

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:

Andrejašič, M., 2014. Analiza stanja veza 7 v Luki Koper s študijo možnosti poglobitve morskega dna. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Logar, J.): 110 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:

Andrejašič, M., 2014. Analiza stanja veza 7 v Luki Koper s študijo možnosti poglobitve morskega dna. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Logar, J.): 110 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  
KONSTRUKCIJSKA SMER

Kandidat:

**MARKO ANDREJAŠIČ**

**ANALIZA STANJA VEZA 7 V LUKI KOPER S ŠTUDIJO  
MOŽNOSTI POGLOBITVE MORSKEGA DNA**

Diplomska naloga št.: 3373/KS

**ANALYSIS OF BERTH 7 IN THE PORT OF KOPER  
WITH THE FISIBILITY STUDY FOR THE DEEPENING  
OF SEABED**

Graduation thesis No.: 3373/KS

**Mentor:**

izr. prof. dr. Janko Logar

**Predsednik komisije:**

izr. prof. dr. Janko Logar

**Član komisije:**

izr. prof. dr. Marijan Žura

Ljubljana, 05. 03. 2014

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA

| Stran z napako | Vrstica z nap. | Namesto | Naj bo |
|----------------|----------------|---------|--------|
|----------------|----------------|---------|--------|

## IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisani Marko Andrejašič izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom  
»Analiza stanja veza 7 v Luki Koper s študijo možnosti poglobitve morskega dna«

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

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v digitalnem repozitoriju.

Ljubljana, 26.1.2014

Marko Andrejašič

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

|                         |   |
|-------------------------|---|
| <b>UDK:</b>             | <b>624.131(497.4Koper)(043.2)</b>   |
| <b>Avtor:</b>           | <b>Marko Andrejašič</b>   |
| <b>Mentor:</b>          | <b>izr. prof. dr. Janko Logar</b>   |
| <b>Naslov:</b>          | <b>Analiza stanja veza 7 v Luki Koper s študijo možnosti poglobitve morskega dna</b>                    |
| <b>Tip dokumenta:</b>   | <b>Diplomska naloga – univerzitetni študij</b>  |
| <b>Obseg in oprema:</b> | <b>110 str., 17 pregl., 112 sl.</b>   |
| <b>Ključne besede:</b>  | <b>poglobitev, koli, globoko temeljenje, Embedded pile row, Plaxis, obalna konstrukcija, Luka Koper</b> |

### **Izvleček**

Luka Koper se razvija že vse od leta 1957. Zaradi potrebe po konkurenčnosti konstantno teži k širjenju in optimizaciji obstoječe infrastrukture. Tudi sedaj, ko se pričakuje izgradnja tretjega pomola, je potrebno poskrbeti, da se bo tovor nemoteno pretovarjal na obstoječih pomolih. Ob prihodu novih ladij post-panamax generacije z globljim ugrezom, se je pojavila potreba po poglobitvi dna na kontejnerskemu terminalu iz 12 m na 15 m. Poglobitev morskega dna v bližini obalne konstrukcije ima nanjo tudi negativne vplive, ki jih je potrebno raziskati. V tej diplomski nalogi so predstavljeni različni načini 2D modeliranja obalne konstrukcije. Posebej natančno so obravnavani novi elementi v programu Plaxis, poimenovani »Embedded pile row« (EPR). Ob uporabi klasičnih linijskih končnih elementov se v 2D modelih zgodi, da se v točkah navideznega križanja vertikalnih in poševnih elementov notranje sile prenašajo kot posledica navideznega stika kolov. Z uporabo EPR elementov teh težav ni. Poleg tega so zelo primerni za modeliranje kolov, saj nam omogočajo natančno določitev poteka nosilnosti po plašču in pod nogo kola. Obnašanje EPR elementov je v prvem delu diplomske naloge primerjano z rezultati statičnega obremenilnega testa, ki je bil izveden v Luki Koper. Hkrati so bili analizirani tudi vplivi parametrov, ki jih moramo določiti pri uporabi EPR elementov. V drugem delu naloge so spoznanja iz prvega dela uporabljena na primeru analize poglobitve morskega dna iz 12 m na 15 m. V nadaljevanju je model z uporabo EPR elementov primerjan z modeliranjem kolov z linijskimi elementi in z modelom modeliranjem v programu Phase 2.0.

## **BIBLIOGRAPHIC – DOKUMENTALISTIC INFORMATION AND ANSTRACT**

**UDC:** **624.131(497.4Koper)(043.2)**

**Author:** Marko Andrejašič  
**Supervisor:** Prof. Janko Logar, Ph.D.  
**Title:** Analysis of berth 7 in the port of Koper with the feasibility study for the deepening of seabed  
**Document type:** Graduation Thesis – University studies  
**Notes:** 110 p., 17 tab., 112 fig.  
**Keywords:** deepening, piles, deep foundation, Embedded pile row, Plaxis, costal structures, Port of Koper

### **Abstract**

Since 1957 the Port of Koper has been constantly developing. Constant expansion and optimization of the existing infrastructure is essential due to the need for competitiveness. Because of the recent arrival of the new generation of post-panamax ships with deeper drafts, there is now the necessity to deepen the bottom of the seabed from 12 m to 15 m. The deepening of the seabed near coastal structures has also negative impacts on costal structures, which need to be examined. This thesis presents different ways of 2D modeling of coastal structures. Especially carefully is discussed the new element in the FE program Plaxis called "Embedded pile row". When using classical linear finite element it happens that in virtual crossing points of vertical and diagonal elements, internal forces are transferred between elements. This happens, because of the virtual unrealistic connection between them. In addition, the "Embedded pile row" element is very suitable for modeling piles. It allows determining the course of bearing capacity of the shaft and the bearing capacity of the toe of the pile. In the first part, the behavior of EPR element is compared to the results of static loading tests, which took place in the Port of Koper. At the same time, is it also analyzed the effect of different parameters that must be determined using EPR elements. In the second part of the thesis, knowledge earned in the first part is used for modeling the deepening of the pier 7A from 12 m to 15 m. Later the model with EPR elements is compared with basic line type element model.

### **Zahvala**

Rad bi se zahvalil vsem dosedanjim profesorjem, saj sem z njihovo pomočjo prišel do znanja s katerim sem napisal to diplomsko nalogo. Posebna zahvala gre prof. dr. Janku Logarju, ki se je izkazal za odličnega mentorja in mi je bil na razpolago vselej, ko sem tekom pisanja diplome potreboval nasvet.

Zahvalil bi se zaposlenim v podjetju Geoportal d.o.o., saj mi je znanje, ki so mi ga posredovali, pomembno pomagalo ob zaključku pisanja diplome.

Zahvalil bi se rad staršem Branku Andrejašiču in Martini Andrejašič Zazula, ki sta mi omogočila študij in me med študijem tudi podpirala, tako finančno kot moralno. Zahvaljujem se bratu Petru Andrejašiču, ki s svojo pozitivno energijo polepša marsikateri moj dan.

## Kazalo vsebine

|           |  |                                       |
|-----------|--|---------------------------------------|
| <b>1</b>  | <b>Uvod.....</b>   | <b>1</b>                              |
| <b>2</b>  | <b>Končni element Embedded pile row v programu Plaxis 2012 .....</b>               | <b>3</b>                              |
| 2.1       | Struktura EPR elementa in njegova povezava z mrežo končnih elementov .....         | 3                                     |
| 2.2       | Parametri EPR .....  | 5                                     |
| 2.3       | Nosilnost EPR elementov .....  | 8                                     |
| <b>3</b>  | <b>Hardening soil small model .....</b>  | <b>8</b>                              |
| 3.1       | Parametri HSsmall modela .....   | 9                                     |
| 3.2       | Dodatna parametra HSsmall modela ( $\gamma_{0,7}$ , $G_0$ ) .....                  | 9                                     |
| 3.3       | Merjenje $\gamma_{0,7}$ , $G_0$ .....  | 11                                    |
| 3.3.1     | Preiskava s seizmičnim dilatometrom .....  | 11                                    |
| <b>4</b>  | <b>Analiza vpliva parametrov na delovanje EPR elementov .....</b>                  | <b>14</b>                             |
| 4.1       | Vhodni podatki, ki so potrebni za analizo preiskave in njen potek.....             | 14                                    |
| 4.2       | Oprema in izvedba testa nosilnosti kolov v Luki koper .....                        | 14                                    |
| 4.3       | Modeliranje EPR elementa.....  | 17                                    |
| 4.3.1     | Potek nosilnosti po plašču.....  | 18                                    |
| <b>5</b>  | <b>Modeliranje zemljine, kolov in poteka preiskave.....</b>                        | <b>21</b>                             |
| 5.1       | Faze numerične analize .....   | <b>Napaka! Zaznamek ni definiran.</b> |
| <b>6</b>  | <b>Primerjalna analiza .....</b>   | <b>23</b>                             |
| 6.1       | Karakteristike zemljine osnovnega modela.....                                      | 23                                    |
| 6.2       | Osnovni model.....   | 23                                    |
| 6.3       | Model 333.....   | 23                                    |
| 6.4       | Model S4B4.....  | 23                                    |
| 6.5       | Model UnD.....   | 24                                    |
| 6.6       | Model HSsmall.....   | 24                                    |
| 6.7       | Model 15 točkovni.....   | 24                                    |
| 6.8       | Rezultati.....   | 24                                    |
| <b>7</b>  | <b>Nadaljnje primerjalne analize z uporabo HSsmall modela.....</b>                 | <b>26</b>                             |
| 7.1       | Model HSsmall.....   | 26                                    |
| 7.2       | Model HSsmall korekcija $G_0$ .....  | 26                                    |
| 7.3       | Model HSsmall $\gamma_{0,7}$ .....   | 26                                    |
| 7.4       | Model HSsmall S4B4 .....   | 27                                    |
| 7.5       | HSsmall 15 točkovni .....  | 28                                    |
| 7.6       | Rezultati.....   | 29                                    |
| 7.7       | Primerjava analize modela s koli, ki prevzemajo reakcijo in modela brez njih ..... | 30                                    |
| <b>8</b>  | <b>Končni model zemljine in EPR elementa .....</b>                                 | <b>31</b>                             |
| 8.1       | Določitev $G_0$ s seizmično dilatometriko preiskavo v Luki Koper .....             | 31                                    |
| 8.2       | Karakteristike končnega modela .....   | 32                                    |
| <b>9</b>  | <b>Prikaz poteka sile po plašču EPR elementa .....</b>                             | <b>35</b>                             |
| 9.1       | Obtežba 900 kN.....  | 35                                    |
| 9.2       | Obtežba 1800 kN.....   | 36                                    |
| 9.3       | Obtežba 2700 kN.....   | 36                                    |
| 9.4       | Obtežba 3600 kN.....   | 37                                    |
| 9.5       | Obtežba 4800 kN.....   | 38                                    |
| 9.6       | Obtežba 5500 kN – pride do porušitve.....  | 39                                    |
| <b>10</b> | <b>Uporaba linijskih in kontaktnih elementov za modeliranje kolov.....</b>         | <b>40</b>                             |
| 10.1      | Kontaktnelement .....  | 40                                    |



|           |  |                                       |
|-----------|--|---------------------------------------|
| 10.1.1    | Vpliv parametra $R_{inter}$ .....  | 41                                    |
| 10.1.2    | Vpliv virtualne debeline elementa.....                                       | 42                                    |
| <b>11</b> | <b>Analiza v Phase 2.0</b> .....   | <b>45</b>                             |
| 11.1      | Modeliranje v programu Phase 2.0.....  | 45                                    |
| 11.2      | Kontaktne elementi .....   | 45                                    |
| 11.3      | Rezultati analize Phase 2.0 .....  | 46                                    |
| <b>12</b> | <b>Poglobitev veza 7A</b> .....  | <b>48</b>                             |
| <b>13</b> | <b>Obremenitve</b> .....   | <b>50</b>                             |
| <b>14</b> | <b>Projektne pristopi</b> .....  | <b>51</b>                             |
| 14.1      | PP2.....   | 51                                    |
| 14.2      | PP3.....   | 51                                    |
| 14.3      | Analiza po projektne pristopu PP2 .....                                      | 51                                    |
| 14.3.1    | Osna sila .....  | 52                                    |
| 14.3.2    | Moment.....  | 53                                    |
| 14.3.3    | Prečna sila.....   | 53                                    |
| 14.4      | Prikaz spreminjanja notranjih sil med poglobitvijo.....                      | 54                                    |
| 14.5      | Notranje sile v horizontalni AB konstrukciji PP2 .....                       | 55                                    |
| 14.5.1    | Osna sila .....  | 55                                    |
| 14.5.2    | Moment.....  | 56                                    |
| 14.5.3    | Prečna sila.....   | 56                                    |
| 14.6      | Globalna stabilnost preverjena po PP3 .....                                  | 56                                    |
| 14.7      | Osna obremenitev kolov .....   | 57                                    |
| 14.8      | Komentar in analiza rezultatov MSN .....                                     | 61                                    |
| <b>15</b> | <b>MSU</b> .....   | <b>62</b>                             |
| 15.1.1    | Horizontalni pomiki pomolne konstrukcije.....                                | 63                                    |
| 15.1.2    | Vertikalni pomiki.....   | 64                                    |
| 15.2      | Ocena posebkov z rezultati statičnega obremenilnega testa.....               | 66                                    |
| <b>16</b> | <b>Analiza vpliva načina vpetja kolov na horizontalno konstrukcijo</b> ..... | <b>67</b>                             |
| 16.1      | Notranje sile v kolih modela s členkastim vpetjem.....                       | 67                                    |
| 16.1.1    | Osne sile .....  | 67                                    |
| 16.1.2    | Momenti .....  | 68                                    |
| 16.1.3    | Prečne sile.....   | 68                                    |
| 16.2      | Notranje sile v horizontalni konstrukciji modela s členkastim vpetjem.....   | 69                                    |
| 16.2.1    | Osne sile .....  | 69                                    |
| 16.2.2    | Momenti .....  | 69                                    |
| 16.2.3    | Prečne sile.....   | 70                                    |
| 16.3      | Globalna stabilnost modela s členkastim vpetjem.....                         | 70                                    |
| 16.4      | Komentar rezultatov .....  | 71                                    |
| <b>17</b> | <b>Vpliv poševnih kolov</b> .....  | <b>72</b>                             |
| 17.1      | Notranje sile v kolih pri modelu brez poševnih kolov .....                   | 72                                    |
| 17.1.1    | Osne sile .....  | 72                                    |
| 17.1.2    | Momenti .....  | 73                                    |
| 17.1.3    | Prečne sile.....   | 73                                    |
| 17.2      | Notranje sile v horizontalni konstrukciji modela brez poševnih kolov .....   | 74                                    |
| 17.2.1    | Osne sile .....  | <b>Napaka! Zaznamek ni definiran.</b> |
| 17.2.2    | Momenti .....  | 74                                    |
| 17.2.3    | Prečne sile.....   | 75                                    |
| 17.3      | Globalna stabilnost modela brez poševnih kolov .....                         | 75                                    |
| 17.4      | Komentar rezultatov .....  | 76                                    |
| 17.5      | Primerjava pomikov modela brez in s poševnimi koli .....                     | 77                                    |

|                  |   |            |
|------------------|---|------------|
| <b>18</b>        | <b>Vpliv zaledne konstrukcije .....</b>                                 | <b>79</b>  |
| 18.1             | Notranje sile v kolih .....   | 79         |
| 18.1.1           | Osne sile .....   | 80         |
| 18.1.2           | Momenti .....   | 80         |
| 18.1.3           | Prečne sile.....  | 81         |
| 18.2             | Notranje sile v horizontalni konstrukciji .....                         | 82         |
| 18.2.1           | Osne sile .....   | 82         |
| 18.2.2           | Momenti .....   | 82         |
| 18.2.3           | Prečne sile.....  | 83         |
| 18.3             | Globalna stabilnost .....   | 84         |
| 18.4             | Komentar rezultatov .....   | 84         |
| <b>19</b>        | <b>Primerjava z analizo v programu Phase 2.0 .....</b>                  | <b>85</b>  |
| 19.1             | Model brez poševnih kolov .....   | 85         |
| 19.2             | Notranje sile v kolih modela v programu Phase brez poševnih kolov ..... | 86         |
| 19.2.1           | Osne sile .....   | 86         |
| 19.2.2           | Momenti .....   | 87         |
| 19.2.3           | Prečne sile.....  | 87         |
| 19.2.4           | Globalna stabilnost modela v programu Phase brez poševnih kolov .....   | 88         |
| 19.3             | Model v Phase 2.0 s poševnimi koli.....                                 | 90         |
| 19.4             | Notranje sile v kolih v modelu s poševnimi koli.....                    | 91         |
| 19.4.1           | Momenti in prečne sile .....  | 91         |
| 19.5             | MSU .....   | 92         |
| 19.6             | Komentar rezultatov analize v programu Phase.....                       | 94         |
| <b>20</b>        | <b>Način izvedbe poglobitve z jeklenimi zagatnicami .....</b>           | <b>95</b>  |
| 20.1             | Obremenitve zagatnic .....  | 97         |
| 20.2             | Obremenitve v kolih - projektni pristop PP2.....                        | 98         |
| 20.2.1           | Osna sila .....   | 98         |
| 20.2.2           | Moment.....   | 99         |
| 20.2.3           | Prečna sila.....  | 99         |
| 20.3             | Prikaz spreminjanja notranjih sil med poglobitvijo.....                 | 100        |
| 20.4             | Varnost .....   | 101        |
| 20.5             | MSU pri modelu z jeklenimi zagatnicami.....                             | 102        |
| 20.5.1           | Točka Z na vrhu diafragme .....   | 102        |
| 20.6             | Kontrola nosilnosti zagatnic .....                                      | 104        |
| <b>21</b>        | <b>Zaključek.....</b>   | <b>106</b> |
| <b>Viri.....</b> |   | <b>108</b> |

## Kazalo slik

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| Slika 1:  | Pogled na Luko Koper iz zraka (Luka Koper).....   | 1  |
| Slika 2:  | Primer pomola na kolih kot v Luki Koper ( CUR, 2005: str. 73).....  | 2  |
| Slika 3:  | Razporeditev točk po EPR elementu (Plaxis Reference Manual, 2012: str. 31) .....  | 3  |
| Slika 4:  | Povezava EPR elementa z osnovno mrežo (Plaxis Reference Manual, 2012: str. 35)<br>.....                                 | 4  |
| Slika 5:  | Parametri, ki jih je potrebno definirati za EPR element .....   | 6  |
| Slika 6:  | Prikaz vzmeti - stika EPR elementa z osnovno mrežo končnih elementov (Plaxis<br>Reference Manual, 2012: str. 132) ..... | 7  |
| Slika 7:  | Elastična cona pod EPR (Plaxis Reference Manual, 2012: str. 132).....   | 8  |
| Slika 8:  | Padanje strižnega modula v odvisnosti od deformacije (Plaxis Material Models<br>Manual, 2012: str. 63).....             | 10 |
| Slika 9:  | Graf padanja strižnega modula, ki je upoštevan v programu Plaxis.....   | 11 |
| Slika 10: | Vrednost $\gamma_{0,7}$ je mogoče oceniti z »resonant column« testom (Žlender, 2003) .....                              | 11 |
| Slika 11: | Delovanje seizmičnega dilatometra (Monaco, Marchetti, 2007).....  | 12 |
| Slika 12: | Potrebna oprema za izvedbo seizmičnega dilatometrijskega preizkusa in slika iz<br>prakse (Logar, Robas, 2008).....      | 12 |
| Slika 13: | Slika izvedbe testa (Strniša, 2009).....  | 15 |
| Slika 14: | Rezultati statičnega obremenilnega testa (Strniša, 2009) .....  | 15 |
| Slika 15: | Rezultati dinamičnega obremenilnega testa (Strniša, 2009).....  | 16 |
| Slika 16: | Modeliranje kolov s "spojenima" EPR elementoma.....   | 19 |
| Slika 17: | Potek trenjske sile - obtežba 900 kN.....   | 20 |
| Slika 18: | Potek trenjske sile obtežba - 4800 kN.....  | 20 |
| Slika 19: | Model testa obnašanja kolov v programu Plaxis .....   | 22 |
| Slika 20: | Graf vplivov posameznih parametrov na pomik kola.....   | 25 |
| Slika 21: | Odvisnost $G/G_0$ ( $\gamma_{0,7}$ ) od indeksa plastičnosti (Plaxis Material Models Manual,<br>2012: str. 70).....     | 27 |
| Slika 22: | Potek indeksa plastičnosti po značilnem profilu tal v Luki Koper (Logar, 2009) ...                                      | 27 |
| Slika 23: | Primerjava vpliva parametrov HSsmall modela na pomike kola.....   | 29 |
| Slika 24: | Prikaz vpliva upoštevanja kolov, ki prevzamejo reakcijsko silo obremenjenega kola<br>natezni koli.....                  | 30 |
| Slika 25: | Rezultati seizmičnega dilatometrijskega testa v Luki Koper (Robas, Logar, 2008)..                                       | 32 |
| Slika 26: | Primerjava obnašanja končnega numeričnega modela z izmerjenimi vrednostmi ..  | 33 |
| Slika 27: | Primerjava obnašanja korigiranega končnega modela z izmerjenimi vrednostmi...   | 34 |
| Slika 28: | Potek trenjske sile po plašču, osne sile in točkovne sile pod nogo kola pri obtežbi<br>900 kN .....                     | 35 |
| Slika 29: | Potek trenjske sile po plašču, osne sile in točkovne sile pod nogo kola pri obtežbi<br>1800 kN .....                    | 36 |
| Slika 30: | Potek trenjske sile po plašču, osne sile in točkovne sile pod nogo kola pri obtežbi<br>2700 kN .....                    | 37 |
| Slika 31: | Potek trenjske sile po plašču, osne sile in točkovne sile pod nogo kola pri obtežbi<br>3600 kN .....                    | 38 |
| Slika 32: | Potek trenjske sile po plašču, osne sile in točkovne sile pod nogo kola pri obtežbi<br>4800 kN .....                    | 38 |
| Slika 33: | Potek trenjske sile po plašču, osne sile in točkovne sile pod nogo kola pri obtežbi<br>5500 kN .....                    | 39 |

|   |    |
|---|----|
| Slika 34: Prikaz konice kola brez podaljška kontaktnega elementa in s podaljšanim kontaktnim elementom (Plaxis Reference Manual, 2012: str. 39) .....     | 41 |
| Slika 35: Graf odvisnosti pomika od parametra $R_{inter}$ .....   | 42 |
| Slika 36: Analiza vpliva virtualne debeline na pomike kola.....   | 43 |
| Slika 37: Primerjava rezultatov analize z uporabo običajnega linijskega elementa z vmesnim elemntom in EPR elementa za modeliranje kolov.....             | 44 |
| Slika 38: Model testa kola v programu Phase 2.0 .....   | 45 |
| Slika 39: Analize odziva kolov s programoma Plaxis in Phase 2.0 z uporabo različnih modelov za modeliranje zemljine in kolov.....                         | 47 |
| Slika 40: Vertikalni pomiki [m] pri modelu v Phase 2.0 .....  | 47 |
| Slika 41: Model za analizo poglobitev veza 7A v programu Plaxis .....   | 48 |
| Slika 42: Model v programu Plaxis računska faza 0 in orientacija koordinatnega sistema ....   | 49 |
| Slika 43: Model v programu Plaxis računska faza vgradnje kolov.....   | 49 |
| Slika 44: Model v programu Plaxis računska faza končne poglobitve na 15m .....  | 50 |
| Slika 45: Oblika deformacije konstrukcije pri obtežbi v MSN - PP2.....  | 52 |
| Slika 46: Osa obremenitev kolov MSN - PP2.....  | 53 |
| Slika 47: Momenti pri obremenitvi MSN - PP2.....  | 53 |
| Slika 48: Prečne sile pri obremenitvi MSN - PP2.....  | 54 |
| Slika 49: Osne sile v horizontalni konstrukciji pri obremenitvi MSN - PP2.....  | 55 |
| Slika 50: Momenti v horizontalni konstrukciji pri obremenitvi MSN - PP2 .....   | 56 |
| Slika 51: Prečne sile v horizontalni konstrukciji pri obremenitvi MSN - PP2 .....   | 56 |
| Slika 52: Pomiki pri doseženi varnosti 1,25 – PP3 .....   | 57 |
| Slika 53: Deformirana lega konstrukcije pri varnosti 1,25 - PP3.....  | 57 |
| Slika 54: Potek osne sile v dveh kolih s prekoračeno nosilnostjo.....   | 60 |
| Slika 55: Potek osne sile v kolih kjer obstaja bojazen o prekoračeni nosilnosti ob upoštevanju nesočasnega delovanja obtežbe dvigal in kontejnerjev ..... | 61 |
| Slika 56: Položaj točk označene s črkami od A do G, ki so jim bili določeni pomiki.....   | 62 |
| Slika 57: Slika skupnih pomikov zaradi poglobitve iz 14 m na 15 m.....  | 63 |
| Slika 58: Horizontalni pomiki obravnavanih točk v odvisnosti od poteka gradnje .....  | 64 |
| Slika 59: Podrobnejši prikaz horizontalnih pomikov v času poglobitve in po njih .....   | 64 |
| Slika 60: Vertikalni pomiki obravnavanih točk v odvisnosti od poteka gradnje .....  | 65 |
| Slika 61: Podrobnejši prikaz vertikalnih pomikov v fazah izkopa in po njih .....  | 65 |
| Slika 62: Osne sile v kolih pri obremenitvi MSN - PP2 - členkasto vpetje .....  | 67 |
| Slika 63: Momenti v kolih pri obremenitvi MSN - PP2 - členkasto vpetje .....  | 68 |
| Slika 64: Prečne sile v kolih pri obremenitvi MSN - PP2 - členkasto vpetje .....  | 69 |
| Slika 65: Osne sile v horizontalni konstrukciji pri obremenitvi MSN - PP2 - členkasto vpetje .....  | 69 |
| Slika 66: Momenti v horizontalni konstrukciji pri obremenitvi MSN - PP2 - členkasto vpetje .....  | 70 |
| Slika 67: Prečne sile v horizontalni konstrukciji pri obremenitvi MSN - PP2 - členkasto vpetje.....   | 70 |
| Slika 68: Pomiki pri doseženi varnosti 1,25 , obremenitev MSN – PP3 – členkasto vpetje...   | 71 |
| Slika 69: Model brez poševnih kolov.....  | 72 |
| Slika 70: Osne sile v kolih pri modelu brez poševnih kolov.....   | 73 |
| Slika 71: Momenti v kolih pri modelu brez poševnih kolov.....   | 73 |
| Slika 72: Prečne sile v kolih pri modelu brez poševnih kolov .....  | 74 |
| Slika 73: Osa sila v horizontalni konstrukciji - model brez poševnih kolov.....   | 74 |
| Slika 74: Momenti v horizontalni konstrukciji - model brez poševnih kolov.....  | 75 |
| Slika 75: Prečna sila v horizontalni konstrukciji - model brez poševnih kolov .....   | 75 |
| Slika 76: Osa sila v kolu tik pred porušitvijo .....  | 76 |

|  |     |
|--|-----|
| Slika 77: Pomiki pri doseženi končni varnosti, obremenitev MSN – PP2 – brez poševnih kolov .....                 | 76  |
| Slika 78: Primerjava vertikalnih pomikov v točkah A,B in D za model z in brez kolov.....                         | 77  |
| Slika 79: Primerjava horizontalnih pomikov v točkah A,B in D za model z in brez kolov....                        | 78  |
| Slika 80: Model obalne konstrukcije brez zaledja .....   | 79  |
| Slika 81: Osne sile v kolih – desno se nahaja model modeliran s celotno konstrukcijo.....                        | 80  |
| Slika 82: Momenti v kolih – desno se nahaja model modeliran s celotno konstrukcijo.....                          | 80  |
| Slika 83: Prečne sile v kolih – desno se nahaja model modeliran s celotno konstrukcijo .....                     | 81  |
| Slika 84: Osne sile v horizontalni konstrukciji – desno se nahaja model modeliran s celotno konstrukcijo .....   | 82  |
| Slika 85: Momenti v horizontalni konstrukciji – desno se nahaja model modeliran s celotno konstrukcijo .....     | 82  |
| Slika 86: Prečne sile v horizontalni konstrukciji – desno se nahaja model modeliran s celotno konstrukcijo ..... | 83  |
| Slika 87: Pomiki pri doseženi varnosti 1,25, obremenitev MSN – PP3.....  | 84  |
| Slika 88: Model v programu Phase 2.0 brez poševnih kolov.....  | 85  |
| Slika 89: Osne sile v kolih - model brez poševnih kolov.....   | 87  |
| Slika 90: Momenti v kolih - model v programu Phase in Plaxis – model brez poševnih kolov .....                   | 87  |
| Slika 91: Prečne sile v kolih - model v programu Phase in Plaxis – model brez poševnih kolov .....               | 88  |
| Slika 92: Faza dodatnega koraka za preračun varnosti .....   | 88  |
| Slika 93: Varnost zadnjega koraka poglobitve modeliranega v programu Phase 2.0.....                              | 89  |
| Slika 94: Pomiki pri izčrpani varnosti - primer z zaledno obtežbo.....   | 89  |
| Slika 95: Model v Phase 2.0 z upoštevanjem poševnih kolov .....  | 90  |
| Slika 96: Osne sile v kolih pri modelu v programu Phase s poševnimi koli.....                                    | 91  |
| Slika 97: Momenti v kolih v modelu v programu Phase in Plaxis – model z poševnimi kolov .....                    | 92  |
| Slika 98: Prečne sile v kolih v modelu v programu Phase in Plaxis – model z poševnimi kolov .....                | 92  |
| Slika 99: Pomiki v zadnji fazi izkopa na -15 m .....   | 93  |
| Slika 100: Grafa pomikov točke A v odvisnosti od faze izkopa.....  | 93  |
| Slika 101: Geometrija izbranih zagatnic .....  | 96  |
| Slika 102: Računski model izvedbe z zagatnicami .....  | 97  |
| Slika 103: Maksimalne osne sile v zagatnicah.....  | 97  |
| Slika 104: Prečne sile v zagatnicah .....  | 98  |
| Slika 105: Potek momentov v zagatnicah .....   | 98  |
| Slika 106: Osna obremenitev kolov MSN - PP2 – model z zagatnicami.....   | 99  |
| Slika 107: Momenti pri obremenitvi MSN - PP2 – model z zagatnicami.....  | 99  |
| Slika 108: Prečne sile pri obremenitvi MSN - PP2 – model z zagatnicami.....                                      | 100 |
| Slika 109: Pomiki pri varnosti 1,25.....   | 101 |
| Slika 110: Graf pomikov točke Z v odvisnosti od računskega koraka.....   | 102 |
| Slika 111: Horizontalni pomiki obravnavanih točk v odvisnosti od poteka gradnje – model z zagatnicami .....      | 103 |
| Slika 112: Vertikalni pomiki obravnavanih točk v odvisnosti od poteka gradnje – model z zagatnicami .....        | 104 |

## Kazalo preglednic

|   |     |
|---|-----|
| Preglednica 1: Rezultati statičnega obremenilnega testa (Strniša, 2009).....                                  | 16  |
| Preglednica 2: Do leta 2008 opravljeni obremenitveni testi kolov v Luki Koper.....                            | 16  |
| Preglednica 3: Karakteristike EPR elementa .....  | 20  |
| Preglednica 4: Karakteristike osnovnega HS modela zemljine .....  | 23  |
| Preglednica 5: Dodatne karakteristike HSsmall modela .....  | 26  |
| Preglednica 6: Končne togostne in strižne karakteristike zemljine pri HSsmall modelu .....                    | 32  |
| Preglednica 7: Končne karakteristike EPR elementa .....   | 32  |
| Preglednica 8: Primerjava računskih vrednosti z izmerjenimi .....   | 34  |
| Preglednica 9: Karakteristike kontaktnega elementa »interface« .....  | 46  |
| Preglednica 10: Karakteristike kontaktnega elementa $t_i = 0,01$ .....  | 46  |
| Preglednica 11: Spremembe notranjih sil zaradi poglobitve morskega dna – maksimalne vrednosti .....           | 54  |
| Preglednica 12: Spremembe notranjih sil zaradi poglobitve morskega dna v prvem kolu obalne konstrukcije ..... | 55  |
| Preglednica 13: Obremenitve in nosilnost posameznih kolov .....   | 59  |
| Preglednica 14: Karakteristike zagatnice Larssen 603.....   | 96  |
| Preglednica 15: Spremembe notranjih sil zaradi poglobitve morskega dna – maksimalne vrednosti .....           | 100 |
| Preglednica 16: Spremembe notranjih sil zaradi poglobitve morskega dna v prvem kolu obalne konstrukcije ..... | 101 |
| Preglednica 17: Nosilnost zagatnic (Gooimeer, 2010).....  | 104 |

## 1 Uvod

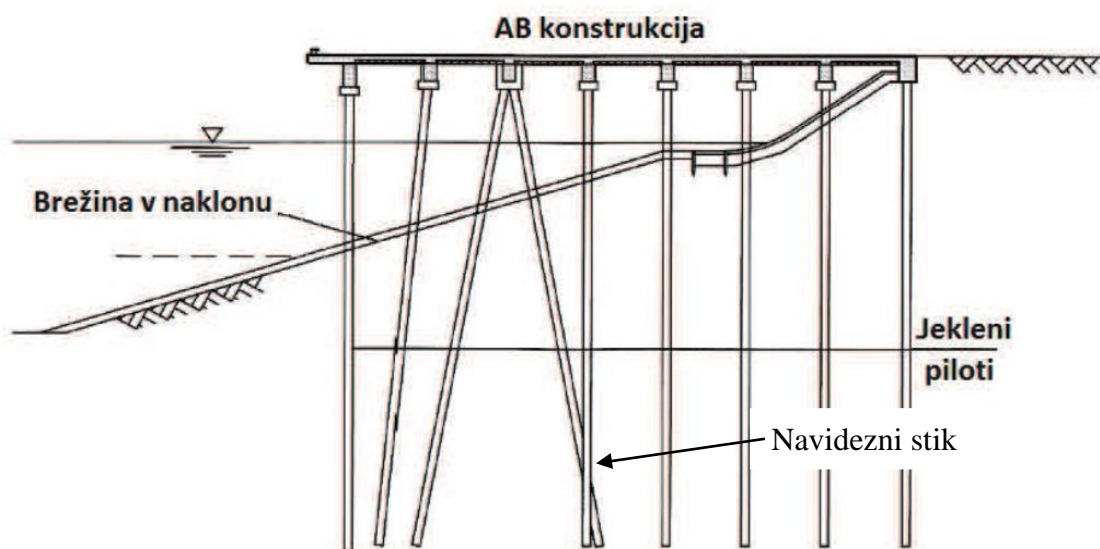
Luka Koper je pristanišče v Jadranskem morju (Slika 1) z izjemno geografsko lego, ki predstavlja potencialno prednost pred drugimi lukami v tem morju. Gre namreč za luko, ki je v tem morju najbližje centralni Evropi. Luka Koper se razvija že vse od leta 1957. Zaradi potrebe po konkurenčnosti se mora konstanto širiti. Tako je tudi sedaj, ko se pričakuje izgradnja tretjega pomola. Do takrat pa je prav tako potrebno poskrbeti, da se bo tovor nemoteno pretovarjal na obstoječi infrastrukturi. Tako se je, zaradi novih ladij post-Panamax generacije z globljim ugrezom, pojavila potreba po poglobitvi morskega dna iz 12 na 15 m. Vsaka poglobitev morskega dna v bližini obalne konstrukcije pa ima nanjo lahko tudi negativne vplive, ki jih je potrebno raziskati.



**Slika 1: Pogled na Luko Koper iz zraka (Luka Koper)**

Pomoli v Luki Koper so praviloma temeljeni na dolgih jeklenih kolih, ki nosilnost zagotavljajo s pomočjo trenja ob plašču in nosilnostjo pod nogo kola, ki sega do bolj nosilnega prodnatega sloja na koti cca. 40 m pod morsko gladino. Koli so razvrščeni v različnih rastrih, odvisno od potrebe po nosilnosti in zemljine. Rastrov ne sestavljajo samo vertikalni koli, ampak tudi poševni koli. Poševni koli v kombinaciji z vertikalnimi predstavljajo poseben problem za analizo z 2D programi z metodo končnih elementov. Kole v

2D analizi praviloma modeliramo z linijskimi elementi, ki jim dodamo kontaktne elemente. Linijski elementi določijo togost kola, medtem ko kontaktni elementi opišejo stik med zemljino in kolom. V točkah navideznih stikov (Slika 2) se z uporabo običajnih končnih elementov zgodi, da se notranje sile med elementi prenašajo kot posledica nerealne povezave med elementi v točki navideznega stika. Poleg tega je problematično tudi določanje vrednosti togosti kontaktnih elementov.



Slika 2: Primer pomola na kolih kot v Luki Koper ( CUR, 2005: str. 73)

Problem križanja kolov je rešljiv s 3D analizo z uporabo ustreznega programa (npr. Midass GTS in Plaxis 3D). Pri temu se je potrebno zavedati dejstva, da so 3D modeli veliko večji od 2D modelov, težje jih je sestaviti, čas preračuna je daljši in več spomina je potrebno za shranjevanje modelov. Zato je smiselno poiskati rešitev, ki bi z ravninsko analizo zadovoljivo natančno rešila opisano težavo.

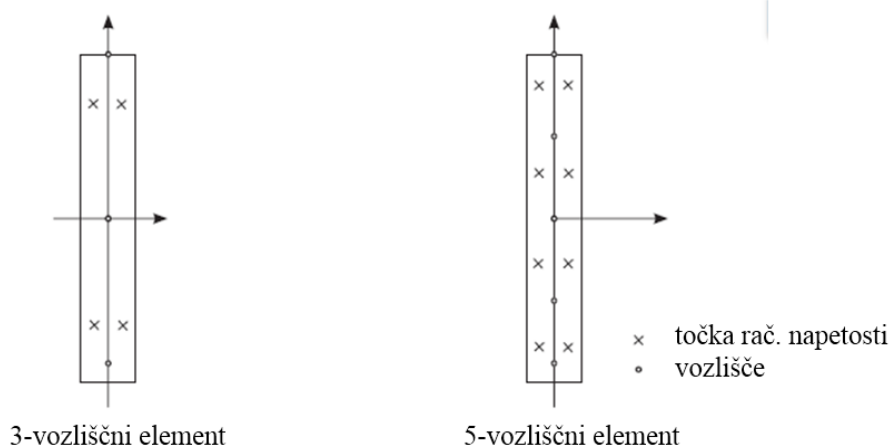


## 2 Končni element Embedded pile row v programu Plaxis 2012

Ustrezno rešitev je mogoče najti v programu Plaxis 2D 2012. V verziji 2012 je v programu omogočena uporaba nove vrste končnega elementa poimenovanega "Embedded pile row". Kakor že samo ime pove gre za element, ki predstavlja niz vgrajenih kolov.

### 2.1 Struktura EPR elementa in njegova povezava z mrežo končnih elementov

EPR<sup>1</sup> element je sestavljen iz linijskih elementov s tremi prostostnimi stopnjami, in sicer dvema pomikoma  $u_x$ ,  $u_y$  ter zasukom  $\delta_z$ . Glede na to, ali zemljino modeliramo s šest ali petnajst vozliščnimi končnimi elementi, je posamezen linijski EPR element opisan s tremi ali petimi vozlišči. Upogib elementa je preračunan kot posledica upogibne in strižne obremenitve, osna deformacija pa je posledica osne obremenitve. Notranje sile se izračunajo iz napetosti v Gaussovih točkah, ki so z oznako x označene na spodnji sliki (Slika 3) in nato ekstrapolirane po celotnem linijskem elementu. (Reference Manual – Plaxis 2012)

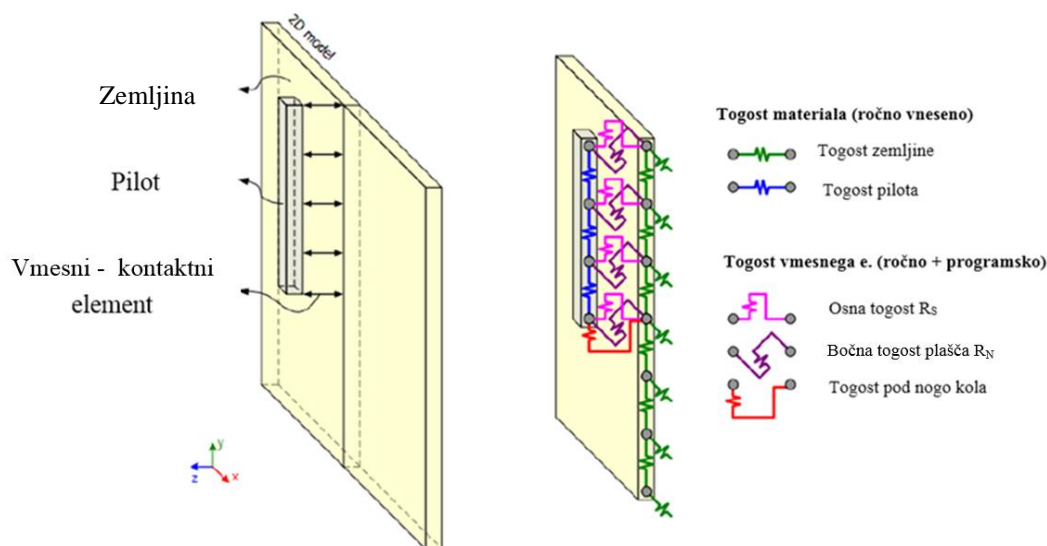


Slika 3: Razporeditev točk po EPR elementu (Plaxis Reference Manual, 2012: str. 31)

Element EPR je drugačen od njemu podobnih linijskih elementov predvsem zaradi tega, ker ni neposredno del ravninske mreže končnih elementov, ampak je preko treh vrst vzmeti (osnih, bočnih in ene spodnje) povezan z mrežo končnih elementov (Slika 4). Vzmeti opisujejo interakcijo, ki jo ima EPR element z okoliško zemljino. Tri različne vrste vzmeti omogočajo, da opišemo obnašanje kola napram zemljini. Tako lahko z dvema skupinama

<sup>1</sup> EPR - kratica za »Embedded pile row«, enako tudi v nadaljevanju

vzmeti v področju plašča in eno vzmetjo pod nogo kola določimo togost in nosilnost stika kol-zemljina. Velja izpostaviti tudi dejstvo, da mreža končnih elementov zemljine tako ni prekinjena z EPR elementi. To omogoča, da se zemljina lahko deformira tudi preko položaja linijskega elementa. Po drugi strani je na tak način zanemarljiv vpliv zgoščevanja zemljine, ki nastopi ob zabijanju kolov. Pomembna značilnost tega elementa je tudi, da se v točki navideznega stika z drugim linijskim elementom notranje sile in momenti ne prenašajo iz enega na drugega. Posebnost pri tem je vrhnja točka EPR elementa. Tej točki je potrebno določiti, kako je povezana z osnovno mrežo (togo, členkasto ali prosto). Če je na mestu vrhnje točke linijski element, ta točka opiše stik med EPR in linijskim elementom, sicer pa stik med EPR elementom in zemljino. (Reference Manual - Plaxis 2012)



**Slika 4: Povezava EPR elementa z osnovno mrežo (Plaxis Reference Manual, 2012: str. 35)**

Položaj elementa v numeričnem modelu enostavno vrišemo z izbiro "Embedded pile row" v orodni vrstici in mu določimo koordinate. V nadaljevanju mu lahko določimo lastnosti in način povezave v zgornji točki. (Reference Manual - Plaxis 2012)

## 2.2 Parametri EPR

EPR opišemo z naslednjimi parametri, ki jih podamo v namenskem oknu (Slika 5):  $E$ ,  $\gamma$ , vrsta prereza,  $I$ ,  $A$ ,  $L_{razmak}$ ,  $T_{top}$ ,  $T_{bot}$ ,  $F_{max}$ , *Rayleigh*  $\alpha$  in  $\beta$  ter z vmesnim togostnim faktorjem  $vzmeti$ .

- $E$  modul elastičnosti in  $\gamma$  specifična teža EPR elementa
- Pri vrsti lahko izbiramo med kvadratnim, okroglim ali cevničnim tipom elementa ter prerezu določimo dimenzije: širino ali premer in debelino
- Vztrajnostni moment  $I$  in prečni prerez  $A$  se avtomatsko preračunata
- $L_{razmak}$  predstavlja razmak med koli v smeri normale (pravokotno) na modelirano ravnino
- $T_{top}$ ,  $T_{bot}$  [kN/m] sta karakteristiki, ki določata potek največje dovoljene sile, ki jo lahko prevzame plašč kola. S  $T_{top}$  določimo maksimalno vrednost trenjske sile na vrhu kola, s  $T_{bot}$  pa vrednost ob nogi kola. Tako je potek mejne nosilnosti plašča lahko le linearen.
- $F_{max}$  [kN] je mejna nosilnost noge kola
- *Rayleigh*  $\alpha$  in  $\beta$  sta parametra dušenja, ki sta pomembna pri dinamičnem obnašanju
- Togostni faktorji ISF so faktorji, s katerimi lahko vplivamo na togost stika med zemljino in linijskim elementom

| Material set                  |                   |                                     |
|-------------------------------|-------------------|-------------------------------------|
| Identification                |                   | EPR                                 |
| Comments                      |                   |                                     |
| Colour                        |                   | RGB 100, 179, 71                    |
| Properties                    |                   |                                     |
| E                             | kN/m <sup>2</sup> | 210,0E6                             |
| γ                             | kN/m <sup>3</sup> | 78,00                               |
| Pile type                     |                   | Predefined                          |
| Predefined pile type          |                   | Circular tube                       |
| Diameter                      | m                 | 0,5080                              |
| Thickness                     | m                 | 8,000E-3                            |
| A                             | m <sup>2</sup>    | 0,01257                             |
| I                             | m <sup>4</sup>    | 0,3928E-3                           |
| L <sub>spacing</sub>          | m                 | 9,000                               |
| Rayleigh α                    |                   | 0,000                               |
| Rayleigh β                    |                   | 0,000                               |
| Skin resistance (linear)      |                   |                                     |
| T <sub>top, max</sub>         | kN/m              | 0,000                               |
| T <sub>bot, max</sub>         | kN/m              | 163,0                               |
| Base resistance               |                   |                                     |
| F <sub>max</sub>              | kN                | 1615                                |
| Interface stiffness factor    |                   |                                     |
| Default values                |                   | <input checked="" type="checkbox"/> |
| Axial skin stiffness factor   |                   | 0,2895                              |
| Lateral skin stiffness factor |                   | 0,2895                              |
| Pile base stiffness factor    |                   | 2,895                               |

Slika 5: Parametri, ki jih je potrebno definirati za EPR element

Nosilnost in togost elementa sta opisana z vmesnimi elementi. Obnašanje vmesnih elementov je opisano z elastičnim-plastičnim obnašanjem. Do elastičnega obnašanja pride pri majhnih diferenčnih pomikih med zemljino in linijskimi elementi, do plastičnega pa pride pri večjih trajnih diferenčnih pomikih. Vmesni element se obnaša elastično dokler je  $t_s < T_{max}$ , kjer je  $t_s$  strižna (trenjska) sila na vmesni element,  $T_{max}$  pa je mejna strižna sila v obravnavani točki (Reference Manual - Plaxis 2012). Togost vmesnih elementov (Slika 6) je določena z naslednjimi enačbami:

$$R_S = ISF_{RS} * G_{zemljine} / L_{razmak}$$

$$R_N = ISF_{RN} * G_{zemljine} / L_{razmak}$$

$$R_{KF} = ISF_{KF} * (G_{zemljine} * R_{ek}) / L_{razmak}$$

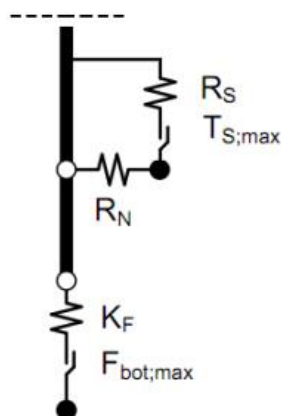
Kjer je  $G_{zemljine}$  strižna togost zemljine,  $R_{ek} = Dek/2$  ekvivalentni radij kola,  $L_{razmak}$  je razdalja med koli, faktorji ISF so izračunani po spodnjih enačbah in veljajo za statično osno obremenjene kole, kjer je zemljina modelirana s HSsmall modelom (poglavje 3) in je nivo podtalnice na površini. Lahko pa faktorje ročno vnesemo, ko vnašamo karakteristike EPR elementa. Posamezni vrsti vzmeti lahko določimo drugačen faktor. Tako so ISF faktorji med seboj ločeni z različnimi indeksi, ki so predstavljeni na spodnji sliki (Slika 6).

$$ISF_{RS} = 2,5 * (L_{razmak} / Dek)^{-0,75}$$

$$ISF_{RN} = 2,5 * (L_{razmak} / Dek)^{-0,75}$$

$$ISF_{KF} = 25 * (L_{razmak} / Dek)^{-0,75}$$

$$D_{eq} = \sqrt{\frac{12EI}{EA}}$$

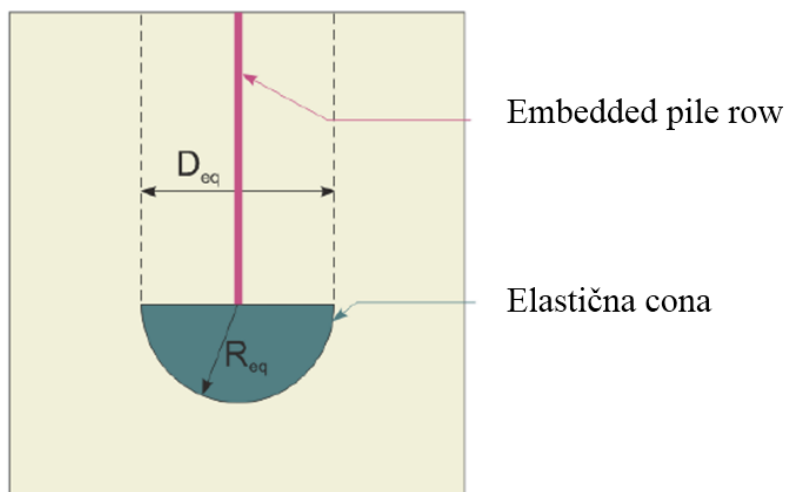


$T_{S,max}$  = maksimalna osna sile v določeni točki

$F_{bot,max}$  = maksimalna sila pod nogo kola

**Slika 6: Prikaz vzmeti - stika EPR elementa z osnovno mrežo končnih elementov (Plaxis Reference Manual, 2012: str. 132)**

Značilnost EPR je tudi avtomatsko generirana elastična cona premera  $D_{eq}$  okoli konice elementa (Slika 7). Tam program privzame elastično obnašanje (izključi možnost tečenja okoliške zemljine), tako da je mogoče doseči podano nosilnost kola. (Reference Manual - Plaxis 2012).



Slika 7: Elastična cona pod EPR (Plaxis Reference Manual, 2012: str. 132)

Omeniti velja tudi, da EPR element lahko prenaša tudi obtežbo, ki ne deluje v osni smeri elementa, vendar so po navedbah razvijalcev programa Plaxis rezultati vprašljivi in jih je potrebno vzeti z nekoliko večjo rezervo.

### 2.3 Nosilnost EPR elementov

Nosilnost EPR elementov se določi z enačbo (Reference Manual - Plaxis 2012):

$$N_{EPR} = F_{bot, max} + 0,5 * L_{EPR} * (T_{Top, max} + T_{Bot, max})$$

Pri tem igra pomembno vlogo parameter  $L_{razmak}$ , ki predstavlja razdaljo med koli v smeri normale na analizirano ravnino končnih elementov. Nosilnost elementa je namreč reducirana z razdaljo med koli. V praksi to pomeni, da določimo nosilnost EPR elementu npr.  $N_{EPR} = 1000 \text{ kN}$  in  $L_{razmak} = 4 \text{ m}$ , posledično porušitev nastopi, ko se v elementu pojavi sila 250 kN/m. To pomeni, da če želimo določiti dejansko silo v EPR elementu moramo slednjo pomnožiti z razdaljo med elementi v smeri normale na ravnino modeliranja. Drugače povedano, če v prej omenjenem primeru rezultat analize pokaže osno silo 200 kN/m je potrebno to ročno pomnožiti še z razdaljo med koli 4 m in tako dobimo dejansko obremenitev kola 800 kN.

## 3 Hardening soil small model

Tekom analize obnašanja kolov se je kot zelo pomemben dejavnik pri preračunu pomikov izkazala uporaba HSsmall modela. HSsmall model je eden izmed modelov opisa obnašanja zemljine, ki jih omogoča program Plaxis. Pri tem modelu obnašanja zemljine je upoštevana odvisnost med deformacijo in strižnim modulom zemljine in tako predstavlja nadgradnjo HS modela.

### 3.1 Parametri HSsmall modela

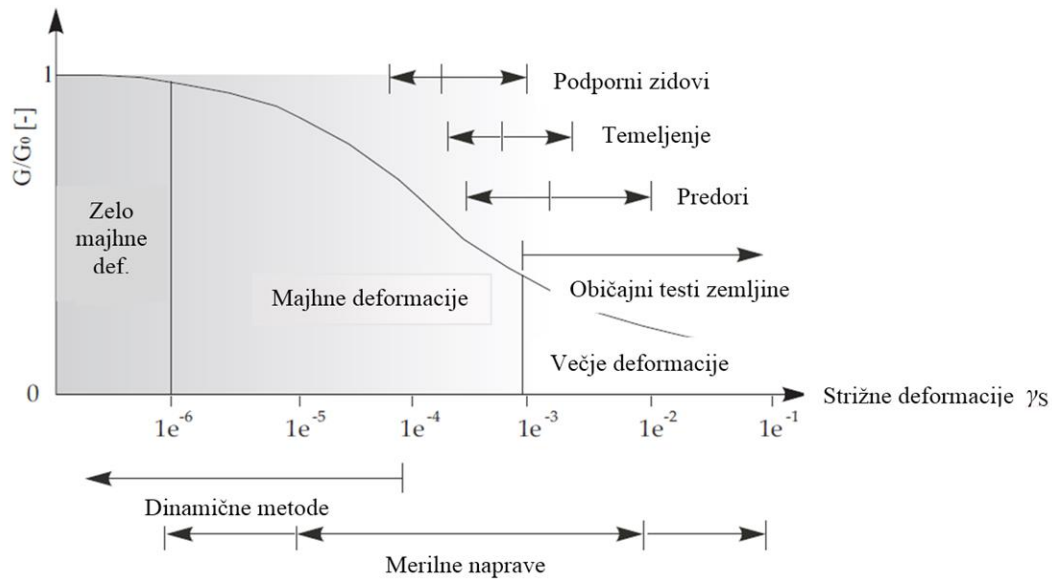
V primerjavi z Mohr-Coulombovim modelom je HS model zmožen natančneje opisati obnašanje zemljine. HS model se od MC modela razlikuje predvsem po zmožnosti povečevanja togostnih parametrov zemljine na račun povečanja njene obremenitve ter po upoštevanju različnih elastičnih modulov zemljine v primeru njenega obremenjevanja, oz. razbremenjevanja. Tako je vse togostne parametre potrebno podati pri referenčni sferni napetosti ( $p^{ref}$ ) 100 kPa, oz. podati referenčno sferno napetost pri kateri so določeni moduli.

Hsmall model je v osnovi enak HS modelu, vendar je pri HSsmall treba definirati tudi parametra  $G_0$ ,  $\gamma_{0,7}$ , ki opisujeta obnašanje zemljine pri majhnih deformacijah. Zemljini, ki je modelirana s tem modelom, je potrebno določiti togostne parametre:  $E_{oed}$ ,  $E_{50}$ ,  $E_{ur}$ ,  $G_0$ ,  $\gamma_{0,7}$  in trdnostne parametre:  $c$ ,  $\phi$ , ter parameter plastičnih deformacij  $\psi$ . (Reference Manual - Plaxis 2012)

- togostni parametri:  $E_{oed}$  – edometrski modul,  $E_{50}$  – modul dobljen pri triaksialnem testu pri 50% nosilnosti,  $E_{ur}$  – razbremenilni modul ( $E_{ur} \approx 3 E_{50}$ ),  $m$  – poda odvisnost togostnih faktorjev od nivoja obremenitve in znaša okoli 0,5 za trdne sloje in do 1 za mehke sloje,  $G_0$  – strižni modul pri majhnih deformacijah in  $\gamma_{0,7}$  – deformacija pri kateri pade  $G$  na 72,2% vrednosti  $G_0$ .
- trdnostna parametra  $c$  – kohezija,  $\phi$  – strižni kot
- $\psi$  – parameter plastičnih deformacij (kot razmikanja).

### 3.2 Dodatna parametra HSsmall modela ( $\gamma_{0,7}$ , $G_0$ )

HSsmall je nadgradnja HS modela zaradi možnosti natančnejšega določevanja togosti zemljine pri majhnih deformacijah in posledično natančnejšega izračuna pomikov, dobljenih z numerično analizo. Zavedati se je potrebno, da strižni modul pada s povečevanjem deformacij, kar prikazuje spodnja slika (Slika 8).



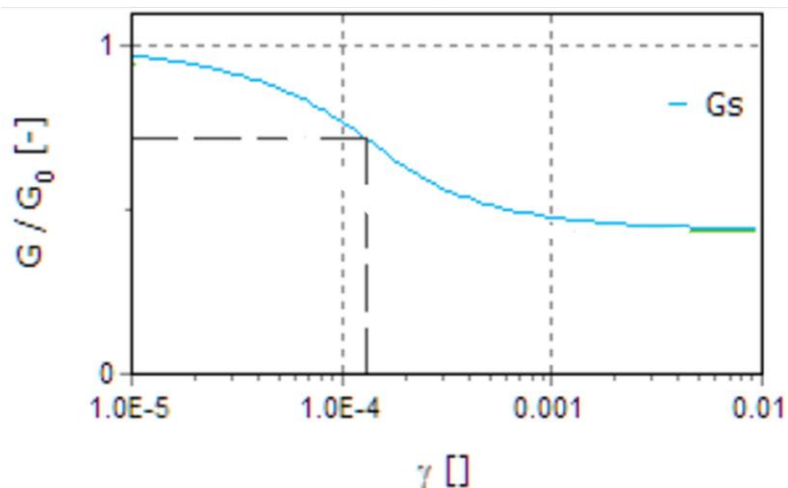
**Slika 8: Padanje strižnega modula v odvisnosti od deformacije (Plaxis Material Models Manual, 2012: str. 63)**

Iz slike je razvidno, da je strižni modul, ki ga dobimo s standardnimi preiskavami, lahko tudi za nekajkrat manjši od dejanskega strižnega modula pri majhnih deformacijah. HSsmall omogoča modeliranje strižnega modula kot funkcijo odvisno od parametrov  $\gamma_{0,7}$ ,  $G_0$ . Enačba, ki opisuje razmerje med  $G$  in  $G_0$ , je podana spodaj, primer funkcije, ki opisuje to razmerje, je prikazan na prejšnji sliki (Slika 8). Po definiciji je  $G_0$  strižni modul pri zelo majhnih deformacijah  $\gamma \approx 0$ . Temu priča tudi graf razmerja  $G/G_0$  (Slika 8), saj je pri zelo majhnih deformacijah vrednost  $G/G_0 = 1$ . Pri večjih deformacijah se vrednost strižnega modula približa vrednosti, ki jih lahko izmerimo tudi s standardnimi preiskavami.

V programu Plaxis 2012 je odvisnost strižnega modula od deformacij določena z grafom, predstavljenim na sliki spodaj (Slika 9). Krivulja vrednosti  $G_s$  predstavlja vrednost strižnega modula pri določeni deformaciji.

$$\tau = G_s \gamma = \frac{G_0 \gamma}{1 + 0.385 \frac{\gamma}{\gamma_{0.7}}}$$





Slika 9: Graf padanja strižnega modula, ki je upoštevan v programu Plaxis

### 3.3 Merjenje $\gamma_{0,7}$ , $G_0$

Karakteristike  $\gamma_{0,7}$ ,  $G_0$  lahko v laboratoriju pridobimo z nekaterimi naprednimi raziskavami (Slika 10). Vrednost  $G_0$  je izmerljiva tudi na lokaciji s seizmičnim dilatometrom, seizmičnim penetrometrom in geoseizmičnimi meritvami.

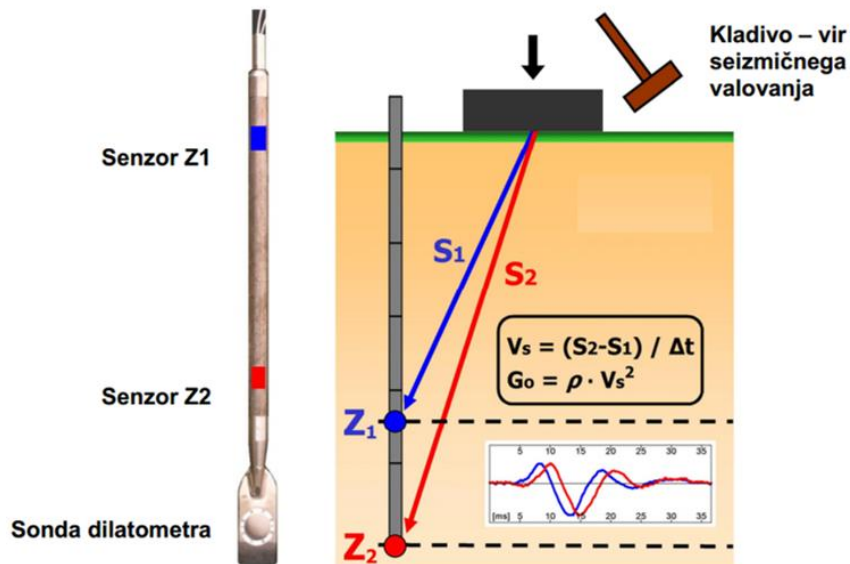


Slika 10: Vrednost  $\gamma_{0,7}$  je mogoče oceniti z »resonant column« testom (Žlender, 2003)

#### 3.3.1 Preiskava s seizmičnim dilatometrom

V Sloveniji so bile do danes že izvedene nekatere preiskave s seizmičnim dilatometrom. V osnovi gre za navaden dilatometer, ki ima na sebi pritrjena še dva senzorja v razmaku 50 cm. Senzorja zaznavata strižno valovanje, ki ga namensko povzročimo na površini. Preiskava poteka tako, da na vsakih 50 cm globine izvedemo meritve. Meritev poteka tako, da na

površini z nihalnimi klavirami povzročimo strižno valovanje, nato pa s senzorji in elektroniko izmerimo čas, ki ga je valovanje potrebovalo, da doseže senzorja (Slika 11). Poleg dilatometra sta za izvedbo raziskave tako potrebna še dva senzorja, vmesnik za vrednotenje rezultatov in spominska enota - računalnik (Slika 12).



Slika 11: Delovanje seizmičnega dilatometra (Monaco, Marchetti, 2007)

Ko je znan čas, ki ga je valovanje potrebovalo, da doseže senzorje in razdalja od vira valovanja do senzorja, lahko z enačbo  $v_s = (S_2 - S_1) / \Delta t$  izračunamo hitrost valovanja. Rezultat analize je kontinuiran profil hitrosti strižnega valovanja po zemljini. Z enačbo  $G_0 = \rho \cdot v_s^2$ , kjer je  $\rho$  gostota materiala,  $v_s$  pa hitrost strižnega valovanja, dobimo vrednost  $G_0$  - strižni modul pri majhnih deformacijah.



Slika 12: Potrebna oprema za izvedbo seizmičnega dilatometrijskega preizkusa in slika iz prakse (Logar, Robas, 2008)

Prednost tega načina merjenja karakteristik je tudi ta, da dobimo tako dilatometrski modul kot  $G_0$ . Preiskave s seizmičnim dilatometrom so bile izvedene tudi na področju Luke Koper, rezultati raziskav so bili uporabljeni za modeliranje zemljine in so predstavljeni v nadaljevanju.

## **4 Analiza vpliva parametrov na delovanje EPR elementov**

EPR je nov element v programu Plaxis, zato je smiselno raziskati njegovo delovanje pred njegovo uporabo na praktičnem primeru. S tem namenom je bila izvedena primerjalna analiza vpliva večine parametrov, ki vplivajo na EPR element.

### **4.1 Vhodni podatki, ki so potrebni za analizo preiskave in njen potek**

Primerjalna analiza je bila izvedena na primeru statičnega obremenilnega testa, ki je bil izveden v Luki Koper v mesecu septembru in oktobru leta 2008. Test je bil izveden na položaju pomola 7A v osi 44. Namen testiranja je bil preveriti nosilnost jeklenih kolov  $\phi 812/12,5$  mm z odprto konico, ki naj bi bili sposobni prenesti cca. 3000 kN ne faktorirane obtežbe. (Strniša, 2009)

### **4.2 Oprema in izvedba testa nosilnosti kolov v Luki koper**

Po navedbah Poročila o preiskavah testnih jeklenih kolov  $\phi 812/12,5$  mm je bil test izveden na sledeč način. 14. in 15. septembra so bili zabiti vsi štirje testni koli (dva testna in dva izvlečna) z dizelskim zabijalom ICE 46. Izvlečne kole so poimenovali C44 in F44, testna kola pa E44 in D44. Kol D44 se je od ostalih razlikoval po tem, da je imel ob konici simetrično pritrjene tri jeklene profile HEA 320 dolžine 2 m. (Strniša, 2009)

Z željo določitve povečevanja nosilnosti s časom, so bili koli testirani na dan zabijanja, tri dni po zabijanju in 38 dni po zabijanju. Kolom je nosilnost s časom rasla, saj so se s časom na račun disipacije pornih tlakov povečevale efektivne napetosti v zemljini. Iz rezultatov je razvidno veliko povečevanje nosilnosti kolov s časom in sicer za 67% v treh dneh od konca zabijanja ter za 120% do 38. dne pri kolu E44. (Strniša, 2009)

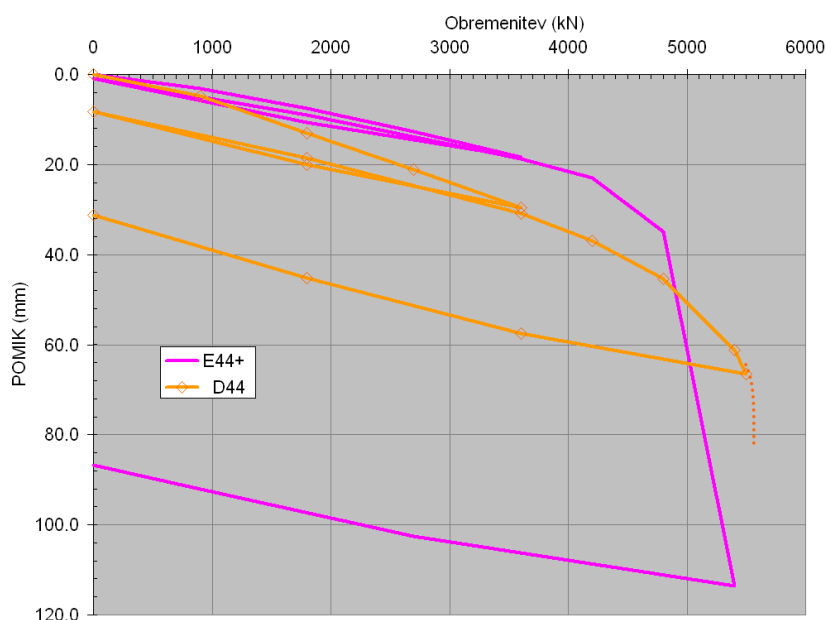
Testna kola sta bila preko hidravličnih cilindrov obremenjena s testno obremenitvijo (Slika 13). Izvlečna kola sta služila za prenos reakcije sile, ki je obremenjevala testna kola. Tekom testa so bile merjene osne obremenitve in osni pomiki glave kola. Za opazovanje so bile uporabljene tri mikrometerske urice s hodom 50 mm in natančnostjo 0,01 mm, ena s hodom 190 mm in natančnostjo 0,1 mm ter kontrolni ekstenziometer natančnosti 1 mm. Na

izvlečnih kolih sta bila uporabljena ekstenziometer in mikrometerska urica s hodom 50 mm. (Strniša, 2009)



Slika 13: Slika izvedbe testa (Strniša, 2009)

Za potrebe te primerjalne analize so bili uporabljeni rezultati testa statične obremenitve kola E44 (Slika 14). Test je bil izveden 21.10.2008, to je 38 dni po vgradnji kola. Rezultati testiranja so navedeni v spodnji preglednici (Preglednica 1). Nosilnost je bila določena po DIN metodi in metodi Davisson.



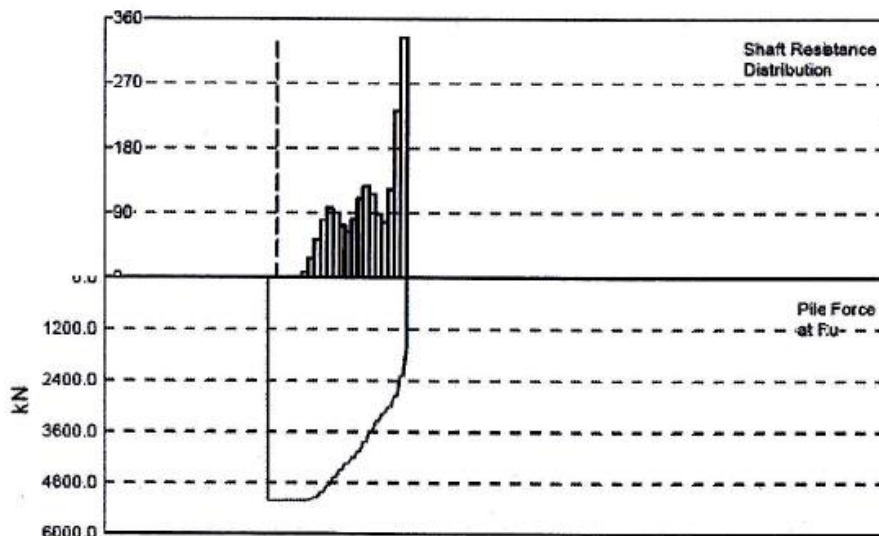
Slika 14: Rezultati statičnega obremenilnega testa (Strniša, 2009)

Omeniti velja, da je ob obremenitvi 4800 kN šele po petih urah prišlo do pomiritve pomikov, pri obremenitvi 5400 kN pa trenda umiritve pomikov ni bilo zaznati. Nosilnost je bila ocenjena na 4900 kN. (Strniša, 2009)

**Preglednica 1: Rezultati statičnega obremenilnega testa (Strniša, 2009)**

| Obremenitev [kN] | Izmerjeno [mm] |
|------------------|----------------|
| 0                | 0,00           |
| 900,00           | 3,20           |
| 1800,00          | 7,60           |
| 2700,00          | 12,70          |
| 3600,00          | 18,40          |
| 4800,00          | 34,90          |

Nosilnost kola E44 je bila v nadaljevanju kontrolirana tudi z dinamičnim testom, pri katerem je bila določena nosilnost 5199 kN, kar predstavlja 6% razliko glede na nosilnost, ocenjeno s statičnim obremenilnim testom. Rezultati dinamične analize so zanimivi tudi zaradi prikaza poteka sile po dolžini - plašču kola (Slika 15). Iz slike je razvidno, da je potek sile približno linearen. Iz rezultatov preiskav lahko še povzamemo, da je nosilnost kola po plašču 3585 kN, da maksimalna trenjska sila ob plašču znaša 333 kN/m in da nosilnost noge kola znaša 1614,9 kN.



**Slika 15: Rezultati dinamičnega obremenilnega testa (Strniša, 2009)**

Poleg omenjenega testa so bili v preteklosti v Luki Koper izvedeni še številni drugi obremenilni testi kolov, o čemer priča spodnja preglednica (Preglednica 2) predstavljena na 10. Šukljetovih dnevih. (Strniša, 2009).

**Preglednica 2: Do leta 2008 opravljeni obremenitveni testi kolov v Luki Koper**

| Št | LOKACIJA                                    | Kota fliša | Tip pilota      | Kota konice | Zabit      | Testiran   | RD  | Ru kN | Pomik - SOT (mm) | Dosežena Ru |
|----|---|------------|-----------------|-------------|------------|------------|-----|-------|------------------|-------------|
| 1  | SIPKI TOVORI 50M OD TH HALE                 | -56        | JK812           | -39.1       | 25.11.1978 | 9.12.1978  | 14  | 4800  | 22               | >4800       |
| 2  | OBALA ZA KONTEJNERJE POMOL I PRI V-10       | -53        | JK812           | -41.0       | 4.2.1981   | 12.2.1981  | 6   | 6000  | 45               | 6000        |
| 3  | TERMINAL ZA PREMORG PRI VRTINI TP-6         | -33        | JK812           | -28.0       | 23.6.1982  | 30.6.1982  | 7   | 6000  | 28               | >6000       |
| 4  | ŽITNI SILOS OBALA OV VRTINI OS-3            | -50        | JK812           | -40.7       | 27.12.1984 | 29.1.1985  | 31  | 5800  | 64               | 5800        |
| 5  | SILOS ZA ŽITARICE - STROJNIC                | -38        | JK812           | -40.2       | 12.12.1984 | 12.2.1985  | 90  | 7200  | 39               | >7200       |
| 6  | SILOS ZA ŽITARICE - STROJNIC                | -38        | JK812           | -40.2       | 12.12.1984 | 12.3.1985  | 120 | 8550  | 53               | 8550        |
| 7  | SILOS 600001 LK, STROJNICA, VRTINA ZS1      | -39        | PAB70           | -44.0       | 26.4.1985  | 10.5.1985  | 14  | 5400  | 25               | >5400       |
| 8  | SILOS ZA ŽITARICE - STROJNIC                | -38        | JK812           | -40.2       | 15.8.1985  | 17.12.1985 | 120 | 6300  | 39               | >6300       |
| 9  | SILOS TGA - SIPKI TOVORI                    | -55        | JK812 + m (1)   | -45.0       | 19.6.1987  | 6.7.1987   | 17  | 5100  | 26               | 5100        |
| 10 | RAZŠIRITEV KONTEJNERSKI T 2 POMOL I         | -54        | JK812           | -40.0       | 19.12.1988 | 4.1.1989   | 14  | 4600  | 30               | >4600       |
| 11 | RAZŠIRITEV KONTEJNERSKI T 2 POMOL I         | -54        | JK812           | -43.8       | 30.1.1989  | 28.2.1989  | 28  | 4650  | 31               | 4650        |
| 12 | ŽIVINSKI TERMINAL F-15                      | -50        | JK508           | -38.2       | 19.4.1997  | 8.5.1997   | 20  | 3100  | 49               | >3100       |
| 13 | TERMINAL ZA ŽELEZO - L48                    | -42        | JK508           | -45.0       | 5.10.1999  | 28.10.1999 | 25  | 2800  | 70               | 2800        |
| 14 | VEZ 7 LOKACIJA 1. PILOT P2                  | -59        | JK508           | -42.0       | 7.12.2006  | 9.1.2007   | 32  | 6500  | 55               | 6500        |
| 15 | JET R-8 LUKA KOPER                          | -41        | JK508           | -25.5       | 7.2.2007   | 22.3.2007  | 45  | 1100  | 11               | 1000        |
| 16 | VEZ 11 PILOT P2- POR                        | -49        | JK508+ m[2]     | -45.0       | 27.3.2007  | 15.5.2007  | 48  | 3650  | 45               | >3650       |
| 17 | VEZ 7 LOKACIJA 2. PILOT P5 X401330, Y 46378 | -58        | JK508           | -42.0       | 25.4.2007  | 19.6.2007  | 37  | 5300  | 52               | 5300        |
| 18 | VEZ 12 TESTI-LUKA KP X402398, Y=46882       | -48        | JK812           | -36.0       | 8.5.2007   | 19.6.2007  | 40  | 6750  | 41               | >6750       |
| 19 | VEZ 7A ZALEDJE TESTNI PILOTI. E44           | -50        | JK812 b (3)     | -42.2       | 15.9.2008  | 21.10.2008 | 36  | 4900  | 40               | 4900        |
| 20 | VEZ 7A ZALEDJE TESTNI PILOTI. D44           | -50        | JK812 b+HEA (4) | -42.2       | 17.9.2008  | 4.11.2008  | 49  | 5500  | 65               | 5500        |

## LEGENDA

- JK812 jeklena cev premera 812.8 mm, debelina stene 12.5 mm z jekleno konico zapolnjeno z betonom  
 JK508 jeklena cev premera 508 mm, debelina stene 8.5 mm z jekleno konico zapolnjeno z betonom  
 PAB70 betonski prednapet votel pilot premera 70 cm in debelino stene 19.4 cm, stikovani in z betonsko konico  
 1 membrana z odprtino 45 cm v cevi na lokaciji 16 m nad dnom  
 2 membrana z odprtino 20 cm v cevi na lokaciji 12 m nad dnom  
 3 jeklena cev premera 812.8 mm, debelina stene 12.5 mm brez konice  
 4 jeklena cev premera 812.8 mm, debelina stene 12.5 mm brez konice s privarjenimi 3xHEA 30 profili dolžine 2 m na zunanji strani cevi na spodnjem koncu  
 RD število dni po zabitju  
 RU\_SOT dosežena maksimalna obremenitev pri testu  
 ED End of Driving - konec zabijanja

Iz zgornje preglednice je razvidno, da so nosilnosti kolov  $\phi 812/12,5$  na lokaciji Luke Koper v povprečju večje od tistih na omenjenem testu. Dobri rezultati testov iz preteklosti nam zagotavljajo določeno dodatno gotovost pri obdelavi podatkov in nadaljnemu projektiranju, saj lahko pričakujemo, da nosilnost kolov ne bo manjša od tiste, izmerjene na testu.

## 4.3 Modeliranje EPR elementa

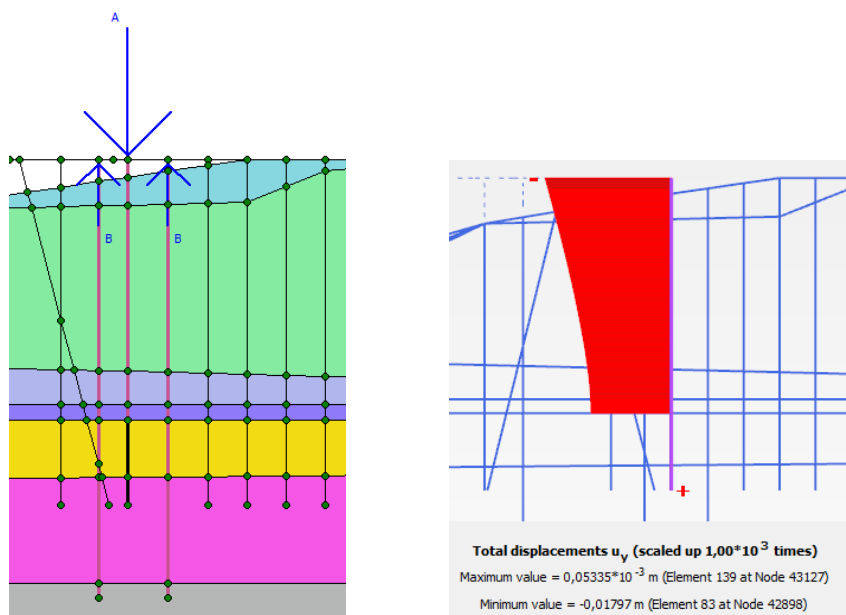
Kot je že omenjeno v odstavku, namenjenemu opisu EPR elementa, element opišemo z naslednjimi parametri:  $E$ ,  $\gamma$ , vrsto prereza,  $I$ ,  $A$ ,  $L_{razmak}$ ,  $T_{top}$ ,  $T_{bot}$ ,  $F_{max}$ , Rayleigh  $\alpha$  in  $\beta$ , ter z vmesnim togostnimi faktorji vzmeti.

Iz poročila je razvidno, da gre za jeklene cevne kole premera 812,5 mm z debelino stene 12,5 mm. Tako je bilo mogoče določiti  $E$ ,  $\gamma$ ,  $I$  ter  $A$ . Rayleighjevi konstanti  $\alpha$  in  $\beta$  v statični analizi nista igrali vloge. Za  $L_{razmak}$  je bila določena razdalja 1 m, saj je pri testu šlo za obremenitev z lokalno točkovno silo. Vmesni togostni faktorji so bili v osnovnem modelu puščeni takšni, kot jih je ponudil program. V določenih primerih v nadaljnji analizi so bile vrednosti korigirane in preučen je bil njihov vpliv. Nosilnost noge kola -  $F_{max}$  je določena iz dinamičnega testa kolov in je po navedbah poročila ocenjena na 1614,9 kN.

#### 4.3.1 Potek nosilnosti po plašču

Določevanje nosilnosti plašča kola je nekoliko bolj zapleteno. Potek maksimalne trenjske sile lahko opišemo samo z nosilnostjo na vrhu ter z nosilnostjo na dnu kola. Torej program omogoča samo linearen potek maksimalne trenjske sile ob plašču. Tekom numerične analize je bil preizkušen tudi model, kjer je bilo uporabljenih več EPR elementov, ki jim je bil določen različen potek nosilnosti po plašču, "spojenih" v en EPR element. Rezultati so bili slabši od tistih dobljenih z enim EPR elementom. Temu je najverjetneje razlog, da se tako pomiki kot tudi notranje sile ne prenašajo direktno iz enega elementa na drugega, ampak prenos sil poteka posredno preko mreže končnih elementov zemljine, kar ne poda korektnih rezultatov. Na sliki spodaj (Slika 16) so predstavljeni vertikalni pomiki pri "spojenem" EPR elementu. Očitno se pomiki med obema elementoma ne prenašajo in delujeta vsak zase. Temu priča tudi izračunana nosilnost kola, saj je enaka nosilnosti, ki je bila določena za zgornji EPR element. Pri tem je bilo korektno upoštevano, da je zgornji EPR prosto, spodnji pa togo povezan v vrhnji točki z ostalimi končnimi elementi.





Slika 16: Modeliranje kolov s "spojenima" EPR elementoma

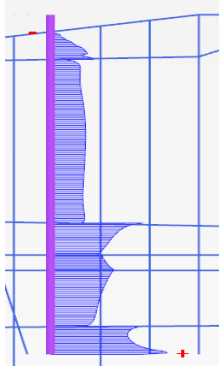
Kot je razvidno iz slike iz prejšnjega poglavja (Slika 15), imamo v našem primeru približno linearen razpored trenjske sile vzdolž kola. Opazimo lahko tudi, da nosilnost skokovito naraste ob dnu kola, kjer kol sega v prodnato plast. Kot že omenjeno, je iz poročila o nosilnosti kolov razvidno, da maksimalna trenjska sila znaša 333 kN/m, ter da je skupna ocenjena nosilnost po plašču 3585 kN. Zaradi že opisane omejitve linearnega poteka sile ob plašču in nezmožnosti medsebojne povezave EPR elementov, se moramo zavedati, da natančnega mejnega poteka trenjske sile ni mogoče opisati.

Parameter  $T_{top}$  lahko vzamemo enak 0 kN/m. Bolj problematična je izbira parametra  $T_{bot}$ . Namreč, če bi parametru določili vrednost 333 kN/m, bi nosilnost po plašču izračunana po enačbi  $N_{Rd} = (T_{top} + T_{bot})/2 * L_{kola}$ , kjer je dolžina kola 44,5 m, znašala nekaj manj kot 7500 kN, kar je veliko več od 3585 kN, kolikor je izmerjena nosilnost kola po plašču. Torej je smiselno modelirati nosilnost na način, da bo skupna nosilnost podobna realni, pa tudi če nosilnost ob dnu kola ne bo 333 kN/m. To odločitev so podprle tudi nekatere numerične analize, vendar vse niso podane v tej diplomski nalogi. Sila  $T_{bot}$  je torej določena na način, da je zadostila pogoju skupne nosilnosti.

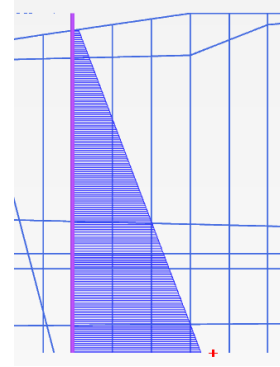
Omejitev določevanja linearnega poteka maksimalne trenjske sile še ne pomeni, da ima graf trenjske sile vselej linearen potek, ampak je potek odvisen od pomika kola. Do linearnega poteka pride šele, ko je lokalno izčrpana nosilnost in pride do zdrsa. To lahko opazimo na sliki spodaj levo (Slika 17) v zgornjem delu kola in na sliki spodaj desno (Slika 18) po

celotnem kolu, saj je v tem primeru nosilnost kola po plašču izčrpana, vseeno ima kol še rezervo v nosilnosti noge, ki je izčrpana pri večjih deformacijah. Podrobnejša analiza obnašanja trenjske sile in sile pod ного kola je narejena v poglavju Prikaz poteka sile po plašču.

V delu, kjer kol ni v stiku z zemljino, program korektno upošteva, da se osna sila v plašču ne zmanjšuje (Slika 17 in 18).



Slika 17: Potek trenjske sile - obtežba 900 kN



Slika 18: Potek trenjske sile obtežba - 4800 kN

Za parameter  $T_{bot}$  je bila izbrana sila 163 kN/m, tako je bila posledično nosilnost kola enaka 5196 kN/m. Karakteristike EPR elementa so zbrane v preglednici spodaj (Preglednica 3).

**Preglednica 3: Karakteristike EPR elementa**

| Karakteristike EPR elementa   |             |
|-------------------------------|-------------|
| $E$ [kN/m <sup>2</sup> ]      | 210 000 000 |
| $\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ] | 78          |
| $I$ [m <sup>4</sup> ]         | 0,002514    |
| $A$ [m <sup>2</sup> ]         | 0,0314748   |
| $T_{top}$ [kN/m]              | 0           |
| $T_{bot}$ [kN/m]              | 163         |
| $F_{max}$ [kN]                | 1614,9      |
| $L_{razmak}$ [m]              | 1           |

## 5 Modeliranje zemljine, kolov in poteka preiskave

Profil zemljine je bil določen na podlagi projekta »Poglabljanja plovnega kanala in severnega dela bazena I znotraj akvatorija koprškega pristanišča na koto -15 m (hidrografsko)«, ki ga je izvedlo podjetje Geoportal. Karakteristike zemljine iz omenjenega projekta so bile dopolnjene z rezultati preiskave s seizmičnim dilatometrom ter s karakteristikami, navedenimi v diplomski nalogi Obalna konstrukcija veza 12 z zagatno steno (Frank D., 2012).

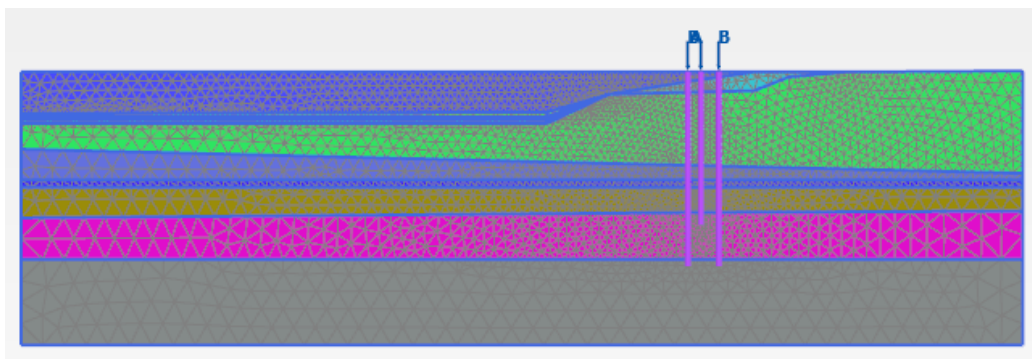
Pri oblikovanju EPR elementov je pomembna tudi določitev vpetosti zgornje točke, kot je omenjeno v poglavju 2 namenjenemu opisu EPR elementa. Ker je v tem primeru šlo za statični test kola, kjer naj bi se kol prosto pogrezal, je bil izbran prost način "vpetja".

Preiskava je bila modelirana s tremi koli. Dva, podobno kot v pravem testu, predstavljata kola za prevzem reakcije sile na testni kol, vmesni pa predstavlja testni kol. Da imata na rezultate manjši vpliv tudi reakcijska kola, bo dokazano na koncu primerjalne analize. Reakcijska kola segata do globine – 52 m.

### 5.1 Faze numerične analize

Spodaj so zapisani vsi koraki, ki so bili uporabljeni v analizi. Na sliki spodaj (Slika 19) je prikazan tudi numerični model.

- Začetni korak  $K_0$  – začetno napetostno stanje
- 0 – služi uravnoteženju napetostnega stanja v tleh
- Vgradnja kolov
- Obremenitev 900 kN
- Obremenitev 1800 kN
- Obremenitev 2700 kN
- Obremenitev 3600 kN
- Obremenitev 4800 kN



**Slika 19: Model testa obnašanja kolov v programu Plaxis**

Obnašanje kola pri obtežbi višji od 4800 kN ni numerično analizirano, saj ni natančnih podatkov o pomikih, ki so se zgodili med preiskavo v Luki Koper. Občasno je bila izvedena analiza pri obtežbi 5180 kN in pri obtežbi 5250 kN. Tako je bila izvedena kontrola, ali obnašanje kola v numeričnem modelu ustreza obnašanju kola iz raziskav, torej če EPR element ni prekoračil nosilnosti testnega kola.

## 6 Primerjalna analiza

V nadaljevanju so primerjani vplivi uporabe HS oz. HSsmall modela, parametra  $T_{bot}$ , uporabe 6 ali 15 točkovnih končnih elementov, nedreniranega oz. dreniranega modela ter vpliv togostnih faktorjev vzmeti EPR - to so ISF faktorji.

### 6.1 Karakteristike zemljine osnovnega modela

V spodnji preglednici (Preglednica 4) so zapisane karakteristike zemljine, ki so bile uporabljene za modeliranje osnovnega modela zemljine. V analizi je bila kohezija upoštevana z vrednostjo 1 kPa, tako da se ne bi med analizo pojavile nepotrebne numerične težave.

**Preglednica 4: Karakteristike osnovnega HS modela zemljine**

| Sloj            |                   | Morska glina zgoraj | Glina 2. sloj | Zaglinjen pesek | Glina 3. sloj | Zaglinjen prod | Fliš    | Nasip   |
|-----------------|-------------------|---------------------|---------------|-----------------|---------------|----------------|---------|---------|
| Vrsta modela    |                   | HS                  | HS            | HS              | HS            | HS             | HS      | HS      |
| Tip dreniranja  |                   | Drained             | Drained       | Drained         | Drained       | Drained        | Drained | Drained |
| $\gamma$        | kN/m <sup>3</sup> | 18                  | 19            | 20              | 19,5          | 19,5           | 27      | 20      |
| $E_{50}^{ref}$  | kN/m <sup>2</sup> | 2200                | 4500          | 30000           | 4000          | 135000         | 135000  | 60000   |
| $E_{oed}^{ref}$ | kN/m <sup>2</sup> | 2200                | 4500          | 30000           | 4000          | 135000         | 135000  | 60000   |
| $E_{ur}^{ref}$  | kN/m <sup>2</sup> | 6600                | 13500         | 90000           | 12000         | 405000         | 405000  | 180000  |
| power (m)       |                   | 0,8                 | 0,8           | 0,6             | 0,8           | 0,5            | 0,5     | 0,5     |
| c               | kN/m <sup>2</sup> | 0                   | 0             | 0               | 0             | 0              | 200     | 0       |
| $\varphi$       | °                 | 19                  | 24            | 33              | 21            | 40             | 40      | 38      |
| $\psi$          | °                 | 0                   | 0             | 3               | 0             | 10             | 10      | 8       |
| $p_{ref}$       | kN/m <sup>2</sup> | 100                 | 100           | 100             | 100           | 100            | 100     | 100     |
| $k_x$           | m/day             | 0,000048            | 0,000048      | 0,0864          | 0,000048      | 0,864          | 1       | 0,0008  |
| $k_y$           | m/day             | 0,000048            | 0,000048      | 0,0864          | 0,000048      | 0,864          | 1       | 0,0008  |

### 6.2 Osnovni model

Osnovni model je sestavljen iz zemljine modelirane s HS modelom s 6 točkovnimi elementi v dreniranem stanju,  $F_{max} = 1614,9$  s trenjsko silo plašča opisano s parametroma  $T_{top} = 0$  kN/m in  $T_{bot} = 163$  kN/m ter z vrednostmi faktorjev ISF kot jih predlaga program sam.

### 6.3 Model 333

V tem modelu je spremenjena vrednost  $T_{bot} = 333$  kN/m.

### 6.4 Model S4B4

V tem modelu je povečana vrednost ISF faktorjev za štiri-krat - povečana je togost vzmeti.

## 6.5 Model UnD

V tem modelu je upoštevana zemljina kot nedrenirana, torej z možnostjo, da se pojavijo presežni porni tlaki.

## 6.6 Model HSsmall

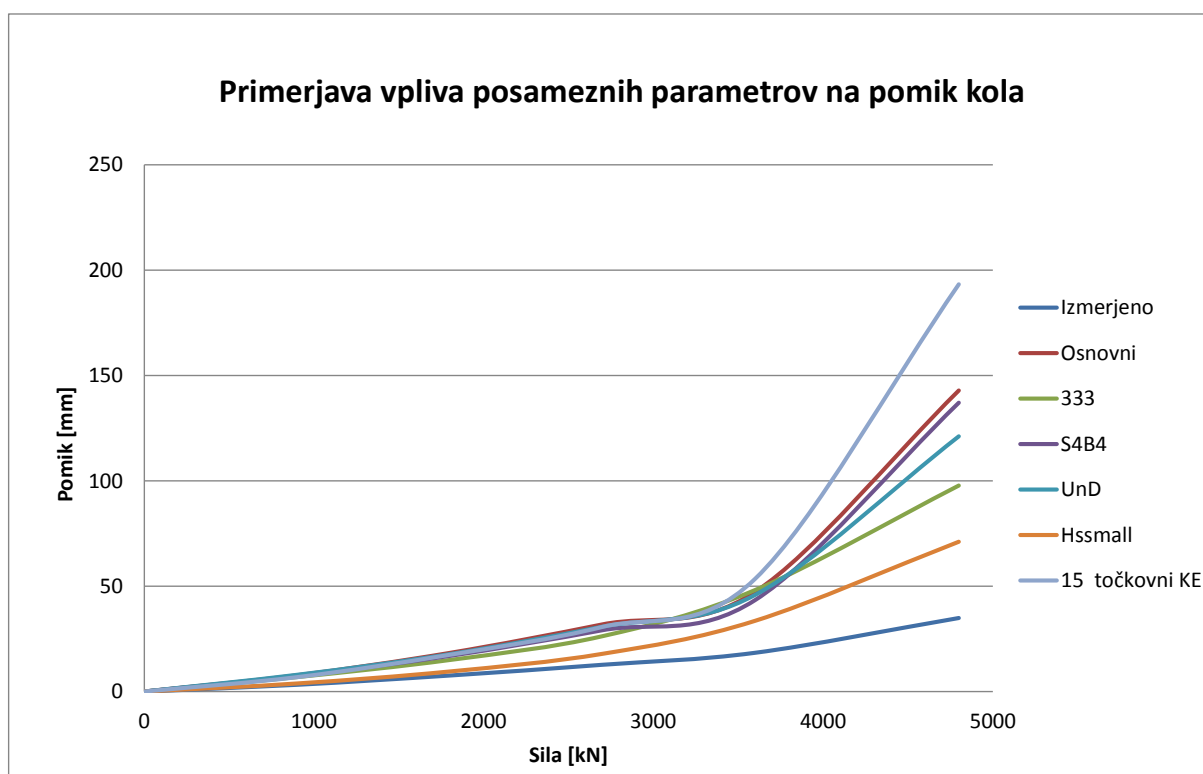
Pri tem modelu je zemljina modelirana s HSsmall modelom. Tukaj sta uporabljeni vrednosti  $\gamma_{0,7}$ ,  $G_0$ , ki opisujeta strižni modul pri majhnih deformacijah.

## 6.7 Model 15 točkovni

Ta model je enak osnovnemu, le da je bila zemljina modelirana s 15 točkovnimi elementi.

## 6.8 Rezultati

Rezultati analize so predstavljeni na grafu spodaj (Slika 20). Poleg rezultatov numerične analize so na grafu podane tudi vrednosti pomikov, ki so bili izmerjeni pri statičnem obremenilnem testu kola. Opazimo lahko, da so vsi modeli preveč podajni. Pomiki, ki so bili izmerjeni, so očitno precej manjši od tistih, ki jih je podala numerična analiza. Model s 15 točkovnimi elementi je izkazal največje pomike, kar ni nič problematičnega, kaže le na dejstvo, da so potrebne korekcije vhodnih podatkov. Zanimiv je HSsmall model, saj so pri tem modelu pomiki pri majhnih deformacijah primerljivi z dejanskimi, večje odstopanje lahko zabeležimo pri večjih pomikih. Iz rezultatov te analize lahko ugotovimo, da je smiselna uporaba HSsmall modela tudi v primeru, ko nimamo natančnih podatkov o vrednosti  $\gamma_{0,7}$  in  $G_0$  na naši lokaciji, a so pridobljeni iz drugega dovolj verodostojnega vira. Okvirne vrednosti se namreč lahko najde v strokovni literaturi, veliko uporabnih informacij je mogoče najti tudi na svetovnem spletu.



Slika 20: Graf vplivov posameznih parametrov na pomik kola

Uporaba HSsmall modela je pomembna predvsem v primeru, ko želimo določiti pomike konstrukcije. Na nosilnost oz. varnost parametra nima velikega vpliva, tudi zato ker je varnost izčrpana pri velikih deformacijah. Na prvi pogled se zdijo dobri tudi rezultati modela 333 in UnD – nedreniranega modela. Kljub temu, da nosilnosti za posamezen primer numerične analize niso navedene, je nosilnost modela 333 večja od 6000 kN in torej pomembno presega izmerjeno nosilnost testiranega kola, zato je uporaba takega modela nepriporočljiva, saj model izkazuje večjo nosilnost od realne. Opazimo lahko tudi, da model S4B4 izkazuje nekoliko manjše pomike od osnovnega modela. Iz prve opravljene analize je mogoče zaključiti, da se je model HSsmall izkazal za najbolj natančnega, zato je bila sprejeta odločitev, da bodo nadaljnje analize temeljile na HSsmall modelu.

## 7 Nadaljnje primerjalne analize z uporabo HSsmall modela

Nova primerjalna analiza je temeljila na HSsmall modelu. Tukaj je bil analiziran vpliv  $\gamma_{0,7}$ ,  $G_0$ , dreniranega oz. nedreniranega stanja, ter 15 oz. 6 točkovnih končnih elementov.

### 7.1 Model HSsmall

Osnovni model je bil zasnovan s karakteristikami, ki so predstavljene v prejšnji preglednici (Preglednica 4). Pri HSsmall modelu so bile dodane karakteristike obnašanja pri majhnih deformacijah (Preglednica 5). Vrednosti  $G_0$ , in  $\gamma_{0,7}$ , ki so predstavljene v preglednici, so bile v večini povzete po prispevku Seizmični dilatometer v Sloveniji in njegova uporaba v praksi (Pulko, Robas, 2012).

Preglednica 5: Dodatne karakteristike HSsmall modela

| Sloj                          | Morska glina zgoraj | Glina 2. sloj | Zaglinjen pesek | Glina 3. sloj | Zaglinjen prod | Fliš    | Nasip  |
|-------------------------------|---------------------|---------------|-----------------|---------------|----------------|---------|--------|
| $G_0^{ref}$ kN/m <sup>2</sup> | 25000               | 82500         | 98400           | 82500         | 300000         | 3000000 | 300000 |
| $\gamma_{0,7}$                | 0,0001              | 0,0001        | 0,0001          | 0,0001        | 0,0001         | 0,0001  | 0,0001 |

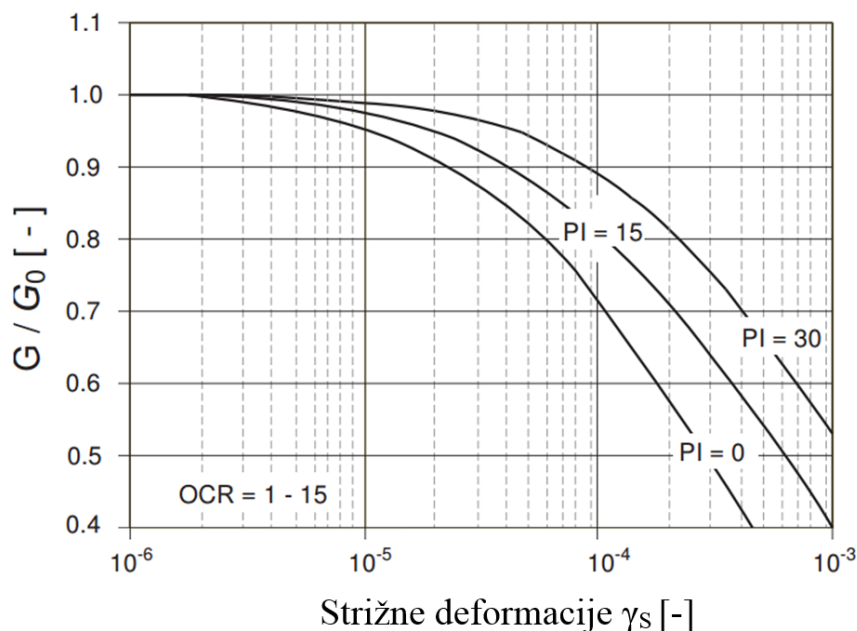
### 7.2 Model HSsmall korekcija $G_0$

Pri tem modelu je bila korigirana vrednost  $G_0$  in sicer tako, da je bila vrednost  $G_0$  povečana za 10%.

### 7.3 Model HSsmall $\gamma_{0,7}$

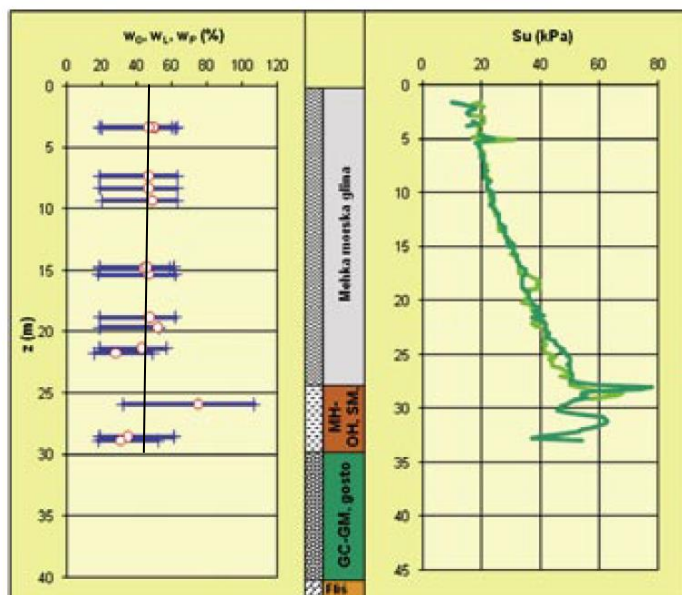
Pri tem modelu je bila vrednost  $\gamma_{0,7}$  povečana na 0,001 za glino, oz. na 0,0005 za prod, pesek in nasip. Vrednosti parametra  $\gamma_{0,7}$  so po navedbah, ki jih razberemo v priročniku Plaxis Material models manual odvisne od  $I_p$  – indeksa plastičnosti (Slika 21). Indeks plastičnosti predstavlja razpon vlažnosti zemljine med mejo židkosti (židkega stanja) in mejo plastičnosti (poltrdnega stanja).





Slika 21: Odvisnost  $G/G_0$  ( $\gamma_{0,7}$ ) od indeksa plastičnosti (Plaxis Material Models Manual, 2012: str. 70)

Iz članka (Logar, 2009), lahko med drugim razberemo, da  $I_p$  za morsko glino znaša 42%. Iz zgornjega grafa (Slika 21) razberemo, da zemljina s takim  $I_p$  izkazuje visoko mejo  $\gamma_{0,7}$ , torej je odločitev o izboru višje vrednosti  $\gamma_{0,7}$  upravičena. Korigirana je bila tudi vrednost  $\gamma_{0,7}$  za ostale materiale, saj je  $I_p$ , ki ga lahko razberemo iz spodnje slike (Slika 22), očitno visok. Na sliki so namreč predstavljene vrednosti meje plastičnosti in židkosti, njuna razlika pa predstavlja  $I_p$ .



Slika 22: Potek indeksa plastičnosti po značilnem profilu tal v Luki Koper (Logar, 2009)

## 7.4 Model HSsmall S4B4

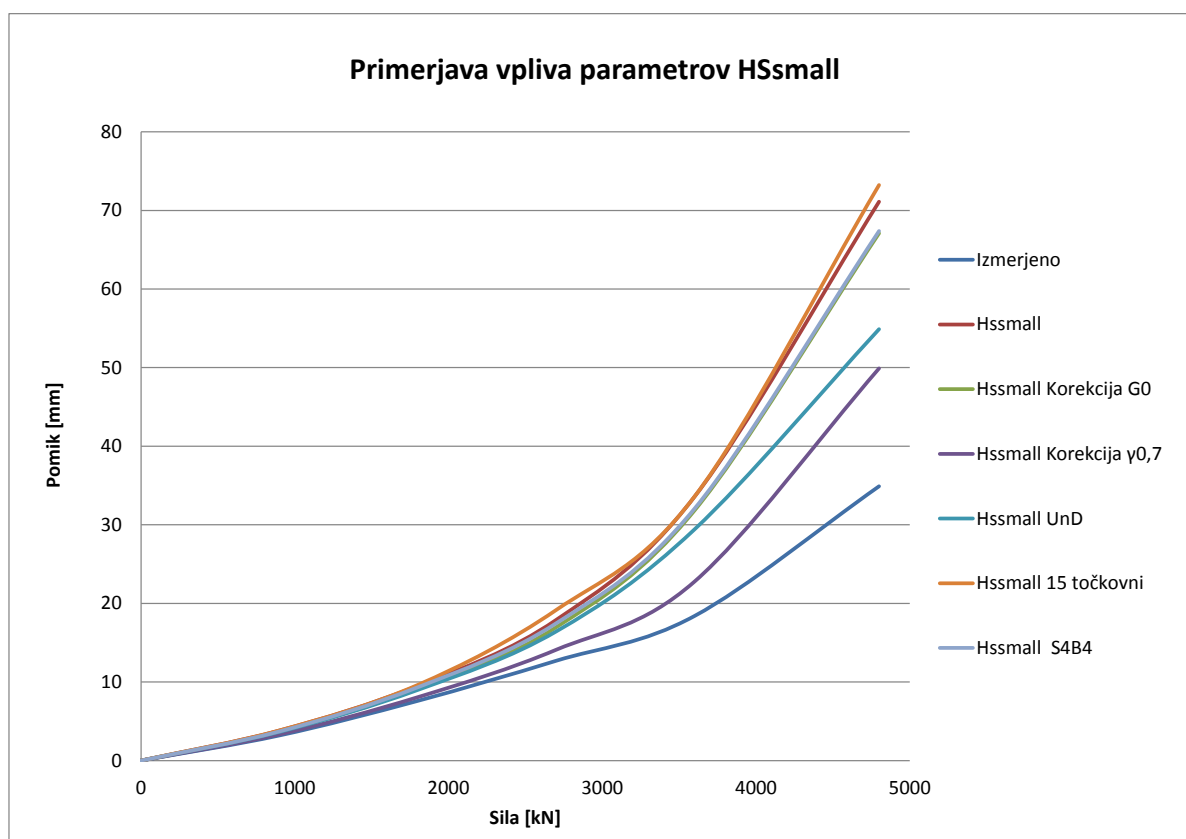
Pri tem modelu je povečana vrednost ISF faktorjev za štirikrat, tako je bila povečana togost vzmeti, ki povezujejo EPR element z mrežo končnih elementov.

## **7.5 HSsmall 15 točkovni**

Ta model je enak osnovnemu HSsmall modelu, le da je zemljina modelirana s 15 točkovnimi elementi.

## 7.6 Rezultati

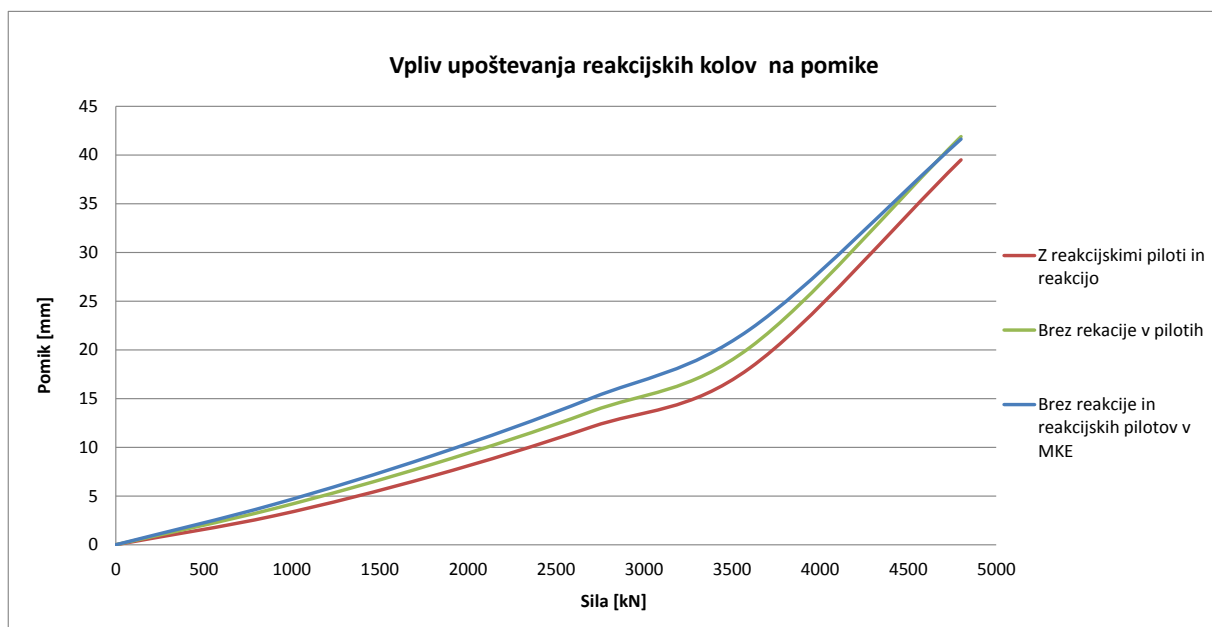
Rezultati analize so predstavljeni na spodnjem grafu (Slika 23). Tokrat lahko opazimo, da največje pomike izkazujeta osnovna modela HSsmall s 6 oz. 15 točkovnimi elementi. To dejstvo kaže na to, da so bile vse korekcije uspešne in so botrovale k manjšim pomikom. Nedreniran model zmanjša pomike podobno kot pri prvi primerjalni analizi. Ta model odговarja dejanskemu nedreniranemu stanju, zato ga je smiselno vključiti v analizo. Naslednja stvar, ki jo lahko razberemo iz grafa je, da sprememba vrednosti ISF faktorjev bistveno ne vpliva na rezultate in je praktično enakovredna povečavi vrednosti  $G_0$ . Kljub pozitivnim rezultatom korekcija ISF faktorjev ta ni osnovana na oprijemljivih enačbah in zato v nadaljnji analizi ni uporabljena. Očitno ima največji vpliv na obnašanje kola parameter  $\gamma_{0,7}$ . Kot je že omenjeno, ta vrednost predstavlja točko - deformacijo, ko vrednost parametra  $G$  zavzame le še 70% začetne vrednosti  $G_0$ .



Slika 23: Primerjava vpliva parametrov HSsmall modela na pomike kola

## 7.7 Primerjava analize modela s koli, ki prevzemajo reakcijo in modela brez njih

Kakor je bilo napovedano v uvodnem poglavju primerjalne analize, sledi analiza vpliva upoštevanja kolov za prevzem reakcijskih sil v numerični analizi. Namreč koli, ki so pri izvedbi statičnega obremenilnega testa prevzeli reakcijo obremenitve testnega kola, so bili v numeričnem modelu obremenjeni z natezno silo, ki predstavlja polovico tlačne sile, ki v posameznem koraku obremeni testni kol. Rezultati primerjalne analize upoštevanja omenjenih nateznih kolov so prikazani na spodnjem grafu (Slika 24). Vpliv sicer ni velik, je pa v redu velikosti upoštevanja korekcije  $G_0$ .



Slika 24: Prikaz vpliva upoštevanja kolov, ki prevzamejo reakcijsko silo obremenjenega kola – natezni koli

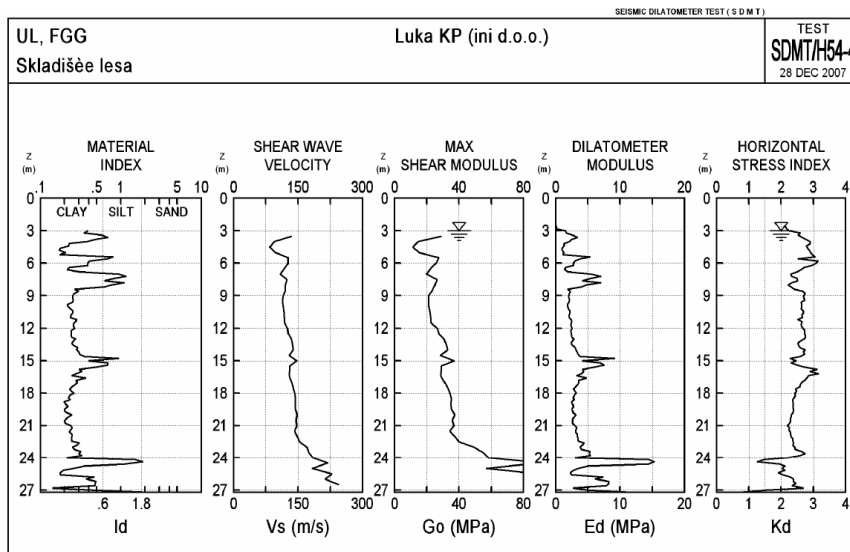
## 8 Končni model zemljine in EPR elementa

Cilj vseh prejšnjih primerjalnih analiz je bil ugotoviti vpliv posameznih parametrov na obnašanje EPR elementov ter z osvojenim znanjem določiti model, ki bi čim bolj realno opisal obnašanje kolov na pomolu 7A v Luki Koper.

### 8.1 Določitev $G_0$ s seizmično dilatometriko preiskavo v Luki Koper

Pri določevanju parametra  $G_0$  za morsko glino, so bili vključeni rezultati seizmične dilatometrične preiskave opravljene v Luki Koper. (Robas, 2007)

Po navedbah poročila o dilatometričnih raziskavah na lokaciji Hale 54 sta bili v Luki Koper izvedeni dve sondi s seizmičnim dilatometrom – SDMT (Robas, 2007). Začetna globina preiskave je bila 2 m, kjer se je končala plast nasipa, končna globina meritev je bila 27,2 oz. 28 m, kar se približno ujema s položajem plasti peska. Preiskovanje se je na tej globini prekinilo zaradi velikega upora prodiranju konice. Rezultati te preiskave so torej uporabni predvsem za določitev parametra  $G_0$  za morsko glino. Preiskava je potekala po standardni metodi, ki je opisana v poglavju Preiskava s seizmičnim dilatometrom (Poglavje 3.3.1), vrednosti so merjene na vsakih 50 cm. Tako je bil dobljen kontinuiran profil merjenih karakteristik zemljine. Vrednosti so predstavljene na spodnjem grafu (Slika 25). Na grafu so merjene vrednosti hitrosti strižnih valov, med tem ko je vrednost  $G_0$  preračunana po enačbi  $G_0 = \rho * v_s^2$ . Ker je potrebno vrednost parametra  $G_0$  v programu Plaxis podati pri vertikalni sferni napetosti 100 kPa in mora izbrana vrednost  $G_0$  predstavljati vrednost celotne plasti morske gline, je bila za potrebe te naloge izbrana vrednost  $G_0 = 25$  MPa.



Slika 25: Rezultati seizmičnega dilatometrijskega testa v Luki Koper (Robas, Logar, 2008)

## 8.2 Karakteristike končnega modela

Zaradi vseh do sedaj navedenih razlogov in analiz je bil izbran model zemljine in parametrov EPR elementa, katerih karakteristike so podane v spodnjih dveh preglednicah (Preglednici 6 in 7). K nosilnosti EPR 5200 kN je prišteta še lastna teža kola, ki znaša 110 kN, torej zahtevana dejanska nosilnost znaša 5310 kN. Zaradi tega se v nadaljevanju upošteva  $T_{bot} = 170$  kN/m. Omeniti velja, da so rezultati končnega modela dobljeni z upoštevanjem nedrenirane analize z uporabo 15 točkovnih končnih elementov zemljine.

Preglednica 6: Končne togostne in strižne karakteristike zemljine pri HSsmall modelu

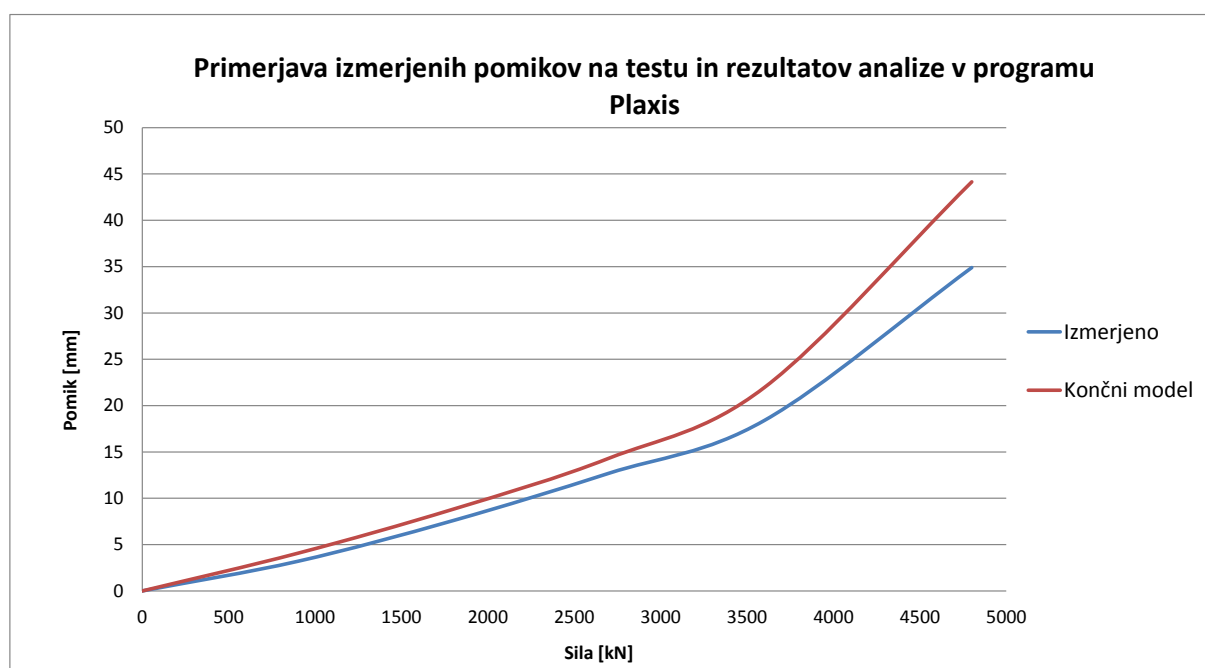
| Sloj            |                   | Morska glina zgoraj | Glina 2. sloj | Zaglinjen pesek | Glina 3. sloj | Zaglinjen prod | Fliš     | Nasip         |
|-----------------|-------------------|---------------------|---------------|-----------------|---------------|----------------|----------|---------------|
| Vrsta modela    |                   | HS small            | HS small      | HS small        | HS small      | HS small       | HS small | HS small      |
| Tip dreniranja  |                   | Undrained (A)       | Undrained (A) | Undrained (A)   | Undrained (A) | Drained        | Drained  | Undrained (A) |
| $\gamma$        | kN/m <sup>3</sup> | 18                  | 19            | 20              | 19,5          | 19,5           | 27       | 20            |
| $E_{50}^{ref}$  | kN/m <sup>2</sup> | 2200                | 4500          | 30000           | 4000          | 135000         | 135000   | 60000         |
| $E_{oed}^{ref}$ | kN/m <sup>2</sup> | 2200                | 4500          | 30000           | 4000          | 135000         | 135000   | 60000         |
| $E_{ur}^{ref}$  | kN/m <sup>2</sup> | 6600                | 13500         | 90000           | 12000         | 405000         | 405000   | 180000        |
| power (m)       |                   | 0,8                 | 0,8           | 0,6             | 0,8           | 0,5            | 0,5      | 0,5           |
| c               | kN/m <sup>2</sup> | 0                   | 0             | 0               | 0             | 0              | 200      | 0             |
| $\varphi$       | °                 | 19                  | 24            | 33              | 21            | 40             | 40       | 38            |
| $\psi$          | °                 | 0                   | 0             | 3               | 0             | 10             | 10       | 8             |
| $\gamma_{0.7}$  |                   | 0,001               | 0,001         | 0,0005          | 0,001         | 0,0005         | 0,0001   | 0,0005        |
| $G_0^{ref}$     | kN/m <sup>2</sup> | 25000               | 82500         | 98400           | 82500         | 300000         | 300000   | 300000        |
| $p_{ref}$       | kN/m <sup>2</sup> | 100                 | 100           | 100             | 100           | 100            | 100      | 100           |
| $k_x$           | m/day             | 0,000048            | 0,000048      | 0,0864          | 0,000048      | 0,864          | 1        | 0,0008        |
| $k_y$           | m/day             | 0,000048            | 0,000048      | 0,0864          | 0,000048      | 0,864          | 1        | 0,0008        |

Preglednica 7: Končne karakteristike EPR elementa

|     |
|-----|
| EPR |
|-----|

|                  |              |
|------------------|--------------|
| $T_{top}$ [kN/m] | 0            |
| $T_{bot}$ [kN/m] | 170          |
| $F_{max}$ [kN]   | 1614,9       |
| $ISF$            | Ni korigiran |

Na spodnjem grafu (Slika 26) je predstavljena odvisnost pomika od obremenitve za testiran kol in razmerje sila-pomik končnega modela analiziranega v programom Plaxis. Razvidno je zelo dobro ujemanje obnašanja modeliranega kola z dejanskim. Zelo spodbuden dejavnik, ki potrjuje pravilnost modela, je tudi dejstvo, da se naklona premic ujemata tako pri začetni, kot tudi pri končni obremenitvi.

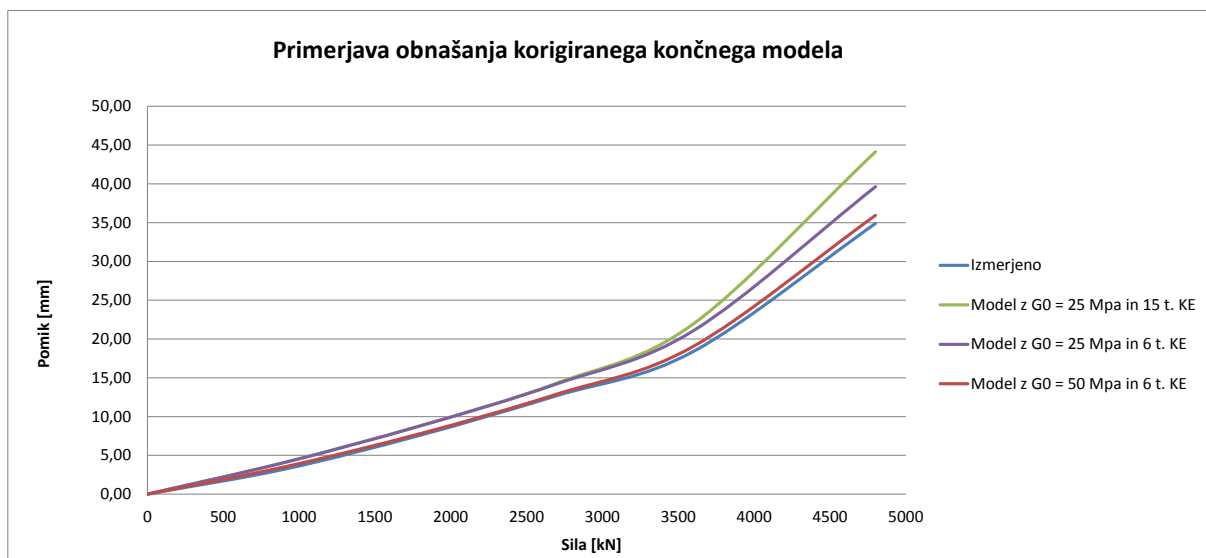


**Slika 26: Primerjava obnašanja končnega numeričnega modela z izmerjenimi vrednostmi**

Opazna je sicer manjša razlika, ki bi jo lahko pripisali večim dejavnikom, kot so omejenost na dvodimenzionalno analizo, ne povsem točne karakteristike zemljine in omejenost na linearen potek maksimalne trenjske sile ob plašču kola.

Tekom analize poglobitve morskega dna izvedene v nadaljevanju je bil uporabljen model s 6 točkovnimi elementi. Uporaba tega modela je bila nujna, zaradi numeričnih težav modelov s 15 točkovnimi elementi ob upoštevanju vseh konstrukcijskih elementov, ki so modelirani v nadaljevanju. Na spodnjem grafu (Slika 27) je prikazan odziv kolov z uporabo 15 in 6 točkovnih končnih elementov zemljine. Dodan je tudi model v katerem je bila morska glina zgornjega sloja modelirana z vrednostjo  $G_0 = 50$  MPa. Pri slednjem je opazno praktično

popolno ujemanje numeričnih rezultatov z rezultati iz testa. Kljub boljšemu ujemanju korigiranega modela je bila za nadaljnjo analizo konstrukcije izbrana vrednost  $G_0 = 25 \text{ MPa}$ , saj se ta vrednost ujema z rezultati terenskih preiskav.



**Slika 27: Primerjava obnašanja korigiranega končnega modela z izmerjenimi vrednostmi**

Kot zaključek numerične analize statičnega obremenilnega testa kola, so na spodnji preglednici (Preglednica 8) predstavljene vrednosti pomikov najbolj zanimivih računskih modelov.

**Preglednica 8: Primerjava računskih vrednosti z izmerjenimi**

| Obremenitev [kN] | Izmerjeno [mm] | Osnovni [mm] | HSsmall [mm] | Korekcija $\gamma_{0,7}$ [mm] | Korigirani končni 6 t.KE in $G_0 = 50$ [mm] | Končni 15 t.KE in $G_0 = 25$ [mm] |
|------------------|----------------|--------------|--------------|-------------------------------|---|-----------------------------------|
| 0                | 0,00           | 0,00         | 0,00         | 0,00                          | 0,00  | <u>0,00</u>                       |
| 900              | 3,20           | 7,7          | 3,8          | 3,3                           | 3,5   | <u>4,1</u>                        |
| 1800             | 7,60           | 18,3         | 9,5          | 8,1                           | 7,8   | <u>8,8</u>                        |
| 2700             | 12,70          | 31,9         | 17,9         | 14,7                          | 12,9  | <u>14,3</u>                       |
| 3600             | 18,40          | 47,3         | 33,6         | 22,8                          | 19,1  | <u>22,0</u>                       |
| 4800             | 34,90          | 142,9        | 71,1         | 49,9                          | 36,0  | <u>44,1</u>                       |

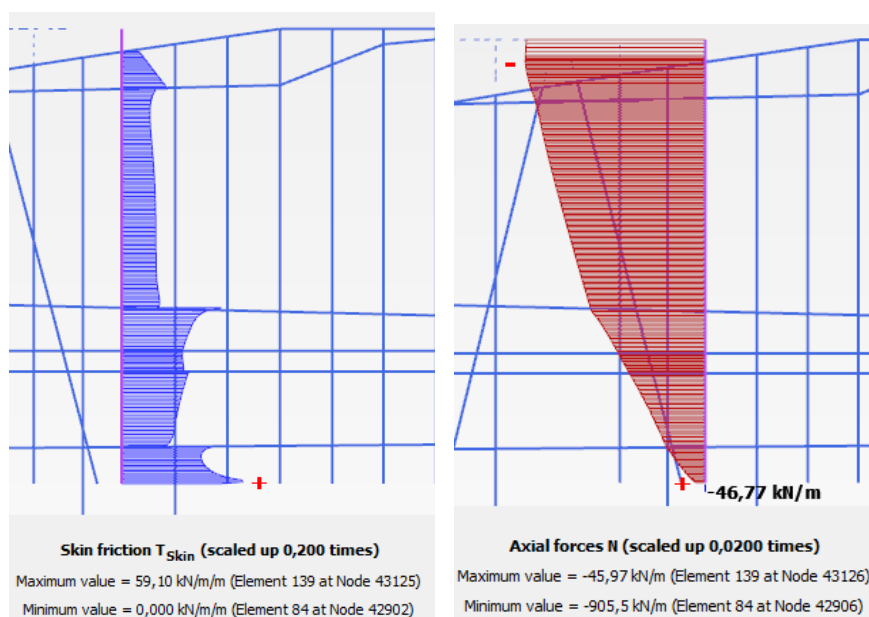


## 9 Prikaz poteka sile po plašču EPR elementa

Na slikah, ki so predstavljene v tem poglavju, je analiziran potek trenjske sile ob plašču, osne sile v kolu in sile pod nogo EPR elementa v odvisnosti od obremenitve. Obravnavan je končni računski model.

### 9.1 Obtežba 900 kN

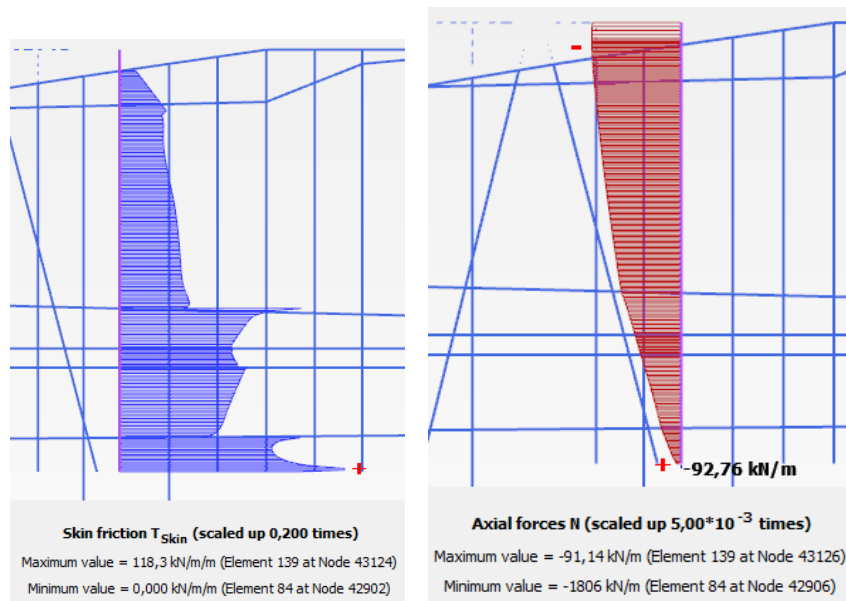
Analiza se začne pri osni obremenitvi 900 kN. Iz spodnje slike (Slika 28) je razvidno, da se osna sila v kolu približno linearno zmanjšuje z globino. Opazimo lahko, da se v zgornjih 2,5 m osna sila ne zmanjša, to ustreza realnemu odzivu, saj je v tem delu kol v zraku oz. vodi. V zgornjem delu opazimo skokovito povečanje trenjske sile ob plašču in nosilnost kola je tam skoraj izčrpana. Temu priča praktično linearen potek trenjske sile. Logično je, da je nosilnost ob vrhu kola hitro izčrpana, saj so pod površjem vertikalne efektivne napetosti majhne, posledično pa kol ne more prevzeti večje sile s trenjem. Največja trenjska sila znaša 59,1 kN/m, sila pod nogo kola pa 46,8 kN.



Slika 28: Potek trenjske sile po plašču, osne sile in točkovne sile pod nogo kola pri obtežbi 900 kN

## 9.2 Obtežba 1800 kN

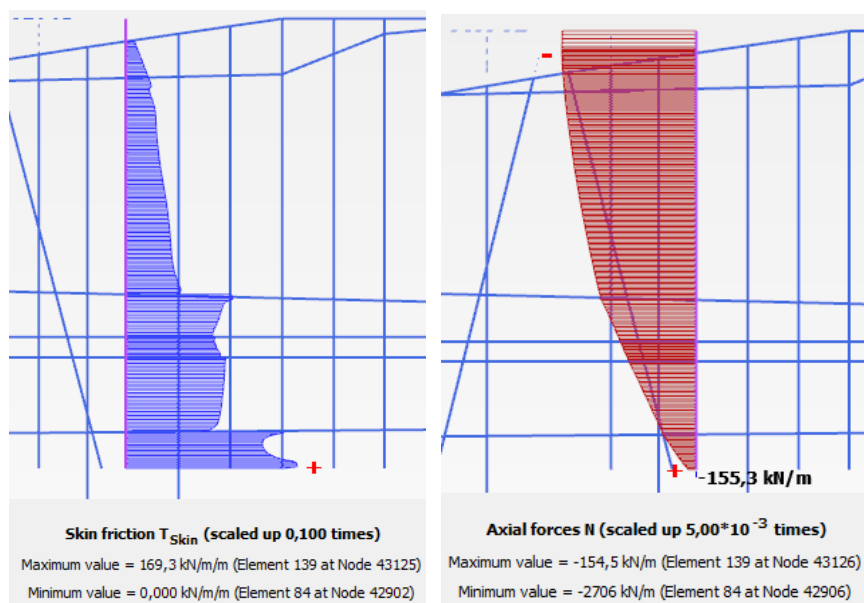
V primerjavi z obtežbo 900 kN lahko za obtežbo 1800 kN (Slika 29) ugotovimo, da se je povečala maksimalna trenjska sila na 118,3 kN/m in sila pod kolom na 92,8 kN. To predstavlja približno dvakratno povečavo sil. Tudi na tej sliki lahko opazimo, da se največja trenjska sila razvije v plasti proda, ki izkazuje najboljše karakteristike med vsemi plastmi.



Slika 29: Potek trenjske sile po plašču, osne sile in točkovne sile pod nogo kola pri obtežbi 1800 kN

## 9.3 Obtežba 2700 kN

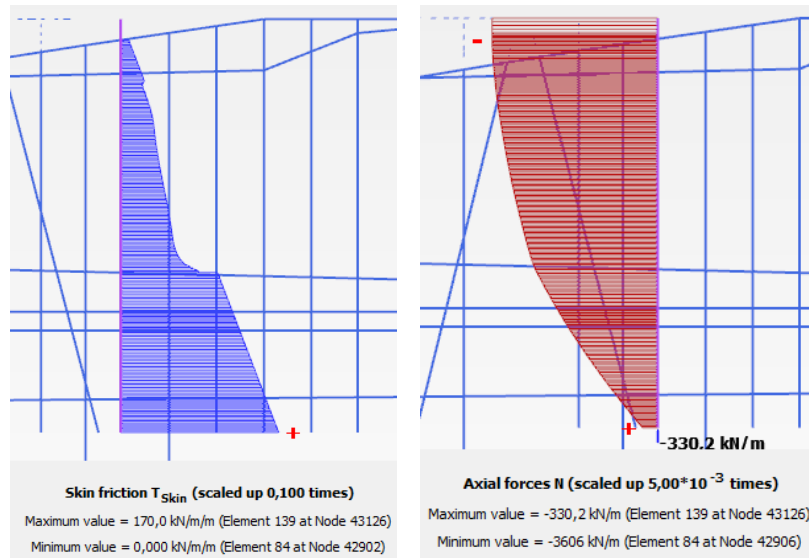
Trend povečevanja trenjske sile se ohranja. Tokrat maksimalna trenjska sila znaša 169,3 kN/m, prav tako se je povečala tudi največja sila pod nogo kola in znaša 155,3 kN (Slika 30). Opazimo lahko, da sta se maksimalna trenjska sila ob plašču in sila pod nogo kola povečala za približno trikrat glede na osnovni model, za trikrat pa se je povečala tudi obtežba na kol.



Slika 30: Potek trenjske sile po plašču, osne sile in točkovne sile pod ного kola pri obtežbi 2700 kN

## 9.4 Obtežba 3600 kN

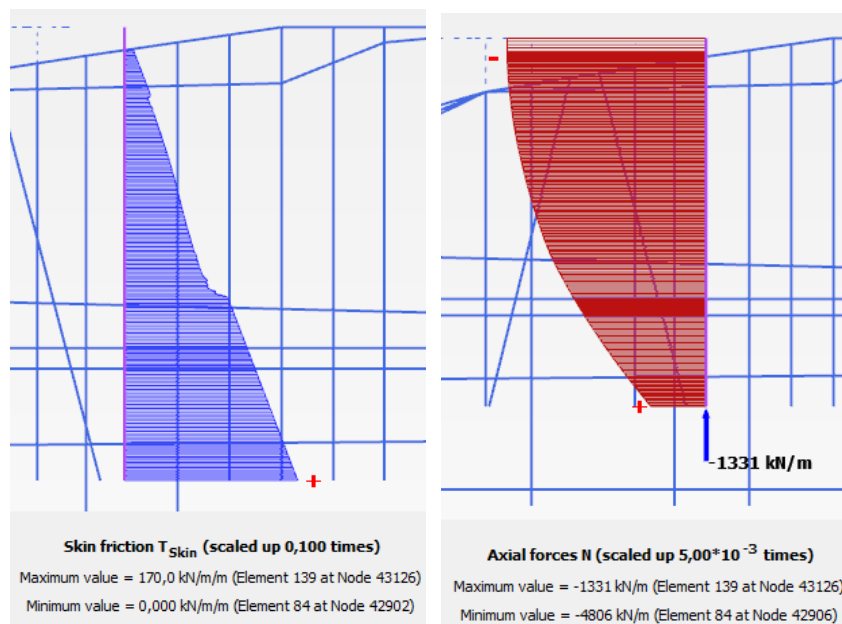
Pri obtežbi 3600 kN opazimo, da je potek trenjske sile v večini slojev zemljine linearen (Slika 31). To nakazuje na to, da je nosilnost po plašču že praktično izčrpana. Trenjska sila se je povečala do 170 kN/m, kar je tudi vrednost maksimalne določene trenjske sile. Na prvi pogled preseneča, da je nosilnost zadnjega sloja (prod) skoraj popolnoma izkoriščena, pri čemer to ne velja za sloj gline. Razlog temu je velika razlika v togosti. Že v poglavju o EPR elementu je prikazana enačba, ki določa togost vzmeti, preko katerih je EPR element povezan na mrežo končnih elementov. Enačba se glasi takole  $R_S = ISF_{RS} * G_{zemljine} / L_{razmak}$ . Iz enačbe je razvidno, da je togost odvisna tudi od parametra  $G_0$ , ki je za sloj proda nekajkrat višji od tistega za sloj gline. To doprinese k temu, da je povezava med EPR elementi in ostalo mrežo končnih elementov v sloju gline bolj podajna. Po drugi strani pa mejna trenjska nosilnost po plašču EPR ni neposredno odvisna od  $G_0$ , saj potek mejne trenjske sile določimo ločeno z vrednostima  $T_{top}$  in  $T_{bot}$ . Če zgoraj zapisana dejstva združimo ugotovimo, da se zaradi večje togosti prodnatega sloja tam nosilnost že pri manjših pomikih približa mejni vrednosti in torej linearnemu poteku na grafu.



Slika 31: Potek trenjske sile po plašču, osne sile in točkovne sile pod nogo kola pri obtežbi 3600 kN

## 9.5 Obtežba 4800 kN

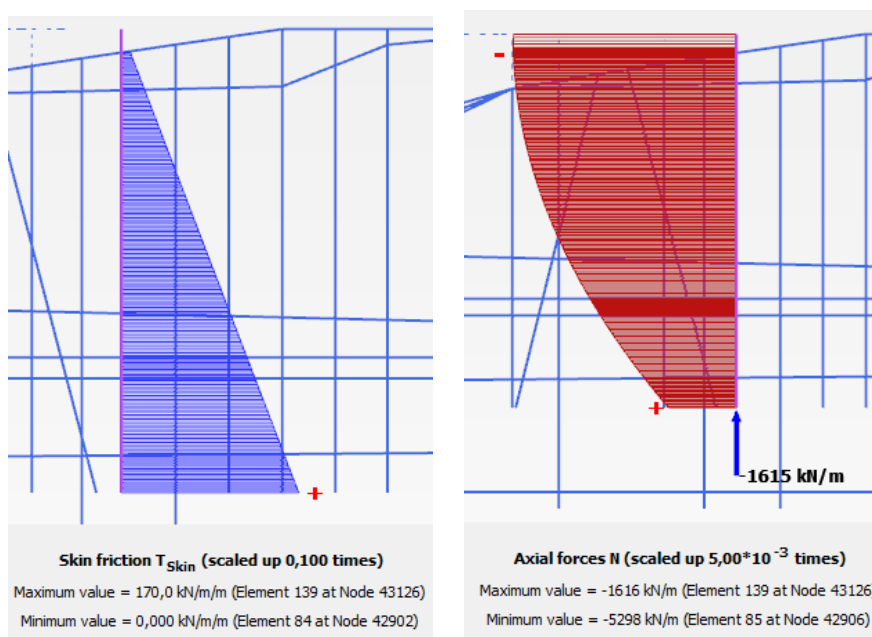
Pri tej obtežbi lahko opazimo skoraj popolnoma linearno razporeditev trenjske sile po celotnem kolu (Slika 32). Velja tudi, da je nosilnost plašča enaka maksimalni predpisani vrednosti, saj največja trenjska sila znaša 170 kN/m. Prvič lahko opazimo korenito povečanje sile pod nogo kola, saj ob tem obtežnem koraku znaša 1331 kN. Največja dovoljena sila pod nogo kola znaša 1615 kN, torej lahko pričakujemo nosilnost, ki bo še za cca. 350 kN večja od obstoječe.



Slika 32: Potek trenjske sile po plašču, osne sile in točkovne sile pod nogo kola pri obtežbi 4800 kN

## 9.6 Obtežba 5500 kN – pride do porušitve

Obtežbe 5500 kN kol ne more prenesti. Med analizo je program opozoril na porušitev. Na sliki (Slika 33) opazimo, da je največja nosilnost ob plašču enaka predpisani 170 kN/m, največja sila pod nogo kola pa je enaka 1615 kN. Če bi se nanos obtežbe izvršil do konca, bi osna sila v konici kola preseгла vrednost 1615 kN. To bi privedlo do neravnovesja in kol bi nezadržno prodiral naprej v globino, kar hkrati pomeni tudi porušitev zemljine v okolici kola.



Slika 33: Potek trenjske sile po plašču, osne sile in točkovne sile pod nogo kola pri obtežbi 5500 kN

## 10 Uporaba linijskih in kontaktnih elementov za modeliranje kolov

Iz podanih rezultatov v prejšnjih poglavjih je razvidno, da je mogoče z uporabo EPR elementov natančno analizirati obnašanje kolov pod vertikalno obtežbo, če le imamo na voljo potrebne rezultate raziskav. Iz opravljenih primerjav je razvidno, da na obnašanje kolov lahko vplivamo z veliko parametri. Nekatere lahko napovemo samo s statičnim ali dinamičnim obremenilnim testom. Rezultati take preiskave niso vselej na razpolago, zato je bila v nadaljevanju narejena analiza po do sedaj najbolj standardnem načinu modeliranja kolov v ravninski mreži končnih elementov. V ta namen je bil element EPR zamenjan z linijskim elementom, ki mu je bil dodan kontaktni element, ki opiše stik med zemljino in linijskim elementom ter omogoči zdrs elementa. Za potrebe te analize je bila zemljina modelirana na enak način, kot je modelirana v prejšnjem poglavju. Linijski elementi so bili modelirani iz enakega materiala kot EPR elementi ter imajo enako osno in upogibno togost ( $EA$  in  $EI$ ) kot obravnavani kol.

Plaxis 2D 2012 omogoča izbiro, da program v področju konice kola ustvari cono premera  $D_{eq}$ , kjer plastifikacija zemljine ni dovoljena. Ta lastnost je bila v numeričnih preiskavah, ki sledijo vselej upoštevana.

$$D_{eq} = \sqrt{12EI/EA}$$

### 10.1 Kontaktni element

Kkontaktni element je element, ki ga običajno postavimo med linijskim elementom in elementi zemljine. Ima svojo togost in nosilnost, ki je dobljena na podlagi Mohr-Coulomb-ovega kriterija. Torej je njegova nosilnost odvisna od kohezije –  $c$  in strižnega kota –  $\varphi$ , te karakteristike so odvisne od posameznega sloja zemljine. Togost kontaktnega elementa je določena na podlagi dveh enačb: osna togost  $\kappa_N = E_{oed}/t_i$  in strižna togost  $\kappa_S = G_i/t_i$ , kjer je  $t_i$  – virtualna debelina elementa,  $E_{oed}$  – edometrski modul zemljine  $G_i$  – je strižni modul zemljine. Plaxis omogoča, da na togost kontaktnih elementov vplivamo na dva načina, in sicer s korekcijo  $t_i$ , ki je v osnovi določena z vrednostjo 0,1 ter s faktorjem  $R_{inter}$  – ta faktor lahko določimo za vsako zemljino posebej v oknu, ki omogoča podajanje karakteristik zemljine. Vrednost  $R_{inter}$  vpliva na nosilnost kontaktnega elementa tako, da je nov parameter nosilnosti

enak vrednosti osnovne karakteristike, pomnožene s parametrom  $R_{inter}$ . Parameter  $R_{inter}$  vpliva tudi na togost elementov. Njen vpliv je predstavljen v spodnjih enačbah:

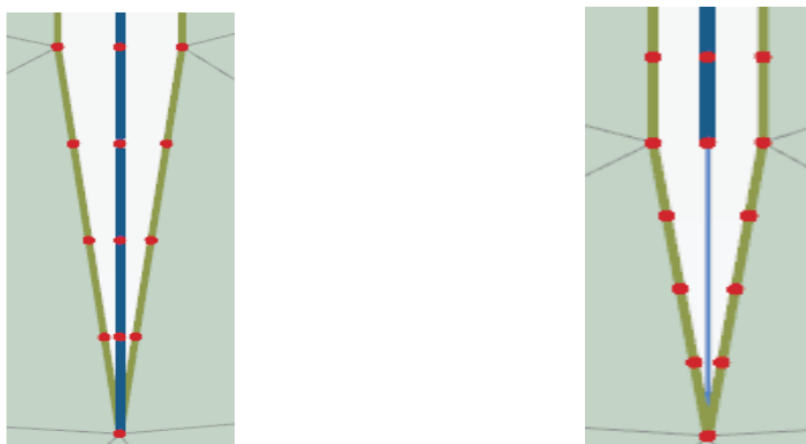
$$E_{oed,i} = 2 G_i \frac{1 - \nu_i}{1 - 2 \nu_i}$$

$$G_i = R_{inter}^2 G_{soil} \leq G_{soil}$$

$$\nu_i = 0.45$$

Analiza, katere rezultati so predstavljeni v nadaljevanju, temelji na korekciji faktorja  $R_{inter}$ .

V splošnem imamo dve možnosti kombiniranja kontaktnih elementov s koncem linijskega elementa in sicer s podaljškom vmesnega elementa in brez njega. Obe možnosti sta predstavljeni spodaj (Slika 34). Pri tem moramo upoštevati, da mora biti vrednost  $R_{inter}$  podaljšanega dela enak 1. Za potrebe te naloge je bil uporabljen način modeliranja s podaljškom vmesnega elementa. Ta povzroči, da noga kola ni togo vpeta v zemljino, saj bi to privedlo do nerealne nosilnosti pod konico kola. (Reference Manual - Plaxis 2012)

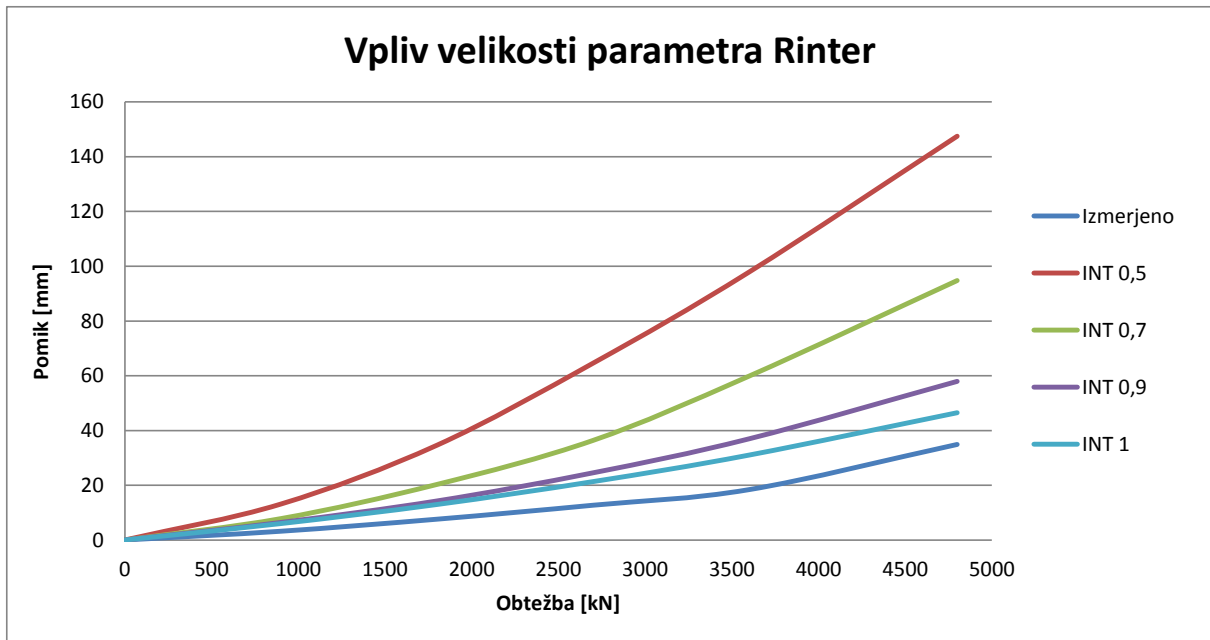


**Slika 34: Prikaz konice kola brez podaljška kontaktnega elementa in s podaljšanim kontaktnim elementom (Plaxis Reference Manual, 2012: str. 39)**

### 10.1.1 Vpliv parametra $R_{inter}$

Rezultati analize s podaljšanim kontaktnim elementom so podani na spodnjem grafu (Slika 35). Analiza je bila izvedena s karakteristikami zemljine, ki so bile uporabljene v končnem modelu analize obnašanja EPR elementov. Iz analize rezultatov je lepo razviden vpliv izbire vrednosti  $R_{inter}$  kontaktnega elementa. Opazimo lahko namreč, kako se pomiki povečujejo z zmanjševanjem vrednosti  $R_{inter}$ . Kljub temu se spreminjanje vrednosti  $R_{inter}$  ne

izkaže za koristno, saj so pomiki kola preveliki že pri vrednosti  $R_{inter} = 1$ . Omeniti velja, da je priporočljiva vrednost  $R_{inter} = 0,67 \approx 0,7$ . (Tutorial Manual - Plaxis 2012)



Slika 35: Graf odvisnosti pomika od parametra  $R_{inter}$

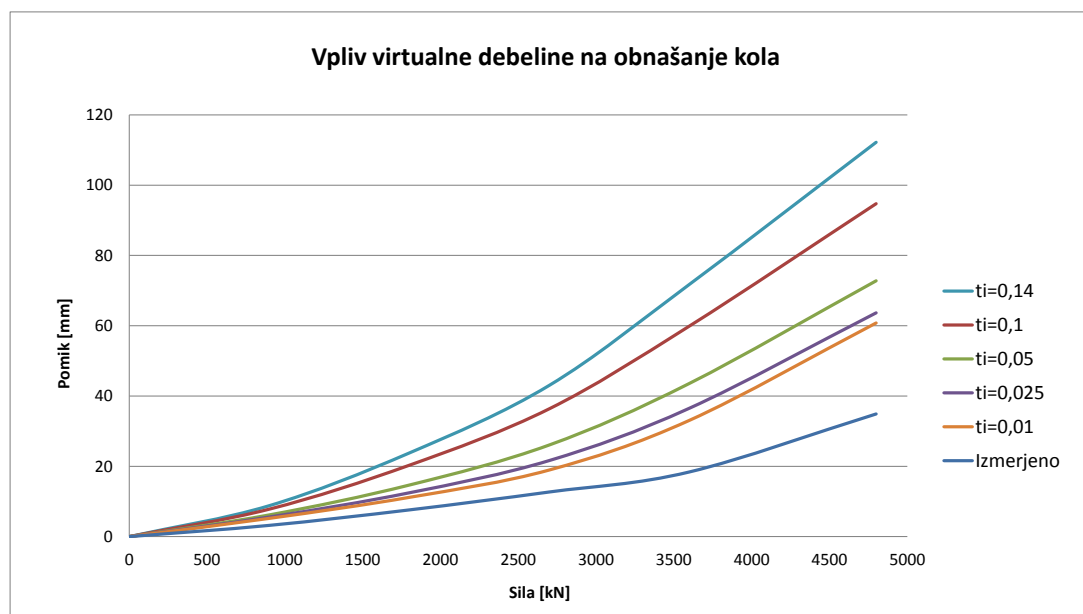
Medtem, ko pri vrednostih  $R_{inter} = 1$  in  $R_{inter} = 0,9$  večje razlike glede na realen odziv ni, pride do izrazite povečave pomikov pri nadaljnjem zmanjševanju vrednosti parametra  $R_{inter}$ . Končni pomik z uporabo  $R_{inter} = 0,7$  je za cca. dvakrat večji od modela z  $R_{inter} = 0,9$  in cca. trikrat večji od izmerjenih vrednosti. Ta vrednost se najbolj približa priporočeni vrednosti  $R_{inter} = 0,67$ . Pri vrednosti  $R_{inter} = 0,5$  pomiki zelo hitro rastejo tako, da tak model vsekakor ni primeren za analizo te konstrukcije.

### 10.1.2 Vpliv virtualne debeline elementa

Kot je bilo že omenjeno, je togost kontaktnega elementa določena na podlagi dveh enačb: osna togost  $\kappa_N = E_{oed,i}/t_i$  in strižna togost  $\kappa_S = G_i/t_i$ , kjer je  $t_i$  virtualna debelina elementa,  $G_i$  in  $E_{oed,i}$  pa sta vrednosti reduciranih togostnih karakteristik zemljine. Veljalo bi torej ugotoviti, kako na pomike vpliva virtualna debelina vmesnega elementa. Za potrebe te primerjalne analize je bil kontaktni element modeliran s priporočeno vrednostjo  $R_{inter} = 0,7$  ter s podaljškom kontaktnega elementa pod konico. Posamezne analize so bile izvedene z različnimi vrednostmi virtualne debeline  $t_i$  – tako da je slednja znašala od 0,01 (minimalna, ki jo program omogoča) do 0,14. Priporočena vrednost virtualne debeline znaša 0,1, vendar je že iz prejšnje analize razvidno, da analiza s tako virtualno debelino poda prevelike pomike.

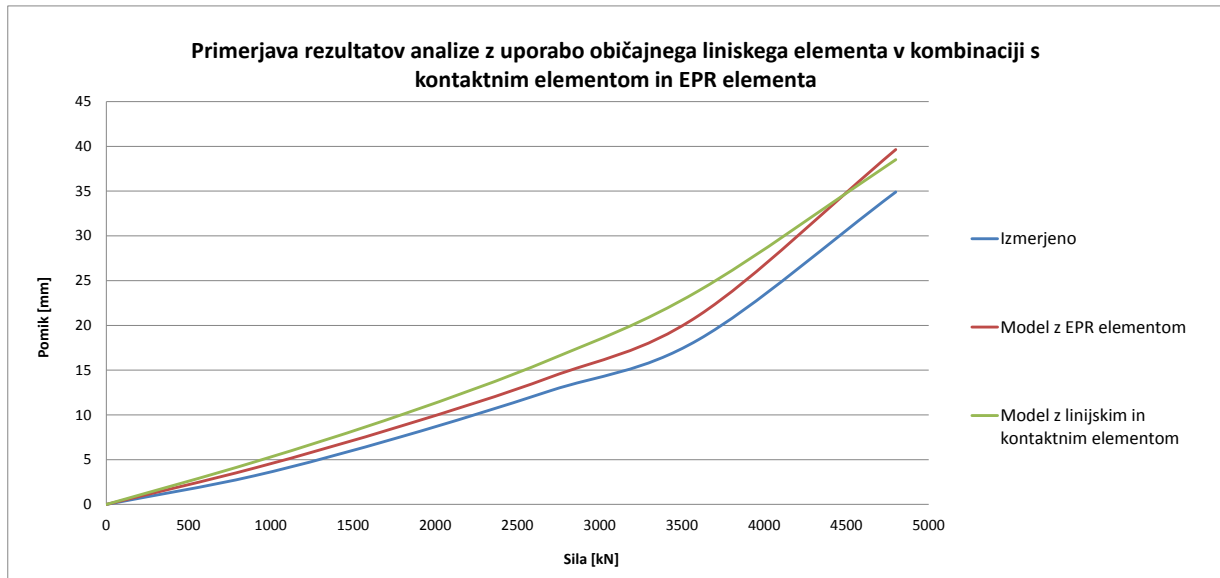


Zaradi tega dejstva so bile analize v nadaljevanju večinoma izvedene z zmanjševanjem debeline  $t_i$ , kar teoretično pomeni bolj tog stik med kolom in zemljino ter posledično manjši pomik kola. Kot je razvidno iz spodnjega grafa (Slika 36), ima zmanjševanje virtualne debeline elementa pomemben vpliv na zmanjševanje pomikov. Izkaže se, da model poda najbolj realne rezultate z uporabo minimalne vrednosti virtualne debeline.



Slika 36: Analiza vpliva virtualne debeline na pomike kola

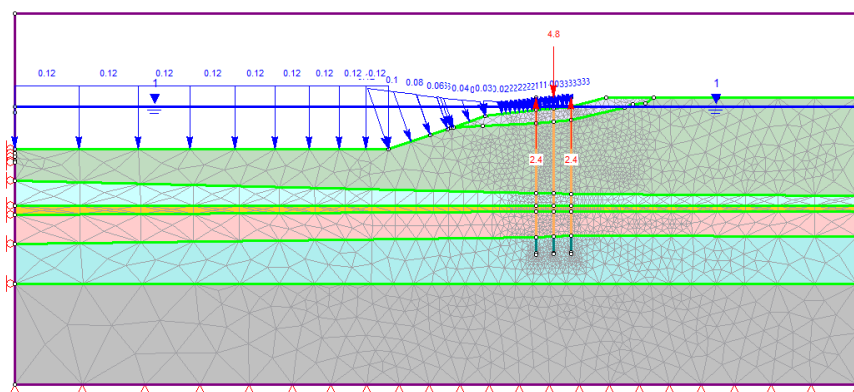
Glede na ugotovitve iz prejšnjih poglavij bi bilo smiselno opraviti še eno analizo pri kateri bi združili najbolj ugodno kombinacijo parametrov  $R_{inter}$  in  $t_i$ . V ta namen je bila izvedena analiza z  $R_{inter}=0,9$  in  $t_i=0,01$ . Rezultati te analize so na spodnjem grafu primerjani z rezultati analize z EPR elementom in rezultati pridobljenimi z meritvami v Luki Koper (Slika 37). Rezultati so dobri, saj je odziv računskega modela zelo podoben izmerjenemu odzivu. Kljub temu pa velja izpostaviti pomanjkljivosti modeliranja kolov z linijskim elementom v kombinaciji s kontaktnim elementom. V tej analizi je namreč tako modeliran kol izkazoval za več 1000 kN večjo nosilnost od izmerjene na testu. Druga velika pomanjkljivost je, da sta parametra  $R_{inter}$  in  $t_i$  popolnoma numerične narave in jih ni mogoče dobiti iz geološko geotehniških raziskav. Analiza s priporočenimi vrednostmi pa očitno ne poda natančnega odziva, kar je razvidno iz prejšnjih poglavij. Poleg tega se je tudi čas analize z uporabo prej omenjene kombinacije  $R_{inter}=0,9$  in  $t_i=0,01$  precej podaljšal.



**Slika 37: Primerjava rezultatov analize z uporabo običajnega linijskega elementa v kombinaciji s kontaktnim elementom z analizo opravljeno z EPR elementom**

## 11 Analiza v Phase 2.0

Omenjeno je že bilo, da je pomol 7A projektiralo podjetje Geoportal. Za analizo poglobitve so pri omenjenem podjetju uporabili tudi program Phase 2.0. Tudi to je program, ki temelji na analizi po metodi končnih elementov. Ker bodo v nadaljevanju rezultati analize poglobljanja veza 7A, dobljeni z analizo z EPR elementi, primerjani tudi z rezultati dobljenimi s programom Phase 2.0, velja opraviti analizo posedanja kolov tudi s tem programom. Na sliki spodaj (Slika 38) je prikazan numerični model statičnega obremenilnega testa v programu Phase 2.0.



Slika 38: Model testa kola v programu Phase 2.0

### 11.1 Modeliranje v programu Phase 2.0

Čeprav se program Phase 2.0 po uporabniškemu vmesniku zelo razlikuje od programa Plaxis, gre po drugi strani za podoben program, ki omogoča analizo geotehničnih problemov. Žal program ne omogoča analize s HS oz. HSsmall modelom tako, da je zemljina v tem primeru modelirana z MC modelom.

### 11.2 Kontaktni elementi

Program omogoča uporabo kontaktnih elementov v kombinaciji z linijskimi, le da so tukaj taki elementi poimenovani »Structural interface«. Ta element združuje lastnosti linijskega elementa in kontaktnega elementa. Zahtevane karakteristike linijskega elementa so praktično enake kot tiste v programu Plaxis. Program sicer ne omogoča enostavnega upoštevanja elastične cone pod konico, slednjo pa lahko po želji zmodeliramo sami. Nekoliko drugače se definira kontaktne elemente. Tukaj ni mogoče uporabiti faktorjev  $R_{inter}$ , temveč je potrebno za

vsako zemljino določiti svoj kontaktni element, kar je sicer zelo zamudno delo. Tako je za vsak material posebej potrebno določiti  $\kappa_N = E_{oed,i}/t_i$  ter  $\kappa_S = G_i/t_i$ . Za vrednosti teh parametrov so bile določene enake vrednosti kot tiste, ki jih v programu Plaxis program sam izračuna in sicer po enačbah omenjenih v poglavju 10.1 in so podane v spodnji preglednici (Preglednica 9).

**Preglednica 9: Karakteristike kontaktnega elementa »interface«**

| Kontaktnelement   |      |        |       |       |       |       |
|-------------------|------|--------|-------|-------|-------|-------|
|                   | Mulj | Fliš   | Glina | Nasip | Pesek | Glina |
| $E_{oed_s}$ [MPa] | 2,20 | 135,00 | 4,00  | 60,00 | 30,00 | 4,50  |
| $\nu_s$           | 0,30 | 0,30   | 0,30  | 0,30  | 0,30  | 0,30  |
| $E_s$ [MPa]       | 1,63 | 100,29 | 2,97  | 44,57 | 22,29 | 3,34  |
| $G_s$ [MPa]       | 0,63 | 38,57  | 1,14  | 17,14 | 8,57  | 1,29  |
| $G_i$ [MPa]       | 0,63 | 38,57  | 1,14  | 17,14 | 8,57  | 1,29  |
| $\nu_i$           | 0,45 | 0,45   | 0,45  | 0,45  | 0,45  | 0,45  |
| $E_i$ [MPa]       | 1,82 | 111,86 | 3,31  | 49,71 | 24,86 | 3,73  |

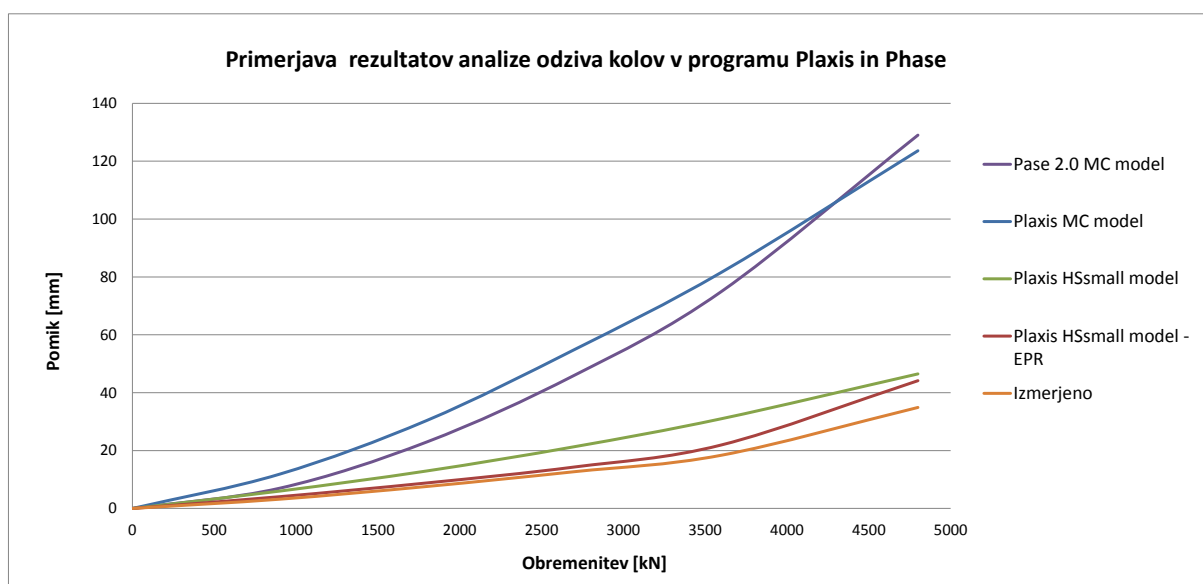
Ker je modeliranje vsakega kontaktnega elementa posebej zelo zamudno delo, pridobljeni rezultati pa se le malo razlikujejo, je bil stik med zemljino in koli modeliran zgolj z dvema tipoma kontaktnih elementov (Preglednica 10). Prvim s karakteristikami stika zgornjega sloja glin in drugim s karakteristikami stika v prod. Prvi kontaktni element je bil upoštevan od vrha do plasti s prodom, drugi pa v prodnatem sloju.

**Preglednica 10: Karakteristike kontaktnega elementa  $t_i = 0,01$**

| Karakteristika   | Kontaktnelement 1<br>manj nosilne zemljine | Kontaktnelement 2<br>prod |
|------------------|--|---------------------------|
| $\kappa_N$ [MPa] | 182  | 11186                     |
| $\kappa_S$ [MPa] | 63   | 3857                      |

### 11.3 Rezultati analize Phase 2.0

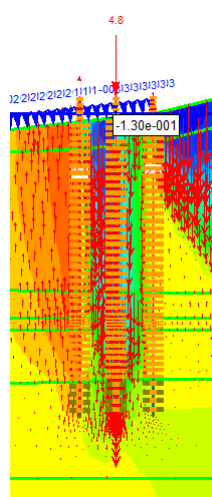
Na grafu (Slika 39) je prikazana primerjava rezultatov analiz v programu Phase 2.0 in Plaxis 2012 2D. Na grafu je poleg analiz z MC modelom v obeh programih ( $R_{inter}=1$  in  $t_i = 0,01$ ), prikazan tudi odziv HSsmall modela v programu Plaxis z uporabo običajnega linijskega elementa za modeliranje kola v kombinaciji s kontaktnim elementom in tistega z uporabo EPR elementa ter dejanski odziv kola izmerjen na testu.



**Slika 39: Analize odziva kolov s programoma Plaxis in Phase 2.0 z uporabo različnih modelov za modeliranje zemlje in kolov**

Iz dobljenih rezultatov je razvidno, da oba programa podata približno enake vrednosti pomikov pri upoštevanju MC modela zemlje in z uporabo običajnega linijskega elementa v kombinaciji s kontaktnim elementom za modeliranje kola.

Na grafu opazimo, da pri uporabi običajnega linijskega elementa za modeliranje kolov ni spremembe naklona premice pomika v odvisnosti od obtežbe, ki pa obstaja pri natančnejših modelih (rdeča premica). Poleg tega je razvidno, da analiza z MC modelom zemlje poda prevelike pomike, kar je prikazano tudi na spodnji sliki (Slika 40), ki prikazuje vertikalne pomike pri obremenitvi 4800 kN dobljene z analizo v programu Phase 2.0.



**Slika 40: Vertikalni pomiki [m] pri modelu v Phase 2.0**

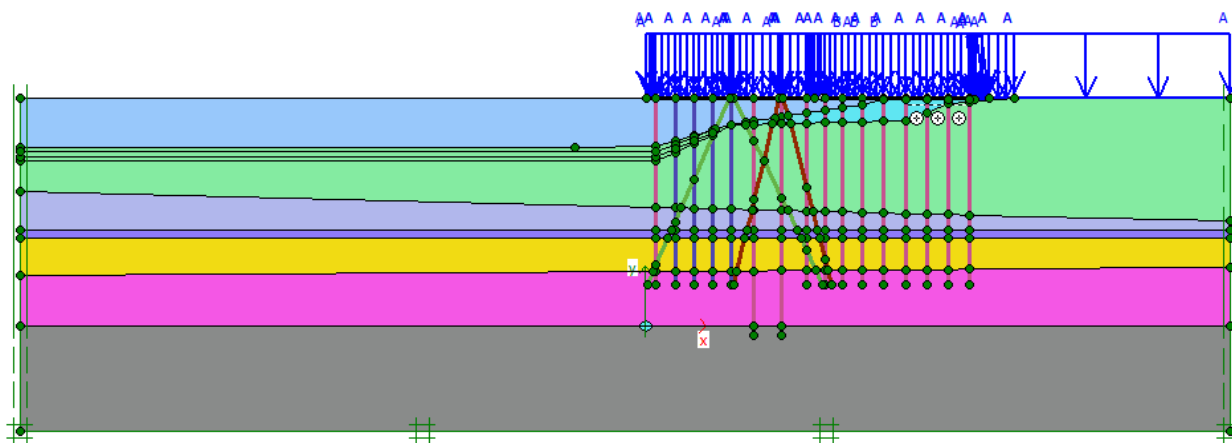
## 12 Poglobitev veza 7A

Osvojena znanja iz dosedanje analize so bila uporabljena pri analizi poglobljanja morskega dna na primeru veza 7A v Luki Koper. Za modeliranje veza je bil uporabljen HSsmall model zemljine v kombinaciji z EPR elementi (Slika 41). Lastnosti EPR elementov in zemljine so enake tistim, uporabljenim v končnem modelu v poglavju 8 - Končni model zemljine in EPR elementa. Spremenila se je samo razdalja  $L_{razmak}$  pri EPR elementih, ki je sedaj dejanska razdalja med koli v posamezni vrsti. Tako je upoštevano, da so prvi koli obalne konstrukcije na medsebojni razdalji 4,5 m, ostali koli obalne konstrukcije na 9 m, poševni koli na 9 m in koli zaledne konstrukcije na 4,5 m. Poleg tega so korigirane tudi dimenzije in nosilnosti poševnih kolov, saj dimenzije prereza poševnih kolov znašajo  $\phi 508/8$  mm, ostalih pa  $\phi 812,5/12,5$  mm. Zaradi drugačnih dimenzij kolov je bilo potrebno korigirati tudi nosilnost po plašču in nosilnost pod nogo kola za kole  $\phi 508/8$ .

$$T_{bot}(\phi 508) = T_{bot}(\phi 812,5) * d(\phi 508)/d(\phi 812,5) = 170 * 508/812,5 = 106,4 \text{ kN/m}$$

$$F_{max}(\phi 508) = F_{max}(\phi 812,5) * d(\phi 508)^2/d(\phi 812,5)^2 = 1615 * 508^2/812,5^2 = 631 \text{ kN}$$

V modelu so bile upoštewane tudi dilatacije med ploščami, ki so posledica gradnje pomola v različnih časovnih obdobjih. Upoštewane so bile z modeliranjem pomola z več linijskimi elementi, ki med sabo niso povezani.

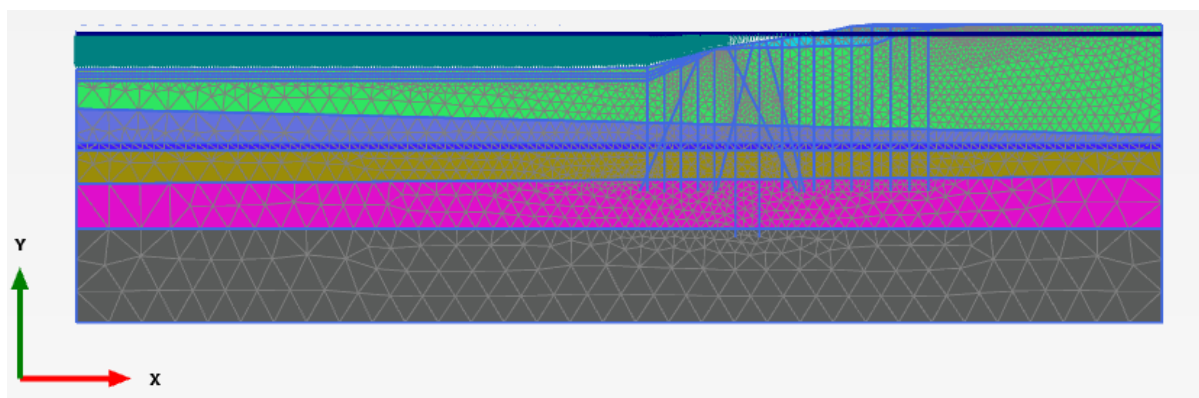


Slika 41: Model za analizo poglobitev veza 7A v programu Plaxis

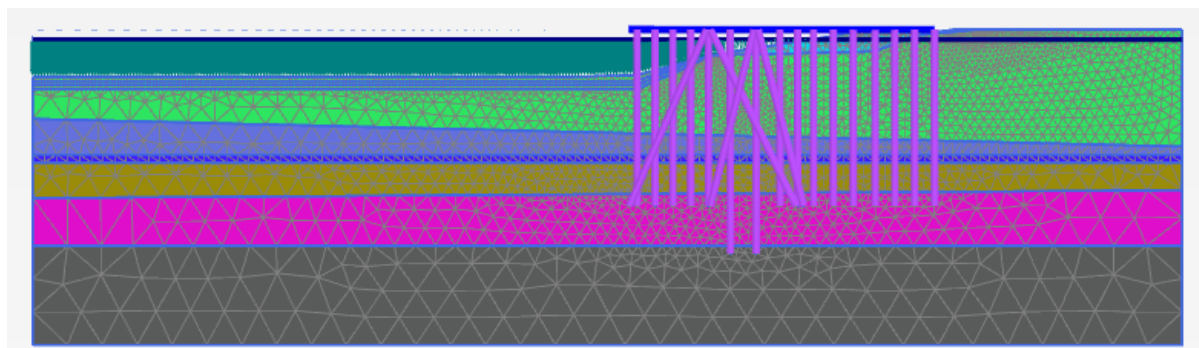
Poglobitev morskega dna naj bi do predvidene globine potekala po fazah, zaradi tega je tudi računski model sestavljen iz več faz:

- Račun začetnega napetostnega stanja –  $K_0$

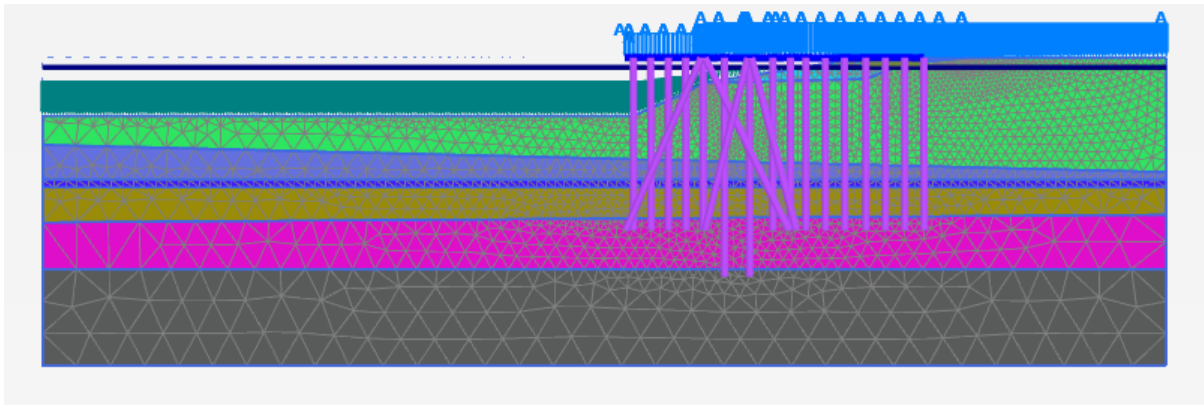
- 0 – služi uravnoteženju napetostnega stanja v zemljini – (Slika 42)
- Vgradnja kolov in plošče pomola – (Slika 43)
- Obremenitev pomola
- Konsolidacija 90% – 12 let
- Poglobitev na koto – 13 hidrografska
- Poglobitev na koto – 14 hidrografska
- Poglobitev na koto – 15 hidrografska – (Slika 44)
- Konsolidacija 99% – 20 let



Slika 42: Model v programu Plaxis računsko fazo 0 in orientacija koordinatnega sistema



Slika 43: Model v programu Plaxis računsko fazo vgradnje kolov



Slika 44: Model v programu Plaxis računsko fazo končne poglobitve na 15m

## 13 Obremenitve

Projektne obremenitve so povzete iz projekta Poglobljanje plovnega kanala in severnega dela bazena I znotraj akvatorija koprškega pristanišča na koto -15 m (hidrografsko) (Geoportal, 2011). Kontejnerji povzročajo ploskovno obtežbo velikosti 50 kPa, obtežba dvigal pa povzroča linijsko obtežbo. Linijska obtežba dvigala se razlikuje glede na tip dvigala, ki lokalno delujejo na konstrukcijo. Na pomolu namreč delujeta dva tipa dvigal z razponom 18 m in 30 m. Obtežba dvigala z razponom 30 m znaša 307 kN/m. Obtežba dvigala z razponom 18 m pa znaša 272 kN/m.



## 14 Projektni pristopi

### 14.1 PP2

Pri tem projektne pristopu se račun izvede s karakterističnimi vrednostmi karakteristik zemljin. Poveča se notranje sile s faktorjem 1,35 za stalne vplive, oz. z 1,5 za spremenljive vplive. Ta projektni pristop je bil upoštevan tako, da se je najprej spremenljiva obtežba v zadnji računski fazi faktorira z 1,11, nato so se še vednosti notranjih sil pomnožile s faktorjem 1,35. Tako so bili vplivi spremenljive obtežbe faktorirani z 1,5, tisti stalne obtežbe pa z 1,35. V Sloveniji je ta projektni pristop priporočen za preverjanje obremenitev elementov.

### 14.2 PP3

V tem projektne pristopu se strižne parametre zemljine ( $\varphi$  in  $c$ ) reducira z 1,25 ter se ustrezno faktorira obtežbo. Ta projektni pristop je bil upoštevan z redukcijo karakteristik zemljine s faktorjem 1,25 ( $c_d = c/1,25$  ;  $\varphi_d = \arctan(\tan(\varphi)/1,25)$ ) ter z ustreznim faktoriranjem obtežbe. Preverjeno je bilo torej ali je zagotovljena stabilnost pri varnosti 1,25. Faktoriranje obtežbe je nekoliko bolj zapleteno, saj je potrebno spremenljive obremenitve, ki izvirajo iz konstrukcije množiti z drugačnimi faktorji, kot tiste za geotehnične vplive. V tej analizi so bili vsi spremenljivi vplivi faktorirani z 1,5, kar ustreza faktorjem za obremenitve iz konstrukcije. V Sloveniji je ta projektni pristop priporočen za preverjanje globalne stabilnosti.

### 14.3 Analiza po projektne pristopu PP2

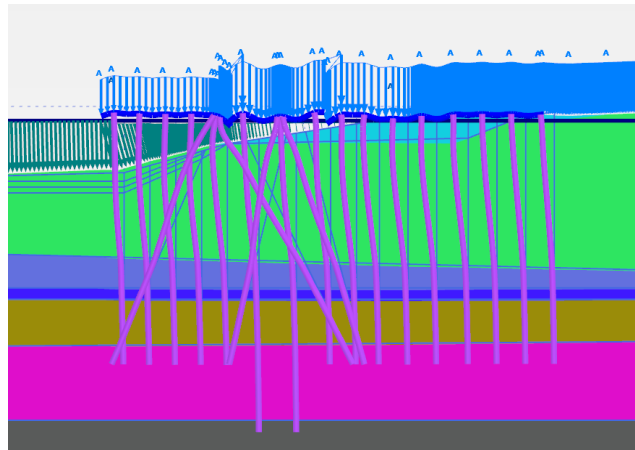
Na sliki spodaj (Slika 45) je predstavljena deformirana oblika konstrukcije, ki jo v računskem koraku nanosa obtežbe povzroči zunanja obremenitev. Opazimo lahko, da se konstrukcija zaradi zunanje obtežbe pomakne proti morju. Vertikalna deformacija je po celi konstrukciji podobna, saj so mesta večjih točkovnih obtežb (dvigala) ojačana s poševnimi koli ali gostejšim rastrom vertikalnih kolov. Velikosti pomikov obalne konstrukcije so obravnavane v poglavju 15 – MSU. V nadaljevanju so prikazani grafi obremenitev kolov po PP2 za fazo poglobitve na 15 m, saj se za večino kolov izkaže, da so najbolj obremenjeni ravno v tej fazi.

Notranje sile v kolih, ki so predstavljene v nadaljevanju, so rezultat analize z metodo končnih elementov kot jih poda program Plaxis 2D 2012 in so podane v kN/m oz. kNm/m. V kolikor

želimo dobiti prave vrednosti sil v kolih, moramo najprej vrednosti na spodnjih grafih pomnožiti z 1,35 (PP2) in nato še z razdaljo med koli 4,5 oz. 9 m.

$$F_{max} = F_{MKE} * 1,35 * L_{Razmak} [m]$$

Vse osne sile v kolih so tlačne, tako je bila sprejeta odločitev, da bo negativen predznak vselej izpuščen.

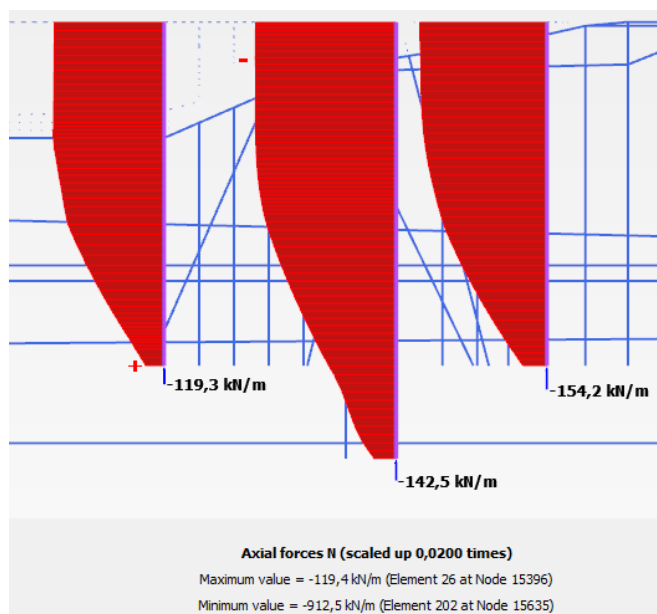


Slika 45: Oblika deformacije konstrukcije pri obtežbi v MSN - PP2

### 14.3.1 Osna sila

Največja osna sila, ki se pojavi v kolih znaša 913 kN/m. Kol, ki je najbolj obremenjen, je daljši kol na zaledni konstrukciji med obema poševnima koloma. V splošnem so sicer veliko bolj obremenjeni tisti koli, ki se nahajajo neposredno pod točkovno obtežbo dvigala, še posebej trije, za katere so spodaj izrisani grafi poteka osne sile (Slika 46). Maksimalne obremenitve za posamezno skupino kolov so podane v preglednici v nadaljevanju v poglavju 14.7. Za najbolj obremenjen kol določimo maksimalno osno silo:

$$F_{N,max} = 913 [kN/m] * 1,35 * 4,5 [m] = 5546 kN$$

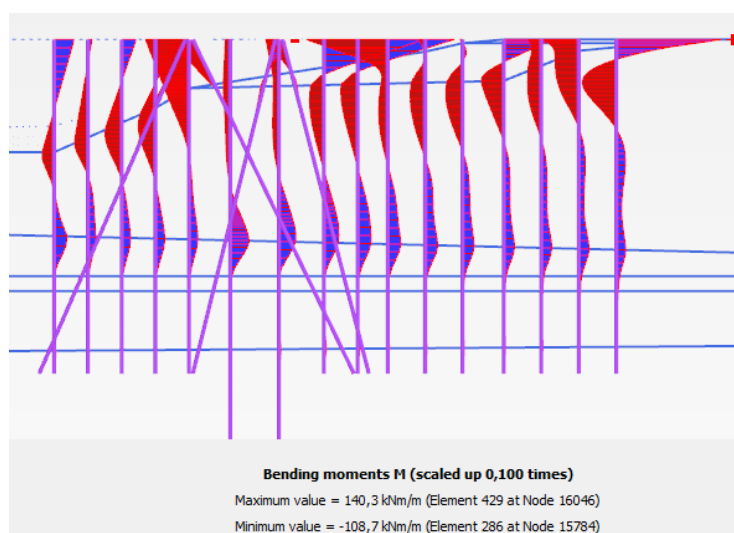


Slika 46: Osna obremenitev kolov MSN - PP2

### 14.3.2 Moment

Največji moment se pojavi v prvem kolu zaledne konstrukcije in znaša 140 kNm/m (Slika 47).

$$M_{max} = 140 \text{ [kNm/m]} * 1,35 * 4,5 \text{ [m]} = 850,5 \text{ kNm}$$

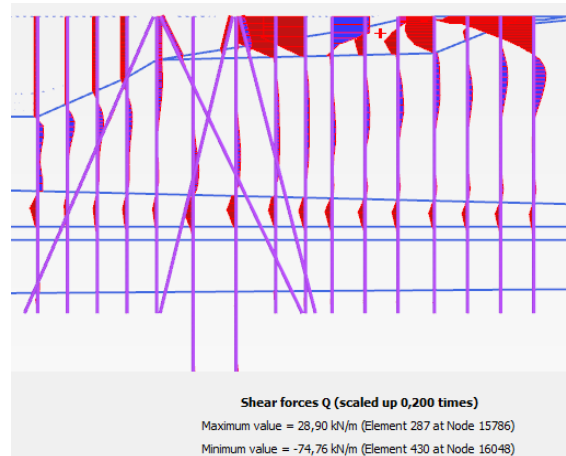


Slika 47: Momenti pri obremenitvi MSN - PP2

### 14.3.3 Prečna sila

Največja prečna sila se pojavi v skrajnem desnem kolu in znaša  $-75 \text{ kN/m}$  in se nahaja na istem mestu in v istem kolu kot največji moment (Slika 48).

$$Q_{max} = 75 \text{ [kN/m]} * 1,35 * 4,5 \text{ [m]} = 456 \text{ kN}$$



Slika 48: Prečne sile pri obremenitvi MSN - PP2

#### 14.4 Prikaz spreminjanja notranjih sil med poglobitvijo

V tem poglavju je predstavljena sprememba notranjih sil v kolih po posameznih korakih poglobitve. Spodnja preglednica (Preglednica 11) prikazuje maksimalne obremenitve kolov. Iz preglednice je razvidno, da se obremenitve med poglobljanjem bistveno ne spreminjajo. Opazimo, da se največja osna obremenitev kola med poglobitvijo poveča za 10 kN, medtem ko se sila pod nogo kola, maksimalni moment in maksimalna prečna sila sploh ne spremenijo.

V vrstici PP2 so vrednosti rezultat enačbe:  $F_{max} = F_{MKE} * 1,35 * L_{Razmak} \text{ [m]}$

Preglednica 11: Spremembe notranjih sil zaradi poglobitve morskega dna – maksimalne vrednosti

| Faza poglobitve  | $N$ [kN/m] | $N_{pod\ nogo}$ [kN/m] | $M$ [kNm/m] | $Q$ [kN/m] |
|------------------|------------|------------------------|-------------|------------|
| 12 - osnovna     | 841        | 133                    | 128         | 72         |
| 13               | 844        | 133                    | 128         | 72         |
| 14               | 847        | 133                    | 128         | 72         |
| 15               | 851        | 133                    | 128         | 72         |
| MSN [fakt. 1,11] | 913        | 143                    | 140         | 75         |
| PP2              | 5546 [kN]  | 868,5 [kN]             | 850 [kNm]   | 455 [kN]   |
| Sprememba - ABS  | 10         | 0                      | 0           | 0          |
| Sprememba [%]    | 1,2        | 0                      | 0           | 0          |

Domnevamo lahko, da bo večji vpliv poglobitve opaziti na prvem kolu obalne konstrukcije, saj se slednjemu najbolj zmanjša sprijemna dolžina z zemljino. Zato preseneča dejstvo, da temu ni tako, saj ob pregledu spodnje preglednice (Preglednica 12) opazimo, da so se vrednosti ostale bolj ali manj enake.

**Preglednica 12: Spremembe notranjih sil zaradi poglobitve morskega dna v prvem kolu obalne konstrukcije**

| Faza poglobitve | $N$ [kN/m] | $N_{pod\ nogo}$ [kN/m] | $M$ [kNm/m] | $Q$ [kN/m] |
|-----------------|------------|------------------------|-------------|------------|
| 12 - osnovna    | 660        | 124                    | 27          | 6          |
| 13              | 659        | 122                    | 26          | 6          |
| 14              | 660        | 121                    | 25          | 7          |
| 15              | 660        | 120                    | 23          | 5          |
| MSN – fakt 1,11 | 719        | 119                    | 24          | 7          |
| PP2             | 4374 [kN]  | 904,5 [kN]             | 207 [kNm]   | 55 [kN]    |
| Sprememba - ABS | 0          | 4                      | 4           | 1          |
| Sprememba [%]   | 0          | 4                      | 11          | 14         |

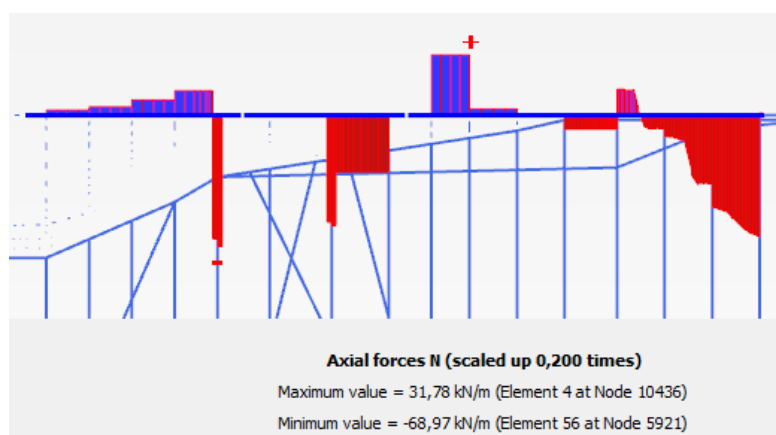
Tak vzorec minimalnega spreminjanja notranjih sil je moč opaziti tudi pri modelih, ki bodo obravnavani v nadaljevanju, zato take primerjave v nadaljevanju niso več predstavljene. V nadaljevanju so torej podane le največje obremenitve za obravnavani model.

## 14.5 Notranje sile v horizontalni AB konstrukciji PP2

### 14.5.1 Osna sila

Največja osna sila znaša 69 kN/m (Slika 49). Sila ni pretirano velika in je povečini tlačna in posledično ne bo bistveno vplivala na nosilnosti AB konstrukcije.

$$F_{N,max} = 69 \text{ [kN/m]} * 1,35 = 93 \text{ kN/m}$$

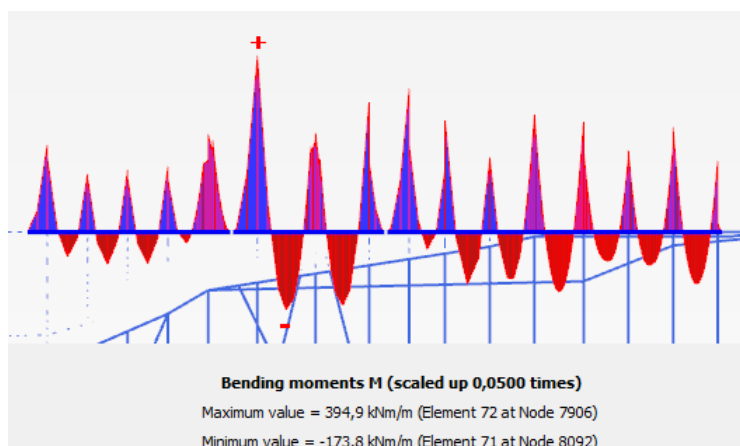


**Slika 49: Osne sile v horizontalni konstrukciji pri obremenitvi MSN - PP2**

### 14.5.2 Moment

Največji moment se pojavi nad kolom (podporo) in znaša -395 kNm/m (Slika 50). V splošnem je lepo razvidno, da se horizontalna nosilna konstrukcija obnaša podobno kot kontinuiran nosilec.

$$M_{max} = 395 \text{ [kNm/m]} * 1,35 = 533 \text{ kNm/m}$$

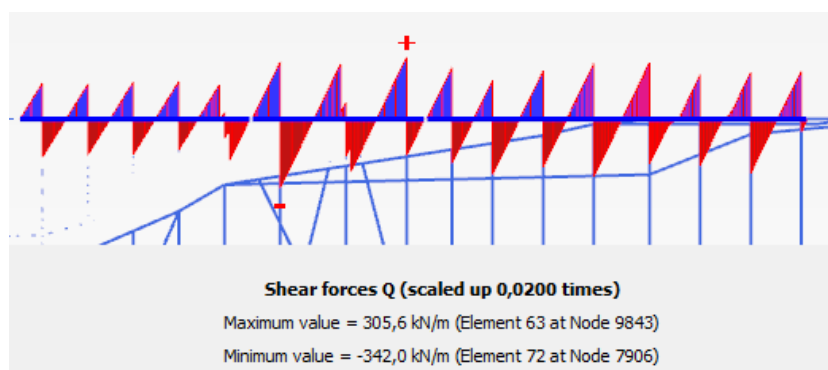


Slika 50: Momenti v horizontalni konstrukciji pri obremenitvi MSN - PP2

### 14.5.3 Prečna sila

Največja prečna sila se pojavi na mestu največjega momenta in znaša -343 kN/m (Slika 51).

$$Q_{max} = 342 \text{ [kN/m]} * 1,35 = 463 \text{ kN/m}$$

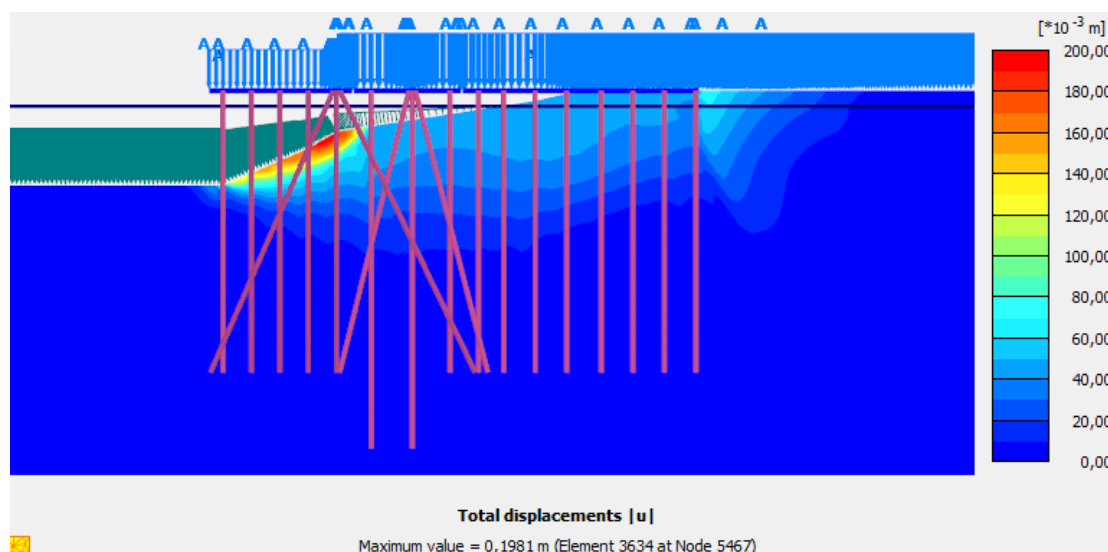


Slika 51: Prečne sile v horizontalni konstrukciji pri obremenitvi MSN - PP2

## 14.6 Globalna stabilnost preverjena po PP3

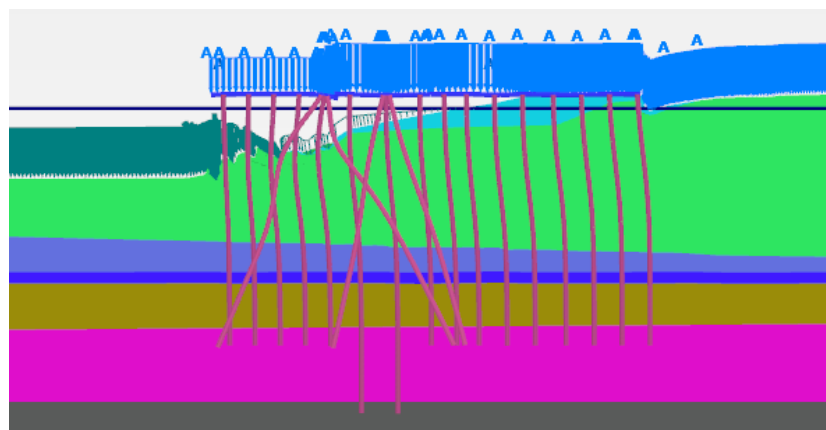
Varnost za zadnji korak poglobitve, ki je preračunana s spremenljivo obtežbo, faktorirano z 1,5, presega vrednost 1,3. Na slikah spodaj (Slika 52) in (Slika 53) so predstavljeni pomiki pri varnosti 1,25. Iz rezultatov lahko opazimo lokalno povečanje pomikov točno na delu kjer je v modelu brežina nagnjena za malenkost večji kot. Po projektnem pristopu PP3 je zahtevana

globalna stabilnost pri redukciji strižnih karakteristik za faktor 1,25. To ustreza varnostnemu faktorju 1,25 pred globalno poružitvijo, analizirano z metodo redukcije strižnih karakteristik.



Slika 52: Pomiki pri doseženi varnosti 1,25 – PP3

Na sliki spodaj (Slika 53), kjer so pomiki povečani 50-krat, vidimo, da se konstrukcija premakne praktično vodoravno v smeri proti morju.



Slika 53: Deformirana lega konstrukcije pri varnosti 1,25 - PP3

## 14.7 Osna obremenitev kolov

Najpomembnejšo obremenitev v kolih predstavljajo osne sile, zato so slednje natančneje obravnavane v tem poglavju. Največja osna sila v kolih se pojavi na vrhu kola, to velja tudi za momente in prečne sile. Največja osna obremenitev se pojavi v tistem izmed dveh daljših kolov, ki je bližje zaledju in znaša:

$$F_{max} = 913 \text{ kN/m} * 1,35 * 4,5\text{m} = 5546 \text{ kN}$$

Glede na karakteristike EPR elementov, ki so bile določene na podlagi opravljenih obremenilnih testov, lahko nosilnost kolov  $\phi 812,5$  ocenimo na:

$$N_{EPR} = F_{bot, max} + 0,5 * L_{EPR} * (T_{Top, max} + T_{Bot, max}) = 1614 + 0,5 * L_{EPR} * (0 + 170) = 85 * L_{EPR} + 1614$$

Za kole  $\phi 508$  pa :

$$N_{EPR} = F_{bot, max} + 0,5 * L_{EPR} * (T_{Top, max} + T_{Bot, max}) = 631 + 0,5 * L_{EPR} * (0 + 106) = 53 * L_{EPR} + 631$$

Prvotni oceni je potrebno odšteti še nosilnost dela kola nad morskim dnom, saj kol v tem delu ni v stiku z zemljino in posledično ni zmožen prenašati obtežbe na okolico. Z omenjenimi izhodišči so preračunane nosilnosti v spodnji preglednici (Preglednica 13).



**Preglednica 13: Obremenitve in nosilnost posameznih kolov**

| Pozicija kola              | Razdalja med koli [m] | FMKE [kN/m] | FMKE [kN] | PP2 [kN]    | Dolžina kola [m] | Prosti del [m] |
|----------------------------|-----------------------|-------------|-----------|-------------|------------------|----------------|
| Prvi kol obalne kons.      | 4,5                   | 719         | 3235      | 4368        | 44,5             | 17,5           |
| Ostali koli obalna kons.   | 9                     | 428         | 3852      | 5200        | 44,5             | 12             |
| Poševni koli obalna kons.  | 9                     | 197         | 1773      | 2394        | 50               | 5,4            |
| Poševni koli zaledna kons. | 9                     | 250         | 2250      | 3038        | 46               | 12,6           |
| Daljša kola zaledne kons.  | 4,5                   | 913         | 4108      | <b>5546</b> | 56,5             | 6,5            |
| Ostali koli zaledne kons.  | 4,5                   | 823         | 3703      | 5000        | 44,5             | 4,7            |

| Pozicija kola              | Nosilnost plašča kola [kN] | Nosilnost noge [kN] | Skupna nosilnost [kN] | Fakt. izkor. karakt. vredn. [%] | Rač. vredn. nos. [kN] | Izkoriščenost [%] |
|----------------------------|----------------------------|---------------------|-----------------------|---------------------------------|-----------------------|-------------------|
| Prvi kol obalne kons.      | 3197,5                     | 1615                | 4812                  | 67,2                            | 4375                  | 99,8              |
| Ostali koli obalna kons.   | 3507,4                     | 1615                | 5122                  | 75,4                            | 4657                  | <b>111,9</b>      |
| Poševni koli obalna kons.  | 4219,0                     | 631                 | 4850                  | 36,6                            | 4409                  | 54,3              |
| Poševni koli zaledna kons. | 3726,4                     | 631                 | 4357                  | 51,6                            | 3961                  | 76,7              |
| Daljša kola zaledne kons.  | 4738,9                     | 1615                | 6354                  | 64,6                            | 5776                  | 95,9              |
| Ostali koli zaledne kons.  | 3740,3                     | 1615                | 5355                  | 69,2                            | 4868                  | <b>102,7</b>      |

Ker je najbolj obremenjen kol hkrati tudi najdaljši  $L_{EPR} = 55,5 \text{ m}$ , velja ocena:

$$N_{kola, RD} = 6354 \text{ kN} > N_{kola, ED} = 5546 \text{ kN}$$

Ob upoštevanju, da imamo na razpolago rezultate več obremenilnih testov kolov  $\phi 812,5/12,5$  in  $\phi 508/8$  (Preglednica 2, poglavje 4.2), lahko ocenimo nosilnost:

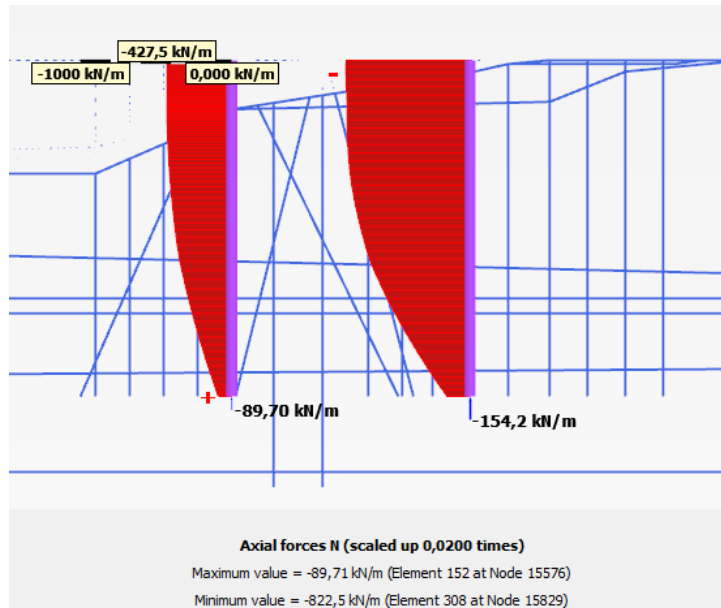
$$R_{c,k} = R_{izmerjeno} / \xi = 6354 / 1,0 = 6353 \text{ kN}$$

$$R_{c,d} = R_{c,k} / 1,1 = 6354 / 1,1 = 5775 \text{ kN}$$

$$R_{c,d} > F_{ed} ; 5775 \text{ kN} > 5546 \text{ kN}$$

Kot je razvidno iz rezultatov, je nosilnost najbolj obremenjenega kola z upoštevanjem zahtev EC7 ustrezna. Pri tem velja, da je dejanska nosilnost najdaljših kolov še večja, saj daljši koli segajo do plasti fliša in je torej nosilnost noge kola večja od predpostavljene, ki velja za prodnat sloj.

V zgornji preglednici lahko opazimo, da je v dveh primerih nosilnost prekoračena. Na spodnji sliki (Slika 54) sta predstavljeni maksimalni osni sili v omenjenih kolih (zgoraj ob kolu na levi strani slike in spodaj pod sliko za bolj obremenjen kol).

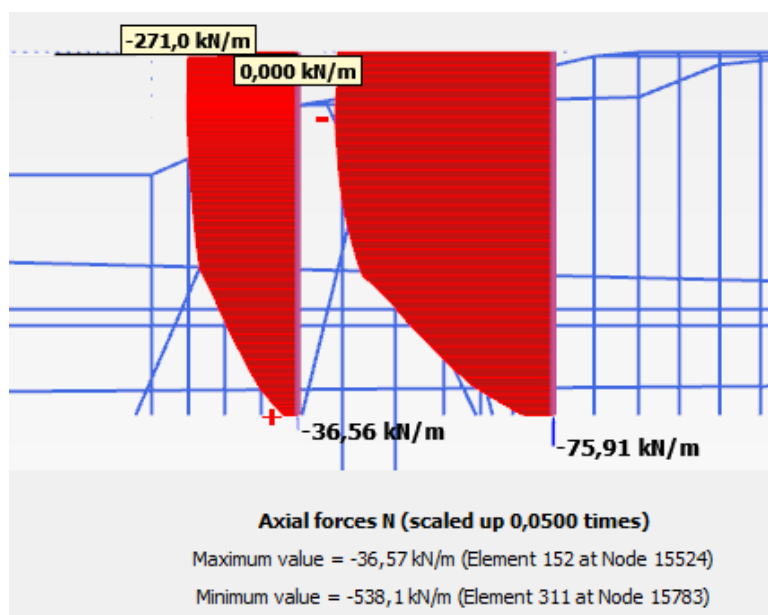


**Slika 54: Potek osne sile v dveh kolih s prekoračeno nosilnostjo**

Po krajšem pregledu rezultatov ugotovimo, da so sile prekoračene v kolih, ki stojijo neposredno pod linijsko obtežbo, ki jo povzročajo luška dvigala. Ob razmisleku, da je nemogoče, da bi hkrati delovala dvigala in bi kontejnerji ležali na tirih po katerih se dvigala premikajo, lahko obtežbo na omenjena kola zmanjšamo. Torej če privzamemo, da v okolici dvigala v radiju 2,5 m ni kontejnerjev, lahko ocenimo zmanjšanje obremenitve za silo:

$$F_Z = 5 \text{ m} * 50 \text{ kN/m}^2 * L_{Razmak} = L_{Razmak} * 250 \text{ kN/m}$$

Pri vrednostih  $L_{Razmak} = 9 \text{ m}$  za kole obalne konstrukcije oz.  $4,5 \text{ m}$  za kole zaledne konstrukcije se obremenitev na kole zmanjša za od  $F_Z = 1100 - 2200 \text{ kN}$  in posledično nosilnost kolov ni prekoračena. Oceno potrjujejo tudi rezultati analize (Slika 55), kjer je upoštevano, da ni obtežbe kontejnerjev v radiju 2,5 m od tirov dvigal.



**Slika 55: Potek osne sile v kolih kjer obstaja bojazen o prekoračeni nosilnosti ob upoštevanju nesočasnega delovanja obtežbe dvigal in kontejnerjev**

Na podlagi rezultatov iz zgornje slike lahko ocenimo osni sili na:

$$F_{max} = 271 \text{ kN/m} * 1,35 * 9 \text{ m} = 3293 \text{ kN}$$

$$F_{max} = 538 \text{ kN/m} * 1,35 * 4,5 \text{ m} = 3268 \text{ kN}$$

Očitno je, da nosilnost v kolih ni prekoračena. Zaključimo lahko, da konstrukcija ustreza EC7 standardom.

## 14.8 Komentar in analiza rezultatov MSN

Iz rezultatov analize je razvidno, da je poglobitev morskega dna po analiziranem načinu ustrezna rešitev. Povečanje notranjih sil v kolih zaradi poglobitve je majhno in tako ne zahteva dodatne ojačitve kolov. Prav tako je globalna varnost konstrukcije zadostna.

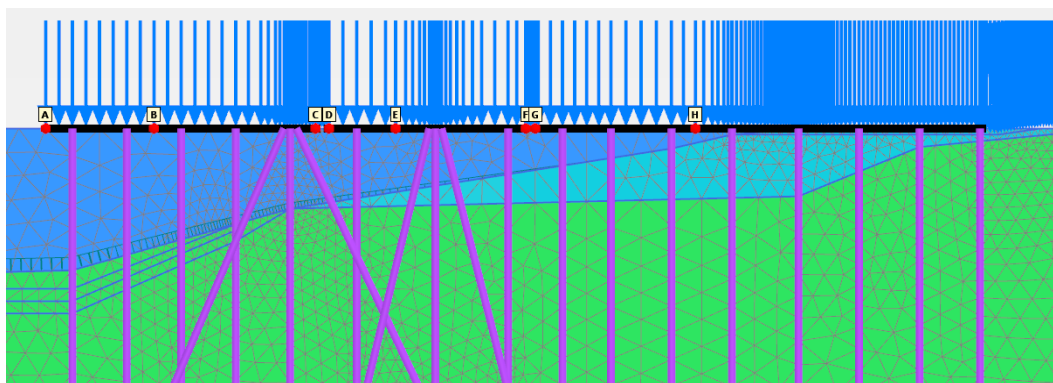
## 15 MSU

Pri oceni mejnega stanja uporabnosti so bili kontrolirani pomiki, ki se izvršijo na vrhu obalne konstrukcije, in sicer v točkah A do H prikazanih spodaj (Slika 56). Zaradi koherentne zemljine je pričakovati, da bo konsolidacija imela pomembno vlogo pri razvoju pomikov, zato je bila v analizo vključena tudi slednja.

Računske faze modela s konsolidacijo pred poglobitvijo in po končani poglobitvi:

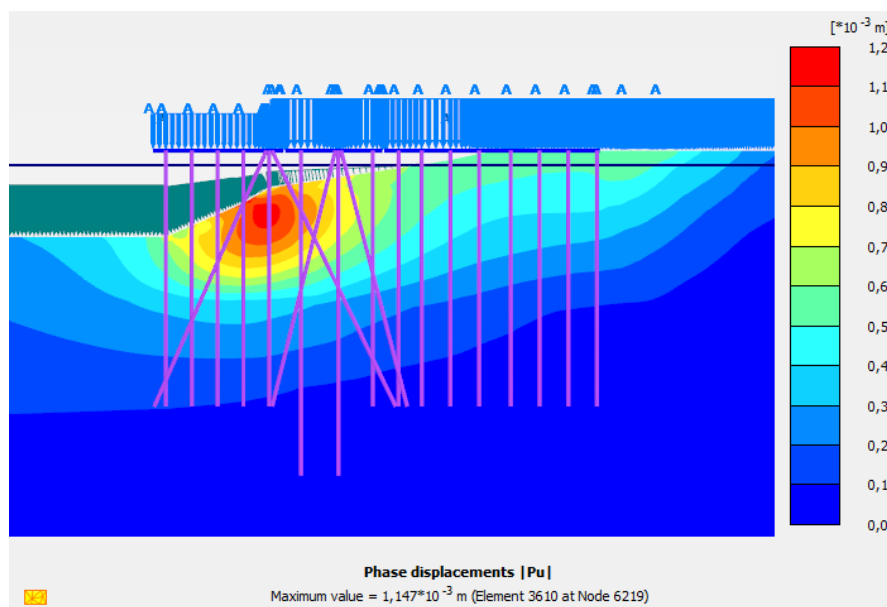
- Račun začetnega napetostnega stanja –  $K_0$
- 0 – služi uravnoteženju napetostnega stanja v zemljini
- Vgradnja kolov in plošče pomola
- Nanos obtežbe
- Konsolidacija 90% – 12 let
- Poglobitev na koto – 13 hidrografska
- Poglobitev na koto – 14 hidrografska
- Poglobitev na koto – 15 hidrografska
- Konsolidacija - 99% konsolidacije 20 let

Analiza s fazo konsolidacije pred poglobitvijo je bila izvedena po razmisleku, da bi bilo potrebno upoštevati nekajletno konsolidacijo pred prvo fazo poglobitve, saj je bil pomol v končni obliki v obratovanju že več let, preden se je začela poglobitev morskega dna. Za ta primer so grafi pomikov prikazani v nadaljevanju (Slike 58-61).



Slika 56: Položaj točk označene s črkami od A do H, ki so jim bili določeni pomiki

Na sliki spodaj (Slika 57) so prikazani pomiki, ki se izvršijo zaradi poglobitve iz 14 m na 15 m. Razvidno je, da so pomiki majhni ter da so usmerjeni proč od obale. Največji totalni pomiki zemljine za posamezno fazo poglobitve znašajo do 1,2 mm.



**Slika 57: Slika skupnih pomikov zaradi poglobitve iz 14 m na 15 m**

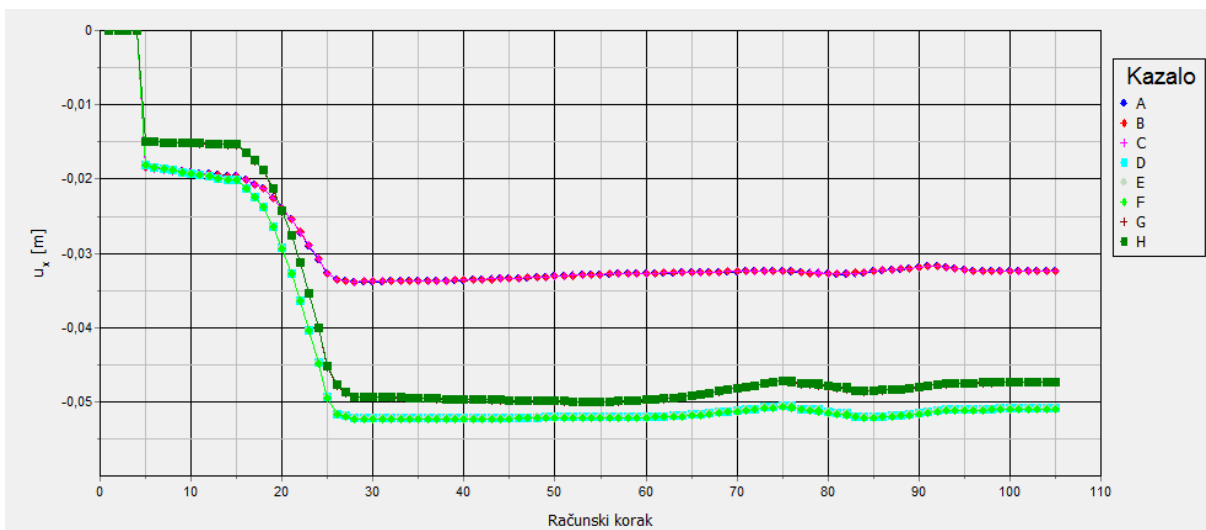
Za lažjo interpretacijo pomikov na grafih v nadaljevanju, so na spodnjem seznamu računskih faz posamezni fazi dodani računski koraki (faza : računski korak). Grafi pomikov so namreč izraženi v odvisnosti od računskega koraka.

- $K_0$  : 1-1
- Korak za uravnoteženje zemljine : 2 - 4
- Vgradnja kolov : 5 - 14
- Obtežba : 15 - 26
- Proces konsolidacije - konsolidacija 12 let : 27 - 75
- Poglobitev na 13 m : 76 - 78
- Poglobitev na 14 m : 79 - 81
- Poglobitev na 15 m : 82 - 84
- Proces konsolidacije - konsolidacija 20 let : 85 - 105

### **15.1.1 Horizontalni pomiki pomolne konstrukcije**

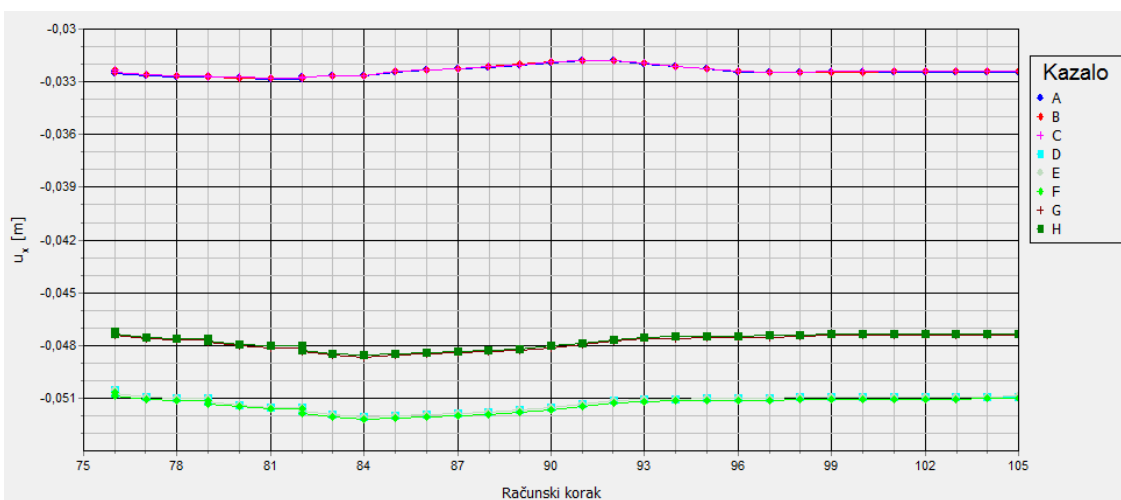
Na spodnjih slikah (Sliki 58-59) je predstavljena odvisnost horizontalnih pomikov od računskega koraka in posledično od procesa poglobljanja. Opazimo lahko, da se konstrukcija

v času poglobljanja morskega dna premakne proti morju (negativna vrednost pomika). Manjši del pomikov pa se izvrši med procesom konsolidacije. Zelo očitno je tudi, da se točke, ki pripadajo istemu delu dilatirane konstrukcije, obnašajo praktično enako.



Slika 58: Horizontalni pomiki obravnavanih točk v odvisnosti od poteka gradnje

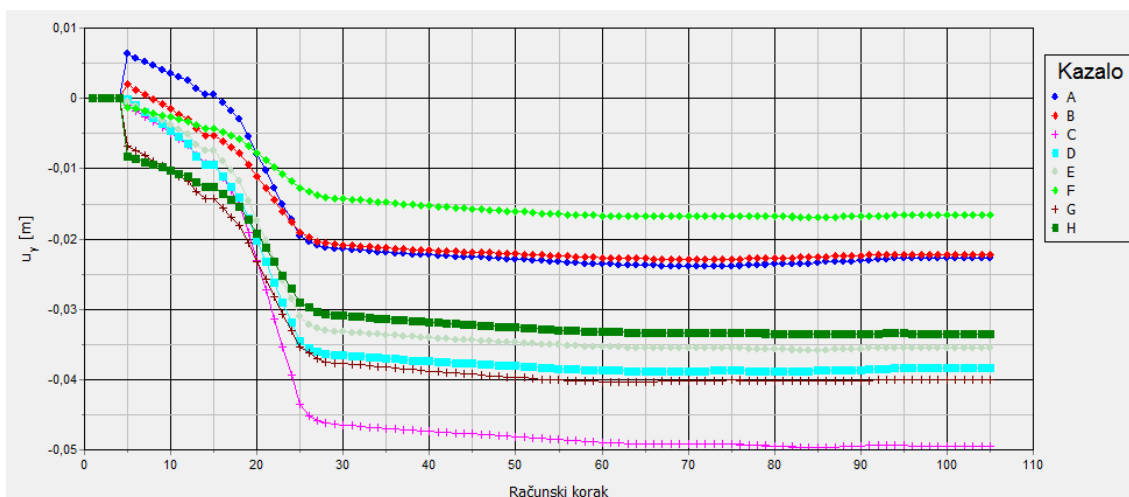
Na sliki spodaj (Slika 59) je podrobneje prikazano dogajanje med poglobitvijo in po njej. Razvidno je, da do horizontalnih pomikov zaradi poglobljanja morskega dna praktično ne pride.



Slika 59: Podrobnejši prikaz horizontalnih pomikov v času poglobitve in po njih

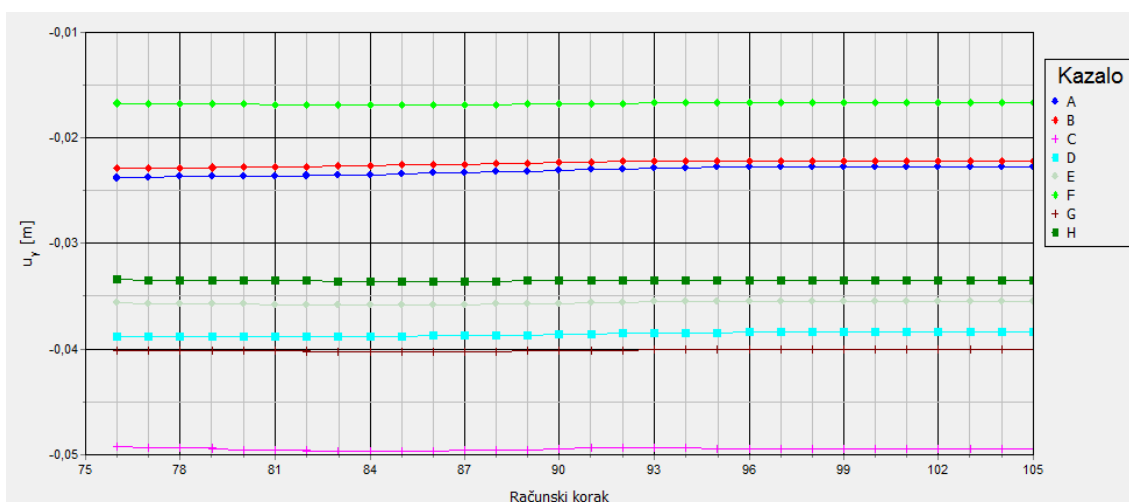
### 15.1.2 Vertikalni pomiki

Na spodnjih slikah (Sliki 60-61) je predstavljen razvoj vertikalnih pomikov med procesom poglobljanja. Ponovno je očitno, da večjih razlik pomikov med posameznimi točkami ni. Kljub temu so opazne večje razlike med pomiki posameznih točk kot v primeru horizontalnih pomikov. Velika večina pomikov se zgodi med nanosom obtežbe, torej pred poglobitvijo morskega dna.



Slika 60: Vertikalni pomiki obravnavanih točk v odvisnosti od poteka gradnje

Na sliki spodaj (Slika 61) je podrobno prikazan odziv konstrukcije na poglobitev. Opazimo, da je odziv konstrukcije minimalen.



Slika 61: Podrobnejši prikaz vertikalnih pomikov v fazah izkopa in po njih

Iz opravljene analize je mogoče sklepati, da so prirastki pomikov v času poglobitve in po njej takšni, da ne ogrožajo mejnega stanja uporabnosti. Zaključimo lahko, da tak način poglobitve ustreza zahtevam mejnega stanja uporabnosti.

## **15.2 Ocena posedkov z rezultati statičnega obremenilnega testa**

Celoten posedek konstrukcije bi lahko grobo ocenili tudi z rezultati statičnega obremenilnega testa. Povprečna obtežba kola znaša med 3000 kN in 4000 kN. Za to obtežbo lahko iz statičnega obremenilnega testa razberemo posedek 1,5-3,5 cm. Taki rezultati so razvidni tudi iz grafov v prejšnjem poglavju. Pri tem je potrebno upoštevati, da so pomiki na grafu vsota posedkov kolov in upogiba pomolne konstrukcije. Po drugi strani pa s to metodo ne moremo oceniti pomika zaradi vliva poglobitve morskega dna.



## 16 Analiza vpliva načina vpetja kolov na horizontalno konstrukcijo

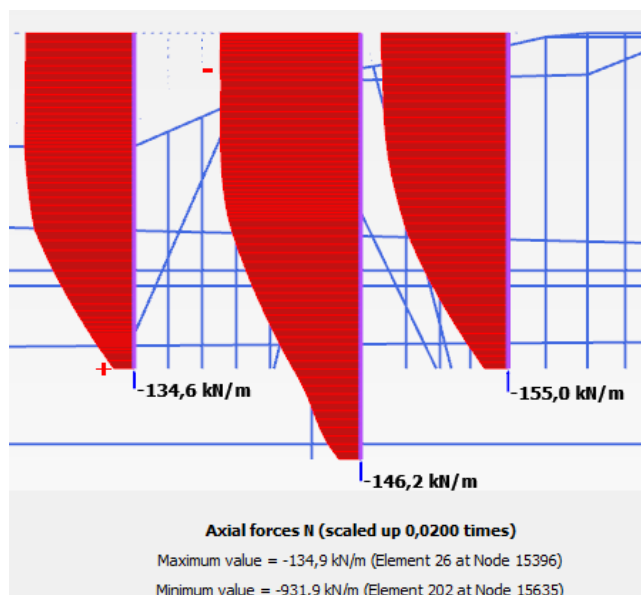
V osnovnem modelu je upoštevana toga povezava med horizontalno konstrukcijo in koli, vendar je popolnoma toga povezava vprašljiva. Zato je bila izvedena še analiza s členkasto povezavo kolov na horizontalno konstrukcijo.

### 16.1 Notranje sile v kolih modela s členkastim vpetjem

Notranje sile v kolih, ki so predstavljene v nadaljevanju, so rezultat analize z metodo končnih elementov, kot jih poda program Plaxis 2D 2012. Ker je analiza narejena z namenom primerjave z osnovnim modelom, te niso preračunane na dejanske vrednosti PP2. V kolikor želimo dobiti prave vrednosti, moramo najprej vrednosti na spodnjih grafih pomnožiti z 1,35 (PP2) in nato še z razdaljo med koli 4,5 oz. 9 m.

#### 16.1.1 Osne sile

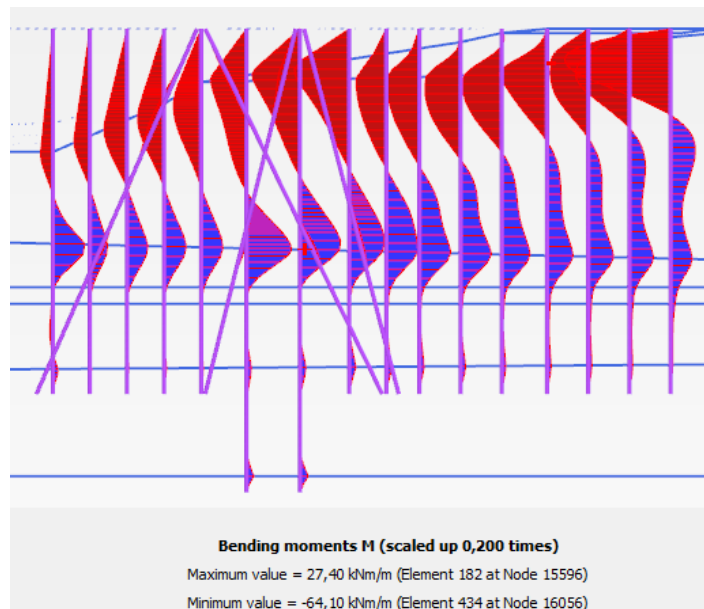
Največja osna sila v kolih znaša 932 kN/m in se nahaja na mestu kola z največjo točkovno silo (Slika 62). Slednja je za 0,2% večja od dobljene osne sile z modelom s togimi stiki kol – horizontalna konstrukcija.



Slika 62: Osne sile v kolih pri obremenitvi MSN - PP2 - členkasto vpetje

### 16.1.2 Momenti

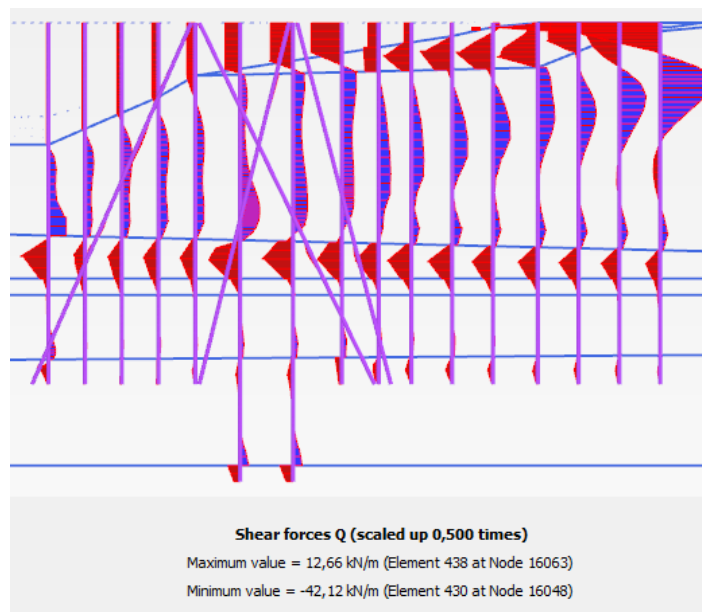
Največji moment znaša 64 kNm/m in je za več kot 50% manjši od momenta, dobljenega z modelom s togim vpetjem. Največji momenti se v kolih pojavijo na drugem mestu kot v osnovnem modelu. (Slika 63).



Slika 63: Momenti v kolih pri obremenitvi MSN - PP2 - členkasto vpetje

### 16.1.3 Prečne sile

Največja prečna sila znaša 42 kN/m in se pojavi na mestu zadnjega kola v zaledju in je za več kot 40% manjša od sile, dobljene z osnovnim modelom. (Slika 64)

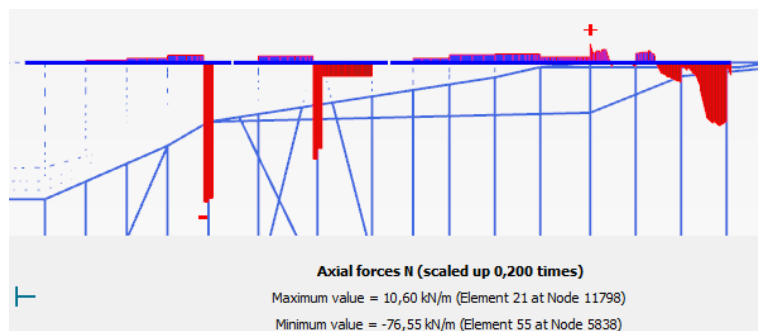


Slika 64: Prečne sile v kolih pri obremenitvi MSN - PP2 - členkasto vpetje

## 16.2 Notranje sile v horizontalni konstrukciji modela s členkastim vpetjem

### 16.2.1 Osne sile

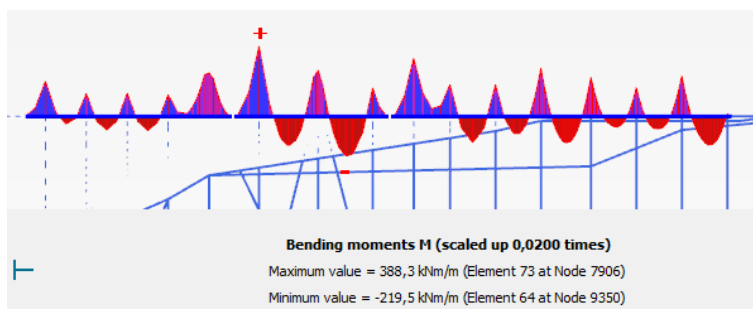
Največja osna sila znaša  $-77 \text{ kN/m}$ , pojavi se na mestu med vertikalnim in poševnim kolom. Slednja je za 11% večja os sile, dobljene po osnovnem modelu (Slika 65).



Slika 65: Osne sile v horizontalni konstrukciji pri obremenitvi MSN - PP2 - členkasto vpetje

### 16.2.2 Momenti

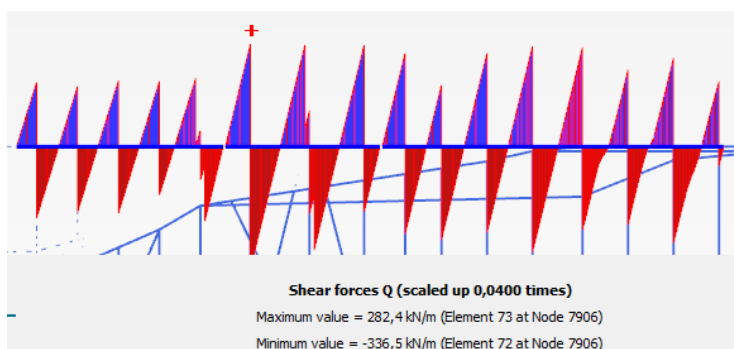
Največji moment znaša  $388 \text{ kNm/m}$  in je za približno 2% manjši v primerjavi z momentom, dobljenim z modelom s togim vpetjem. Maksimalni moment se pojavi na enakem mestu kot v osnovnem modelu (Slika 66).



Slika 66: Momenti v horizontalni konstrukciji pri obremenitvi MSN - PP2 - členkasto vpetje

### 16.2.3 Prečne sile

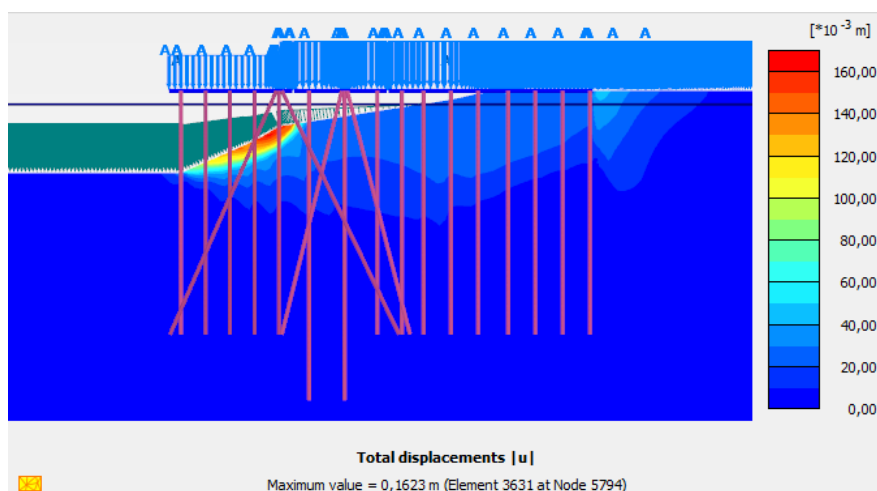
Največja prečna sila znaša 337 kN/m in je za 2% manjša od sile, dobljene po osnovnem modelu (Slika 67).



Slika 67: Prečne sile v horizontalni konstrukciji pri obremenitvi MSN - PP2 - členkasto vpetje

## 16.3 Globalna stabilnost modela s členkastim vpetjem

Varnost za zadnji korak poglobitve, ki je preračunana s spremenljivo obtežbo, faktorirano z 1,5, presega vrednost 1,3. Na sliki spodaj (Slika 68) so predstavljeni pomiki pri varnosti 1,25. Iz rezultatov lahko ponovno opazimo lokalno povečanje pomikov točno na delu, kjer je v modelu brežina nagnjena pod malenkost večjim kotom. Po projektne pristopu PP3 je zahtevana globalna stabilnost pri redukciji strižnih karakteristik za faktor 1,25. To ustreza varnostnemu faktorju 1,25 pred globalno porušitvijo, analizirano z metodo redukcije strižnih karakteristik.



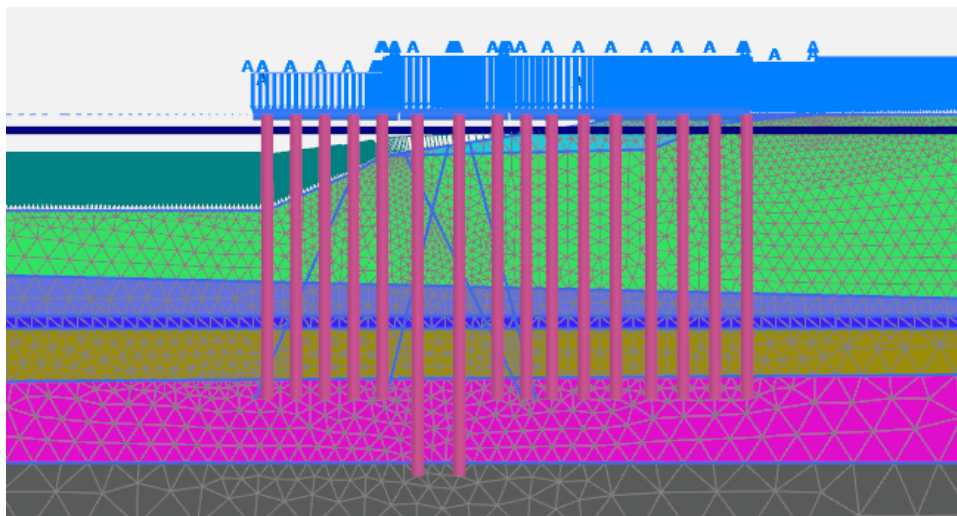
Slika 68: Pomiki pri doseženi varnosti 1,25 , obremenitev MSN – PP3 – členkasto vpetje

## 16.4 Komentar rezultatov

Očitno je velikost obremenitev odvisna od načina vpetja kola. Prav tako je tudi položaj maksimalnih vrednosti sil v kolih odvisen od njihovega vpetja. Kljub temu pa ni bilo zaznati pomembno večjih vrednosti notranjih sil. Še največja razlika v primerjavi s togim vpetjem se pojavi pri velikosti osnih sil v horizontalni konstrukciji, saj se obremenitev poveča za 11%. Po drugi strani pa se bistveno zmanjšajo maksimalni momenti v kolih za več kot 50% in prečnih sil za 40%. Na globalno varnost sprememba vpetja kolov ni imela pomembnega vpliva.

## 17 Vpliv poševnih kolov

Že v uvodu je bil predstavljen problem, ki ga za modeliranje povzročajo poševni koli. Ena izmed najlažjih rešitev bi bila, da bi poševne kole enostavno zanemarili. Z veliko verjetnostjo lahko namreč predvidevamo, da bomo s tako odločitvijo na varni strani. V tem poglavju je obravnavan pomol 7A modeliran samo z vertikalnimi koli (Slika 69). Sicer je računski model enak tistemu v poglavju 14.



Slika 69: Model brez poševnih kolov

### 17.1 Notranje sile v kolih pri modelu brez poševnih kolov

Notranje sile v kolih, ki so predstavljene v nadaljevanju, so rezultat analize z metodo končnih elementov, kot jih poda program Plaxis 2D 2012. Ker je analiza narejena z namenom primerjave z osnovnim modelom, te niso preračunane na dejanske vrednosti PP2. V kolikor želimo dobiti prave vrednosti, moramo najprej vrednosti na spodnjih grafih pomnožiti z 1,35 (PP2) in nato še z razdaljo med koli 4,5 oz. 9 m.

#### 17.1.1 Osne sile

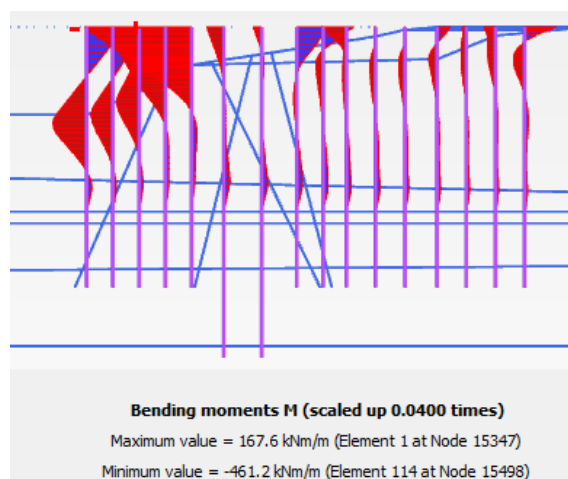
Podobno kot v modelu s poševnimi koli se je ponovno izkazalo, da so najbolj obremenjeni koli tisti, ki so vgrajeni pod točkovno obtežbo. Največja osna sila znaša 1252 kN/m in je za 37% večja od sile 913 kN/m, ki je bila izračunana z modelom s poševnimi koli (Slika 70).



Slika 70: Osne sile v kolih pri modelu brez poševnih kolov

### 17.1.2 Momenti

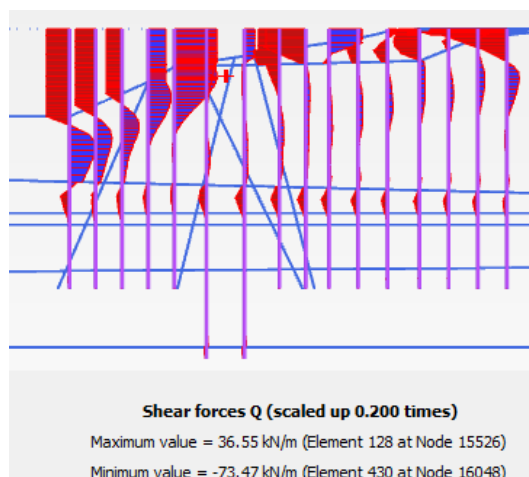
Njavečji izračunani moment znaša 461 kNm/m in je približno 3,2 krat večji od momenta, dobljenega z modelom z nagnjenimi koli (Slika 71).



Slika 71: Momenti v kolih pri modelu brez poševnih kolov

### 17.1.3 Prečne sile

Njavečja izračunana prečna sila znaša 73 kN/m in je skoraj enaka sili dobljeni z modelom z nagnjenimi koli (Slika 72).

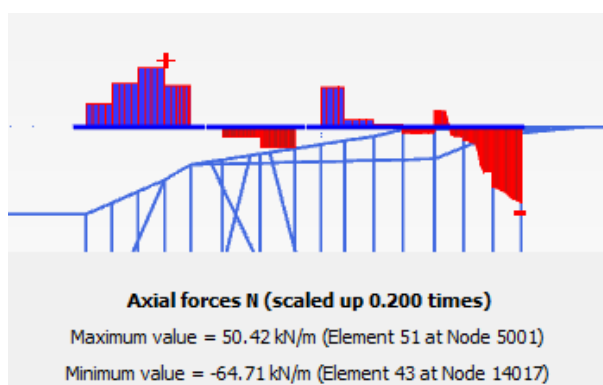


Slika 72: Prečne sile v kolih pri modelu brez poševnih kolov

## 17.2 Notranje sile v horizontalni konstrukciji modela brez poševnih kolov

### 17.2.1 Osne sile

Največja osna sila znaša 65 kN/m in je manjša od sile dobljene z modelom z nagnjenimi koli (Slika 73).

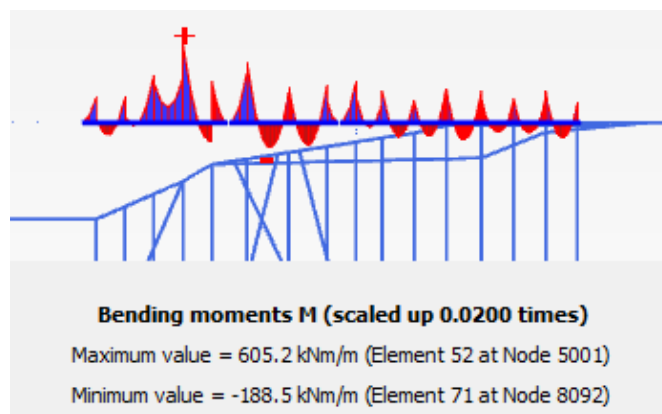


Slika 73: Osna sila v horizontalni konstrukciji - model brez poševnih kolov

### 17.2.2 Momenti

Največji moment znaša 605 kNm/m in je več kot 50% večji od momenta, dobljenega z modelom z nagnjenimi koli (Slika 74).

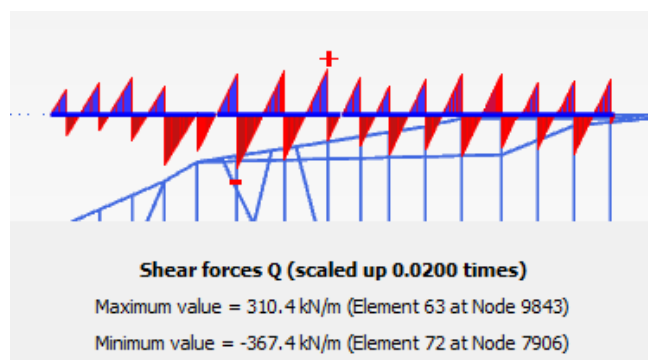




Slika 74: Momenti v horizontalni konstrukciji - model brez poševnih kolov

### 17.2.3 Prečne sile

Največja prečna sila znaša 368 kN/m in je ponovno večja od sile dobljene, z modelom z nagnjenimi koli (Slika 75).

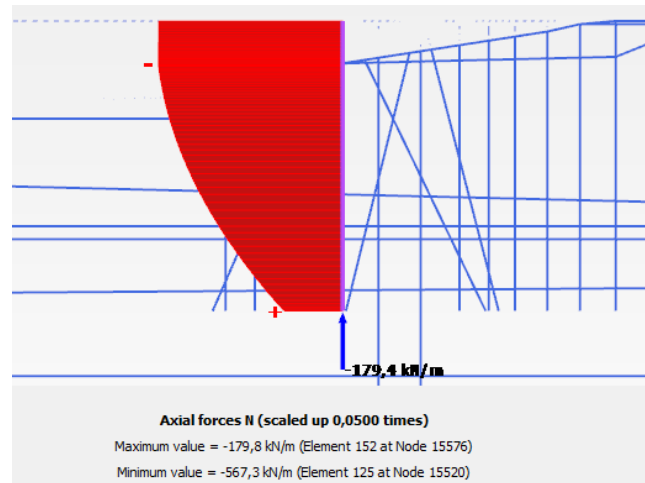


Slika 75: Prečna sila v horizontalni konstrukciji - model brez poševnih kolov

## 17.3 Globalna stabilnost modela brez poševnih kolov

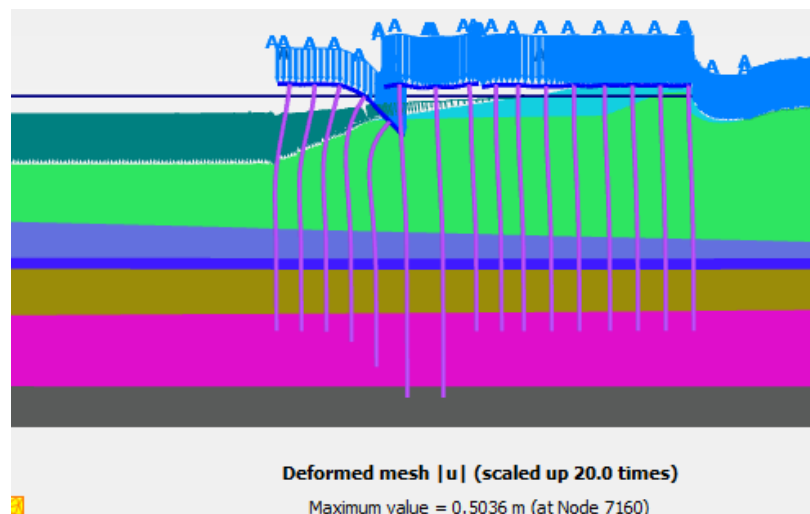
Tokrat je analiza pokazala, da konstrukcija ne more prenesti obtežbe, posledično pride do porušitve. Do porušitve pride na mestu zadnjega kola obalne konstrukcije. Iz spodnje slike (Slika 76) lahko razberemo silo v tem kolu 562 kN/m, tako da dejanska sila v problematičnem kolu ob porušitvi znaša:

$$F_{N,max} = 568 [kN/m] * 9 [m] = 5112 kN$$



Slika 76: Osna sila v kolu tik pred poružitvijo

Ocenjena nosilnost znaša  $F_{R,k} = 5122$ . Glede na to, da se v trenutku, ko program zazna poružitve, še velik del obremenitve ni nanesen na konstrukcijo je logično, da je v naslednjem računskem koraku presežena mejna nosilnost kola in posledično zemljina ne more več prenesti obremenitve in sledi poružitve. Način poružitve je prikazan na spodnji sliki (Slika 77).



Slika 77: Pomiki pri doseženi končni varnosti, obremenitev MSN – PP2 – brez poševnih kolov

## 17.4 Komentar rezultatov

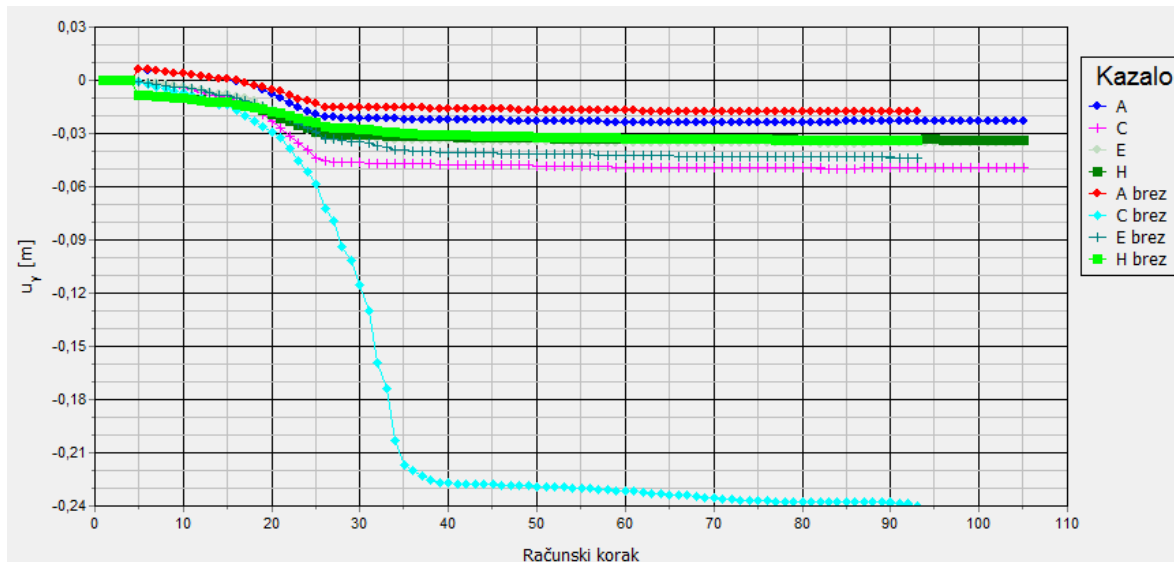
Iz rezultatov je očitno, da model brez poševnih kolov izkazuje večje obremenitve na nosilno konstrukcijo. Edina izjema so osne sile v horizontalni nosilni konstrukciji. Izračunana globalna varnost pri tem modelu ni zagotovljena. Iz rezultatov analize lahko zaključimo, da smo praviloma na varni strani, če poševnih kolov ne upoštevamo. V posameznih primerih pri tem pride do bistveno povečanih obremenitev v konstrukciji. Tako bi lahko zaključili, da se

take analize ob odsotnosti natančnejših orodij lahko poslužimo, vendar bodo elementi nosilne konstrukcije predimenzionirani.

## 17.5 Primerjava pomikov modela brez in s poševnimi koli

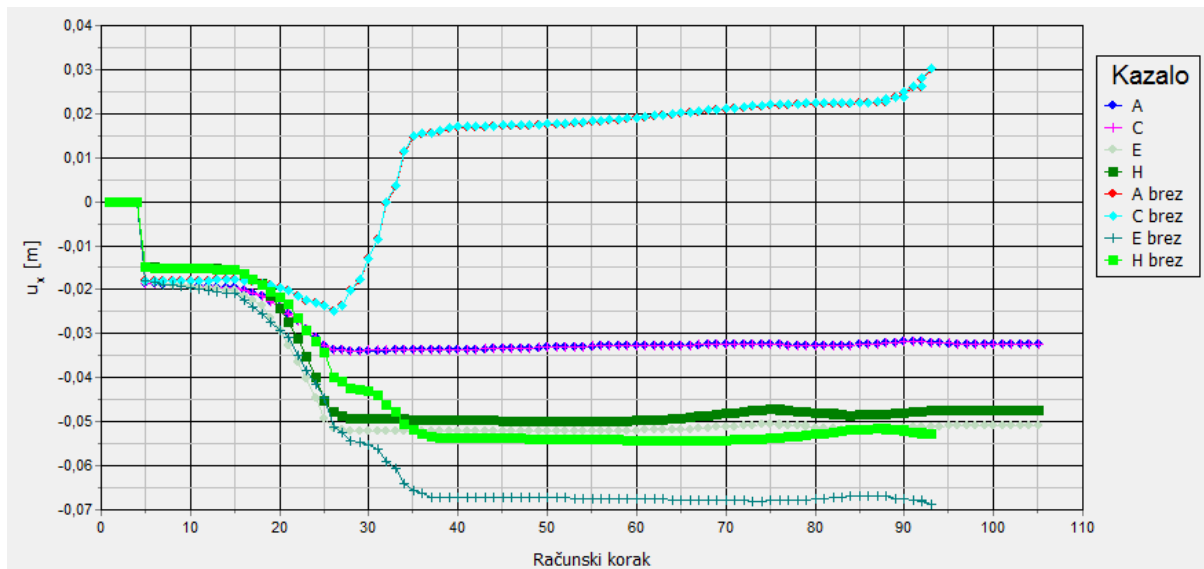
Na dveh grafih spodaj (Sliki 78 in 79) so predstavljeni pomiki konstrukcije v primeru analize z upoštevanjem poševnih kolov in brez njih. Opazovane so bile enake točke kot v poglavju 15 - MSU. Opazimo lahko, da je odziv konstrukcije zelo podoben odzivu konstrukcije v osnovnem modelu z izjemo točke C.

Grafi vertikalnih pomikov (Slika 78) točk A, E in H so skoraj enaki, med tem ko se grafa točke C razlikujeta za več deset centimetrov. Točka C se nahaja med obema serijama poševnih kolov in je le nekaj metrov oddaljena od velike točkovne sile, ki jo povzroča dvigalo. Po drugi strani se točka A, kjer ni opaziti pomembne razlike med modeloma, nahaja na skrajnem robu pomola in je precej oddaljena od poševnih kolov. Ponovno lahko ugotovimo, da ima prisotnost poševnih kolov pomemben vpliv na analizo predvsem za točke v neposredni bližini teh kolov.



Slika 78: Primerjava vertikalnih pomikov v točkah A,B in D za model z in brez kolov

Podobno lahko ugotovimo tudi s primerjavo horizontalnih pomikov (Slika 79). Tudi tokrat lahko opazimo majhne razlike pomikov točk E in H. Ponovno pa so pomiki točke C povsem drugačni v primeru, ko vertikalnih kolov ne upoštevamo v analizi. To lahko tokrat trdimo tudi za pomike točke A, ki so v tem primeru praktično enaki pomikom točke C.

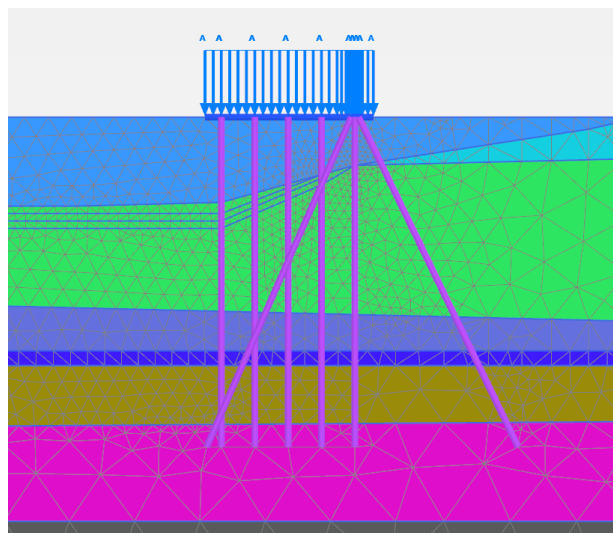


Slika 79: Primerjava horizontalnih pomikov v točkah A,B in D za model z in brez kolov

Kljub lokalno večjim pomikom v primeru analize brez poševnih kolov pa MSU tudi v tem primeru ni ogroženo, saj so pomiki majhni.

## 18 Vpliv zaledne konstrukcije

Znano je, da je bila zaledna konstrukcija pomola 7 v Luki Koper dograjena kasneje kot obalna konstrukcija. Zanimivo bi bilo torej ugotoviti kakšen vpliv ima zaledni del konstrukcije na obalnega in ali lahko analizo obalne konstrukcije izvedemo brez upoštevanja zaledne konstrukcije.



Slika 80: Model obalne konstrukcije brez zaledja

V ta namen je bila izvedena analiza, ki je vsebovala samo obalno konstrukcijo. Tako je v tem poglavju obravnavan pomol 7A modeliran samo z obalno konstrukcijo (Slika 80). Sicer je računski model enak tistemu v poglavju 14.

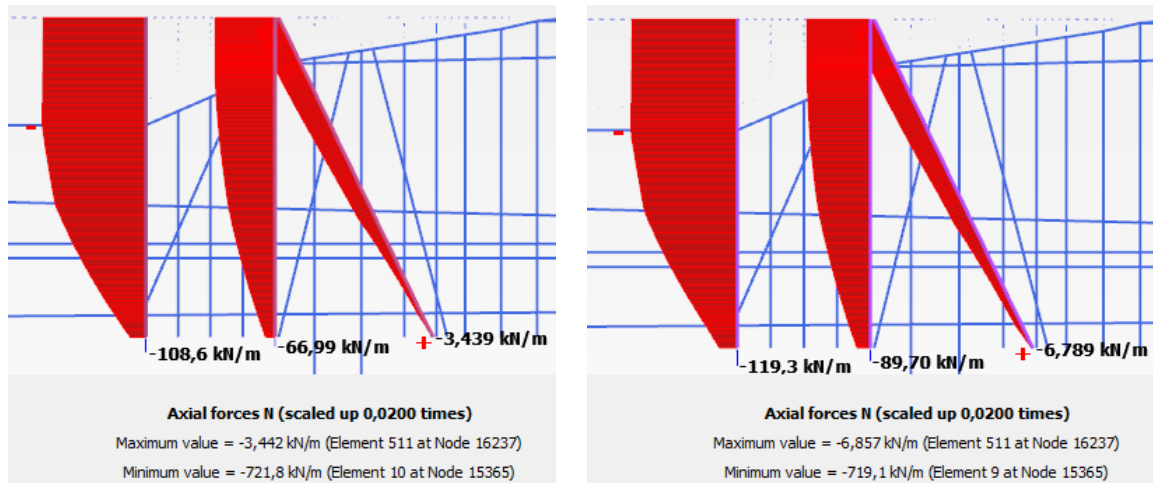
### 18.1 Notranje sile v kolih

Tega modela ni mogoče ovrednotiti s pomočjo primerjave maksimalnih obremenitev, saj se v osnovnem modelu (poglavje 14.3) maksimalne obremenitve pojavijo v kolih, ki tokrat niso modelirani. Zato so v nadaljevanju primerjane obremenitve samo tistih kolov, ki so prisotni pri obeh modelih.

Notranje sile v kolih, ki so predstavljene v nadaljevanju, so rezultat analize z metodo končnih elementov, kot jih poda program Plaxis 2D 2012. Ker je analiza narejena z namenom primerjave z osnovnim modelom, te niso preračunane na dejanske vrednosti PP2. V kolikor želimo dobiti prave vrednosti, moramo najprej vrednosti na spodnjih grafih pomnožiti z 1,35 (PP2) in nato še z razdaljo med koli 4,5 oz. 9 m.

### 18.1.1 Osne sile

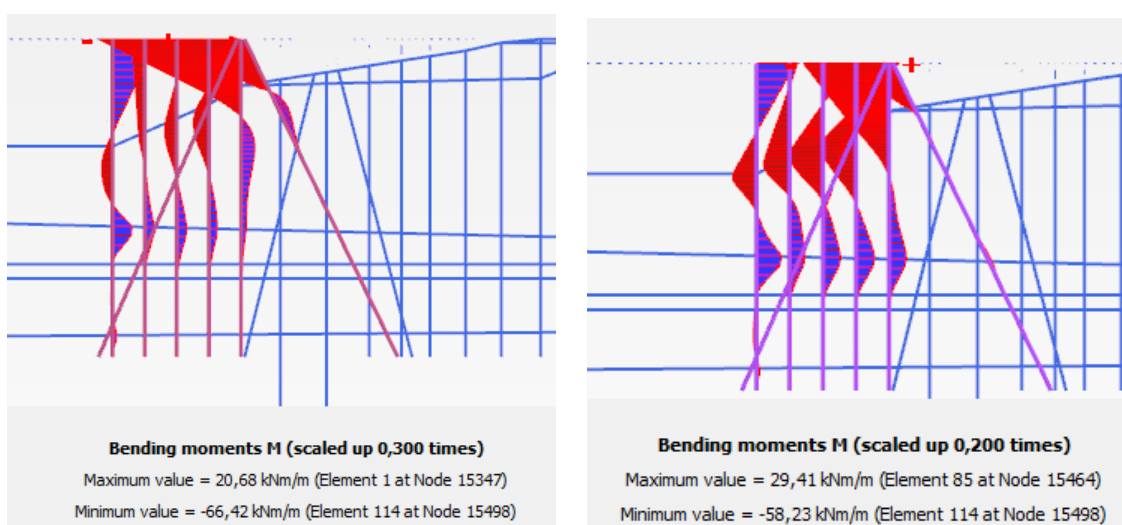
Največja osna sila se pojavi v skrajno levem kolu in znaša 722 kN/m – slika spodaj levo (Slika 81). Tako razpored, kot velikost sil se praktično popolnoma ujema s tistimi, ki jih izkazuje osnovni model, kar je razvidno iz slik spodaj. Pri osnovnem modelu znaša največja osna sila 719 kN/m – slika spodaj desno.



Slika 81: Osne sile v kolih – desno se nahaja model modeliran s celotno konstrukcijo

### 18.1.2 Momenti

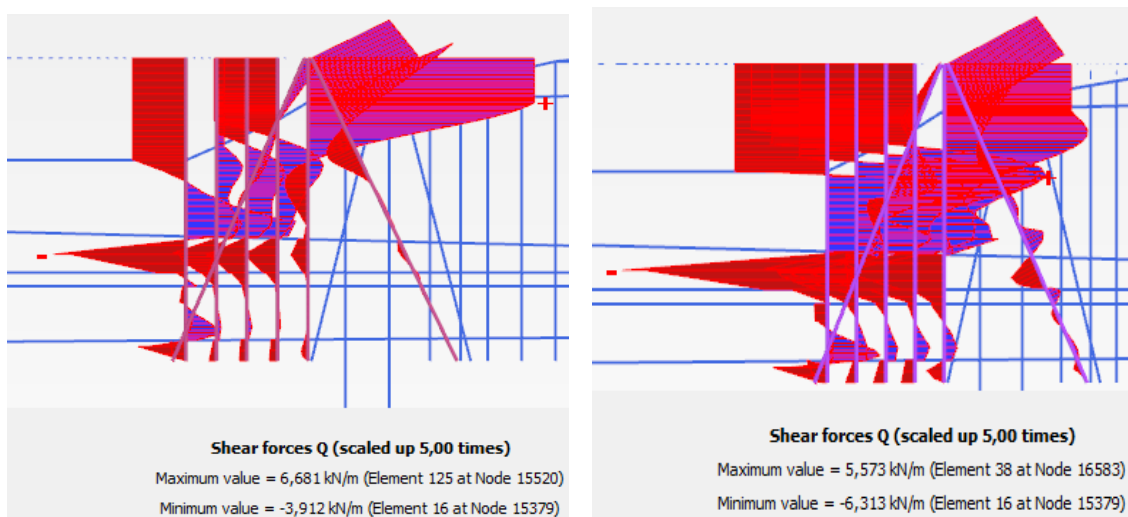
Največji moment se pojavi v skrajno levem kolu in znaša 66 kNm/m (Slika 82). V osnovnem modelu je izkazan moment nekoliko manjši, saj slednji v osnovnem modelu znaša 58 kNm/m.



Slika 82: Momenti v kolih – desno se nahaja model modeliran s celotno konstrukcijo

### 18.1.3 Prečne sile

Največja prečna sila se pojavi v skrajno levem kolu in znaša 7 kN (Slika 83). V osnovnem modelu je izkazana prečna sila malo manjša in znaša 6 kN. Poleg tega je nekoliko drugačen tudi potek prečne sile, kar je razvidno iz spodnjih slik.

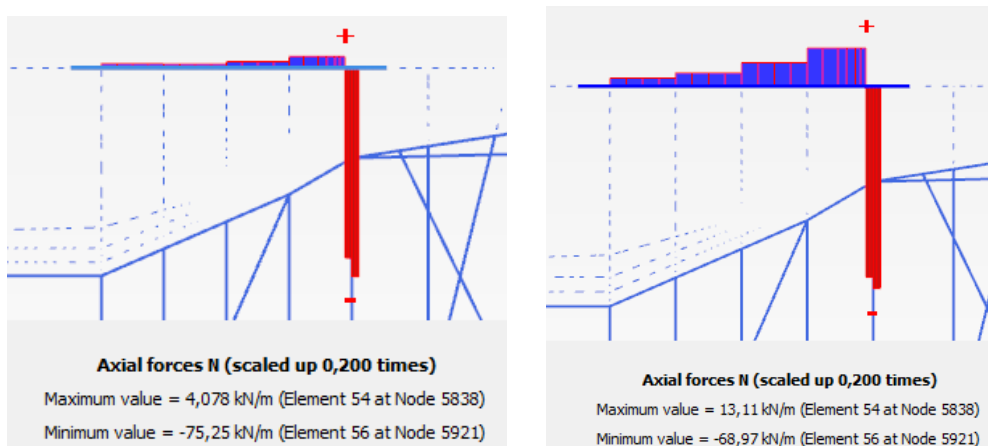


Slika 83: Prečne sile v kolih – desno se nahaja model modeliran s celotno konstrukcijo

## 18.2 Notranje sile v horizontalni konstrukciji

### 18.2.1 Osne sile

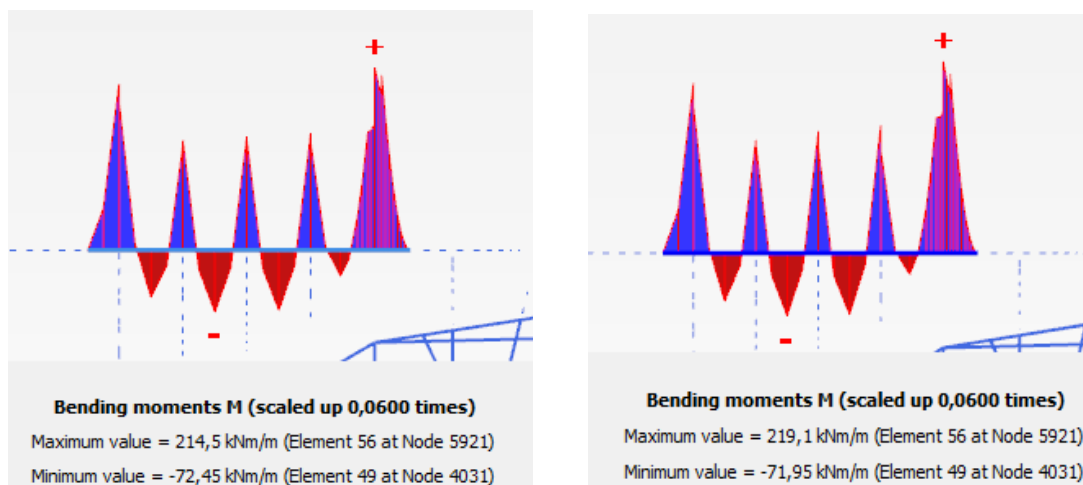
Največja osna sila se pojavi med obema poševnima koloma in znaša 75 kN/m (Slika 84). V osnovnem modelu lahko opazimo podoben potek osne sile po horizontalni konstrukciji z največjo vrednostjo 69 kN/m.



Slika 84: Osne sile v horizontalni konstrukciji – desno se nahaja model modeliran s celotno konstrukcijo

### 18.2.2 Momenti

Največji moment se pojavi nad najbolj obremenjenim kolom in znaša 215 kNm/m (Slika 85), v isti točki osnovnega modela pa ta znaša 219 kNm/m. V obeh modelih opazimo zelo podoben potek momentov.

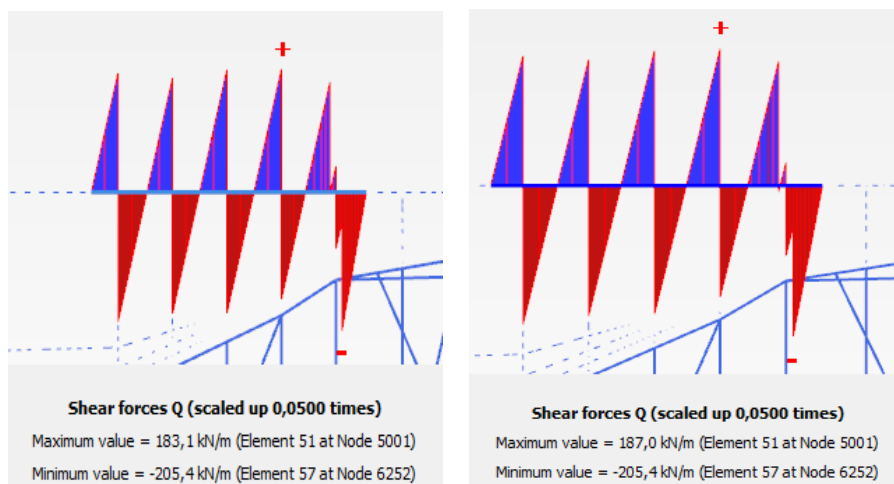


Slika 85: Momenti v horizontalni konstrukciji – desno se nahaja model modeliran s celotno konstrukcijo



### 18.2.3 Prečne sile

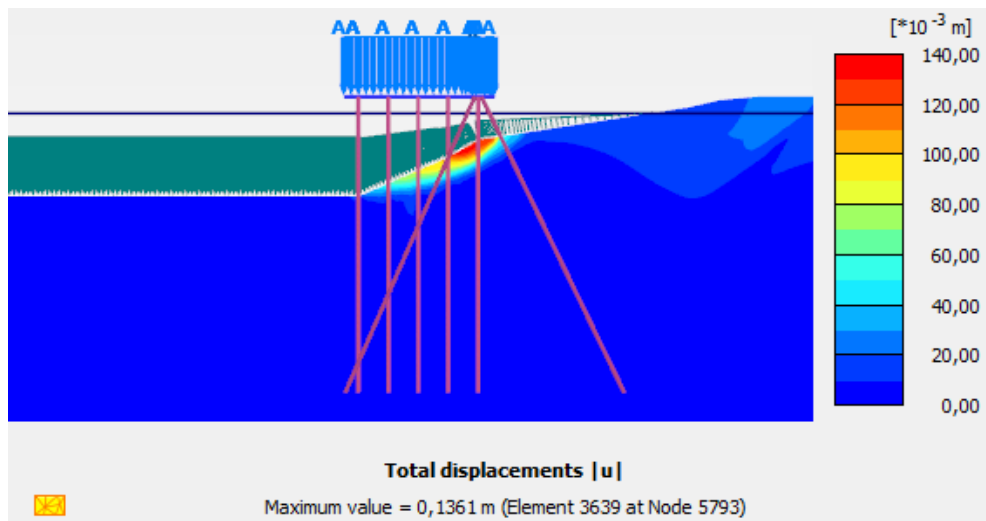
Največja prečna sila se pojavi nad najbolj obremenjenim kolom in znaša 205 kN/m (Slika 86), v isti točki osnovnega modela pa ta znaša 212,2 kN/m. Ponovno je potek sil v obeh primerih zelo podoben.



Slika 86: Prečne sile v horizontalni konstrukciji – desno se nahaja model modeliran s celotno konstrukcijo

### 18.3 Globalna stabilnost

Varnost pred globalno porušitvijo je nekaj večja kot 1,3, kar je enako izračunani varnosti za celotno konstrukcijo. Do porušitve je prišlo zaradi zdrsa brežine na praktično istem mestu, kot v osnovnem modelu, kar je razvidno iz spodnje slike (Slika 87).



Slika 87: Pomiki pri doseženi varnosti 1,25, obremenitev MSN – PP3

### 18.4 Komentar rezultatov

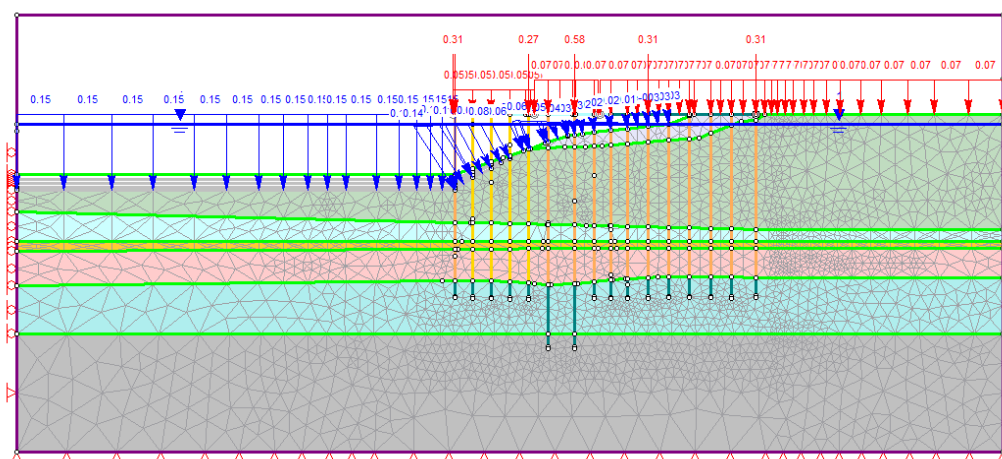
Iz primerjave notranjih sil je razvidno, da se obalna konstrukcija odziva podobno v primeru, če poleg obalne konstrukcije modeliramo tudi zaledno konstrukcijo ali tega ne naredimo. Kljub temu da pride do manjših razlik lahko zaključimo, da je modeliranje samo obalne konstrukcije povsem upravičena odločitev, v kolikor nas zanimajo samo njene obremenitve.

## 19 Primerjava z analizo v programu Phase 2.0

Program Phase 2.0 je v grobem opisan že v poglavju Analiza v Phase 2.0. Analiza mejnih stanj je bila opravljena tudi s tem programom. Omeniti velja, da se v tem programu ne da modelirati križanja poševnih in navpičnih kolov, ne da bi se notranje sile med njimi prenašale. Pomembna omejitev je tudi nujna uporaba dreniranega stanja – procesa konsolidacije ni mogoče modelirati.

### 19.1 Model brez poševnih kolov

Glede na to, da so razlike med programoma v primeru modeliranja poševnih kolov neizbežne, je bila najprej opravljena analiza samo z vertikalnimi koli. Na spodnji sliki je predstavljen model izdelan v programu Phase 2.0 brez poševnih kolov (Slika 88).



Slika 88: Model v programu Phase 2.0 brez poševnih kolov

Računski model vsebuje malenkost drugačne faze, kot so bile določene v programu Plaxis. Glavna sprememba so faze konsolidacije, ki se je kot omenjeno ne da modelirati v programu Phase 2.0. Druge manjše spremembe so posledica težav pri modeliranju modela. Tako analiza vsebuje naslednje faze:

- 1 – faza za uravnoteženje napetosti v zemljini
- 2 – obtežba zaledja
- 3 – vgradnja konstrukcijskih elementov
- 4 – obtežba obalne konstrukcije
- 5 – poglobitev na globino 13 m

- 6 – poglobitev na globino 14 m
- 7 – poglobitev na globino 14,5 m
- 8 – poglobitev na globino 15 m

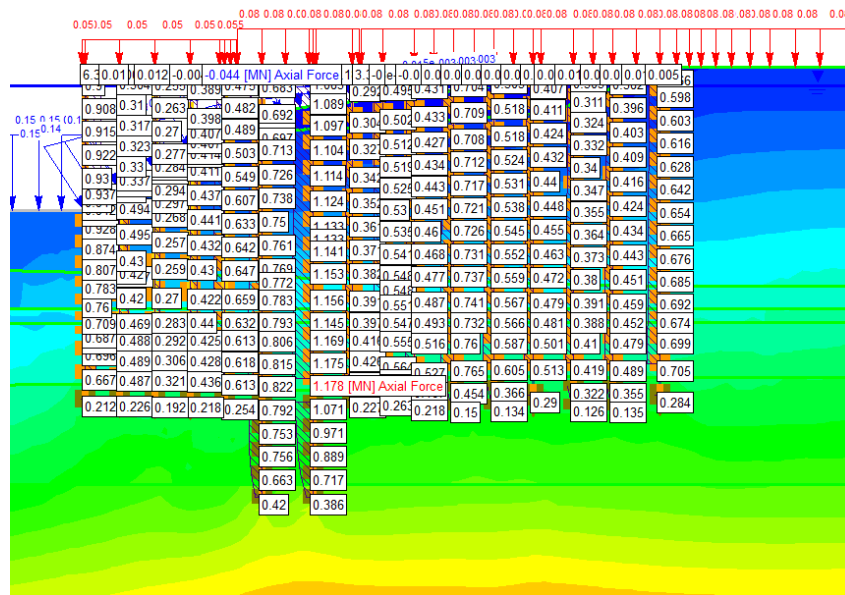
Zemljina je tokrat modelirana z MC modelom. Karakteristike kolov in strižne karakteristike zemljine so enake karakteristikam projektne pristopa PP2, modeliranega s programom Plaxis. Poenostavitev je bila izvedena pri kontaktnih elementih. Kot je že omenjeno v sklopu te naloge, je v programu Phase 2.0 za vsak sloj zemljine potrebno modelirati svoj kontaktni element, če želimo enakovredno opisati odziv zemljine, kot v programu Plaxis. Tudi tokrat je bila uporabljena poenostavitev z zgolj dvema vrstama kontaktnih elementov. Prvim s karakteristikami stika zgornjega sloja gline in drugim s karakteristikami stika v produ

## **19.2 Notranje sile v kolih modela v programu Phase brez poševnih kolov**

Notranje sile v kolih, ki so predstavljene v nadaljevanju, so rezultat analize z metodo končnih elementov v programu Phase 2.0. Ker je analiza narejena z namenom primerjave z osnovnim modelom v programu Plaxis, te niso preračunane na dejanske vrednosti PP2. V kolikor želimo dobiti prave vrednosti, moramo najprej vrednosti na spodnjih grafih pomnožiti z 1,35 (PP2) in nato še z razdaljo med koli 4,5 oz. 9 m.

### **19.2.1 Osne sile**

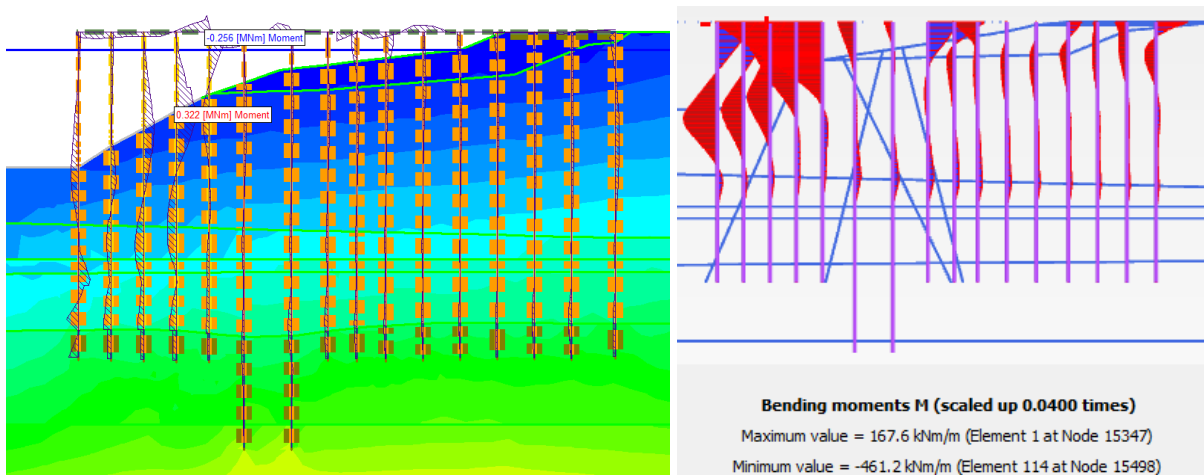
Največja osna sila znaša 1178 kN/m in se tako zgolj za 6% razlikuje od rezultata, dobljenega s programom Plaxis. Enako kot s programom Plaxis se tudi s to analizo za najbolj obremenjen kol izkaže daljši kol, ki je bližje zaledju (Slika 89). Potek osne sile je nekoliko drugačen kot potek v programu Plaxis. Največja osna sila se pojavi šele pred slojem bolj nosilnega prodnatega sloja. Iz rezultatov bi lahko sklepali, da se v sloju gline praktično nič obremenitve ne prenese s pomočjo trenja na okoliško zemljino.



Slika 89: Osne sile v kolih - model brez poševnih kolov

### 19.2.2 Momenti

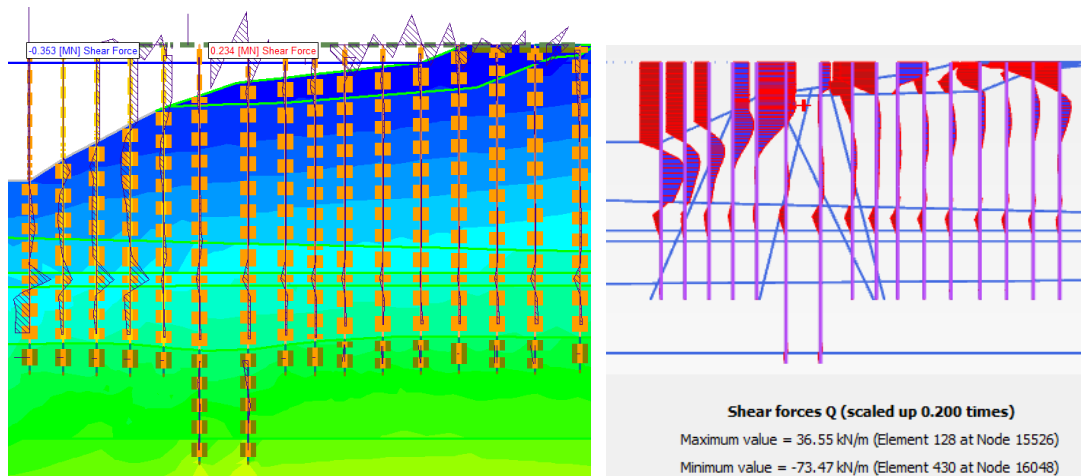
Če je slika osnih sil dokaj podobna za modela v programu Plaxis in Phase, pa to ne velja za momente in prečne sile (Sliki 90 in 91). Opazimo, da so tako potek kot tudi vrednosti momentov različni. Maksimalni moment, dobljen s programom Phase, je tako za 30% manjši od tistega, dobljenega s programom Plaxis.



Slika 90: Momenti v kolih - model v programu Phase in Plaxis – model brez poševnih kolov

### 19.2.3 Prečne sile

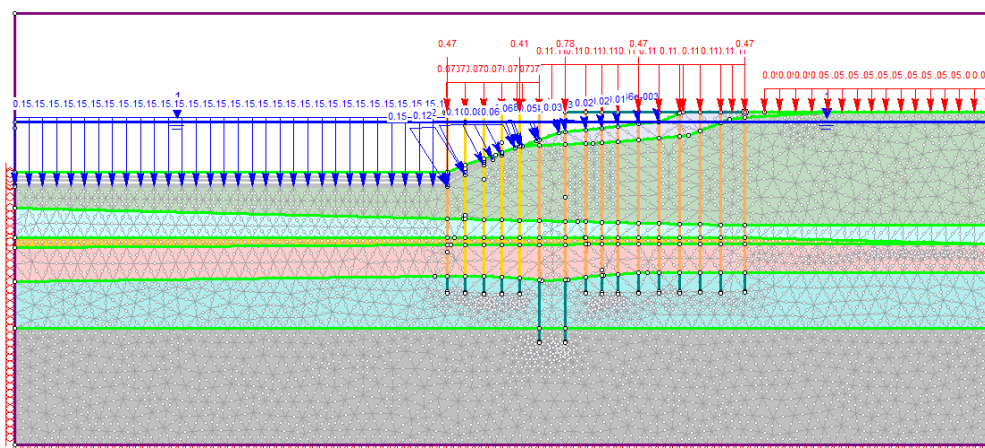
Na spodnji sliki so prikazane maksimalne prečne sile v konstrukciji (Slika 91). Maksimalna prečna sila v kolu znaša 105 kN/m (na sliki ta vrednost ni zapisana) in je tako ponovno za 30% manjša od sile dobljene s programom Plaxis.



Slika 91: Prečne sile v kolih - model v programu Phase in Plaxis – model brez poševnih kolov

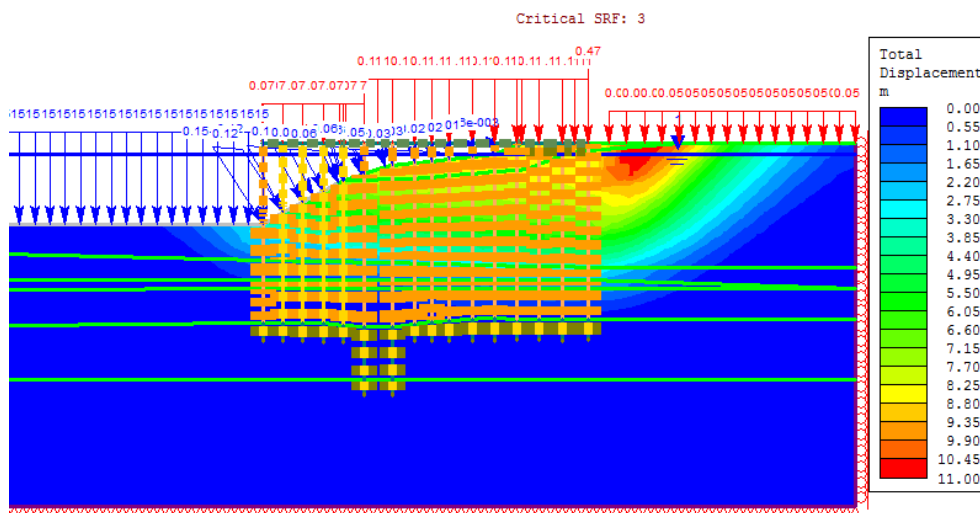
#### 19.2.4 Globalna stabilnost modela v programu Phase brez poševnih kolov

Model za preračun varnosti se je malenkostno razlikoval od modela za izračun notranjih sil. Varnost je bila nerealno majhna zaradi lokalne porušitve zemljine neposredno za konstrukcijo pomola. Da bi bilo mogoče dobiti rezultat, ki bi pričal o dejanski varnosti, je bil dodan še en korak po poglobitvi na 15 m, kjer je bilo 5 m obtežbe za konstrukcijo pomola odstranjeno. Obtežba zaledja pa je bila zmanjšana na 50 kPa (Slika 92).



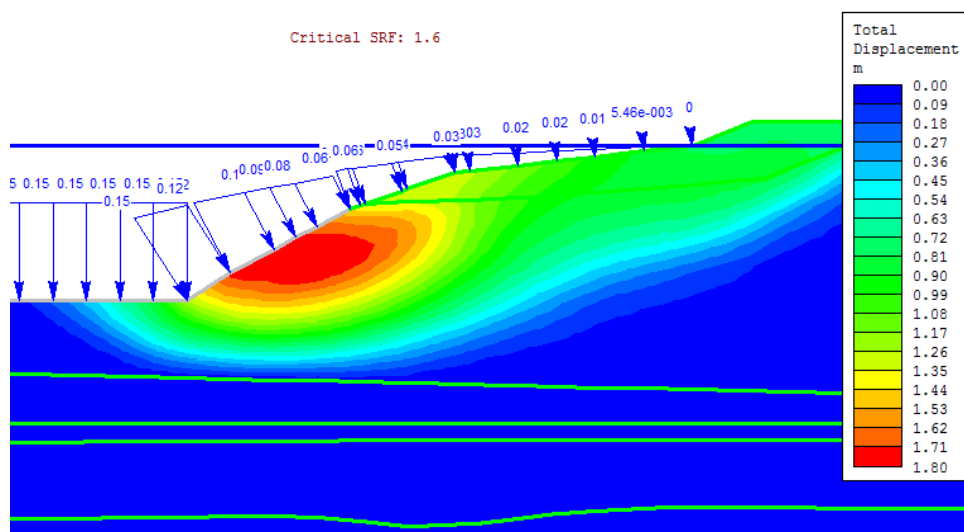
Slika 92: Faza dodatnega koraka za preračun varnosti

Varnost pred porušitvijo, ki jo izkazuje ta model, dosega vrednost 3. Na spodnji sliki so prikazani pomiki ob porušitvi (Slika 93).



Slika 93: Varnost zadnjega koraka poglobitve modeliranega v programu Phase 2.0

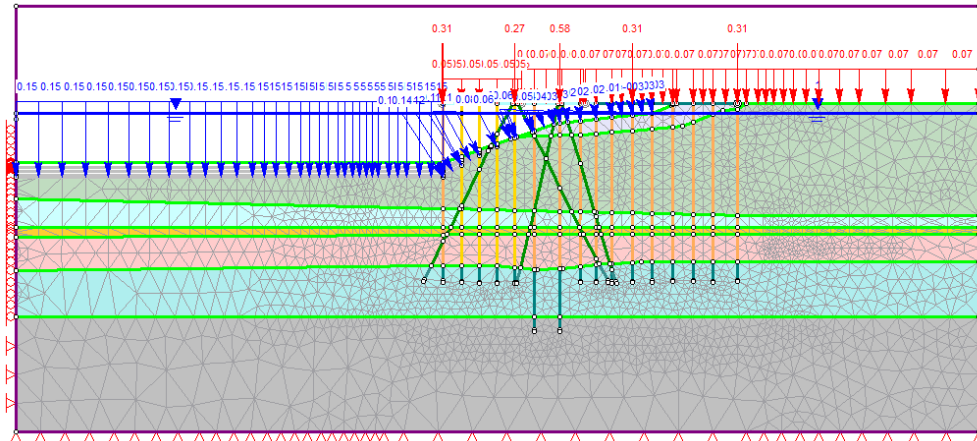
Na prvi pogled preseneča velika varnost pred porušitvijo brežine, ki dosega vrednost 3. Presenečenost podkrepi tudi rezultat analize varnosti brežine brez upoštevanja pomolne konstrukcije in obtežbe (Slika 94). Razvidno je, da je varnost same brežine enaka 1,6 in torej za polovico manjša od varnosti, ki jo izkazuje končni model poglobitve morskega dna. Vzrok za te nekoliko presenetljive rezultate bi lahko iskali v dejstvu, da koli, modelirani kot linijski elementi, prekinajo mrežo končnih elementov zemljine, tako se posledično napetosti in deformacije v zemljini ne prenašajo direktno iz enega elementa na drugega, ampak posredno prek linijskih elementov, ki lahko prevzamejo nase obremenitev in zmanjšajo napetosti v zemljini.



Slika 94: Pomiki pri izčrpani varnosti - primer z zaledno obtežbo

### 19.3 Model v Phase 2.0 s poševnimi koli

Izvedena je bila tudi analiza s poševnimi koli. Model je enak modelu v Phase brez poševnih kolov s to razliko, da so v tem modelu dodani poševni koli (Slika 95).

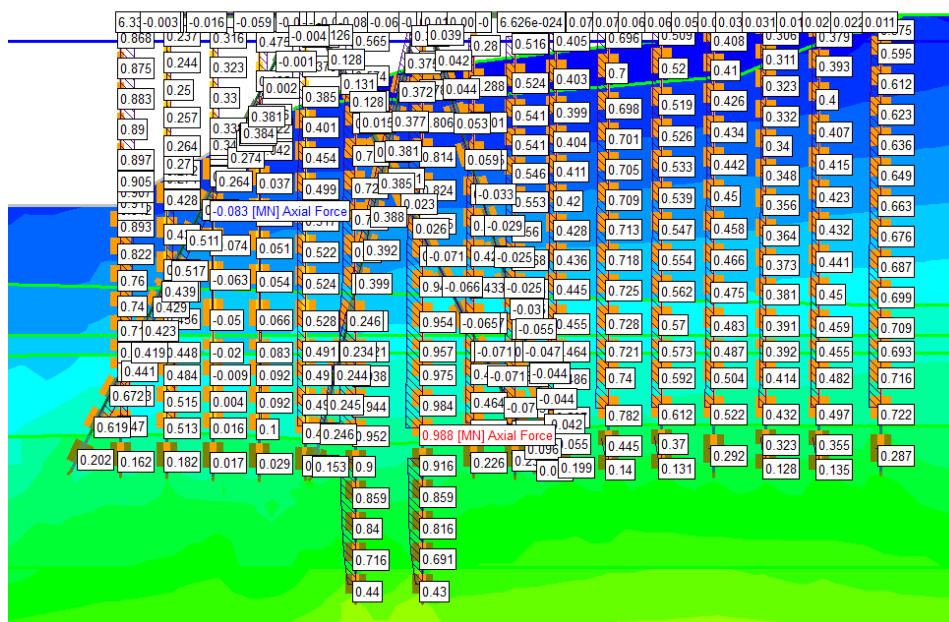


Slika 95: Model v Phase 2.0 z upoštevanjem poševnih kolov



## 19.4 Notranje sile v kolih v modelu s poševnimi koli

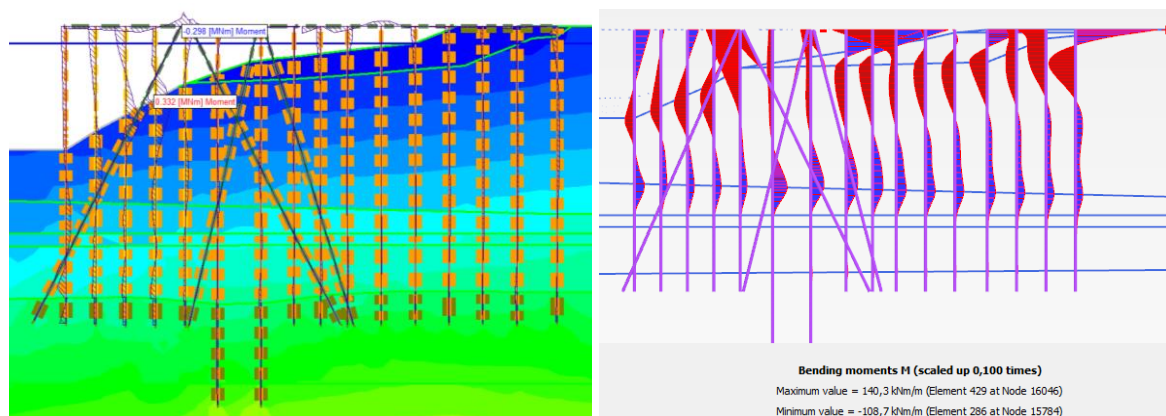
Na spodnjem grafu (Slika 96) je predstavljen potek osnih sil. Tokrat opazimo, da analiza poda natezno silo v nekaterih kolih in to predstavlja pomembno razliko v primerjavi z rezultati modela v programu Plaxis, ki nateznih sil ne izračuna. Maksimalna osna sila znaša 988 kN/m in je za 8% večja od sile, ki jo poda program Plaxis.



Slika 96: Osne sile v kolih pri modelu v programu Phase s poševnimi koli

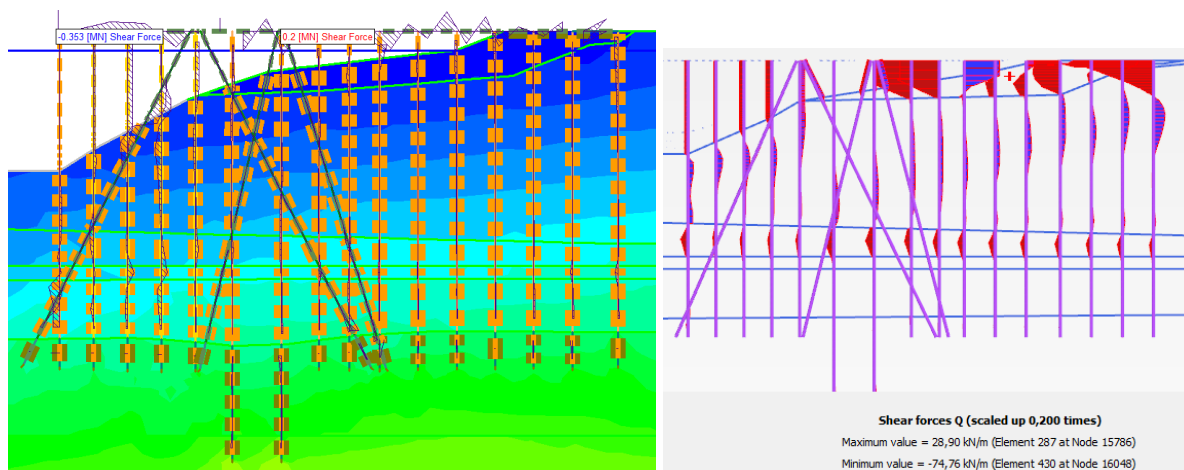
### 19.4.1 Momenti in prečne sile

Tudi tokrat velja, da če je slika osnih sil dokaj podobna za oba programa, to ne velja za momente in prečne sile (Sliki 97 in 98). Opazimo, da so tako potek, kot tudi vrednosti momentov različna. Maksimalni moment dobljen s programom Plaxis predstavlja le 42% vrednosti maksimalnega momenta, dobljenega s programom Phase 2.0. Opazimo lahko, da do največjega momenta pride ravno na nerealnem stiku med vertikalnimi in poševnimi koli.



Slika 97: Momenti v kolih v modelu v programu Phase in Plaxis – model z poševnimi kolov

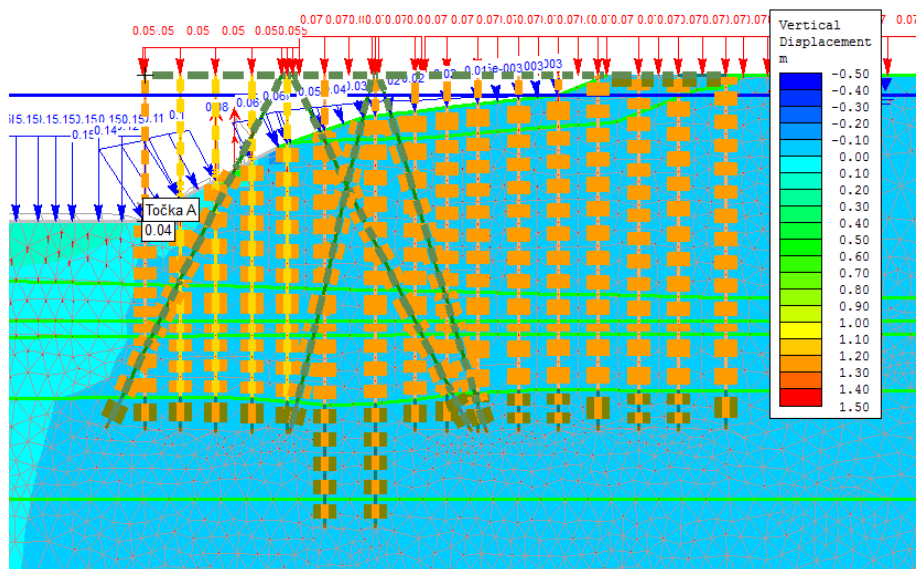
Podobno kot za momente velja tudi za prečne sile. Največja prečna sila se pojavi na v poševnem kolu in znaša 108 kN/m (Slika 98).



Slika 98: Prečne sile v kolih v modelu v programu Phase in Plaxis – model z poševnimi kolov

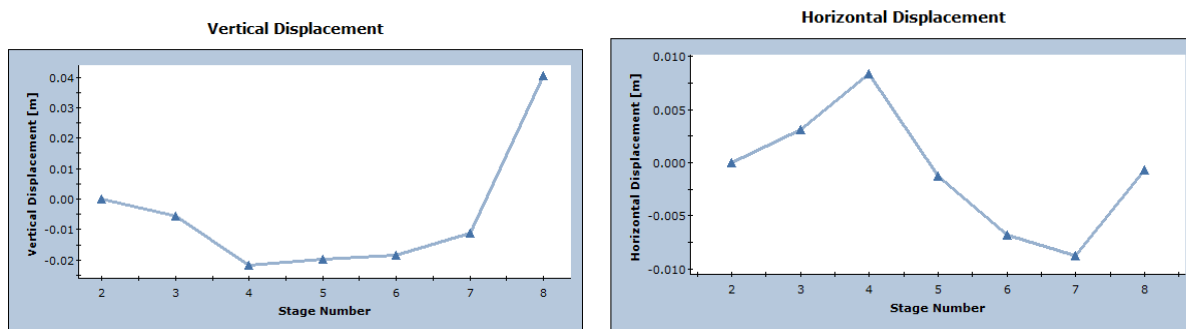
## 19.5 MSU

Na slikah (Sliki 99 in 100) je prikazan potek pomikov za točko A, pozicija katere je prikazana na spodnji sliki (Slika 98). Program Phase ne omogoča prikaza pomika linijskega elementa, omogoča pa prikaz pomika zemljine v stiku z linijskim elementom. Tako je najboljši približek pomika pomolne konstrukcije ravno pomik točke A, ki se nahaja neposredno ob prvem kolu obalne konstrukcije.



Slika 99: Pomiki v zadnji fazi izkopa na -15 m

Če spodnje grafe pomikov primerjamo z grafi pomikov točke A, iz modela izdelanega v programu Plaxis (poglavje 15), ugotovimo, da obstajajo pomembne razlike med njima. Velikostni red pomikov je sicer podoben, vendar so pomiki točke A programa Phase za približno 1 cm manjši od pomika točke A programa Plaxis. Druga očitna razlika je skok vertikalnih pomikov v zadnjem koraku poglobitve modela Phase. To bi najverjetneje lahko pripisali MC modelu zemljine, ki ni zmožen upoštevati različnih modulov zemljine za obremenitev oz. razbremenitev, za razliko od modela HSsmall, ki je zmožen upoštevati različna modula med obremenjevanjem in razbremenjevanjem. Kot že omenjeno, pa se točki nahajata na različnih mestih, tako da so pomiki obravnavanih točk le težko primerljivi.



Slika 100: Grafa pomikov točke A v odvisnosti od faze izkopa

## **19.6 Komentar rezultatov analize v programu Phase**

Opazimo lahko, da model v Phase 2.0 pogosto poda različne rezultate glede na model v programu Plaxis. Pomembna dejavnika, ki najverjetneje povzročita razlike v rezultatih, sta različna modela za modeliranje zemljine (HSsmall za Plaxis in MC za Phase), ter v osnovi različna linijska elementa za modeliranje kolov (EPR za Plaxis in običajen linijski element v kombinaciji s kontaktnim elementom za Phase), ki sta tudi različno povezana z mrežo končnih elementov.

## 20 Način izvedbe poglobitve z jeklenimi zagatnicami

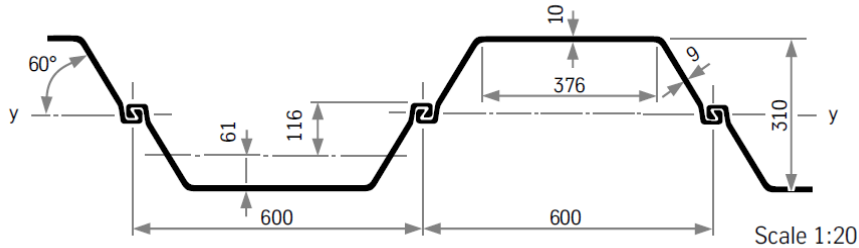
Na prvi pogled je način poglobitve s spremembo naklona brežine zelo dobra rešitev, saj ne zahteva vgradnje dodatnih gradbenih elementov. Do težav pa lahko pride pri sami izvedbi del. Poglobitev naj bi potekala tako, da bi bila zemljina odstranjena s posebnim splavom, ki je preko cevi sposoben črpati morsko glino. Pri tem obstaja nevarnost, da bo sesalna cev med procesom zadela ob kole in jih trajno poškodovala. Glino je nato potrebno transportirati na drugo lokacijo in jo nekje odložiti. Znano pa je, da je Luka Koper že zadostila svojim potrebam po zemljini za potrebe zasipavanja. Tako bi proces odlaganja zemljine predstavljal dodaten strošek za luko.

Tako je verjetno smiselno preveriti tudi rešitev z vgradnjo jeklenih zagatnic pred prvi kol obalne konstrukcije. Ta bi omogočila vertikalno poglobitev morskega dna in posledično ne bi bilo potrebe po odstranjevanju materiala morskega dna med koli.

Tekom analize tega problema so bili preverjeni različni modeli. V osnovi so vsi vsebovali zagatnice Larssen 603, vtisnjene pred prvi kol vertikalno pod robom pomola, spreminjale so se le dolžine zagatnic. Višina "svetlega" dela zagatnic znaša 3,5 m, oz. je enaka višini poglobitve v točki pod robom pomola. Ocenjena potrebna globina zagatnic pod koto končne poglobitve je bila enaka dvakratni višini poglobitve. Tako je spodnja kota zagatnic v prvi analizi segala do kote -21 m z zagatnicami dolžine 9,5 m. Analiza problema s programom Plaxis se je korektno izvedla do konca. Izvedena je bila tako drenirana kot nedrenirana numerična analiza. Drenirana analiza se je izkazala za bolj kritično tako za MSU, kot tudi za MSN. Dosežena varnost v zadnjem koraku poglobitve drenirane analize je znašala nekaj več kot 1,35. Zaradi zadostne varnosti je bila analizirana tudi varianta s skrajšano dolžino zagatnic. Tokrat je spodnja kota zagatnic segala do globine -20 m. Tudi ta analiza se je korektno izvedla do konca, vendar je varnost ob poglobitvi na koto -15 m znašala zgolj 1,2, kar ne ustreza zahtevam EC7.

Iz opravljenih začetnih analiz je razvidno, da bodo potrebne zagatnice dolžine vsaj 9,5 m. Tako so v nadaljevanju predstavljeni rezultati poglobitve z jeklenimi zagatnicami dolžine 9,5 m, ki segajo od kote -11,5 m do kote -21 m. Za opis stika med zemljino in zagatnicami je

bil izbran kontaktni element s faktorjem  $R_{inter} = 0,67$ . Geometrija uporabljenih zagatnic je predstavljena na spodnji sliki (Slika 101).



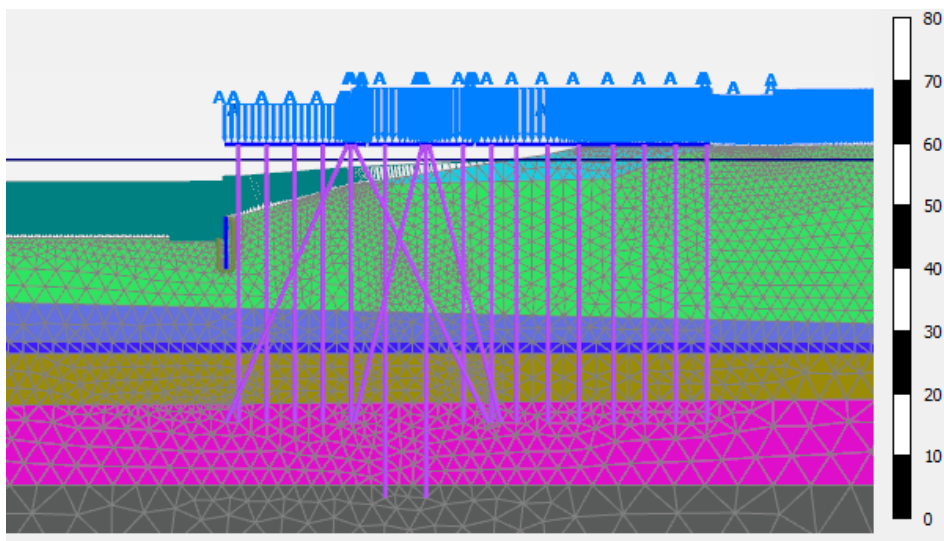
Slika 101: Geometrija izbranih zagatnic

V spodnji preglednici (Preglednica 14) so navedene karakteristike enega metra zidu izdelanega z izbranimi zagatnicami Larssen 603.

Preglednica 14: Karakteristike zagatnice Larssen 603

| Karateristika              | Za meter zidu |
|----------------------------|---------------|
| Wy [cm <sup>3</sup> ]      | 1240          |
| Masa [kg/m]                | 113,5         |
| Površina [m <sup>2</sup> ] | 145           |
| Sy [cm <sup>3</sup> ]      | 680           |
| Iy [cm <sup>4</sup> ]      | 19220         |
| iy [cm]                    | 11,5          |

Na spodnji sliki (Slika 102) je predstavljen računski model poglobitve z uporabo jeklenih zagatnic.



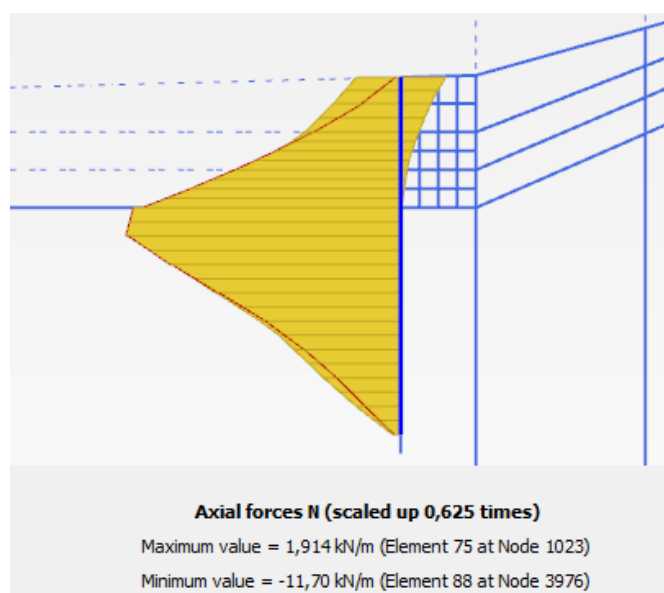
### Slika 102: Računski model izvedbe z zagatnicami

## 20.1 Obremenitve zagatnic

Na spodnji sliki (Slika 103) je predstavljen ovojnica osne sile v zagatnicah tekom poglobitve. Maksimalna osna sila znaša -12 kN/m. Silo je potrebno še faktorirati z 1,35:

$$F_{N,max} = 12 \text{ [kN/m]} * 1,35 = 16,2 \text{ kN/m}$$

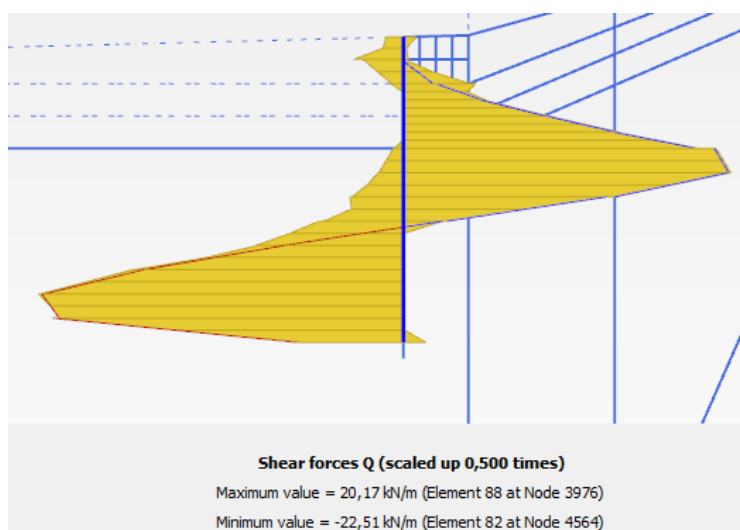
Osne sile v zagatnicah so majhne, kar je pričakovano glede na to, da slednje niso neposredno osno obremenjene z zunanjo obtežbo.



Slika 103: Maksimalne osne sile v zagatnicah

Na spodnji sliki (Slika 104) je predstavljen potek prečnih sil v zagatnicah. Maksimalna obremenitev je majhna in znaša 23 kN/m.

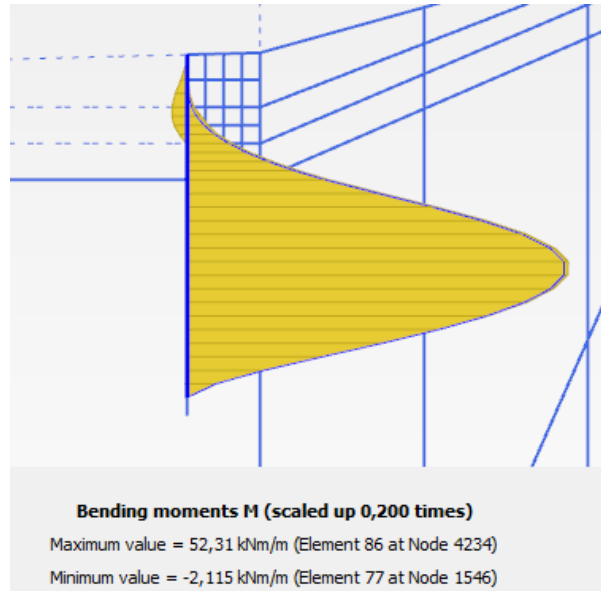
$$Q_{max} = 23 \text{ [kN/m]} * 1,35 = 31 \text{ kN/m}$$



### Slika 104: Prečne sile v zagatnicah

Na sliki (Slika 105) v nadaljevanju je predstavljen še potek momentov. Maksimalni moment znaša 52 kNm/m.

$$M_{max} = 52 \text{ [kN/m]} * 1,35 = 71 \text{ kN/m}$$



Slika 105: Potek momentov v zagatnicah

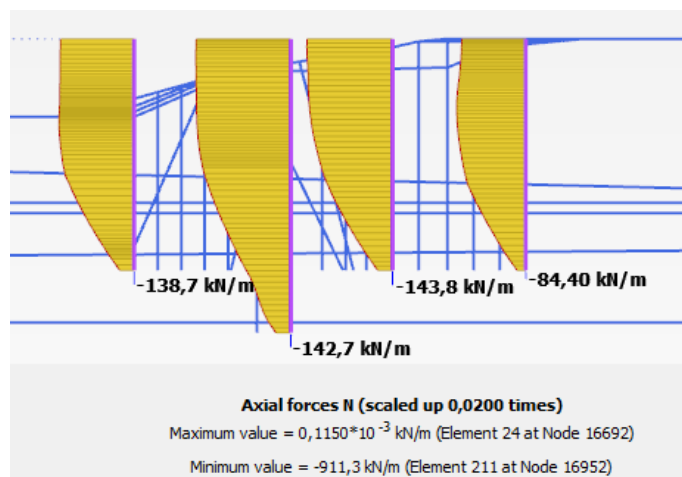
## 20.2 Obremenitve v kolih - projektni pristop PP2

Notranje sile v kolih, ki so predstavljene v nadaljevanju, so rezultat analize z metodo končnih elementov s programom Plaxis 2D 2012. V kolikor želimo dobiti prave vrednosti notranjih sil, moramo najprej vrednosti na spodnjih grafih pomnožiti z 1,35 (PP2) in nato še z razdaljo med koli 4,5 oz. 9 m.

### 20.2.1 Osna sila

Največja osna sila, ki se pojavi v kolih, znaša 911 kN/m. Kol, ki je najbolj obremenjen, je kol na zaledni konstrukciji med poševnima koloma (Slika 106).

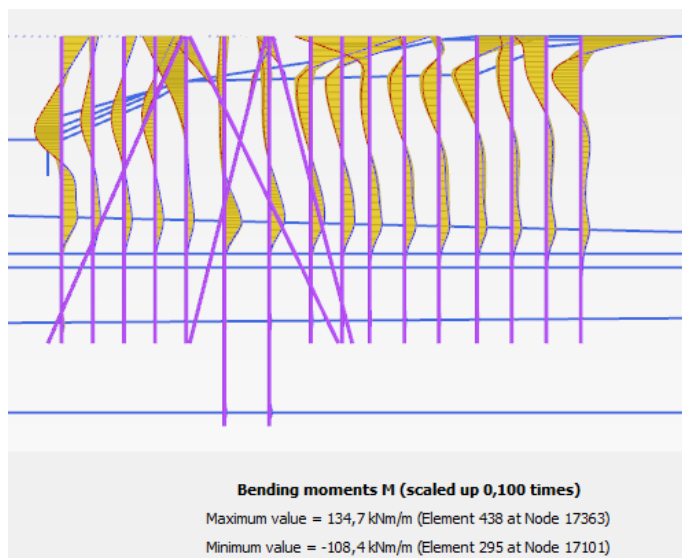




Slika 106: Osna obremenitev kolov MSN - PP2 – model z zagatnicami

### 20.2.2 Moment

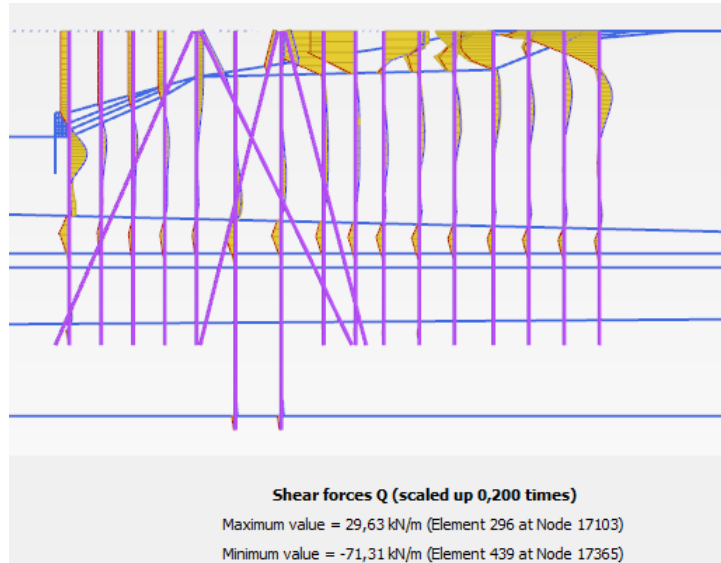
Največji moment se pojavi v prvem kolu zaledne konstrukcije in znaša 135 kNm/m. Vendar se ne nahaja v istem kolu, kot največja osna sila (Slika 107).



Slika 107: Momenti pri obremenitvi MSN - PP2 – model z zagatnicami

### 20.2.3 Prečna sila

Največja prečna sila se tudi pojavi v skrajnem desnem kolu in znaša -71 kN/m in se nahaja na istem mestu in v istem kolu kot največji moment (Slika 108).



**Slika 108: Prečne sile pri obremenitvi MSN - PP2 – model z zagatnicami**

### 20.3 Prikaz spreminjanja notranjih sil med poglobitvijo

V tem poglavju je predstavljena sprememba notranjih sil v kolih po posameznih korakih poglobitve. Spodnja preglednica (Preglednica 15) prikazuje maksimalne obremenitve kolov. Primerjane so vrednosti analize z uporabo zagatnic (stolpci z oznako »Z«) s tistimi dobljenimi v poglavju 14 z analizo s spremembo naklona brežin (stolpci z oznako »O«). Iz preglednice je razvidno, da se obremenitve v kolih ne glede na način poglobitve praktično ne spreminjajo.

**Preglednica 15: Spremembe notranjih sil v kolih zaradi poglobitve morskega dna – maksimalne vrednosti**

| Faza poglobitve     | O         | Z         | O                      | Z                      | O         | Z         | O        | Z        |
|---------------------|-----------|-----------|------------------------|------------------------|-----------|-----------|----------|----------|
|                     | N [kN/m]  | N [kN/m]  | $N_{pod\ nogo}$ [kN/m] | $N_{pod\ nogo}$ [kN/m] | M [kNm/m] | M [kNm/m] | Q [kN/m] | Q [kN/m] |
| 12 m - osnovna      | 841       | 841       | 133                    | 133                    | 128       | 128       | 72       | 71       |
| 13 m                | 844       | 842       | 133                    | 133                    | 128       | 128       | 72       | 71       |
| 14 m                | 847       | 845       | 133                    | 133                    | 128       | 128       | 72       | 71       |
| 15 m                | 851       | 847       | 133                    | 133                    | 128       | 128       | 72       | 71       |
| PP2 [kN]            | 5540 [kN] | 5535 [kN] | 869 [kN]               | 869 [kN]               | 851 [kNm] | 851 [kNm] | 455 [kN] | 428 [kN] |
| Sprememba absolutno | 10        | 7         | 0                      | 0                      | 0         | 0         | 0        | 0        |
| Sprememba [%]       | 1         | 0,7       | 0                      | 0                      | 0         | 0         | 0        | 0        |

V spodnji preglednici so predstavljene sile za prvi kol obalne konstrukcije - najbolj oddaljen kol od obale in hkrati tisti, ki je najbližje zagatnicam (Preglednica 16). Izkaže se, da vgradnja

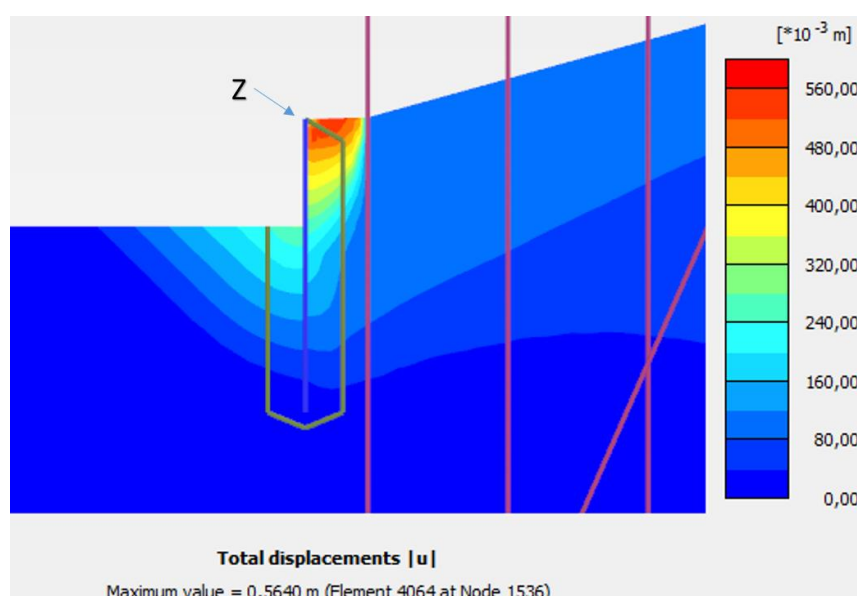
zagatnic in poglobitev, ki sledi, nima večjih vplivov na kol in da so obremenitve v kolu praktično enake obremenitvam v primeru poglobitve s spremembo naklona brežine morskega dna.

**Preglednica 16: Spremembe notranjih sil zaradi poglobitve morskega dna v prvem kolu obalne konstrukcije**

| Faza poglobitve     | O            | Z            | O                       | Z                       | O            | Z            | O           | Z           |
|---------------------|--------------|--------------|-------------------------|-------------------------|--------------|--------------|-------------|-------------|
|                     | $N$<br>[kN]  | $N$<br>[kN]  | $N_{pod\ nogo}$<br>[kN] | $N_{pod\ nogo}$<br>[kN] | $M$<br>[kNm] | $M$<br>[kNm] | $Q$<br>[kN] | $Q$<br>[kN] |
| 12 m - osnovna      | 660          | 660          | 124                     | 124                     | 27           | 27           | 6           | 6           |
| 13 m                | 659          | 662          | 122                     | 125                     | 26           | 29           | 6           | 6           |
| 14 m                | 660          | 665          | 121                     | 126                     | 25           | 31           | 7           | 7           |
| 15 m                | 660          | 668          | 120                     | 129                     | 23           | 33           | 5           | 7           |
| PP2                 | 4374<br>[kN] | 4379<br>[kN] | 905 [kN]                | 846 [kN]                | 153<br>[kNm] | 243<br>[kNm] | 41<br>[kN]  | 70<br>[kN]  |
| Sprememba absolutno | 0            | 8            | 4                       | 5                       | 4            | 6            | 1           | 1           |
| Sprememba [%]       | 0            | 1            | 3                       | 4                       | 15           | 22           | 17          | 16          |

## 20.4 Varnost

Kot že omenjeno, je računsko varnost zanašala nekaj več kot 1,3, kar popolnoma zadošča EC 7 standardom. Na sliki spodaj (Slika 109) so predstavljeni horizontalni pomiki pri varnosti 1,25 in spremenljivi obtežbi faktorirani z 1,5, kar ustreza zahtevam PP3. Omeniti velja, da se je ravno zahteva po globalni varnosti izkazala za merodajno pri dimenzioniranju dolžine zagatnic.



**Slika 109: Pomiki pri varnosti 1,25**

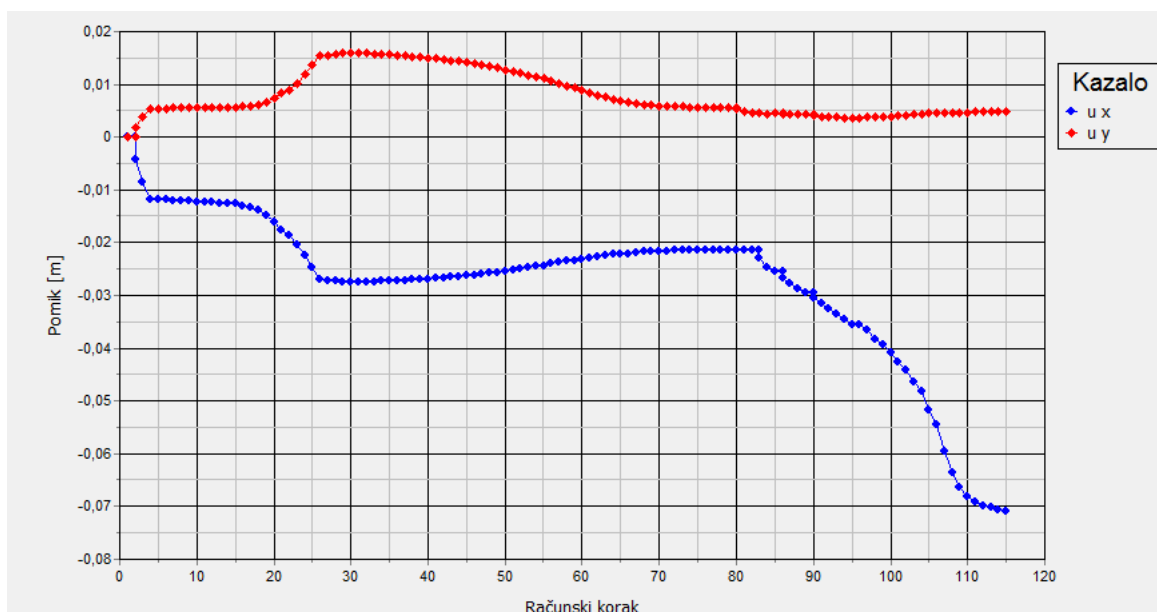
## 20.5 MSU pri modelu z jeklenimi zagatnicami

### 20.5.1 Točka Z na vrhu diafragme

Na spodnjem grafu (Slika 110) so predstavljeni horizontalni in vertikalni pomiki točke Z označeno na sliki 109. Točka Z leži na vrhu diafragme. Maksimalni pomiki so manjši od 6 cm. Glede na lokacijo diafragme je to vsekakor sprejemljiv pomik.

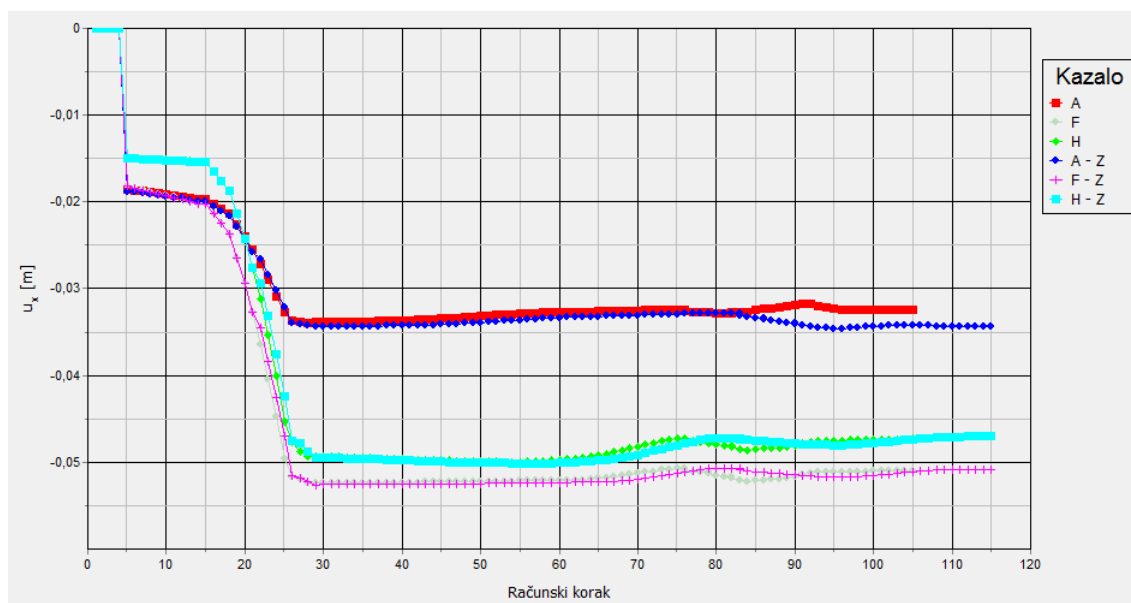
Na spodnjem seznamu faz analize so k posamezni fazi pripisani računski koraki (faza : računski korak).

- $K_0$  : 1-1
- Korak za uravnoveženje zemljine : 2-4
- Vgradnja kolov : 5-14
- Obtežba : 15-27
- Konsolidacija 90% izvedena v 12 letih: 28-79
- Vgradnja diafragme: 80-82
- Poglobitev na 13 m : 83-85
- Poglobitev na 14 m : 86-89
- Poglobitev na 15 m : 90-96
- Proces konsolidacije - 99% konsolidacija, ki bo izvedena v 11 letih : 97-115



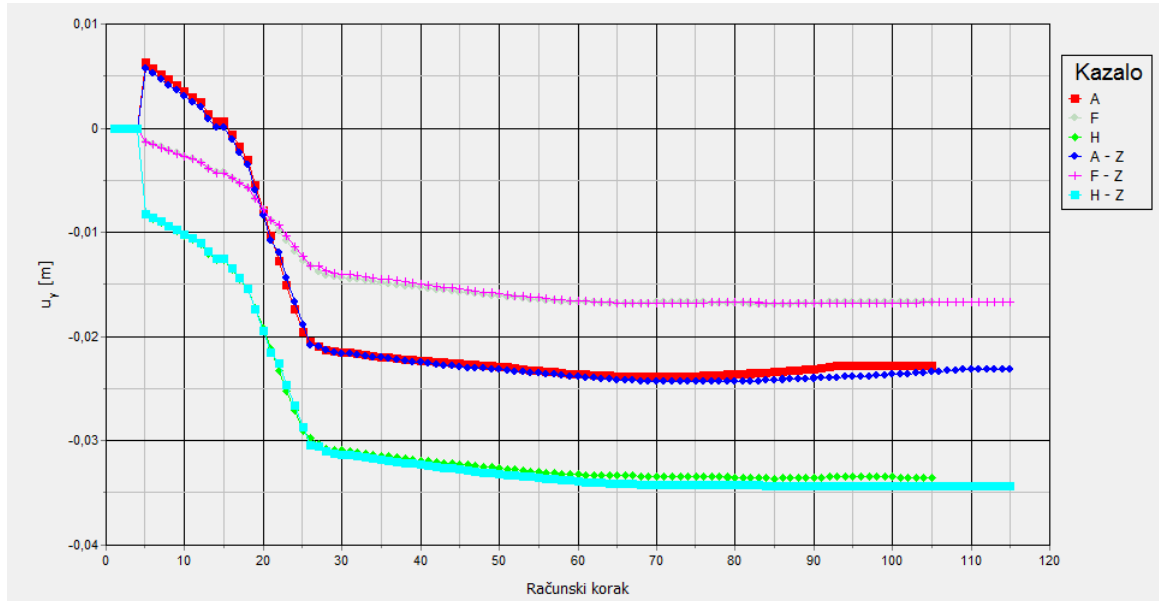
Slika 110: Graf pomikov točke Z v odvisnosti od računskega koraka

Na spodnjem grafu (Slika 111) so predstavljeni horizontalni pomiki opazovanih točk A, F in H. Točke so postavljene na ista mesta, kot tiste, ki so predstavljene v poglavju 15 - MSU. Iz grafa lahko razberemo, da so pomiki praktično enaki za oba primera poglobljanja. Pomiki, ki se izvršijo v času vgradnje zagatnic in izkopa do globine 15 m, so predstavljeni od koraka 80 naprej. Ugotovimo lahko, da so pomiki zaradi poglobitve ranga velikosti nekaj milimetrov.



**Slika 111: Horizontalni pomiki obravnavanih točk v odvisnosti od poteka gradnje – model z zagatnicami**

Na spodnjem grafu (Slika 112) je predstavljen potek vertikalnih pomikov. Podobno kot je bilo moč ugotoviti za horizontalne pomike, velja tudi za vertikalne. Pomiki so ranga velikosti nekaj milimetrov in praktično enaki za oba načina poglobitve. Tako so izpolnjeni pogoji, ki jih zahteva mejno stanje uporabnosti.



Slika 112: Vertikalni pomiki obravnavanih točk v odvisnosti od poteka gradnje – model z zagatnicami

## 20.6 Kontrola nosilnosti zagatnic

Da bo nosilnost zagatnic zadostna, mora odpornostni moment zagatnic presegati maksimalni moment dobljen po PP2 in PP3. Iz analize je razvidno, da največji moment lahko pričakujemo po končani konsolidaciji po PP2.

$$M_{ed} = 52,31 * 1,35 = 71 \text{ kNm/m}$$

Na podlagi dobljene maksimalne obremenitve lahko iz preglednice nosilnosti, ki jo podaja proizvajalec, določimo potrebno kvaliteto jekla (Preglednica 17).

Preglednica 17: Nosilnost zagatnic (Gooimeer, 2010)

| Section           | Modulus of elasticity<br>$W_{y,el}$ [cm <sup>3</sup> /m] | Withstandable bending moments $M_{y,Rd}$<br>$W_{y,el} / 1000 * f_{yk} / 1,1$ |          |          |          |          |          |
|-------------------|--|--|----------|----------|----------|----------|----------|
|                   |  | S 240 GP   | S 270 GP | S 320 GP | S 355 GP | S 390 GP | S 430 GP |
|                   |  | [kNm/m]  | [kNm/m]  | [kNm/m]  | [kNm/m]  | [kNm/m]  | [kNm/m]  |
| LARSSEN 755       | 2000   | 436  | 491      | 582      | 645      | 709      | 782      |
| LARSSEN 703       | 1210   | 264  | 297      | 352      | 391      | 429      | 473      |
| LARSSEN 703 K     | 1300   | 284  | 319      | 378      | 420      | 461      | 508      |
| LARSSEN 703 10/10 | 1340   | 292  | 329      | 390      | 432      | 475      | 524      |
| LARSSEN 704       | 1600   | 349  | 393      | 465      | 516      | 567      | 625      |
| LARSSEN 600       | 510  | 111  | 125      | 148      | 165      | 181      | 199      |
| LARSSEN 600 K     | 540  | 118  | 133      | 157      | 174      | 191      | 211      |
| LARSSEN 601       | 745  | 163  | 183      | 217      | 240      | 264      | 291      |
| LARSSEN 602       | 830  | 181  | 204      | 241      | 268      | 294      | 324      |
| LARSSEN 603       | 1200   | 262  | 295      | 349      | 387      | 425      | 469      |
| LARSSEN 603 K     | 1240   | 271  | 304      | 361      | 400      | 440      | 485      |

Na podlagi zgornje preglednice izberemo zagatnice Larssen 603 kvalitete S 240 GP. Glede na podatke enega izmed vodilnih proizvajalcev jeklenih zagatnic so slednje dobavljive v dolžinah od 30 do 36 m. Zahtevana minimalna dolžina zagatnic znaša 9,5 m, tako je iz praktičnih razlogov smiselno uporabiti zagatnice dolžine 10 m, saj bo tako posamezen element dolžine 30 mogoče razrezati na 3 elemente dolžine 10 m.

## 21 Zaključek

V sklopu te naloge je predstavljeno delovanje »Embedded pile row« elementov. Obnašanje EPR elementov je bilo primerjano z rezultati statičnega obremenilnega testa. Znanje, pridobljeno z analizo delovanja EPR elementov, je bilo uporabljeno na praktičnem primeru za modeliranje poglobitve morskega dna v Luki Koper pomol 7A. V nadaljevanju so bile analizirane še druge možnosti za analizo vplivov poglobitve na obalno konstrukcijo, ki so bile primerjane z rezultati, dobljenimi z analizo osnovnega modela. Pomembnejše ugotovitve bi lahko strnil v naslednjih točkah:

- Z dosledno uporabo EPR elementov je možno natančno simulirati obnašanje kola pod statično obtežbo.
- Modeliranje obnašanja kola z linijskim elementom, ki mu je dodan kontaktni element, se je v sklopu te naloge izkazalo za manj natančno metodo od modeliranja kolov z EPR elementi.
- Dinamični obremenilni preizkus je zelo koristen test za oblikovanje EPR elementov.
- EPR elementi so sposobni rešiti problematiko križanja vertikalnih in poševnih kolov v 2D numerični analizi.
- Pri modeliranju z EPR elementi je zelo pomembna uporaba HSsmall modela zemljine, saj so pomiki zelo odvisni od strižne togosti pri majhnih deformacijah.
- Pri modeliranju z uporabo HSsmall modela zemljine sta ključna parametra  $\gamma_{0,7}$ ,  $G_0$ . Vrednosti teh parametrov lahko dobimo z nekaterimi naprednimi raziskavami, ocenimo pa jih lahko tudi na podlagi strokovne literature.
- Obravnavani koli pri manjših obremenitvah prenašajo obtežbo na okoliško zemljino s trenjem, pri povečevanju obtežbe pa se izkoristi tudi nosilnost pod nogo kola.
- Pri napovedi pomikov konstrukcije je pomembno poznati, kaj se je s konstrukcijo dogajalo v preteklosti, čemur pričajo rezultati v poglavju 15 – MSU. Izkazalo se je namreč, da je razvoj pomikov tekom poglobitve odvisen tudi od upoštevanja predhodnega koraka konsolidacije.
- Z modeliranjem konstrukcije brez upoštevanja poševnih kolov smo na varni strani, vendar so izračunane obremenitve in pomiki lokalno nerealno veliki.



- V primeru, da nismo prepričani, da lahko zagotovimo povsem tog stik med koli in horizontalno konstrukcijo, je smiselno narediti analizo s togim in členkastim načinom vpetja.
- V primeru, da nas zanimajo samo obremenitve obalne konstrukcije, lahko v modelu upoštevamo samo slednjo in ostale dele konstrukcije pomola izpustimo, saj bistvenih razlik v rezultatih ni.
- Ideja poglobitve morskega dna z vgradnjo zagatnic pred prvi kol obalne konstrukcije se je izkazala za stabilnostno ustrezno varianto.
- Za primer modeliranja poglobitve morskega dna v Luki Koper se je program Plaxis izkazal za bolj uporabno programsko orodje kot program Phase 2.0.

## Viri

Beg, D. (ur.), Pogačnik, A. (ur.). 2009. Priročnik za projektiranje gradbenih konstrukcij po evrokod standardih. Ljubljana, Inženirska zbornica Slovenije: 1077 str.

Frank, D. 2012. Obalna konstrukcija veza 12 z zagatno steno. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, (samozaložba D.Frank): 109 str.

Poglabljanje plovnega kanala in severnega dela bazena I znotraj akvatorija koprškega pristanišča na koto -15 m (hidrografsko). 2011 Projekt za pridobitev gradbenega dovoljenja. Ljubljana, Geoportal: 83 str.

Gooimeer – Sheet Piling Handbook. 2010. <http://www.gooimeer.nl/downloads/Handboek%20damwanden.pdf> (10.11.2013.)

Logar, J. 2010. Geotehnika v Luki Koper na začetku 21. stoletja. Gradbeni vestnik 59: str. 43-74.

Logar, J. 2013. Luka Koper - profili. Elektronska pošta za: Andrejašič, M. 6.3.2013. Osebna komunikacija.

Luka Koper d.d. 2013. <http://www.luka-kp.si/> (Pridobljeno 14.4.2013.)

Mehanika tal. 2013 Laboratorijske vaje: Fizikalne lastnosti zemljin in hribin. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za mehaniko tal z laboratorijem: 29 str.

Monaco, P., Marchetti, S. 2007. Evaluating liquefaction potential by seismic dilatometer (SDMT) accounting for aging/stress history, 4th Int. Conf. on earthquake geotechnical engineering, Greece: 12 str.

Monaco, P., Marchetti, S., Totani, G., Marchetti, D. 2013. Interrelationship between small strain modulus  $G_0$  and operative modulus. University of L'Aquila, Italy. Studio Prof. Marchetti, Rome, Italy. <http://www.marchetti-dmt.it/pdf/monaco%20IS-Tokyo%202009%20Interrelationship%20Go-operative%20modulus.pdf> (Pridobljeno 10.3.2013.)

Plaxis 2D 2012 – Scientific Manual. 2012. <http://www.plaxis.nl/files/files/2D2012-4-Scientific.pdf> (Pridobljeno 2.3.2013.)

Plaxis 2D 2012 – Reference manual. 2012. <http://www.plaxis.nl/files/files/2D2012-2-Reference.pdf> (Pridobljeno 17.2.2013.)

Plaxis 2D 2012 – Tutorial manual. 2012. <http://www.plaxis.nl/files/files/2D2012-1-Tutorial.pdf> (Pridobljeno 16.2.2013.)

Plaxis 2D 2012 – Material Model. 2012. <http://www.plaxis.nl/files/files/2D2012-3-Material-Models.pdf> (Pridobljeno 2.3.2013.)

Pulko, B., Robas, A. 2012. Seizmični dilatometer v Sloveniji in njegova uporaba v praksi. V: Razprave 6. posvetovanja Slovenskih geoteknikov. Lipica, Slovensko geotehnično društvo: str. 157-170.

Robas, A., Logar, J. 2008. Prve izkušnje s seizmičnim dilatometrom v Sloveniji. Razprave petega posvetovanja slovenskih geoteknikov. Ljubljana, Slovensko geotehniško društvo: str. 155-162.

Robas, A., Logar, J., Majes, B. 2008. Poročilo o preiskavah tal s seizmičnim dilatometrom na lokaciji Hale 54 na pomolu II v Luki Koper. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za mehaniko tal z laboratorijem: 58 str.

Strniša, G. 2009. Statični in dinamični testi na kolih v Luki Koper. V: Zbornik referatov 10. Šukljjetovih dnevov. Ljubljana, Slovensko geotehniško društvo: Str. 89-110.

Žlender, B. 2003. Ciklični triosni preizkusi. V: Zbornik referatov 4. Šukljetovih dnevov.  
Ljubljana, Slovensko geotehniško društvo: Str. 80-97.