



UNIVERZA
V LJUBLJANI

FGG

Fakulteta za gradbeništvo
in geodezijo

Katedra za geotehniko

POROČILO

**o rezultatih geotehničnih analiz načrtovanih
privezov za plovila URSP**

Naročnik:	Uprava RS za pomorstvo, Koper
GG poročilo:	Zavod za gradbeništvo, Ljubljana
Št. naročila:	Elektronska pošta Vitomir Mavrič
Datum naročila:	27.10.2025

Številka poročila:	E-16-25
Datum:	15. 12. 2025
Pripravil:	prof. dr. Janko Logar, univ.dipl.inž.grad.
Predstojnik:	izr. prof. dr. Boštjan Pulko, univ.dipl.inž.grad.



1 UVOD

Uprava RS za pomorstvo načrtuje izvedbo novih priveznih mest za svoja plovila neposredno pred svojo poslovno stavbo na lokaciji, poznani pod lokalnim imenom Štapiči. Načrt izdeluje podjetje ISAN 12 iz Kopra (inž. Iztok Kleibencetl). Poročilo o preiskavah tal je izdelal Zavod za gradbeništvo:

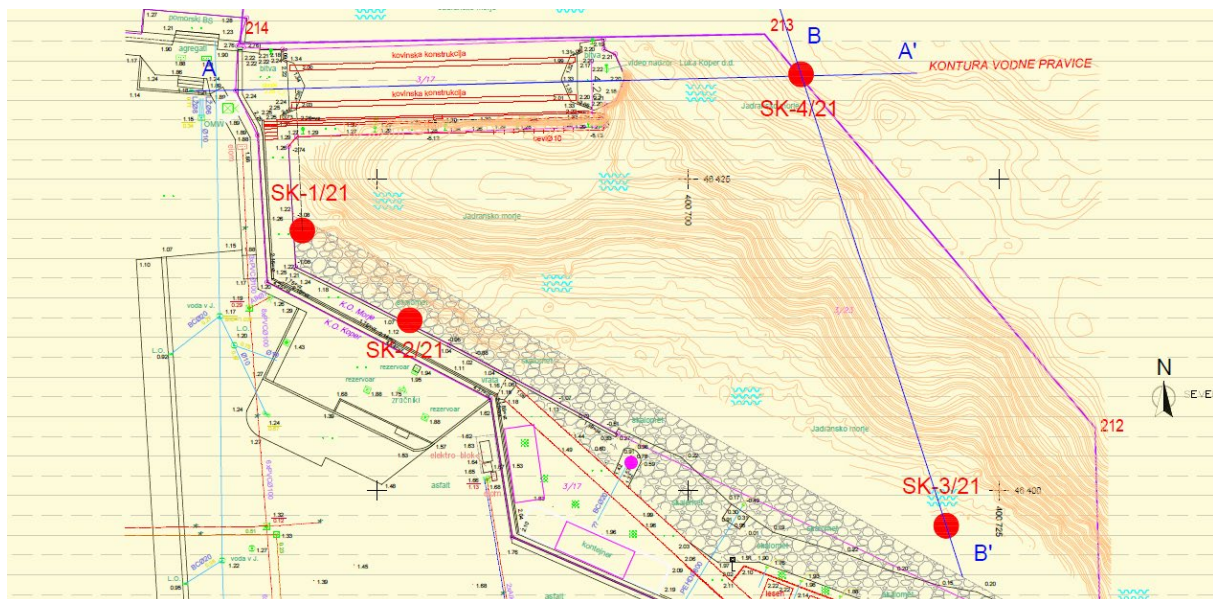
B. Likar, L. Vovčko: Geološko – geomehansko poročilo o sestavi tal in pogojih temeljenja za izgradnjo novih priveznih mest na območju »Štapičev«, parc.št. 3/17, k.o. Morje (2716), št. 977/21-710-2, 2.11.2021.

Po dogovoru z naročnikom in v sodelovanju s projektantom smo izdelali geotehnične analize v dveh profilih (P-1 in P-4), o katerih podrobneje poročamo v nadaljevanju.

Namen teh analiz je v obeh prerezih preveriti globalno stabilnost, v profilu P-1, kjer je za varovanje obale načrtovana pilotna stena, pa tudi izračun obremenitev oziroma notranjih sil v pilotih.

2 POVZETEK PODATKOV O TLEH

Zavod za gradbeništvo (ZAG) je leta 2021 za potrebe preiskav tal izvedel 4 sondaže na lokacijah, prikazanih na sliki 1. Vrtine so bile globoke 2 do 3 m, le vrtina SK-2/21 je bila vrtana 6 m globoko. Na morskem dnu se nahaja do 1,5 m debel sloj mehkih morskih sedimentov (mulj). Sledi preperel, tudi v grušč spremenjen fliš debeline do 2 m, pod tem pa je kompaktna flišna podlaga. Pri pripravi geotehničnega modela tal v obeh obravnavanih računskih profilih smo si pomagali z grafično interpretacijo sestave tal, ki jo v svojem poročilu podaja ZAG.



Slika 1: Situacija območja Štapiči s prikazom lokacij vrtin.

Pomembna ugotovitev preiskav tal je tudi ta, da je vrtina SK-1/21 dokazala, da je obstoječa obalna konstrukcija temeljena na 1 m debelem temelju, ki leži neposredno na flišni podlagi.

Drugo zanimivost razkrije vrtina SK-2/21, ki je edina locirana v območju obstoječega skalometa: Pod površinskimi sloji umetnih nasutij se na globini 2,8 m (absolutna kota -4,1 m) pojavi sloj morskega mulja. To pomeni, da je sedanja obala nasuta na mehko morsko dno. Zato smo primerjali lego načrtovanega posega med gradbenima profiloma P1 in P6 (na sliki 2 označeno z zelenim pravokotnikom) s stanjem obale, kot ga lahko razberemo s karte iz leta 1930 (vir: Atlas voda, karta GHI_IGM_25K_1930_SI) – glej sliko 3. Primerjava pokaže, da je

bilo na obravnavani lokaciji pred 100 leti morje in je celotno območje med stavbo URSP in načrtovanimi privezi za plovila URSP na umetnem nasutju. Ker v zaledju načrtovane konstrukcije ne razpolagamo s podatki preiskav tal, je interpretacija sestave tal v nadaljevanju predpostavljena, enako pa velja tudi za lastnosti umetnih nasutij.



Slika 2: Lokacija nove obale med P1 in P6 na ortofoto posnetku iz leta 2024 (zelen pravokotnik).



Slika 3: Lokacija nove obale med P1 in P6 na karti iz leta 1930 (zelen pravokotnik) – vir: Atlas voda, karta GHI_IGM_25K_1930_SI.

Mehanske lastnosti vseh nastopajočih slojev tal smo interpretirali na podlagi podatkov iz poročila ZAG ter na podlagi siceršnjega poznavanja tal v Koprskem zalivu. Karakteristike, upoštevane v računskih analizah, so zbrane v preglednici 1.

Preglednica 1: Karakteristične vrednosti mehanskih lastnosti nastopajočih slojev tal

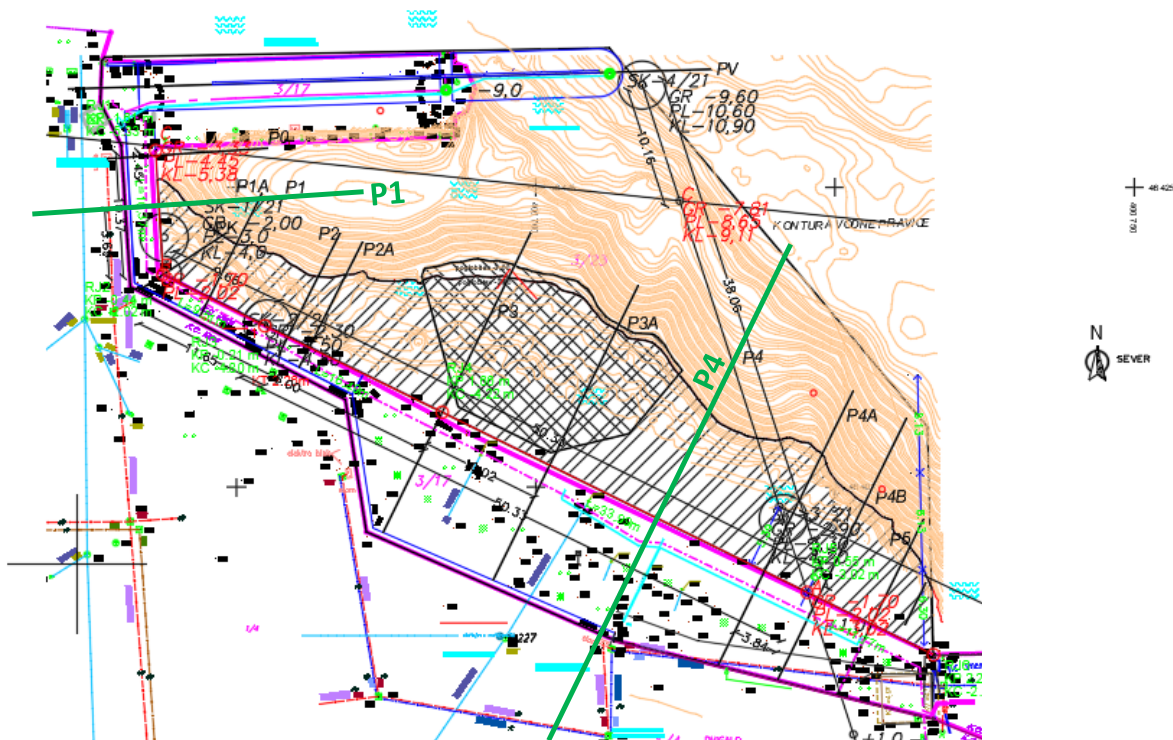
Številka	Unit	1	2	3	4	5	6	7
Opis		Beton	Fliš	mulj	Preperel fliš	Star zasip	Skalomet	Nov zasip
Mat. model		Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb
(Ne)dreniran		Drained	Drained	Drained	Drained	Drained	Drained	Drained
Barva		RGB 144, 146, 145	RGB 236, 232, 156	RGB 195, 229, 249	RGB 134, 234, 162	RGB 232, 161, 219	RGB 234, 235, 235	RGB 233, 104, 12
γ	kN/m ³	24	24	18	22	21	23	21
E'_{ref}	MN/m ²	30 000	148,6	1,49	44,6	18,6	40,0	25,0
ν		0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
G_{ref}	MN/m ²	12 500	57,1	0,57	17,14	7,14	15,38	9,62
E_{oed}	MN/m ²	33 330	200	2,00	60,0	25,0	53,85	33,65
c'_{ref}	kN/m ²	1000	50	2	10	3	1	1
ϕ' (phi)	°	40	35	24	32	27	45	38
ψ (psi)	°	0	0	0	0	0	15	8
Natezna trdnost	kN/m ²	100	0	0	0	0	0	0
$K_{0,x}$		0,3572	0,4264	0,5933	0,4701	0,546	0,2929	0,3843
$K_{0,z}$		0,3572	0,4264	0,5933	0,4701	0,546	0,2929	0,3843

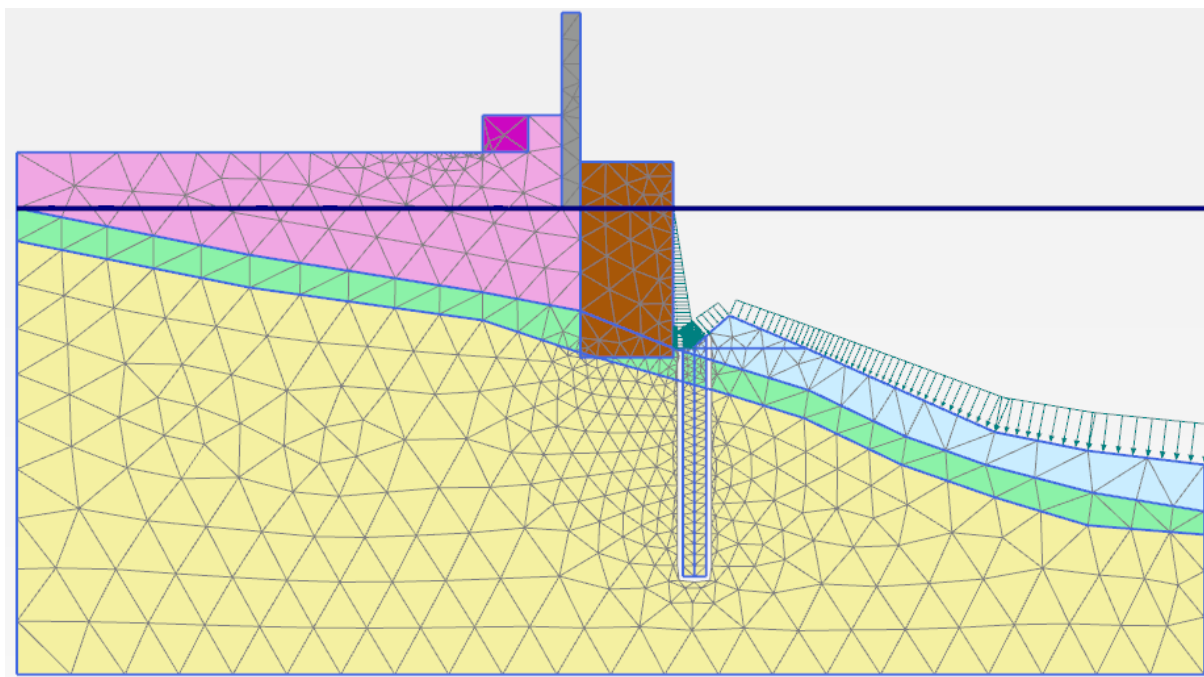
3 RAČUNSKE ANALIZE

Ureditev priveznih mest za potrebe URSP predvideva ureditev obalne ploščadi, ki je predvidena na koti ca 2,25 m ter poglobitev morskega dna na koto -2,8 m.

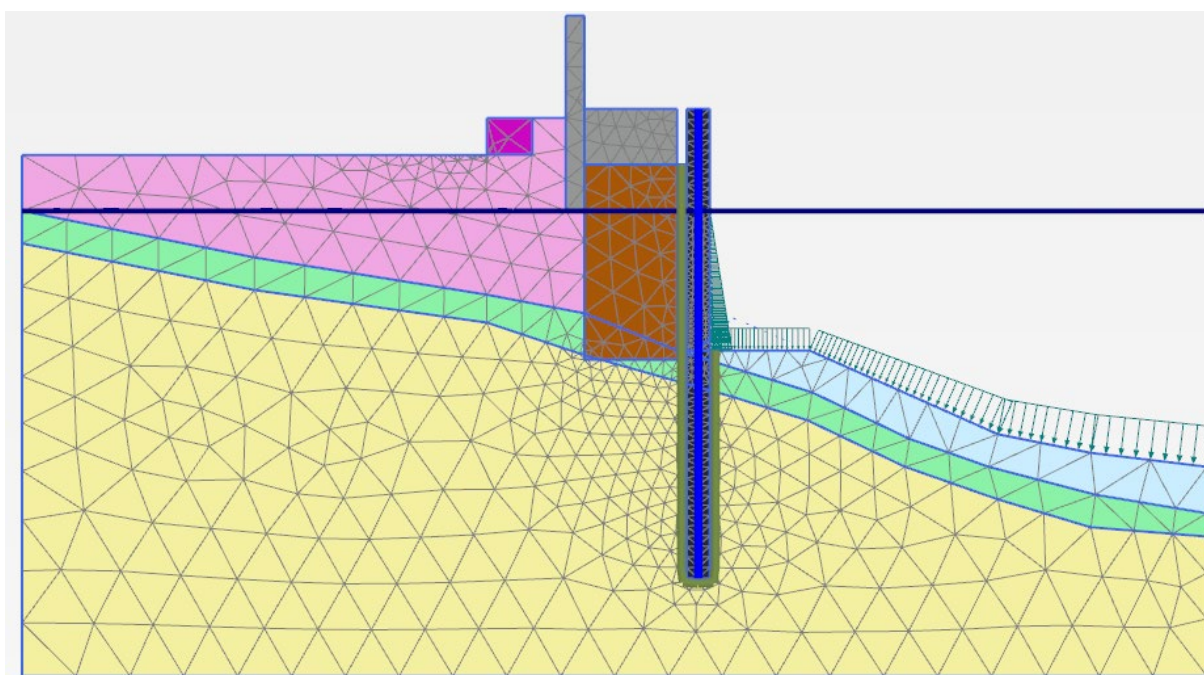
Računske analize smo opravili v dveh prerezih: P1 in P4, katerih lega je prikazana na sliki 4. V profilu P1 je obala zasnovana tako, da se vzdolž obalne linije izdela pilotna stena. V profilu P4 pa je predvidena obalna ploščad na pilotih, pod njo pa se oblikuje prosta brežina morskega dna, ki je zaradi velikega naklona varovana s skalometom.

Računske analize smo izdelali s programom Plaxis 2D po metodi končnih elementov z upoštevanjem nelinearnega Mohrovega in Coulombovega materialnega modela.





Slika 5: Računski model tal v profilu P1 v trenutnem stanju (pred gradnjo).



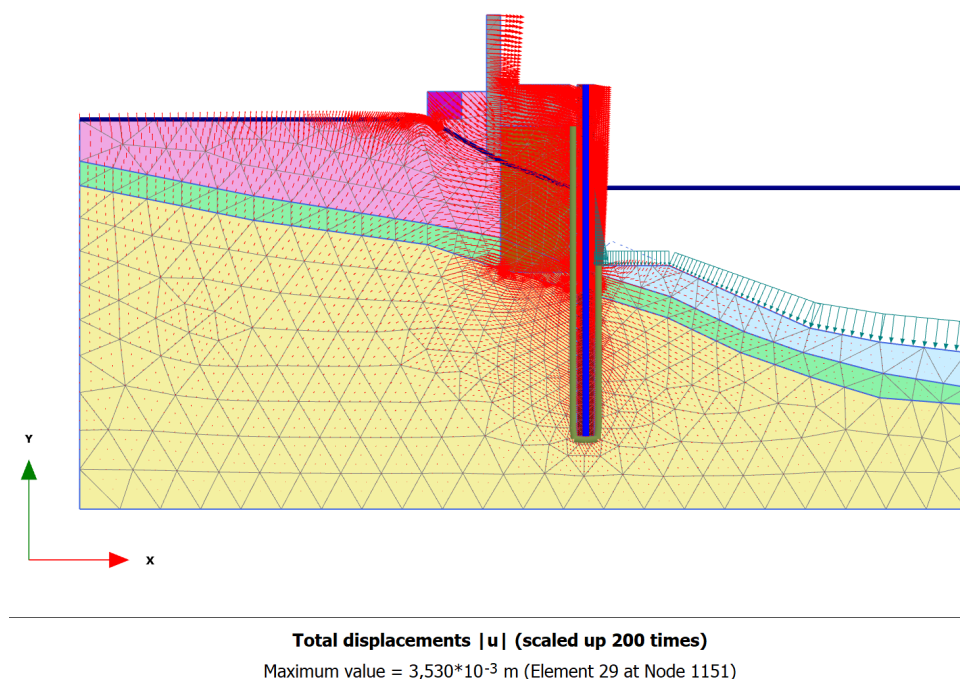
Slika 6: Računski model tal v profilu P1 v končnem stanju (po izgradnji obale).

Računsko analizo smo izvedli po naslednjih fazah gradnje oziroma v sledečih računskih korakih:

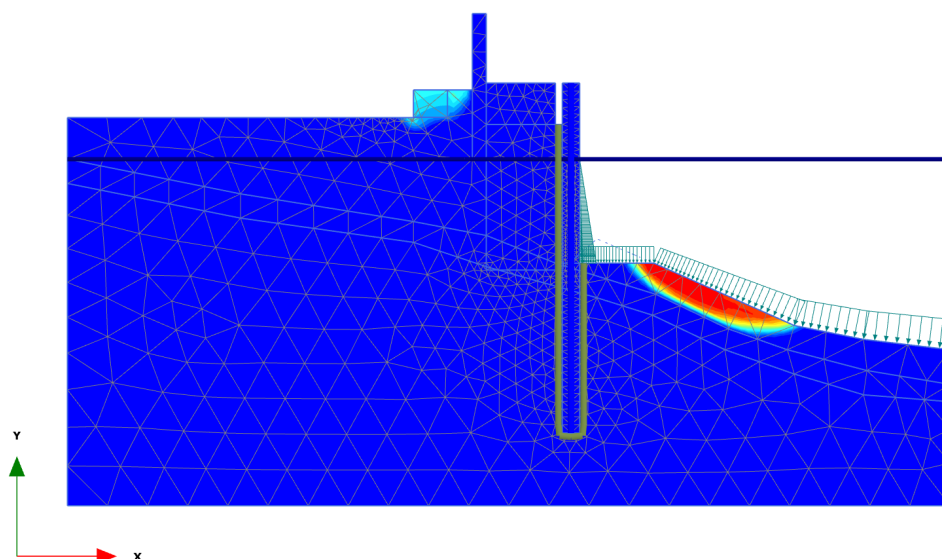
- Začetno (trenutno) stanje
- Izdelava pilotne stene
- Nadvišanje obale
- Injiciranje kamnite obale in zapolnitev prostora med njo in pilotno steno (vključena 0,33% deformacija vmesnega prostora v vodoravni smeri)

- Poglobitev morskega dna na koto -2,80 m
- Račun varnosti
- Varnost profila v končnem stanju (s skalometom in konstrukcijo)
- Sprememba vodostaja (ekstremna razlika v višini vode med zaledjem +1,20 m in na morski strani -0,77 m)
- Ponovljen račun varnosti za spremenjen vodostaj

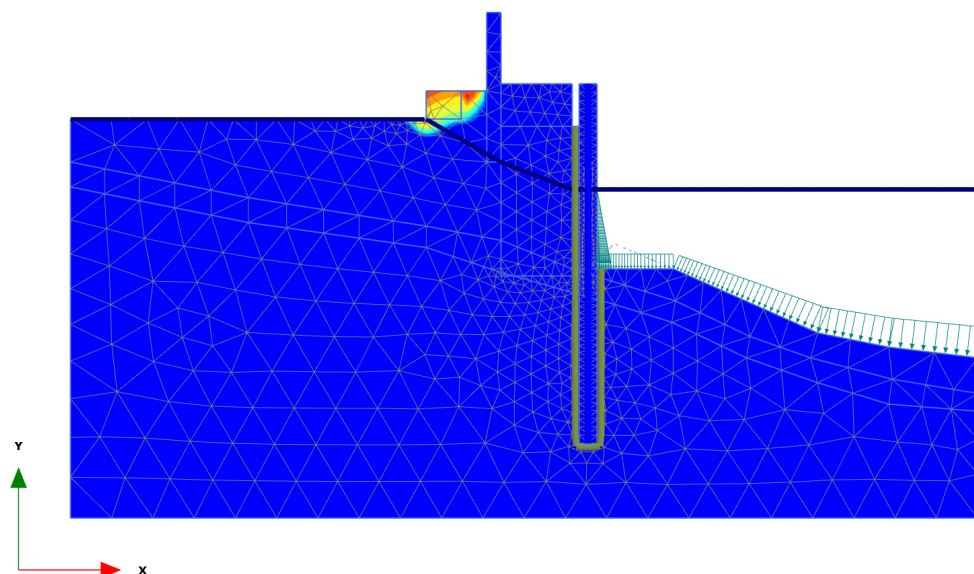
Rezultati računa pokažejo, da so pričakovani premiki konstrukcije v času gradnje majhni in znašajo ca 3 mm (slika 7) in še ti so posledica spremembe vodostaja (ekstremna oseka). To je pričakovano, saj gradnja tu ne povzroča pomembnih sprememb obtežb. Varnost obravnavanega profila je preko 1,70 (sliki 8 in 9). Izračunane notranje sile v pilotih so prikazane na slikah 10 in 11.



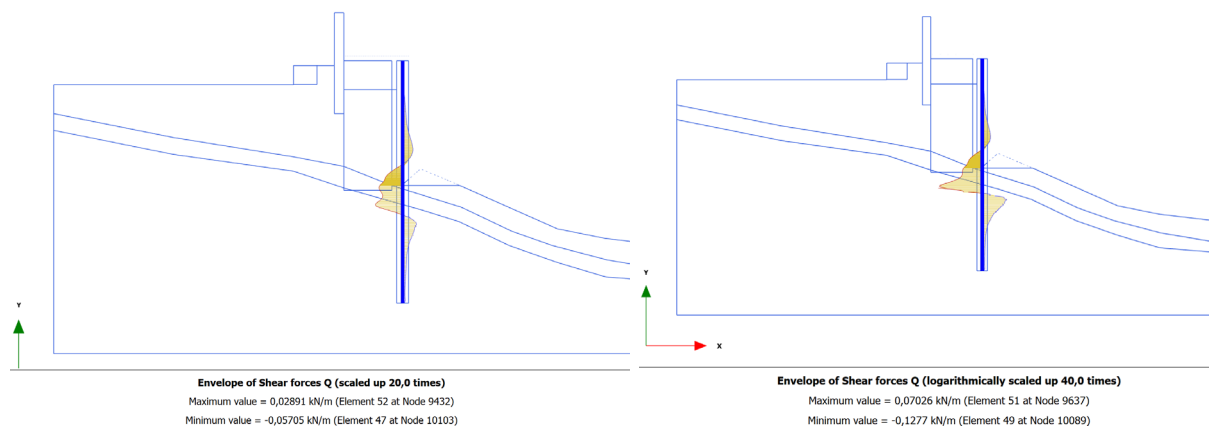
Slika 7: Največji računski premiki modela tal v profilu P1 so posledica ekstremne oseke.



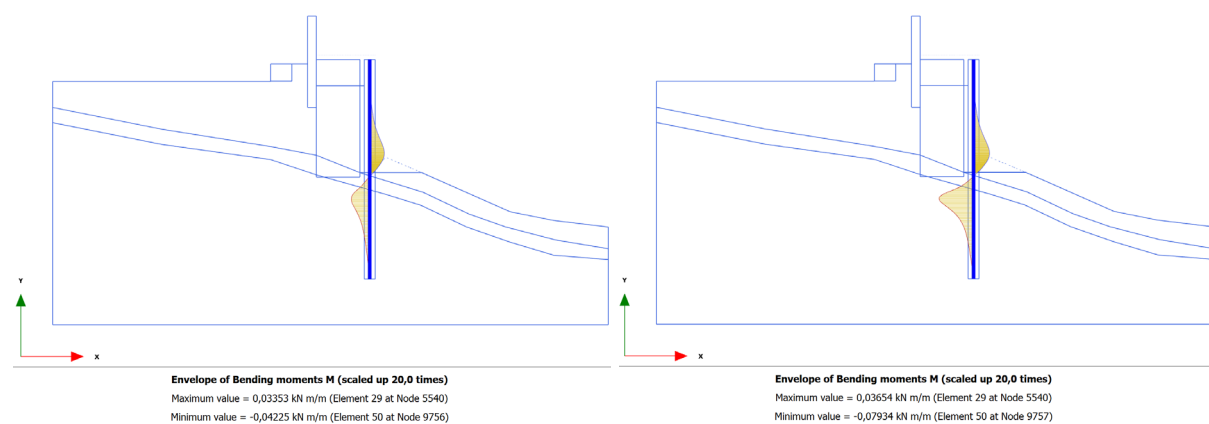
Slika 8: Računska varnost z vodostajem na koti 0 znaša $F = 1,89$. Porušni mehanizem je zunaj območja gradbenega posega v sloju morskega mulja pred pilotno steno.



Slika 9: Računska varnost z največjo možno razliko v višini vode pred in za obalno konstrukcijo znaša $F = 1,74$. Porušni mehanizem je zunaj območja gradbenega posega v zaledju obale.



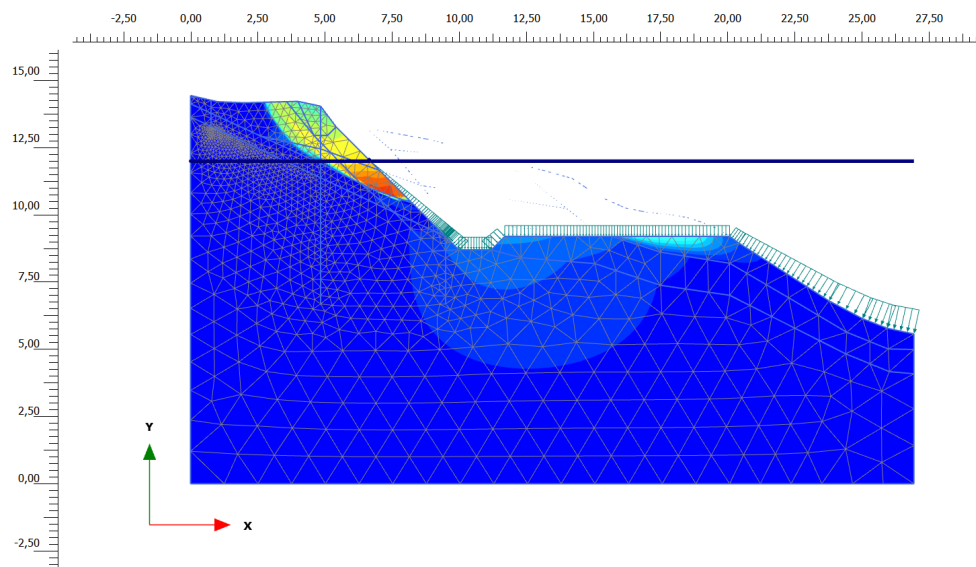
Slika 10: Ovojnica prečnih sil. Levo: mejno stanje uporabnosti ($Q_{\max;MSU} = 57,1$ kN/m); Desno: Mejno stanje nosilnosti (pri $F = 1,25$) ($Q_{\max} = 128$ kN/m). *OPOMBA:* Zaradi računskega postopka je treba na sliki izpisane izračunane vrednosti množiti s 1000.



Slika 11: Ovojnica upogibnih momentov v pilotni steni. Levo: mejno stanje uporabnosti ($M_{\max;MSU} = 42,3$ kNm/m); Desno: Mejno stanje nosilnosti (pri $F = 1,25$) ($M_{\max;MSN} = 79,3$ kNm/m). *OPOMBA:* Zaradi računskega postopka je treba na sliki izpisane izračunane vrednosti množiti s 1000.

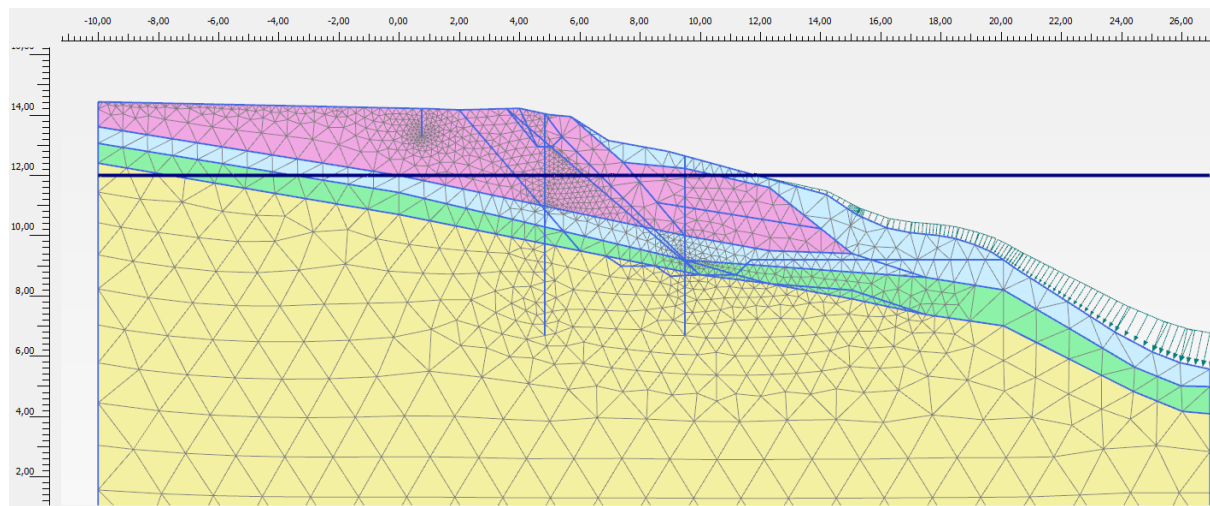
3.2 Računski prerez P4

Prerez P4 je izbran kot karakterističen za drugi del obale, kjer je konstrukcija zasnovana kot 30 cm debela armiranobetonska obalna ploščad na pilotih premera 50 cm v rastru 5 x 5 m. Prve izračune smo opravili s predpostavljeno brežino morskega dna v nagibu 45° in kamnito oblogo debeline 1 m. Ker tak profil računsko ni bil stabilen (glej sliko 12), smo nato poiskali obliko skalometa, ki zagotavlja dolgoročno stabilnost podvodne brežine.

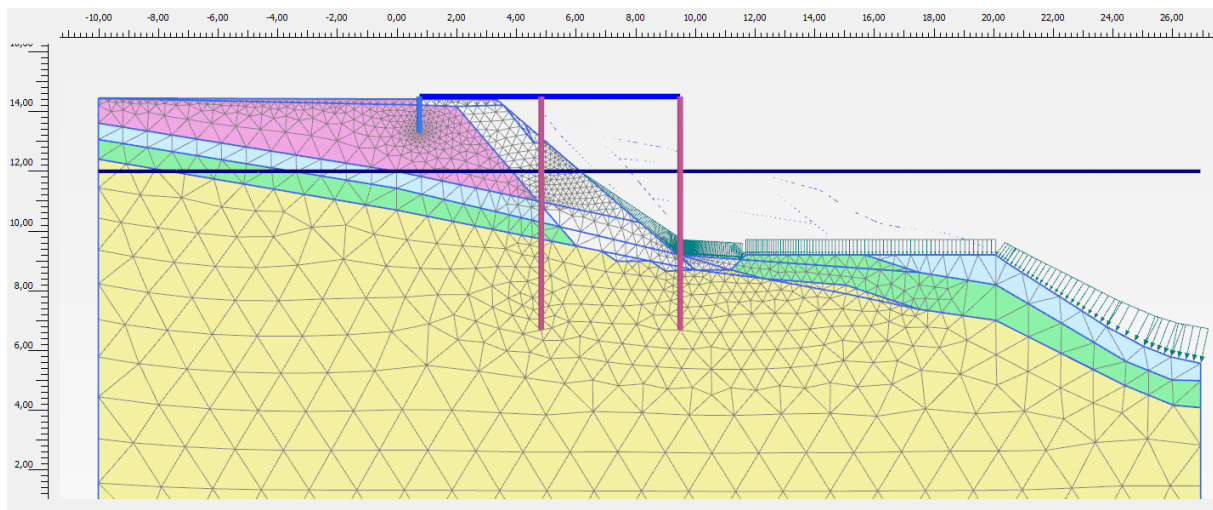


Slika 12: Izkop v profilu P4 v projektiranem naklonu ni stabilen ($F < 1$).

Stabilno situacijo smo dobili z naklonom čelne brežine 40°, zaledne brežine 50° in debelino skalometa na vrhu v širini 1,5 m. Pri višini skalometa 6,0 m to pomeni širino temelja 3,6 m. Predlagamo, da se skalomet temelji v ustrezno oblikovan (stopničen) izkop v flišno podlago. Računski model predpostavljenega trenutnega stanja tal prikazuje slika 13, model končnega stanja pa slika 14.



Slika 13: Računski model tal v trenutnem stanju (pred gradnjo).



Slika 14: Računski model tal v končnem stanju (po izgradnji obal).

Računsko analizo smo izvedli po naslednjih fazah gradnje oziroma računskih korakih:

- Začetno (trenutno) stanje,
- Izkop za skalomet po kampadah (50% sproščene napetosti zaradi izkopa),
- Izdelava skalometa
- Varnost skalometa
- Izgradnja konstrukcije
- Varnost profila v končnem stanju (s skalometom in konstrukcijo)

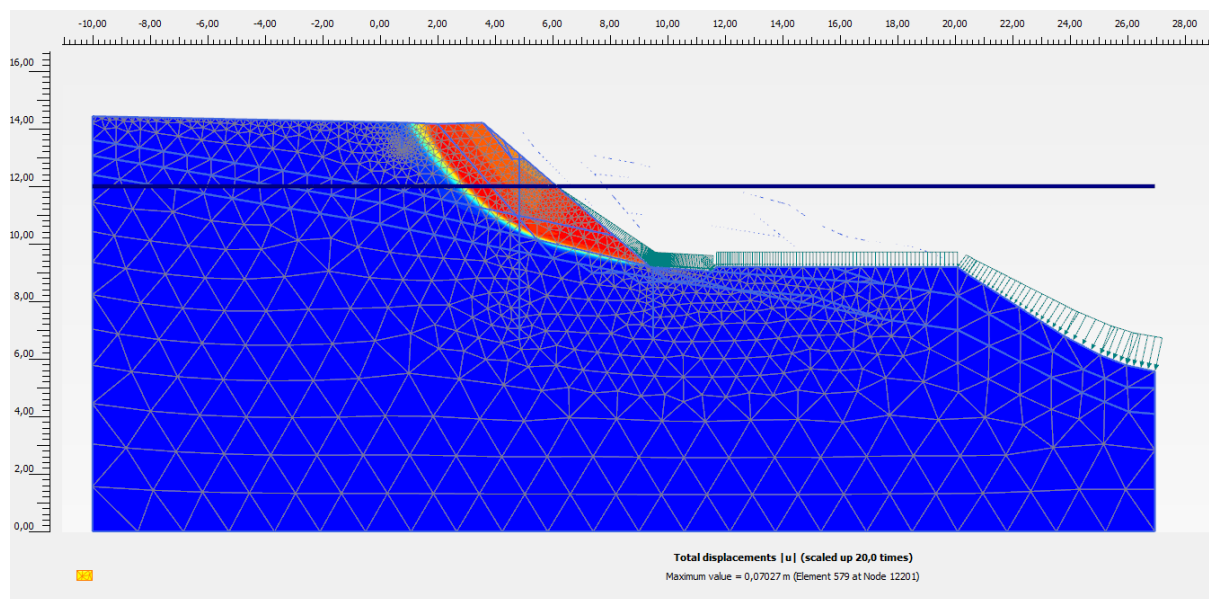
Začasen izkop v naklonu 50° ni stabilen, zato smo predpostavili kampadno gradnjo, ki smo jo računsko simulirali z le 50% sprostitev spremembe napetostnega stanja, ki je posledica izkopa. To pomeni, da je treba gradnjo dejansko izvajati postopoma po čim krajših še smiselnih segmentih (predlagamo kampade dolžine do 7,5 m, kar ob celotni dolžini obale na pilotih 45 m pomeni 6 delovnih kampad).

Končno stanje po izvedenem skalometu ima računsko varnost 1,27 pri vodostaju na koti 0 (v zaledju in na morski strani), oziroma 1,18 pri ekstremni oseki (-0,77 m) in zastoju podzemne vode na suhi strani (+1,75 m). Oba rezultata sta z obliko porušnega mehanizma predstavljena na slikah 15 in 16.

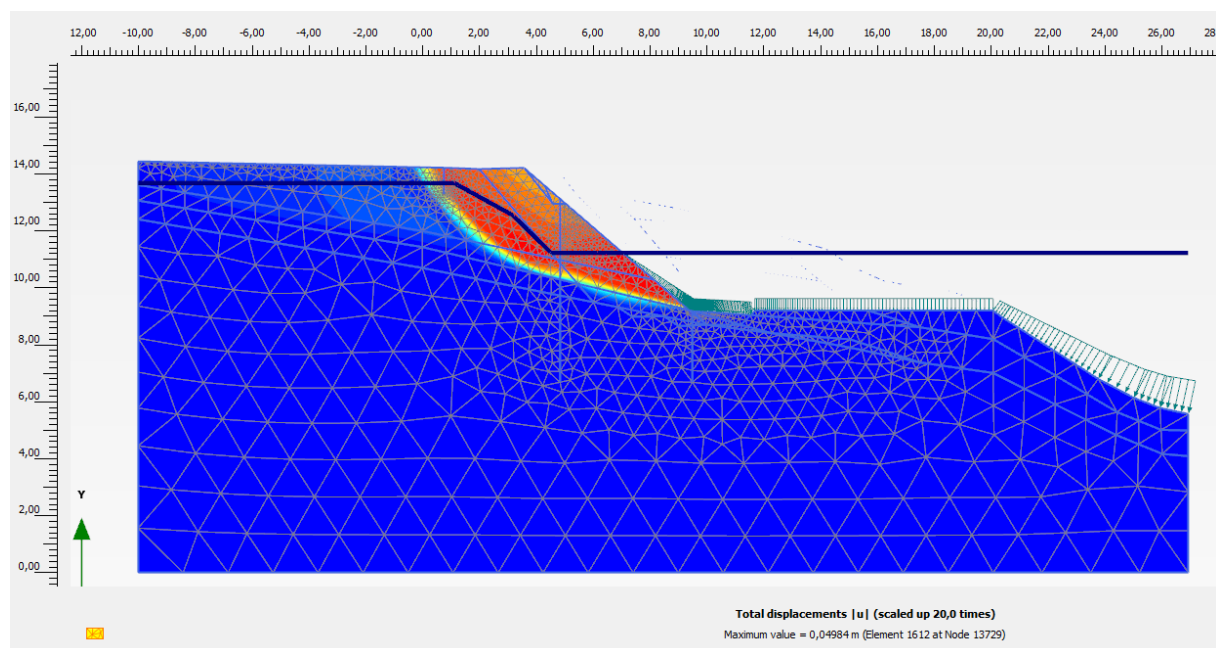
Ko se na tako oblikovan in s skalometom varovan profil zgradi še konstrukcija na pilotih, slednji zagotavljajo še dodaten podporni element, zato se računske varnosti povečajo. Rezultata za oba predpostavljena vodostaja sta predstavljena na slikah 17 in 18.

Končno stanje izkazuje ustrezno varnost.

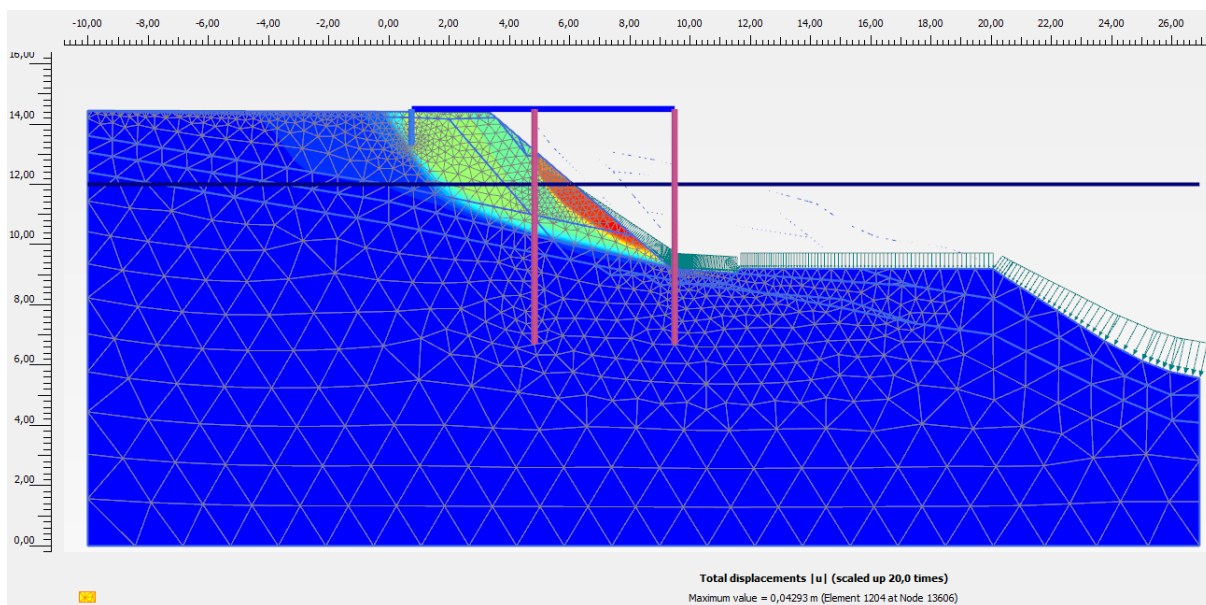
Na slikah 19 in 20 prikazujemo še prečne sile in upogibne momente v pilotih pri varnosti 1,25, kar skladno z Evrokodom 7 lahko smatramo za projektne vrednosti notranjih sil v pilotih.



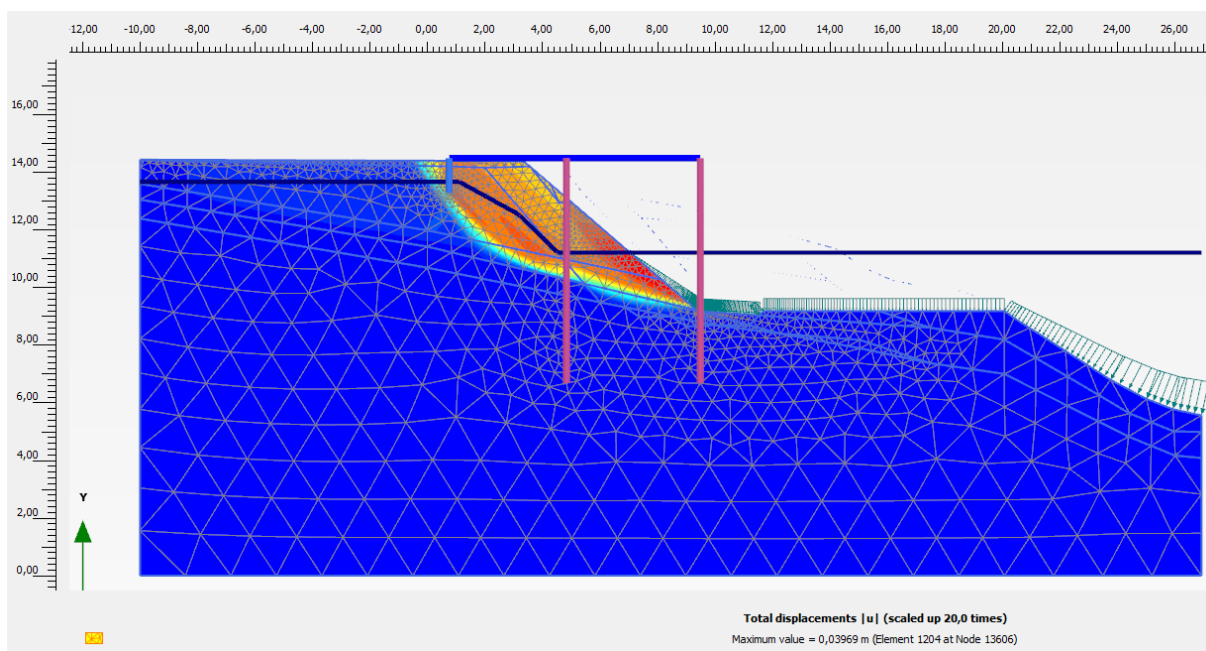
Slika 15: Račun varnosti profila P4 pred izvedbo obalne konstrukcije (samo skalomet) z vodostajem na koti 0 ($F = 1,27$).



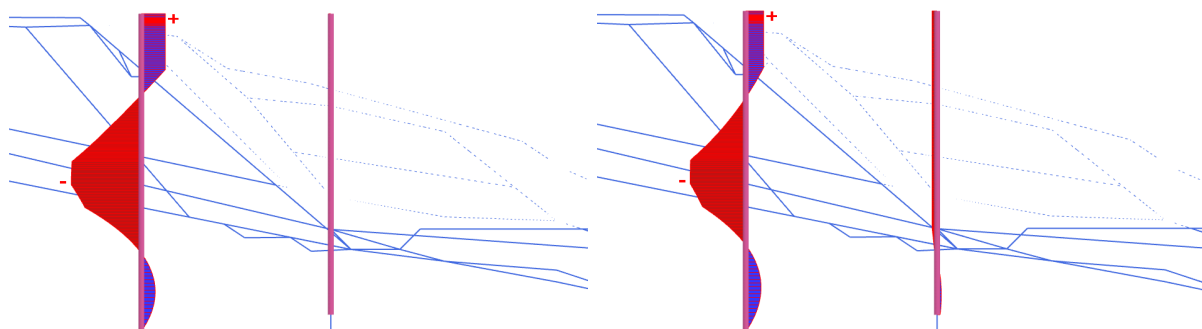
Slika 16: Račun varnosti profila P4 pred izvedbo obalne konstrukcije (samo skalomet) z ekstremno razliko v vodostajih na zaledni in morski strani ($F = 1,18$).



Slika 17: Račun varnosti profila P4 po izvedbi obalne konstrukcije z vodostajem na koti 0 ($F = 1,40$).



Slika 18: Račun varnosti profila P4 po izvedbi obalne konstrukcije z ekstremno razliko v vodostajih na zaledni in morski strani ($F = 1,33$).



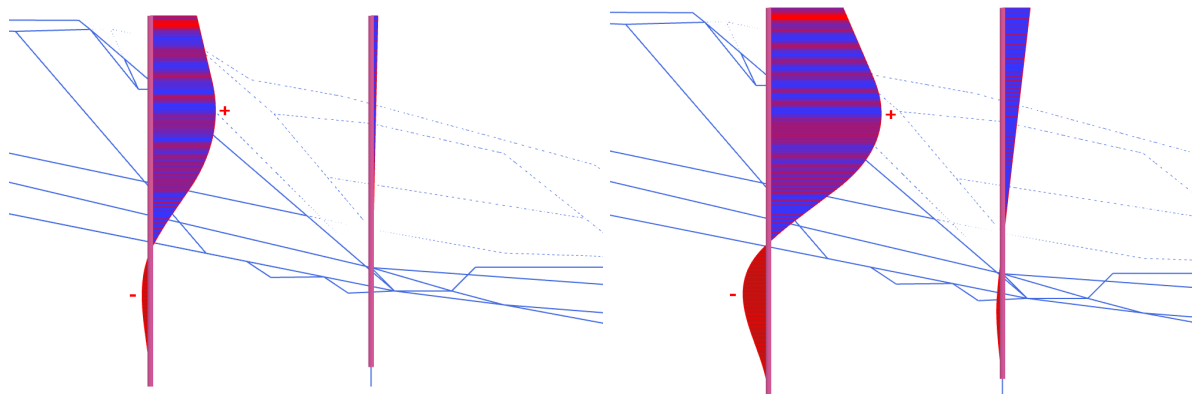
Shear forces Q (scaled up 0,0500 times) per structural element

Maximum value = 11,80 kN (Element 2 at Node 23982)
Minimum value = -34,49 kN (Element 28 at Node 24080)

Shear forces Q (scaled up 0,0200 times) per structural element

Maximum value = 21,84 kN (Element 2 at Node 23982)
Minimum value = -67,69 kN (Element 28 at Node 24080)

Slika 19: Prečne sile v pilotih pri redukciji strižne trdnosti tal s faktorjem 1,25 in pri ekstremni razliki nivoja vode pred in za konstrukcijo. Levo: vodostaj na koti 0 ($Q_{\max;d} = 34,5$ kNm); Desno: ekstremna razlika v kotah vode na morski in zaledni strani ($Q_{\max;d} = 67,7$ kNm).



Bending moments M (scaled up 0,0200 times) per structural element

Maximum value = 68,80 kNm (Element 15 at Node 24066)
Minimum value = -8,711 kNm (Element 34 at Node 24117)

Bending moments M (scaled up 0,0200 times) per structural element

Maximum value = 112,3 kNm (Element 15 at Node 24063)
Minimum value = -25,46 kNm (Element 33 at Node 24119)

Slika 20: Upogibni momenti v pilotih pri redukciji strižne trdnosti tal s faktorjem 1,25. Levo: vodostaj na koti 0 ($M_{\max;d} = 68,8$ kNm); Desno: ekstremna razlika v kotah vode na morski in zaledni strani ($M_{\max;d} = 112,3$ kNm).

4 PREDLOG DODATNIH PREISKAV TAL

Kot smo zapisali že v točki 2 tega poročila, v zaledju obalnih konstrukcij ni podatkov o sestavi in lastnostih tal. Zato je treba najkasneje pred pričetkom gradnje izvesti dodatne preiskave tal, katerih cilj je pridobiti podatke o legi flišne podlage ter o debelini in kakovosti umetnih nasutij ter ostankov morskega mulja v zaledju načrtovane obalne konstrukcije. Predlagamo naslednji obseg preiskav tal:

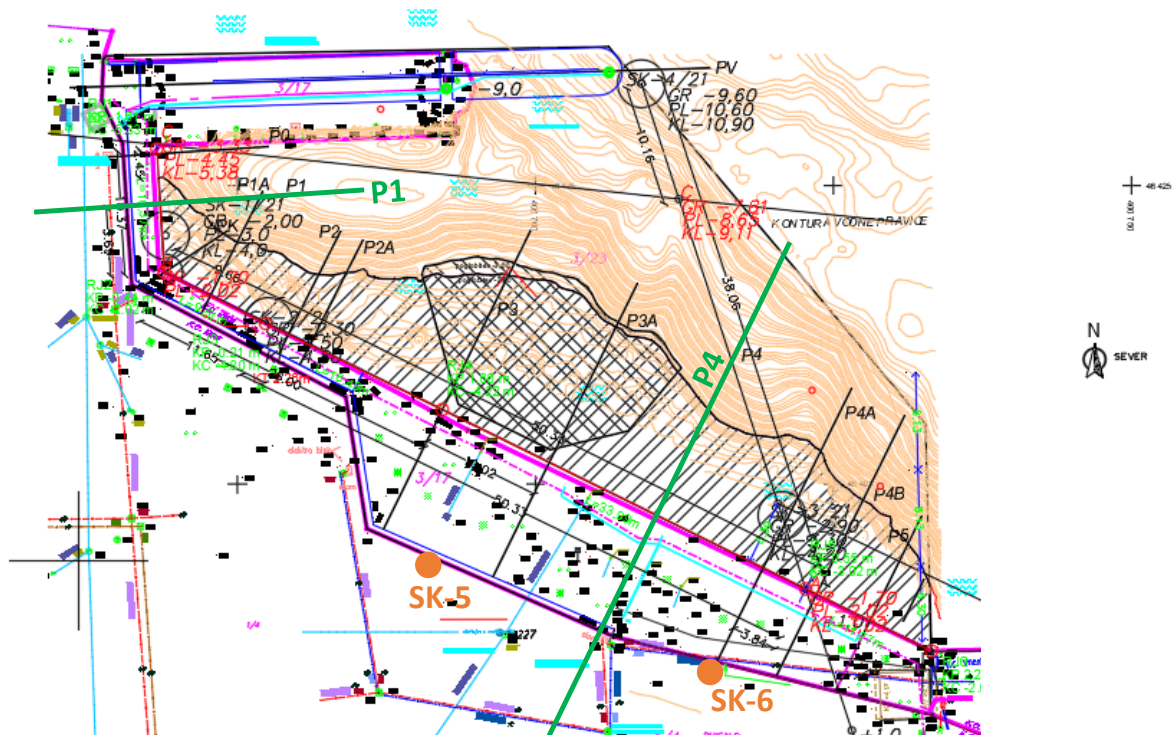
- Izvedba 2 vrtin (SK-5 in SK-6)
- Izvedba 2 CPT meritev (SK-5/CPT in SK-6/CPT)
- Izvedba laboratorijskih preiskav trdnosti in gostote

Lokaciji predlaganih preiskav sta prikazani na spodnji sliki 21. Izvedeta naj se neposredno v zaledju načrtovane AB ploščadi med profiloma P3 in P3A ter v profilu P4A.

Postopek: Najprej se prevrta utrjene površinske sloje tal (zgornji ustroj) debeline največ 1 m. Vrtino se zacevi in skozi cevitev izvede CPT meritev skozi sloj umetnega nasutja in morski mulj do preperelega fliša. Ko je dosežen odpor prevelik za nadaljnje penetriranje, se CPT sonda izvleče in na istem mestu nadaljuje z vrtanjem do take globine, da bo vrtina zaključena 1 m globoko v podlagi kompaktnega fliša. Enak postopek se ponovi na obeh lokacijah.

Obrazložitev: Potrebujemo tako zanesljiv podatek o legi flišnih plasti kot tudi mehanske lastnosti umetnega nasutja in morskega mulja. Mehanske lastnosti nasutja (relativna gostota in strižni kot) bomo dobro določili s CPTU meritvijo. Zanesljivo pa lege flišne podlage s CPTU meritvijo ne moremo določiti, saj se lahko zgodi, da bo večji kamen preprečil nadaljnjo penetracijo, kar bi lahko napačno tolmačili kot podlago. Zato naj se po izvedeni CPT meritvi še z vrtino potrdi globino do preperelega in kompaktnega fliša. Vrtalni stroj je v vsakem primeru potreben, ker izvedba CPT meritve s površine zaradi utrjenih površinskih plasti ni mogoča.

Laboratorij: Predvidi naj se odvzem dveh vzorcev umetnega nasutja in morske gline. Na njih se predvidi izvedba direktnega strižnega preizkusa (umetno nasutje) in nedrenirane strižne trdnosti (morski mulj). Odločitev o dejanski izvedbi teh preiskav se odloči glede na ugotovitve in rezultate terenskih preiskovalnih del.



Slika 21: Lokacije predlaganih dodatnih terenskih preiskav SK-5 in SK-6

5 ZAKLJUČEK

Izdelali smo računske geotehnične analize rekonstrukcije obale v območju načrtovanih priveznih mest za plovila URSP. Vzdolž načrtovane obale sta predvidena dva tipa konstrukcije. Prvi predvidi pilotno steno pred obstoječo kamnito obalno konstrukcijo, drugi pa AB ploščad na pilotih in strmo s skalometom varovano podvodno brežino pod ploščadjo.

Analize so pokazale, da je prvo območje z vidika globalne varnosti in obremenitev konstrukcijskih elementov neproblematična. AB ploščad na pilotih pa vključuje razmeroma tvegan začasen strm izkop, katerega stabilnost kasneje zagotavlja skalomet. Z računskimi analizami smo določili potrebno geometrijo skalometa in opozorili na potrebo po kampadni izvedbi skalometa.

Ugotovili smo tudi, da so obstoječi podatki o sestavi in lastnostih tal za načrtovan poseg nezadostni. Zato smo predlagali dodatne preiskave tal, ki jih je nujno izvesti pred gradnjo, še bolj pa čim prej.