

Univerza  
v Ljubljani

Fakulteta  
*za gradbeništvo  
in geodezijo*



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

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

To je izvirna različica zaključnega dela.

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

Starc, R., 2013. Uporaba metode globinskega mešanja v Luki Koper. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Logar, J.): 74 str.

University  
of Ljubljana

Faculty of  
*Civil and Geodetic  
Engineering*



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

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

This is original version of final thesis.

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

Starc, R., 2013. Uporaba metode globinskega mešanja v Luki Koper. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Logar, J.): 74 pp.

Univerza  
v Ljubljani

Fakulteta za  
*gradbeništvo in  
geodezijo*



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

**UNIVERZITETNI ŠTUDIJ  
GRADBENIŠTVA  
PROMETNA SMER**

Kandidat:

**ROK STARC**

**UPORABA METODE GLOBINSKEGA MEŠANJA V  
LUKI KOPER**

Diplomska naloga št.: 3329/PS

**THE USE OF DEEP SOIL MIXING METHOD IN THE  
PORT OF KOPER**

Graduation thesis No.: 3329/PS

**Mentor:**

izr. prof. dr. Janko Logar

**Predsednik komisije:**

izr. prof. dr. Janko Logar

**Član komisije:**

doc. dr. Andrej Kryžanowski

doc. dr. Matevž Dolenc

izr. prof. dr. Matjaž Dolšek

Ljubljana, 28. 10. 2013

## **POPRAVKI**

Stran z napako	Vrstica napake	Namesto	Naj bo
----------------	----------------	---------	--------

»Ta stran je namenoma prazna«

## **IZJAVE**

Podpisani Rok Starc izjavljam, da sem avtor diplomskega dela z naslovom: »Uporaba metode globinskega mešanja v Luki Koper«.

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

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

Ljubljana, 1.10.2013

Rok Starc

»Ta stran je namenoma prazna«

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

<b>UDK:</b>	<b>624.131(497.4Koper)(043.2)</b>
<b>Avtor:</b>	<b>Rok Starc</b>
<b>Mentor:</b>	<b>izr. prof. dr. Janko Logar</b>
<b>Naslov:</b>	<b>Uporaba metode globinskega mešanja v Luki Koper</b>
<b>Tip dokumenta:</b>	<b>Dipl. nal.–UNI</b>
<b>Obseg in oprema:</b>	<b>74 str., 25 pregl., 78 sl., 2 graf., 20 en.</b>
<b>Ključne besede:</b>	<b>metoda globinskega mešanja, Luka Koper, Plaxis</b>

### **Izvleček**

V diplomski nalogi je predstavljena metoda globinskega mešanja, njena uporaba, možnosti izvedbe in primernost vgradnje v mehkih tleh Luke Koper. Opisane so različne vrste uporabe metode globinskega mešanja, primerjava z drugimi metodami in celoten proces vgradnje ter spremljanja mešanja. Ker se metoda do sedaj v Sloveniji še ni uporabila, je povzetih nekaj konkretnih primerov uporabe metode v tujini. Na podlagi do sedaj izvedenih terenskih in laboratorijskih preiskav so opravljene računalniške simulacije več načinov globinskega mešanja za temeljna tla pod rezervoarjem in deponijo premoga. Pojasnjeno je tudi delovanje programa Plaxis 2D v različnih pogojih. Prikazan je vpliv stabilizacije na posedke in nosilnost temeljnih tal. Ugotovljeno je, da je metoda globinskega mešanja primerna za luška tla, še posebej pri uporabi globokega temeljenja s koli. Iz priporočil in informativnih cen tujih podjetij, je okvirno preračunana vrednost stabilizacije s koli pod rezervoarjem in nasipom v Luki Koper.

**BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT**

<b>UDK:</b>	<b>624.131(497.4Koper)(043.2)</b>
<b>Author:</b>	<b>Rok Starc</b>
<b>Supervisor:</b>	<b>Assoc. Prof. Janko Logar, Ph. D.</b>
<b>Title:</b>	<b>The Use of Deep Soil Mixing Method in the Port of Koper</b>
<b>Document type:</b>	<b>Graduation Thesis – University studies</b>
<b>Scope and tools:</b>	<b>74 p., 25 tab., 78 fig., 2 graph., 20 eq.</b>
<b>Keywords:</b>	<b>deep soil mixing, Port of Koper, Plaxis</b>

**Abstract**

This graduation thesis presents the method of deep soil mixing, its usage, execution possibilities, and its suitability for the soft soil of the Port of Koper. It further on specifies various types of this method's usage, gives the comparison to other methods, and describes the complete process of its incorporation to the soft soil of the Port of Koper. As this method has never been applied in Slovenia, the present thesis also gives some specific examples of its usage abroad. Based on previously executed field and laboratory research, we have performed computer simulations of various modes of deep soil mixing which could be applied in the foundation ground beneath the reservoir and coal depot of the Port of Koper. In addition to that, this work explains the functioning of the program Plaxis 2D under different circumstances, and shows the influence of soil treatment on deformations and on load capacity of foundation ground. The research has shown that the method of deep soil mixing is suitable for the port ground, especially if deep foundation with columns is applied. With the help of recommendations and price estimates of foreign companies, the indicative value of this specific type of stabilisation has been calculated for the ground beneath the reservoir and embankment of the Port of Koper.



## **ZAHVALA**

Zahvaljujem se svojemu mentorju izr. prof. dr. Janku Logarju, za pomoč in potrpežljivost pri nastajanju diplomske naloge.

Za podporo in spodbudo v času študija in med pisanjem diplome se zahvaljujem družini ter puncu Sandri.

»Ta stran je namenoma prazna«

## KAZALO VSEBINE

Izjave .....	III
Bibliografsko – dokumentacijska stran in izvleček.....	V
Bibliographic-documentalistic information and abstract .....	VI
Zahvala.....	VII
Kazalo vsebine.....	IX
Kazalo preglednic .....	XII
Kazalo grafikonov .....	XIV
Kazalo slik.....	XV
<b>1 UVOD.....</b>	<b>1</b>
<b>2 SPLOŠNO O METODI GLOBINSKEGA MEŠANJA .....</b>	<b>3</b>
2.1 Delitev metode .....	4
2.1.1 Metoda suhega mešanja.....	4
2.1.2 Metoda mokrega mešanja.....	4
2.1.3 Površinsko mešanje .....	5
2.2 Prednosti in slabosti metode .....	6
2.3 Dejavniki, ki vplivajo na trdnost stabiliziranih zmesi .....	8
2.4 Uporabnost metode.....	9
2.5 Razporeditev kolov pri globinski stabilizaciji .....	9
2.6 Proces stabilizacije z metodo globinskega mešanja.....	12
2.6.1 Priporočila pred pričetkom del .....	12
2.6.2 Proces mešanja zemljin – stabilizacija.....	14
2.6.2.1 Globinsko mešanje – suha metoda .....	14
2.6.2.2 Globinsko mešanje – mokra metoda.....	16
2.6.2.3 Površinsko mešanje .....	17
2.6.2.4 Proizvodnja veziva .....	18
2.6.2.5 Stabilizacija .....	18
2.6.2.6 Zaporedje mešanja.....	19
2.6.2.7 Proizvodne norme .....	20
2.6.2.8 Spremljanje procesa mešanja in instrumenti.....	20
2.6.2.9 Okoljska priporočila.....	23
2.7 Zagotavljanje in kontrola kakovosti (Quality Assurance & Quality Control, QA/QC).....	23
2.8 Ekonomski vidik .....	25
2.9 Podobni primeri uporabe metode globinskega mešanja v tujini.....	25
2.9.1 Čistilna naprava Jelutong (Jelutong Sewage Treatment Plant), Otok Penang v Maleziji.....	25

2.9.2	Naftni rezervoarji na Sand Islandu, Honolulu, Hawaii .....	27
2.9.3	Rezervoarji za gorivo v Port Everglades, Florida .....	28
2.9.4	Površine za Ham Marine, Pascagoula, Misisipi .....	30
<b>3</b>	<b>OPIS POTEKA RAZISKOVANJA .....</b>	<b>32</b>
3.1	Luka Koper in sestava tal .....	32
3.2	Lastnosti stabilizirane zmesi .....	34
3.3	Opis dela v programu Plaxis 2D.....	35
3.3.1	Nedrenirani pogoji .....	36
3.3.2	Karakteristike zemljin v obravnavanem modelu .....	39
3.3.2.1	Nasip .....	39
3.3.2.2	Melj, pesek.....	40
3.3.2.3	Morska glina .....	40
3.3.2.4	Prod, pesek.....	41
3.3.2.5	Stabilizacija.....	41
3.3.2.6	Premog.....	42
<b>4</b>	<b>REZULTATI IN UGOTOVITVE.....</b>	<b>43</b>
4.1	Stabilizacija pod nasipom premoga.....	43
4.1.1	Simulacija modela brez stabilizacije .....	43
4.1.2	Površinska stabilizacija do globine 7 m .....	45
4.1.3	Globinsko mešanje – stabilizacija s koli.....	47
4.1.4	Stabilizacija z »dvojnimi« koli.....	50
4.1.5	Kombinirana stabilizacija s koli in blokom .....	52
4.1.6	Horizontalni pomiki pod deponijo premoga.....	54
4.2	Simulacija stabilizacije pod rezervoarjem .....	55
4.2.1	Model brez stabilizacije .....	55
4.2.2	Površinsko stabiliziranje do globine 4 m.....	57
4.2.3	Površinska stabilizacija s poglobitvijo .....	58
4.2.4	Globinsko mešanje - vgradnja kolov .....	60
4.2.5	Kombinacija kolov in bloka stabilizirane zemljine .....	63
4.3	Ugotovitve in zaključki .....	64
4.4	Napotki tujih podjetij, ki izvajajo globinsko mešanje.....	66
4.4.1	Napotki podjetja Keller Grundläggning .....	66
4.4.2	Napotki podjetja Hayward Baker .....	67
4.5	Ekonomska primerjava globinskega mešanja in drugih metod temeljenja .....	67
4.5.1	Temeljenje pod deponijo premoga .....	67
4.5.1.1	Globinska stabilizacija z enojnimi koli premera 2000 mm (primer iz poglavja 4.1.3) .....	68

4.5.1.2	Globinska stabilizacija z dvojnimi koli premera 2000 mm (primer iz poglavja 4.1.4) .....	68
4.5.1.3	Globinska stabilizacija z enojnimi koli premera 800 mm v trikotnem rastru (Wiberg, 2013)	68
4.5.1.4	Primerjava okvirnih cen na tekoči meter vgradnje kolov pod nasipom premoga.....	69
4.5.2	Temeljenje pod rezervoarjem .....	69
4.5.2.1	Stabilizacija s koli premera 2000 mm (primer iz poglavja 4.2.4) .....	69
4.5.2.2	Globinska stabilizacija s posamičnimi koli premera 800 mm v trikotnem rastru.....	69
4.5.2.3	Globinsko temeljenje s piloti.....	70
4.5.2.4	Primerjava vrednosti različnih globinskih temeljenj pod rezervoarjem .....	70
<b>5</b>	<b>ZAKLJUČEK.....</b>	<b>71</b>
<b>VIRI.....</b>		<b>72</b>

**KAZALO PREGLEDNIC**

Preglednica 1: Pregled prednosti in pomanjkljivosti metode globinskega mešanja (Topolnicki, 2004; EuroSoilStab, 2002, cit. po Cotelj, 2011).....	6
Preglednica 2: Primerjava drugih metod za izboljšanje temeljnih tal z metodo globinskega mešanja (EuroSoilStab, 2002, cit. po Cotelj, 2011).....	7
Preglednica 3: Približne vrednosti količine stabilizirane zmesi v eni uri za različne tipe stabilizacij (EuroSoilStab, 2002: str. 70).....	20
Preglednica 4: Pričakovane vrednosti na terenu za stabilizirano zmes v Luki Koper (Cotelj, 2011).....	35
Preglednica 5: Vhodni parametri za sloj Nasip.....	39
Preglednica 6: Vhodni parametri za sloj Melj, pesek v primeru dreniranega ali nedreniranega(A) stanja ter modela Hardening soil. ....	40
Preglednica 7: Vhodni parametri za sloj Melj, pesek v primeru modela Mohr-Coulomb in nedreniranega(B) stanja. ....	40
Preglednica 8: Vhodni parametri za sloj Morska glina v primeru dreniranega ali nedreniranega(A) stanja ter modela Hardening soil. ....	40
Preglednica 9: Vhodni parametri za sloj Morska glina v primeru modela Mohr-Coulomb in nedreniranega(B) stanja. ....	41
Preglednica 10: Vhodni podatki za sloj Prod, pesek.....	41
Preglednica 11: Vhodni podatki za stabilizacijo.....	41
Preglednica 12: Vhodni podatki za nasip premoga.....	42
Preglednica 13: Posedki pri obremenitvi in razbremenitvi modela brez stabilizacije. ....	45
Preglednica 14: Primerjava posedkov na nivoju temeljnih tal med nestabiliziranim modelom in stabilizacijo z blokom zemljine.....	46
Preglednica 15: Primerjava posedkov pri stabilizaciji s koli in modelom brez stabilizacije. ....	49
Preglednica 16: Posedki na nivoju temeljnih tal v nestabiliziranih tleh in pri stabilizaciji z dvojnimi koli.....	51
Preglednica 17: Primerjava posedkov pri izboljšavi s koli in blokom zemljine ter modelu brez stabilizacije. ....	54
Preglednica 18: Največji horizontalni pomiki v temeljnih tleh, pri obremenitvi z nasipom premoga. ....	54
Preglednica 19: Posedki na nivoju temeljnih tal pri nestabiliziranem modelu po obremenitvi in razbremenitvi. ....	56
Preglednica 20: Primerjava posedkov na nivoju temeljnih tal med nestabiliziranim modelom in površinsko stabilizacijo do globine 4 m. ....	58
Preglednica 21: Posedki pri stabilizaciji s poglobitvijo in nestabiliziranim modelu.....	59

Preglednica 22: Primerjava posedkov pri modelu brez stabilizacije in posedkov pri globinski stabilizaciji s koli, na nivoju temeljnih tal. ....	61
Preglednica 23: Primerjava posedkov pri stabilizaciji s koli in blokom ter nestabiliziranim modelom. ....	63
Preglednica 24: Količina stabilizirane zmesi pri stabilizacijah pod deponijo premoga. ....	65
Preglednica 25: Količina stabilizirane zemljine pri temeljenju pod rezervoarjem. ....	65

---

**KAZALO GRAFIKONOV**

Grafikon 1: Grafični prikaz vrednosti na tekoči meter, različnih stabilizacij s koli, pod nasipom premoga. ....	69
Grafikon 2: Vrednosti temeljenja pod rezervoarjem za različne metode [€]. ....	70



## KAZALO SLIK

Slika 1: Izvedba globinskega mešanja (Schleter, 2007: str. 44).....	2
Slika 2: Stabilizacija tal z globinskim mešanjem (Keller, 2011: str 1).....	3
Slika 3: Shematski prikaz mešalke in postopka vgradnje kola pri metodi suhega mešanja (Keller, 2011: str 6). ....	4
Slika 4: Shematični prikaz mešalk in postopka vgradnje pri metodi mokrega mešanja (Keller, 2011: str 4). ....	5
Slika 5: Površinsko mešanje temeljnih tal (Keller, 2011: str 7). ....	6
Slika 6: Primeri razporeditve kolov v tlorisu: (a), (b) pravokotna in trikotna razporeditev; (c) stena dotikajočih se kolov; (d) stena prekrivajočih se kolov; (e) stene dotikajočih se kolov; (f) mreža sten dotikajočih se kolov; (g) prekrivajoči se koli v delni mreži; (h) tangentska celica; (i) krog; (j) rešetka; (k) skupine kolov; (l) skupine kolov v stiku; (m) blok (Topolnicki, 2004, str. 375). ....	10
Slika 7: Ocena deleža izboljšane površine: (a) običajna razporeditev kolov v mreži ( $A_t =$ prerez kola). (b) stabilizacija pod temeljno ploščo ( $A_t =$ vsota neto prerezov dvojnih kolov) (Topolnicki, 2004, str. 376). ....	11
Slika 8: Primeri izvedbe globinskega mešanja z različnimi dolžinami kolov: (a) kombinacija dolgih in kratkih sten; (b) prehodno območje; (c) stopničasti koli; (d) nasip; (e) kombinacija stabiliziranja bloka zemljine in globinskih kolov (Topolnicki, 2004, str. 377) .....	11
Slika 9: Organizacija gradbišča kjer potekajo dela globinskega mešanja za izboljšanje temeljnih tal v Singapurju ( <a href="http://www.keller.co.uk">http://www.keller.co.uk</a> ). ....	12
Slika 10: Mešalni obrat s silosi veziva, katerega se preko cevi dovaja do mešalne naprave ( <a href="http://wsipsunolvalley.blogspot.com/2011_12_01_archive.html">http://wsipsunolvalley.blogspot.com/2011_12_01_archive.html</a> ). ....	13
Slika 11: Silos, kompresor in sušilec na mešalnem stroju (EuroSoilStab, 2002: str. 62). ....	14
Slika 12: Ločen obrat za mešanje in črpanje veziva ( <a href="http://www.kellergrundbau.com">http://www.kellergrundbau.com</a> ). ....	15
Slika 13: Ločen mobilni obrat za mešanje veziva in dovod do mešalnega stroja ( <a href="http://www.haywardbaker.com">http://www.haywardbaker.com</a> ). ....	15
Slika 14: Mešalke za suho mešanje (EuroSoilStab, 2002: str. 65). ....	15
Slika 15: Celotna oprema za izvedbo mokrega mešanja ( <a href="http://www.groundimprovement.ch">http://www.groundimprovement.ch</a> ). ....	16
Slika 16: Mešalke za mokro mešanje ( <a href="http://texas.construction.com">http://texas.construction.com</a> in <a href="http://www.entact.com">http://www.entact.com</a> ). ....	17
Slika 17: Površinsko mešanje, stabiliziranje bloka ( <a href="http://www.haywardbaker.com">http://www.haywardbaker.com</a> ). ....	17
Slika 18: Mehanizacija za izvedbo površinskega mešanja ( <a href="http://s3.thingpic.com/images/D1/iXwa4me5LjcrkPYDaAdz.jpeg">http://s3.thingpic.com/images/D1/iXwa4me5LjcrkPYDaAdz.jpeg</a> ). ....	18
Slika 19: Primer zaporedja vgrajevanja kolov (EuroSoilStab, 2002: str. 69). ....	19

Slika 20: Kontrolna enota s prikazovalnikom in instrumenti za uravnavanje parametrov mešanja (EuroSoilStab, 2002: str. 87).....	21
Slika 21: Tipičen prikaz na zaslonu, kjer je prikazan napredek mešanja (EuroSoilStab, 2002: str. 88).....	22
Slika 22: Niz grafov, ki prikazujejo potek vgradnje enega kola (EuroSoilStab: 2002, str. 89). ....	22
Slika 23: Merilni instrumenti in prikaz na monitorju (Ryobi, 2010).....	24
Slika 24: Računalniška oprema v kabini upravljalca stroja (Makusa, 2013: str. 20).....	25
Slika 25: Pogled na zgrajeno čistilno napravo Jelutong ( <a href="http://greenerlifes.com">http://greenerlifes.com</a> ). ....	26
Slika 26: Izvajanje globinskega mešanja na področju čistilne naprave Jelutong (Raju, 2008: str. 9).....	27
Slika 27: Prečni prerez vgrajenih kolov pod naftnim rezervoarjev na Sand Islandu (Andromalos, 2002: str. 11).....	28
Slika 28: Prečni prerez rezervoarja in temeljnih tal v Port Everglades (Hayward Baker, 2009: str. 2).....	28
Slika 29: Izvedba mešanja stabiliziranega bloka zemljine pred gradnjo rezervoarjev v Port Everglades (Hayward Baker, 2009: str. 1).....	29
Slika 30: Gradnja rezervoarjev v Port Everglades na stabiliziranih tleh (Hayward Baker, 2009: str. 1).....	30
Slika 31: Izvedba globinskega mešanja (Hayward Baker, 2008: str. 1).....	30
Slika 32: Shema vgrajenih kolov in pilotne stene v tlorisu, na področju Pascagoule (Hayward Baker, 2008: str. 2).....	31
Slika 33: Prečni prerez temeljnih tal v Pascagouli (Hayward Baker, 2008: str. 2).....	31
Slika 34: Mesto in Luka Koper ( <a href="http://www.geopedia.si/">http://www.geopedia.si/</a> ) .....	32
Slika 35: Gradnja zgornjega ustroja površine za skladiščenje in pretovor premoga (Logar, 2010: str. 110).....	33
Slika 36: Temeljna plošča rezervoarja R-09 med gradnjo (Logar, 2010: str 113).....	34
Slika 37: Diagram vertikalnih pomikov na nivoju temeljnih tal, model Hardening soil; max 31 cm. ....	37
Slika 38: Diagram vertikalnih pomikov na nivoju temeljnih tal, Mohr-Coulombov model; max 41 cm. ....	37
Slika 39: Diagram vertikalnih pomikov v osi največjih deformacij, model Hardening Soil. ....	38
Slika 40: Diagram vertikalnih pomikov v osi največjih deformacij, Mohr-Coulombov model. ....	38
Slika 41: Prerez temeljnih tal na pomolu 2, model v programu Plaxis. ....	39
Slika 42: Prečni prerez modela brez stabilizacije pod nasipom premoga v programu Plaxis 2D. ....	43
Slika 43: Diagrama vertikalnih pomikov v dreniranih pogojih, pri modelu brez stabilizacije. ....	44
Slika 44: Diagram vertikalnih pomikov pri modelih nedrenirano(A) in nedrenirano(B), v primeru brez stabilizacije. ....	44

Slika 45: Kritične drsine v dreniranih in nedreniranih pogojih pri modelu brez stabilizacije.....	44
Slika 46: Model stabilizacije do globine 7 m.....	45
Slika 47: Diagrami vertikalnih pomikov pri stabilizaciji do globine 7 m.....	46
Slika 48: Kritične drsine pri računu varnosti v primeru stabilizacije do globine 7 m.....	47
Slika 49: Prečni prerez modela stabilizacije z enojnimi koli.....	47
Slika 50: Shematski prikaz dela vgrajenih enojnih sten v tlorisu.....	48
Slika 51: Diagrami vertikalnih pomikov v primeru stabilizacije z enojnimi koli.....	48
Slika 52: Kritične drsine pri računu varnosti v primeru stabilizacije s koli.....	48
Slika 53: Diagrami relativnih strižnih napetosti (delež izkoriščene strižne trdnosti) pri enojni steni iz kolov.....	49
Slika 54: Prečni prerez modela stabilizacije z dvojnimi koli.....	50
Slika 55: Shematski prikaz dela tlorisa vgrajenih dvojnih kolov.....	50
Slika 56: Diagrami vertikalnih pomikov pri dvojnih kolih.....	51
Slika 57: Kritične drsine pri računu varnosti pri stabilizaciji z dvojnimi koli.....	52
Slika 58: Diagram relativne strižne napetosti pri dvojnih kolih.....	52
Slika 59: Model prečnega prereza stabilizacije s koli in blokom.....	52
Slika 60: Diagrami vertikalnih pomikov v dreniranih in nedreniranih pogojih za primer stabilizacije s koli in blokom.....	53
Slika 61: Kritične drsine pri računu varnosti v primeru stabilizacije s koli in blokom.....	53
Slika 62: Diagram horizontalnih pomikov v primeru globinske stabilizacije s koli.....	54
Slika 63: Prečni prerez modela brez uporabe stabilizirane zmesi.....	55
Slika 64: Diagrami vertikalnih pomikov pri modelu brez stabilizacije.....	56
Slika 65: Prečni prerez modela površinske stabilizacije do globine 4 m.....	57
Slika 66: Diagrami vertikalnih pomikov za drenirano in nedrenirano stanje pri površinski stabilizaciji do globine 4 m.....	57
Slika 67: Kritične drsine pri stabilizaciji do globine 4 m.....	58
Slika 68: Prečni prerez poglobitve rezervoarja v blok stabilizirane zemljine.....	58
Slika 69: Diagrami vertikalnih pomikov v primeru poglobitve.....	59
Slika 70: Kritične drsine pri računu varnosti pri poglobitvi rezervoarja v blok stabilizirane zemljine.....	59
Slika 71: Prečni prerez modela stabilizacije s koli.....	60
Slika 72: Tloris vgradnje kolov pod rezervoarjem, na sliki je shema četrtnine kroga.....	60
Slika 73: Diagrami vertikalnih pomikov pri vgradnji kolov.....	61
Slika 74: Kritične drsine pri stabilizaciji s koli.....	62
Slika 75: Diagram relativne strižne napetosti pri stabilizaciji s koli pod rezervoarjem.....	62
Slika 76: Model prečnega prereza pri stabilizaciji s koli in blokom.....	63
Slika 77: Diagrami vertikalnih pomikov pri uporabi kolov in bloka stabilizirane zemljine.....	64

---

Slika 78: Kritične drsine pri računu varnosti v primeru vgradnje kolov in stabiliziranega bloka zemljine.....	64
--	----

## 1 UVOD

Različni dejavniki, ki sestavljajo potek dela v gradbeništvu, morajo biti še pred samo izvedbo temeljito načrtovani. Pritiski z vseh strani zahtevajo pravilno presojo že v fazi izbire elementov, načinov gradnje in metod. Poleg kakovosti so tu še pomembni faktorji ekonomičnosti gradnje, skrbi za okolje in zdravje. Z dolgoročnim načrtovanjem lahko poskrbimo za celotno življenjsko dobo objekta, gradnjo, uporabo in morebitno reciklažo ob koncu uporabe. Upoštevajoč vse faktorje in omejitve dobimo precej možnih variant, pri čemer je potrebno izbrati tisto, ki bo najbolje zadovoljila vse potrebe.

Luka Koper se nahaja na območju manj primernem za gradnjo. Poleg Škocjanskega zatoka in ob izlivu reke Rižane najdemo večinoma muljnate sloje in prodne nanose. Poleg tega je večino področja Luke zgrajenega z nasipavanjem morja in sicer z materialom, ki so ga pridobili s poglobljanjem le-tega.

Slabo nosilna tla pred uporabo zahtevajo izboljšanje, kar zahteva celovit projekt, od terenskih in laboratorijskih preiskav, do izbire in načrtovanja prave metode ter nazadnje še testiranja in kakovostne izvedbe.

Od leta 1957, ko je Luka Koper pričela z obratovanjem, se je ta nenehno širila in povečevala svoje zmogljivosti, saj so to narekemale potrebe. Včasih se potrebe po novih objektih pojavijo tik pred zdajci, zato so tudi odločitve hitre in zahtevajo učinkovite ukrepe. Pri tem pa se morda ne pretehta vseh variant, ampak izbere že tisto preizkušeno, ki pa ni morda najbolj optimalna. V Luki so se do sedaj najpogosteje poslužili globinskega temeljenja s piloti, uporabe geosintetikov ali pa predobremenilnih nasipov. Načinov izboljšanja temeljnih tal je veliko, sam pa sem se v diplomski nalogi osredotočil na metodo globinskega mešanja, ki je v svetu že dolgo poznana, pri nas pa še ni bila uporabljena.

To je bil glavni razlog s katerim me je tema pritegnila in hkrati izziv preučiti nam manj poznano metodo, predvsem v smislu uporabnosti v luških tleh. Globinsko mešanje se v osnovi izvede tako, da stroj vtiska mešalke v tla do določene globine, pri tem mešalke mešajo zemljino, hkrati se pa skozi šobe na mešalkah dodaja vezivo, ki reagira z zemljino in ustvari trden kol ali pa blok zemljine. Namen je seveda izboljšati nosilnost temeljnih tal in zmanjšati posedke.



Slika 1: Izvedba globinskega mešanja (Schleter, 2007: str. 44).

V prvem delu diplomske naloge je natančneje predstavljena metoda in njena uporaba. Naštete so njene prednosti in slabosti metode ter primerjave z ostalimi načini izboljšanja temeljnih tal. Predstavljen je celoten postopek stabilizacije, od postavitve gradbišča, do potrebne mehanizacije in postopkov mešanja veziv. V nadaljevanju je opisanih nekaj primerov iz tujine, kjer se je globinsko mešanje dobro obneslo.

Glavnina drugega dela je posvečena simulaciji metode v Luki Koper s programskim orodjem Plaxis 2D. Simuliral sem nekaj primerov uporabe globinskega mešanja za izboljšanje temeljnih tal pred deponiranjem premoga in pod rezervoarjem za tekoče tovore. Podal sem ugotovitve in nekaj nasvetov za nadaljnje raziskave. Na koncu sledi okvirno cenovno vrednotenje takega temeljenja in nekaj priporočil ter napotkov s strani Švedskega in Ameriškega podjetja, ki izvajata globinsko mešanje.

## 2 SPLOŠNO O METODI GLOBINSKEGA MEŠANJA

Metodo globinskega mešanja, kot alternativo globinskemu temeljenju, so neodvisno razvili v Skandinaviji in na Japonskem v sedemdesetih letih prejšnjega stoletja. Do danes se je metoda precej razvila in razširila po svetu, še posebej v zadnjih dvajsetih letih, ko so z razvojem tehnologije pridobili na kakovosti in ekonomičnosti. Najprej je bila razvita metoda suhega mešanja, namenjena stabilizaciji gline z apnom in cementom, od tedaj so se razvile nove tehnologije in pa možnosti široke uporabe različnih veziv in dodatkov. K širši uporabi veziv in možnosti uporabe v šotah ter drugih organskih zemljinah je največ prispeval Swedish deep stabilization research centre (SGI), ki je opravil mnogo preiskav na različnih zemljinah. V devetdesetih letih prejšnjega stoletja je bila razvita metoda mokrega mešanja, katera danes prevladuje. Z razvojem tehnologije je metoda globinskega mešanja postala uporabna tudi v peskih in gramozih, predvsem v ZDA, najbolj pogosto pa se jo uporablja v mehkih koherentnih zemljinah. Možnosti uporabe in načinov vgradnje je veliko. Pri vseh je skupno to, da se temeljna tla izboljšuje z vezivom, katerega skupaj z mešanjem mešalk dodajamo v zemljino skozi odprtine na osi mešalke (Cotelj, 2011).



Slika 2: Stabilizacija tal z globinskim mešanjem (Keller, 2011: str 1).

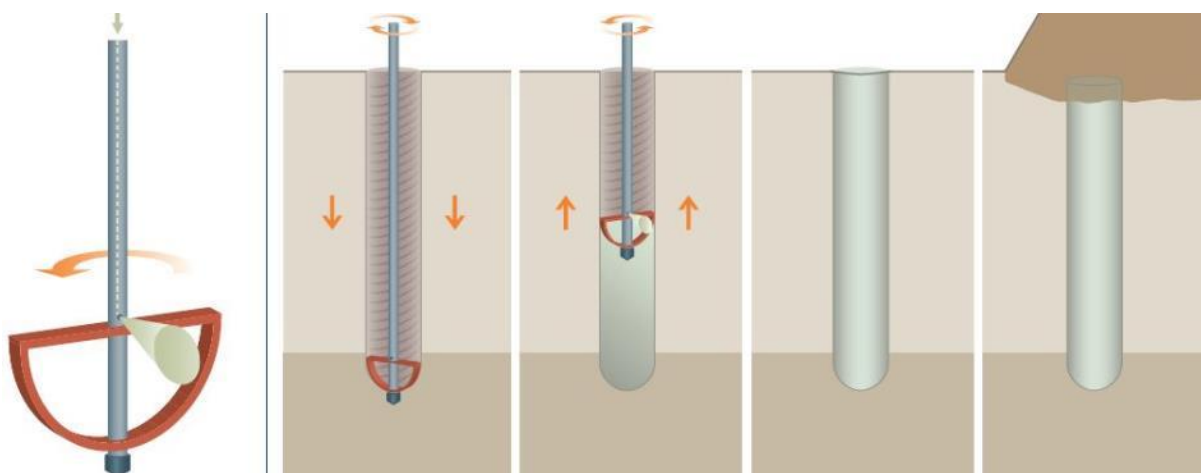
## 2.1 Delitev metode

Primarno se metoda deli glede na stanje veziva med vtiskanjem, in sicer na suho (SM) in pa metodo mokrega mešanja (MM). Uporaba je pogojena z vlažnostjo zemljine. Običajna minimalna vlažnost za izvedbo SM je med 20 in 30 %. Pri MM je običajen vodo/cementni faktor vezivne malte med 0,6 in 1,3. Z metodo SM dosegamo višje tlačne trdnosti, z MM pa boljše homogenost kolov. Samo mešanje je načeloma lažje izvedljivo z MM kot s SM, posebej pri nizki naravni vlažnosti in visoki strižni trdnosti zemljine (Broms, 2004, cit. po Cotelj, 2011).

Glede na globino delimo metodo na globinsko mešanje, kjer izdelujemo kole stabilizirane zemljine (do 30 m) in na površinsko mešanje (do 6 m globine).

### 2.1.1 Metoda suhega mešanja

Pri metodi suhega mešanja se osnovni zemljini dodaja suho vezivo, katero nato reagira v temeljnih tleh. Za vezivo so najprej uporabljali samo apno, kasneje je v uporabo prišel cement, danes pa se večinoma uporablja mešanica različnih veziv. Suho vezivo se pnevmatsko ali mehansko vtiska v zemljino s pomočjo rotacijske penetracije (Cotelj, 2011).



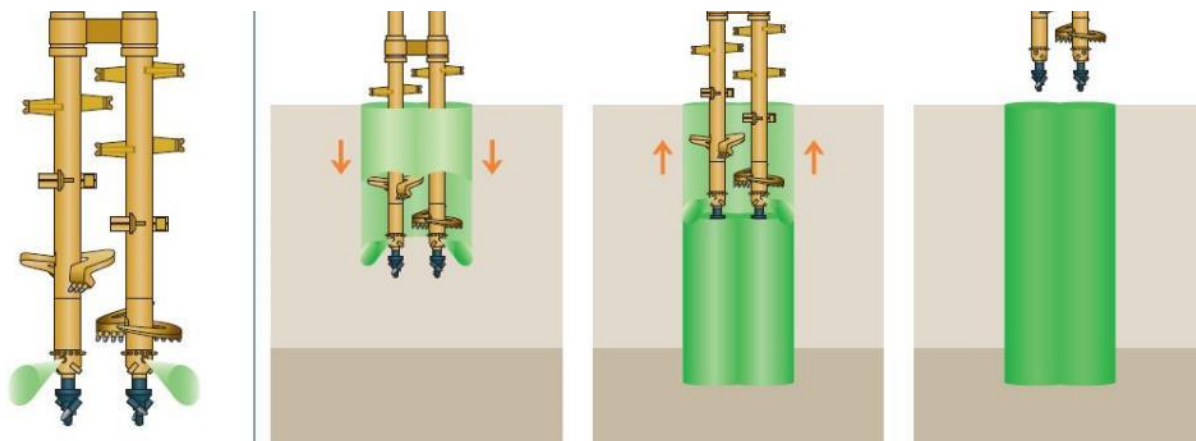
Slika 3: Shematski prikaz mešalke in postopka vgradnje kola pri metodi suhega mešanja (Keller, 2011: str 6).

### 2.1.2 Metoda mokrega mešanja

Metoda mokrega mešanja je relativno nova metoda, katere uporaba se hitro širi po svetu. V tla se vtiska vezivo v obliki paste. Je bolj prilagodljiva za različne zemljine, z njo dosegamo bolj homogeno mešanico, a manjše trdnosti v primerjavi s suho metodo. Uporaba metode izkazuje ugodne rezultate,



tehnologija je v primerjavi s suho metodo bolj raznolika in dosega večje globine. Izvajamo jo lahko na mehkih glinah, peskih, drobnozrnatih peskih in organskih zemljinah. Delimo jo na dve glavni podskupini: mehanično mešanje in kombinirano mehanično ter »jet« mešanje. Izvedba je možna na terenu in v vodi (Cotelj, 2011).



Slika 4: Shematični prikaz mešalk in postopka vgradnje pri metodi mokrega mešanja (Keller, 2011: str 4).

### 2.1.3 Površinsko mešanje

Plitvo mešanje najpogosteje uporabljamo za ustvarjanje bloka stabilizirane zemljine, predvsem takrat ko imamo opravka z velikimi količinami mehke zemljine z visoko vlažnostjo, kot so šote in mulji. Gledano z ekonomskega vidika, je metoda uporabna do globine nekaj metrov in z uporabo mešalk velikih premerov.

Površinsko mešanje se lahko izvede na dva načina (Topolnicki, 2004):

- s tvorjenjem bloka stabilizirane zemljine z instalacijo vertikalnih prekrivajočih se kolov in gibanjem mešalk gor in dol, podobno kot pri globinskem mešanju. Pri tem je ekonomično uporabljati velike premere kolov z več mešalkami.
- z različnimi nastavki mešalk. Gre za novejšo tehnologijo, pri kateri gibanje ni omejeno na vertikalno os (Slika 5). V ta namen so v Skandinaviji razvili posebne mešalne glave, ki temeljijo na vertikalnem in horizontalnem gibanju mešalke. Običajna rotacija mešalk je okrog horizontalne osi.



Slika 5: Površinsko mešanje temeljnih tal (Keller, 2011: str 7).

## 2.2 Prednosti in slabosti metode

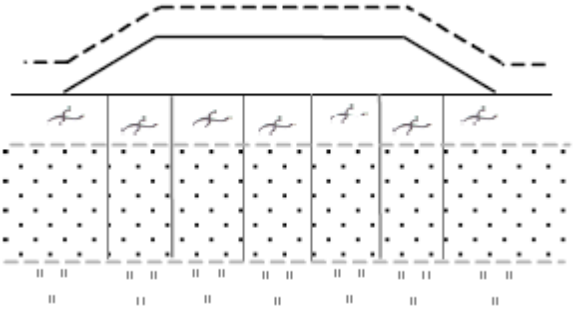
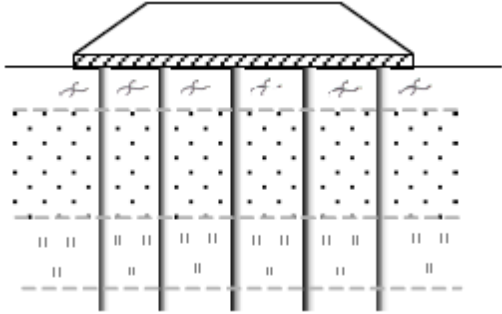
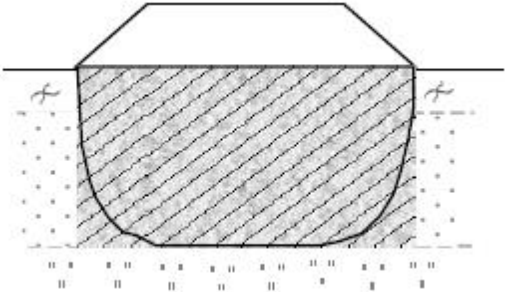
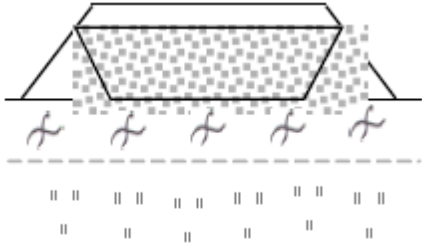
Vpliv na prednosti in slabosti metode imajo:

- Karakteristike in sestava tal
- Karakteristike veziva
- Pogoji in postopek vgradnje
- Pogoji strjevanja
- Tehnologija vgrajevanja

Preglednica 1: Pregled prednosti in pomanjkljivosti metode globinskega mešanja (Topolnicki, 2004; EuroSoilStab, 2002, cit. po Cotelj, 2011).

Prednosti	Slabosti
Visoka produktivnost, ekonomična za večje projekte.	Globina (odvisno od tehnologije).
Potencialno uporabna na vseh tipih zemljine, z omejitvami.	Apliciranje ni mogoče v zelo suhih, togih zemljinah, ki vsebujejo grušč.
Inženirske parametre je možno natančno določiti s terenskimi preiskavami.	Kakovost izboljšane zemljine ni konstantna po celotnem volumnu.
Ni vibracij.	Potrebno je preveriti zmrzlinško odpornost.
Nizka kvarljivost opreme za suho mešanje.	Večja kvarljivost opreme za mokro mešanje.
Se lahko uporabi tudi na obalnem območju in pod morskim dnom.	Težka oprema je lahko problematična za mehka tla (odvisno od metode).
Minimalni okoljski vplivi.	Omejena možnost stabiliziranja posameznega sloja v globini.
Majhna poraba energije in materiala.	Omejena možnost zvišanja stabilnosti visokih nasipov.
Možno projektiranje stopnje izboljšanja z uravnavanjem količine veziva.	Zračni pritisk in vezivo lahko povzročita dvigovanje tal med izvedbo.
Ni odvečnega materiala.	Sprememba doseženega učinkovanja stabiliziranja s časom, kar lahko tudi izkoristimo.

Preglednica 2: Primerjava drugih metod za izboljšanje temeljnih tal z metodo globinskega mešanja  
(EuroSoilStab, 2002, cit. po Cotelj, 2011).

<p><b>Vertikalne drenaže</b></p> 	<ul style="list-style-type: none"><li>• Cenejša izvedba</li><li>• Več težav z zagotavljanjem stabilnosti</li><li>• Večji posedki</li><li>• Daljša izvedba</li></ul>
<p><b>Pilotiranje</b></p> 	<ul style="list-style-type: none"><li>• Dražja izvedba</li><li>• Velika razlika posedkov v okolici in pilotov</li><li>• Hitrejša izvedba</li><li>• Doseg večjih globin</li></ul>
<p><b>Zamenjava tal</b></p> 	<ul style="list-style-type: none"><li>• Cena odvisna od posameznega primera</li><li>• Vključuje večjo količino zemljine</li><li>• Večje tveganje porušitve temeljnih tal</li><li>• Velik vpliv na okolje</li></ul>
<p><b>Zmanjšanje teže nasipa</b></p> 	<ul style="list-style-type: none"><li>• Običajno dražje</li><li>• Možnost kombinacije metod</li></ul>

Vidimo, da ima globinsko mešanje veliko pozitivnih lastnosti, zato bi ga bilo smiselno upoštevati pri postopku izbire metode za različne projekte izboljšave temeljnih tal v Sloveniji.

### 2.3 Dejavniki, ki vplivajo na trdnost stabiliziranih zmesi

Prisotnost organskih delcev, sulfatov, sulfidov in ogljikovih dioksidov lahko prispeva k zmanjšanju trdnosti stabiliziranih zemljin (Makusa, 2013).

- Organski delci: so največkrat prisotni v vrhnjih plasteh zemljin. Ti delci reagirajo z vodo, npr. v kalcijev hidroksid ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), kar se odraža pri nižani pH vrednosti. Manjša pH vrednost pa vpliva na proces hidratacije in s tem na slabšo trdnost stabiliziranih zmesi.
- Sulfati: pri rabi veziv baziranih na kalciju, v zemljinah bogatih s sulfati nastane kalcijev sulfoaluminat. To je produkt, ki povzroči večji volumen od volumna reaktantov. Težavo se lahko odpravi z dodajanjem vode med mešanjem, katera raztopi sulfat in s tem onemogoči nadaljevanje reakcije.
- Sulfidi: v mnogih odpadnih materialih in stranskih proizvodih so sulfidi lahko prisotni v obliki železovih piritov ( $\text{FeS}_2$ ). Oksidacija  $\text{FeS}_2$  povzroči žveplovo kislino, ki v prisotnosti kalcijevih karbonatov reagira v sadro. Ta pa ob prisotnosti odvečne vode ustvari povečan volumen, na podoben način kot sulfati.
- Zgoščevanje: učinek dodajanja veziva je za gostoto zemljine bistvenega pomena. Stabilizirana zmes ima nižjo maksimalno suho gostoto kot pa nestabilizirana zmes pri določeni stopnji kompaktiranja. Z večanjem količine veziva se viša tudi optimalna vlažnost. Pri cementni stabilizaciji se proces hidratacije prične takoj ob stiku cementa z vodo. Pri tem pride do strjevanja mešanice, zato je potrebno tla hitro pomešati. Vsaka zamuda privede do strjevanja stabiliziranih tal, posledica je lahko lom in s tem izguba trdnosti. Na ta pojav so še posebej občutljivi stabilizirani glineni sloji. Nasprotno imamo pri stabilizaciji z apnom več časa za delo, saj počasneje reagira.
- Vlažnost: za stabilizacijo potrebujemo zadostno količino vlage, saj se voda porabi za hidratacijo in pa za zgoščevanje. V tleh z velikim pomanjkanjem vode se hidrationski proces upočasni, kar se odraža pri končni trdnosti.
- Temperatura: pucolanska reakcija je občutljiva na temperaturo, katera se čez dan neprestano spreminja. Reakcija med vezivom in zemljino se pri nizkih temperaturah upočasni, posledica je nižja trdnost stabilizirane zmesi, zato je na hladnejših področjih priporočljivo mešanje v toplejših mesecih.
- Vpliv zmrzovanja-odtajejanja: stabilizirane zemljine ne prenesejo cikličnega zmrzovanja in odtajejanja, zato je potrebno tla zaščititi pred zmrzaljo.

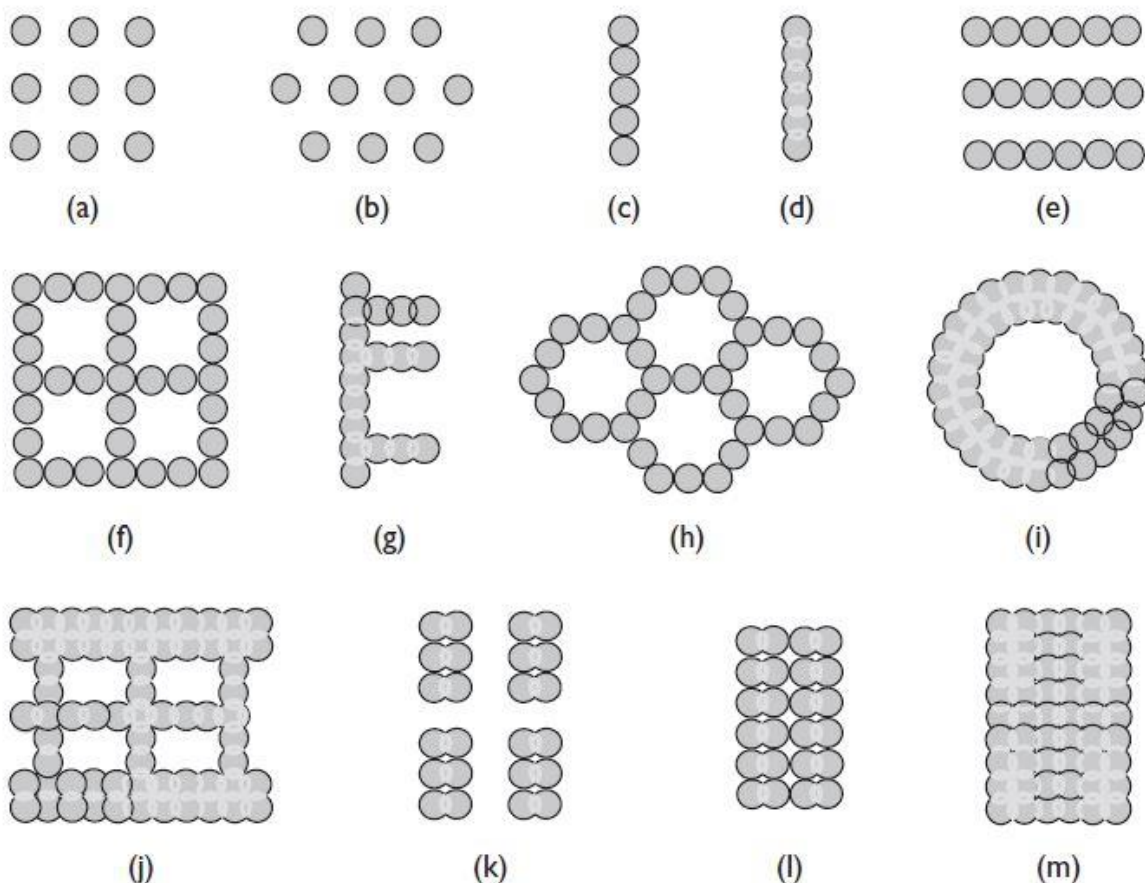
## **2.4 Uporabnost metode**

Metoda je primerna za različne namene izboljšanja temeljnih tal: od temeljenja objektov do izvedbe specialnih sider. Pri uporabi globinskega mešanja za temeljenje objektov je njen glavni namen zmanjšanje posedkov, povečanje nosilnosti temeljnih tal in preprečitev globalne porušitve tal. Tak način temeljenja se običajno uporablja pri projektih kot so (Topolnicki, 2004, cit. po Cotelj, 2011):

- Cestni in železniški nasipi
- Stavbe
- Industrijske hale
- Rezervoarji
- Oporni zidovi
- Podzemni objekti
- Varovanje gradbene jame
- Obalne in podmorske aplikacije (pomoli, valobrani, zaščita obalnih brežin)
- Preprečitve utekočinjenja tal

## **2.5 Razporeditev kolov pri globinski stabilizaciji**

Na kakšen način se bo izvedlo globinsko mešanje je odvisno od več dejavnikov: vrste objekta za katerega se izvaja temeljenje, razpoložljive mehanizacije, projektirane stabilnosti in cene. Možnosti za razporeditev kolov je veliko, lahko jih vgradimo posamično ali v skupini, s prekrivanjem ali brez (Topolnicki, 2004).

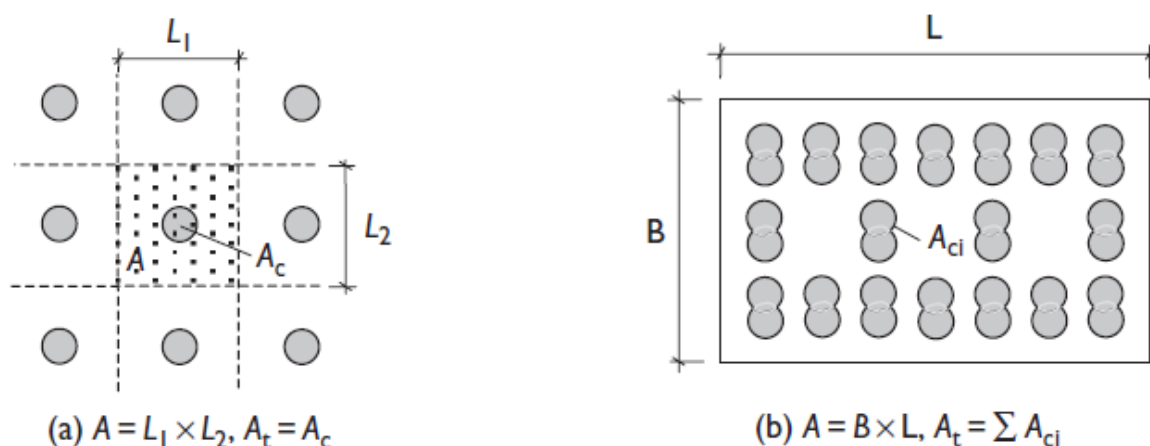


Slika 6: Primeri razporeditve kolov v florisu: (a), (b) pravokotna in trikotna razporeditev; (c) stena dotikajočih se kolov; (d) stena prekrivajočih se kolov; (e) stene dotikajočih se kolov; (f) mreža sten dotikajočih se kolov; (g) prekrivajoči se koli v delni mreži; (h) tangenta celica; (i) krog; (j) rešetka; (k) skupine kolov; (l) skupine kolov v stiku; (m) blok (Topolnicki, 2004, str. 375).

Kvadratne ali trikotne mreže z enojnimi ali skupinskimi koli so običajno uporabljene takrat, ko želimo zmanjšati posedke ter povečati stabilnost. Skupinski koli pridejo v poštev pri cestnih in železniških nasipih. Stene uporabljamo pri izkopih, za varovanje gradbenih jam ali okoliških objektov ter za izboljšanje nosilnosti zemljine proti horizontalnim silam. Prekrivanje kolov je pomembno pri izvedbi sten gradbenih jam in vodotesnih sten v okoljskih projektih.

Za primerjavo različnih vzorcev vgrajevanja in pogojev na področju stabiliziranja ter oceno lastnosti stabilizirane in okoliške nestabilizirane zemljine uporabimo enačbo, ki nam poda delež stabilizirane površine:

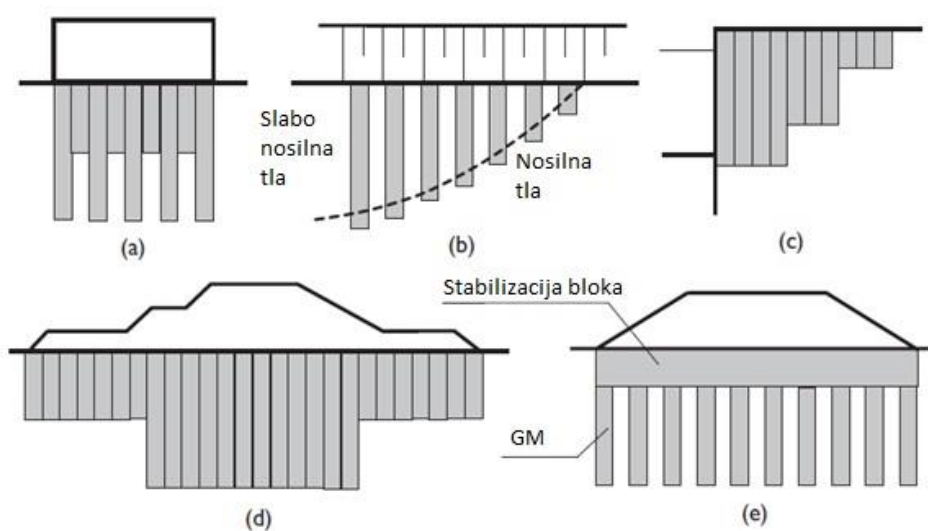
$$a_p = \frac{A_t}{A} = \frac{\text{neto površina stabilizirane zemljine}}{\text{površina vplivnega območja stabilizacije}} \quad (1)$$



Slika 7: Ocena deleža izboljšane površine: (a) običajna razporeditev kolov v mreži ( $A_t$  = prerez kola).  
(b) stabilizacija pod temeljno ploščo ( $A_t$  = vsota neto prerezov dvojnih kolov) (Topolnicki, 2004, str. 376).

Zgornja meja deleža izboljšane površine za kvadratno mrežo posameznih kolov je 78,5 %, za trikotne mreže pa 90,7 %. Za dvojne kole je zgornja meja 19,6 in 22,7 % ter za trojne 8,7 in 10,1 % (Topolnicki, 2004).

Geometrijske optimizacije kolov ne izvajamo zgolj v tlorisu, temveč tudi v vzdolžnem in prečnem prerezu. Za zmanjšanje stroškov lahko izvedemo kole različnih dolžin. Daljši koli prenašajo zunanjo obtežbo na nosilni sloj, medtem ko imajo krajši koli funkcijo povezave med dolgimi ter povečanje togosti celotne stabilizirane zmesi (Topolnicki, 2004).



Slika 8: Primeri izvedbe globinskega mešanja z različnimi dolžinami kolov: (a) kombinacija dolgih in kratkih sten; (b) prehodno območje; (c) stopničasti koli; (d) nasip; (e) kombinacija stabiliziranja bloka zemljine in globinskih kolov (Topolnicki, 2004, str. 377).

## 2.6 Proces stabilizacije z metodo globinskega mešanja

### 2.6.1 Priporočila pred pričetkom del

Kot je navedeno v EuroSoilStab (2002), je na tej točki predpostavljeno, da so bile opravljene že vse preiskave tal, laboratorijski testi in projektiranje stabilizacije. Prav tako je stranka in lokalna skupnost odobrila konstrukcijska dela. Za nemoteno opravljanje stabilizacije moramo poskrbeti za:

- Mobilizacijo opreme in materiala na gradbišče
- Skladiščenje materiala na gradbišču
- Vzpostavitev mešalne opreme
- Proces mešanja veziva na gradbišču

Preden je gradbišče pripravljeno na delo, je potrebno preveriti in načrtovati več faktorjev. Ti so:

- Dostop do območja stabilizacije
- Nosilnost temeljnih tal za delovanje mehanizacije
- Odstranitev ovir v okolici območja mešanja, nad in pod nivojem tal
- Vpliv na objekte v bližini gradbišč, za katere obstaja možnost poškodb med izvajanjem del

Potek dela mora biti planiran tako, da stabiliziranje ne posega v ostale aktivnosti na gradbišču. Včasih je to težko doseči, saj gre za težko mehanizacijo, ki za obratovanje potrebuje veliko prostora. V primeru, da stabiliziranje prihaja v konflikt z ostalimi deli na gradbišču, se delo lahko upočasni in s tem podraži. To lahko preprečimo z dobrim in skrbnim načrtovanjem poteka del (EuroSoilStab, 2002).



Slika 9: Organizacija gradbišča kjer potekajo dela globinskega mešanja za izboljšanje temeljnih tal v Singapurju (<http://www.keller.co.uk>).



Tudi skladiščenje in hranjenje veziva mora biti dobro načrtovano. Oceniti je potrebno dostopnost območja stabiliziranja za mehanizacijo in za dobavo veziva. Področje za skladiščenje in mešanje veziva mora biti optimalno oddaljeno od mešalne naprave. Če je ta preblizu, jo lahko ovira, če je predaleč pa je časovno potratno in se večajo proizvodni stroški. Največ težav nam povzročajo dolgi objekti, kot so ceste ali železnice. Silosi morajo biti lahko dostopni tako za dostavo na gradbišče kot tudi za mešalni stroj. Če ne moremo hkrati zadostiti obema zahtevama, je potrebno narediti kompromis. V tem primeru se največkrat izbere možnost črpanja veziva iz silosov do mešalne naprave preko fleksibilnega cevovoda.



Slika 10: Mešalni obrat s silosi veziva, katerega se preko cevi dovaja do mešalne naprave  
([http://wsipsunolvalley.blogspot.com/2011\\_12\\_01\\_archive.html](http://wsipsunolvalley.blogspot.com/2011_12_01_archive.html)).

Ker gre pri celotnem procesu stabilizacije za težko in visoko mehanizacijo (50 do 80 ton ter tudi do 20 m višine), morajo tla omogočati stabilno oporo. V primeru, da temeljna tla ne omogočajo potrebne nosilnosti, ustvarimo ravno delovno površino z nasutjem sloja dobro granuliranega materiala, ki ga povaljamo. Ta sloj porazdeli obtežbo mehanizacije, zmanjša pritisk v tleh in zagotavlja dobro delovno površino. Pod sloj kamenega agregata lahko položimo tudi geotekstil, ki preprečuje mešanje zrnatega materiala z zemljinjo. Pri izbiri pravega geotekstila je potrebna pozornost, saj ne sme preprečiti penetracije mešalkam v globino, smiselno pa ga je tudi uporabiti v bodoče kot del izboljšanja temeljnih tal.

Ovire, ki vplivajo na delo, so lahko električni kabli in daljnovodi, razni cevovodi, starejše podzemne konstrukcije (predori, prepusti, stari temelji). Vse ovire morajo biti jasno opredeljene že v fazi preiskav.

Potrebno pa se je posvetiti tudi okolici gradbišča. Morebitno razsuto vezivo lahko ponese veter in škoduje okoliškim poljščinam ali ljudem, sploh če gre za apno. Če se v okolici nahajajo strma pobočja, se med mešanjem lahko zmanjša stabilnost in pride do zdrsa. Do težav lahko pride tudi pri mešanicah z več kot 50 % dodatkom volumna, kar se pozna pri dvigovanju okolice. To lahko uravnavamo z izkopavanjem okrog območja stabiliziranja, z zmanjšano hitrostjo mešanja in/ali s spreminjanjem zaporedja vgradnje (EuroSoilStab, 2002).

## 2.6.2 Proces mešanja zemljin – stabilizacija

### 2.6.2.1 Globinsko mešanje – suha metoda

Na sami mešalni napravi so lahko priključeni tudi silosi, sušilec in kompresor, ki proizvaja stisnjen zrak za prenos veziva do mešalne glave. Druga možnost je, da se silos, sušilec in kompresor nahajajo na ločenem podvozju z lastnim pogonom. Ta je s kabli povezan z mešalno napravo, preko katerih prehaja vezivo pod stisnjenim zrakom in informacije glede količine mešanega veziva ter stopnje oskrbe (EuroSoilStab, 2002).



Slika 11: Silos, kompresor in sušilec na mešalnem stroju (EuroSoilStab, 2002: str. 62).



Slika 12: Ločen obrat za mešanje in črpanje veziva (<http://www.kellergrundbau.com>).



Slika 13: Ločen mobilni obrat za mešanje veziva in dovod do mešalnega stroja  
(<http://www.haywardbaker.com>).

Mešalke imajo običajno horizontalno upognjeno ali poševno rezilo in samo eno šobo za dodajanje veziva. Mešalke so različnih dimenzij, z njimi pa lahko delamo kole premera 500 do 800 mm.

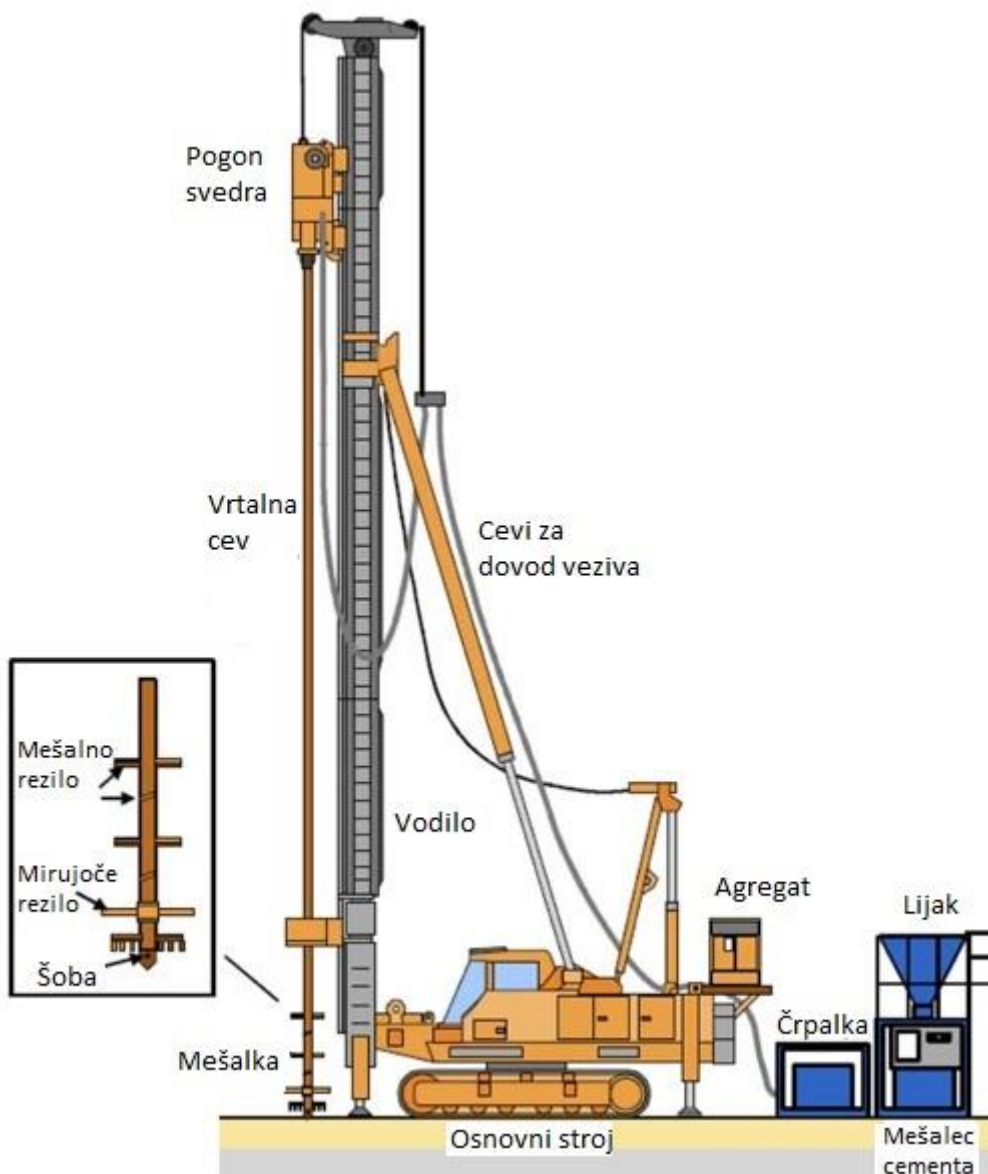


Slika 14: Mešalke za suho mešanje (EuroSoilStab, 2002: str. 65).

### 2.6.2.2 Globinsko mešanje – mokra metoda

Za mokro mešanje je običajna uporaba ločene naprave za mešanje in hranjenje veziva, katera je preko črpalke in fleksibilne cevi povezana na mešalno napravo. Mešanje veziva se izvaja s strižnimi mešalkami, katere poskrbijo, da se vsi delci veziva razpršijo v tekočo zmes. Tudi v silosih veziva najdemo mešala, ki skrbijo, da vezivo ohranja konsistenco med čakanjem na vgradnjo.

Stroji in oprema je podobnih dimenzij kot pri suhem mešanju (EuroSoilStab, 2002).



Slika 15: Celotna oprema za izvedbo mokrega mešanja (<http://www.groundimprovement.ch>).

Tipična mešalka za mokro mešanje ima eno ali več rezil s pritrjenimi zobmi in eno ali več šob za dobavo veziva. Mešalke imajo večji premer in s tem debelejša rezila s šobami vzdolž njih. Tudi tu najdemo različne dimenzije, največje merijo do 2,4 m premera.



Slika 16: Mešalke za mokro mešanje (<http://texas.construction.com> in <http://www.entact.com>).

### 2.6.2.3 Površinsko mešanje

Pri tem načinu stabilizacije je glava mešalke po navadi nameščena kar na roko bagerja. Vezivo se dobavlja iz ločene enote, na kateri je silos veziva, kompresor, sušilec in instrumenti za nadzor mešanja. Običajen stroj za mešanje ima 20 ton in v višino meri do 7 m.

Mešalke za stabiliziranje bloka so različnih oblik, približno 800 mm premera s šobo na sredini. Oblike mešalk se nenehno razvijajo in vsak izvajalec del ima obliko primerno glede na zemljinu katero se izboljšuje (EuroSoilStab, 2002).



Slika 17: Površinsko mešanje, stabiliziranje bloka (<http://www.haywardbaker.com>).



Slika 18: Mehanizacija za izvedbo površinskega mešanja  
(<http://s3.thingpic.com/images/D1/iXwa4me5LjcrkPYDaAdz.jpeg>).

#### 2.6.2.4 Proizvodnja veziva

Pri mokrem mešanju se materiali pomešajo z vodo v močnih mešalcih, pri čemer se tvori zmes v projektiranih deležih. Razmerje materialov je regulirano s količino materiala dodanega v mešalec. Mešanica je nato prenesena v silose, ki neprekinjeno tresejo in mešajo ter tako ohranjajo konsistenco mešanice. Od tu se vezivo prečrpava do stroja za stabilizacijo.

Pri suhem mešanju gre za suhe materiale, katere potiska komprimiran zrak naravnost do stabilizacijskega stroja. Vhodni materiali so shranjeni v ločenih silosih, količino dodanega veziva reguliramo z uravnavanjem pretoka stisnjenega zraka, tako da je izguba teže materiala v silosu enaka tisti projektirani (EuroSoilStab, 2002).

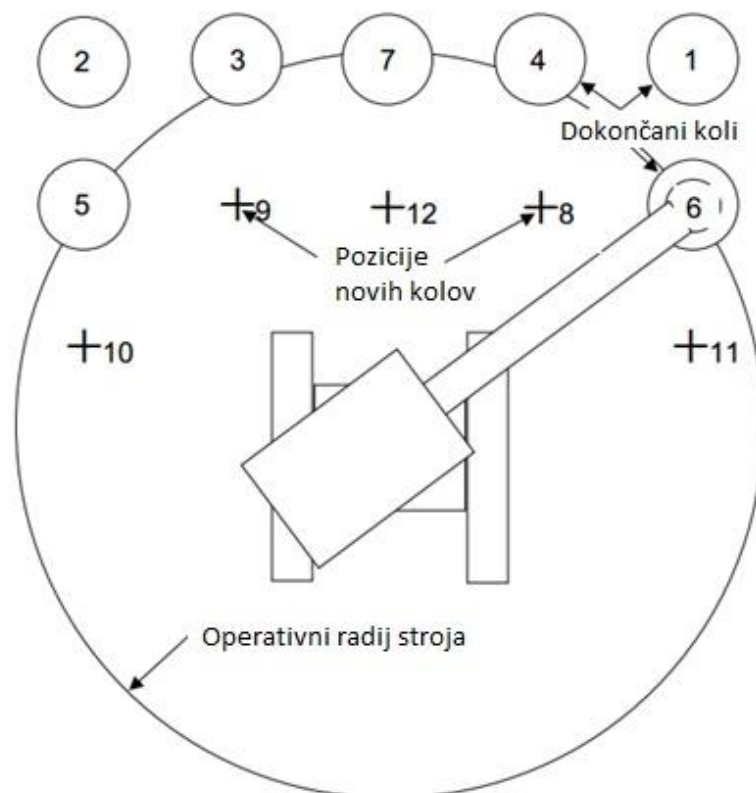
#### 2.6.2.5 Stabilizacija

Pri suhi metodi se premeri kolov gibljejo od 1 do 1,5 m pri Japonski in od 0,5 do 0,8 m pri Skandinavski metodi. Potreben navor je običajno 6 do 50 kNm pri 50 - 150 obratih na minuto. Največje naprave lahko izvedejo kole do globine 30 ali 40 m. Skandinavske naprave običajno delujejo na 120 do 200 obratov/minuto. Dvižna hitrost v morskih glinah je nekje 15 do 30 mm na obrat. Količina vgrajenega veziva je med 80 in 120 kg/m<sup>3</sup> v morskih glinah, pri nedrenirani strižni trdnosti med 40 in 60 kPa, medtem ko je za organske zemljine potrebno dodati 250 do 350 kg/m<sup>3</sup>, pri nedrenirani strižni trdnosti med 100 in 150 kPa.

Stabiliziranje bloka je relativno nova metoda, kjer se stabilizira do globine 6 m. Uporablja se suho mešanico veziv, zelo dobro se obnese v organskih zemljinah. Operater dozira mešanico v zemljinu na tak način, da je vezivo enakomerno porazdeljeno v mešani zemljini. Po navadi naenkrat meša blok dimenzij 8 do 10 kvadratnih metrov in do 6 metrov globine. Za uspešno mešanje v mehkih tleh je potrebno odstraniti plast nasutja in morebiten geotekstil, katerega ponovno vgradimo po končanem mešanju. Količina veziva je med 200 in 400 kg/m<sup>3</sup>. Za stabilizacijo 100 m<sup>3</sup> zemljine je potrebna približno ena ura. Takoj po končanem mešanju je zelo priporočljivo dodati nasutje kamene plasti v višini 0,5 do 1 m, s čimer se pretrese blok in sprostijo ujeti zrak, kar se pozna pri povečani končni nosilnosti (EuroSoilStab, 2002).

### 2.6.2.6 Zaporedje mešanja

Zaporedje vgrajevanja kolov mora biti optimizirano za vsako gradbišče posebej, v splošnem pa je najbolj učinkovito delo takrat, ko izkoristimo celoten delovni radij stroja, preden ga premaknemo (EuroSoilStab, 2002).



Slika 19: Primer zaporedja vgrajevanja kolov (EuroSoilStab, 2002: str. 69).

Pri površinski stabilizaciji zaporedno stabiliziramo bloke zemljine znotraj operativnega radija stroja. Produktivnost povečamo z zaporednim odkrivanjem plasti nasutja in takojšnjim prekritjem po končanem mešanju.

### 2.6.2.7 Proizvodne norme

Odvisne so od premera kolov, moči mehanizacije in trdnosti temeljnih tal. Približne vrednosti za različne metode so zbrane v preglednici 3:

Preglednica 3: Približne vrednosti količine stabilizirane zmesi v eni uri za različne tipe stabilizacij (EuroSoilStab, 2002: str. 70).

Proces	Tipična globina stabiliziranja (m)	Količina stabilizirane zmesi v eni uri (m/hr)
Suho mešanje s koli premera 0,6 m	20	15 do 20
Mokro mešanje s koli premera 0,8 m	20	15 do 20
Površinsko mešanje	6	100

### 2.6.2.8 Spremljanje procesa mešanja in instrumenti

Spremljanje procesa mešanja je zelo pomembno, saj se stabilizacija sama po sebi redko konča z zelenimi rezultati. S sprotnimi meritvami porabe veziva, gostote mešanice itd., lahko uravnavamo količino dodanega veziva v sloju zemljine, geometrijo in homogenost stabilizacije.

Več težav se izkaže pri suhi metodi, ker je težje kontrolirati vezivo v komprimiranem zraku kot pa tekočo mešanico veziva pri mokri metodi. Tako se pri suhi metodi meri izguba teže v silosu, pri mokri pa dejanski volumen vgrajene količine.

Sprememba teže je glavni parameter pri spremljanju procesa suhega mešanja, drugi parameter pa je globina izpušne šobe. Globina se običajno meri s pomočjo vrtečega se kolesa z oddajnikom. Vrteče kolo je povezano s kablom in pritrjeno na mešalno cev. Ko se mešalna cev spušča, kabel obrne kolo in podatek se pošlje v nadzorno enoto.

Pri mokrem mešanju se za eno šaržo izmeri količina vsakega materiala posebej, kateremu se doda potrebna količina vode v mešalcu.



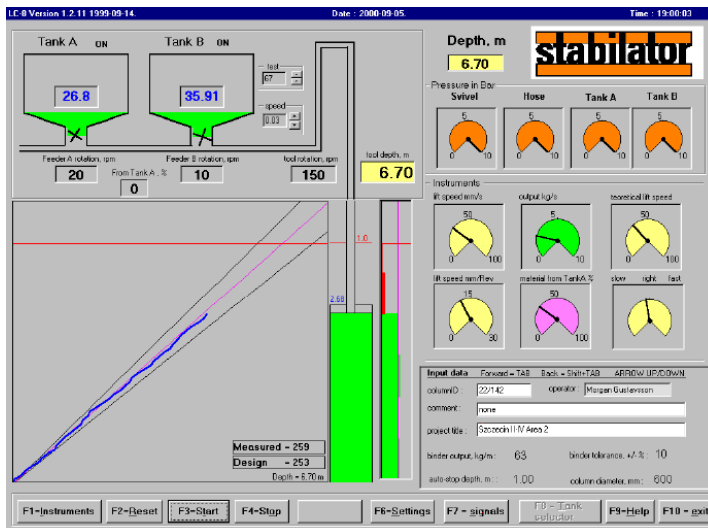
Kontrolira se še hitrost vrtenja mešalnega orodja, hitrost dviganja in navor. Vrednosti teh parametrov se procesirajo v instrumentih nadzorne enote. Vsi podatki se prikazujejo na monitorju glavnega operaterja in se shranjujejo na disku. Tako pridobljeni podatki so lahko podlaga za kontrolo kakovosti in za analizo po končanem delu.

Centralni nadzorni sistem sestavljata dva računalnika. Prvi računalnik zbira informacije iz vseh senzorjev in jih pošilja drugemu, ki prikazuje proces vgradnje v grafični in numerični obliki. Preko tega računalnika operater upravlja proces, tako da ga zažene ali prekine in po potrebi tudi popravlja parametre (EuroSoilStab, 2002).



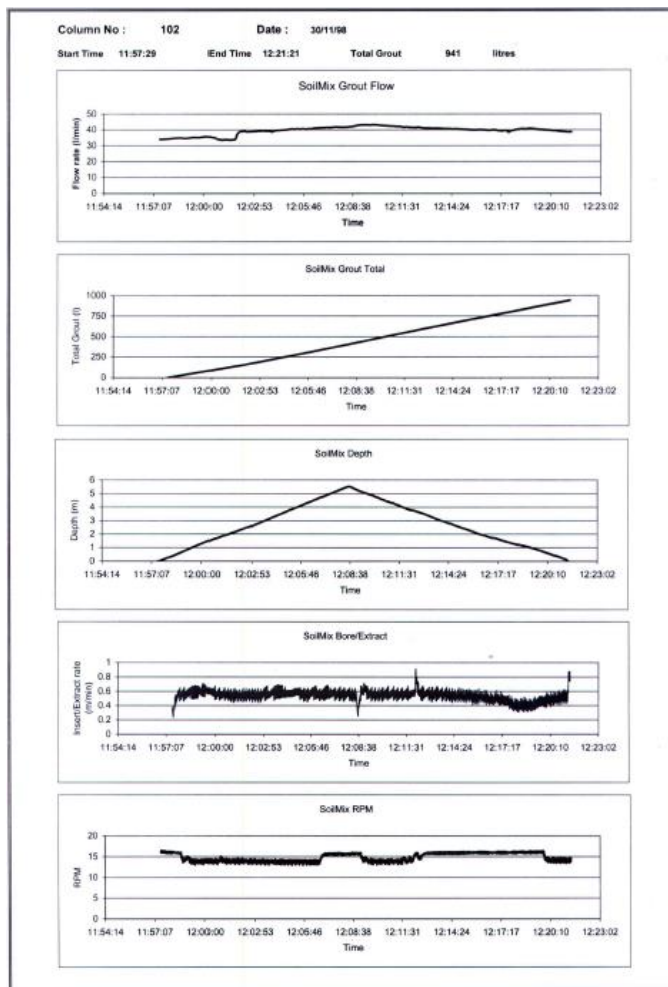
Slika 20: Kontrolna enota s prikazovalnikom in instrumenti za uravnavanje parametrov mešanja  
(EuroSoilStab, 2002: str. 87).

Prikazovalni monitor operaterju prikazuje vse podatke iz kontrolnega računalnika. Pogoje v rezervoarjih veziva, globino in vrtenje mešalnega orodja, količino vgrajenega veziva. Dobavljeno vezivo naj bi sledilo projektni liniji, ki pa ima spodnjo in zgornjo toleranco. Operater spremlja še hitrost dviganja in pritisk v cevi. Če se izmerjene vrednosti ne ujemajo s projektnimi, se števcu takoj obarvajo in s tem opozorijo operaterja. Tako lahko pravočasno urgira in pravilno nastavi parametre.



Slika 21: Tipičen prikaz na zaslonu, kjer je prikazan napredek mešanja (EuroSoilStab, 2002: str. 88).

Po končanem mešanju, računalnik shrani podatke stabiliziranja v tekstovne in grafične datoteke, kjer si lahko ogledamo parametre za vsak vgrajen kol posebej.



Slika 22: Niz grafov, ki prikazujejo potek vgradnje enega kola (EuroSoilStab: 2002, str. 89).

### **2.6.2.9 Okoljska priporočila**

- Varnost in zdravje

Nekatera veziva, kot je apno, so nevarna za zdravje, zaradi njih lahko pride do poškodb ob nezaščiti kože in oči. Pozornost je potrebno nameniti ne samo delavcem, ki so v vsakdanjem stiku z materiali, ampak tudi prebivalcem in pešcem v okolici gradbišča. Poleg tega je potrebno redno pregledovati velike tlačne posode in pravočasno odkriti nepravilnosti ali poškodbe, ki lahko vplivajo na zmanjšanje varnosti, v najslabšem primeru eksplozije.

Metoda globinskega mešanja ne povzroča hrupa in vibracij. Je pa potrebno pred vgradnjo preveriti, ali bo imelo kakršen koli vpliv na podzemno vodo.

- Vpliv na sosednje objekte in okoliška tla

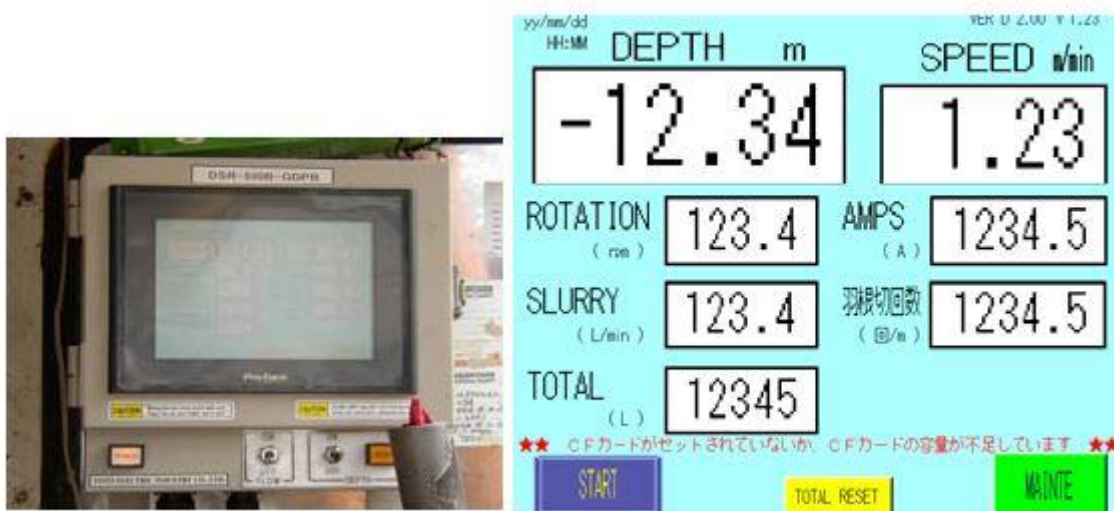
Največji vpliv ima dvig tal v okolici zaradi mešanja. Pri suhem mešanju je 5 – 10 cm dviga povsem običajno. Pri mokrem mešanju z veliko količino veziva in visokim pritiskom mešanice so bili izmerjeni dvigi tudi do 0,75 m. Ti dvigi so največji v bližini kolov in lahko predstavljajo velik problem v primeru, da je sosednji objekt oddaljen manj kot en premer od kola.

Največji vpliv ima stabiliziranje bloka zemljine. Sveža mešanica ima majhno trdnost in ne nudi opore okoliški zemljini. Pri tem lahko pride do porušitve temeljev sosednjih objektov (EuroSoilStab, 2002).

## **2.7 Zagotavljanje in kontrola kakovosti (Quality Assurance & Quality Control, QA/QC)**

V prejšnjem poglavju sem se dotaknil spremljanja procesa stabilizacije, tukaj bi pa natančneje opisal razvoj opreme in samo kontrolo.

Zaradi zagotavljanja homogenega izboljšanja tal, je tako pri suhem kot pri mokrem mešanju med samo izvedbo pomembna kontrola. Preverja se ali je potrebna količina veziva bila enakomerno pomešana po celotni globini. Mešalne enote so opremljene z avtomatsko računalniško zapisovalno napravo, ki v realnem času meri parametre, kot so globina mešalke, količina ali teža vgrajenega veziva, hitrost pretoka veziva, hitrost vrtenja mešalke, stopnjo penetracije itd. Po določenem času, ko se mešanica posuši, običajno med 3 in 4 tedni, lahko na kolih opravimo tudi teste nosilnosti, preizkus tlačne trdnosti in vizualni pregled izpostavljenih kolov (Raju, 2008).



Slika 23: Merilni instrumenti in prikaz na monitorju (Ryobi, 2010).

Kot navaja Bruce (2010) je nadzor postopka vgradnje eden ključnih elementov pri zagotavljanju kakovosti izboljšanih zemljin. Odvisno od tehnologije in prefinjenosti upravljanja mešanja, lahko nadzor postopka razdelimo na tri nivoje.

Nivo 1: parametri dodajanja veziva se merijo s preprostimi instrumenti in so prikazani v digitalni ali analogni obliki pri terenskih delavcih. Osnovni vrtni parametri so prikazani v kabini stroja in so kontrolirani s strani upravljalca stroja. Običajno je strojnik telefonsko povezan s cementno bazo ali pa so podatki iz baze elektronsko poslani v kabino. Operaterji ročno določajo spremembe na vrtnih in vezivnih parametrih glede na izmerjene podatke.

Nivo 2: parametre vtiskanja veziva meri računalnik in so prednastavljeni tako, da zagotavljajo projektno vrednost vodo-cementnega količnika, kar je povezano s stopnjo penetracije. Ti podatki so avtomatsko zapisani in prikazani pri glavnem kontrolorju. Če izmerjeni parametri odstopajo od projektiranih, jih lahko ročno regulira. Računalniški sistem omogoča pregled dela nad celotnim projektom, saj izpisuje podatke o vsakem vgrajenem kolu, dolžini in količini vgrajenega cementa.

Nivo 3: uporablja se največji nivo računalniške kontrole. Na mešalki so senzori, ki preko mikroprocesorja vsakih 6 sekund beležijo hitrost vtiskanja, stopnjo penetracije, navor, potisk in gostoto mešanice. Računalnik reagira na spremembe pogojev v temeljnih tleh in samodejno popravi parametre vtiskanja, tako da ohranja parametre mešanice na vsaki stopnji. Mešanje je avtomatsko prekinjeno, v primeru da parametri ne dosežajo tistih prednastavljenih. Prav tako se kontinuirano beležijo vsi podatki vgrajenih kolov. Centralni kontrolni sistem omogoča visoko kakovostno in enakomerno vgradnjo kolov in olajša pripravo poročil in ostalih administrativnih nalog.



Slika 24: Računalniška oprema v kabini upravljalca stroja (Makusa, 2013: str. 20).

## 2.8 Ekonomski vidik

Ekonomičnost je odvisna od vrste in količine vgrajenega veziva kot posledica načrtovanja trdnosti, izbrane tehnologije in geometrije. Pri uporabi apna in/ali cementa je metoda konkurenčna v primerjavi z drugimi stabilizacijskimi metodami, predvsem takrat, ko je uporaba omejena na izboljšanje stabilnosti in posedkov (Broms 2004, cit. po Cotelj, 2011). Ker cena na enoto pada z večanjem premerov kolov, je smotrna uporaba večjih premerov in tehnologije z večosnim mešanjem. Uporaba velikih premerov je zaradi omejenega navora mehanizacije omejena na mehke zemljine, pri suhi metodi pa je priporočena uporaba kolov s premerom manjšim od 0,8 m, zaradi boljše porazdelitve veziva.

## 2.9 Podobni primeri uporabe metode globinskega mešanja v tujini

### 2.9.1 Čistilna naprava Jelutong (Jelutong Sewage Treatment Plant), Otok Penang v Maleziji

Leta 2008 je potekala gradnja čistilne naprave Jelutong, ki lahko zadovolji potrebe 1,2 milijona prebivalcev. Deluje kot centralna čistilna naprava in premore 12 bazenov, več rezervoarjev in drugih namenskih objektov. Glavni objekt je sestavljen iz 12 sekvenčnih bioloških reaktorjev iz armiranega betona. Vsak izmed njih je velikosti 90m x 60m x 7m, zgrajeni so na izboljšanih temeljnih tleh z metodo globinskega mešanja (Raju, 2008).



Slika 25: Pogled na zgrajeno čistilno napravo Jelutong (<http://greenerlives.com>).

Področje, kjer stoji čistilna naprava, je bilo odtrgano morju. Polovica je služila kot deponija odpadkov, zato na tem delu ni bilo možno uporabiti metode globinskega mešanja. Uporabili so jo na drugi polovici, kjer so tla sestavljena iz 3 – 5 m debele plasti nasutja, sledi 5 – 7 m debela plast mehke morske gline. Pod glino se nahajajo trdni sedimenti do globine 50 m.

Najprej je bilo predvideno temeljenje s piloti do globine 40 m. Kasneje so načrt spremenili zaradi hrupa pri zabijanju pilotov, težav s transportom in skladiščenjem ter predvsem zaradi prevelikih stroškov. Kot alternativo so uporabili Vibro betonske kole in metodo globinskega mešanja. Premer kolov je bil 800 mm, dolžina pa 14 m. S tem so nosilnost temeljnih tal izboljšali za več kot 40 krat. Po testnem polnjenju bazenov so bili posedki manjši od 75 mm, kolikor je bila pričakovana vrednost (Raju, 2008).



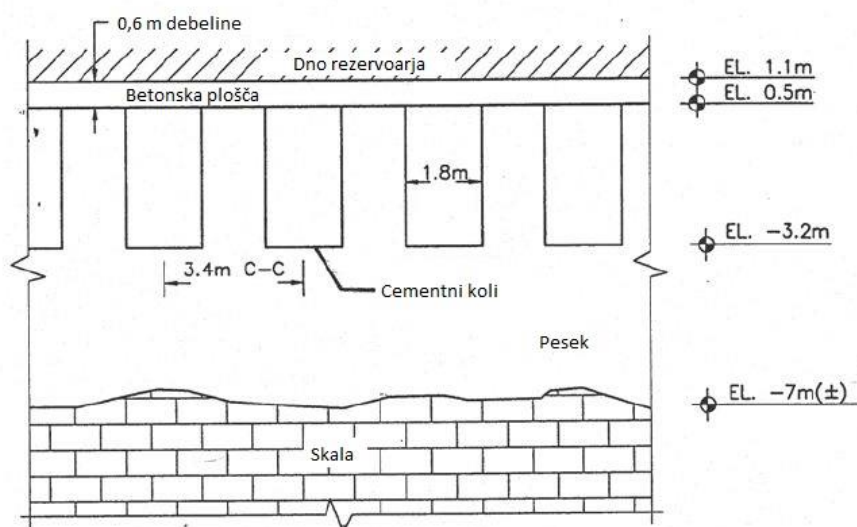
Slika 26: Izvajanje globinskega mešanja na področju čistilne naprave Jelutong (Raju, 2008: str. 9).

## 2.9.2 Naftni rezervoarji na Sand Islandu, Honolulu, Hawaii

Pri tem projektu so globinsko mešanje uporabili za izboljšanje nosilnosti in nadzor posedkov v temeljnih tleh za tri večje naftne rezervoarje. Zgrajeni so bili na peščenih sedimentih poleg že obstoječih rezervoarjev. Primarno so bili planirani gruščnati koli premera 0,9 m in medsebojnega razmika 2,75 m. Nato so sprojektirali kole z metodo globinskega mešanja, 1,8 m premera v trikotnem rastru, razmik med koli je 3,4 m. Razlogi, zaradi katerih so se odločili za globinsko mešanje:

- Nižji stroški
- Pri vgradnji ne prihaja do vibracij, ki bi lahko poškodovale obstoječe rezervoarje v bližini.
- Tako stabilizirana tla omogočajo boljši stik med zemljino in betonsko ploščo, kar odpravlja potrebo po vgradnji dodatne plasti kamenega agregata pod ploščo.
- Za razliko od gruščnatih kolov, metoda globinskega mešanja zahteva manjše področje izboljšanja, mešanje izven oboda rezervoarja ni bilo potrebno.

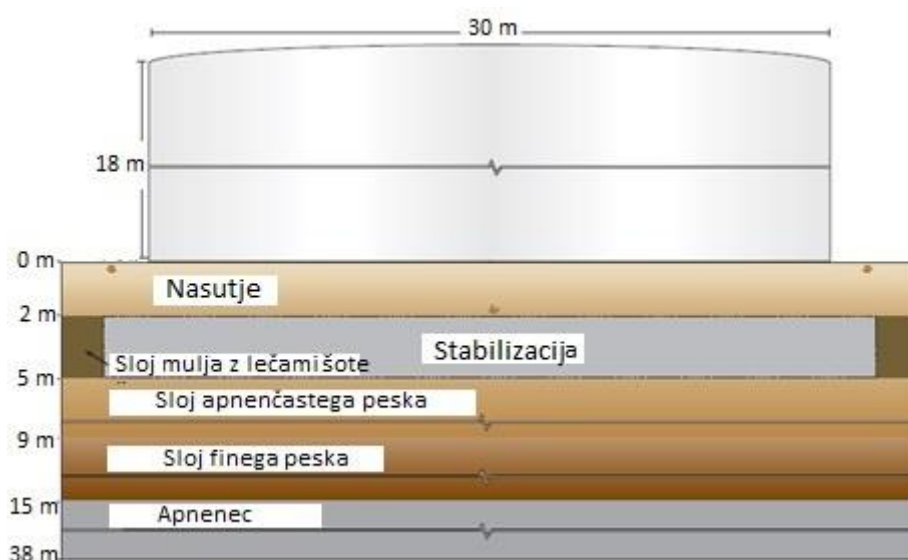
Po končani gradnji so bili opravljeni obremenilni testi. Posedki so bili znotraj dovoljenih glede na ameriške direktive ter od 50 do 70% manjši kot pri podobnih rezervoarjih na nestabiliziranih tleh (Andromalos, 2002).



Slika 27: Prečni prerez vgrajenih kolov pod naftnim rezervoarjev na Sand Islandu (Andromalos, 2002: str. 11).

### 2.9.3 Rezervoarji za gorivo v Port Everglades, Florida

Zgrajenih je bilo 11 rezervoarjev višine 18 m in premera od 30 do 38 m. Sestava tal je večinoma muljnata, z lečami šote na globinah od 2 do 5 m. Rešitev za stabilizacijo temeljnih tal je bil trden blok mešane zemljine pod vsakim rezervoarjem. Preko stabiliziranega bloka se prenašajo obremenitve rezervoarjev na zgornje sloje apnenca, to je na globini 4,5 m. Metoda globinskega mešanja je bila cenejša v primerjavi z izkopom in zamenjavo temeljnih tal, ali pa z globinskim temeljenjem s piloti (Hayward Baker, 2009).



Slika 28: Prečni prerez rezervoarja in temeljnih tal v Port Everglades (Hayward Baker, 2009: str. 2).



Najprej so odstranili vrhno plast nasutja, katera ni potrebovala stabilizacije. Potem so plast mulja izboljšali s suhim mešanjem, uporabili so mešalno orodje montirano na bager, pri tem se je vezivo preko pnevmatske dozirne postaje dovajalo na glavo mešalke. Po končanem mešanju so na svežo mešanico položili geotekstil in ponovno zasuli z nasutjem. S tem so stabilizirano zmes tudi kompaktirali, da so se znebili zračnih žepkov, ki so nastali med mešanjem.

Med mešanjem je bilo računalniško kontrolirano doziranje veziva in energija mešanja, kar se odraža pri konsistentni, enakomerni mešanici.

Po končani gradnji so opravili obremenilni test, ki je pokazal posedek rezervoarjev manj kot 3 cm, kar je precej manj od dovoljenih 25 cm.



Slika 29: Izvedba mešanja stabiliziranega bloka zemljine pred gradnjo rezervoarjev v Port Everglades  
(Hayward Baker, 2009: str. 1).



Slika 30: Gradnja rezervoarjev v Port Everglades na stabiliziranih tleh (Hayward Baker, 2009: str. 1).

#### 2.9.4 Površine za Ham Marine, Pascagoula, Misisipi

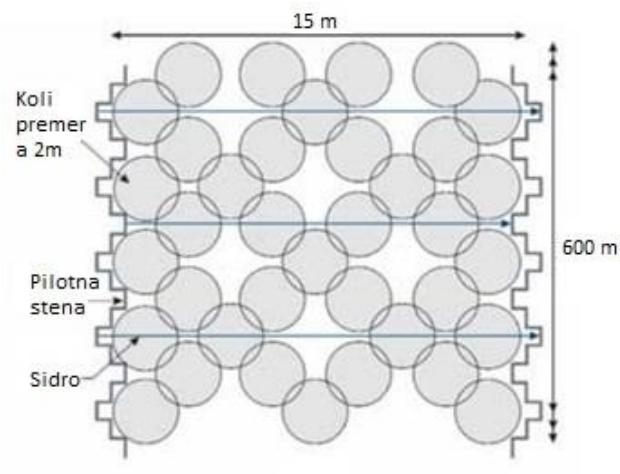
Za potrebe podjetja Ham Marine so z nasipavanjem morja širili površine, ki pa jih je bilo pred uporabo potrebno izboljšati. Ker gre za gradnjo pri ustju reke in močvirju, je sestava temeljnih tal temu primerna. Prisotni so nehomogeni nanosi organskih zemljin, mulja, glin in peska (Hayward Baker, 2008).



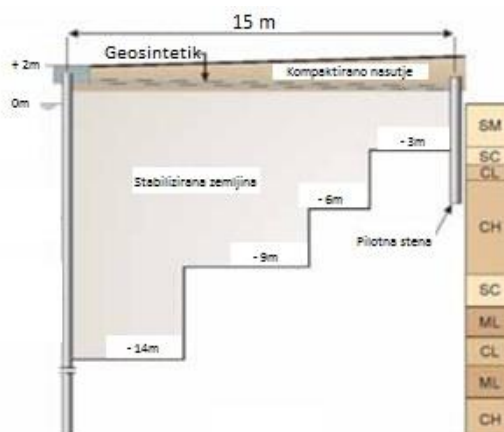
Slika 31: Izvedba globinskega mešanja (Hayward Baker, 2008: str. 1).

Med vsemi možnostmi za izboljšavo tal so se odločili za stabilizacijo z mokrim mešanjem skupaj s sidrano pilotno steno. Stabilizirana zemljina občutno zmanjša zemeljske pritiske na steno, hkrati pa nudi čvrsto podlago za potrebe pristanišča. Novo pridobljena površina meri 15 m v širino in 600 m v dolžino, globina stabiliziranja je spremenljiva, maksimalna pa je 15 m.

Po raziskavah in testiranjih so se odločili za mešalke premera 2 m, katere najboljše zagotavljajo mešalno energijo in geometrijo za obravnavano površino. Konstrukcija stabilizacije je narejena z dvojno vrsto kolov na eni in drugi strani ter celičnim vzorcem vmes, koli se prekrivajo. Preiskave po 28 dneh so pokazale nosilnost tal  $1200 \text{ kN/m}^2$ .



Slika 32: Shema vgrajenih kolov in pilotne stene v tlorisu, na področju Pascagoule (Hayward Baker, 2008: str. 2).

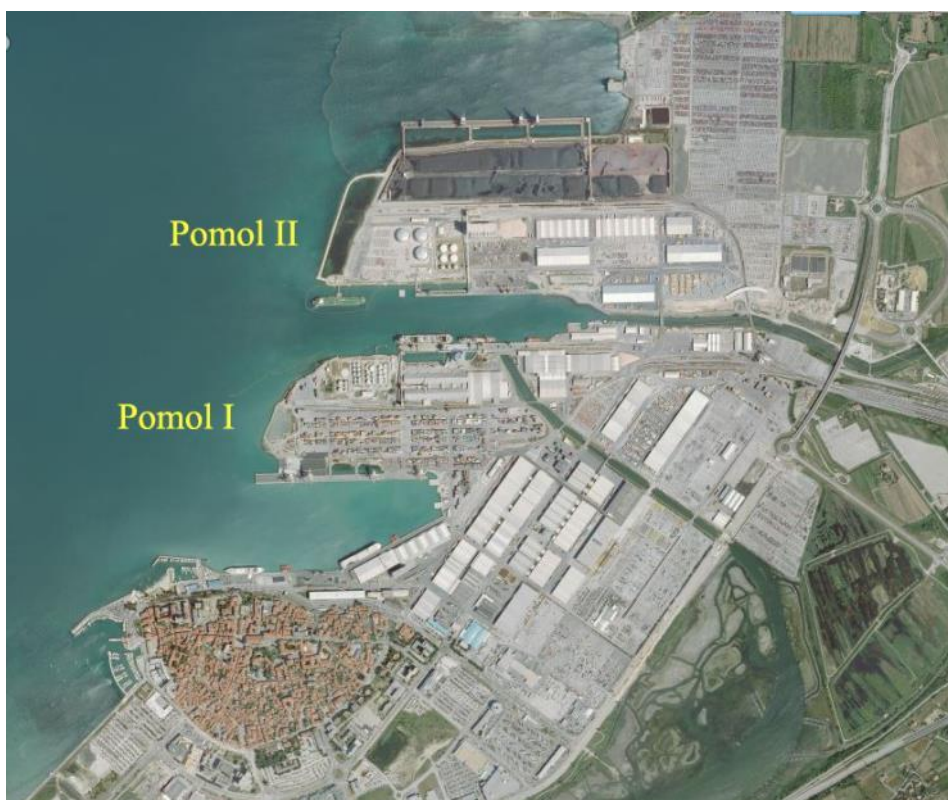


Slika 33: Prečni prerez temeljnih tal v Pascagouli (Hayward Baker, 2008: str. 2).

### 3 OPIS POTEKA RAZISKOVANJA

#### 3.1 Luka Koper in sestava tal

Nad trdno flišno podlago, ki se nahaja na koti med -30 in -60 m, je nekaj metrov debela plast flišne preperine, ki jo prekrivajo različno debeli sloji prodnih in peščenih nanosov reke Rižane, ki so ponekod na različnih globinah prekinjeni z do 5 m debelimi sloji gline. Na sloj rečnih sedimentov je odložen sloj mehkih morskih glin pretežno sive barve, ki sega do kote -26 do -30 m. Med slojem morskih sedimentov in podlago se pogosto nahaja tanjši sloj organskega melja in šote. Na južnem in severnem delu Luke je flišna podlaga plitvejša, prodnih sedimentov praviloma ni, tako da je na sloj preperelega fliša neposredno odložen sloj mehke morske gline. Na pomolih I in II, ki sta umetno zgrajena z materialom (refulom), pridobljenim s poglobljanjem plovnih poti s črpalnim bagrom, so na površini utrjena umetna nasutja iz flišnih in karbonatnih kamnin pretežno v debelini 2 do 4 m. Reful najdemo pretežno do največje kota dna sloja pri -10 m. Njegove lastnosti so podobne lastnostim morskih glin, le da je zaradi prečrpavanja nekoliko heterogen, saj se menjujejo tanjši sloji bolj glinastih in bolj meljno peščenih slojev. Morska glina ima zelo homogen profil fizikalnih in mehanskih lastnosti z globino (Logar, 2010).



Slika 34: Mesto in Luka Koper (<http://www.geopedia.si/>).

Na mehkih tleh Luke Koper je pred vsakim koriščenjem površin potrebna izboljšava temeljnih tal, ki poveča nosilnost in omeji posedke v tleh.

Do sedaj so prepotrebno nosilnost in omejitev posedkov dosegali s predobremenilnimi nasipi, ojačanjem temeljnih tal z armaturnimi geomrežami ali globinskim temeljenjem objektov. Za temeljenje se uporabljajo jekleni cevni piloti s konico ali spodaj odprti piloti z vgrajeno membrano ter piloti s konico in privarjenimi HEA profili. Redkeje pridejo v poštev AB piloti in piloti sidrani v flišno podlago (Frank, 2012).

Temeljna tla pod odlagališčem premoga so izpostavljena velikim obremenitvam, predvsem nihanjem obremenitev in delovanju težke mehanizacije. Nastale neravnine onemogočajo optimalno uporabo površine, zato so na enem delu poskusili z uporabo geosintetikov izboljšati plato. Na sloj dobro zgoščenega nasutja je bil najprej položen ločilno-filtracijski geosintetik, ki so ga prekrili s 30 cm kamnitega nasutja (0-100 mm). Sledila je močnejša armaturna geomreža, na katero so nasuli še 40 cm kamnitega materiala (0-100 mm). Tako izboljšana temeljna tla se dobro obnesejo (Logar, 2010).



Slika 35: Gradnja zgornjega ustroja površine za skladiščenje in pretovor premoga (Logar, 2010: str. 110).

S povečanim pretovorom naftnih derivatov so se izkazale potrebe po hitri izgradnji rezervoarjev večjih dimenzij in obtežb. Odločili so se za temeljenje na plošči, podprti s skupino 113 zabitih pilotov premera 813 mm in dolžine 30 do 31 m za rezervoarja R-08 in R-09 ter 36 m za rezervoar R-11. Na podlagi 3D-analize po MKE za nedreniran odziv so bili računsko napovedani posedki v velikosti 4 do 7 cm, po daljšem obdobju uporabe in več ciklih obremenitev in razbremenitev pa bodo ti še enkrat večji (Logar, 2010).



Slika 36: Temeljna plošča rezervoarja R-09 med gradnjo (Logar, 2010: str 113).

Kot alternativo dosedanjim ukrepom sem preučil varianto, ki jo v tujini že dolgo poznajo. Metoda globinskega mešanja je cenejša, manj obremenjujoča za okolje med samo gradnjo, posedki pa so enakomerni. Simuliral sem več možnosti izboljšave temeljnih tal z globinskim mešanjem ter obnašanje pod obtežbami kot sta rezervoar na terminalu tekočih tovorov in nasip premoga na Evropskem energetske terminalu.

### 3.2 Lastnosti stabilizirane zmesi

Laboratorijske preiskave izboljšanja morske gline iz Luke Koper je v svoji diplomski nalogi z naslovom »Preiskave mulja iz Luke Koper za načrtovano stabilizacijo z globinskim mešanjem« opravil Tadej Cotelj (2011). Pri tem se je zaradi laboratorijskih omejitev in zmožnosti osredotočil na metodo suhega mešanja. Preizkušal je mešanje različnih vrst cementa in apna ter njune kombinacije. Ugotovil je, da je za cementno stabilizacijo najprimernejši cement z dodatkom pepela C II/B-V 42,5, saj s tem dosežemo najboljšo tlačno trdnost in togost stabilizirane zemljine. Pri uporabi apneno-cementne stabilizacije se kot najboljše izkaže mešanica apna CL 90 Q in cementa C II/B-V 42,5 v razmerju 0,25/0,75.

Glede na doseženo trdnost in količino uporabljenega veziva pa je najbolj optimalna uporaba stabilizacije s 16 odstotki cementa C II/B-V 42,5, glede na težo suhe zemljine. Za to mešanico je ocenil tudi pričakovane lastnosti na terenu, katere sem tudi sam uporabil kot vhodne parametre v programu Plaxis 2D. Potrebno je poudariti, da je zanesljivost korelacij med laboratorijskimi in terenskimi vrednostmi nizka, zaradi možnih odstopanj laboratorijskih rezultatov in vpliva velikega števila faktorjev kot so: tehnologija mešanja, okoljske razmere, količina stabilizirane mase, itd.

Preglednica 4: Pričakovane vrednosti na terenu za stabilizirano zmes v Luki Koper (Cotelj, 2011).

Inženirski parameter	Oznaka	Pričakovana vrednost na terenu
Vrhunska tlačna trdnost	$q_u$	286 kPa
Nedrenirana strižna trdnost	$\tau_u$	$143 \text{ kPa} + \sigma_h \times \tan 30^\circ$
Nosilnost	$\sigma_{ult}$	$286 \text{ kPa} + 3 \times \sigma_h$
Trdnost kolov na meji lezenja	$q_{1,max}$	$0,65 \times a \times \sigma_{ult}$
Modul stisljivosti	$M$	21 MPa
Prekonsolidacijski pritisk	$p_c$	372 kPa
Modul elastičnosti	$E_{50}$	11 – 18 MPa
Propustnost	$K_{stab}$	Manjša od $k_{zemljine}$
Prostorninska teža	$\gamma$	$17,3 \text{ kN/m}^3$

Legenda:

- $\sigma_h$  horizontalni pritisk med zemljino in kolom  
 $a$  delež površine stabiliziranja

### 3.3 Opis dela v programu Plaxis 2D

Simulacije sem opravil z namenskim programom Plaxis 2D, ki je bil razvit za analize stabilnosti in deformacij na področju geotehnike. Temelji na numeričnem računu po metodi končnih elementov. Modeliranje pričnemo z izrisom geometrije obravnavanega problema, kateremu sledi definiranje lastnosti zemljin in drugih konstrukcij z vnosom karakteristik (Plaxis 2D Input). Določiti je potrebno še robne pogoje in pa mrežo končnih elementov, katero lahko poljubno gostimo. V drugem delu (Plaxis 2D Calculations) podamo faze računa, aktiviramo posamezne elemente po fazah in izberemo vrsto analize (stabilnostna, plastična, dinamična, konsolidacija, varnost). Ko program izvrši račun, si rezultate ogledamo v oknu Plaxis 2D Output.

Za materialni model zemljine sem uporabil Mohr-Coulomb in Hardening Soil. Hardening Soil je napredni nelinearni model, ki opisuje mejno stanje napetosti s parametri  $\varphi$ ,  $c$  in  $\psi$ , podobno kot Mohr-Coulomb, togost pa je definirana bistveno natančneje. Opisujejo jo trije različni moduli: triosni obremenilni elastični modul  $E_{50}$ , triosni razbremenilni elastični modul  $E_{ur}$  in edometrski obremenilni modul  $E_{oed}$ . Če nimamo točnih podatkov za vse module, si lahko pomagamo z zvezami:  $E_{ur} \approx 3 E_{50}$  in  $E_{oed} \approx E_{50}$ . Hardening soil upošteva tudi odvisnost modulov od napetostnega stanja, kar pomeni, da se ti povečujejo s pritiski. Kot razmik  $\psi$  določa delež med osno in volumensko deformacijo v območju plastičnega deformiranja in s tem definira volumske spremembe. Za peščena in prodnata tla lahko za določitev  $\psi$  uporabimo približno vrednost  $\psi \approx \varphi - 30^\circ$ . Za strižne kote manjše od  $30^\circ$  velja, da je  $\psi = 0^\circ$  (Brinkgreve, 2011, cit. po Frank, 2012).

Pri Hardening soil modelu smo se poslužili enostavne zveze med parametri Cam clay modela in med moduli stisljivosti:

$$E_{\text{oed}}^{\text{ref}} = \frac{p^{\text{ref}}}{\lambda^*} \quad \lambda^* = \frac{\lambda}{(1+e_0)} \quad \text{ali} \quad \lambda^* = \frac{C_c}{2,3(1+e_0)}, \quad (2)$$

$$E_{\text{ur}}^{\text{ref}} = \frac{2p^{\text{ref}}}{\kappa^*} \quad \kappa^* = \frac{\kappa}{(1+e_0)} \quad \text{ali} \quad \kappa^* = \frac{2C_s}{2,3(1+e_0)}, \quad (3)$$

kjer je:

$\lambda, \lambda^*, C_c$	kompresijski indeks
$\kappa, \kappa^*, C_s$	razbremenilni indeks
$p^{\text{ref}}$	referenčna sferna napetost
$e_0$	začetni količnik por

Tako smo za mehke sloje v program direktno vnesli kompresijski  $C_c$  in razbremenilni indeks  $C_s$ , na podlagi katerih je Plaxis sam izračunal module stisljivosti:

$$C_c = \lambda \times 2,3 = 0,17 \times 2,3 = 0,39 \quad (4)$$

$$C_s = \kappa \times 2,3 = 0,05 \times 2,3 = 0,11 \quad (5)$$

### 3.3.1 Nedrenirani pogoji

Plaxis nam omogoča račun nedreniranega stanja na dva načina (Brinkgreve, 2011):

**Undrained(A)** oz. **nedrenirano(A)** za modeliranje nedrenirane strižne trdnosti materiala upošteva efektivne strižne parametre  $\varphi'$  in  $c'$ . V tem primeru razvoj pornih tlakov igra ključno vlogo pri zagotavljanju pravih efektivnih napetosti, ki vodijo do takih porušitev, kot pri realnih vrednostih nedrenirane strižne trdnosti ( $c_u$  ali  $s_u$ ).

**Undrained(B)** oz. **nedrenirano(B)** uporabimo tedaj, ko poznamo nedrenirano strižno trdnost zemljin ( $c_u$ ). V tem primeru je strižni kot enak nič ( $\varphi = 0^\circ$ ), kohezija pa enaka nedrenirani strižni trdnosti ( $c = s_u$ ). Opozoriti velja na primer hkratne uporabe Hardening Soil modela in strižnega kota  $\varphi = 0^\circ$ . Moduli stisljivosti v tem primeru niso več odvisni od napetosti, zato se ti ne spreminjajo z globino.

Da model Hardening Soil ob uporabi nedrenirano(B) ne računa pravilno, sem tudi sam ugotovil iz primerjave rezultatov pri prvih simulacijah, kar mi je povzročalo nemalo težav. Delo bi sicer lahko nadaljeval samo s sočasno uporabo Hardening Soil modela ter nedrenirano(A), vendar nas je zanimal odziv programa pri vnosu podatka nedrenirane strižne trdnosti ( $c_u$ ), katerega so dobili iz



laboratorijskih preiskav za stabilizirano zemljino (Preglednica 4). Poleg tega je podatek o nedrenirani strižni trdnosti zelo dobro poznan tudi za sloj morskih glin, dobljen iz terenskih raziskav tal (krilna sonda, CPT, DMT). Odločili smo se za poskus in primerjavo rezultatov na dveh primerih:

- za najbolj stisljive sloje (Melj, pesek in Morska glina) uporabimo model Hardening Soil in nedrenirano(A), pri čemer vnesemo efektivne strižne parametre  $\varphi'$  in  $c'$ .
- za najbolj stisljive sloje uporabimo model Mohr-Coulomb in nedrenirano(B), pri čemer je glavni podatek nedrenirana strižna trdnost.

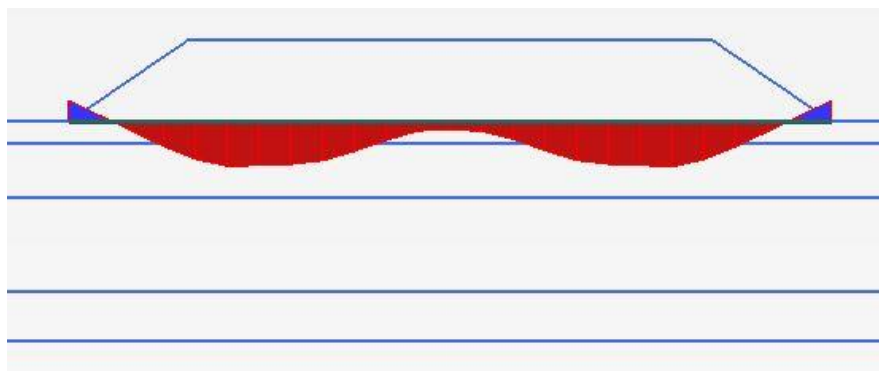
V prvem primeru izvedemo simulacijo brez težav, v drugem pa je bilo najprej potrebno preračunati vrednosti modula po globini. Mohr-Coulomb namreč ne upošteva odvisnosti med moduli in napetostmi in s tem spreminjanje modulov po globini, tako kot Hardening Soil. Uporabil sem zvezo:

$$E_{\text{oed}} = E_{\text{oed}}^{\text{ref}} \left( \frac{c \cos \varphi - \frac{\sigma_3}{K_0} \sin \varphi}{c \cos \varphi + p^{\text{ref}} \sin \varphi} \right)^m \quad (6)$$

in izračunal povprečne  $E_{\text{oed}}$  za različne globine. S tem sem dobil v primeru M-C in nedrenirano(B) podobne rezultate kot pri Hardening Soil in nedrenirano(A).



Slika 37: Diagram vertikalnih pomikov na nivoju temeljnih tal, model Hardening soil; max 31 cm.

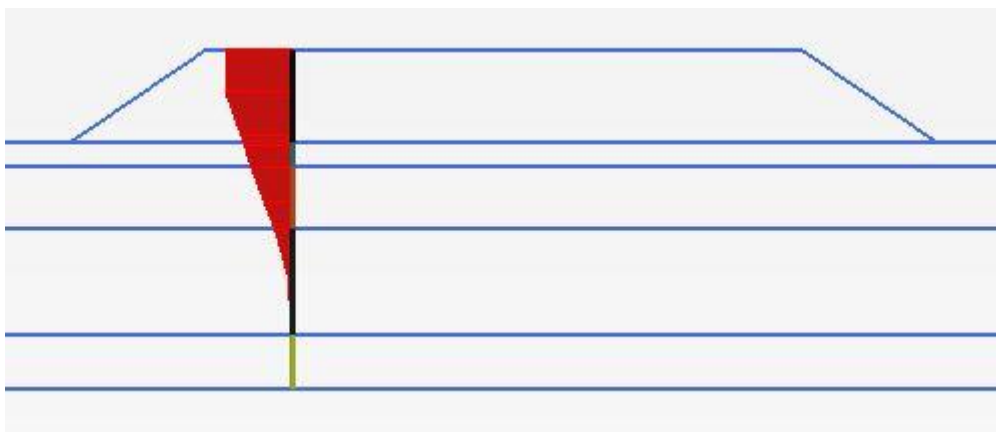


Slika 38: Diagram vertikalnih pomikov na nivoju temeljnih tal, Mohr-Coulombov model; max 41 cm.

Kljub večjemu posedku, sta rezultata dovolj blizu, da lahko uporabo Mohr-Coulombovega modela pri nedrenirano(B) potrdimo. Če preverimo še vertikalne deformacije v oseh največjih deformacij, ravno tako ugotovimo, da sta si naša modela zelo podobna (Sliki 39 in 40). Razlike, ki nastanejo, lahko pripišemo zaokroževanju pri iskanju povprečnega modula stisljivosti za mehka sloja pri Mohr-Coulombovem modelu.



Slika 39: Diagram vertikalnih pomikov v osi največjih deformacij, model Hardening Soil.



Slika 40: Diagram vertikalnih pomikov v osi največjih deformacij, Mohr-Coulomb model.

Odločil sem se, da oba primera izračuna ponovim na vseh primerih, ki sem jih simuliral. Pri večini primerov sem dobil skoraj enake rezultate za nedrenirano(A) in (B), kar še dodatno potrjuje naš poskus in s tem razumevanje delovanja programa Plaxis 2D.

### 3.3.2 Karakteristike zemljin v obravnavanem modelu

Sestava temeljnih tal na celotnem področju Luke je opisana v poglavju 3.1. Oba obravnavana primera, rezervoar in nasip premoga najdemo na pomolu 2, zato sem se z modelom čim bolj poskušal približati realnemu stanju na tistem delu. Osnovni model s sloji zemljin in globinami je prikazan na sliki 41.



Slika 41: Prerez temeljnih tal na pomolu 2, model v programu Plaxis.

#### 3.3.2.1 Nasip

Globina: 0 do -4 m

- Uporabljen materialni model: Hardening soil

Stanje: drenirano

Preglednica 5: Vhodni parametri za sloj Nasip.

$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$E_{50}^{ref}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$E_{oed}^{ref}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$E_{ur}^{ref}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$m$	$c_{ref}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\varphi$ [°]	$\psi$ [°]
22	60000	60000	150000	0,4	0,5	38	8

### 3.3.2.2 Melj, pesek

Globina: -2 do -14 m

- Uporabljen materialni model: Hardening soil

Stanje: drenirano ali nedrenirano(A)

Preglednica 6: Vhodni parametri za sloj Melj, pesek v primeru dreniranega ali nedreniranega(A) stanja ter modela Hardening soil.

$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$C_c$	$C_s$	$m$	$c_{ref}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\varphi$ [°]	$\psi$ [°]
18,5	0,39	0,11	0,9	0,5	24	0

- Uporabljen materialni model: Mohr-Coulomb

Stanje: nedrenirano(B)

Preglednica 7: Vhodni parametri za sloj Melj, pesek v primeru modela Mohr-Coulomb in nedreniranega(B) stanja.

$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\nu$	$E_{oed}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$c_{ref}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$E_{inc}$	$c_{inc}$
18,5	0,3	1732	15	133	1,25

Legenda:

$E_{inc}$  prirastek elastičnega modula na meter globine

$c_{inc}$  prirastek nedrenirane strižne trdnosti na meter globine

### 3.3.2.3 Morska glina

Globina: -14 do -31 m

- Uporabljen materialni model: Hardening soil

Stanje: drenirano ali nedrenirano(A)

Preglednica 8: Vhodni parametri za sloj Morska glina v primeru dreniranega ali nedreniranega(A) stanja ter modela Hardening soil.

$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$C_c$	$C_s$	$m$	$c_{ref}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\varphi$ [°]	$\psi$ [°]
16,9	0,39	0,11	0,9	0,5	20	0

- Uporabljen materialni model: Mohr-Coulomb

Stanje: nedrenirano(B)

Preglednica 9: Vhodni parametri za sloj Morska glina v primeru modela Mohr-Coulomb in nedreniranega(B) stanja.

$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\nu$	$E_{oed}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$c_{ref}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$E_{inc}$	$c_{inc}$
16,9	0,3	4042	25	130	1,75

### 3.3.2.4 Prod, pesek

Globina: -31 do -40 m

- Uporabljen materialni model: Hardening soil

Stanje: drenirano

Preglednica 10: Vhodni podatki za sloj Prod, pesek.

$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$E_{50}^{ref}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$E_{oed}^{ref}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$E_{ur}^{ref}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$m$	$c_{ref}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\varphi$ [°]	$\psi$ [°]
20,3	100000	100000	300000	0,5	0,5	38	8

### 3.3.2.5 Stabilizacija

- Uporabljen materialni model: Mohr-Coulomb

Stanje: nedrenirano(B)

Preglednica 11: Vhodni podatki za stabilizacijo.

$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\nu$	$E_{oed}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$c_{ref}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\varphi$ [°]	$\psi$ [°]
17,3	0,3	21000	143	0	0

### 3.3.2.6 Premog

Višina: 0 do 15 m

- Uporabljen materialni model: Mohr-Coulomb

Stanje: drenirano

Preglednica 12: Vhodni podatki za nasip premoga.

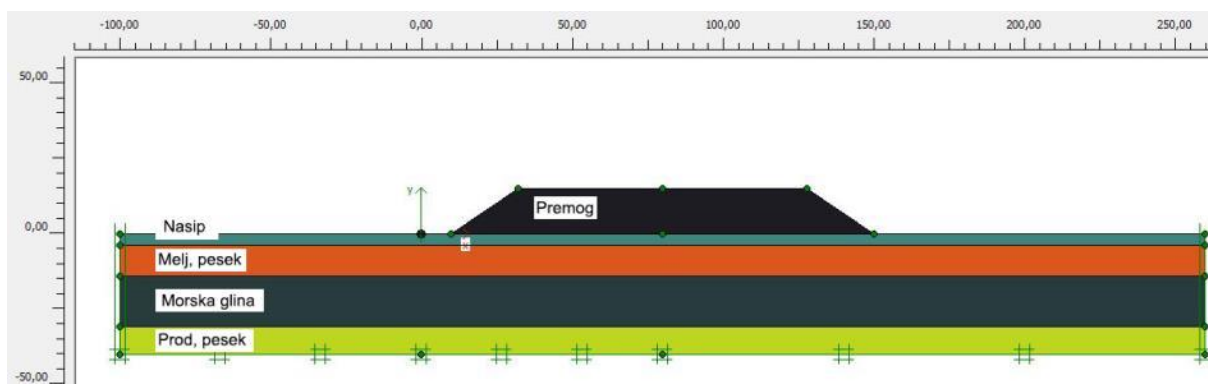
$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\nu$	$E_{oed}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$c_{ref}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\varphi$ [°]	$\psi$ [°]
9	0,3	20190	0,5	40	0

## 4 REZULTATI IN UGOTOVITVE

### 4.1 Stabilizacija pod nasipom premoga

Kot že omenjeno imajo v Luki Koper nemalo težav z zagotavljanjem nosilnosti tal ter neenakomernimi posedki na Evropskem energetske terminalu, kjer deponirajo premog. Zato nas je zanimalo kako in koliko lahko stabiliziranje z metodo globinskega mešanja pripomore k izboljšanju temeljnih tal. Večja nosilnost tal bi namreč omogočila pretovor večjih količin ali pa uporabo manjših površin za deponiranje istih količin premoga.

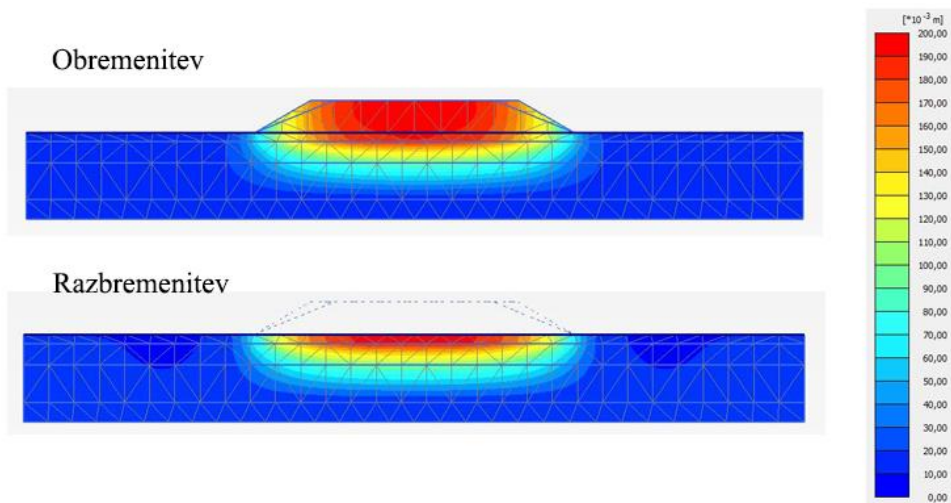
Obravnaval sem primer povprečnega nasipa premoga iz Luke Koper, to je približno 100 m širok in 15 m visok. Nagib brežin znaša 30 – 34°. Osredotočil sem se predvsem na velikost posedkov in pa samo stabilnost nasipa, oziroma varnost pred poružitvijo temeljnih tal.



Slika 42: Prečni prerez modela brez stabilizacije pod nasipom premoga v programu Plaxis 2D.

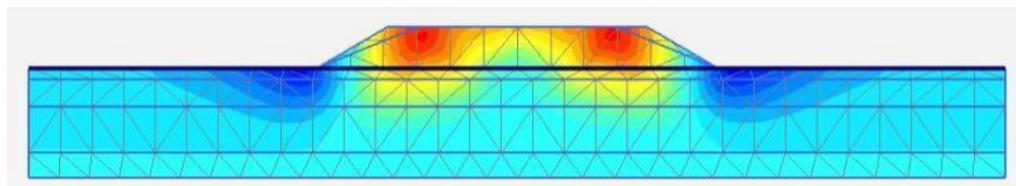
#### 4.1.1 Simulacija modela brez stabilizacije

Ker so v Luki še pred časom deponirali nasip brez dodatne izboljšave temeljnih tal, sem tudi sam začel s primerom brez stabilizacije. Da bi se čim bolj približal realnemu stanju, sem v programu Plaxis 2D izvedel obremenitev in razbremenitev temeljnih tal z nasipom. Izkaže se, da je posedek po razbremenitvi manjši in ta posedek sem nato izbral kot ciljno vrednost pri iskanju najboljše stabilizacije. Simulacije sem opravil v dreniranih in nedreniranih pogojih.

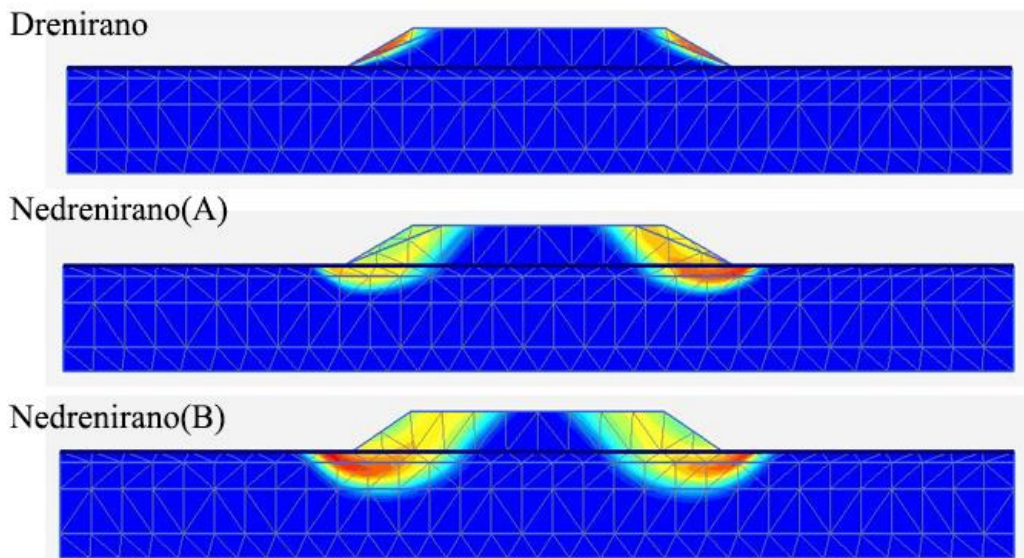


Slika 43: Diagrama vertikalnih pomikov v dreniranih pogojih, pri modelu brez stabilizacije.

V dreniranih pogojih znaša vrednost maksimalnega posedka na nivoju temeljnih tal 179 cm. Po razbremenitvi in ponovni obremenitvi pa se tla posedejo samo še za 58 cm. Drsina poteka po brežinah, varnostni faktor pa znaša 1,71.



Slika 44: Diagrama vertikalnih pomikov pri modelih nedrenirano(A) in nedrenirano(B), v primeru brez stabilizacije.



Slika 45: Kritične drsine v dreniranih in nedreniranih pogojih pri modelu brez stabilizacije.



V nedreniranih pogojih so posedki bistveno manjši, pri nedrenirano(A) znaša maksimalni posedek na nivoju temeljnih tal 31 cm, pri nedrenirano(B) pa 41 cm. Drsina se nahaja bližje sredini nasipa, varnostni faktor je 1,52 v primeru nedrenirano(A) in 1,24 pri nedrenirano(B). To pomeni, da obstaja možnost porušitve temeljnih tal pri hitri gradnji nasipa.

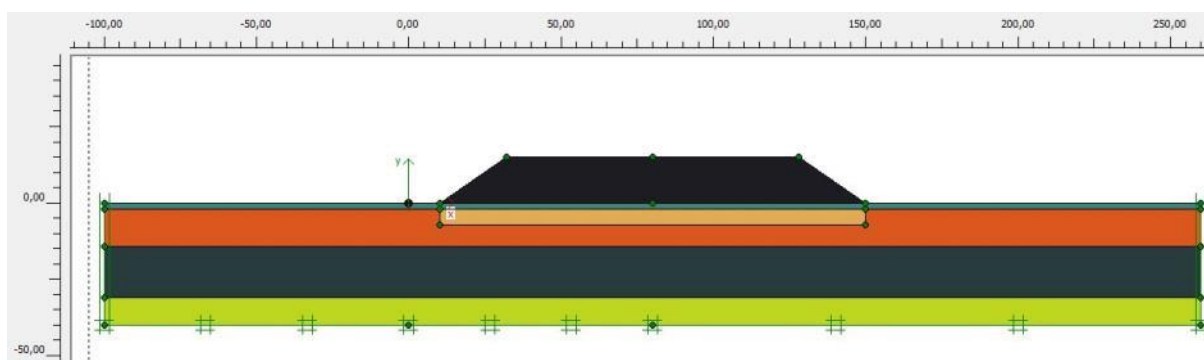
Po obremenitvi in razbremenitvi je posedek temeljnih tal manjši. V nadaljevanju, ko sem temeljna tla izboljševal z različnimi načini globinskega mešanja, sem poskušal vpliv stabilizacije približati vplivu razbremenitve pri modelu brez stabilizacije. Drugače rečeno, posedki pri obremenitvi stabiliziranih tal naj bi bili podobni posedkom po razbremenitvi nestabiliziranih tal. Tako bi lahko tudi v realnosti »izenačili« posedke na novih, stabiliziranih območjih za deponiranje, s tistimi ki so že nekaj časa v uporabi brez izboljšanja tal.

Preglednica 13: Posedki pri obremenitvi in razbremenitvi modela brez stabilizacije.

	<b>Povprečni posedek pri obremenitvi temeljnih tal brez stabilizacije</b>	<b>Posedek po razbremenitvi temeljnih tal brez stabilizacije</b>
<b>Drenirano stanje</b>	179 cm	58 cm
<b>Nedrenirano stanje</b>	36 cm	17 cm

#### 4.1.2 Površinska stabilizacija do globine 7 m

Pod nasipom premoga in pod sloj nasutja sem postavil plast stabilizirane zmesi debeline 5 m. Stabilizacija bi se izvedla s plitvim mešanjem. Pred mešanjem bi se nasutje odstranilo in po koncu ponovno nasulo. Zgledoval sem se po stabilizaciji pod rezervoarji v Port Everglades, opisani v poglavju 2.9.3.



Slika 46: Model stabilizacije do globine 7 m.

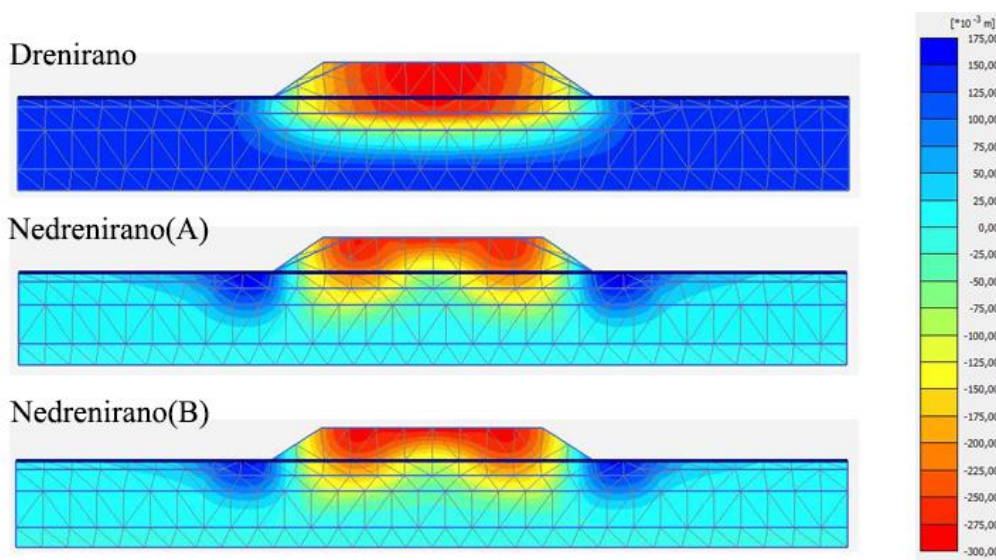
Tak način izboljšave nam da le malo manjše posedke kot v primeru brez stabilizacije (Preglednica 14). Razlog tega je večja teža stabiliziranega bloka v primerjavi z zemljino v meljnem sloju in zato se

meljni in glinasti sloj pod blokom stisneta. V dreniranih pogojih znaša varnostni faktor 1,69, medtem ko je v nedreniranih pogojih le-ta 1,60. S tem je varnost ustrezna in v temeljnih tleh ne pride do porušitve.

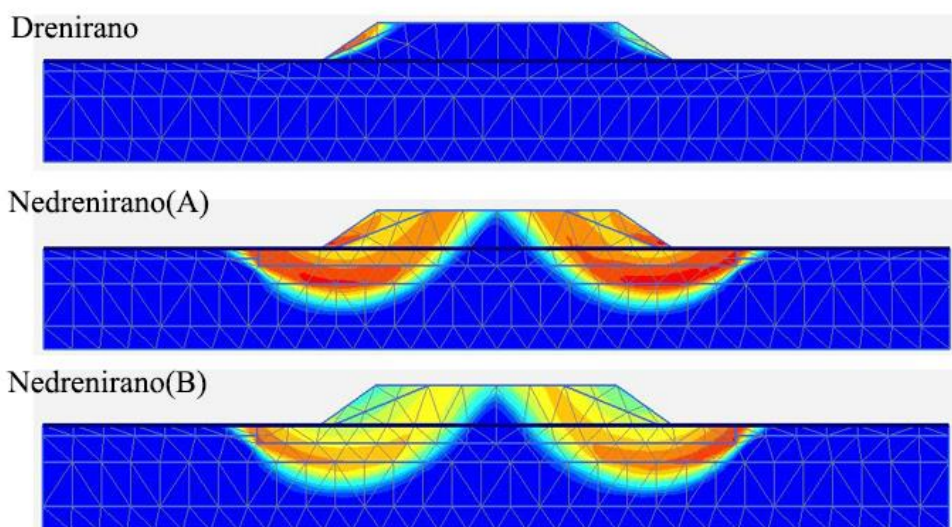
Preglednica 14: Primerjava posedkov na nivoju temeljnih tal med nestabiliziranim modelom in stabilizacijo z blokom zemljine.

	Posedki pri modelu brez stabilizacije.		Posedki pri stabilizaciji do globine 7 m.	
	Obremenitev	Razbremenitev	Obremenitev	Razbremenitev
<b>Drenirano stanje</b>	179 cm	58 cm	160 cm	51 cm
<b>Nedrenirano stanje</b>	36 cm	17 cm	25 cm	17 cm

Če primerjamo posedke pri obremenitvi stabiliziranih tal in posedke pri razbremenitvi nestabiliziranih tal, kot sem navedel v prejšnjem poglavju, vidimo, da je razlika precejšnja, zato se mi tak način stabilizacije ne zdi primeren.



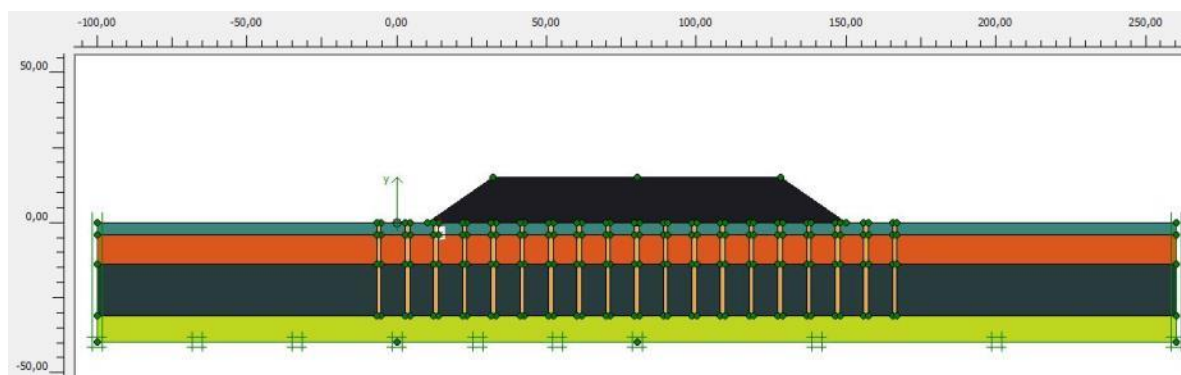
Slika 47: Diagrami vertikalnih pomikov pri stabilizaciji do globine 7 m.



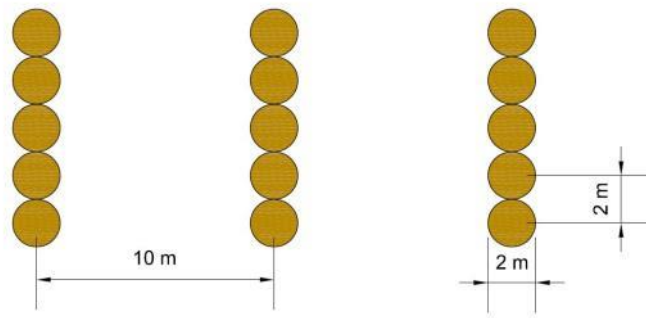
Slika 48: Kritične drsine pri računu varnosti v primeru stabilizacije do globine 7 m.

#### 4.1.3 Globinsko mešanje – stabilizacija s koli

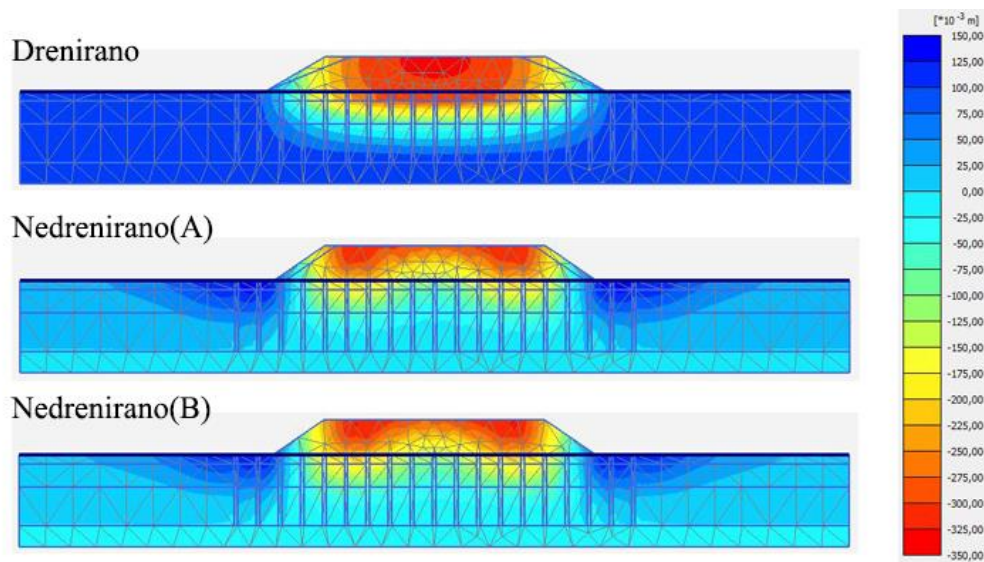
Načeloma velja, da je za stabilizacijo pod raznimi nasipi, boljša uporaba globinskega mešanja z vgradnjo kolov, zato sem poskusil kako bi se le-ta obnesla pod deponijo premoga. Primer sem modeliral z dotikajočimi se koli, ki v ravnih vrstah tvorijo stene. Izbral sem kol premera 2 m, razdalja med osmi sosednjih kolov znaša ravno tako 2 m. Za lažje modeliranje v programu Plaxis 2D sem izračunal nadomestno širino in ustvaril steno debeline 1,57 m. Medosna razdalja med stenami znaša 10 m.



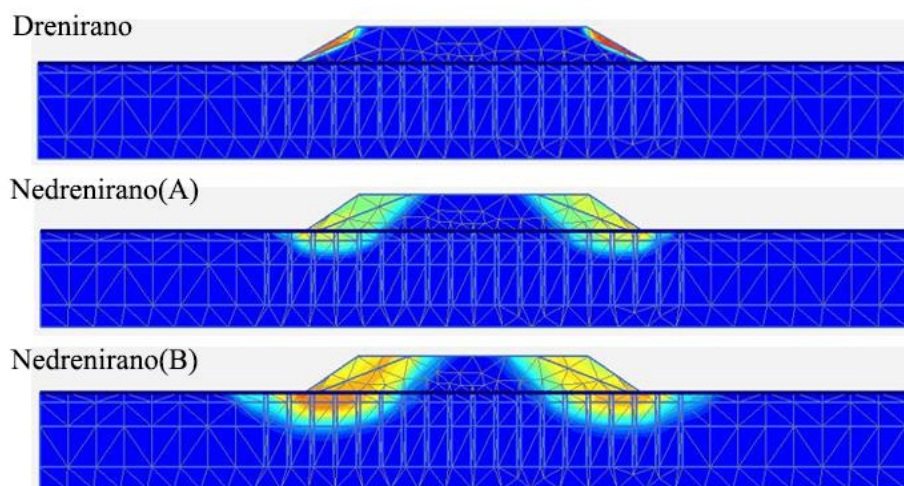
Slika 49: Prečni prerez modela stabilizacije z enojnimi koli.



Slika 50: Shematski prikaz dela vgrajenih enojnih sten v tlorisu.



Slika 51: Diagrami vertikalnih pomikov v primeru stabilizacije z enojnimi koli.



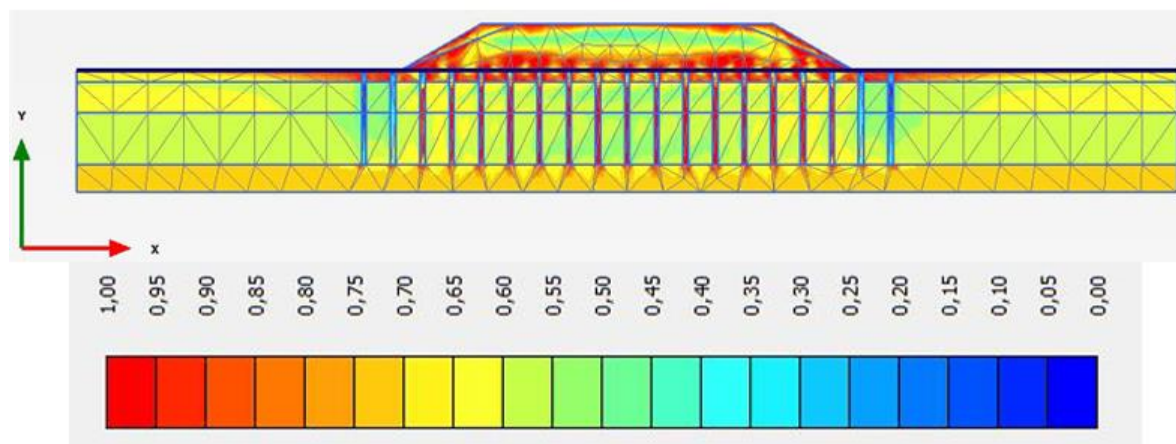
Slika 52: Kritične drsine pri računu varnosti v primeru stabilizacije s koli.

Simulacija stabilizacije s koli nam poda dobre rezultate, le v dreniranih pogojih dobimo še vedno precej velik posedek (Preglednica 15). Najmanjši varnostni faktor je 1,63, katerega najdemo v primeru nedrenirano(B). Potek drsin je pričakovan. Delež izboljšane zemljine je približno 15 %, kar je znotraj dovoljene meje.

Preglednica 15: Primerjava posedkov pri stabilizaciji s koli in modelom brez stabilizacije.

	Posedki pri modelu brez stabilizacije		Posedki pri stabilizaciji s koli	
	Obremenitev	Razbremenitev	Obremenitev	Razbremenitev
<b>Drenirano stanje</b>	179 cm	58 cm	117 cm	40 cm
<b>Nedrenirano stanje</b>	36 cm	17 cm	20 cm	15 cm

V nedreniranih pogojih je posedek pri obremenitvi stabiliziranih tal (20 cm) že povsem blizu tistemu po razbremenitvi nestabiliziranih tal (17 cm), k čemur sem tudi stremel pri simulacijah.



Slika 53: Diagrami relativnih strižnih napetosti (delež izkoriščene strižne trdnosti) pri enojni steni iz kolov.

Iz diagrama relativne strižne napetosti lahko vidimo kje pride do največjih strižnih obremenitev. Relativna strižna napetost nam poda delež izkoriščene strižne trdnosti.

$$\tau_{rel} = \frac{\tau_{mob}}{\tau_{max}} \quad (7)$$

Kjer je:

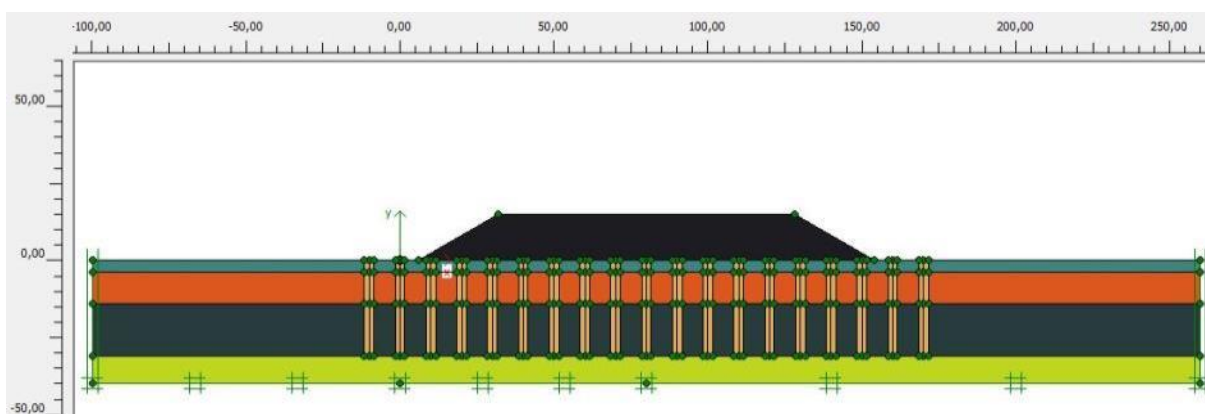
$\tau_{mob}$  mobilizirana strižna trdnost v trenutnem stanju.

$\tau_{max}$  maksimalna vrednost strižne trdnosti.

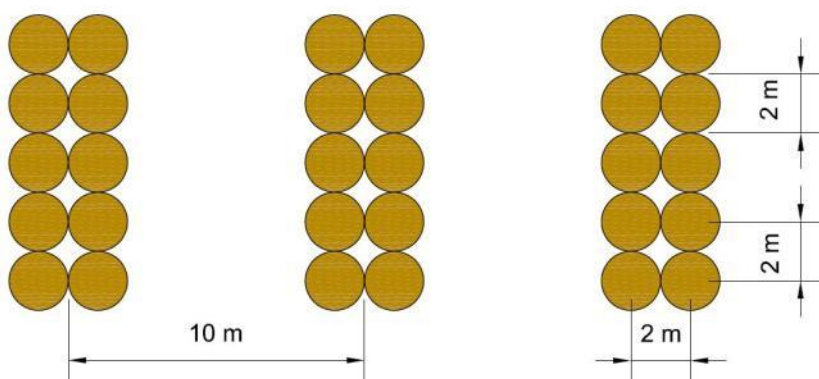
Rdeča območja na sliki 53 predstavljajo relativne strižne napetosti vrednosti 1 (mejno stanje). Ta območja so največja pri tistih kolih, ki so bližje osi nasipa, in se manjšajo z oddaljenostjo kolov. Na teh območjih lahko pride do loma kolov.

#### 4.1.4 Stabilizacija z »dvojnimi« koli

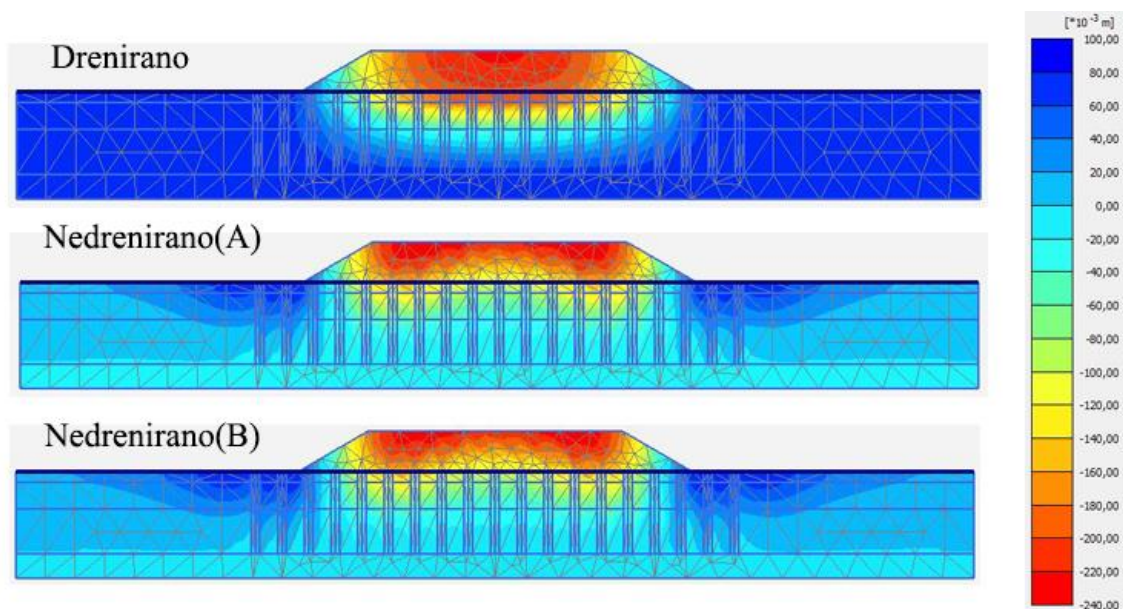
Za še večji učinek sem preizkusil dvojne kole. Prejšnjemu primeru sem dodal še eno vrsto enakih dotikajočih se kolov, tako da so stene podvojene.



Slika 54: Prečni prerez modela stabilizacije z dvojnimi koli.



Slika 55: Shematski prikaz dela tlorisa vgrajenih dvojnih kolov.

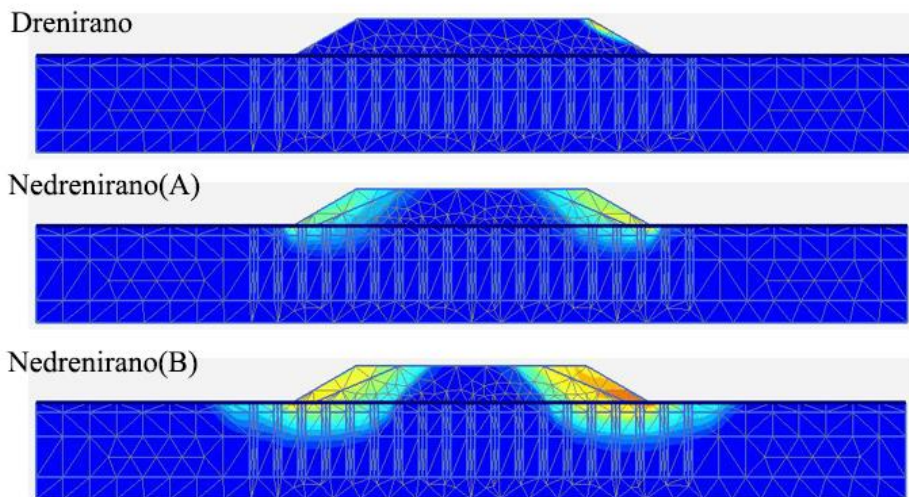


Slika 56: Diagrami vertikalnih pomikov pri dvojnih kolic.

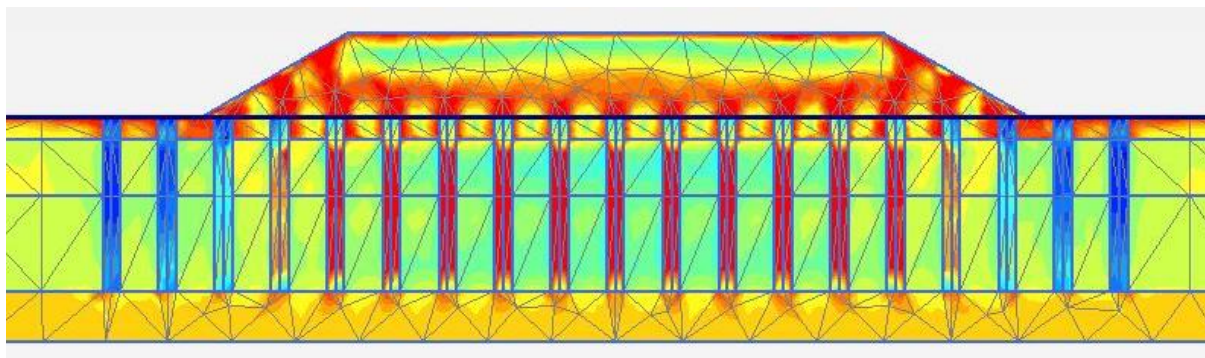
Posedki pri obremenitvi stabiliziranih tal z dvojnimi kolic so zelo podobni tistim pri razbremenitvi nestabiliziranih tal, kar je tudi cilj naših simulacij (Preglednica 16). V obeh primerih ni nevarnosti pred porušitvijo, varnostni faktor je v dreniranih pogojih 1,62, v nedreniranih pa se giblje okrog 2,00. Delež izboljšane zemljine je približno 30 %, kar pa je nad zgornjo mejo. Dvojni kolic tako veliko pripomorejo k nosilnosti in zmanjšanju posedkov.

Preglednica 16: Posedki na nivoju temeljnih tal v nestabiliziranih tleh in pri stabilizaciji z dvojnimi kolic.

	Posedku pri modelu brez stabilizacije		Posedki pri stabilizaciji z dvojnimi kolic	
	Obremenitev	Razbremenitev	Obremenitev	Razbremenitev
<b>Drenirano stanje</b>	179 cm	58 cm	63 cm	30 cm
<b>Nedrenirano stanje</b>	36 cm	17 cm	15 cm	12 cm



Slika 57: Kritične drsine pri računu varnosti pri stabilizaciji z dvojnimi koli.

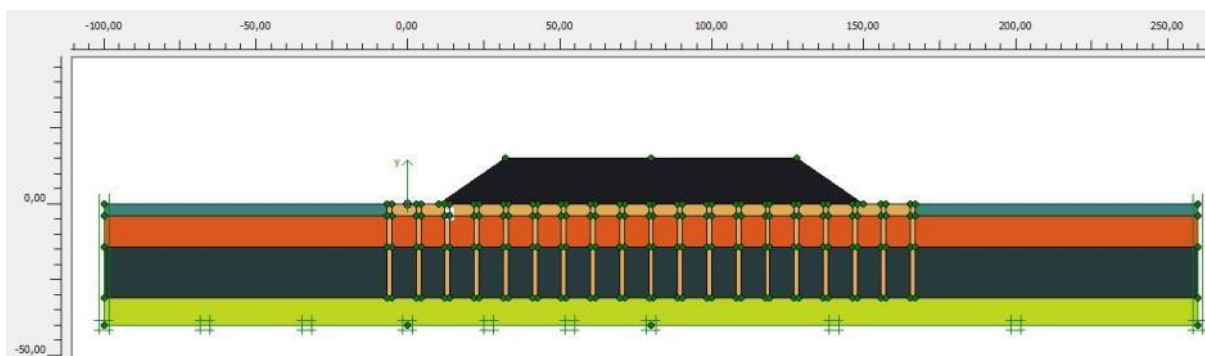


Slika 58: Diagram relativne strižne napetosti pri dvojnih kolih.

Relativne strižne napetosti so podobne kot v primeru enojnih kolov, največje so pod telesom nasipa.

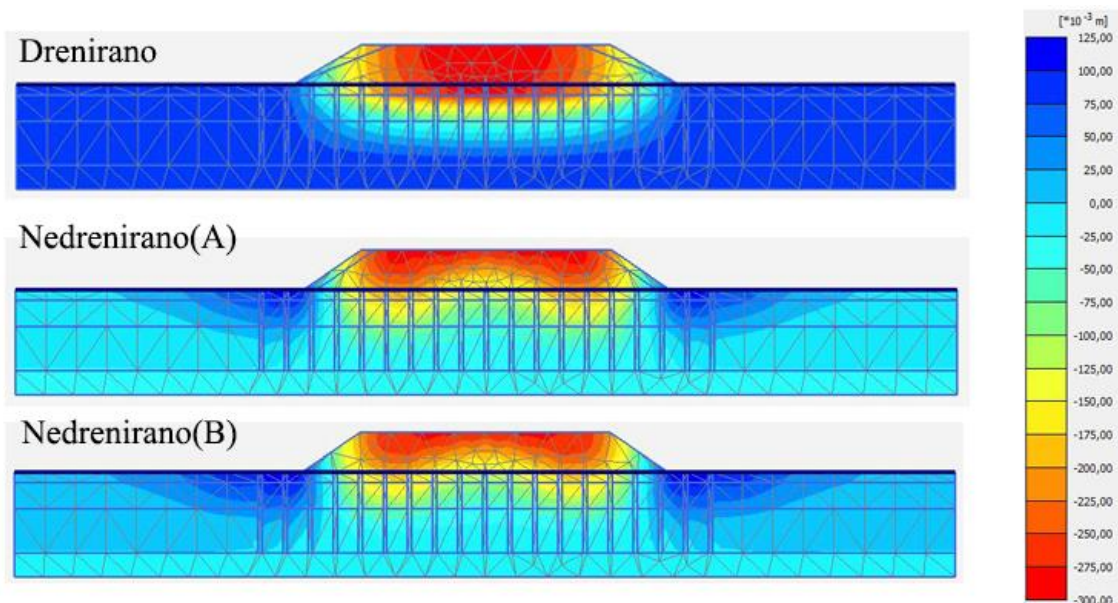
#### 4.1.5 Kombinirana stabilizacija s koli in blokom

Zanimal me je še model, v katerem so združeni prejšnji primeri. Tako sem uporabil stabilizacijo z blokom debeline 4 m in enojno vrsto kolov.

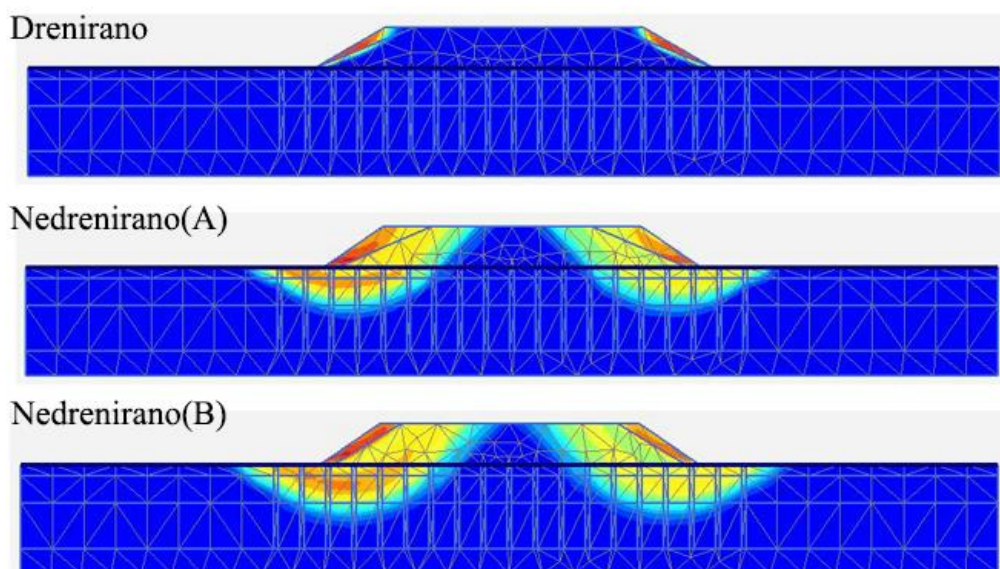


Slika 59: Model prečnega prereza stabilizacije s koli in blokom.





Slika 60: Diagrami vertikalnih pomikov v dreniranih in nedreniranih pogojih za primer stabilizacije s koli in blokom.



Slika 61: Kritične drsine pri računu varnosti v primeru stabilizacije s koli in blokom.

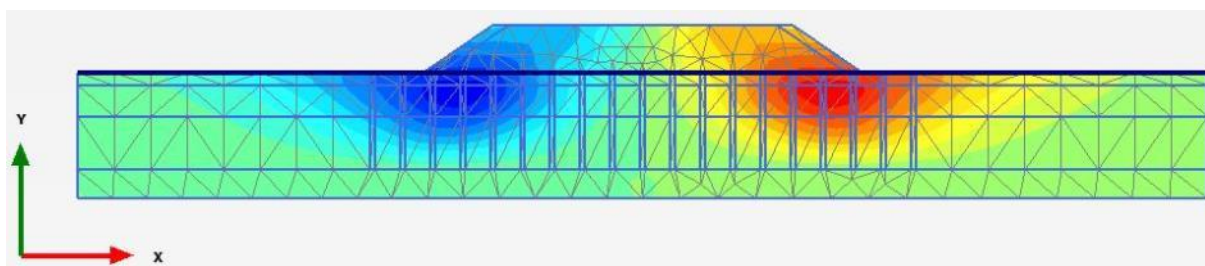
Tudi v tem primeru dobimo dobre rezultate, a so zelo podobni kot v modelu z enojnimi koli. Iz tega sklepam, da površinska stabilizacija pod nasipom premoga nima bistvenega vpliva. V dreniranih pogojih znaša varnostni faktor 1,78, medtem ko je v nedreniranem stanju najmanj 1,89. Z varnostjo ni težav, drsine so v nedreniranih pogojih blizu osi nasipa.

Preglednica 17: Primerjava posedkov pri izboljšavi s koli in blokom zemljine ter modelu brez stabilizacije.

	Posedki pri modelu brez stabilizacije		Posedki pri izboljšanju s koli in blokom stabilizirane zemljine	
	Obremenitev	Razbremenitev	Obremenitev	Razbremenitev
<b>Drenirano stanje</b>	179 cm	58 cm	132 cm	42 cm
<b>Nedrenirano stanje</b>	36 cm	17 cm	20 cm	15 cm

#### 4.1.6 Horizontalni pomiki pod deponijo premoga

Pri obremenitvi temeljnih tal z nasipom premoga, pride do največjih horizontalnih pomikov vedno pod vznožjem nasipa.



Slika 62: Diagram horizontalnih pomikov v primeru globinske stabilizacije s koli.

Preglednica 18: Največji horizontalni pomiki v temeljnih tleh, pri obremenitvi z nasipom premoga.

	Brez stabilizacije	Blok stabilizirane zemljine	Enojna stena sestavljena iz kolov	Dvojna stena sestavljena iz kolov	Stabilizacija s koli in blokom
<b>Drenirano stanje</b>	31 cm	37 cm	26 cm	17 cm	33 cm
<b>Nedrenirano stanje</b>	58 cm	43 cm	36 cm	28 cm	35 cm

Največji odpor proti horizontalnim premikom v tleh nudi dvojna stena iz kolov, saj v tem primeru pride do najmanjših pomikov. Zanimivo je, da koli v območju največjih horizontalnih pomikov niso najbolj izkoriščeni. To pomeni, da sicer relativno veliki horizontalni pomiki niso vzrok za porušitev kolov, ampak je vertikalna obremenitev tista, ki v kolih povzroča največje strižne napetosti.

## 4.2 Simulacija stabilizacije pod rezervoarjem

Na pomolu 2 se nahaja tudi terminal tekočih tovorov. Do sedaj so temeljna tla pred gradnjo rezervoarjev izboljševali predvsem s predobremenitvijo (tudi v kombinaciji z gruščnatimi koli), v določenih primerih pa so rezervoarji temeljeni na pilotih. Sam sem simuliral obnašanje pri stabilizaciji z globinskim mešanjem. Modeliral sem en večji rezervoar, kakršnega že uporabljajo v Luki Koper. Premer znaša 25 m, visok je 15 m, sprejme pa 6250 m<sup>3</sup> tekočine, za katero sem izbral kar vodo, s katero opravljajo testna polnjenja. Pod rezervoarjem se nahaja armiranobetonska plošča debeline 80 cm, v programu Plaxis 2D je modelirana kot toga plošča s pripadajočimi karakteristikami. Obtežbo polnega rezervoarja sem v Plaxisu podal kot linijsko obtežbo v osnosimetričnem modelu. Preračunana obremenitev vode:

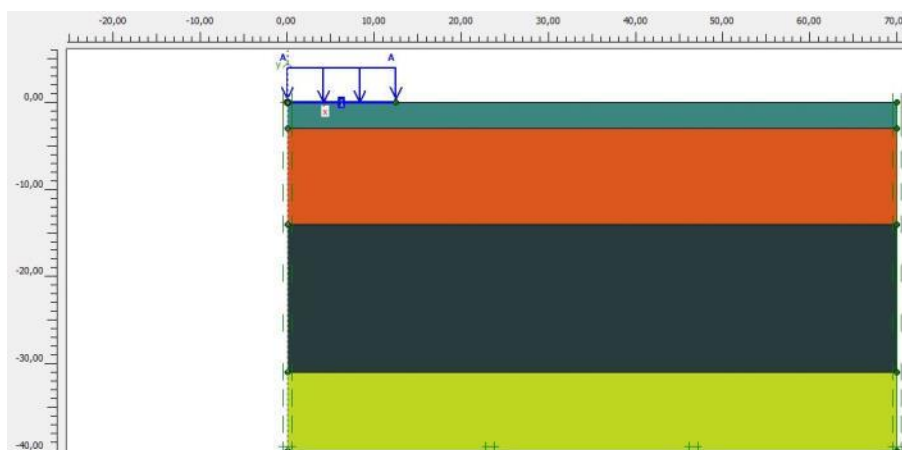
Upoštevajoč volumen 6250 m<sup>3</sup> in specifično težo vode 10 kN/m<sup>3</sup>, dobimo težo vode v polnem rezervoarju:

$$F_g = 6250 \text{ m}^3 \times 10 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} = 62500 \text{ kN} \quad (8)$$

Površina rezervoarja v tlorisu znaša 490,9 m<sup>2</sup>, izračunamo jo iz premera – 12,5 m.

$$\text{Obtežba vode} = \frac{62500 \text{ kN}}{490,9 \text{ m}^2} = 127,3 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \approx 130 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \quad (9)$$

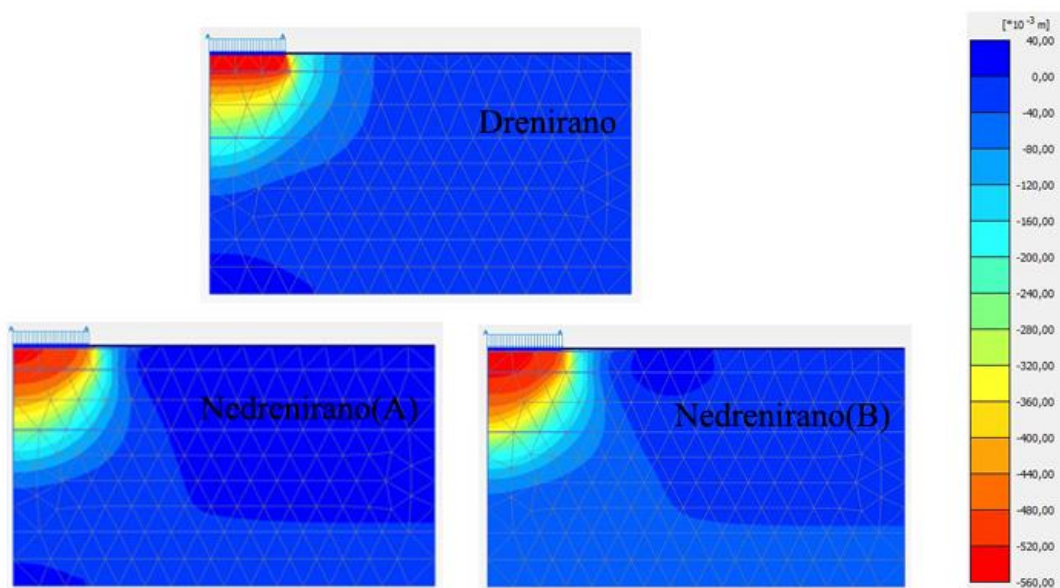
### 4.2.1 Model brez stabilizacije



Slika 63: Prečni prerez modela brez uporabe stabilizirane zmesi.

Rezultati, ki jih dobimo, so sledeči: 145 cm posedka v dreniranem stanju in pa 53 do 63 cm v nedreniranih pogojih, na nivoju temeljnih tal. Po razbremenitvi pa se posedki zmanjšajo na 40 cm v

dreniranih pogojih ter 25 cm v nedreniranih. Navkljub velikim posedkom ne pride do porušitve v temeljnih tleh, najmanjši varnostni faktor dobimo v primeru nedrenirano(B), kateri znaša 1,55, v dreniranih pogojih pa je ta kar 2,41.



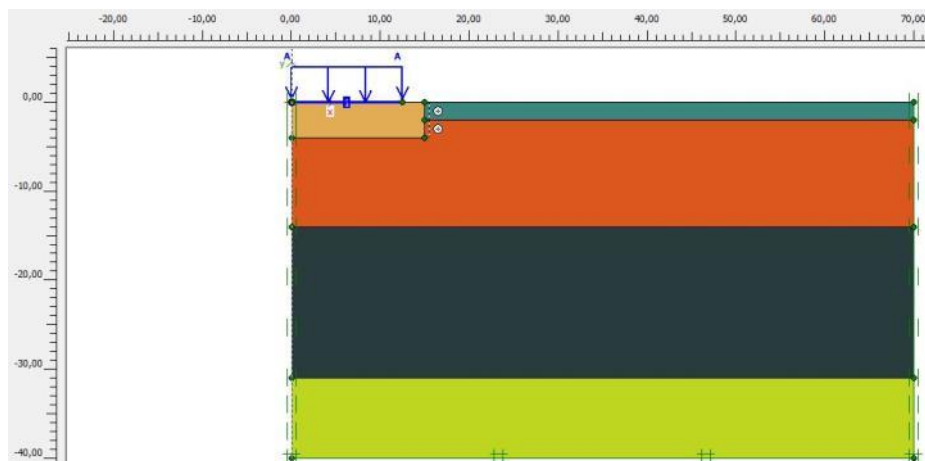
Slika 64: Diagrami vertikalnih pomikov pri modelu brez stabilizacije.

Preglednica 19: Posedki na nivoju temeljnih tal pri nestabiliziranem modelu po obremenitvi in razbremenitvi.

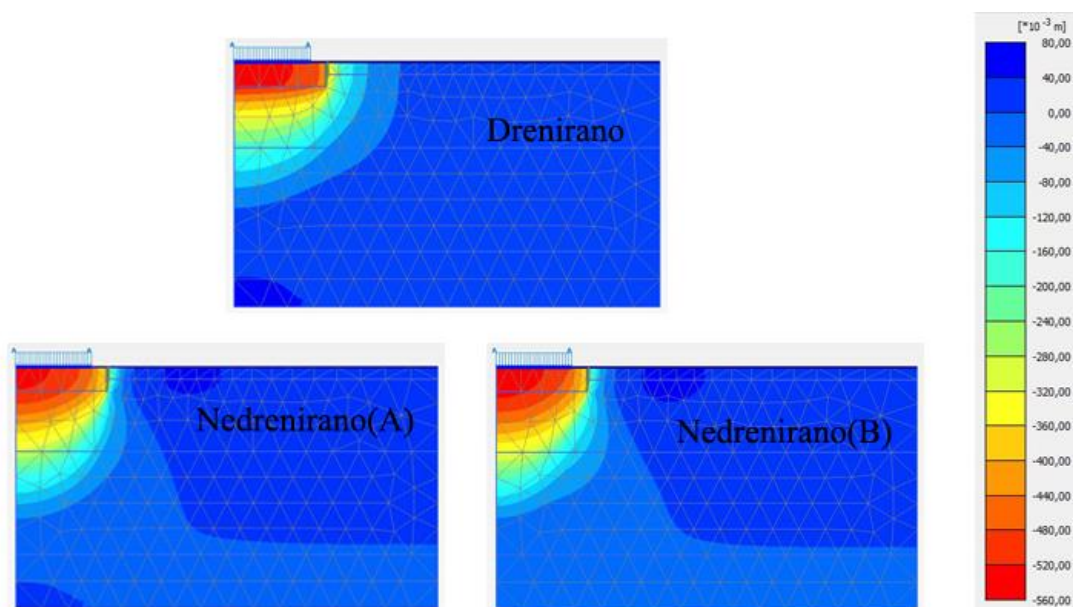
	<b>Posedek pri obremenitvi</b>	<b>Posedek po razbremenitvi</b>
<b>Drenirano stanje</b>	145 cm	40 cm
<b>Nedrenirano stanje</b>	58 cm	25 cm

#### 4.2.2 Površinsko stabiliziranje do globine 4 m

Na podoben način kot pri deponiji premoga, sem tudi tukaj najprej poskušal s plitvo stabilizacijo bloka zemljine, kateri sega 4 m v globino in ima 15 m premera.



Slika 65: Prečni prerez modela površinske stabilizacije do globine 4 m.

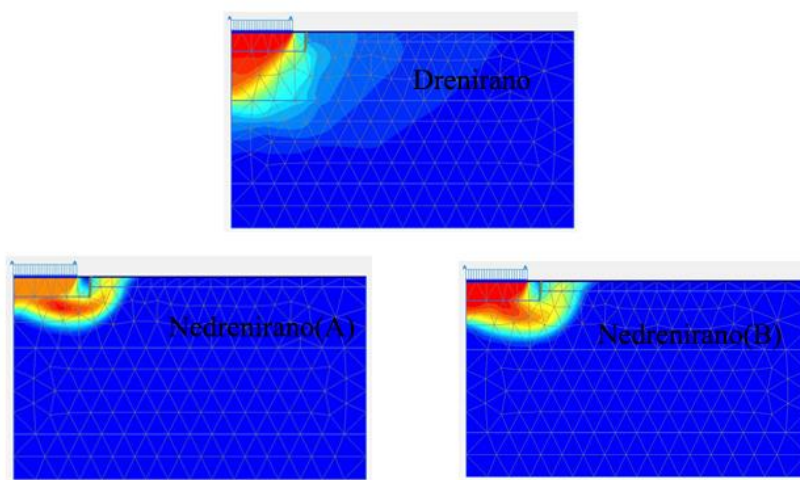


Slika 66: Diagrami vertikalnih pomikov za drenirano in nedrenirano stanje pri površinski stabilizaciji do globine 4 m.

Posedki so pri površinski stabilizaciji skoraj enaki modelu brez stabilizacije (Preglednica 20), kar lahko pripišemo večji prostorninski teži stabiliziranega bloka zemljine, kot je pa teža zemljine v sloju Melj, pesek. Glede varnosti ni težav, varnostni faktorji so 2,68 v dreniranem stanju, v nedreniranem pa najmanj 1,82. Površinsko mešanje pod rezervoarjem, se v Luki Koper zaradi velikih posedkov izkaže kot neprimerno.

Preglednica 20: Primerjava posedkov na nivoju temeljnih tal med nestabiliziranim modelom in površinsko stabilizacijo do globine 4 m.

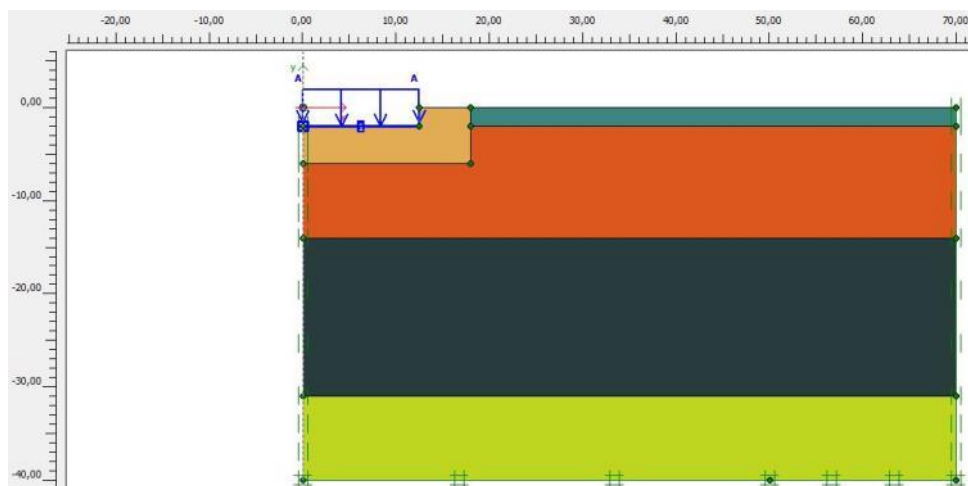
	Posedki pri modelu brez stabilizacije		Posedki pri površinski stabilizaciji do globine 4 m	
	Obremenitev	Razbremenitev	Obremenitev	Razbremenitev
<b>Drenirano stanje</b>	145 cm	40 cm	115 cm	41 cm
<b>Nedrenirano stanje</b>	58 cm	25 cm	57 cm	32 cm



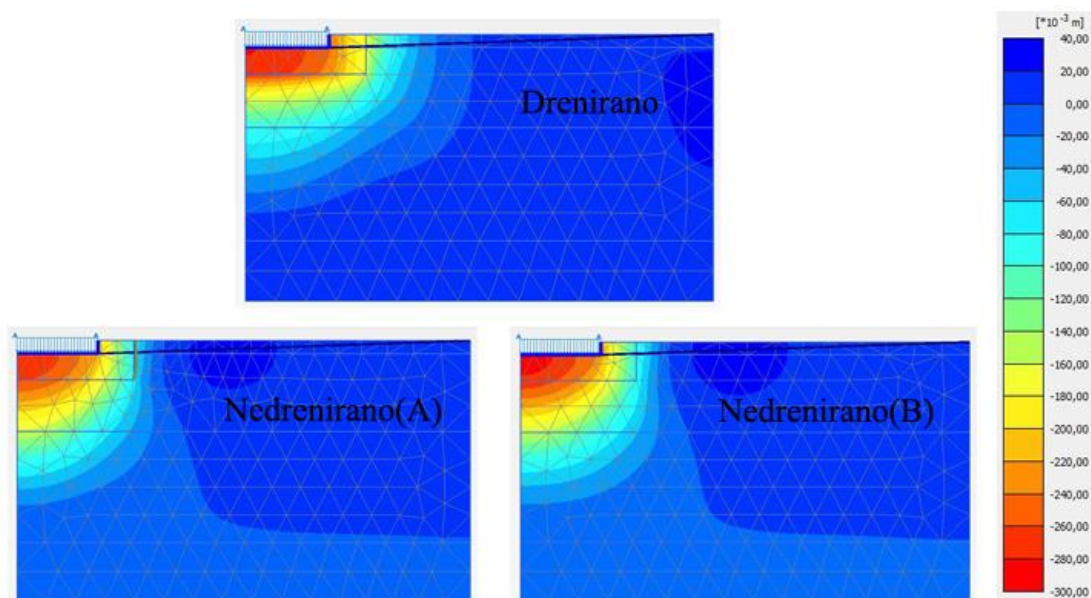
Slika 67: Kritične drsine pri stabilizaciji do globine 4 m.

#### 4.2.3 Površinska stabilizacija s poglobitvijo

Naslednji primer, katerega sem simuliral, je poglobitev rezervoarja v stabilizirano zmes za 2 m. Stabilizacija bi se izvedla do globine -6 m in imela bi 18 m premera. Tako bi vse skupaj, stabilizacija in rezervoar, nekako »plavala« na morski glini.



Slika 68: Prečni prerez poglobitve rezervoarja v blok stabilizirane zemljine.

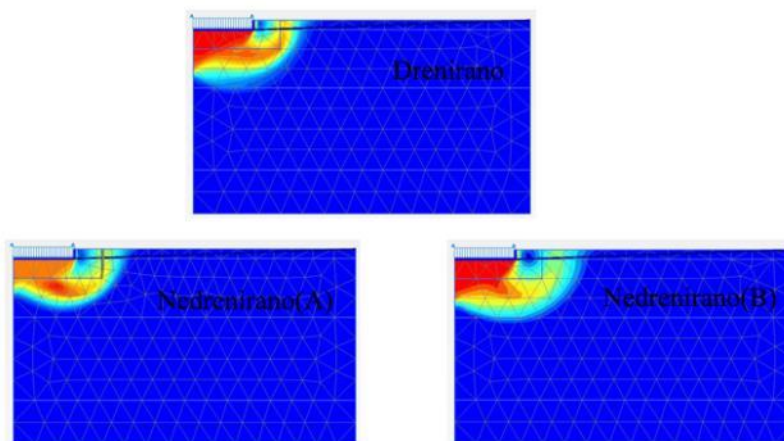


Slika 69: Diagrami vertikalnih pomikov v primeru poglobitve.

Rezultati analiz s programom Plaxis so dobri in zelo blizu posedkom pri razbremenitvi nestabiliziranih tal (Preglednica 21). Varnost pred porušitvijo temeljnih tal je v tem primeru zelo velika, v dreniranih pogojih znaša varnostni faktor 6,28, v nedreniranih pa 3,69.

Preglednica 21: Posedki pri stabilizaciji s poglobitvijo in nestabiliziranim modelu.

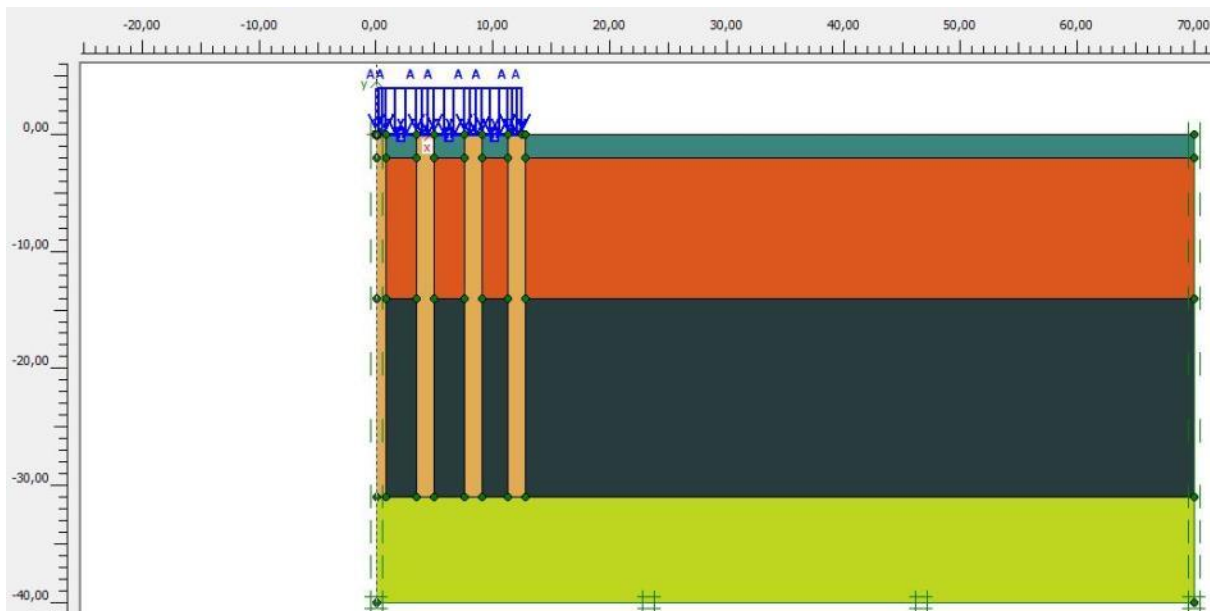
	Posedki pri modelu brez stabilizacije		Posedki pri površinski stabilizaciji s poglobitvijo rezervoarja	
	Obremenitev	Razbremenitev	Obremenitev	Razbremenitev
<b>Drenirano stanje</b>	145 cm	40 cm	64 cm	31 cm
<b>Nedrenirano stanje</b>	58 cm	25 cm	28 cm	24 cm



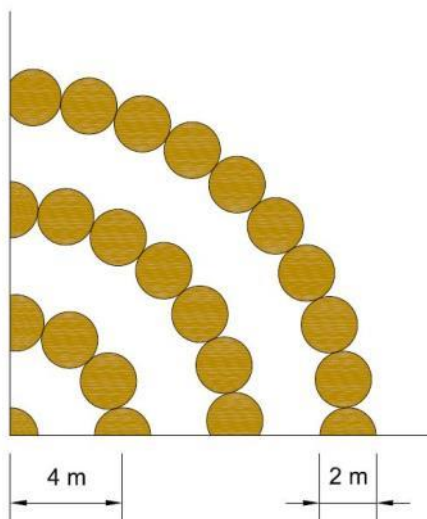
Slika 70: Kritične drsine pri računu varnosti pri poglobitvi rezervoarja v blok stabilizirane zemljine.

#### 4.2.4 Globinsko mešanje - vgradnja kolov

Boljše rezultate sem pričakoval pri vgradnji kolov. Ravno tako sem modeliral dotikajoče se kole, ki sestavljajo steno. Razmik med stenami je 4 m.

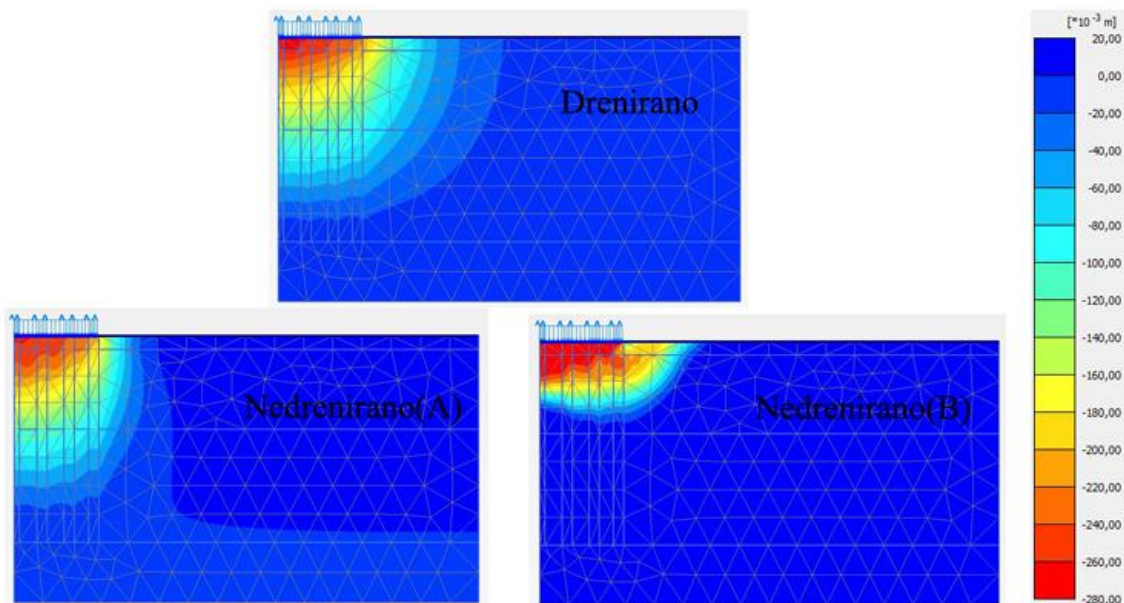


Slika 71: Prečni prerez modela stabilizacije s koli.



Slika 72: Tloris vgradnje kolov pod rezervoarjem, na sliki je shema četrtnine kroga.



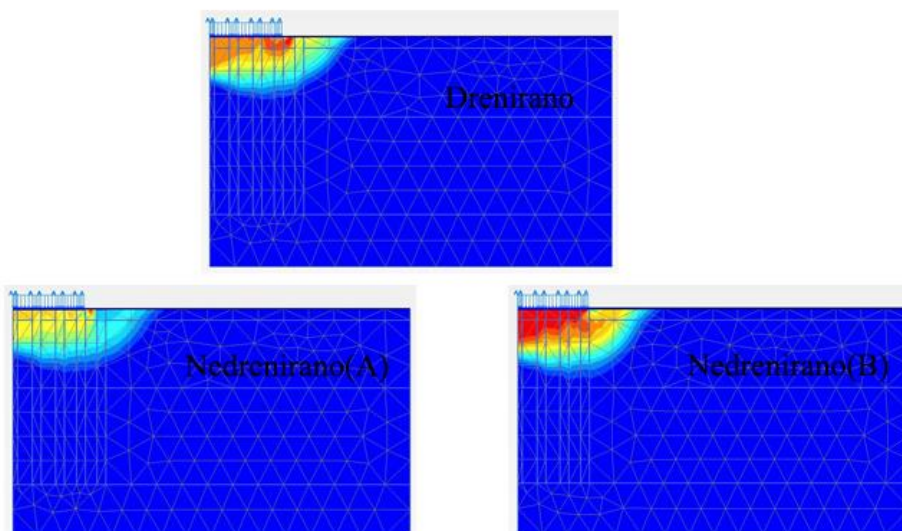


Slika 73: Diagrami vertikalnih pomikov pri vgradnji kolov.

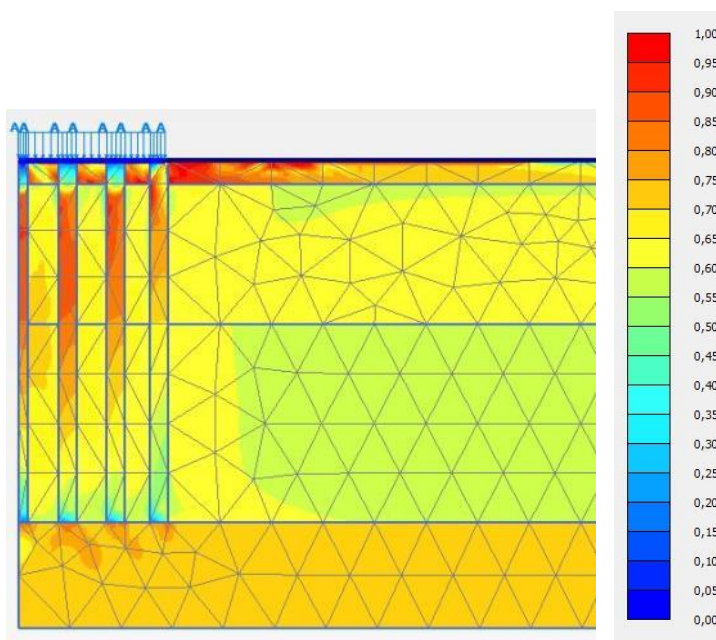
Stabilizacija s koli pričakovano da najboljše rezultate, saj so posedki isti ali pa še manjši kot tisti pri razbremenitvi nestabiliziranih tal. Varnostni faktorji znašajo 2,02 v nedreniranem primeru ter 3,32 v dreniranem.

Preglednica 22: Primerjava posedkov pri modelu brez stabilizacije in posedkov pri globinski stabilizaciji s koli, na nivoju temeljnih tal.

	Posedki pri modelu brez stabilizacije		Posedki pri globinski stabilizaciji s koli	
	Obremenitev	Razbremenitev	Obremenitev	Razbremenitev
<b>Drenirano stanje</b>	145 cm	40 cm	33 cm	25 cm
<b>Nedrenirano stanje</b>	58 cm	25 cm	24 cm	21 cm



Slika 74: Kritične drsine pri stabilizaciji s koli.

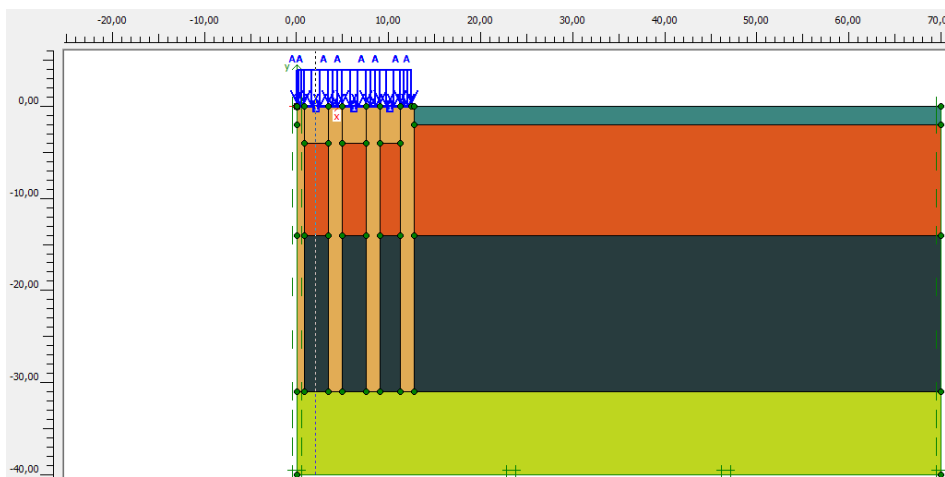


Slika 75: Diagram relativne strižne napetosti pri stabilizaciji s koli pod rezervoarjem.

Pri temeljenju pod rezervoarjem ni nevarnosti loma kolov, saj relativna strižna napetost nikjer ne doseže vrednosti faktorja 1.

#### 4.2.5 Kombinacija kolov in bloka stabilizirane zemljine

Ponovno sem združil tako kole in blok stabilizirane zemljine, pri čemer blok sega 4 m v globino, koli so pa enaki kot v prejšnjem primeru.

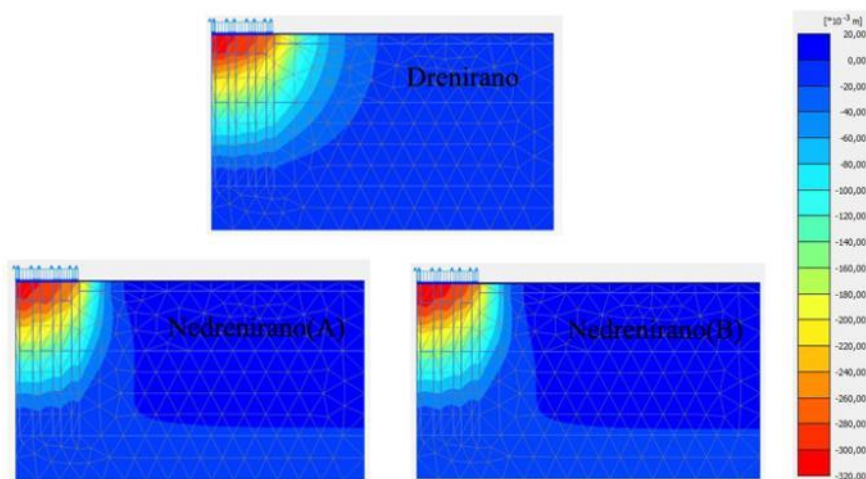


Slika 76: Model prečnega prereza pri stabilizaciji s koli in blokom.

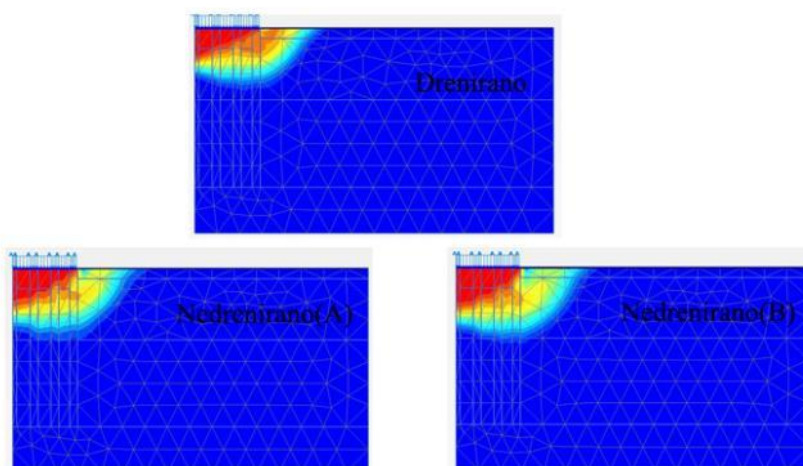
Rezultati so prav tako odlični in zelo podobni tistim iz primera stabilizacije s koli, kar pomeni, da je blok stabilizirane zemljine praktično nepotreben. Varnost pred porušitvijo je dobra, saj varnostni faktor ni manjši od 2,5.

Preglednica 23: Primerjava posedkov pri stabilizaciji s koli in blokom ter nestabiliziranim modelom.

	Posedki pri modelu brez stabilizacije		Posedki pri hkratni uporabi kolov in bloka stabilizirane zemljine	
	Obremenitev	Razbremenitev	Obremenitev	Razbremenitev
<b>Drenirano stanje</b>	145 cm	40 cm	30 cm	24 cm
<b>Nedrenirano stanje</b>	58 cm	25 cm	25 cm	21 cm



Slika 77: Diagrami vertikalnih pomikov pri uporabi kolov in bloka stabilizirane zemljine.



Slika 78: Kritične drsinje pri računu varnosti v primeru vgradnje kolov in stabiliziranega bloka zemljine.

### 4.3 Ugotovitve in zaključki

Pri deponiji premoga dobimo najboljše rezultate glede posedkov z vgradnjo dvojnih sten z dotikajočimi se koli.

Pri rezervoarju se za najbolj učinkovito izboljšanje izkaže stabiliziran blok zemljine v kombinaciji s koli in stene, sestavljene iz kolov.

Pri tem seveda ne smemo pozabit na ekonomski vidik, zato je pomembna količina vgrajenega materiala.

- Količina stabilizirane zmesi pod deponijo premoga.

Preglednica 24: Količina stabilizirane zmesi pri stabilizacijah pod deponijo premoga.

	<b>Količina stabilizirane zmesi</b>	<b>Največji posedek na nivoju temeljnih tal pri obremenitvi z nasipom. Drenirano/nedrenirano stanje</b>
<b>Površinska stabilizacija do 7 m globine, pod nasutjem</b>	740 m <sup>3</sup> /m	160/25 cm
<b>Stabilizacija s koli</b>	925 m <sup>3</sup> /m	117/20 cm
<b>Stabilizacija z dvojnimi koli</b>	1850 m <sup>3</sup> /m	63/15 cm
<b>Stabilizacija s kombinacijo kolov in bloka</b>	1565 m <sup>3</sup> /m	132/20 cm

Čeprav z vgradnjo dvojnih kolov dobimo najmanjše posedke, se poraja vprašanje smiselnosti uporabe, ker za zelene rezultate izboljšamo največji volumen v primerjavi z drugimi primeri. Posledica je uporaba večjih količin veziva in s tem večja cena projekta. Zanimivo je, da pri stabilizaciji z enojnimi koli opravimo polovico manj mešanja, rezultati so pa le malo slabši. Razlika v posedkih v nedreniranih pogojih je le 5 cm.

- Količina stabilizirane zmesi pod rezervoarjem premera 25 m.

Preglednica 25: Količina stabilizirane zemljine pri temeljenju pod rezervoarjem.

	<b>Količina stabilizirane zmesi</b>	<b>Največji posedek na nivoju temeljnih tal pri obremenitvi s polnim rezervoarjem. Drenirano/nedrenirano stanje</b>
<b>Površinska stabilizacija do 4 m globine</b>	1963 m <sup>3</sup>	115/57 cm
<b>Površinska stabilizacija s poglobitvijo</b>	5126 m <sup>3</sup>	64/28 cm
<b>Stabilizacija s koli</b>	7646 m <sup>3</sup>	33/24 cm
<b>Vgradnja kolov in bloka zemljine</b>	8623 m <sup>3</sup>	30/25 cm

Pri stabilizaciji s koli in blokom stabilizirane zemljine dobimo podobne rezultate kot pri sami stabilizaciji s koli, kljub temu da stabiliziramo večji volumen. Tako se najbolj smiselna zdi stabilizacija s poglobitvijo, ker nam da dobre rezultate pri manjši prostornini stabilizacije.

Zavedati se je potrebno, da sem vse primere modeliral v 2D modelu, kar je prineslo določene omejitve. Pri stabilizaciji s koli sem bil primoran uporabiti stene, čeprav je pri kolih veliko različnih možnosti razporeditve. V 3D modelu bi se stvari dalo bolje optimizirati. Na primer simuliral bi še posamezne kole razporejene v različnih mrežah, ali pa dotikajoče se kole, postavljene v različnih geometrijskih vzorcih.

#### 4.4 Napotki tujih podjetij, ki izvajajo globinsko mešanje

Na moja povpraševanja, ki sem jih prek elektronske pošte poslal različnim podjetjem po svetu, katera izvajajo globinsko mešanje, sem prejel dva odgovora. Iz Švedskega podjetja Keller Grundläggning mi je odgovoril gospod David Wiberg (2013), odpisal pa mi je tudi gospod George Burke (2013) iz podjetja Hayward Baker, ZDA. Oba sta mi podala nekaj izkušenj, napotkov in omejitev pri uporabi njihove tehnologije. Gospod Wiberg je izračunal tudi okvirne cene vgradnje kolov v Luki Koper.

##### 4.4.1 Napotki podjetja Keller Grundläggning

- Maksimalna globina, ki jo dosežejo njihovi stroji, je približno 26 m.
- Če so v nasutju pretežno večji kamni (nad 60 mm), je pred pričetkov vgradnje kolov potrebno celotno plast nasutja odstraniti. Če je nasutje iz zrahljanega gramoza ali peska, se lahko meša tudi skozi to plast.
- Glede na sestavo in lastnosti temeljnih tal v Luki Koper in pa približno obremenitev  $130 \text{ kN/m}^2$ , bi gospod Wiberg (2013) svetoval uporabo:
  - Suhega mešanja
  - Kolov premera 800 mm na oddaljenosti 1,1 m
  - Projektne strižne trdnosti kolov  $150 \text{ kN/m}^2$
  - Veziva bodisi cementa ali pa apna/cementa v razmerju 25/75
  - Količina veziva  $110 \text{ kg/m}^3$
- Okvirne cene izvedbe projekta, upoštevana je cena cementa v Sloveniji (približno 110 €/tono)
  - Mobilizacija vse potrebne mehanizacije  $\approx 35000 \text{ €}$
  - Za manjši projekt (25000 – 50000 m)  $\approx 15 \text{ €/m}$
  - Za večji projekt (nad 100000 m)  $\approx 12 \text{ €/m}$

#### 4.4.2 Napotki podjetja Hayward Baker

Gospod Burke (2013) iz ZDA mi je zaupal naslednje zadeve:

- Kole vgrajujejo do globine 15 m
- Za suho mešanje uporabljajo mešalke premera 0,8 – 1 m
- Za mokro mešanje uporabljajo mešalke premera 1 – 2,4 m
- Površina mora biti dovolj trdna, da zdrži mehanizacijo
- Večinoma uporabljajo vezivo iz enega materiala, ker je mešanje različnih materialov predrago. S cementom kvečjemu mešajo samo plavžno žlindro.
- Delež veziva se določi na podlagi laboratorijskih testov, običajne vrednosti so med  $100 \text{ kg/m}^3$  in  $250 \text{ kg/m}^3$
- Vezivo predstavlja 40 % celotne cene projekta

#### 4.5 Ekonomska primerjava globinskega mešanja in drugih metod temeljenja

Za lažjo primerjavo sem izbral globinsko temeljenje do globine 30 m. Čeprav obe podjetji, s katerimi sem bil v stiku, ne izvajata mešanja do takih globin, literatura pa navaja tudi globlje mešanje, sem prepričan, da po svetu nekateri izvajalci lahko dosežejo 30 m in več globine. Pri informativnem izračunu sem se oprl na podatke, ki sta mi jih podala gospoda Wiberg (2013) in Burke (2013).

Za preračun vrednosti kolov, ki sem jih uporabil pri simulacijah, sem uporabil naslednje predpostavke:

- Vezivo (cement) predstavlja 40% cene kola
- Cena cementa v Sloveniji je približno 110 €/tono z davkom
- Vlažnost zemljine pri vgradnji  $w = 45 \%$
- Gostota zemljine  $\rho = 1730 \text{ kg/m}^3$

##### 4.5.1 Temeljenje pod deponijo premoga

Najprej sem izračunal ceno enega kola s premerom 2 m in 30 m dolžine.

$$\text{volumen kola} = \pi \times r^2 \times H = 94,2 \text{ m}^3 \quad (10)$$

$$\text{masa cementa} \approx \frac{0,16 \times 94,2 \text{ m}^3 \times \rho_{\text{zemljine}}}{(1+w)} \approx 17,98 \text{ t/kol} \quad (11)$$

$$\text{cena kola} \approx \frac{17,98 \text{ t} \times 110 \frac{\text{€}}{\text{t}}}{0,4} \approx 4950 \frac{\text{€}}{\text{kol}} \quad (12)$$

**4.5.1.1 Globinska stabilizacija z enojnimi koli premera 2000 mm (primer iz poglavja 4.1.3)**

V prečnem prerezu je 19 kolov, tako da je cena na tekoči meter dolžine:

$$\text{cena na m} \approx \frac{19 \times 4950 \text{ €}}{2} \approx 46.979 \frac{\text{€}}{\text{m}} \quad (13)$$

**4.5.1.2 Globinska stabilizacija z dvojnimi koli premera 2000 mm (primer iz poglavja 4.1.4)**

Cena na tekoči meter se podvoji:

$$\text{cena na m} \approx 46979 \text{ €} \times 2 \approx 93.958 \frac{\text{€}}{\text{m}} \quad (14)$$

**4.5.1.3 Globinska stabilizacija z enojnimi koli premera 800 mm v trikotnem rastru (Wiberg, 2013)**

Gospod Wiberg mi je glede na dane podatke (sestava in lastnosti zemljin ter obremenitev) približno povedal, na kakšen način bi podjetje Keller Grundläggning projektiralo in izvedlo stabilizacijo v Luki Koper (poglavje 4.4.1). Takšno izboljšanje naj bi sicer zadostilo potrebam po nosilnosti temeljnih tal, a nam je učinek na pomike neznan. Zaradi opravljanja simulacij z 2D programom tudi sam nisem uspel preračunati takšne postavitve, zato ne vemo ali je stabilizacija primerljiva z modeli katere sem sam preizkušal. Vseeno sem informativno opravil hiter cenovni izračun tudi predloga švedskega podjetja.

Cena enega kola premera 800 mm in 30 m dolžine:

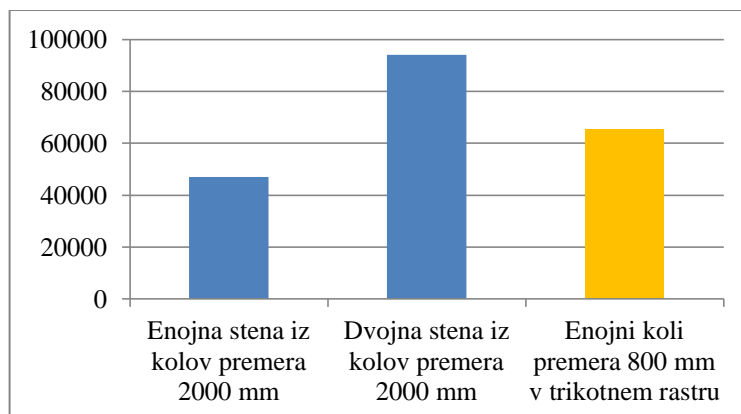
$$\text{cena kola} = 30 \text{ m} \times 15 \frac{\text{€}}{\text{m}} = 450 \text{ €} \quad (15)$$

Pod izbranim nasipom premoga, bi se tako vgradilo 145 kolov na tekoči meter dolžine.

$$\text{cena na m} \approx 145 \text{ kolov} \times 450 \frac{\text{€}}{\text{kol}} \approx 65.250 \frac{\text{€}}{\text{m}} \quad (16)$$



#### 4.5.1.4 Primerjava okvirnih cen na tekoči meter vgradnje kolov pod nasipom premoga



Grafikon 1: Grafični prikaz vrednosti na tekoči meter, različnih stabilizacij s koli, pod nasipom premoga.

Stabilizacija z enojnimi koli je najcenejša varianta med izbranimi. Pri dvojnih kolih smo že v prejšnjem poglavju ugotovili, da je ekonomsko gledano nesmiselna, ker imamo za podoben učinek dvakrat več dela in materialov, kar podraži projekt.

#### 4.5.2 Temeljenje pod rezervoarjem

##### 4.5.2.1 Stabilizacija s koli premera 2000 mm (primer iz poglavja 4.2.4)

V našem primeru pod rezervoar premera 25 m vgradimo 82 kolov premera 2 m.

$$\text{cena projekta} \approx 82 \text{ kolov} \times 4950 \frac{\text{€}}{\text{kol}} \approx 405.500 \text{ €} \quad (17)$$

##### 4.5.2.2 Globinska stabilizacija s posamičnimi koli premera 800 mm v trikotnem rastru

Po nasvetu gospoda Wiberga (2013) bi se vgradili koli premera 800 mm na medsebojni oddaljenosti 1,1 m. Tako bi pod rezervoarjem premera 25 m bilo potrebno vgraditi približno 470 kolov. Ker tak način izboljšanja ni računsko preverjen, velja isto pojasnilo kot v poglavju 4.5.1.3.

$$\text{cena kola} \approx 30 \text{ m} \times 15 \frac{\text{€}}{\text{m}} \approx 450 \frac{\text{€}}{\text{kol}} \quad (18)$$

$$\text{cena projekta} \approx 470 \text{ kolov} \times 450 \frac{\text{€}}{\text{kol}} \approx 211.500 \text{ €} \quad (19)$$

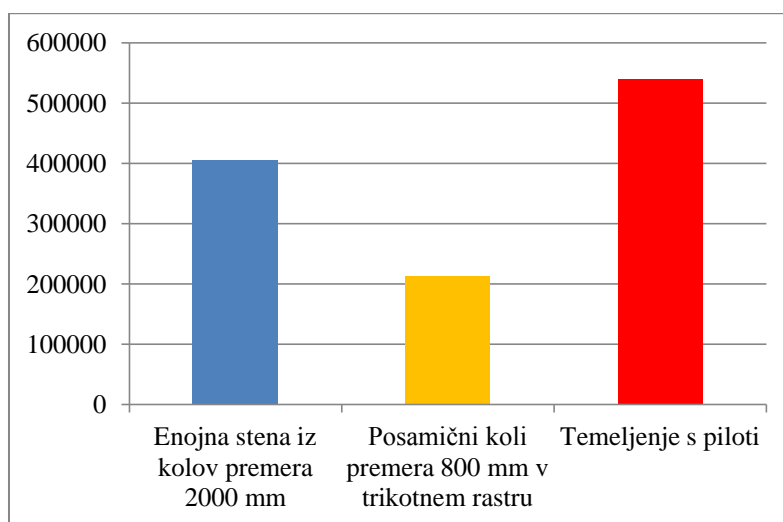
#### 4.5.2.3 Globinsko temeljenje s piloti

V preteklosti so podobne rezervoarje temeljili s piloti, pri čemer so uporabili 30 pilotov, preračunana cena na en pilot je znašala približno 18000 €.

$$\text{cena projekta} \approx 30 \times 18000 \text{ €} \approx 540.000 \text{ €}$$

(20)

#### 4.5.2.4 Primerjava vrednosti različnih globinskih temeljenj pod rezervoarjem



Grafikon 2: Vrednosti temeljenja pod rezervoarjem za različne metode [€].

Najmanjšo ceno izboljšanja tal pod rezervoarjem dobimo pri vgradnji 800 mm kolov v trikotnem rastru, za katero pa žal ne poznamo vpliva na redukcijo posedkov. Obravnavan primer iz poglavja 4.2.4, kjer smo uporabili kole premera 2 m, je za 25 % cenejši kot pa temeljenje s piloti.

Še enkrat bi poudaril, da gre za zelo grobe izračune cen temeljenja z metodo globinskega mešanja, a se metoda vseeno izkaže za cenovno ugodno. Ker sem simulacije opravljal z 2D programom in pri tem najboljše rešitev iskal s poizkušanjem, se zavedam, da lahko obstaja kakšna bolj optimalna izvedba stabilizacije, ki bi posledično bila tudi cenejša.

## 5 ZAKLJUČEK

V diplomski nalogi sem predstavil metodo globinskega mešanja in možnosti njene uporabe na področju Luke Koper. V prvem delu sem opisal metodo in različne vrste mešanj s poudarkom na sami izvedbi mešanja ter zahtevam, omejitvam in pozornostim na gradbišču.

Kako bi se tak način izboljšanja temeljnih tal obnesel v mehkih luških tleh sem simuliral z uporabo specializiranega programskega orodja za geotehniko, Plaxis 2D. S preskusi in primerjavami med različnimi modeli, kjer sem spremljal velikosti vertikalnih in horizontalnih pomikov ter varnost pred porušitvijo, sem prišel do naslednjih ugotovitev:

- V večini primerov se bolje izkaže stabilizacija s koli, kot pa ustvarjanje stabiliziranega bloka zemljine. Pri izboljšanju tal pod rezervoarjem dobimo dobre rezultate tudi pri poglobitvi rezervoarja za 2 m v blok stabilizirane zemljine.
- Pomemben je volumen stabilizacije temeljnih tal, saj večji kot je volumen, več veziva je potrebno vgraditi, s tem pa se poveča tudi cena projekta.
- Metoda je cenejša od drugih primerljivih metod globinskega temeljenja (npr.: vgradnja kolov).
- Potrebne bi bile še dodatne simulacije v 3D modelu, preiskave za mokro mešanje in pa obvezno testno polje v Luki pred morebitno uporabo takega načina stabiliziranja.
- Metoda je primerna za Luko Koper, saj hitro poskrbi za izboljšanje nosilnosti in zmanjšanje posedkov. Sama vgradnja ne povzroča vibracij, zato nima vpliva na sosednje objekte, ki so v Luki postavljeni tesno skupaj.

»Ta stran je namenoma prazna«

## **VIRI**

Andromalos, K.B., Hegazy, Y.A., Jasperse, B.H. 2002. Stabilization of soft soils by soil mixing: str. 10-11.

<http://www.geocon.net/pdf/paper46.pdf> (Pridobljeno 3. 4. 2013.)

Brinkgreve, R.B.J., Swolfs, W.M., Engin, E. 2011. Plaxis 2D 2011. Delft, Plaxis bv.

Broms, B. 2004. Lime and lime/cement columns. V: Moseley, M. A. , Kirsch . Ground Improvement: str. 252-329.

Bruce, D.A., Bruce, M.E., Dimillio, A.F. 2002. Deep mixing: QA/QC and verification methods. Deep Mixing Workshop. Port and Airport Research Institute & Coastal Development Institute of technology.

<http://www.geosystemsbruce.com/v20/biblio/152%20Deep%20Mixing%20QA%20QC.pdf>  
(Pridobljeno 21. 5. 2013.)

Burke, G. K. 2013. Question about deep soil mixing (online). Message to: Starc, R. 4.6.2013. Osebna komunikacija.

Cotelj, T. 2011. Preiskave mulja iz Luke Koper za načrtovanje stabilizacije z globinskim mešanjem. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba T. Cotelj): 165 str.

EuroSoilStab, 2002. Development of design and construction methods to stabilise soft organic soils. Design Guide Soft Soil Stabilisation. European commission project no.: BE 96-3177.

Frank, D. 2012. Obalna konstrukcija veza 12 z zagatno steno. Diplomaska naloga. Ljubljana, univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba D. Frank): 122 str.

Hayward Baker Inc., 2008. Project summary, Ham Marine Facility, Pascagoula, MS: 2 str.

<http://www.revbase.com/TagTeam/client/Zoom.asp?DataID=25630&LS=undefined> (Pridobljeno 21. 4. 2013.)

Hayward Baker Inc., 2009. Project summary, Fuel Storage Tanks Port Everglades, FL: 2 str.

<http://www.haywardbaker.com/WhatWeDo/Techniques/GroundImprovement/DrySoilMixing/default.aspx> (Pridobljeno 27. 5. 2013.)

Keller Holding GmbH, 2011. Brošura 32-01 E, Deep Soil Mixing (DSM): Improvement of weak soils by the DSM method.

[http://www.keller-fondazioni.com/fileadmin/Sito\\_Italiano/Inserzione\\_Laterale/Deep\\_Soil\\_Mixing.pdf](http://www.keller-fondazioni.com/fileadmin/Sito_Italiano/Inserzione_Laterale/Deep_Soil_Mixing.pdf)  
(Pridobljeno 3. 4. 2013.)

Logar, J. 2010. Geotehnika v Luki Koper na začetku 21. stoletja. Gradbeni vestnik, letnik 59, april: 97-105 in maj: 106-116.

<http://www.zveza-dgits.si/geotehnika-v-luki-koper-na-zacetku-21-stoletja-1-del-raziskave-tal>  
(Pridobljeno 18. 4. 2013.)

<http://www.zveza-dgits.si/geotehnika-v-luki-koper-na-zacetku-21-stoletja-2-del-nedavno-izvedeni-projekti-nadaljevanje-iz-apr> (Pridobljeno 9. 5. 2013.)

Makusa, G.P. 2013. Soil stabilization methods and materials. Lulea, Lulea University of Technology, Department of Civil, Environmental and Natural resources engineering: 35 str.

[http://pure.ltu.se/portal/files/42050076/Soil\\_stabilization\\_methods\\_and\\_materials.pdf](http://pure.ltu.se/portal/files/42050076/Soil_stabilization_methods_and_materials.pdf) (Pridobljeno 18. 4. 2013.)

Raju, V.R., Sridhar, V. 2008. Practical applications of ground improvement: str 7-9.

<http://kellerindia.com/pdf/technicalpapers/Practical%20Applications%20of%20Ground%20Improvement.pdf> (Pridobljeno 18. 4. 2013.)

Ryobi Kiso PTE LTD. 2010. Introduction of deep soil mixing (DSM) & Trench cutting re-mixing deep wall (TRD): str. 8-10.

<http://www.geoss.sg/documents/seminar/GeoSS%20Event%20Seminar%205%20Oct%202010%20slides%201.pdf> (Pridobljeno 3. 4. 2013.)

Schleter, M. H. 2007. Hayward Baker. Soil mixing methods.

<http://ednthurber.ca/GSE/ED%20DSM.pdf> (Pridobljeno 3. 4. 2013.)

Topolnicki, M. 2004. In situ soil mixing. V: Moseley, M. , Kirsch . Ground Improvement : str. 252-329.

Wiberg, D. 2013. Question about deep soil mixing (online). Message to: Starc, R. 4.6. in 5.6.2013. Osebna komunikacija.