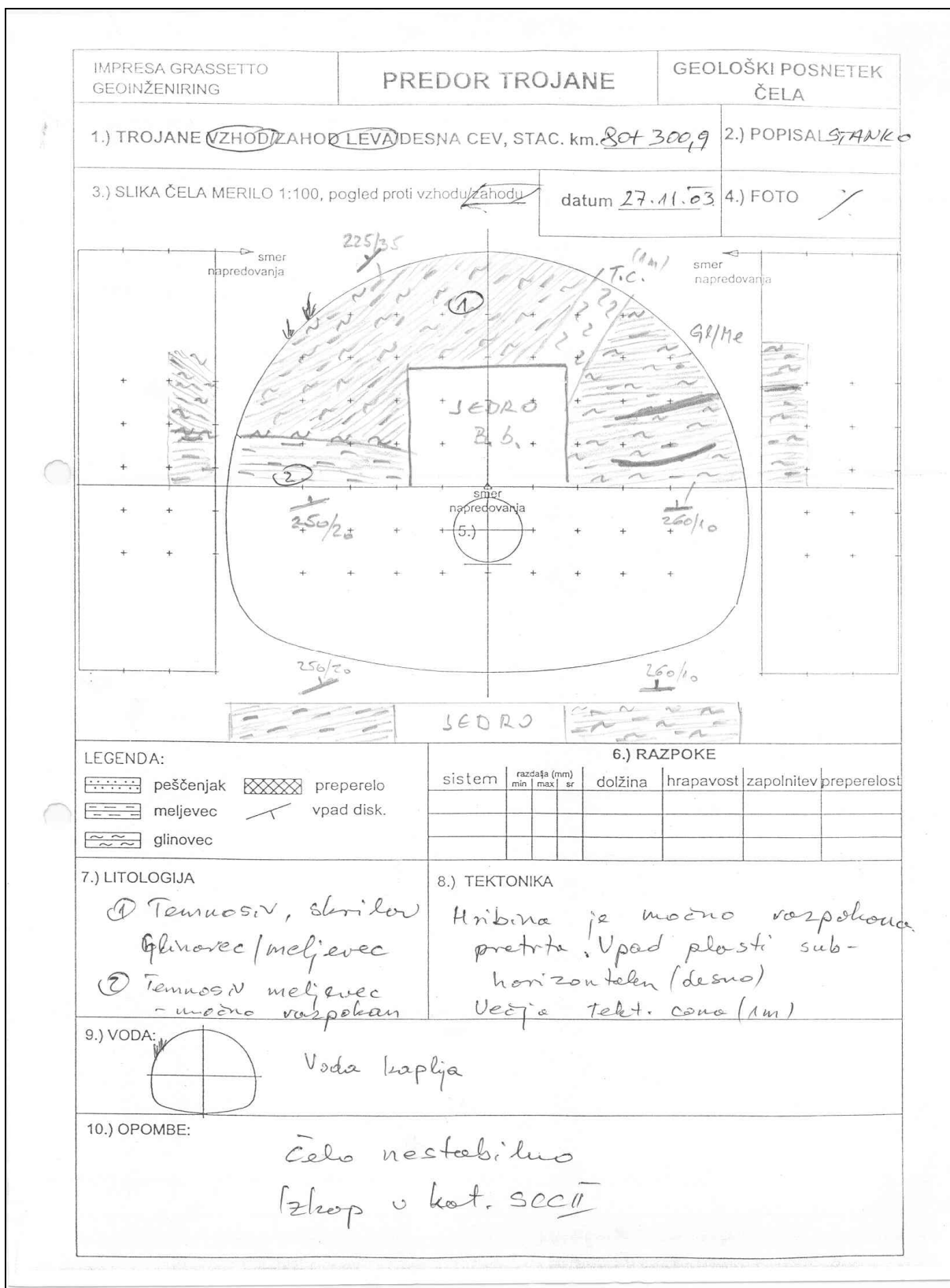


Tako določene hribinske kategorije ne upoštevajo samo lastnosti hribin okrog podzemnega prostora, ampak omogočajo oceno pričakovanih deformacij, zahteve razdelitev izkopnega profila na posamezne odseke, omogočajo oceno koraka napredovanja, razpored delovnih faz pri izkopu, vpliv podzemne vode in ocene intenzivnosti vgradnje podpornih elementov.

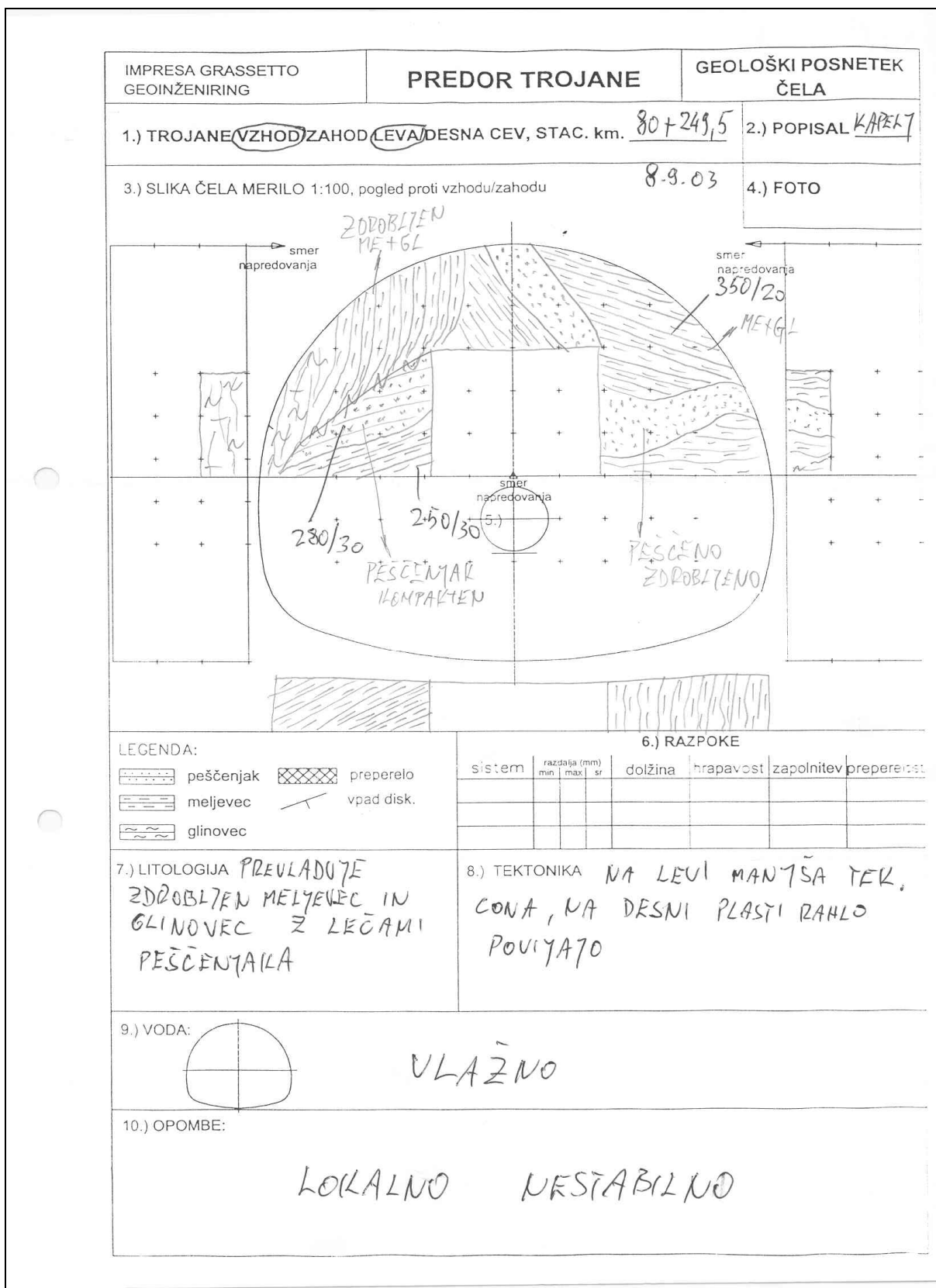
Standardne vrste podpornih elementov in možna dolžina koraka napredovanja izkopa za vsako hribinsko kategorijo so prikazani na načrtih, ki jih pripravi projektant. Spremenljivi geotehnični pogoji gradnje in nehomogene lastnosti hribin pogosto zahtevajo prilagajanje intenzivnosti podpornih ukrepov dejanskim razmeram na gradbišču.

### **Uporaba in postopki klasifikacije hribine**

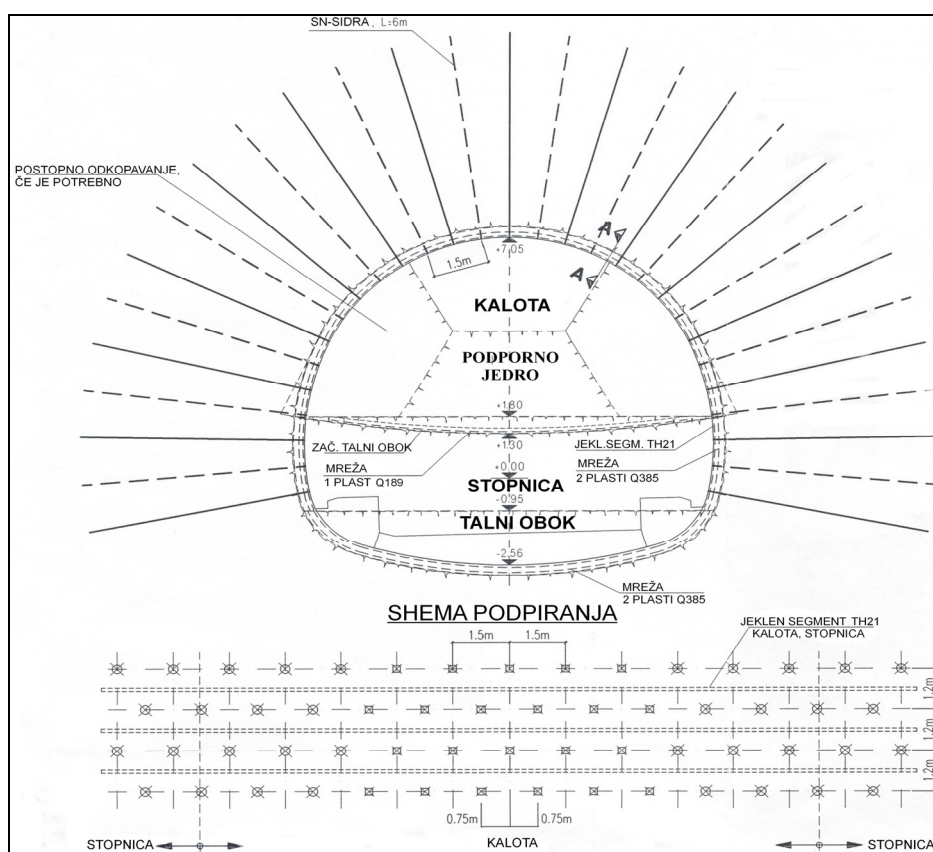
- o Tip hribine se določi na osnovi popisa hribine na čelu predora pred pričetkom napredovanja, kot to prikazujeta spodnji sliki (Slika 11 in 12).
- o Rezultati geotehničnih meritev v podobnih hribinskih razmerah so uporabni za oceno deformacij in določitev hribinske kategorije.
- o V odvisnosti od velikosti celotnega profila izkopa in geotehničnih pogojev gradnje je lahko izkopni profil razdeljen na pododseke, kar vpliva na določitev hribinske kategorije.
- o V primeru razdelitve izkopnega profila predora na kaloto, stopnico in talni obok se mora upoštevati za celoten profil tista kategorija, ki je bila ugotovljena in določena za kaloto.



**SLIKA 11:** Popis hribine na čelu predora pred pričetkom izkopa za stacionažo 80+300



SLIKA 12: Popis hribine na čelu predora pred pričetkom izkopa za stacionažo 80+250

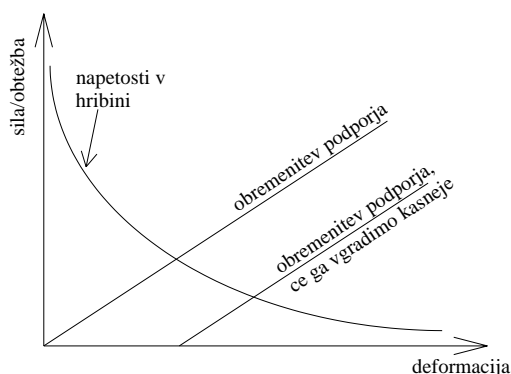


SLIKA 13: Podporni sistem v hribinski kategoriji C5 [3]

### 3.2 Tehnologija gradnje v predoru Trojane

Za gradnjo predora Trojane je bila uporabljena NOVA AVSTRIJSKA METODA – (NATM). NATM je metoda načrtovanja in gradnje podzemnih objektov, katere cilj je doseči tehnično učinkovito, varno in ekonomično načrtovanje in izgradnjo. Pri tej metodi se obravnava hribina okrog obroča kot breme ter kot nosilni obroč, ki to breme tudi nosi. To velja za hribine, ki lahko prenesejo dodatne obremenitve. V nizkonosilnih hribinah je nosilnejši obroč možno doseči z uporabo sodobnih tehnoloških postopkov, ki povečajo togost in trdnost hribine. Če se obroč okrog podzemnega prostora dodatno ojača, se samonosilnost obroča poveča. Tak pristop, pri katerem se obravnava hribina kot breme in hkrati kot nosilni obroč, ki breme nosi, do neke mere loči NATM od ostalih načinov načrtovanja, ki obravnavajo hribino okrog podzemnega prostora le kot breme, ki naj bi ga nosila izključno obloga v predoru. Za učinkovitost te metode je potrebno upoštevati naslednje dejavnike.

- o Pri izbiri profila oziroma oblike prostora mora biti upoštevano primarno napetostno stanje in lastnosti hribine ter okoliščine, ki vplivajo na zmanjšanje nosilnosti. Z obliko podzemnega prostora lahko zagotovimo, da ne pride do koncentracij napetosti v oblogi predora.
- o Izkop profila se izvaja postopoma (kalota, stopnica in po potrebi talni obok) z namenom čim manjšega deformiranja hribine in zagotavljanja stabilnosti izkopa.
- o Podporni ukrepi se določajo na podlagi predhodnih raziskav in kategorizacije hribine v ustrezne razrede vzdolž trase podzemnega objekta.
- o Vgrajevanje podpornih elementov mora biti časovno optimalno in postopno, da ne pride do večjih deformacij hribine. Podporni elementi so predvsem jekleni loki, armaturne mreže, brizgani beton in hribinska sidra. Ti podporni elementi se med gradnjo prilagajajo spremenljivim geotehničnim razmeram vzdolž objekta.
- o Primarna obloga mora biti takšna, da zagotavlja trajno stabilnost sistema hribina – podporni sistem, medtem ko notranja obloga, ki še dodatno poveča stabilnost podzemnega prostora, daje objektu izgled, izboljša vodoneprepustnost, omogoča boljši pretok zraka in lažje vzdrževanje.
- o Glede na rezultate geotehničnih meritev v predoru, ki so sestavni del NATM, je možno vgraditi dodatne podporne ukrepe. Merijo se pretežno deformacije v predoru, pa tudi napetosti v hribini in sile v sidrih.
- o Če nastopa hribinska voda pod visokimi pritiski, jo je potrebno ustrezno drenirati, da se zmanjšajo pritiski in negativen vpliv na lastnosti hribine.
- o Princip prenosa obremenitve na predorsko oblogo prikazuje spodnja slika (Slika 14).



**SLIKA 14:** Princip prenosa obremenitve na predorsko oblogo

Največji problemi so bili z levo cevjo in sicer od stacionaže 80+220 do 80+300. Tu so se dela tudi ustavila dne 20.03.03, vzrok je bil prevelik vpliv izkopa predora na objekte na površini. Potrebni so bili drugačni pogoji napredovanja, zato so bile izvedene dodatne detajlne strukturno geološke preiskave v območju leve cevi predora. Preiskave so bile izvedene za potrebe projektiranja dodatnih podpornih ukrepov za varovanje gostinskih objektov Trojane. Iz tega je sledilo, da se je zgoraj omenjeni predel izvajal v hribinski kategoriji SCC II tip 7, kar bo natančneje opisano v spodnji točki. Ta tip izkopa je bil uporabljen v levi cevi na odseku od stacionaže 80+220 do 80+370.

### **3.2.1 Način izvajanja del v hribinski kategoriji SCC II tip 7**

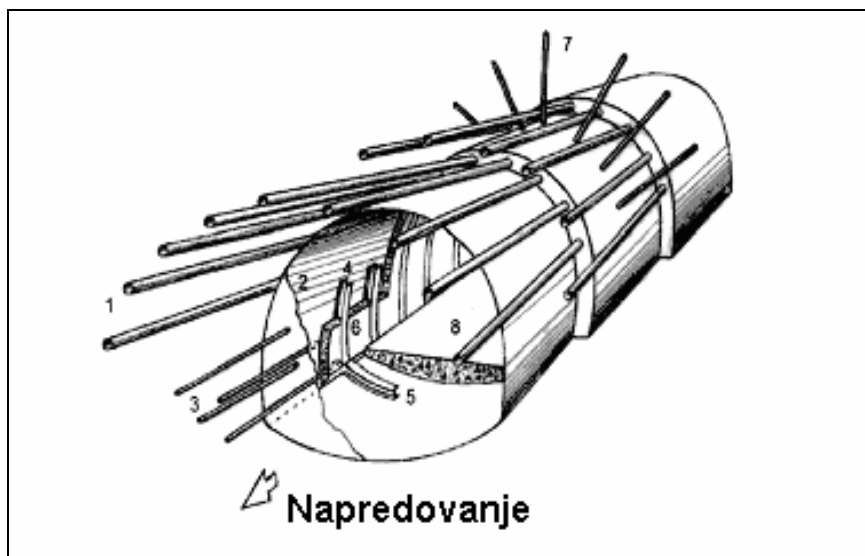
Izkop in vgradnja podpornih elementov je načrtovana po fazah tako, da je vzpostavljen kvaliteten stik med podpornimi elementi in okoliško hribino, kar omogoča prerazporeditev napetosti. SCC II tip 7 je bil načrtovan tako, da bi bili pomiki na površju čim manjši.

Dela pri izkopu predora so se izvajala v dveh fazah, to je faza A in faza B.

Faza A:

- o Vgradnja cevnega ščita dolžine 15 m v stropu predora. S tem je zagotovljena ustrezna zaščita prostora nad in pod izkopnim čelom, kar prikazujeta sliki (Slika 15 in 16).
- o Sidranje čela izkopa (IBO sidra dolžine 15 m in nosilnost 250 kN).
- o Izkop v kaloti in vgradnja podpornih elementov (izkop kalote se izvaja po delih (v 5 fazah) kot to prikazuje slika (Slika 17). Čelo izkopa se sprti varuje z mrežo Q189 in 15 cm debelo plastjo brizganega cementnega betona MB 25 ter s hribinskimi sidri. Čelo izkopa je bilo oblikovano vertikalno za fazo izkopa I, za faze II, III, IV in V pa pod kotom 85° glede na horizontalo. Podpiranje v kaloti se izvaja z brizganim cementnim betonom MB 25 debeline 35 cm, jeklenimi segmenti K24 in dvema plastema armaturnih mrež Q283 ter sidri IBO ali SN dolžine 9 m z nosilnostjo 250 kN na desnem boku in sidri IBO ali SN dolžine 6 m z nosilnostjo 250 kN na levem boku.
- o Vgradnjo mikro kolov in sider v območju slonove noge.
- o Vgradnja začasnega talnega oboka (iz brizganega betona MB 25 cm in armaturne mreže Q 283).

Sledi izkop kalote na razdalji enega koraka (0,8 m oz. 1,0 m).



**SLIKA 15:** Prikaz cevnega ščita

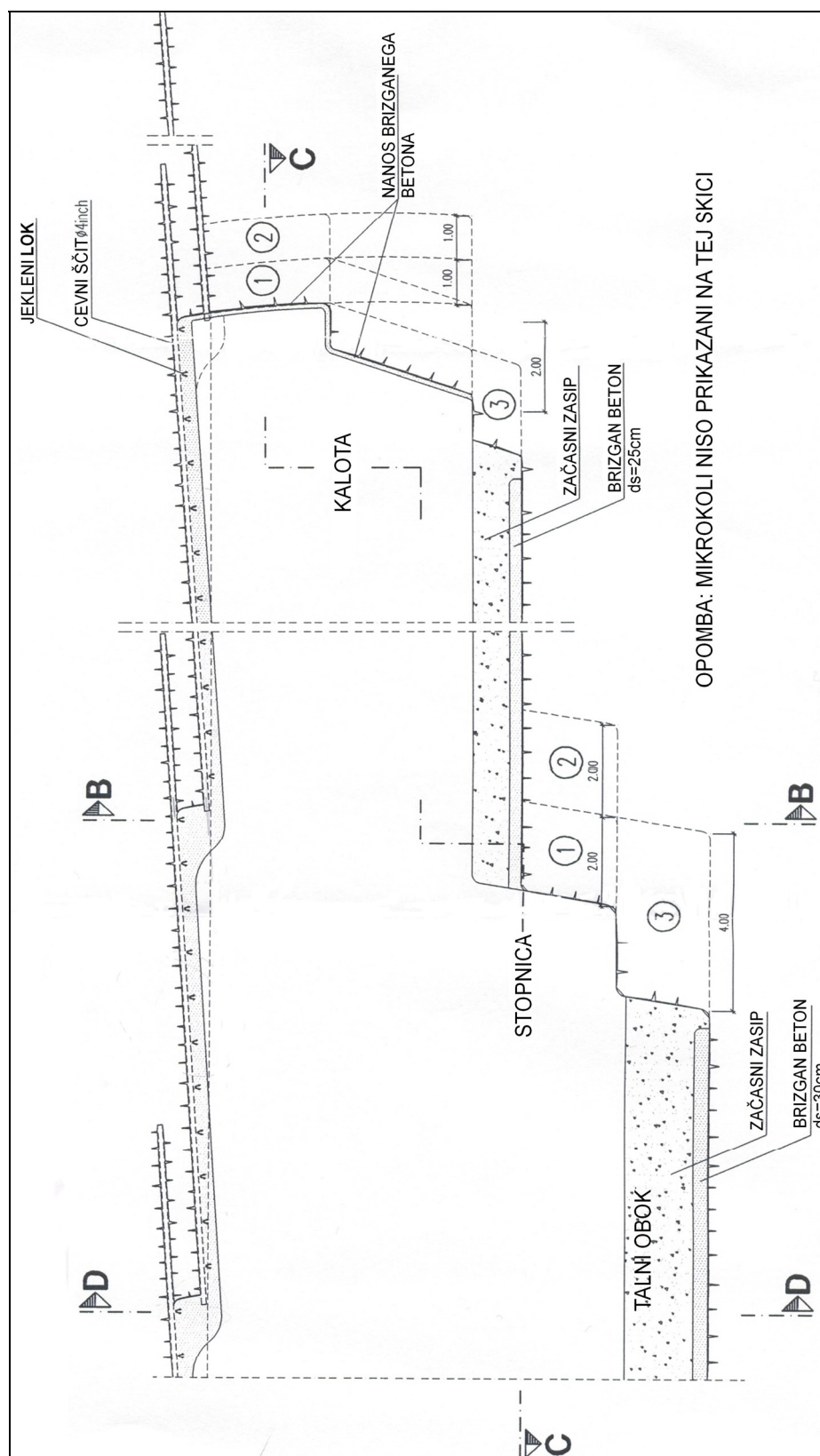


**SLIKA 16:** Prikaz cevnega ščita v predoru Trojane

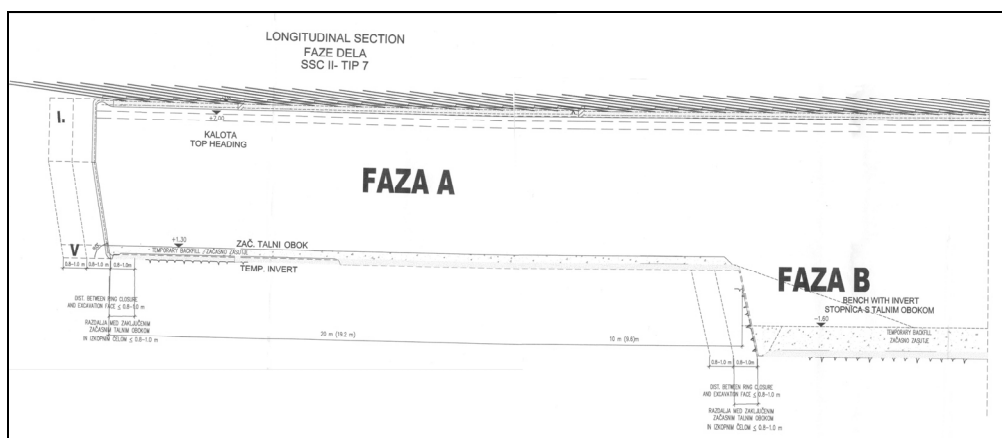








**SLIKA 18:** Shema izkopa v hribinski kategoriji SCC II, tip 7 v vzdolžni smeri



**SLIKA 19:** Faze dela v hribinski kategoriji SCC II, tip 7 v vzdolžni smeri

**Faza B:**

- Izkop stopnice, talnega oboka in vgradnjo podpornih elementov se izvaja po delih kot prikazuje slika (Slika 19). Podpiranje se je izvajalo z brizganim cementnim betonom MB 25 debeline 35 cm, jeklenimi segmenti K24 in dvema plastema armaturnih mrež Q 283 ter sidri IBO dolžine 6 m in IBO dolžine 9 m z nosilnostjo 250 kN.

### 3.3 Geotehnična spremljava gradnje

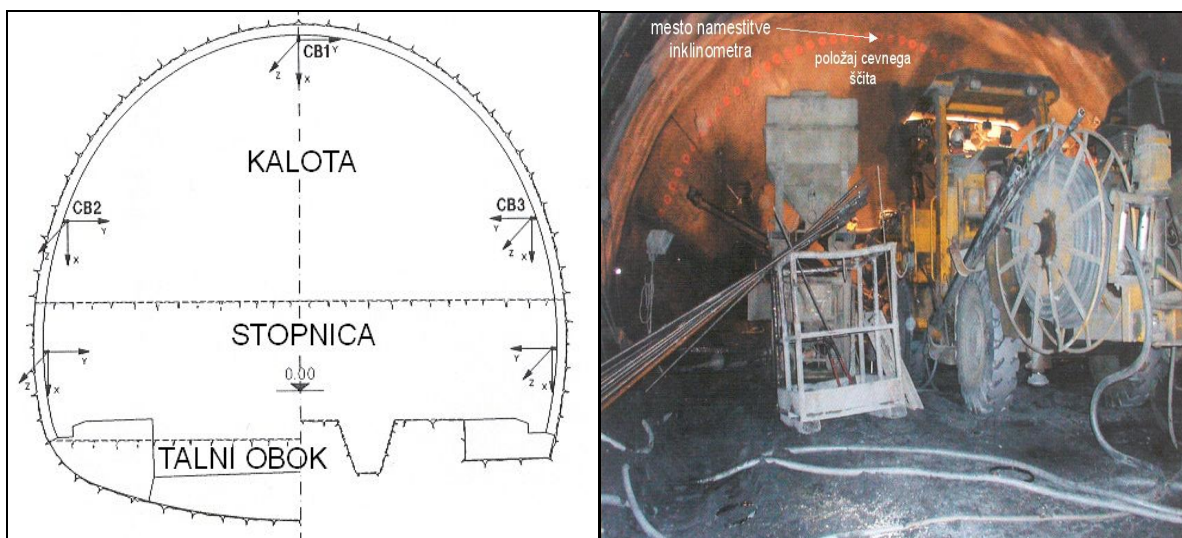
Zagotoviti varnost v času gradnje, v občutljivem območju naselja je bila ob izvedbi izkopa predora vzpostavljena obsežna geotehnična spremljava tega območja. Stalna kontrola dogajanja v predoru in na površini je poglobitnega pomena saj samo to omogoča ob stalni prisotnosti projektanta pravočasno ukrepanje. Prepozno odzivanje bi lahko imelo za posledico povečane pomike in s tem lahko nastale večje poškodbe na objektih.[7]

#### 3.3.1 V predorski cevi

V skladu s programom geotehničnih meritev se v predorski cevi vgrajujejo naslednji tipi merskih profilov.

**MSI:**

- trigonometrične meritve – merjenje prostorskih pomikov predorske obloge na petih merskih točkah.
- merski profili so vgrajeni približno na vsakih 20 m za izkopnim čelom, po potrebi tudi bolj pogosto.



**SLIKA 20:** Merski profil MS I ter prikaz jeklenega cevnega ščita in mesto namestitve horizontalnih inklinometrov

### **MS II:**

- šest tritočkovnih ekstenzometrov (dva dolžine 6 m in štiri dolžine 9 m) – z njimi merimo pomike, specifične deformacije v okoliški hribini, lezenje in relaksacijo hribine.
- vgrajeni so v boke in stropni del.

### **MS III:**

- šest merskih sider (dva dolžine 6 m in štiri dolžine 9 m).
- merimo pomike v okoliški hribini in ocenjujemo obremenitve sidrnega sistema.

### **MS IV:**

- štirinajst tlačnih celic za merjenje tangencialnih in radialnih napetosti v predorski oblogi.

### **HORIZONTALNI INKLINOMETRI:**

- za merjenje časovnega razvoja in velikosti posedkov pred in za izkopnim čelom.
- vgrajeni so bili v območje cevnega ščita (pod približno enakim kotom kot cevi) v levi predorski cevi na odseku 80+220 do 80+360.

### 3.3.2 Na površini

Poleg meritev v predorski cevi so s programom geotehničnih meritev predpisane tudi meritve na površini.

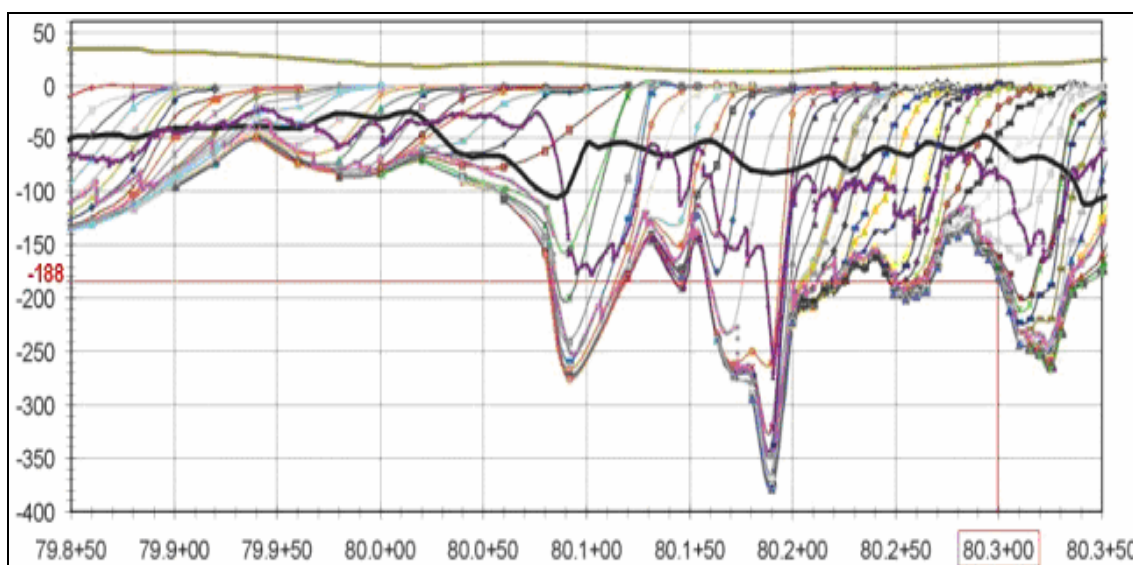
#### MS V:

- pettočkovni prečni višinski profil (v nekaterih profilih je tudi več točk).
- točke se nahajajo na površini prečno na os predora.
- merijo se posedki in prostorski pomiki.

Tako je na profilu 80+300 postavljen merski profil z oznako **MS V/7E**. Pri analizi, ki sledi v nadaljevanju sem se osredotočil predvsem na levo predorsko cev. Na tem mestu je bil postavljen merski profil, na desni strani pa ga ni bilo. Merski profil je vseboval 10 merskih točk, ki so bile postavljene prečno na os predora. Meritve so se začele 11.07.2003, ko so bili z izkopanim predorom na stacionaži 80+222.

#### **Pomik na površju**

Na spodnji sliki (Slika 21) je prikazan posedek površja v osi leve cevi na območju naselja Trojane.



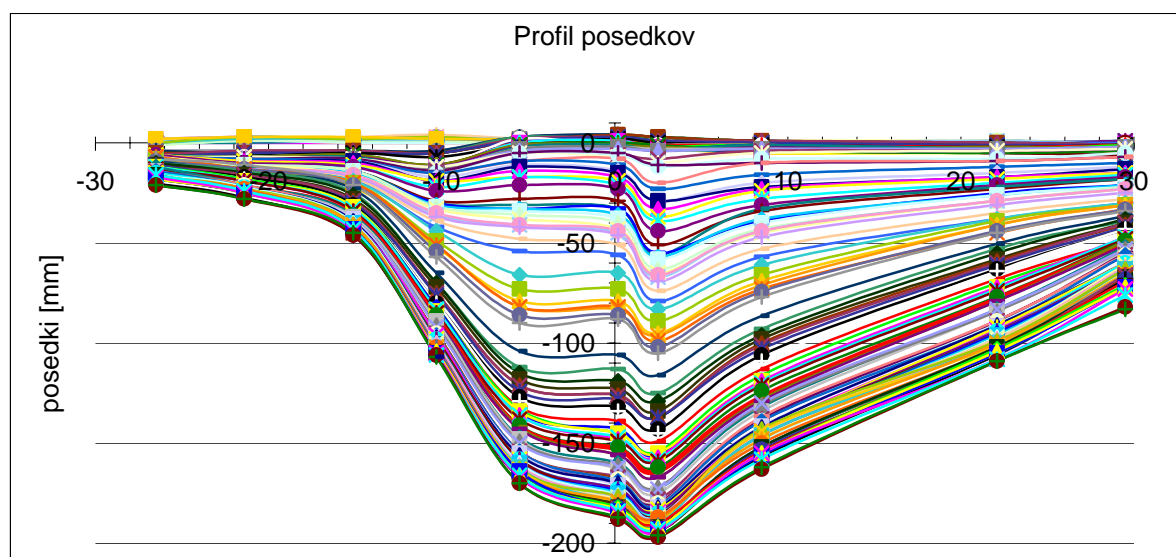
**SLIKA 21:** Posedek površja v osi leve predorske cevi za profil 80+300



SLIKA 22: Letalski posnetek območja Trojan z prikazom osi leve predorske cevi [9]

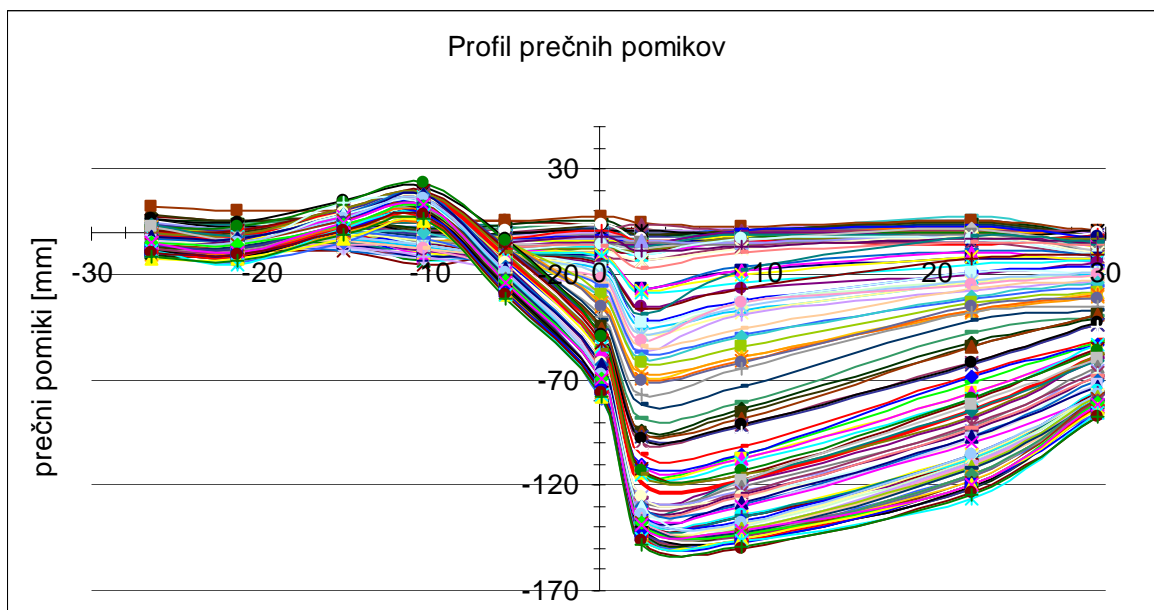
### Prikaz posedkov in prečnih pomikov v profilu MS V/7E stac. 80+300

Spodnji sliki (Slika 23 in 24) prikazujeta dejanske pomike v času gradnje in po njej.



SLIKA 23: Prikaz vertikalnih pomikov v profilu MS V/7E



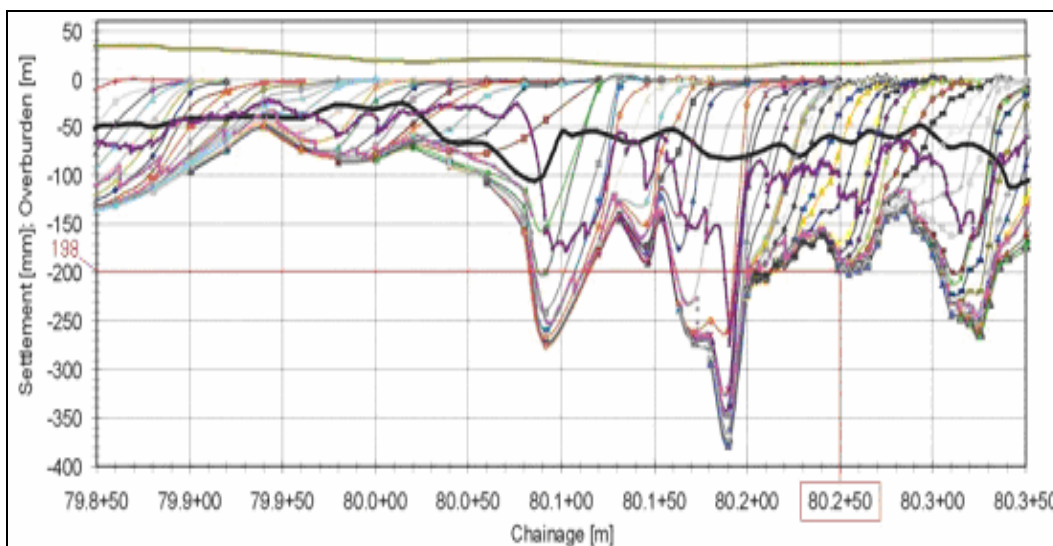


SLIKA 24: Prikaz horizontalnih pomikov v profilu MS V/7E

### MS V/7C za profil 80+250

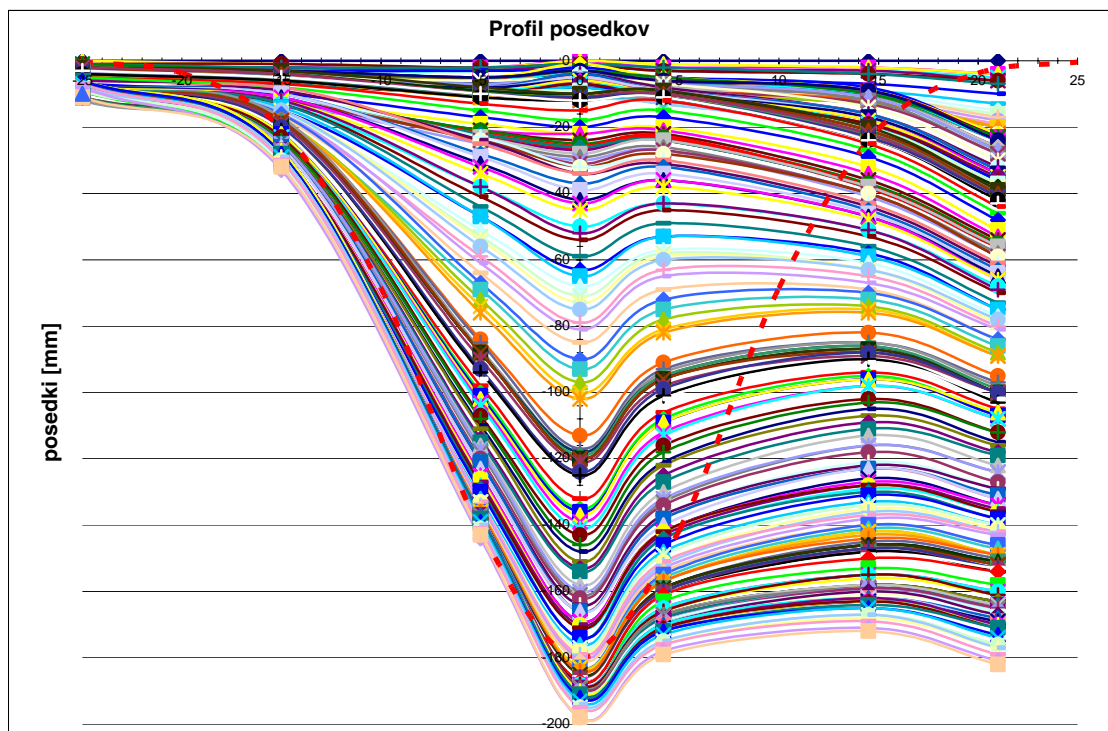
Tudi na profilu 80+250 se bom v nadaljevanju osredotočil predvsem na levo predorsko cev, saj so bili tu prav tako postavljeni merski profili in sicer 7 merskih točk, na desni strani pa jih ni bilo.

### Pomik na površju

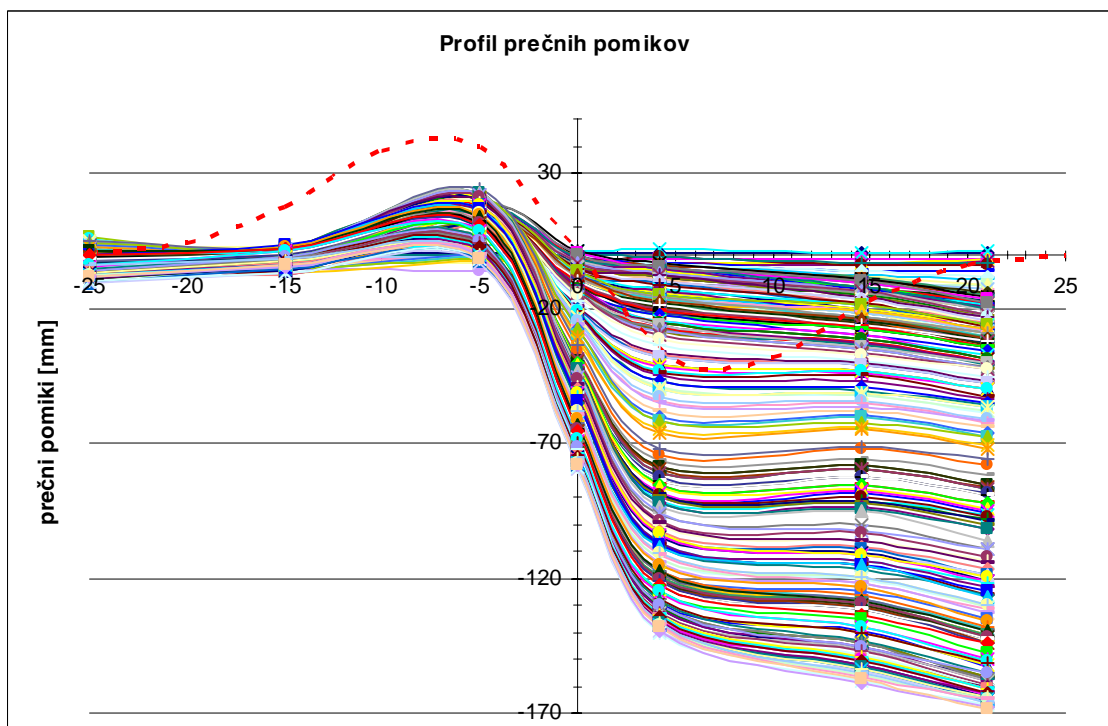


SLIKA 25: Posedek površja v osi leve predorske cevi za profil 80+250

### Prikaz posedkov in prečnih pomikov v profilu MS V/7C stac. 80+250



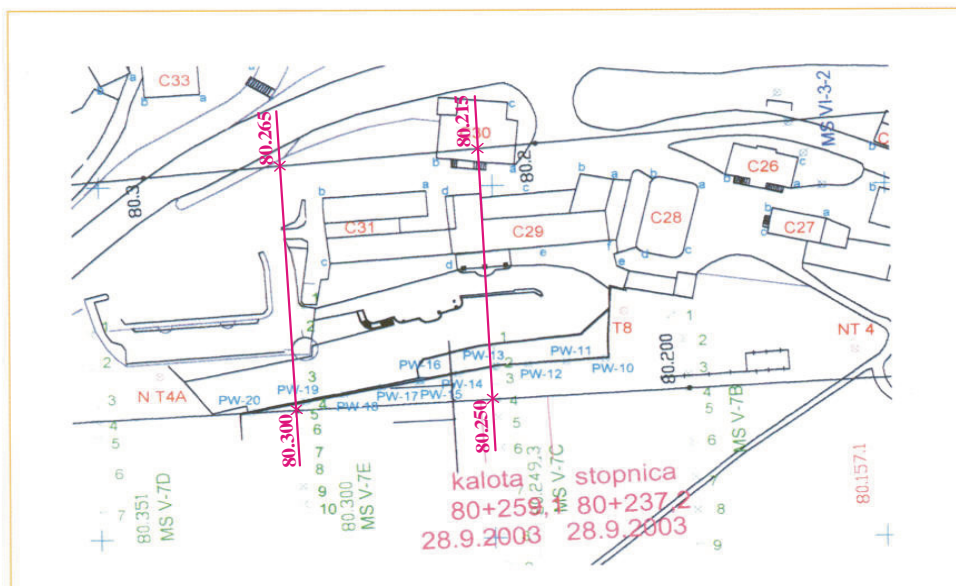
SLIKA 26: Prikaz vertikalnih pomikov v profilu MS V/7C



SLIKA 27: Prikaz horizontalnih pomikov v profilu 80+250

**MS VI:**

- pettočkovni prečni višinski profil z dodatnimi tremi vertikalnimi tritočkovnimi ekstenzometri.
- ugotavljajo se vertikalni pomiki po globini in razrahljanosti hribine v bližini predorske cevi.



**SLIKA 28:** Razpored merskih mest na površini nad predorsko cevjo

**REPERJI NA OBJEKTIH:**

- nivelmansko spremljanje zgradb v vplivnem območju izkopa predora (vsaj 3 točke na zgradbi) ter nivelmansko in tridimenzionalno spremljanje pomikov točk v oseh predora.

**TOČKE V OSI PREDORA:**

- nivelmansko spremljanje pomikov površine nad osjo predora.



## 4 NUMERIČNE ANALIZE S PROGRAMOM PHASE<sup>2</sup>

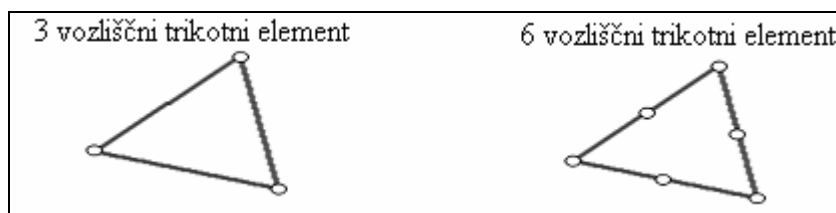
Program PHASE<sup>2</sup>, katerega bom uporabil za izdelavo svoje diplomske naloge za izračunavanje parametrov potrebnih za dimenzioniranje, uporablja numerično metodo in sicer metodo končnih elementov (MKE). MKE je najbolj znana numerična metoda, ki temelji na razdelitvi (mreženju, diskretizaciji) obravnavanega zveznega območja na večje število medsebojno povezanih manjših območij enostavnih geometrijskih oblik, ki jih imenujemo končni element. Mreža končnih elementov je medsebojno povezana v karakterističnih točkah oziroma vozliščih, v katerih vrednotimo končno število računsko določljivih neznanih osnovnih spremenljivk. S pomočjo interpolacijskih funkcij predpostavimo variacijo osnovnih spremenljivk znotraj končnih elementov v odvisnosti od njihovih vozliščnih vrednosti. Interpolacijske funkcije morajo zadovoljevati določene pogoje vzdolž robov elementov, da se diskretizirani računski model pri določenih robnih in začetnih pogojih obnaša čim bolj podobno odzivu zveznega območja. Natančnost numerične rešitve je tem večja, čim podrobnejša je diskretizacija oziroma čim večje je število končnih elementov ali stopnja interpolacijskih funkcij. Za opis materialnega območja sem izbral Mohr – Coulomb (MC) materialni model. V računskem modelu sem upošteval levo in desno predorsko cev, pri analizi in interpretaciji rezultatov pa sem se osredotočil predvsem na levo cev in območje nad njo. Glede na to, da so bile na levi strani precej težje razmere za gradnjo kot na desni in vplivi na površje večji, so bile tu geotehnične meritve in geološka spremljava bolj obsežne.

Pri izračunu sem za oba profila (80+300 in 80+250) upošteval faznost izgradnje, dejansko geometrijo površja in podporne ukrepe. Za podporni sistem sem uporabil samo brizgan beton brez sider. Geomehanske karakteristike zemljin so bile povzete po diplomski nalogi [Saša Miklavžin - 2005], da bi lahko kasneje primerjal rezultate med PHASE<sup>2</sup>, ki ga uporabljam jaz in PLAXIS-om, ki ga je uporabljala Saša Miklavžin v svoji diplomski nalogi. V nalogi sem se posebej osredotočil na levo predorsko cev ter vpliv posameznih parametrov na izračun. Na podlagi teh analiz sem prišel do končnih rezultatov, ki so predstavljeni v nadaljevanju.

### 4.1 Vpliv mreže

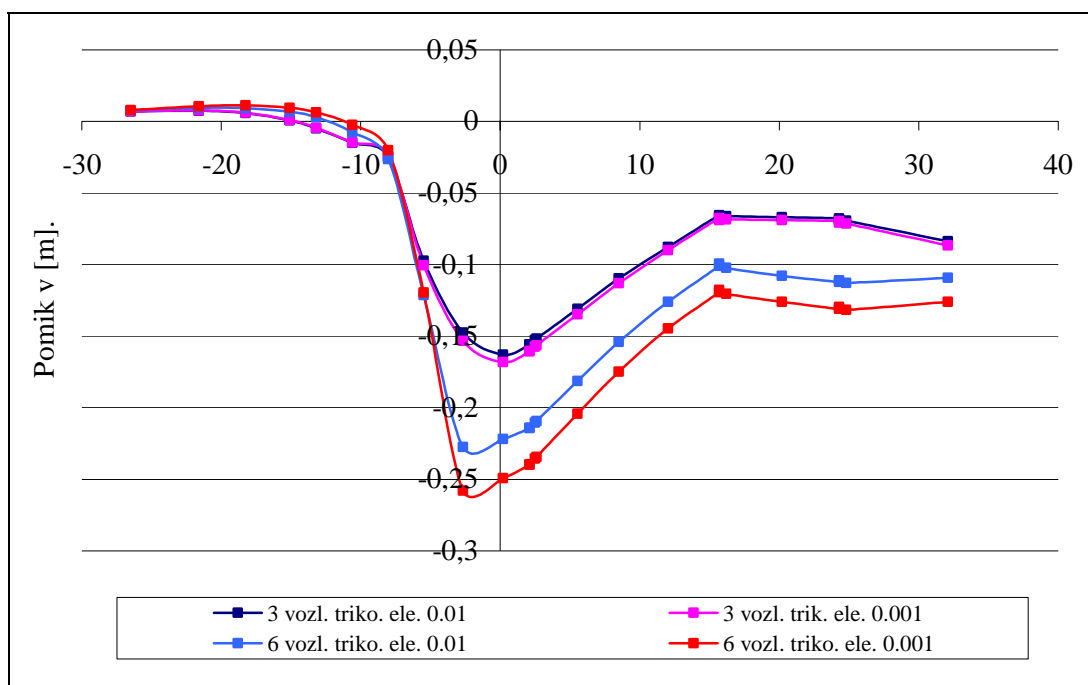
Phase2 omogoča 3 ali 6 vozliščni trikotni element (Slika 29), ter 4 in 8 vozliščni kvadratni element. Pri analizah sem uporabljal trikotne element. Kasneje bo prikazana razlika med enim

in drugim trikotnim elementom. Program omogoča, da celotni model zgoštimo naenkrat ali pa ga zgoščamo na mestih, kjer pač to želimo. Pri vseh analizah v tej nalogi sem uporabljal 6 vozliščni trikotni element. Razlika med 3 in 6 vozliščnim trikotnim elementom je v času izračuna ter v natančnosti izračuna. 6 vozliščni trikotni element poda pri enaki gostoti mreže točnejše izračune, slabost pa je, da izračun traja zelo dolgo v primerjavi s 3 vozliščnim trikotnim elementom.



**SLIKA 29:** Prikaz 3 in 6 vozliščnega trikotnega elementa

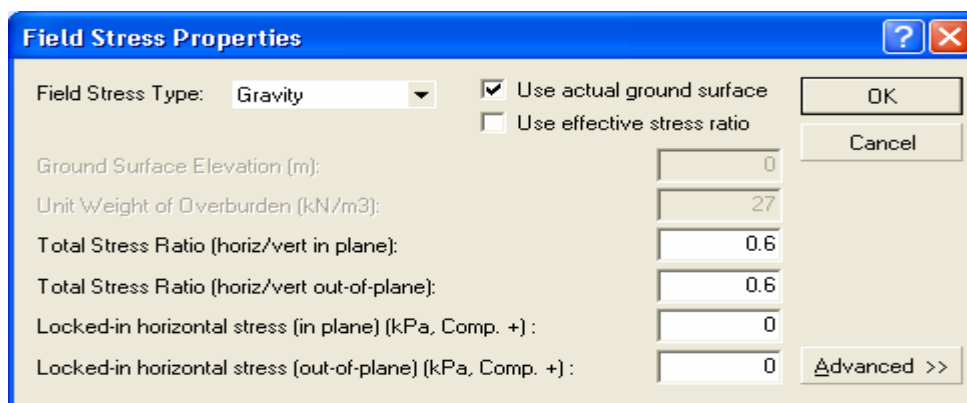
Spodnja slika (Slika 30) prikazuje, kako vpliva natančnost izračuna na pomike, povem pa naj še to, da za 3 vozliščni trikotni element z natančnostjo 0.01 potrebuje računalnik slabo minuto za izračun, če pa uporabimo 6 vozliščni trikotni element z natančnostjo 0.001 pa potrebuje nekaj več kot 18 minut. (Konfiguracija računalnika Pentium 2.4 GHz, 512 MB RAM).



**SLIKA 30:** Prikaz natančnosti izračuna

## 4.2 Začetne napetosti

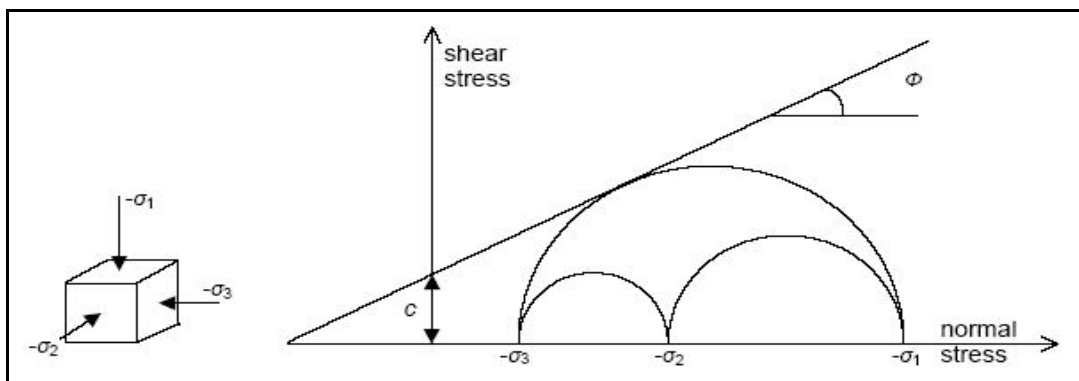
Program Phase<sup>2</sup> omogoča, da je končni element lahko v začetnem stanju obtežen z lastno težo in še z morebitnimi dodatnimi »zaostalimi« napetostmi, ki so lahko posledica npr. tektonskih aktivnosti v preteklosti. Potrebni podatki za definiranje začetnega napetostnega stanja so poleg geometrije in prostorninske teže materialov še »Ko« in »zaostale« napetosti (Slika 31).



SLIKA 31: Prikaz dialoga field stress properties

## 4.3 Porušni mehanizem Mohr - Coulomb

Za modeliranje mehanskega obnašanja hribin sem izbral Mohr – Coulomb-ov (MC) materialni model. MC model je najpreprostejši in najbolj razširjen model, ki se običajno uporablja za prvo analizo problema. S tem modelom opišemo bistvene lastnosti zemljine. Za vsak sloj podamo povprečno konstantno togost (module), zato so izračuni navadno hitri in dajo prvo oceno deformacij. Grafično je ploskev plastičnega tečenja za MC predstavljena na spodnji sliki (Slika 32). Plastične deformacije nastopijo, ko se radij največjega kroga dotakne ovojnice, ki predstavlja to ploskev.



SLIKA 32: MC kriterij porušitve

MC materialni model zahteva pet osnovnih vhodnih parametrov, ki jih lahko pridobimo s pomočjo osnovnih laboratorijskih preiskav. Ti parametri so:

Parametri elastičnosti:

- o Youngov modul (modul elastičnosti)
- o Poissonovo število

Strižni parametri:

- o Kohezija
- o Strižni kot

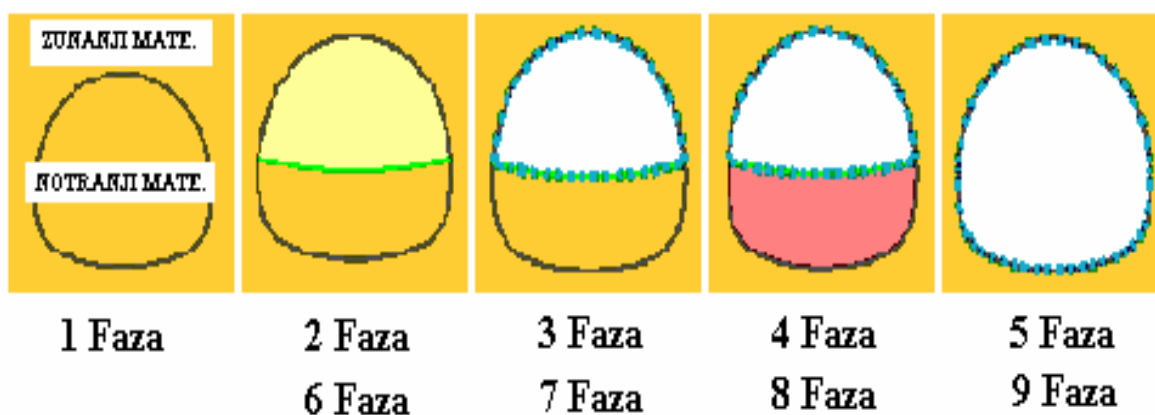
Plastične deformacije:

- o Kot razmikanja

#### **4.4 Prikaz izkopa predora**

Potek izkopa predora za oba profila, tako za 80+300, kot kasneje za profil 80+250 bo enak. Pri izračunu bosta upoštevani obe predorski cevi, to je leva in desna predorska cev. Za analiziranje pa sem se osredotočil predvsem na levo predorsko cev, ker je bil na tem mestu postavljen merski profil, na desni strani ga ni bilo. Spodnja slika (Slika 33) prikazuje izkop po fazah. Od druge do pete faze je obravnavan izkop desne cevi, od šeste pa do devete je obravnavan izkop leve cevi.

- o 1. faza (izračun začetnega napetostnega stanja)
- o 2. faza (uporabim  $\alpha$ -metodo za simulacijo 3D vplivov izkopa, kar pomeni, da zmanjšam modul elastičnosti notranjemu materialu v kaloti – desna cev)
- o 3. faza (izkop kalote v desni cevi + podprtje z brizganim betonom +začasni talni obok)
- o 4. faza (zmanjšam modul elastičnosti notranjemu materialu v stopnici – desna cev)
- o 5. faza (izkop stopnice v desni cevi + podprtje z brizganim betonom)
- o 6. faza (zmanjšam modul elastičnosti notranjemu materialu v kaloti – leva cev)
- o 7. faza (izkop kalote v levi cevi + podprtje z brizganim betonom +začasni talni obok)
- o 8. faza (zmanjšam modul elastičnosti notranjemu materialu v stopnici – leva cev)
- o 9. faza (izkop kalote v levi cevi + podprtje z brizganim betonom)

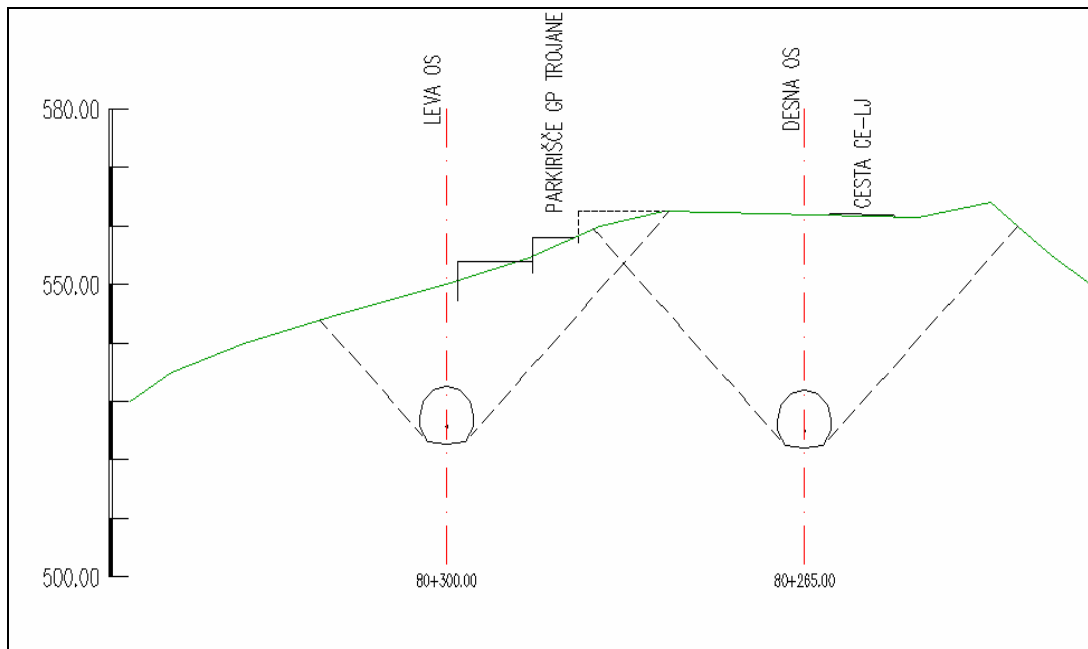


SLIKA 33: Potek izkopa po fazah

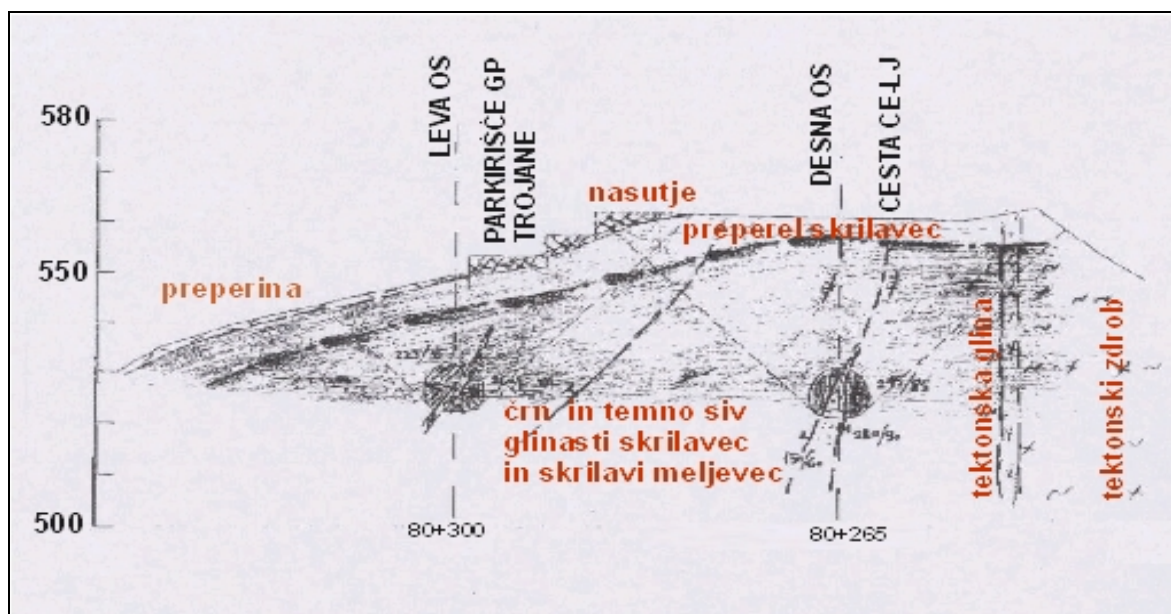
#### 4.5 Profil 80+300

Najprej sem si za preučevanje izbral profil 80+300, na katerem sem opravil večino analiz.

Na podlagi geometrije profila in geoloških podatkov, ki so prikazani na sliki (Slika 34 in 35), sem s programom Phase<sup>2</sup> naredil matematični model.

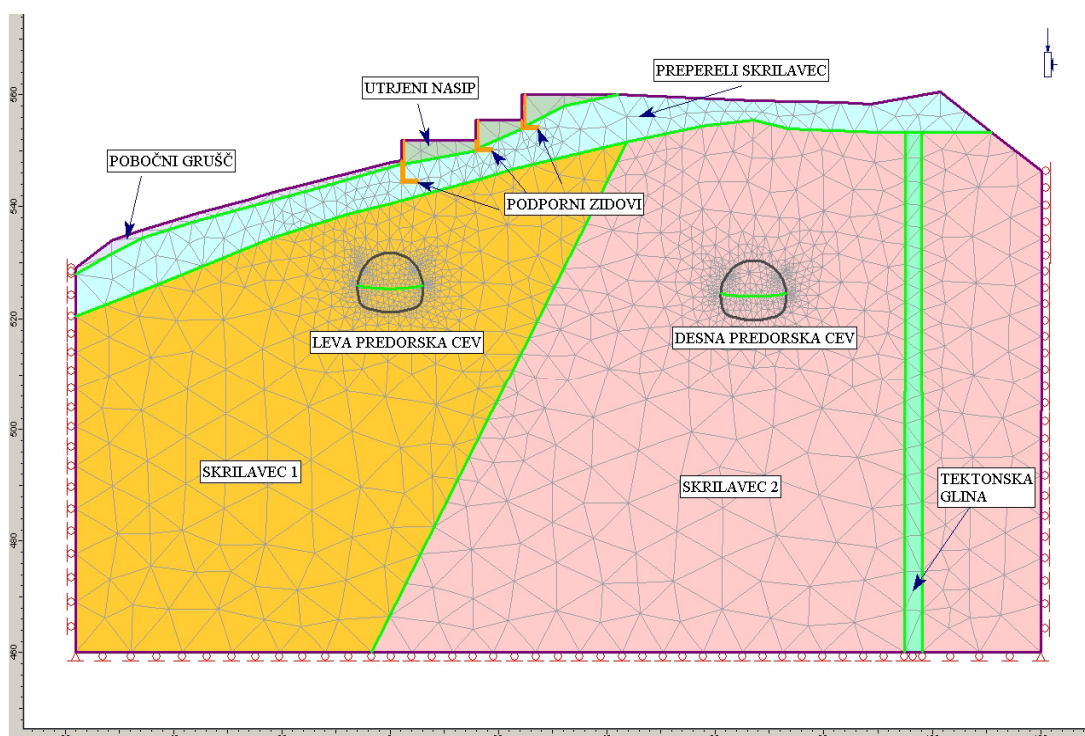


SLIKA 34: Geometrija profila 80+300



SLIKA 35: Geološka struktura profila 80+300

### Geometrija matematičnega modela



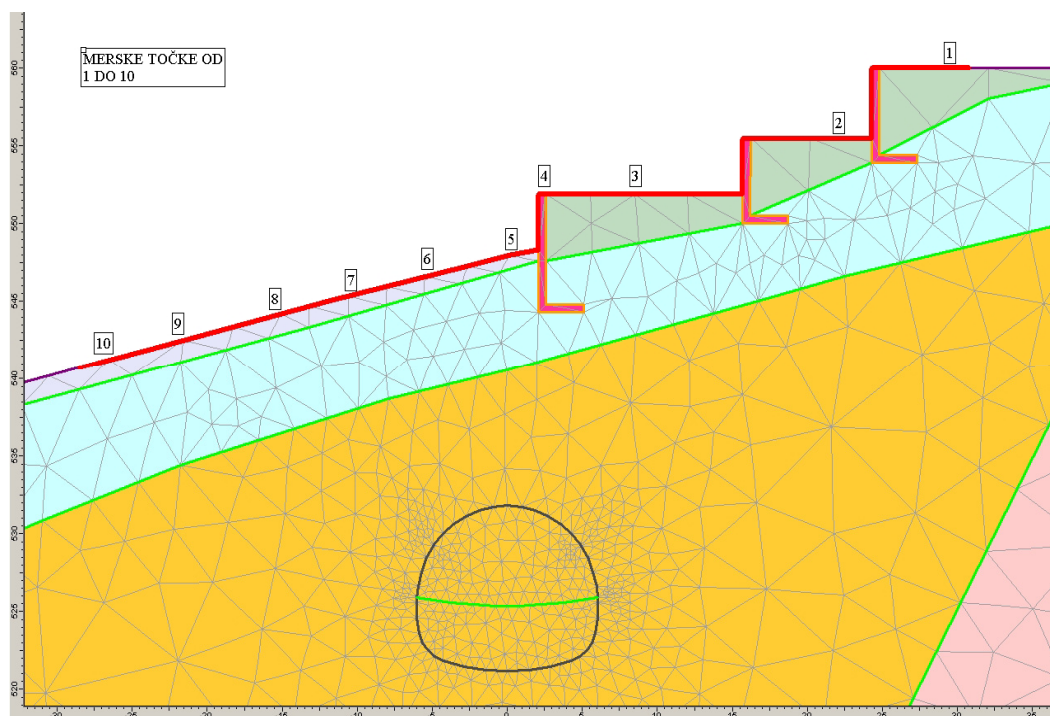
SLIKA 36: Matematični model profila 80+300

Pri izračunu so upoštevane naslednje geološke plasti:

- o *skrilavec 1* (nahaja se na območju leve predorske cevi)
- o *skrilavec 2* (nahaja se na območju desne predorske cevi)
- o *prepereli skrilavec* (sega do 10 m globoko)
- o *pobočni grušč* (debeline okrog 1 m)
- o *utrjen nasip* (na območju parkirišč)
- o *tektonska glina* (debeline okrog 3 m)

#### 4.5.1 Točke opazovanja pomikov v matematičnem modelu

Na sliki (Slika 37), so z debelo rdečo črto prikazane točke, ki sem jih analiziral za površje nad levo predorsko cevjo. Številke v kvadratih predstavljajo dejansko postavljene merske točke v tem profilu nad levo predorsko cevjo.



SLIKA 37: Merske točke in točke v katerih sem spremljal rezultate računske analize

#### 4.6 Vpliv posameznih parametrov na izračunane pomike

V tem poglavju bom prikazal, kako posamezni parametri vplivajo na pomike. Vsi vhodni podatki to je karakteristike zemljin bodo iste kot pri Miklavžinovi. (Preglednica 3)



### PREGLEDNICA 3: Geomehanske karakteristike za MC materialni model

	Ime	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\nu$	E [kPa]	c peak. [kPa]	$\phi$ peak. [stop.]	$\psi$ [stop.]
1	Utrjeni nasip	22	0,25	60.000	5	35	5
2	Pobočni grušč	20	0,25	25.000	3	28	0
3	Prepereli skrilavec	23	0,25	44.000	20	30	0
4	Skrilavec 1	24	0,25	69.000	30	24	0
5	Skrilavec 2	24	0,25	150.000	30	27	0
6	Tektonska glina	22	0,25	10.000	15	23	0

Poglavitni del naloge bo prikazati do kakšnih sprememb pride med programom Plaxis, kjer je MC model idealno elastoplastičen brez utrjevanja ter med Phase<sup>2</sup>, ki ima lastnost mehčanja kar pomeni, da za strižne parametre podamo vrhunske in rezidualne vrednosti. Na spodnji sliki je prikazan del dialoga za vnašanje vhodnih podatkov (Slika 38).

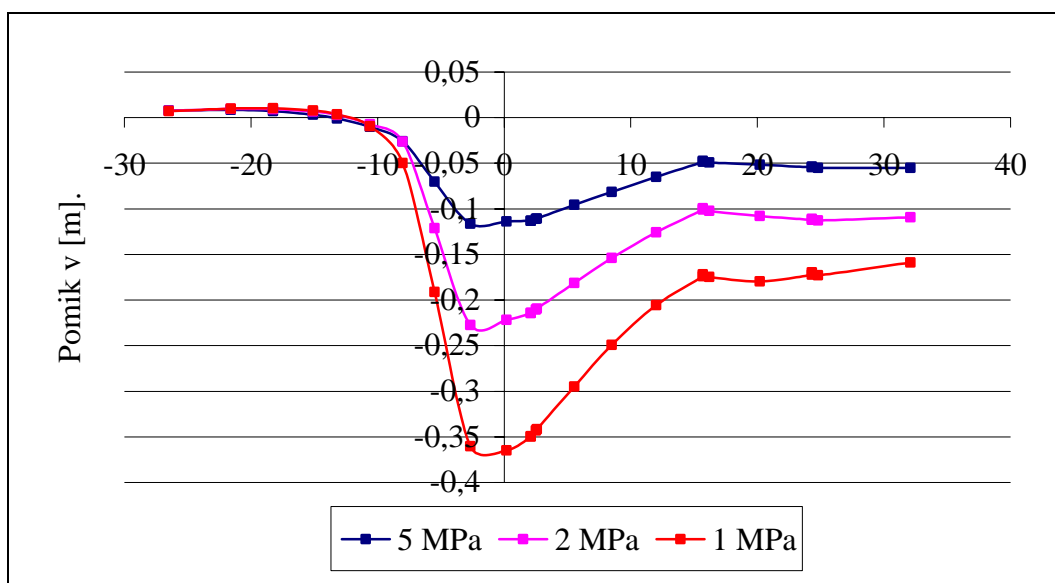
Pomembno si je zapomniti, da se bodo materialni parametri spreminjali le za "skrilavec 1". Notranji material je vse kar je znotraj predora, zunanji material je vse kar zunaj predora, seveda govorim le za material "skrilavec 1". Vpliv posameznih parametrov na pomike bom prikazal v obliki diagramov.

**SLIKA 38:** Okno za vnašanje vhodnih podatkov za program Phase<sup>2</sup>

#### 4.6.1 Zmanjševanje modula elastičnosti (znotraj predora)

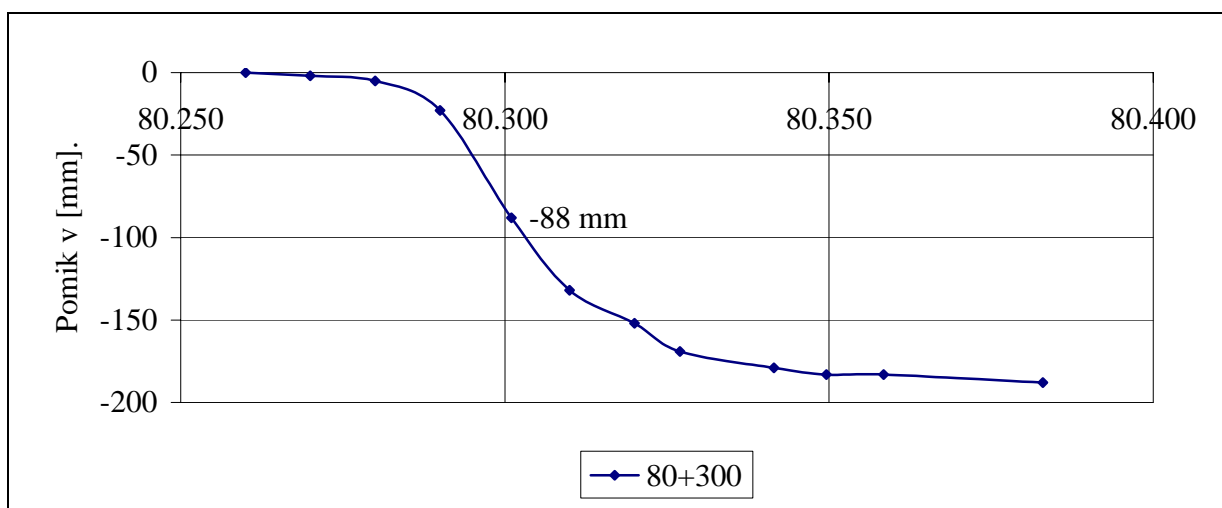
Plaxis omogoča modeliranje 3D problema izkopa predora z  $\beta$ -metodo. Ker program Phase<sup>2</sup> ne omogoča te metode sem uporabil  $\alpha$ -metodo. Ta metoda temelji na tem, da so deformacije omogočene pred vgradnjo podporja zaradi zmanjšanja modula elastičnosti znotraj predora. Najprej sem preveril, kako vpliva zmanjševanje modula elastičnosti znotraj predora na pomike in ugotovil, da manjši ko je modul elastičnosti znotraj predora, večji so pomiki. (Slika 39).





**SLIKA 39:** Prikaz vertikalnih pomikov površja zaradi zmanjševanja modula elastičnosti znotraj predora

Ker moram v nadaljevanju diplomske naloge prikazati kaj pomeni mehčanje materiala, sem za nadaljnjo analizo izbral vertikalni pomik pri katerem sem moral notranji material, to je modul elastičnosti, zmanjšati na 5MPa. Pri takem modulu elastičnosti dobim tik nad predorsko cevjo vertikalni pomik na površju, ki je enak 113 mm. Razlog da sem izbral vertikalni pomik z modulom elastičnosti 5 MPa znotraj predora je ta, da so se tudi dejansko zgodili približno taki vertikalni pomiki na površju kar prikazuje spodnja slika (Slika 40).

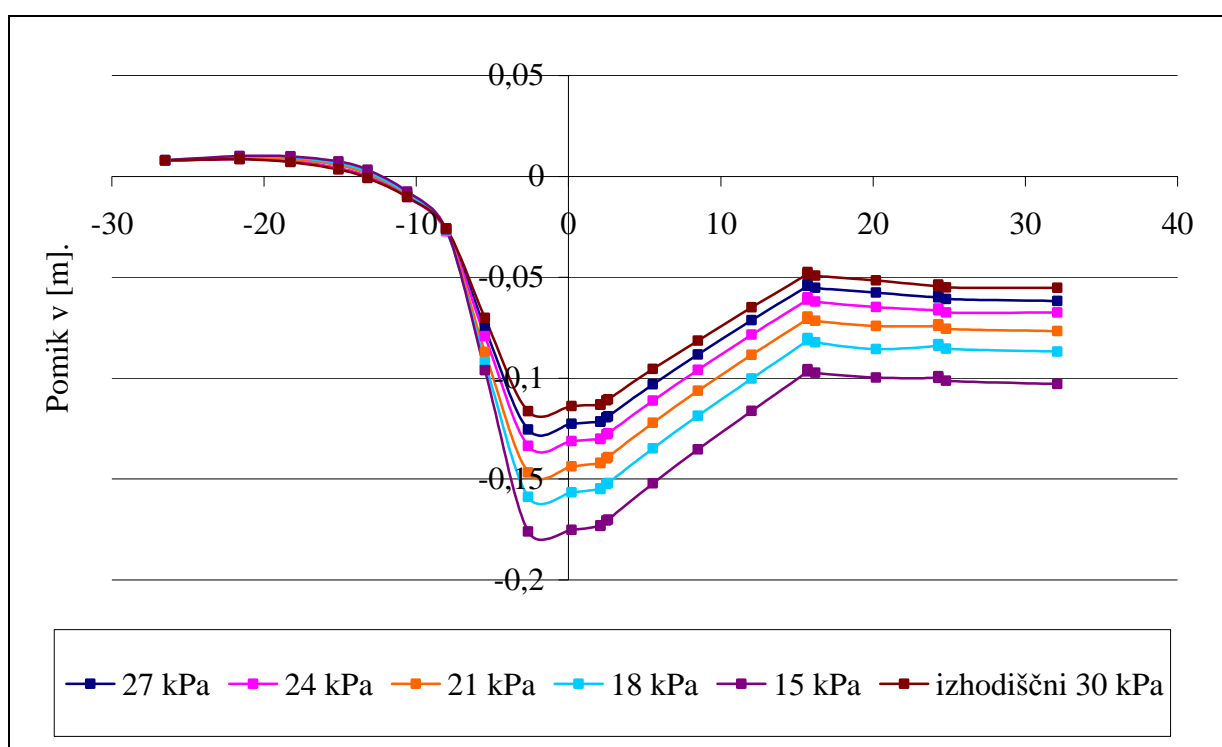


**SLIKA 40:** Prikaz vertikalnih pomikov površja zaradi zmanjševanja modula elastičnosti

Slika (Slika 40) prikazuje kako naraščajo pomiki v profilu 80+300 pri napredovanju izkopavanja predora. Tako vidimo, da ko so prišli z izkopom tik do profila 80+300 je bil vertikalni pomik na površju tik nad predorsko cevjo 88 mm.

#### 4.6.2 Vpliv rezidualne kohezije na posedke za material "skrilavec 1"

Karakteristike zemljin so tudi v tem primeru isti kot pri Miklavžinovi. Zopet obravnavam samo "skrilavec 1" in spreminjam samo kohezijo kar pomeni, da želim videti kaj se zgodi, ko je vrhunska vrednost kohezije fiksna to je 30 kPa, rezidualna vrednost pa se spreminja.



**SLIKA 41:** Prikaz vpliva rezidualne kohezije na vertikalni pomik

Iz zgornje slike (Slika 41) se vidi kako z zmanjšanjem rezidualne kohezije vertikalni pomiki naraščajo. Vertikalni pomik, ki se zgodi samo zaradi zmanjšanja modula elastičnosti notranjemu materialu, je 11,39 cm in sicer je ta pomik merjen na površini tik nad predorsko cevjo. Tudi vsi ostali pomiki, ki bodo dobljeni zaradi zmanjševanja rezidualne kohezije bodo merjeni v isti točki, to je tik nad predorsko cevjo. Ostale spremembe, ki se zgodijo zaradi zmanjšanja rezidualne kohezije so prikazane v preglednici (Preglednica 4).

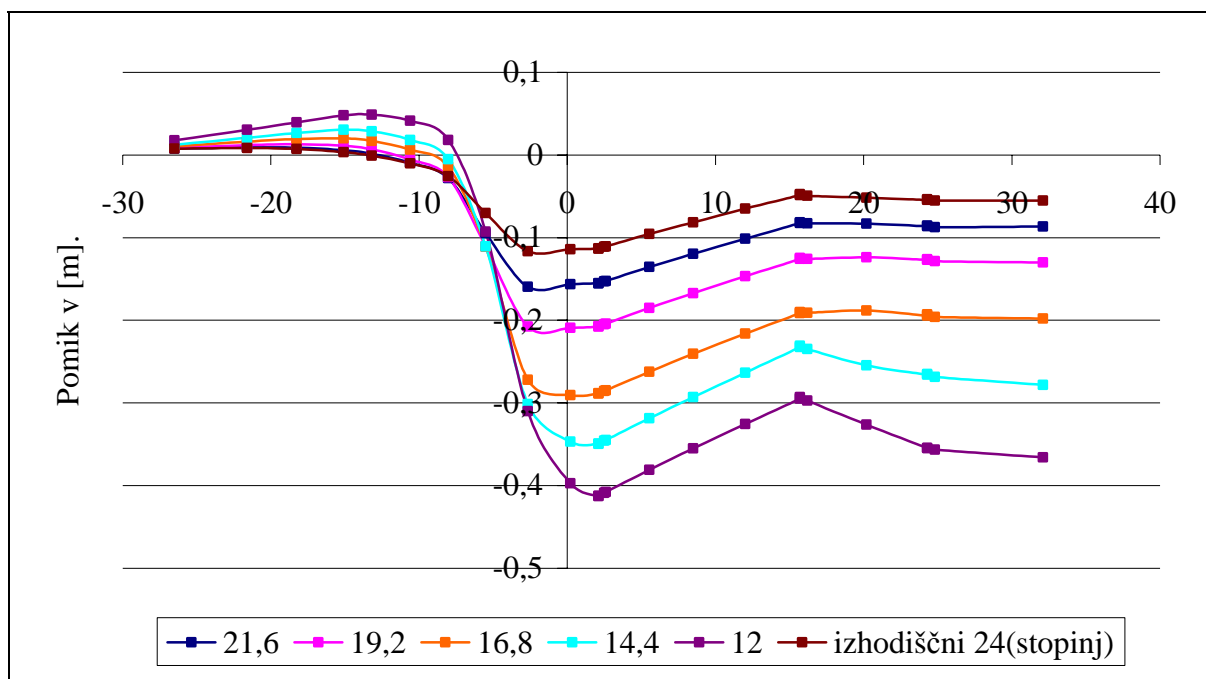
**PREGLEDNICA 4:** Končni pomiki zaradi spreminjanja rezidualne kohezije

Kohezija (vrhunska) [kPa]	Kohezija (rezidualna) [kPa]	Modul elastičnosti znotraj predora [MPa]	Pomik [m]
30	30	5	0,113
30	27	5	0,122
30	24	5	0,131
30	21	5	0,143
30	18	5	0,156
30	15	5	0,175

Kasneje bodo primerjani pomiki, ki se zgodijo zaradi zmanjševanja rezidualne kohezije s pomiki, ki se zgodijo zaradi zmanjšanja rezidualnega strižnega kota.

#### 4.6.3 Vpliv rezidualnega strižnega kota na posedke za material "skrilavec 1"

V tem primeru bo vse isto kot je bilo pri spreminjanju rezidualne kohezije, le da bom sedaj spreminjal rezidualni strižni kot.

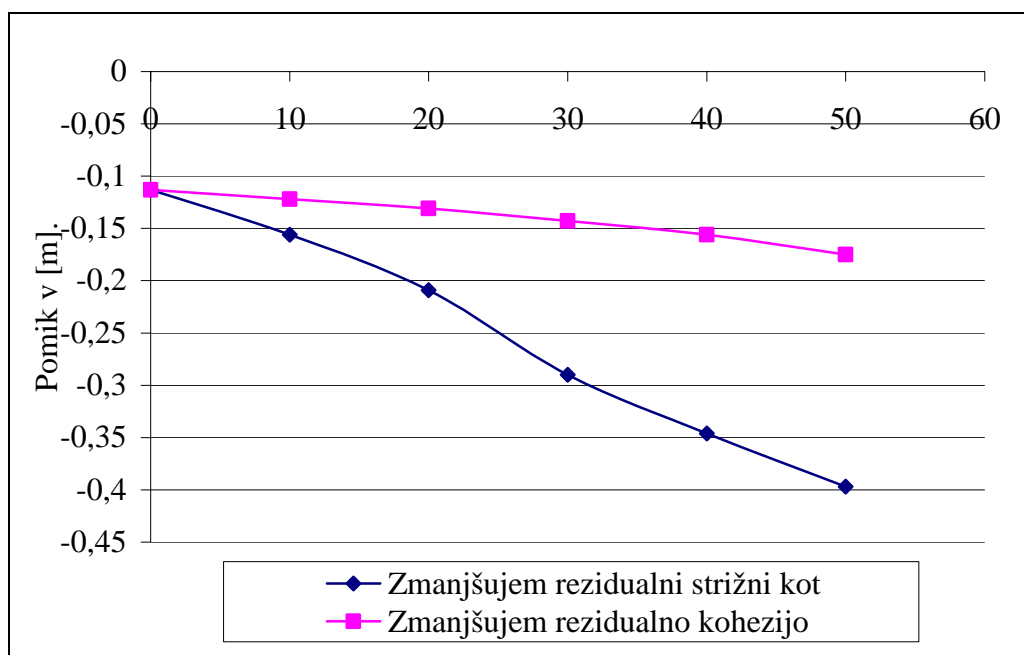


**SLIKA 42:** Prikaz vpliva strižnega kota rezidualno na vertikalni pomik na površju

**PREGLEDNICA 5:** Končni pomiki zaradi spreminjanja rezidualnega strižnega kota

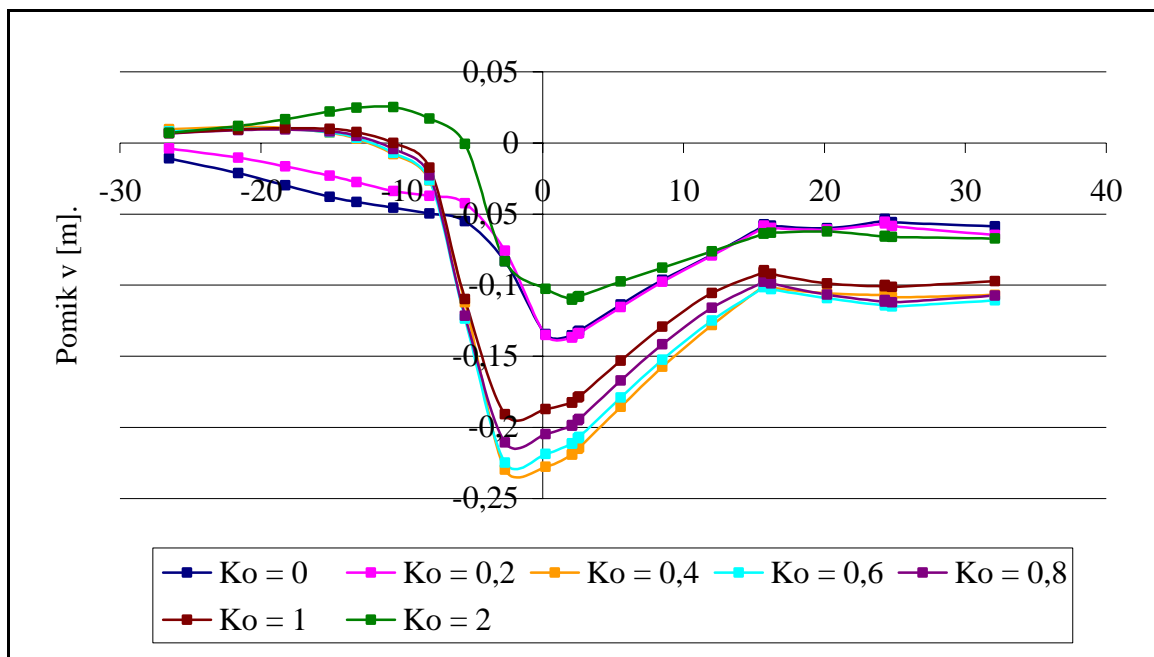
Strižni kot (vrhunski) [°]	Strižni kot (rezidualni) [°]	Modul elastičnosti znotraj predora [MPa]	Pomik [m]
24	24	5	0,113
24	21,6	5	0,156
24	19,2	5	0,209
24	16,8	5	0,290
24	14,4	5	0,346
24	12	5	0,397

V tem primeru, ko spreminjam rezidualni strižni kot, se vidi, da sprememba strižnega kota bolj vpliva na vertikalne pomike kot kohezija. Na spodnji sliki je še bolj nazorno prikazan vpliv strižnega kota v primerjavi s kohezijo. Spodnja slika (Slika 43) prikazuje kako se vršijo vertikalni pomiki tik nad predorsko cevjo, če izhodiščne vrednosti, to je kohezija 30 kPa in strižni kot 24° zmanjšujemo prvo za 10% nato za 20%...ter na koncu še za 50%.



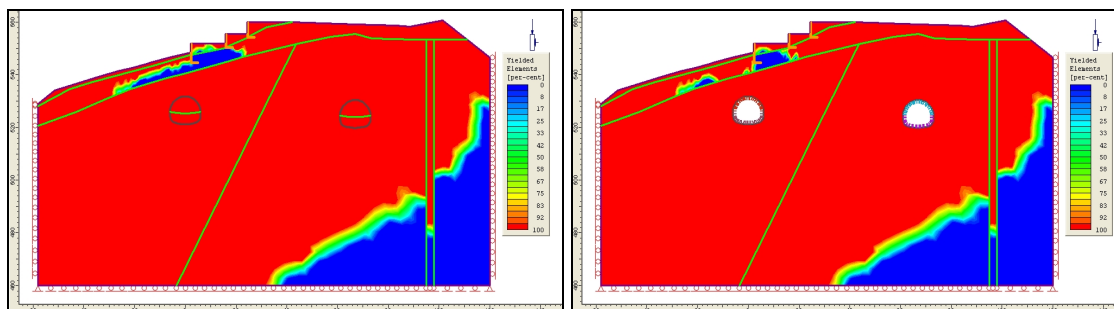
**SLIKA 43:** Prikaz vpliva zmanjševanja rezidualnega strižnega kota in kohezije

#### 4.6.4 Vpliv prvotnih horizontalnih napetosti

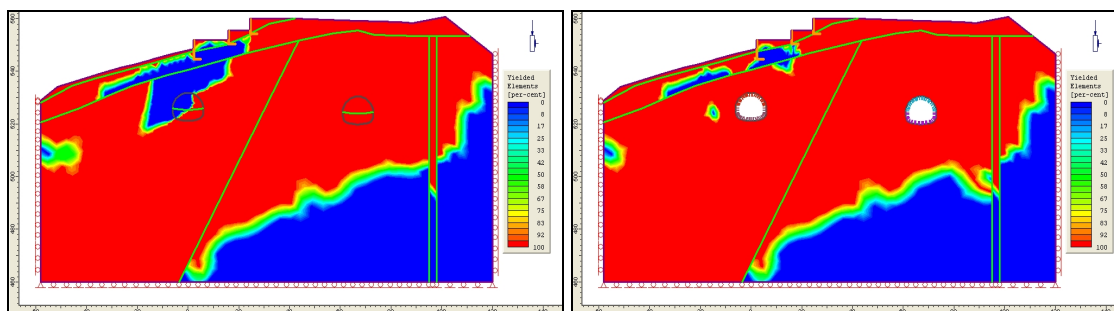


**SLIKA 44:** Prikaz vertikalnih pomikov zaradi spreminjanja parametra Ko

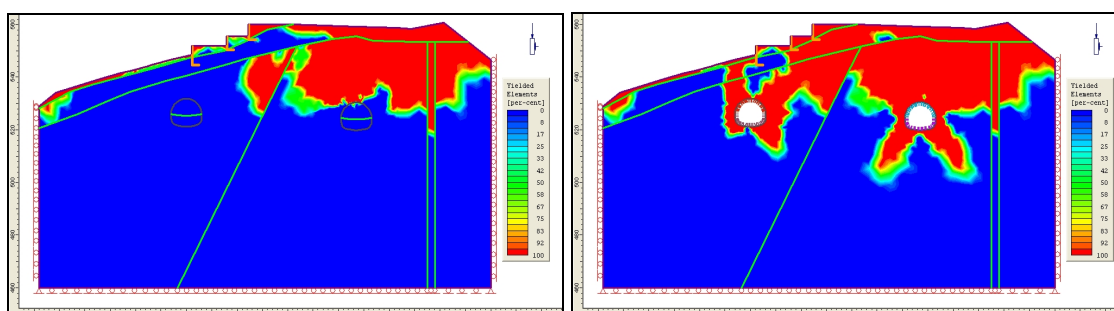
Zgornja slika (Slika 44) prikazuje kaj se dogaja z vertikalnimi pomiki, če spreminjamo samo parameter "Ko", to je vpliv prvotnih horizontalnih napetosti. Spodnje slike (Slika 45, 46, 47, 48, 49, 50 in 51) prikazujejo kolikšen del modela je v plastičnem stanju. To pomeni, tam kjer je rdeča barva je material 100% izkoriščen, iz tega pa sledi da so na tem mestu vertikalni pomiki večji . S pomočjo spodnjih slik nam je bolj jasno zakaj pride do takih vertikalnih pomikov, ki jih prikazuje slika (Slika 44).



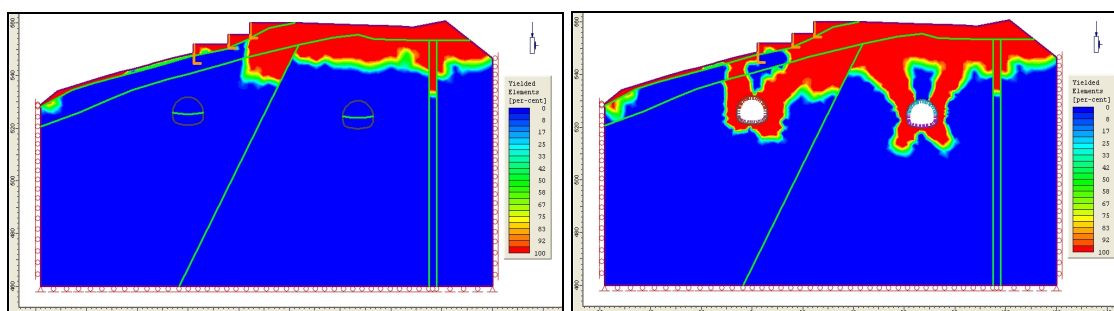
**SLIKA 45:** Plastični elementi-Ko = 0, levo začetna faza, desno končna faza



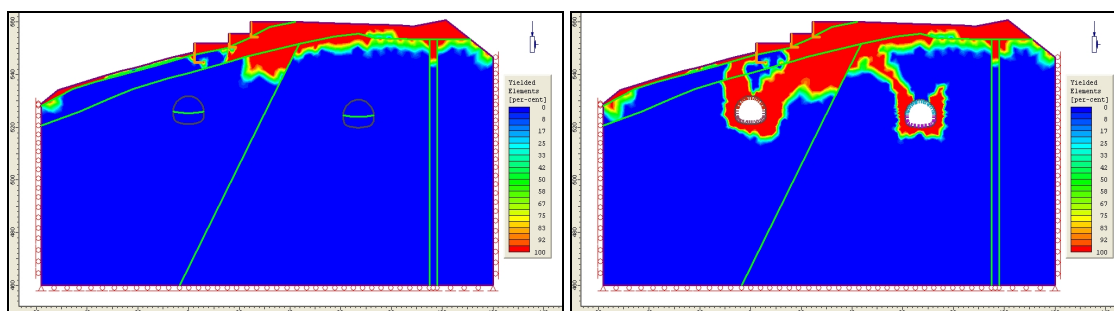
SLIKA 46: Plastični elementi - $K_o = 0.2$ , levo začetna faza, desno končna faza



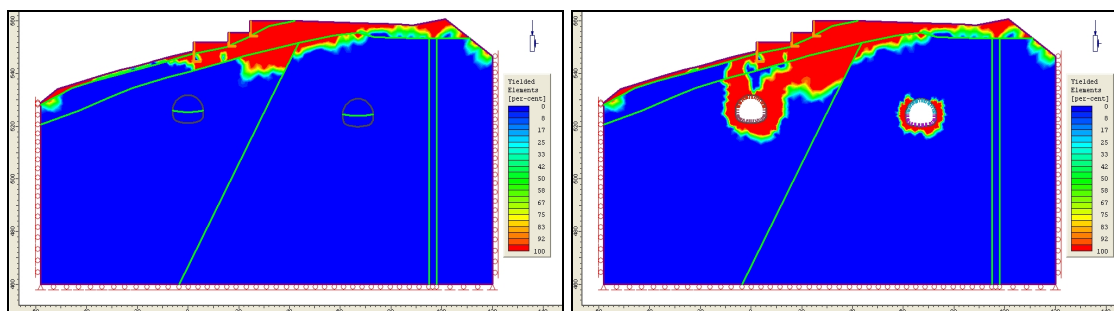
SLIKA 47: Plastični elementi - $K_o = 0.4$ , levo začetna faza, desno končna faza



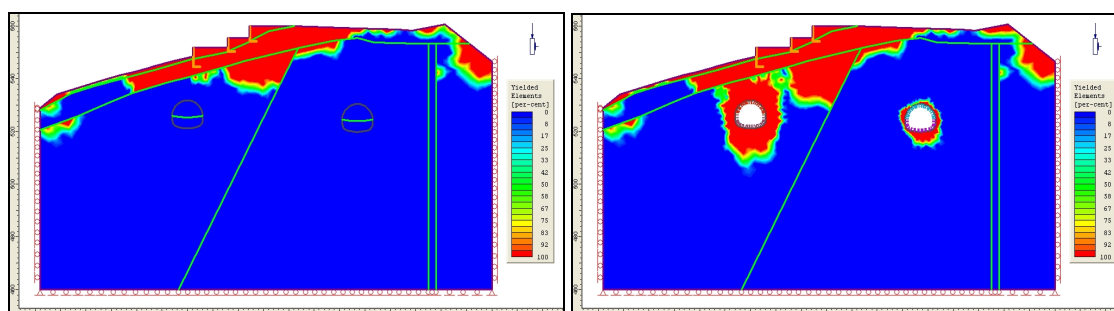
SLIKA 48: Plastični elementi - $K_o = 0.6$ , levo začetna faza, desno končna faza



SLIKA 49: Plastični elementi - $K_o = 0.8$ , levo začetna faza, desno končna faza



SLIKA 50: Plastični elementi - $K_o = 1$ , levo začetna faza, desno končna faza

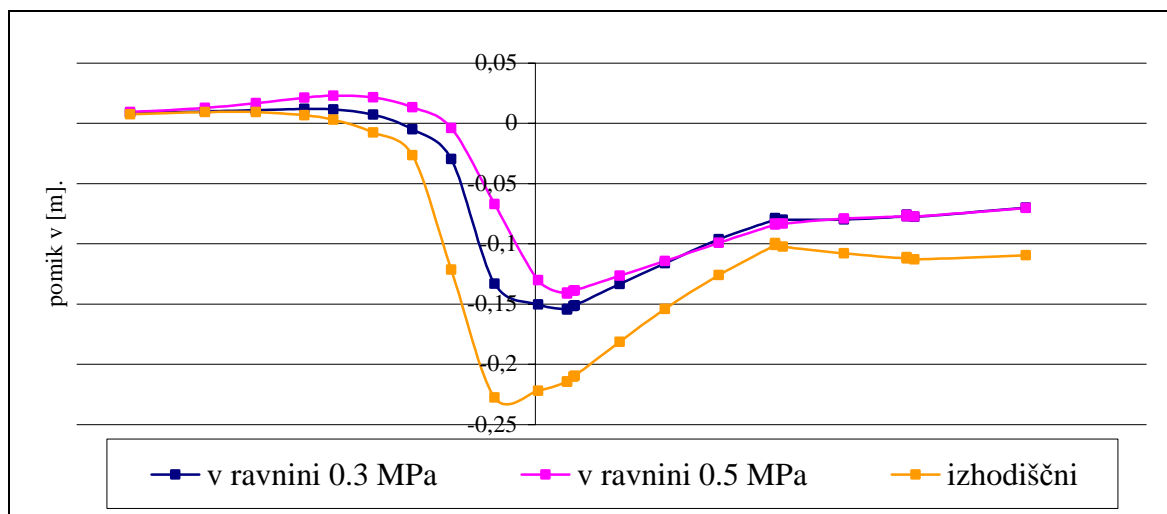


SLIKA 51: Plastični elementi - $K_o = 2$ , levo začetna faza, desno končna faza

#### 4.6.5 Vpliv ujetih napetosti

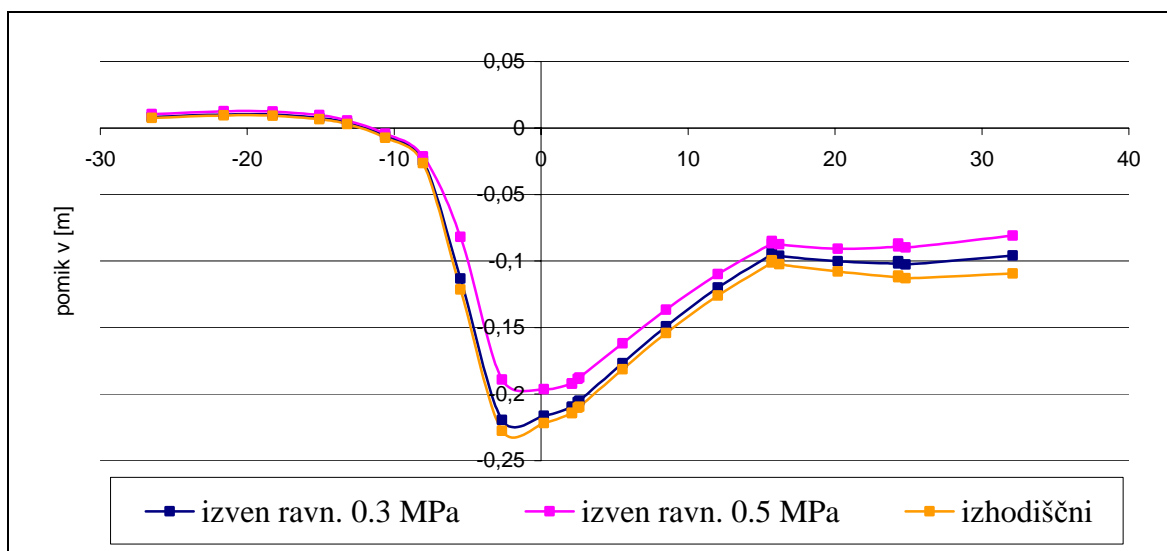
##### V ravnini prečnega profila

Tu bom prikazal, kako ujete napetosti delujejo na vertikalni pomik. Ujete napetosti v ravnini (tlačne) se bodo nahajale le v “skrilavcu 1”, ki obdajajo levo cev. Najprej sem izdelal izračun, kjer ni ujetih napetosti (izhodiščni), nato je ujeta napetost nastavljena na 0,3 MPa ter na koncu še na 0,5 MPa. Isti postopek bo sledil za ujete napetosti v smeri pravokotno na ravnino prečnega profila.



**SLIKA 52:** Prikaz vpliva ujetih napetosti v ravnini na vertikalne pomike

### Pravokotno na prečni profil



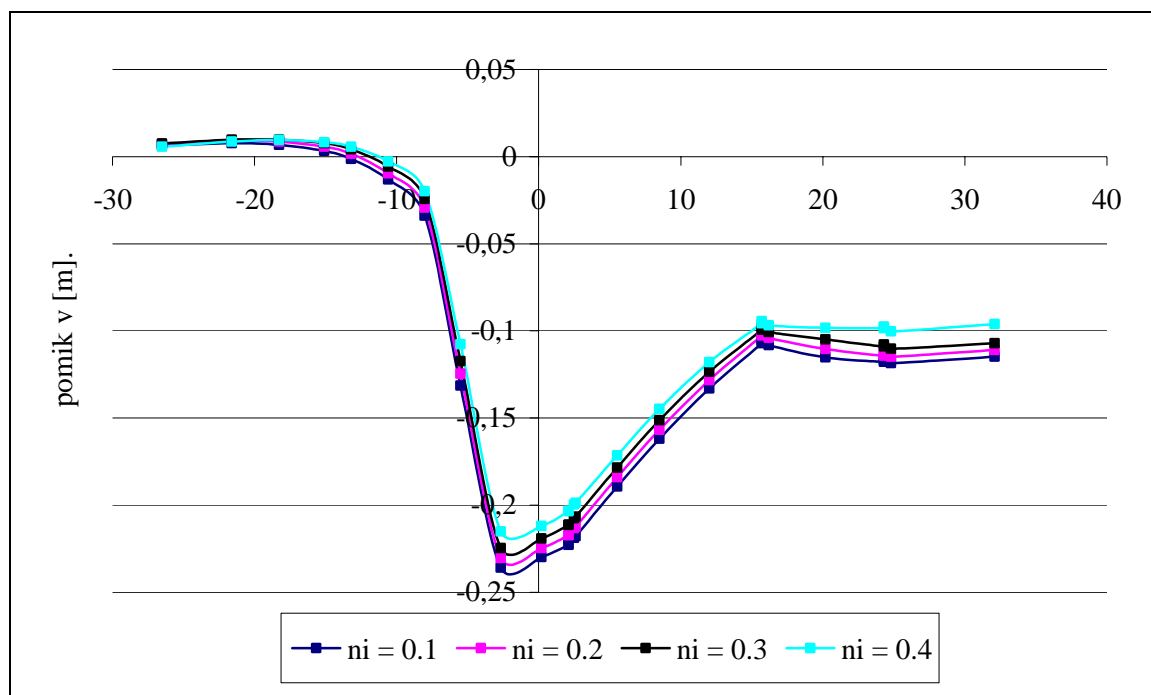
**SLIKA 53:** Prikaz vpliva ujetih napetosti izven ravnine na vertikalne pomike

Zgornja slika (Slika 52) prikazuje, kako močno vpliva ujeta napetost v ravnini na pomike, dočim ujeete napetosti pravokotno na ravnino nimajo takega vpliva na končne posedke površja (Slika 53).



#### 4.6.6 Vpliv Poissonovega količnika $\nu$

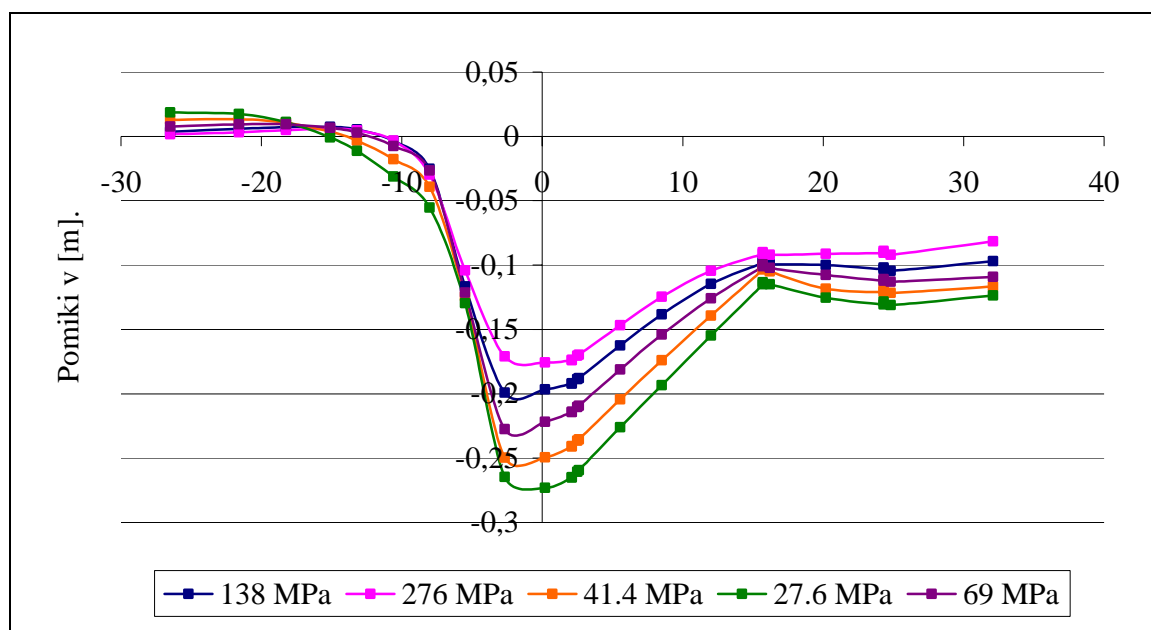
Iz slike (Slika 54) se jasno vidi, da večji, ko je Poissonov količnik, manjši je pomik. Vpliv tega parametra na posedke površine pa je zelo majhen.



SLIKA 54: Prikaz vpliva Poissonovega količnika

#### 4.6.7 Vpliv modula elastičnosti

Na tem primeru sem hotel videti, kaj se zgodi, če zunanjemu materialu, to je "skrilavec 1", dvakrat oziroma štirikrat povečam modul elastičnosti in kakšna bo sprememba, če ga za 60% oziroma 40% zmanjšam. Izhodiščni modul elastičnosti za zunanji material je 69 MPa.



**SLIKA 55:** Prikaz zmanjševanja modula elastičnosti na vertikalne pomike

Na zgornji sliki (Slika 55) se jasno vidi, da se s povečevanjem modula vertikalni pomik zmanjšuje in če, zmanjšujem modul elastičnosti, se vertikalni pomik povečuje.

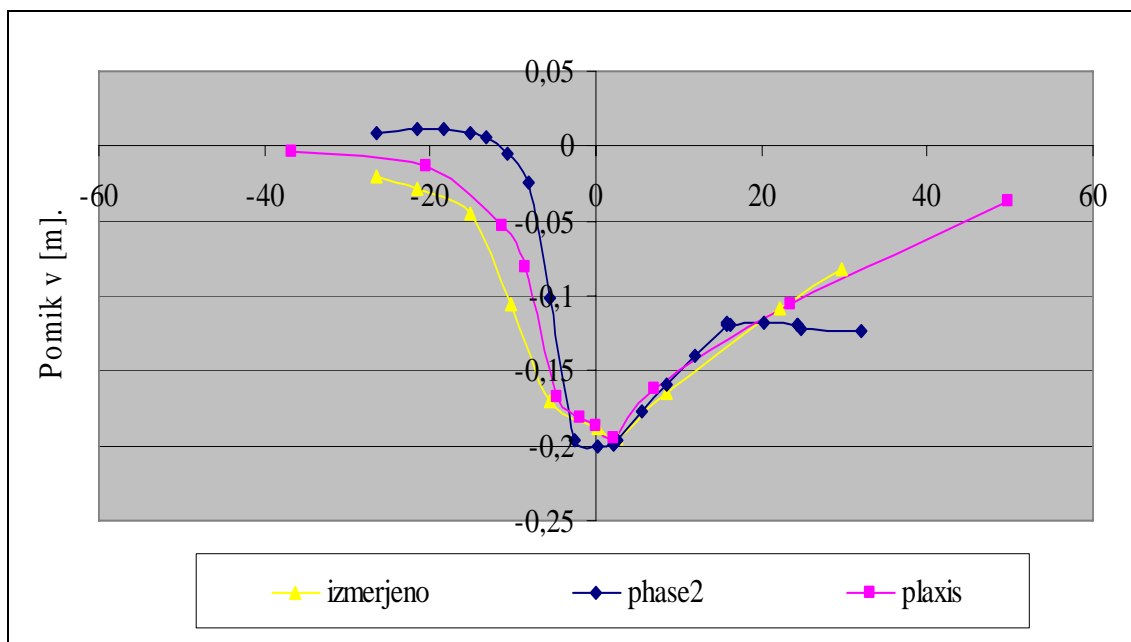
#### 4.6.8 Lastnosti hribine v matematičnem model

Na osnovi vseh zgornjih analiz, ki sem jih izvedel s programom Phase<sup>2</sup> so v spodnji preglednici (Preglednica 6) predstavljene končne karakteristike hribin.

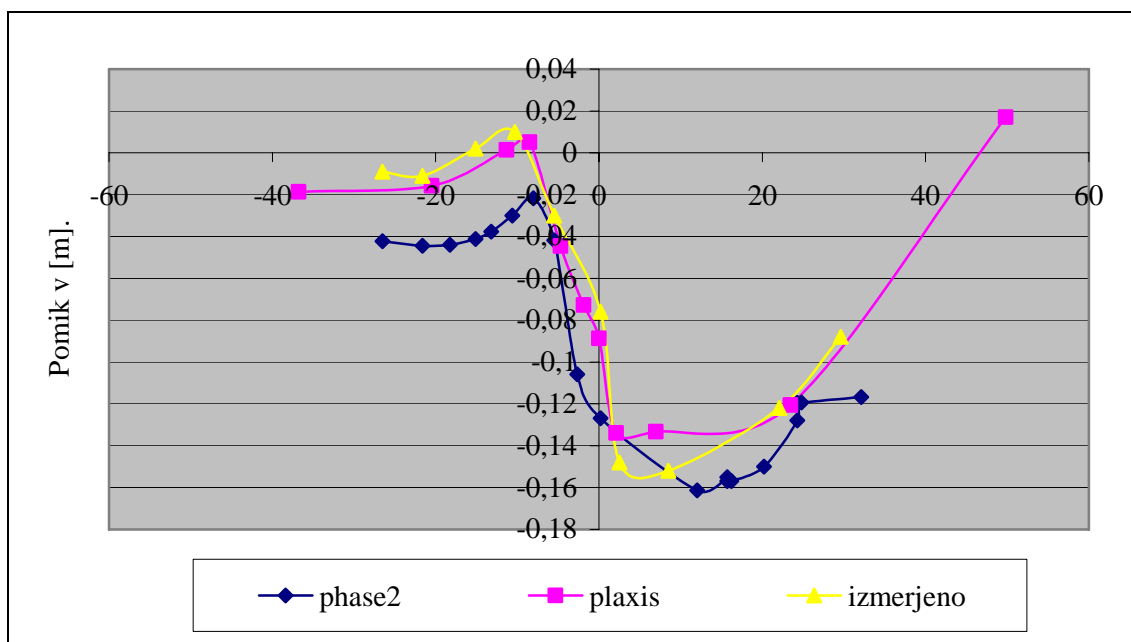
**PREGLEDNICA 6:** Karakteristike zemljin za profil 80+300

	Ime	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\nu$	E [kPa]	c peak. [kPa]	c resid. [kPa]	$\phi$ peak. [stop.]	$\phi$ resid. [stop.]	$\psi$ [stop.]
1	Utrjeni nasip	22	0,25	60.000	5	5	35	35	5
2	Pobočni grušč	20	0,25	25.000	3	3	28	28	0
3	Prepereli skrilavec	23	0,25	44.000	20	20	30	30	0
4	Skrilavec 1	24	0,25	69.000	<b>30</b>	<b>15</b>	<b>24</b>	<b>23</b>	0
5	Skrilavec 2	24	0,25	150.000	30	30	27	27	0
6	Tektonska glina	22	0,25	10.000	15	15	23	23	0

#### 4.6.9 Končni primer profila 80+300



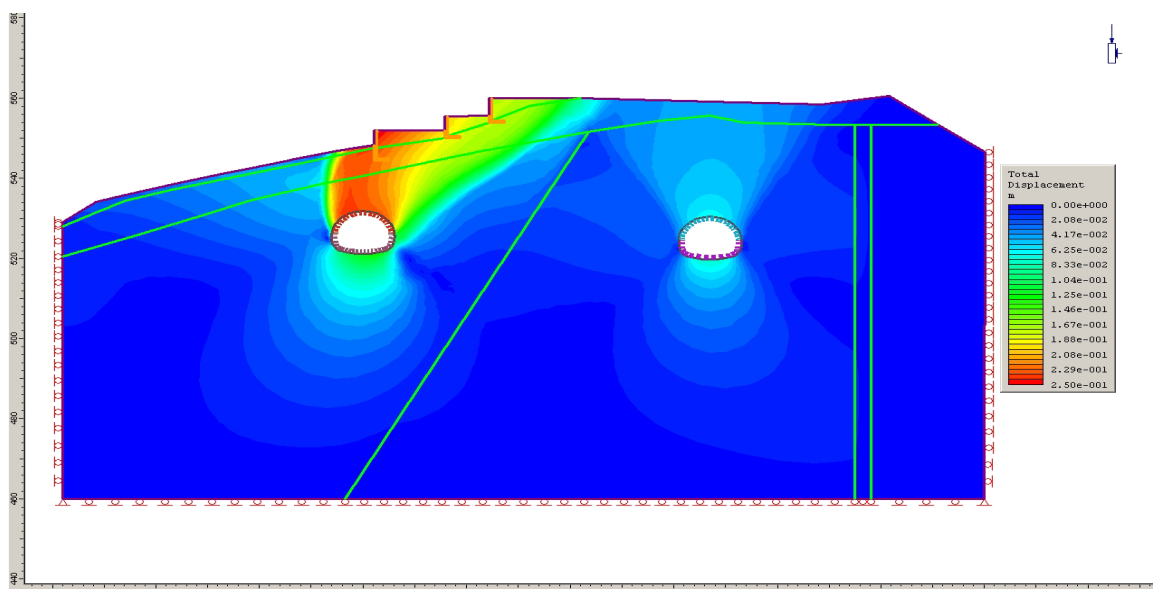
**SLIKA 56:** Primerjava izračunanih vertikalnih pomikov (PHASE<sup>2</sup> in PLAXIS) z izmerjenimi vertikalnimi pomiki v profilu 80+300



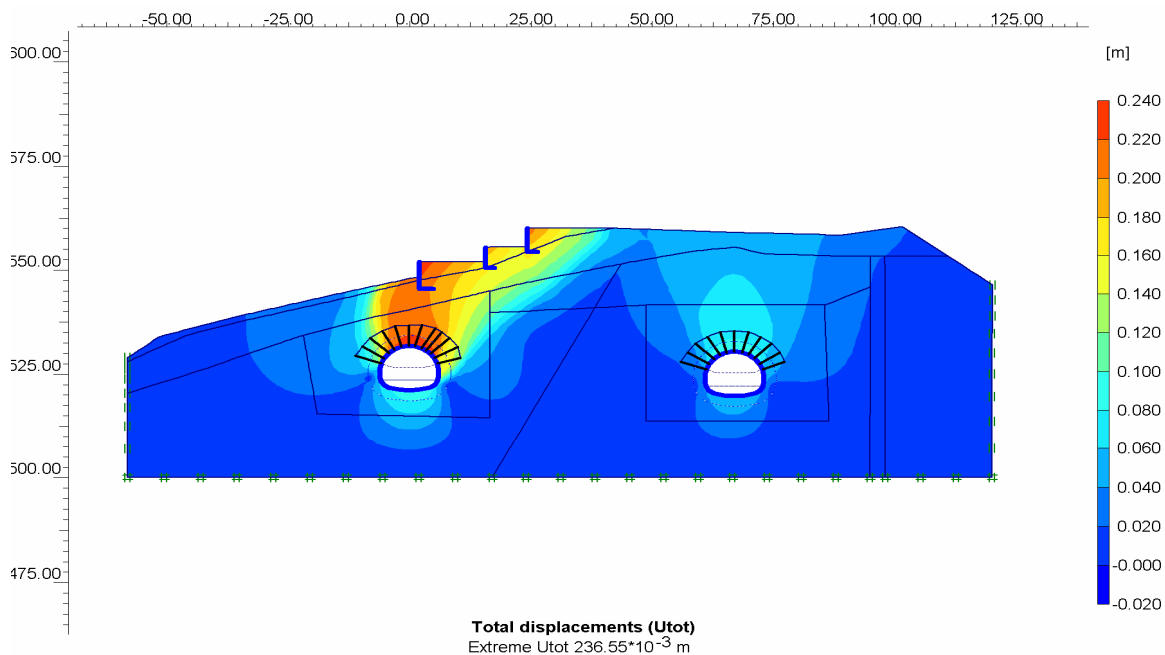
**SLIKA 57:** Primerjava izračunanih horizontalnih pomikov (PHASE<sup>2</sup> in PLAXIS) z izmerjenimi horizontalnimi pomiki v profilu 80+300

Na zgornjih slikah (Slika 56 in 57) vidimo, da se izračunani vertikalni pomik s programom PHASE<sup>2</sup> nekoliko slabše ujema z dejanskimi izmerjenimi vertikalnimi pomiki, kot vertikalni pomiki dobljeni s programom PLAXIS. Prav tako pa velja tudi za horizontalni pomik.

#### 4.6.9.1 Polje pomikov v profilu 80+300



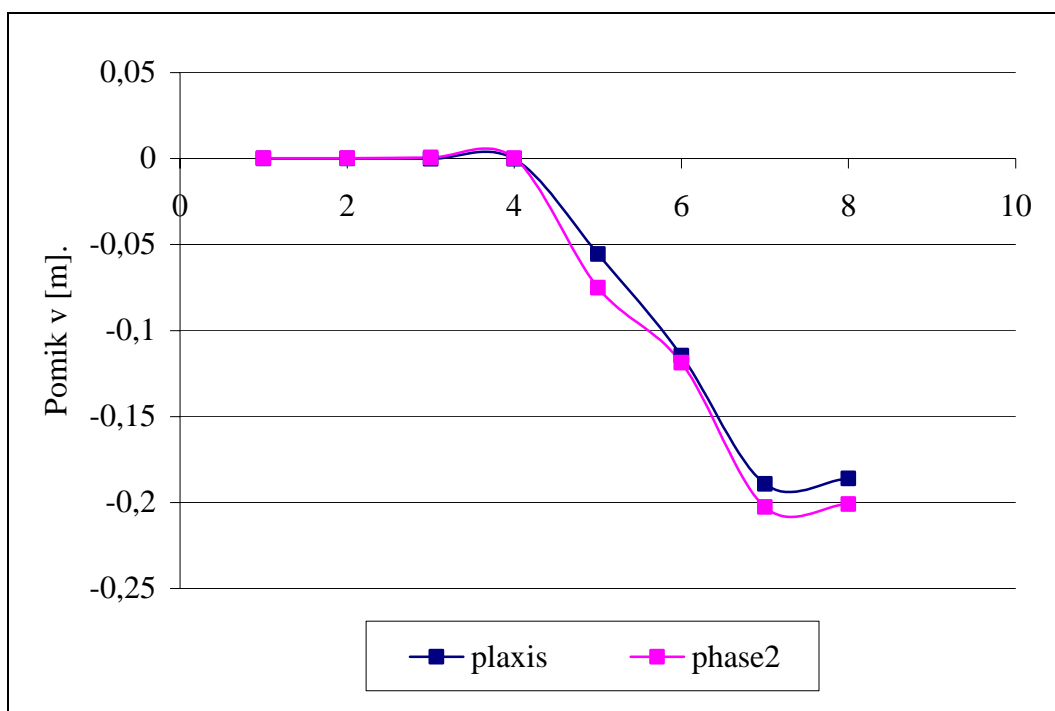
SLIKA 58: Polje pomikov po končanem izkopu izračunano s programom PHASE<sup>2</sup>



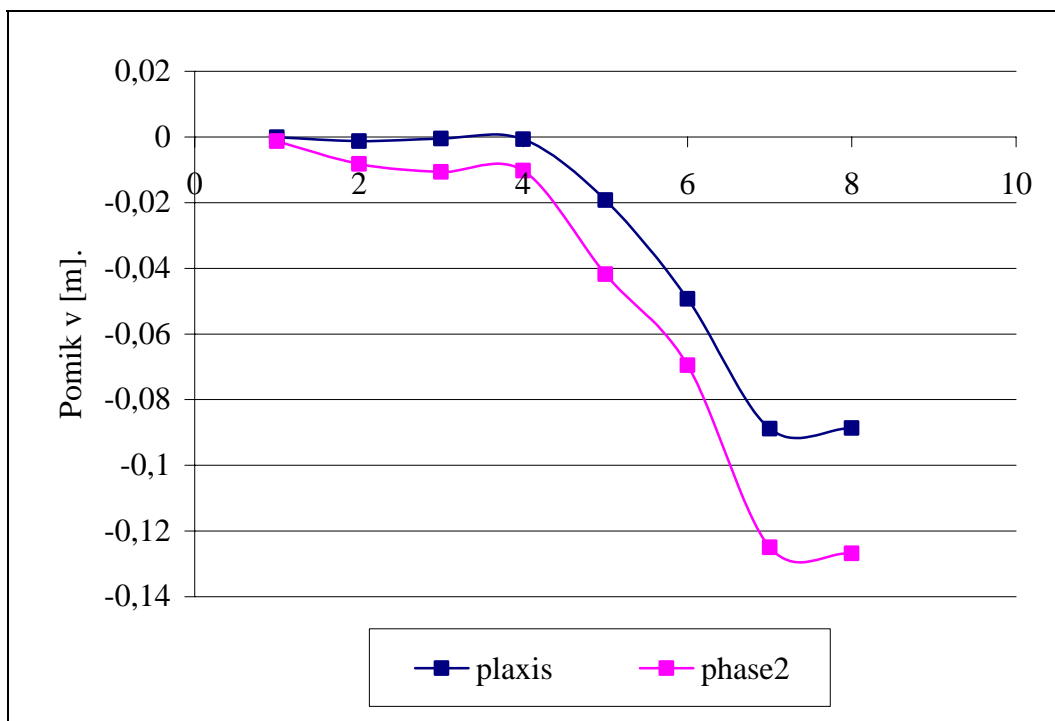
SLIKA 59: Polje pomikov po končanem izkopu izračunano s programom PLAXIS



### Pomik točke A

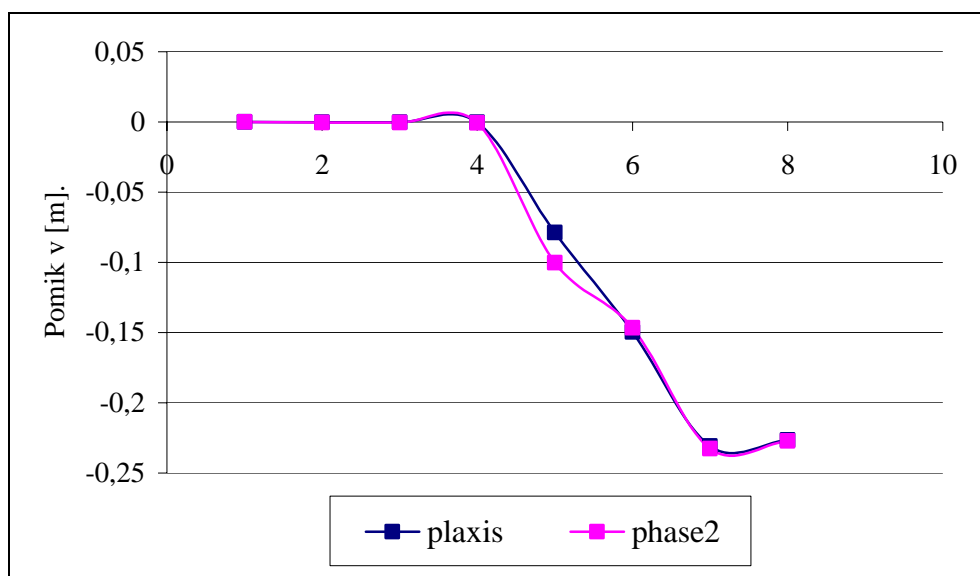


SLIKA 62: Vertikalni pomik po fazah v točki A

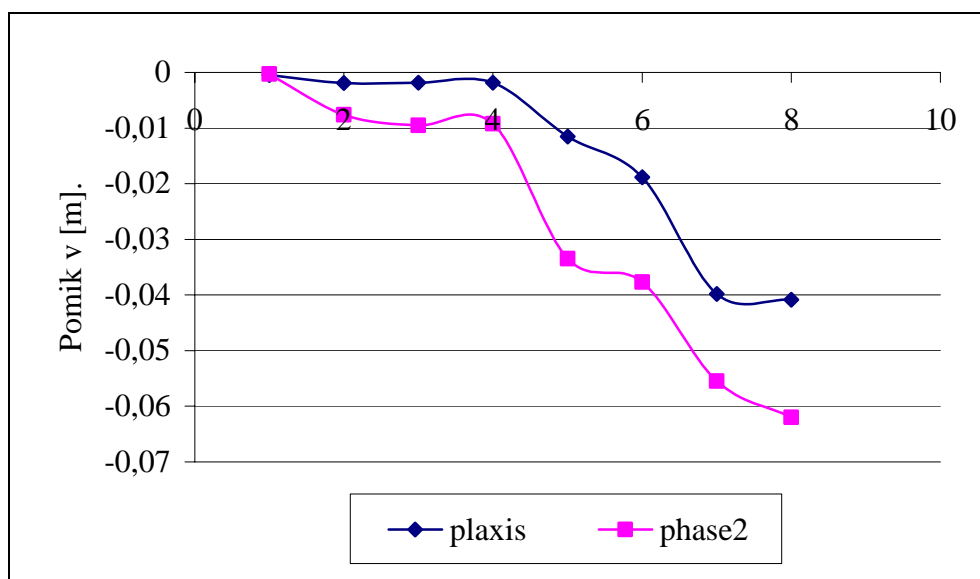


SLIKA 63: Horizontalni pomik po fazah v točki A

### Pomik točke B



**SLIKA 64:** Vertikalni pomik po fazah v točki B

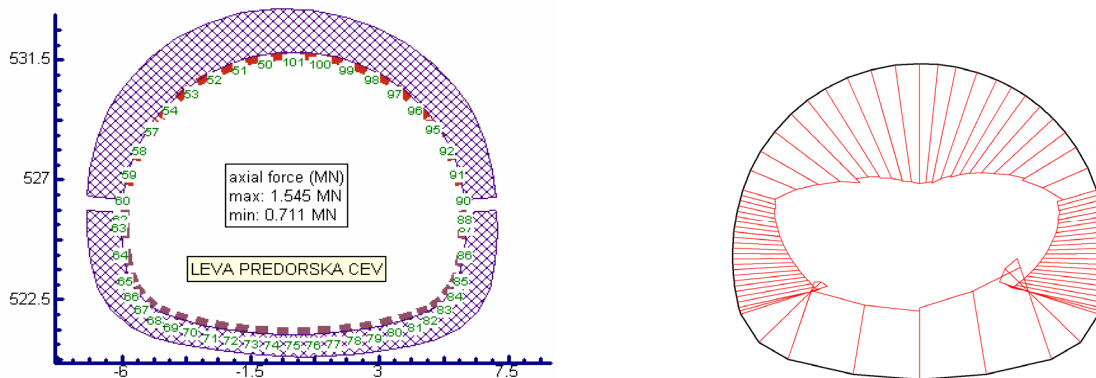


**SLIKA 65:** Horizontalni pomik po fazah v točki B

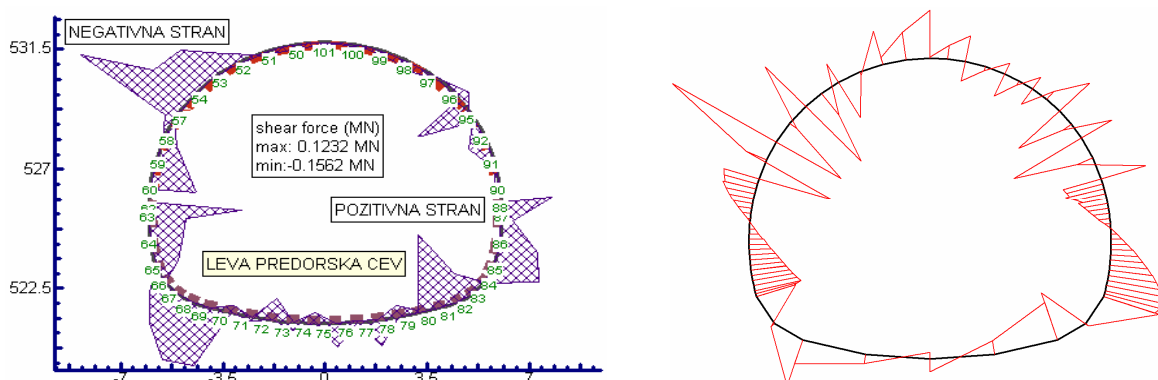
Iz zgornjih slik (Slika 62 in 64) vidimo, da se vertikalna pomika izračunana s programom PLAXIS in PHASE<sup>2</sup>, kar dobro ujemata, kar pa ne velja za horizontalne pomike, to je tudi razvidno iz zgornjih slik (Slika 63 in 65). Vidi se tudi, da je vpliv izkopa desne cevi na območje leve cevi zelo majhen, spet pa to ne velja za horizontalne pomike izračunane s programom PHASE<sup>2</sup>.

#### 4.6.9.4 Notranje sile v predorski oblogi

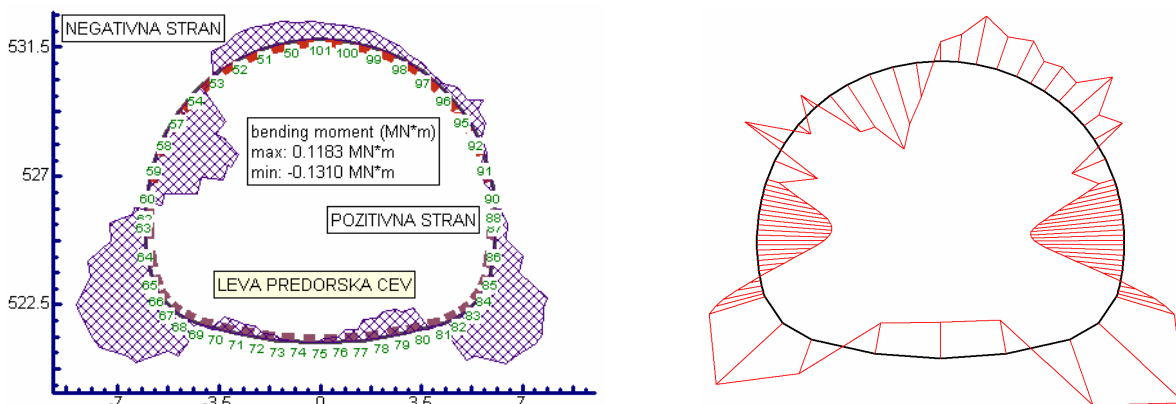
Notranje sile so prikazane za predorsko oblogo in sicer samo za levo predorsko cev. Na spodnjih slikah so zopet primerjave med obema programoma na koncu pa je tabela, ki prikazuje maksimalne vrednosti notranjih sil izračunanih z obema programoma.



SLIKA 66: Levo, osna sila dobljena s PHASE<sup>2</sup>, desno s PLAXIS-om



SLIKA 67: Levo, strižna sila dobljena s PHASE<sup>2</sup>, desno s PLAXIS-om



SLIKA 68: Levo, moment dobljen s PHASE<sup>2</sup>, desno s PLAXIS-om



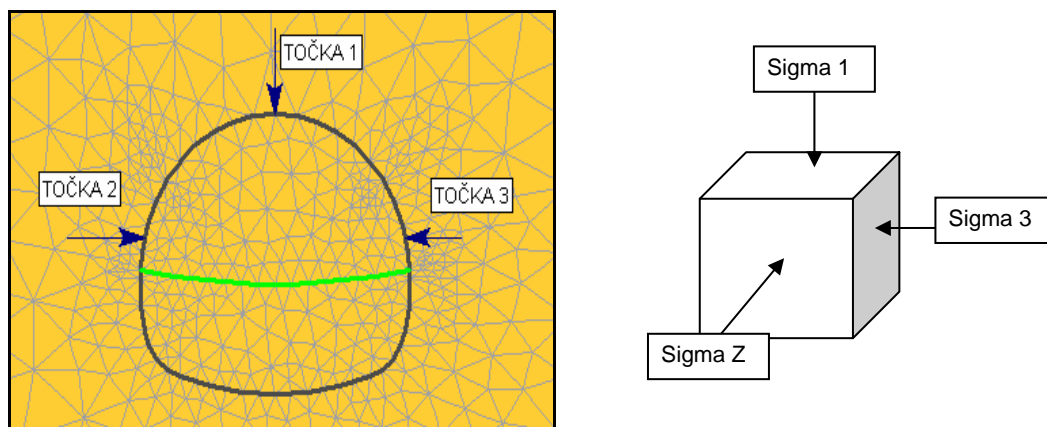
**PREGLEDNICA 7:** Primerjava vrednosti notranjih sil med PHASE<sup>2</sup> in PLAXIS-om

	Notranje sile	PHASE <sup>2</sup> (MC)	PLAXIS (MC)
1	N max [kN/m]	1.545	(-)625
2	Q max [kN/m]	124	265
3	M max [kNm/m]	118	146

Iz preglednice vidimo, da se maksimalna momenta še najbolj ujemata med seboj. Osnova sila izračunana s programom PHASE<sup>2</sup> je več kot dvakrat večja od osne sile izračunane s programom PLAXIS. Strižna sila izračunana s programom PHASE<sup>2</sup>, pa je dvakrat manjša od strižne sile izračunane s programom PLAXIS.

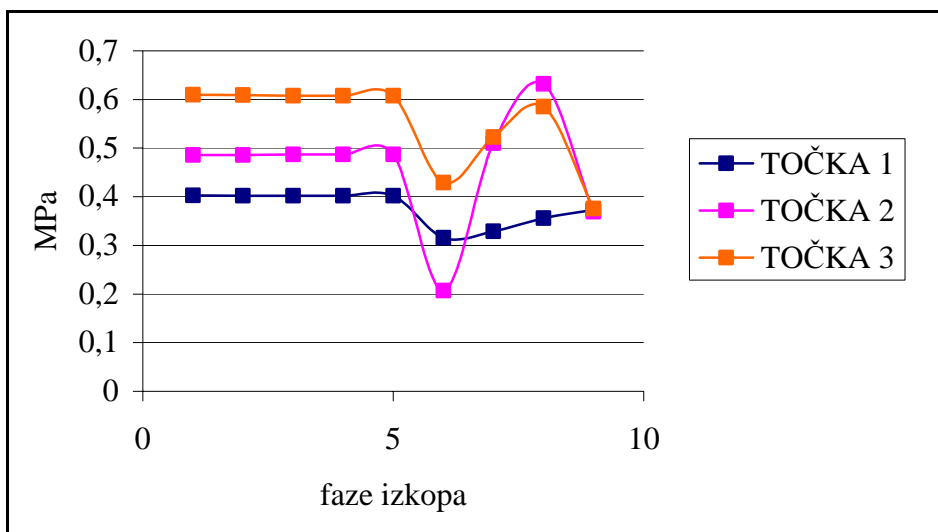
**4.6.9.5 Napetosti v levi cevi za profil 80+300**

Tu bom primerjal napetosti v treh točkah, kot je to razvidno iz slike (Slika 69). Rezultati so podani kot diagrami (Slika 70, 71 in 72).

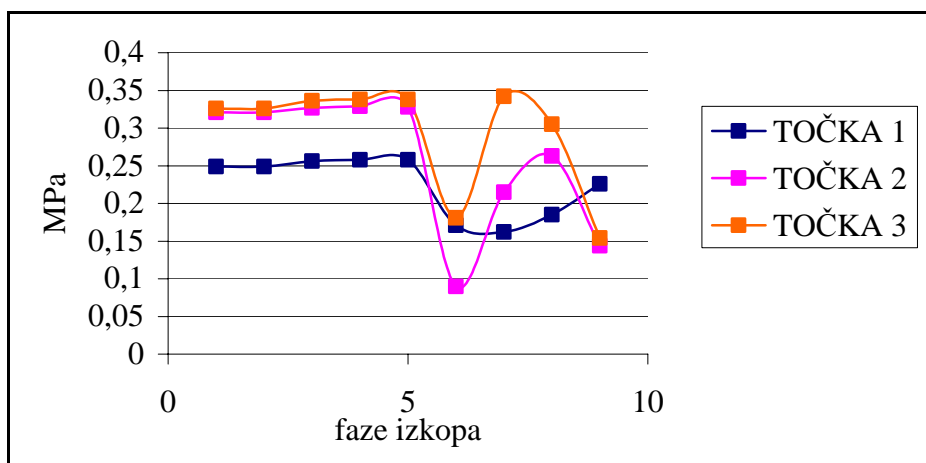


**SLIKA 69:** Točke opazovanja napetosti okrog leve predorske cevi ter prikaz glavnih napetosti

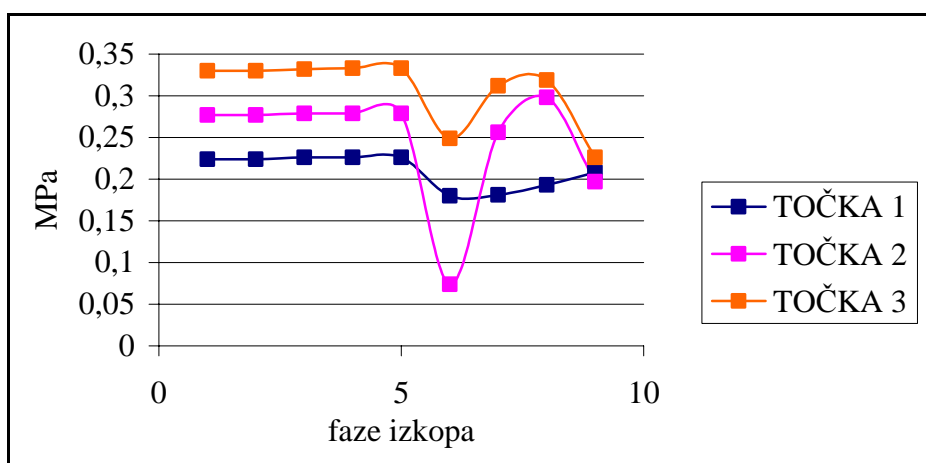
Sigma 1 in sigma 3 so glavne napetosti in delujejo v ravnini, kot je razvidno iz slike (Slika 69), sigma Z pa deluje izven ravnine.



SLIKA 70: Prikaz glavnih napetosti sigma 1



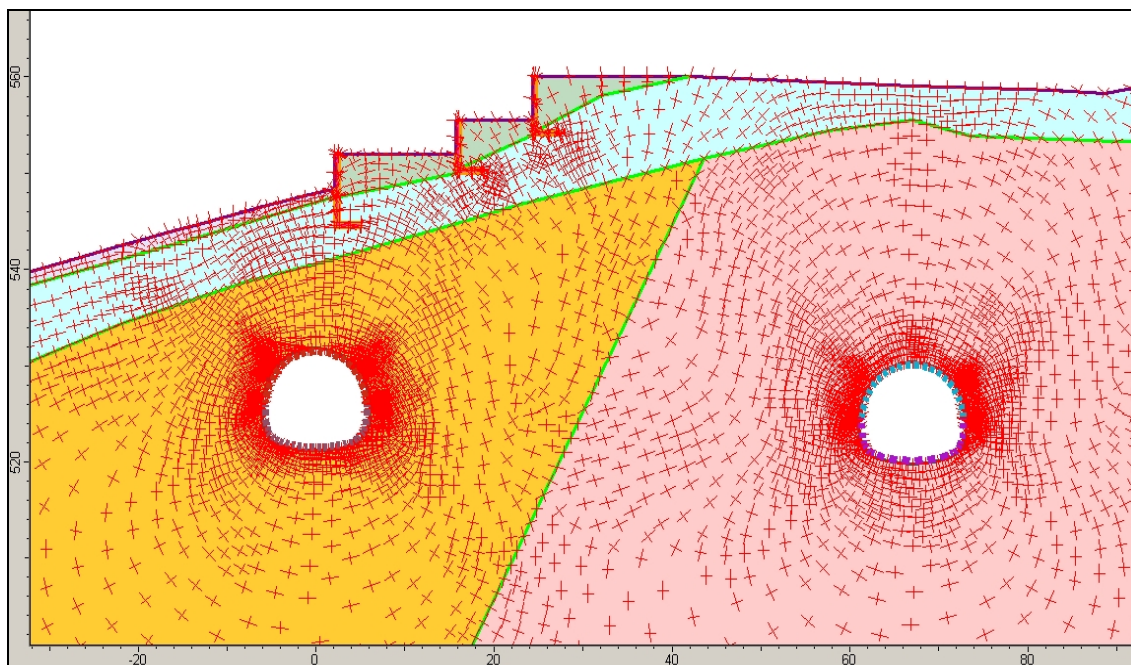
SLIKA 71: Prikaz vrednosti sigma 3



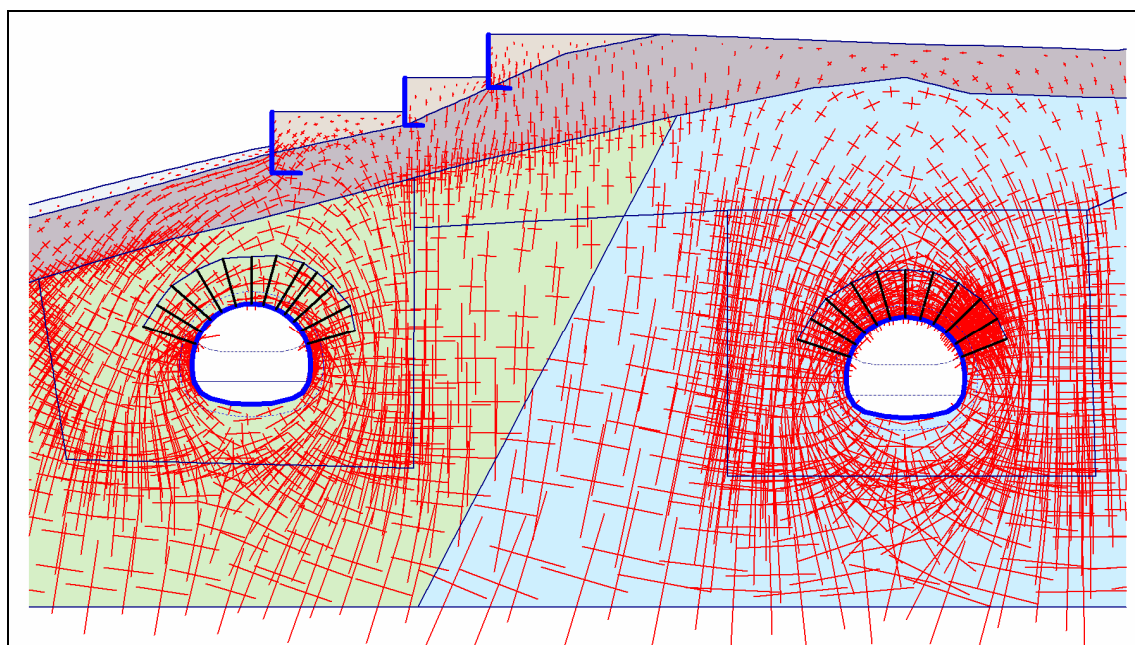
SLIKA 72: Prikaz vrednosti sigma Z

#### 4.6.9.6 Totalne napetosti

Prikaz totalnih napetosti pri programu Phase<sup>2</sup> ni najbolje prikazano v primerjavi s programom Plaxis.



SLIKA 73: Totalne napetosti dobljene s programom PHASE<sup>2</sup>



SLIKA 74: Totalne napetosti dobljene s programom PLAXIS

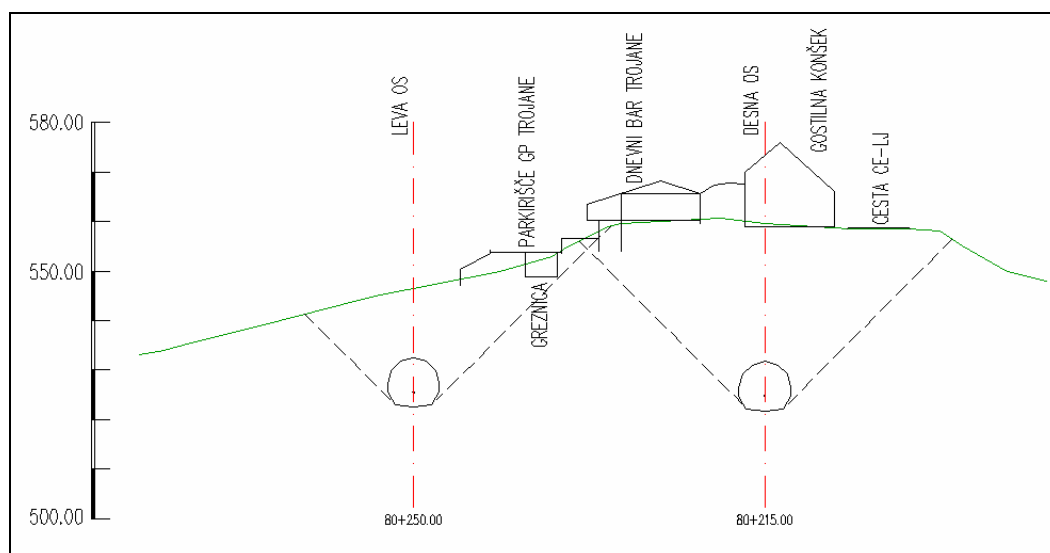
## 4.7 Profil 80+250

S povratnimi analizami za profil 80+300 sem dobil karakteristike zemljin, katere sem uporabil v profilu 80+250. Zanimalo me je kakšne rezultate dajo te karakteristike za profil, ki je le 50 m oddaljen in ima nekoliko drugačno geometrijo in geološke plasti.

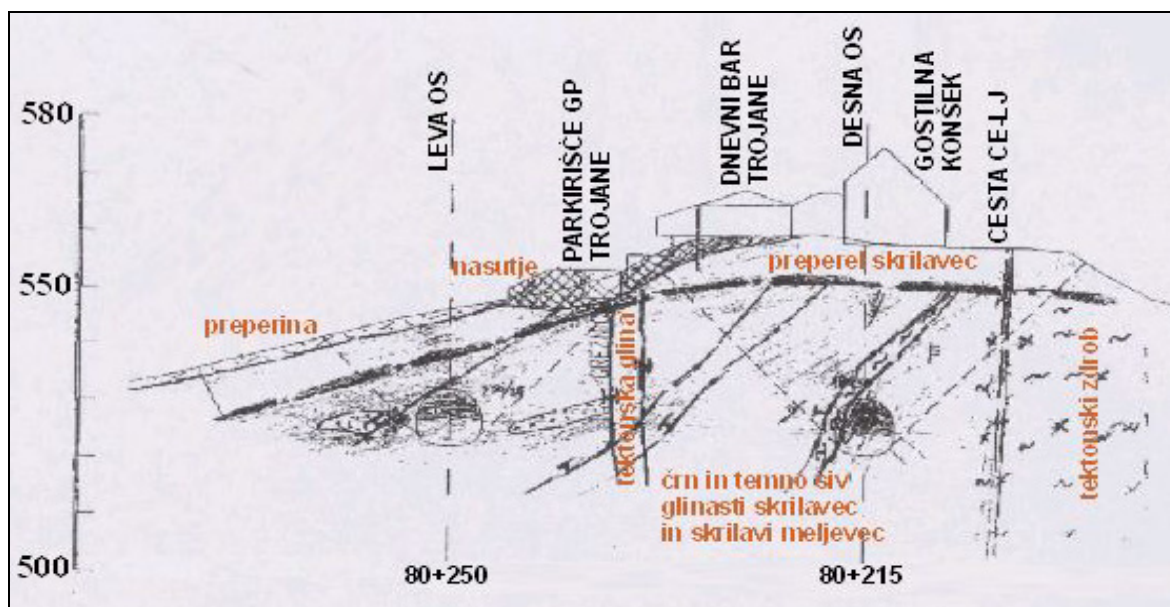
**PREGLEDNICA 8:** Karakteristike zemljin za profil 80+250

Ime	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\nu$	E [kPa]	c peak. [kPa]	c resid. [kPa]	$\phi$ peak. [stop.]	$\phi$ resid. [stop.]	$\psi$ [stop.]
1 Utrjeni nasip	22	0,25	60.000	5	5	35	35	5
2 Pobočni grušč	20	0,25	25.000	3	3	28	28	0
3 Prepereli skrilavec	23	0,25	44.000	20	20	30	30	0
4 Skrilavec 1	24	0,25	69.000	30	15	24	23	0
5 Skrilavec 2	24	0,25	150.000	30	30	27	27	0
6 Tektonska glina	22	0,25	10.000	15	15	23	23	0

Matematični model je bil narejen podobno kot profil 80+300 in sicer na podlagi geometrije profila in geoloških podatkov, ki so prikazani na spodnjih slikah (Slika 75 in 76).

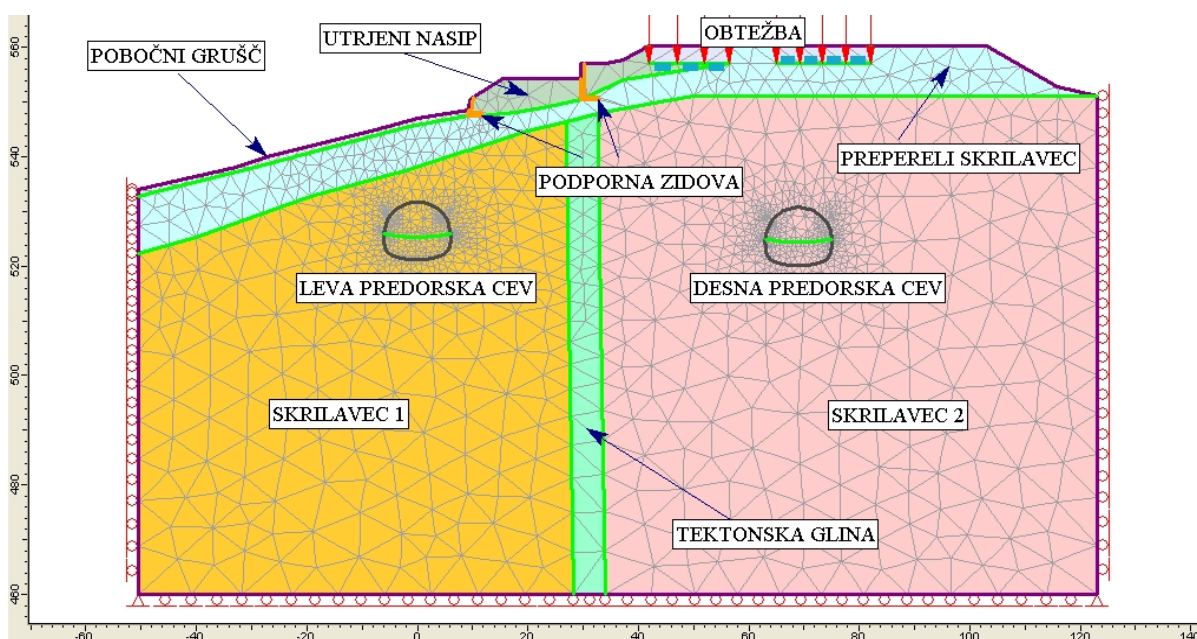


**SLIKA 75:** Geometrija profila 80+250



SLIKA 76: Geološka struktura profila 80+250

### Geometrija matematičnega modela



SLIKA 77: Matematični model profila 80+250

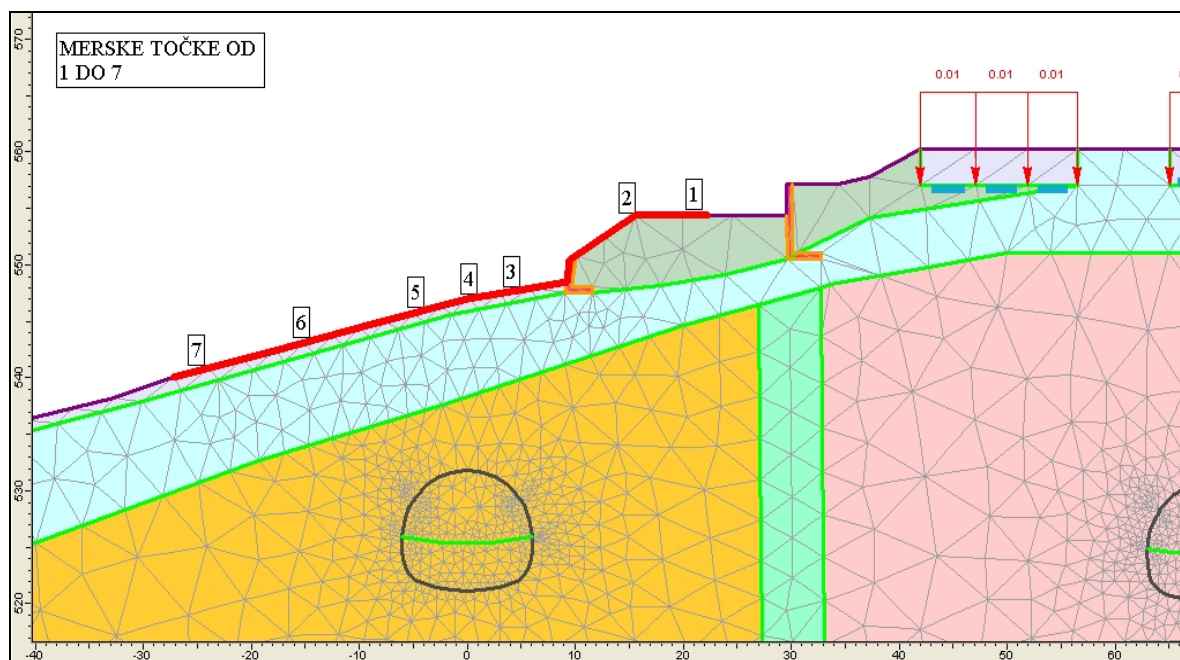
Pri izračunu so bile upoštevane enake geološke plasti, kot pri analizi profila 80+300. V modelu je upoštevana nad desno predorsko cevjo obtežba 10 kN/m<sup>2</sup> (v y smeri). To sta dva objekta gostišča Trojane (C29 in C30).



V profilu 80+250 je prav tako upoštevan MC materialni model. Gostota mreže je skoraj enaka kot pri profilu 80+300 in prav tako je izbran 6 točkovni trikotni element.

#### 4.7.1 Točke opazovanja pomikov v modelu

Na površju je bilo opazovanih 7 točk nad levo cevjo (Slika 78).

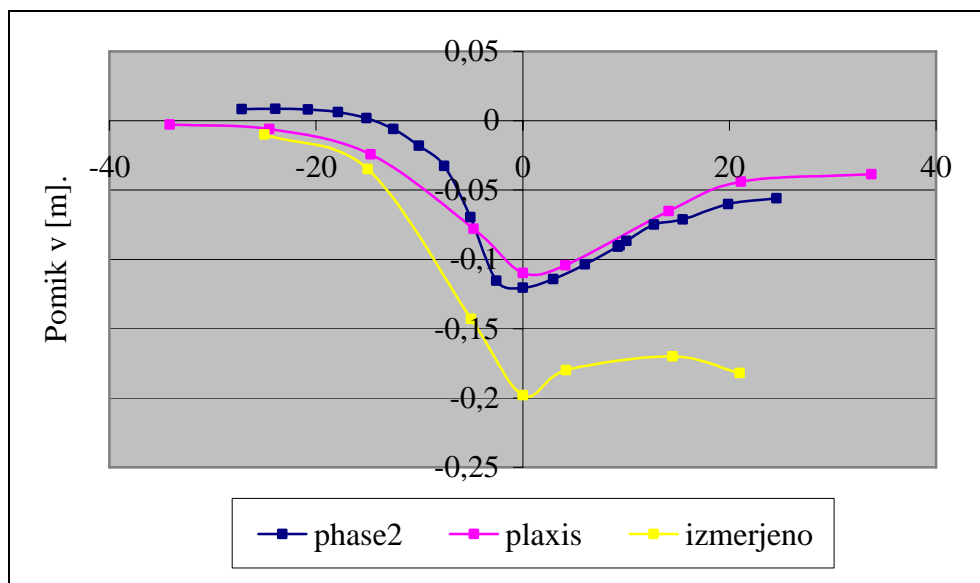


SLIKA 78: Merske točke in točke v katerih sem spremljal rezultate računske analize

#### 4.7.2 Končni primer profila 80+250

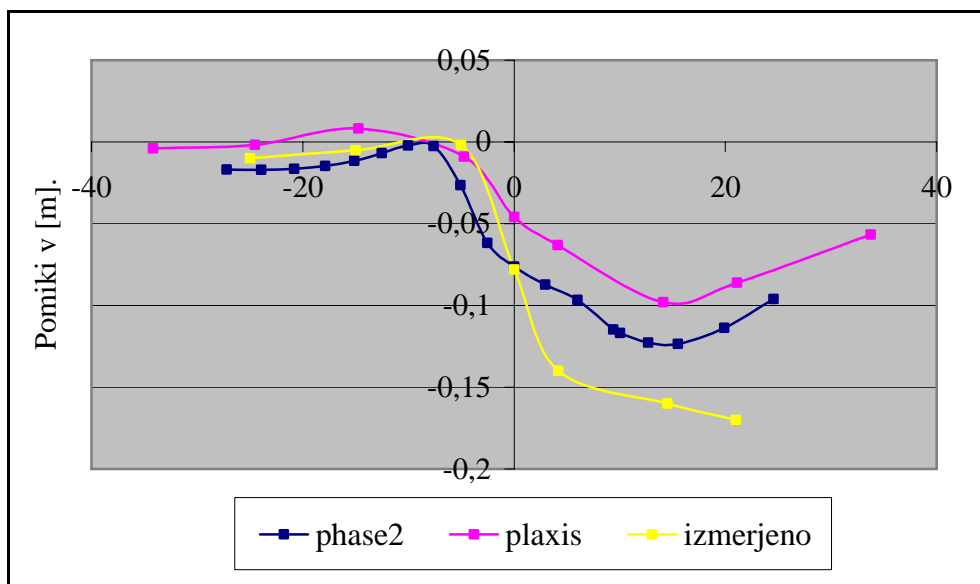
Spodnja slika (Slika 79) prikazuje vertikalne pomike ter primerjavo med izmerjenimi ter izračunanimi pomiki, ki jih je dobila Miklavžinova, ter med mojimi pomiki, ki sem jih dobil s povratno analizo s programom Phase<sup>2</sup> za MC porušni model. Na isti način so prikazani horizontalni pomiki (Slika 80).

Na sliki (Slika 79) z vertikalnimi pomiki se lepo vidi, da se izračunani pomiki ne ujemajo z izmerjenimi, kar pove, da bi za model 80+250 moral uporabiti material s slabšimi karakteristikami. Pomiki izračunani s programom Phase<sup>2</sup> in Plaxis pa se v večji meri kar ujemajo, kar nakazuje na podobnost programov.



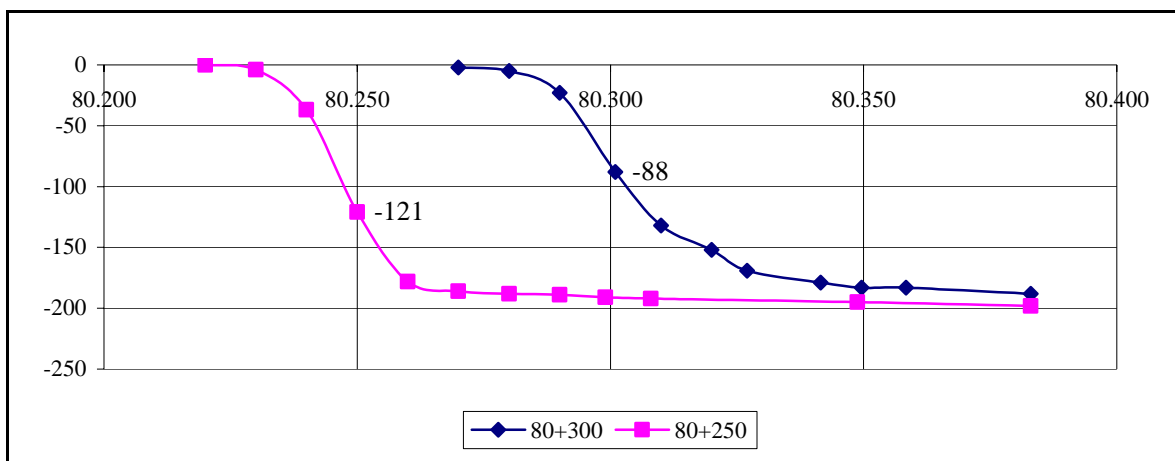
**SLIKA 79:** Primerjava izračunanih vertikalnih pomikov (PHASE<sup>2</sup> in PLAXIS) z izmerjenimi vertikalnimi pomiki v profilu 80+250

Tudi slika (Slika 80) prikazuje, da se izračunani horizontalni pomiki ne ujemajo ravno najboljše z izmerjenimi, vendar pa se horizontalni pomiki izračunani s programom Phase<sup>2</sup> veliko boljše ujemajo z izmerjenimi kot horizontalni pomiki dobljeni s Plaxis-om (Slika 80).



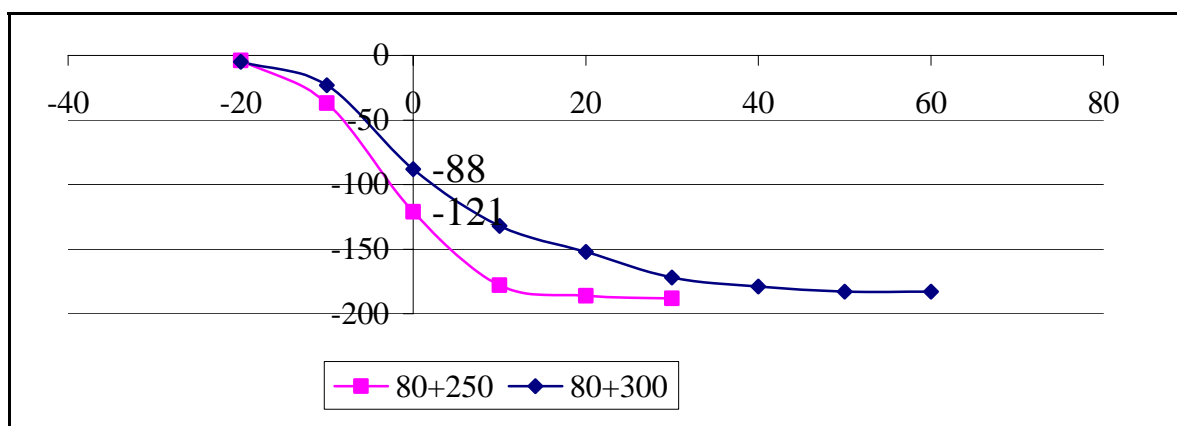
**SLIKA 80:** Primerjava izračunanih horizontalnih pomikov (PHASE<sup>2</sup> in PLAXIS) z izmerjenimi horizontalnimi pomiki v profilu 80+250

Razlog zakaj se vertikalni pomiki v profilu 80+250 ne ujemajo z dejanskimi pomiki, ki so zgolj 50 m oddaljeni od profila 80+300 je prikazan na spodnji sliki (Slika 81).



**SLIKA 81:** Prikaz naraščanja vertikalnih pomikov na površju ko so se z izkopi približevali profiloma

Iz slike (Slika 81) se vidi, da ima izkop predora približno 20 m pred profilom 80+250 ter pred profilom 80+300 že majhen vpliv na vertikalne pomike na površju. Z napredovanjem izkopavanja predora proti profilu 80+250 vertikalni pomiki hitreje naraščajo v primerjavi z približevanjem izkopa k profilu 80+300. To nakazuje, da so v okolici profila 80+250 zemeljske karakteristike slabše kot pri profilu 80+300. Spodnja slika (Slika 82) je še bolj očitna in prikazuje da so v okolici profila 80+250 zemeljske karakteristike res bile slabše v primerjavi z profilom 80+300.

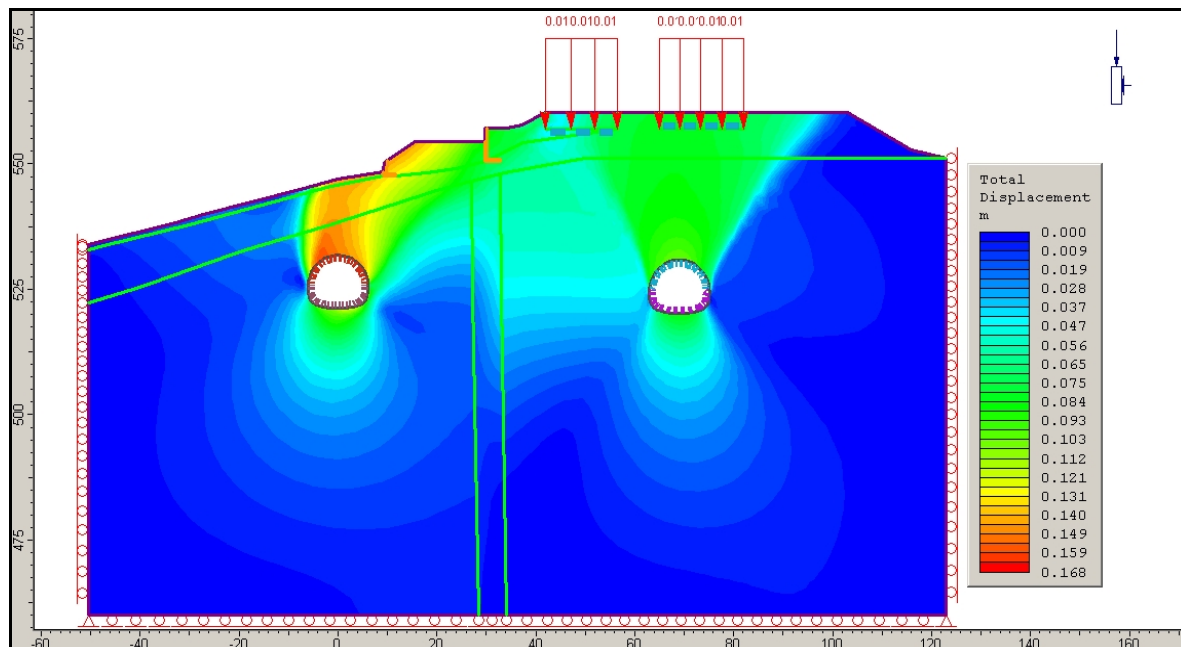


**SLIKA 82:** Prikaz naraščanja vertikalnih pomikov na površju

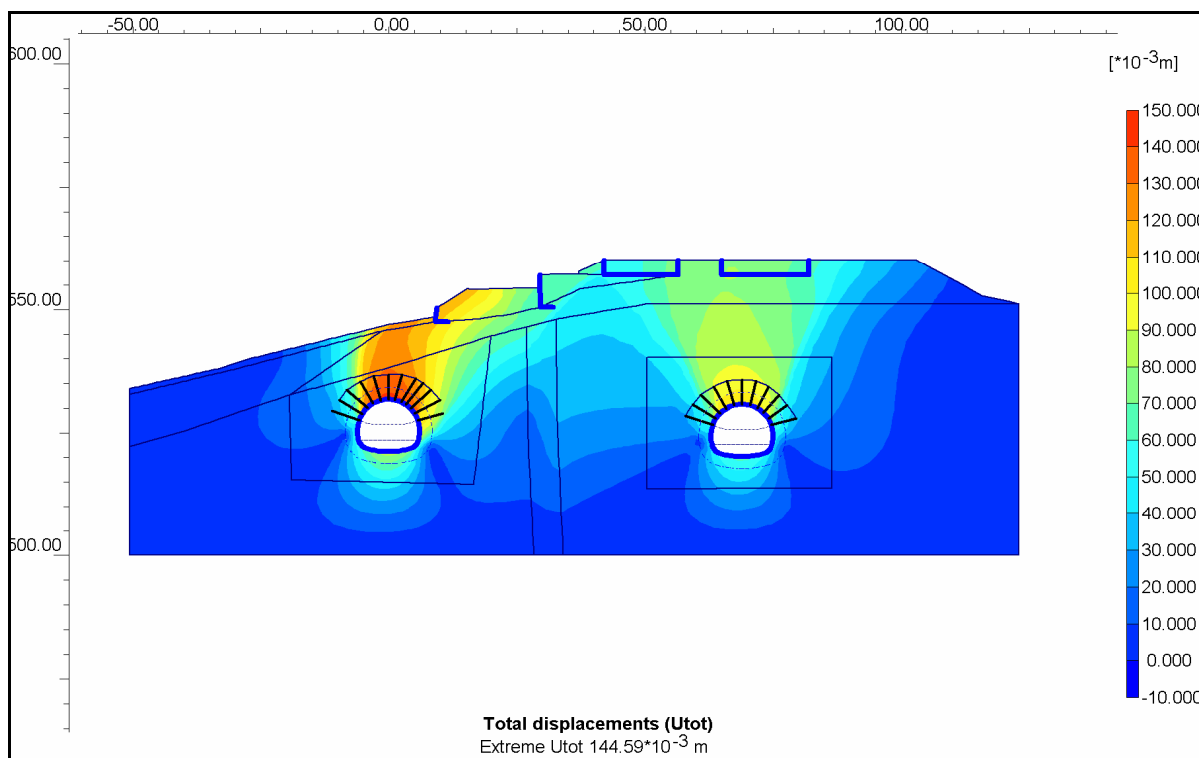


#### 4.7.2.1 Polje pomikov v profila 80+250

Spodnji sliki (Slika 83 in 84) prikazujeta polje pomikov v celotnem profilu.

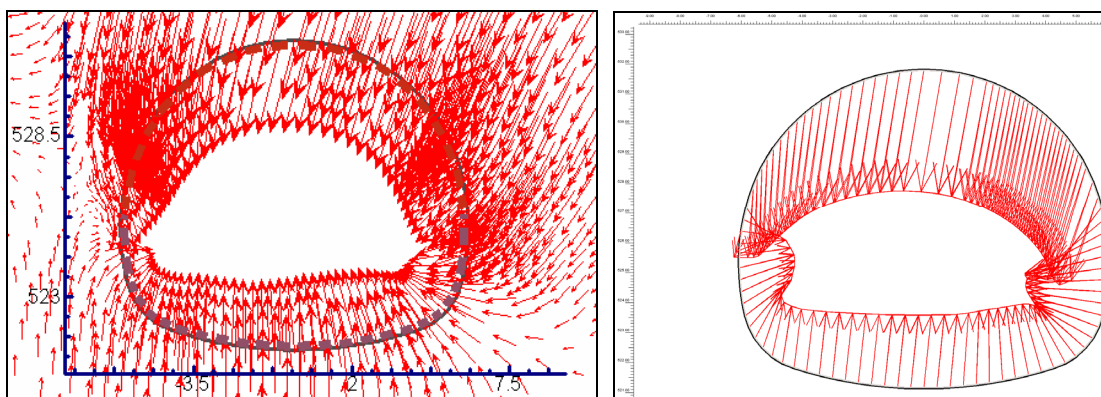


SLIKA 83: Polje pomikov po končanem izkopu dobljeno s programom PHASE<sup>2</sup>



SLIKA 84: Polje pomikov po končanem izkopu dobljeno s programom PLAXIS

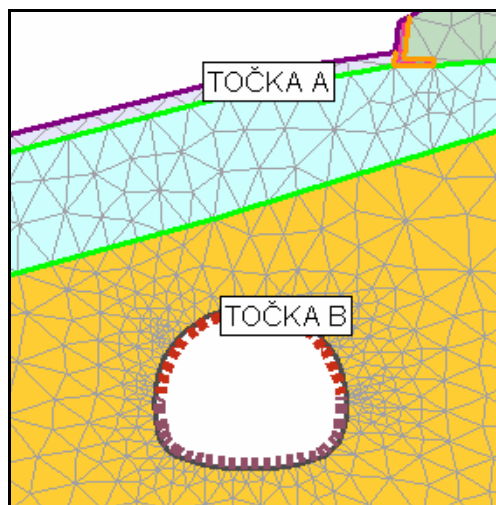
#### 4.7.2.2 Končni pomik v predorski cevi



**SLIKA 85:** Levo, pomik dobljen s programom PHASE<sup>2</sup>, desno dobljen s programom PLAXIS

#### 4.7.2.3 Pomik po fazah za profil 80+250 na površini in v temenu predorske cevi

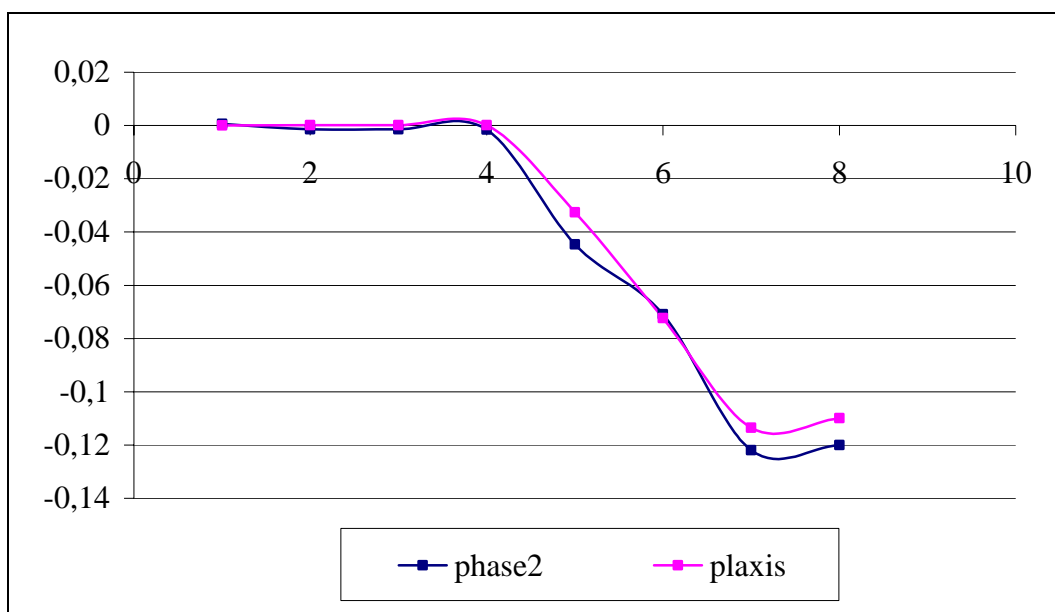
Točka A se nahaja na površju nad levo predorsko cevjo. Točka B pa, kot je to razvidno iz slike (Slika 86).



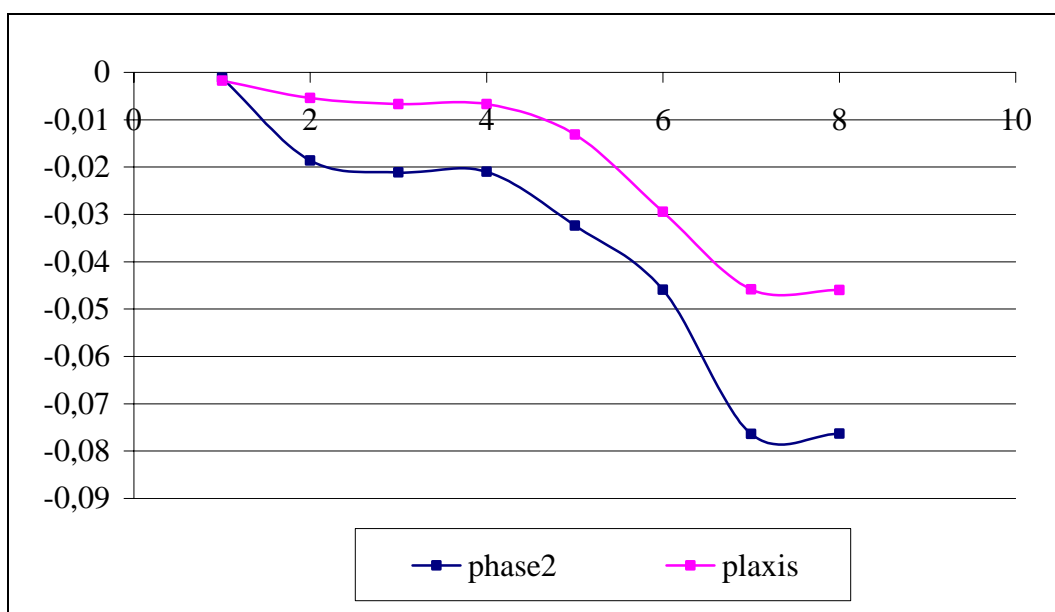
**SLIKA 86:** Prikaz opazovanih točk pri analizi

Na naslednjih slikah (Slika 87, 88, 89 in 90) bodo prikazane primerjave pomikov po fazah med programom Phase<sup>2</sup> in Plaxis.

### Pomik točke A



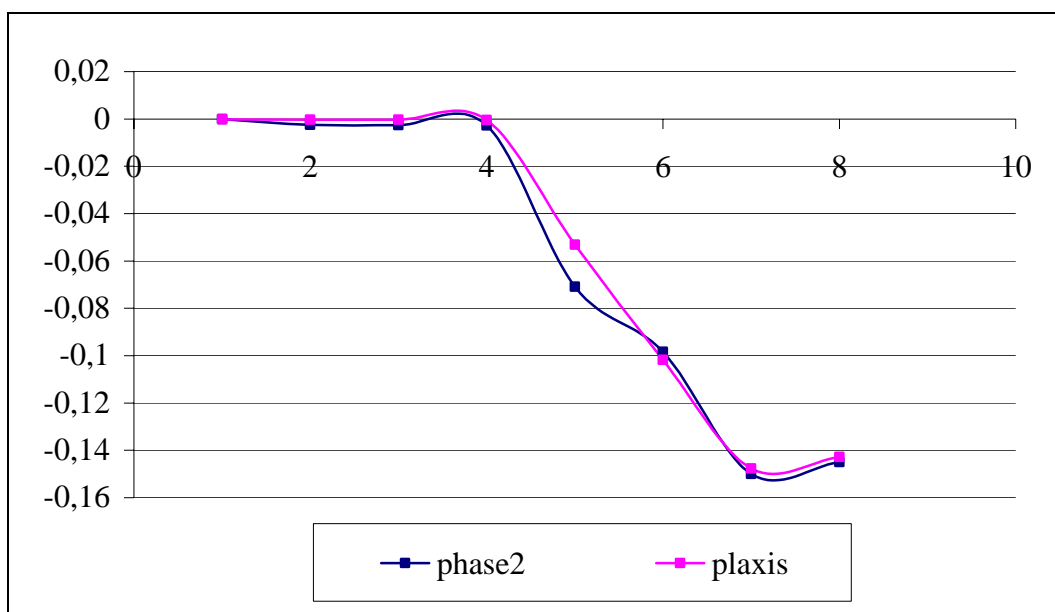
SLIKA 87: Vertikalni pomik po fazah v točki A



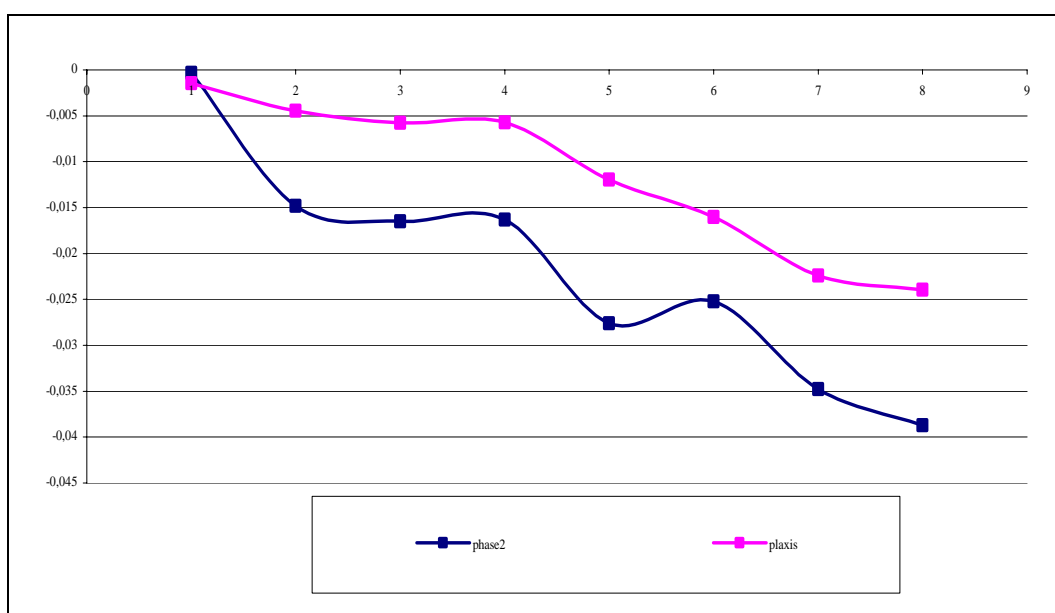
SLIKA 88: Horizontalni pomik po fazah v točki A

Tudi za profil 80+250 se kaže dobro ujemanje vertikalnih pomikov med Phase<sup>2</sup> in Plaxis-om (Slika 87).

### Pomik točke B



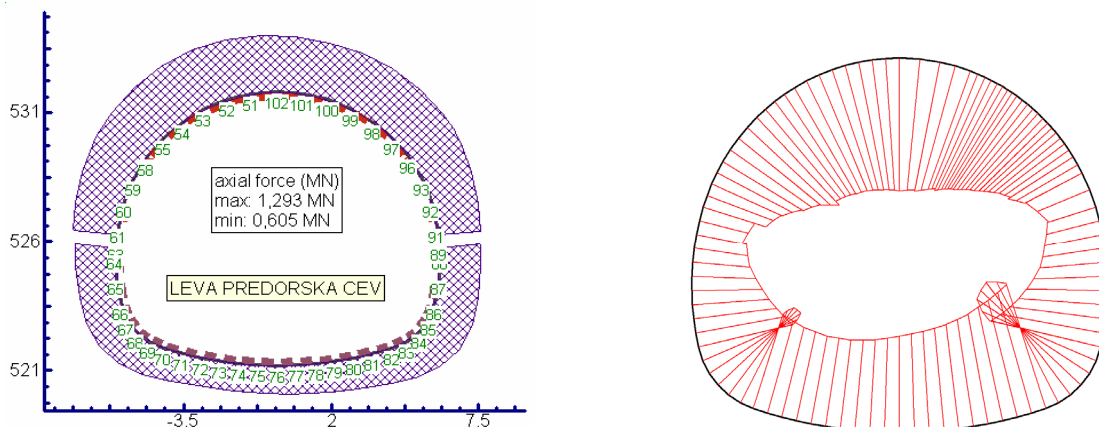
SLIKA 89: Vertikalni pomik po fazah v točki B



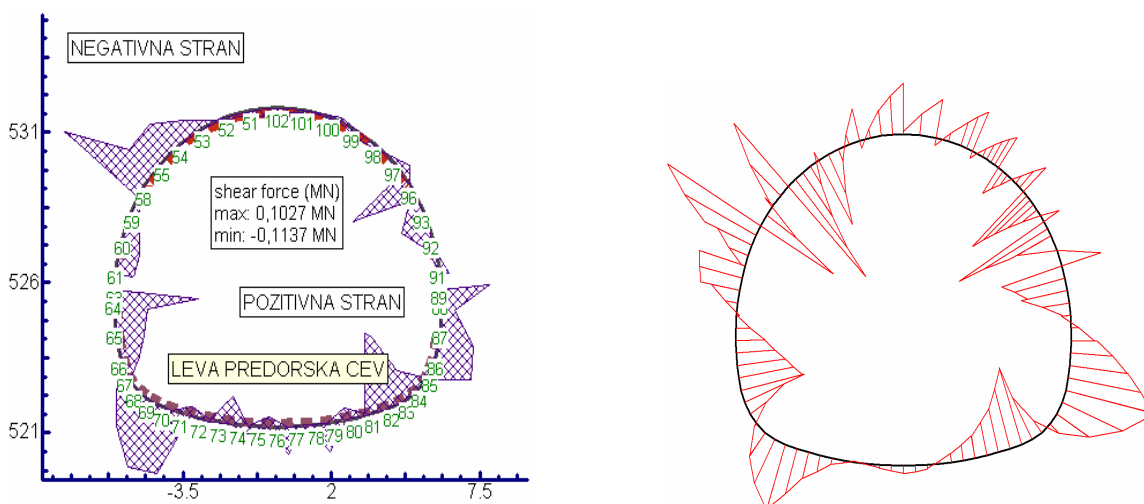
SLIKA 90: Horizontalni pomik po fazah v točki B

#### 4.7.2.4 Notranje sile v predorski oblogi

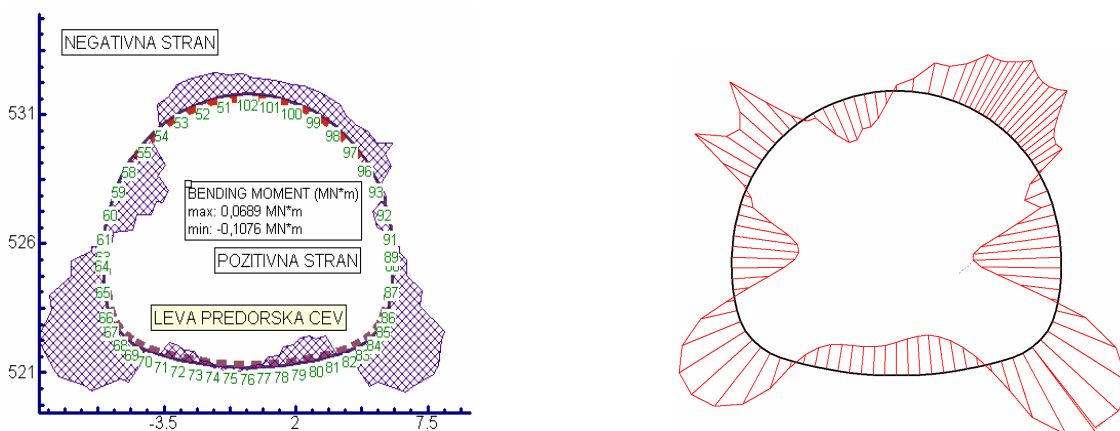
Notranje sile so prikazane za predorsko oblogo in sicer samo za levo predorsko cev. Na spodnjih slikah so zopet primerjave med obema programoma na koncu pa je tabela, ki prikazuje maksimalne vrednosti notranjih sil izračunanih z obema programoma.



SLIKA 91: Levo, osna sila dobljena s PHASE<sup>2</sup>, desno dobljena s PLAXIS-om



SLIKA 92: Levo, strižna sila dobljena s PHASE<sup>2</sup>, desno dobljeno s PLAXIS-om



SLIKA 93: Levo, moment dobljen z PHASE<sup>2</sup>, desno dobljeno s PLAXIS-om

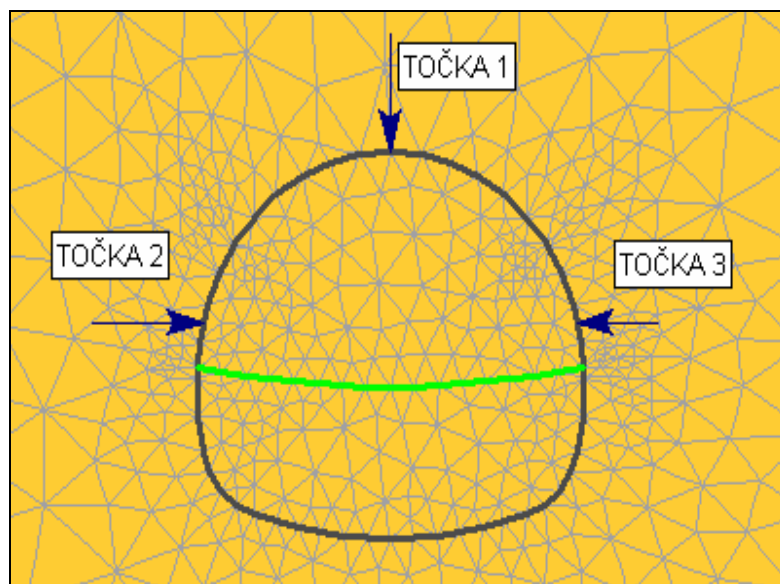
**PREGLEDNICA 9:** Primerjava vrednosti notranjih sil med PHASE<sup>2</sup> in PLAXIS-om

	Notranje sile	PHASE <sup>2</sup> (MC)	PLAXIS (MC)
1	N max [kN/m]	1.293	(-)918
2	Q max [kN/m]	102,7	302
3	M max [kNm/m]	68,9	134

Iz zgornjih slik (Slika 91, 92 in 93) se vidi, da se notranje sile izračunane s programom Phase<sup>2</sup> kvalitativno kar ujemajo s programom Plaxis, medtem ko so absolutne vrednosti različne. To je posledica različnega modeliranja prenosa obtežbe na podporje ( $\alpha$ ,  $\beta$  metoda, delež sproščene obtežbe ali deformacije pred vgradnjo podporja slika 14).

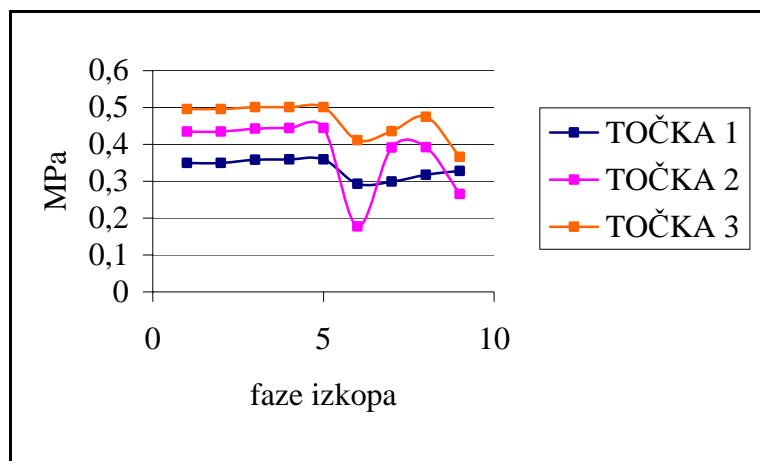
**4.7.2.5 Napetosti v levi cevi za profil 80+250**

Tu sem primerjal totalne napetosti v treh točkah okrog leve predorske cevi.

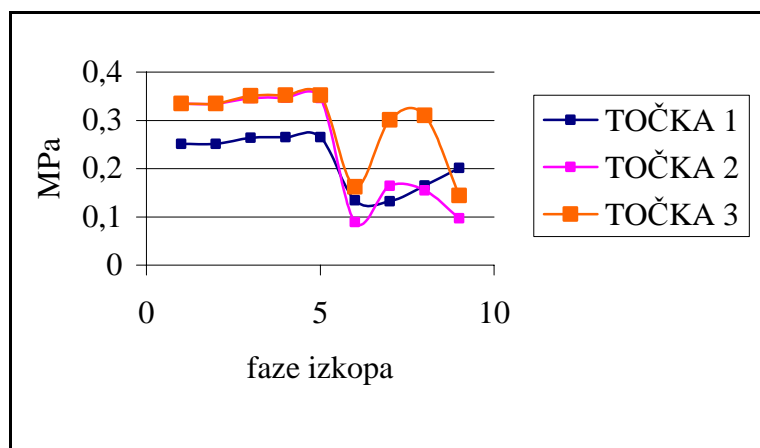


**SLIKA 94:** Točke opazovanja okrog leve predorske cevi za profil 80+250

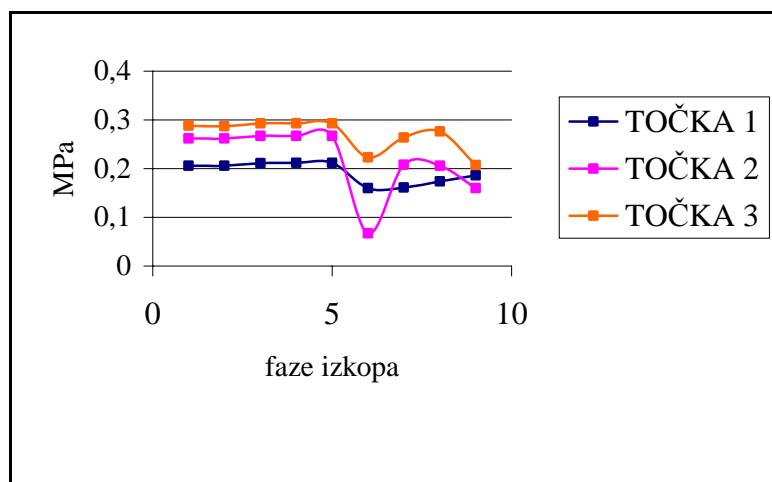
Na spodnjih slikah (Slika 95, 96 in 97) je prikazan potek napetosti po fazah.



SLIKA 95: Prikaz glavnih napetosti sigma 1



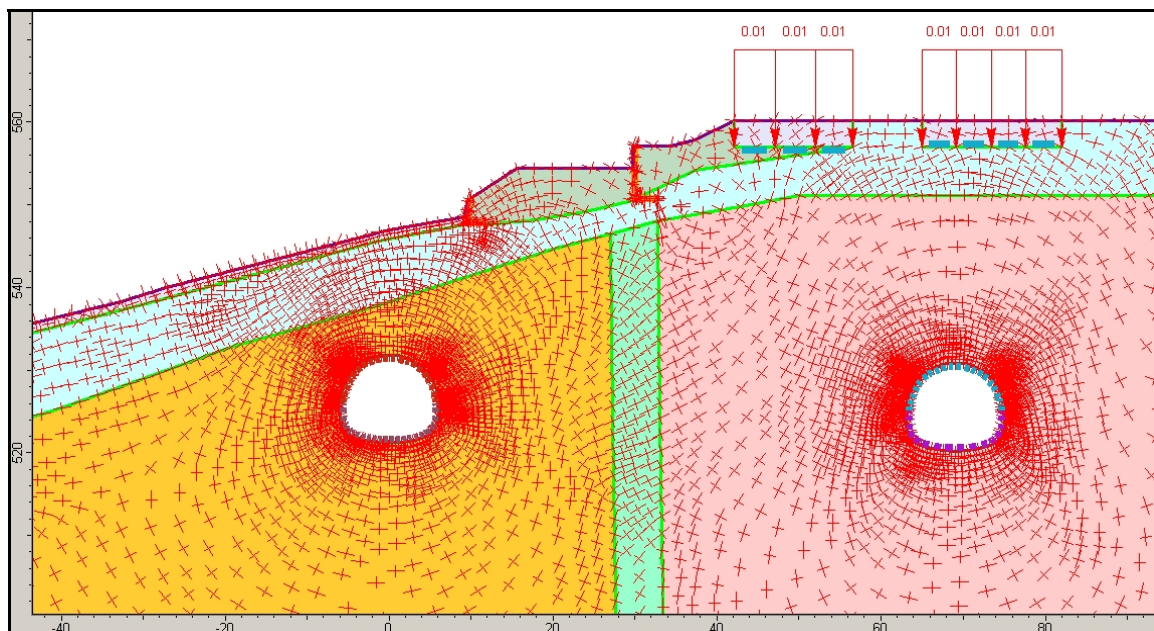
SLIKA 96: Prikaz glavnih napetosti sigma 3



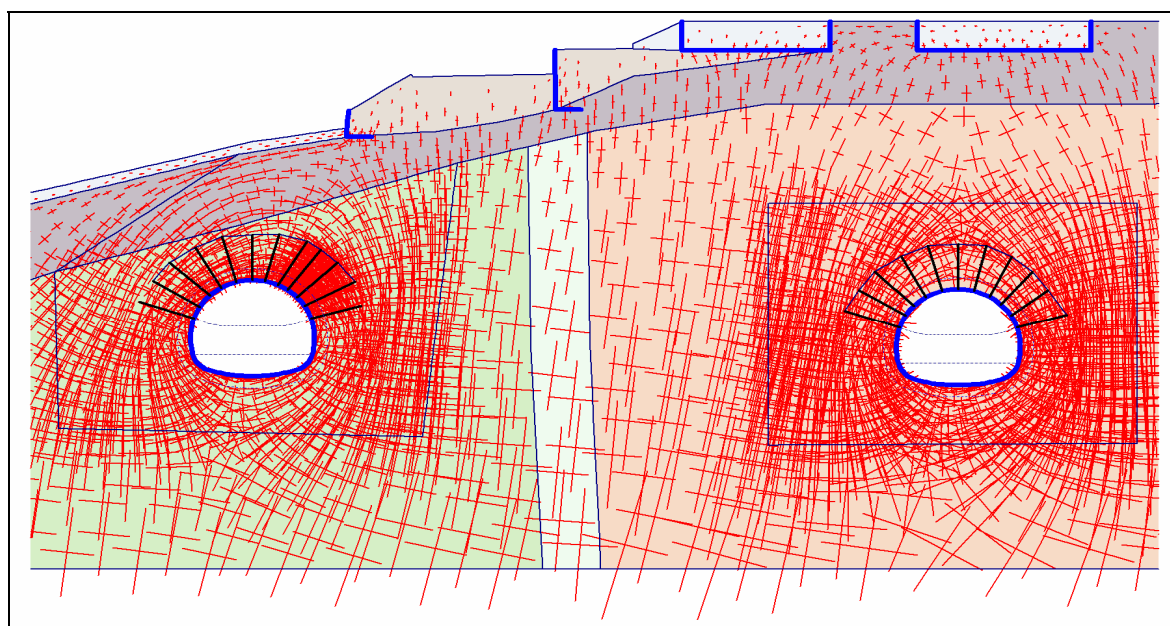
SLIKA 97: Prikaz glavnih napetosti sigma Z



#### 4.7.2.6 Totalne napetosti



SLIKA 98: Totalne napetosti dobljene s programom PHASE<sup>2</sup>



SLIKA 99: Totalne napetosti dobljene s programom PLAXIS

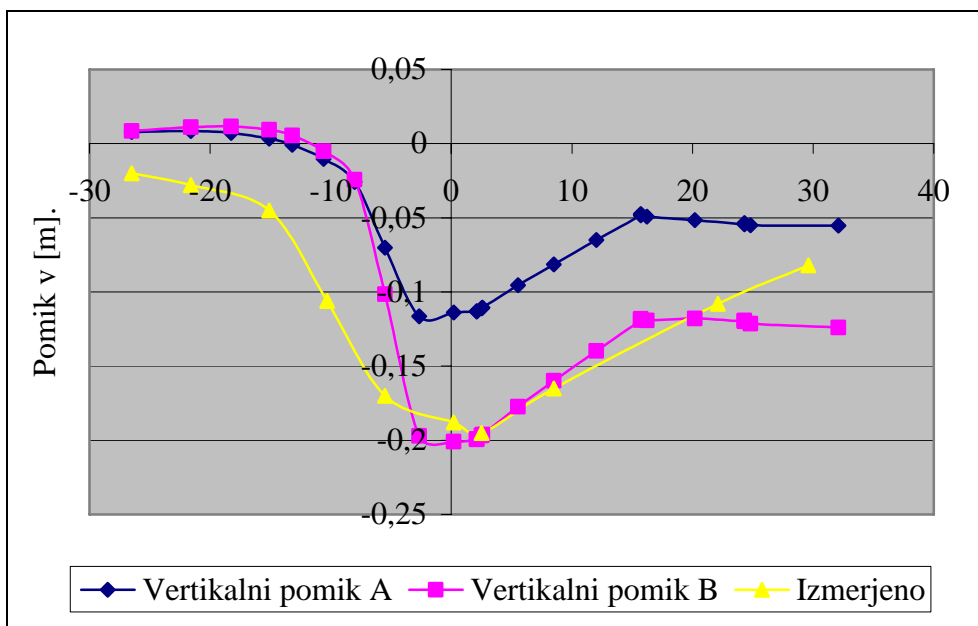
### 4.8 Vpliv mehčanja materiala

Spodnji sliki (Slika 100 in 101) prikazujeta kako vpliva mehčanje materiala na vertikalne oziroma horizontalne pomike kar prikazuje tudi preglednica (Preglednica 10). Možnost katero dopušča program Phase<sup>2</sup> v primerjavi s programom Plaxis sem omenil že v poglavju 4.6.

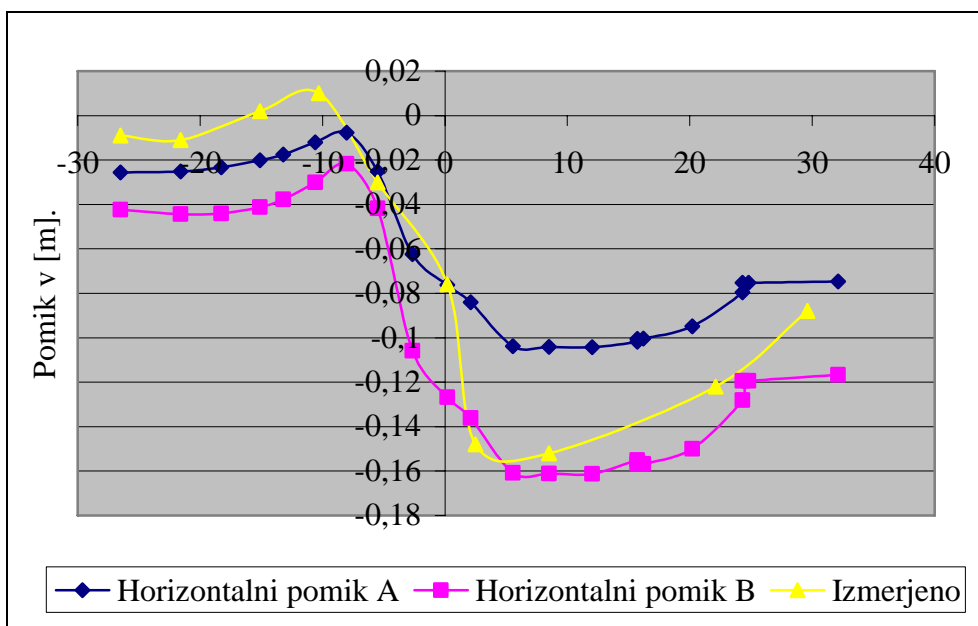


**PREGLEDNICA 10: Vhodni podatki**

	$\varphi$	$\varphi_{\text{rezid}}$	c	$c_{\text{rezid}}$
<b>A</b>	24°	24°	30 kPa	30 kPa
<b>B</b>	24°	23°	30 kPa	15 kPa



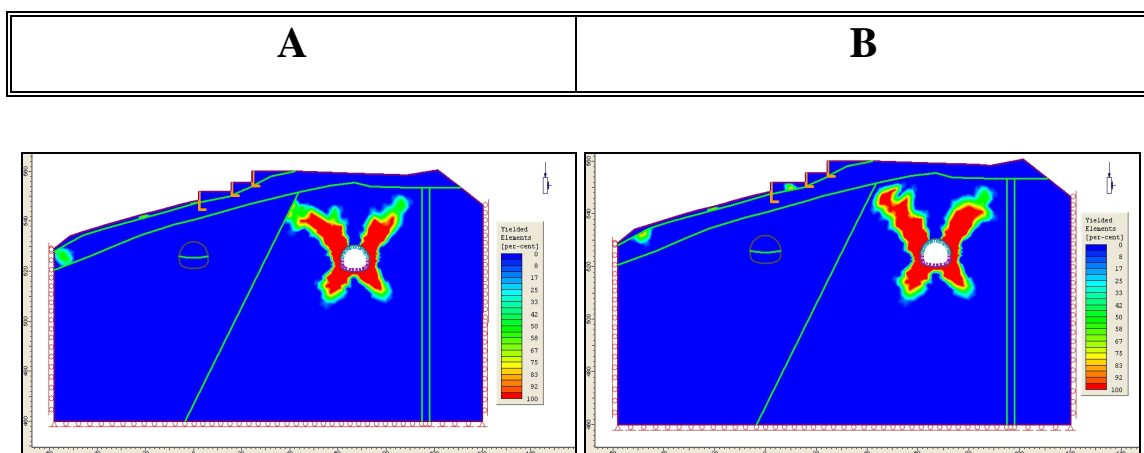
**SLIKA 100: Vertikalni pomiki na površju za profil 80+300**



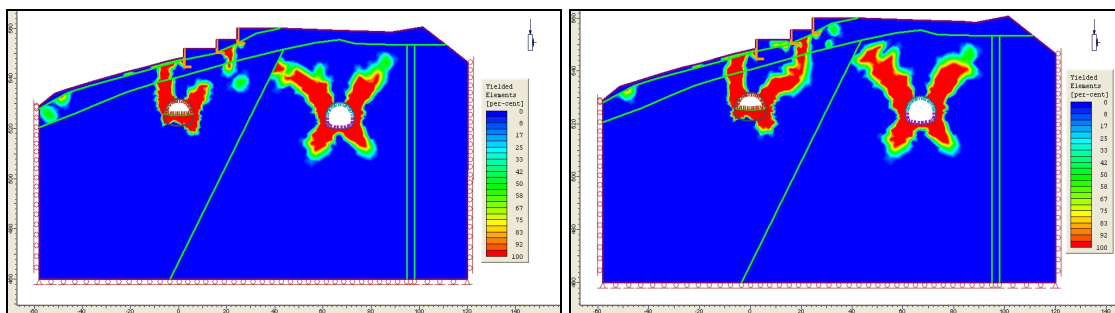
**SLIKA 101: Horizontalni pomiki na površju za profil 80+300**

### Plastično območje po fazah

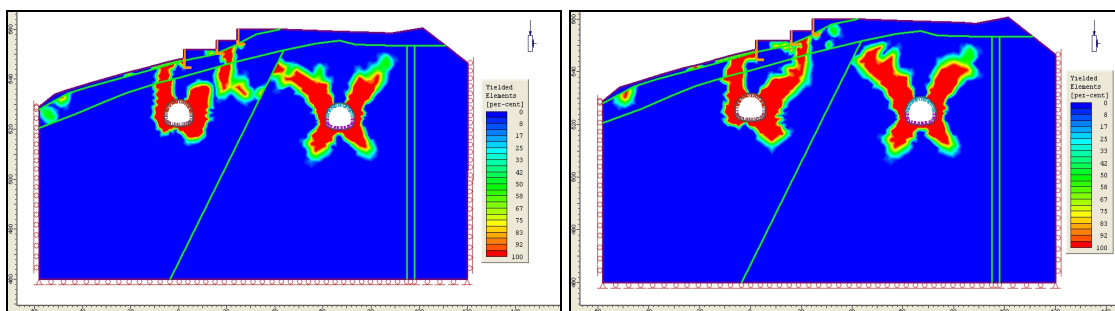
Spodnje slike (Slika 102, 103 in 104) prikazujejo kako se spreminja plastično območje glede na faze izkopa. Rdeča barva predstavlja da je material 100% izkoriščen, modra pa 0%. Tako lahko vidimo, da imajo desne slike (material z mehčanjem; Slika 102, 103 in 104) večje plastično območje v primerjavi z levimi slikami (brez mehčanja; Slika 102, 103 in 104). Le nekoliko nižje vrednosti rezidualne trdnosti od vrhunske (Preglednica 10) povzročijo na videz majhne spremembe plastičnega območja, a imajo pomemben vpliv na velikost deformacij.



**SLIKA 102:** Po izkopu desne predorske cevi



**SLIKA 103:** Po izkopu kalote v levi predorski cevi



**SLIKA 104:** Po izkopu obeh predorskih cevi

## 5 ZAKLJUČEK

Izgradnja podzemnih prostorov v različnih geotehničnih pogojih je eno najzahtevnejših inženirskih del v gradbeništvu. Vezana je predvsem na poznavanje lastnosti hribin v katerih se bodo izvajali gradbeni posegi ter drugi naravni pogoji, ki so spremenljivi glede na globino. Predvsem je pomembno poznavanje napetostno deformacijskih razmer v okolici izkopa in dimenzioniranje podpornih ukrepov. V ta namen se v zadnjem času vse več uporabljajo numerične metode s katerim lahko simuliramo stanje v hribini pred, med in po izkopu podzemnega objekta.

Tako sem v svoji diplomski nalogi za dva prečna profila predora Trojane, ki se nahajata v neposredni bližini gostišča Trojane, naredil številne analize vpliva različnih parametrov na rezultate in na podlagi geotehničnih podatkov in geodetskih meritev opravil povratne analize. Vsi izračuni so bili izvedeni s programom Phase<sup>2</sup> 2D, ki temelji na metodi končnih elementov. Po pridobitvi vseh potrebnih vhodnih podatkov, ki jih je potreboval program za sam izračun, sem najprej pripravil geometrijo matematičnega modela. Uporabil sem Mohr – Coulomb-ov materialni model.

Najprej sem analiziral profil 80+300. Glavni del naloge je bil, prikazati do kakšnih sprememb pride med programom Plaxis kjer je MC materialni model idealno elastoplastičen brez utrjevanja ter med Phase<sup>2</sup>, ki ima lastnosti mehčanja kar pomeni, da za strižne parametre podamo vrhunske in rezidualne vrednosti. Drugi pogoj pa je, da se nato čim bolj približam dejanskim pomikom na tem profilu, nato pa te karakteristike zemljin uporabiti v drugem profilu to je profil 80+250, ki je zgolj 50m oddaljen od prejšnjega obravnavanega profila.

Ko sem po številnih analizah prišel do najbolj primerne pomika v primerjavi z dejanskim pomikom na profilu 80+300, sem ugotovil, da se izračunani pomiki s programom Phase<sup>2</sup>, ne ujemajo najboljše z dejanskimi pomiki na tem profilu. Namreč na nikakršen način kljub vsem ukazom ki jih omogoča sam program, se nisem mogel znebiti, tako ozkega vpliva pomikov nad predorom v levi cevi v primerjavi z dejanskimi pomiki na površju. Naposled, ko sem se z izračunanimi pomiki končno približal dejanskimi pomikom, ampak ne v vseh merjenih točkah, sem končal z analizami.

Nato sem te materialne karakteristike za MC materialni model prenesel v profil 80+250, ter ugotovil, da se izračunani pomiki ne ujemajo z dejanskimi pomiki v profilu 80+250. Vidi pa se da se izračunani pomiki s programom Phase<sup>2</sup> v profilu 80+250, dobro ujemajo s pomiki, ki

so bili dobljeni s povratno analizo s programom Plaxis, kar nakazuje na podobnost programov. To, da pa se izračunani pomiki ne ujemajo z dejanskimi pomiki v profilu 80+250, ki je zgolj 50 metrov oddaljen in ima nekoliko drugačno geometrijo gre pripisati dejstvu, da se struktura in lastnosti tal na območju predora Trojane zelo hitro spreminjajo.

Za konec naj omenim še poglavje 4.8 kjer je prikazan vpliv mehčanja materiala. Ugotovili smo, da že majhna razlika med vrhunsko in rezidualno trdnostjo povzroči sicer na videz majhno razliko v velikosti plastičnega območja, a pomembno vpliva na premike površja.

Tako lahko na koncu povem, da čeprav so sodobne metode izračuna v veliki uporabi, še vedno ne moremo smotrno in učinkovito graditi podzemnih objektov brez kakovostne geotehnične spremljave in meritev. Možnost kombinacije opazovanj in povratnih analiz nam daje trdne argumente za pravočasno in primerno prilagajanje tehnologije gradnje danim geotehničnim pogojem.

## LITERATURA

- [1] Miklavžin, S. 2004. Numerični model predora Trojane v območju nizkega nadkritja pod poseljenim območjem. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, FGG.
- [2] Geološko geotehnično poročilo za idejni projekt predora Trojane na AC Celje – Ljubljana, odsek Vranksko – Blagovica, IGGG, 1995, Ljubljana
- [3] PZI za predor Trojane, Stabilizacija območja nad levo cevjo od stacionaže km 80.180 do km 80+330 pod objektoma C29 in C 31, IRGO, 2003, Ljubljana
- [4] Predor Trojane, Geološke preiskave leve cevi med stacionažama 80+200 in 80+400, GeoZS, 2003, Ljubljana
- [5] »Predor Trojane na AC A10« načrt gradbenih konstrukcij, izkop v hribinski kategoriji SCC II, tip 7 v levi cevi predora Trojane - vzhod, odmik št. 15,IRGO, 2003, Ljubljana
- [6] Štimulak A., Ajdič I.: Ocena ogroženosti zgradb in geološko – geotehnična spremljava izvedbe AC predora predora v območju naselja Trojane, Zbornik referatov – 6. mednarodno posvetovanje o gradnji predora in podzemnih prostorov,, 2002, 81 - 94, Ljubljana
- [7] Štimulak A., Ajdič I.: Geološka spremljava in klasificiranje hribinske mase pri gradnji predora Trojane, Zbornik referatov – Razprave četrtega posvetovanja slovenskih geotehnikov, 2004, 35 - 44, Rogaška Slatina
- [8] Podatki o geotehničnih meritvah za profila 80+250 in 80+300, DDC, 2001 – 2004, Blagovica
- [9] Ministrstvo za kmetijstvi, gozdove in prehrano, spletna stran:  
<http://rkg.gov.si/GERK/viewer.jsp>