

STABILNOST PODMORSKEGA ODKOPA

SLOPE STABILITY OF UNDERWATER EXCAVATION

GEZA VOGRINČIČ, univ. docent, Laboratorij za mehaniko tal IMFM

POVZETEK: V referatu so prikazani rezultati stabilnostnih analiz podmorskega odkopa, potrebnega pri gradnji večnamenskega terminala ob bazenu III v Luki Koper. Podmorska brežina je odkopana v nagibu 1 : 3, do globinske kote -12.00 m. Temeljna tla sestavljajo normalno konsolidirane recentne glinasto meljaste morske usededline, pretežno v lahko gnetnem do židkem konsistenčnem stanju. V stabilnostnih analizah, izvršenih z numerično uporabo lamelne metode s krožnimi potencialnimi porušnicami, so bile uporabljene na eni strani strižne značilnosti tal v nedreniranem stanju, ugotovljene s terenskimi preiskavami s krilno sondo, in na drugi strani strižne značilnosti, dobljene z laboratorijskimi preiskavami v rotacijskih strižnih aparatih. Zaradi obtežbe površja terena v zaledju z novo zgrajenim nasipom so upoštevani presežni porni tlaki različne intenzitete. Stabilnost odkopane brežine potrjuje realnost računsko dobljenih varnostnih količnikov.

SUMMARY: This paper presents the results of slope stability analyses of an underwater excavation at the site of many-sided terminal now under construction at the port of Koper. The subsoil consists of normally consolidated marine clayey-silty sediments of a very soft consistency. The stability analyses were performed using the method of slices programmed on computer. The undrained shear strength determined by vane shear tests in-situ and the shear strength parameters obtained from laboratory ring shear tests were taken into account. The excess pore pressures caused by embankment were also considered. The stability of already excavated slope proves the reality of calculated factors of safety.

UVOD

Luka Koper in Metalna MIO Maribor nameravata zgraditi večnamenski terminal za proizvodnjo izdelkov, vezanih na pomorski prevoz. Izbrana lokacija večnamenskega terminala leži v luki Koper, kot prikazuje slika 1, v zaledju bazena III proti vzhodu. Na severni strani omejuje področje večnamenskega terminala razbremenilni kanal, na vzhodni strani glavni melioracijski jarek in na južni strani površina Terminala za rzsute tovore v luki Koper. Na zemljišču predvidenem za izgradnjo terminala je potrebno pripraviti manipulativne površine in zgraditi infrastrukturne objekte za posamezno vrsto proizvodnje. Predviden razpored objektov, potrebnih predvsem za montažo kontejnerskih dvigal in rezervoarjev za utekočinjene tehnične pline, prikazuje slika 8.

Z geomehanskega vidika je v zvezi z izkopom akvatorija, pripravo nasipnega platoja in gradnjo objektov (montažne hale, nakladalne (RO-RO) rampe, navoza (rampe za splovitev), žerjavnih prog, delavniških in pomožnih prostorov) potrebno obravnavati predvsem naslednjo problematiko:

- posedanje platoja, stabilnost nasipnih brežin in določitev načina nasipavanja
- stabilnost obale s posebnim poudarkom na analizi stabilnosti brežin podmorskega odkopa
- plitvo in globoko (na koleh) temeljenje objektov.

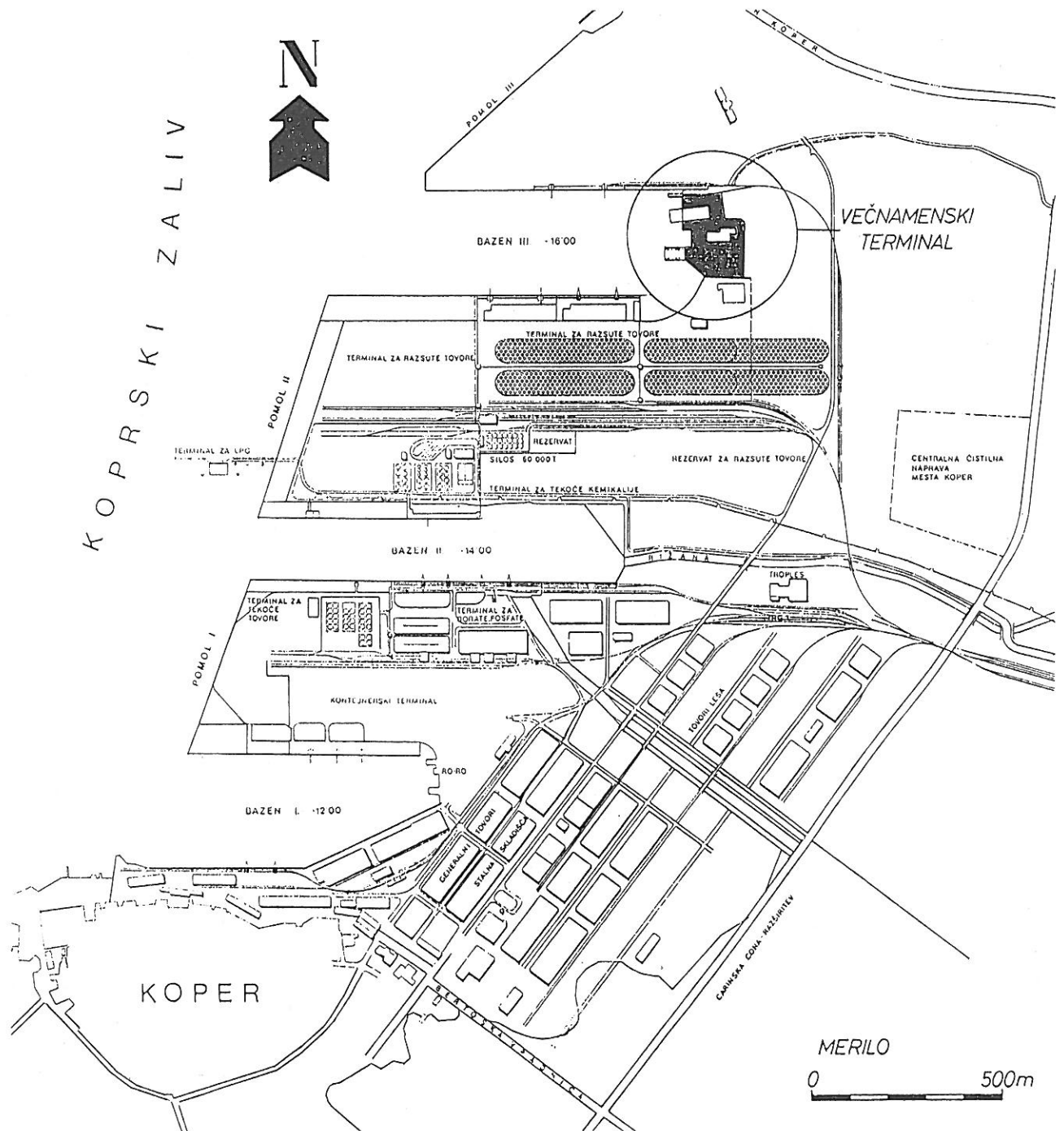
Do tega trenutka je bilo izvršeno nasipavanje platoja in izveden je bil podmorski odkop. Gradnja objektov se še ni pričela.

Ta prispevek obravnava le analizo stabilnosti podmorske brežine. Analiza posedanja platoja je popisana v referatu prof. Sovinca z naslovom Ocenitev začetnih usedkov morskih glinastih sedimentov, objavljenem v Zborniku referatov 1. strokovnega posvetovanja Slovenskega geotehničnega društva, Bled, september 1993.

TEMELJNA TLA IN GEOTEHNIČNE PREISKAVE

Glede na navedeno problematiko je Laboratorij za mehaniko tal Inštituta za matematiko, fiziko in mehaniko Univerze v Ljubljani (v nadaljevanju LMT) pripravil program terenskih in laboratorijskih geotehničnih preiskav tal. V skladu s tem programom je sondažna vrtnja (vključno s standardnimi penetracijskimi testi SPT in strižnimi preiskavami "in-situ" s krilno sondo) izvršil Geološki zavod Ljubljana - Inštitut za geologijo, geotehniko in geofiziko, preiskave s statičnim konusnim penetrometrom Gradis Ljubljana - Razvojno tehnološka enota in laboratorijske preiskave zemljin LMT. Slika 2 prikazuje zatečeno površje temeljnih tal, razpored desetih izvršenih klasičnih sondažnih vrtin (DM), šestih vrtin, v katerih so bile opravljene preiskave nedrenirane strižne trdnosti glinasto meljastih zemljin s krilno sondo (KDM), in situacijo šestih preiskav s statičnim konusnim penetrometrom (CDM). Na isto sliko je vrisana tudi predvidena končna kontura nasipnega platoja večnamenskega terminala. Laboratorijske preiskave so obsegale določitev AC klasifikacije, naravne vlažnosti, prostorninske teže, konsistenčnih mej, zrnivosti, enosne tlačne trdnosti, deformabilnosti, vodopropustnosti in strižne trdnosti. Skupno je bilo preiskanih 34 odvzetih neporušenih vzorcev zemljin.

Geotehnične preiskave so pokazale, da sestavljajo temeljna tla najprej plasti malonosilnih glinasto meljastih morskih sedimentov deloma v židkem, pretežno pa v lahko gnetnem konsistenčnem stanju in v večjih globinah v srednje do težko gnetnem stanju. Sledi plast flišne preperine (debeline okrog 1 m), ki prehaja v kompaktni, trdni fliš. Na osnovi sondažnih vrtin izrisana geotehnična karta (izdelek LMT) izohips trdne flišne podlage kaže, da se površje trdnega fliša polagoma dviga od kote okrog -27.00 m na skrajnem jugozahodnem delu področja večnamenskega terminala, do kote okrog -18.00 m na severovzhodnem delu. Laboratorijske preiskave glinasto meljastih zemljin so pokazale naslednje povprečne vrednosti: naravna vlažnost $w = 40 - 60\%$, prostorninska teža $\gamma = 16 - 19 kN/m^3$, meja židkosti $w = 62\%$, meja plastičnosti $w_p = 23.5\%$,

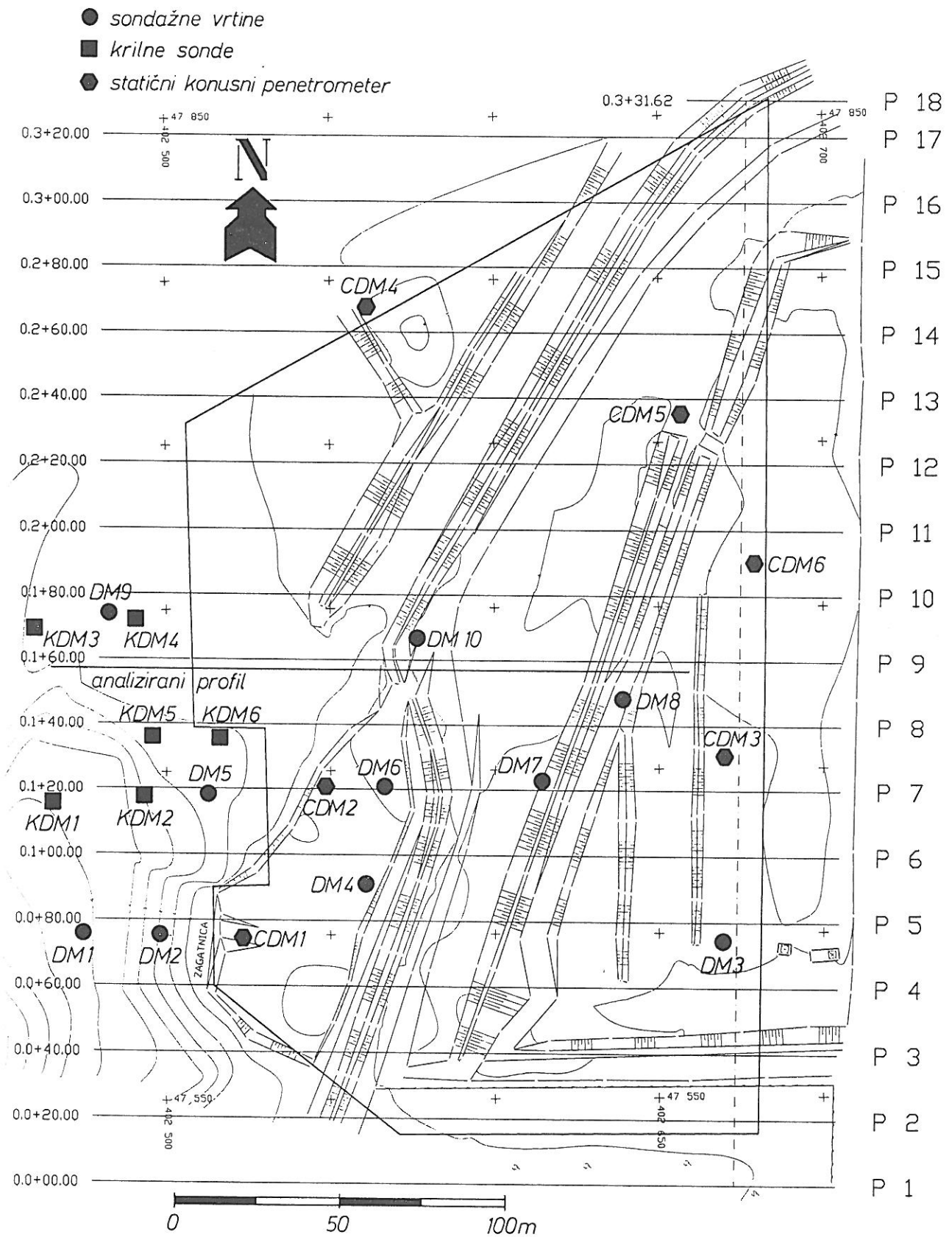


Slika 1. Situacija večnamenskega terminala v Luki Koper

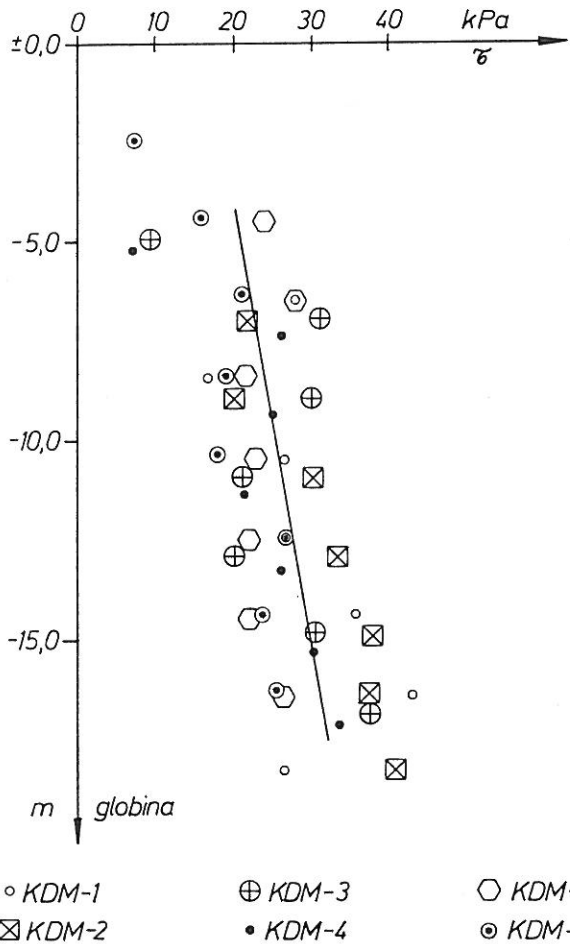
indeks plastičnosti $I_p = 38.5\%$ in indeks konsistence $I_c = 0.46$. Rezultate nedrenirane strižne trdnosti (vrhunske vrednosti), ugotovljene s krilno sondo "in-situ" v različnih vrtnah prikazuje slika 3. Nedrenirana strižna trdnost pri ponovnem prestrigu (rezidualna vrednost) je mnogo nižja, saj v izvršenih preiskavah na tem področju dosega le okrog 56% vrhunske vrednosti. Povprečno naraščanje nedrenirane strižne trdnosti z globino lahko aproksimiramo s premico vrisano na sliko 3, za katero velja v področju med kotama -5.00 in $-17.50m$ zakonitost $\tau_f = 16 + 0.97 z \dots$ (kPa),

globina z je izražena v m (merjeno od kote $0.00 m$ navzdol). Preiskave strižne trdnosti izvršene v rotacijskih strižnih aparatih in izražene s porušno premico po Coulombovem zakonu, kažejo naslednje sovisnosti:

za preiskano lahko gnetno glino $\tau_f = 2.6 + \sigma' \tan 20^\circ$,
 za meljasto glino $\tau_f = 3.3 + \sigma' \tan 26^\circ$,
 in za pretežno meljasto zemljino $\tau_f = 5.7 + \sigma' \tan 27.5^\circ$,
 (σ' in τ_f sta pri tem izražena v kPa).



Slika 2. Situacija začetnega stanja površja tal z vrisanim razporedom sondažnih vrtin, krilnih preizkusov in obrisom bodočega področja večnamenskega terminala



Slika 3. Vrhunske nedrenirane strižne trdnosti, ugotovljene s terenskimi preiskavami s križno sondno

STABILNOSTNE ANALIZE

Priprava potrebnega platoja na končni koti +3.00 m je zahtevala nasipavanje površja obstoječega terena, ki je bilo pretežno na koti -0.20 do -0.40 m, razen dela urejenega terena na jugu ob laguni Terminala za razsute tovore in dostopne ceste, ki je na koti do +1.00 m. Glede na malonosilne zemljine vrhnjih plasti je bila v LMT izvršena, še pred zaključkom vseh laboratorijskih

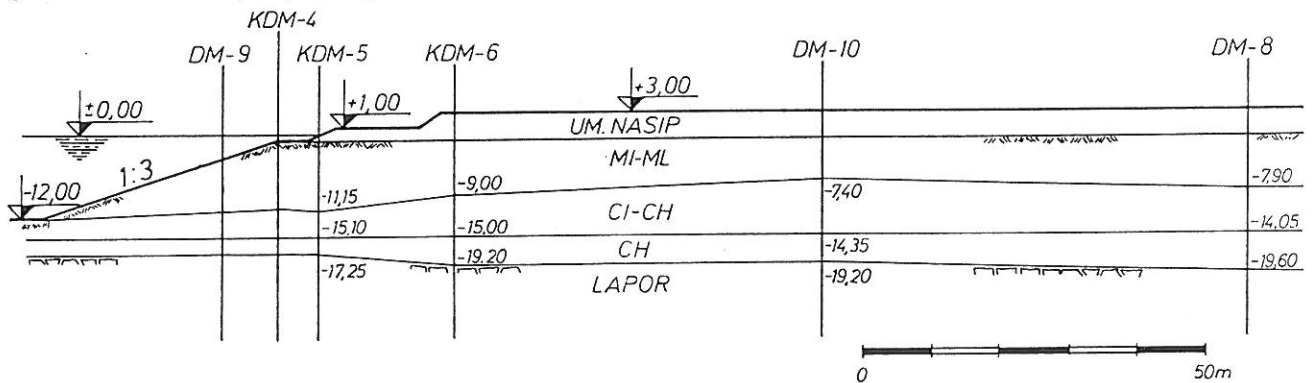
preiskav strižne trdnosti, preliminarna stabilnostna analiza (Sovinc, 1992), ki naj bi odgovorila na vprašanje, kakšni naj bodo nagibi nasipnih brežin in kako naj poteka nasipavanje, ne da bi prišlo do zdrsnitve temeljnih tal. Uporabljena je bila aproksimativna metoda za določitev nosilnosti omejeno debelih koherentnih plasti pod gibko obtežbo v obliki trapeznega in stopnjastega pasu, osnovana na modelnih raziskavah (Šuklje, 1967). Nasipavanje je potekalo postopoma po predpisanem časovnem načrtu in je bilo ves čas spremljano z meritvami posedanja površja nasutega terena. Na zapadnem delu nasipnega platoja v bližini podmorskega odkopa (pas širine 10 m) višina nasipa ne presega kote +1.00 m. Razbremenilni kanal je bil pred nasipavanjem prestavljen na skrajni severni rob platoja terminala.

Osrednji problem stabilnosti v dosednji fazi izgradnje terminala je predstavljala izvedba podmorskega odkopa do globinske kote -12.00 m. Glede na izkušnje, da je prišlo pod konstrukcijo I. pomola pri podmorskem odkopu do velikih drsnih premikov (Sovinc, 1981) je bila podrobna stabilnostna analiza tega odkopa potrebna. Kot kažejo izvedene vrtine je bila kota dna morja ob predvidenem robu nasipnega platoja med okrog -1.00 m (severni del) do okrog -6.00 m (južni del, vrtina DM2).

Za podrobno stabilnostno analizo je bil izbran kritični profil, katerega potek prikazuje slika 2. Slika 4 kaže prečni prerez vzdolž izbranega profila z vrisanim sestavom temeljnih tal, dobljenim s projiciranjem najbližjih vrtin. Analizirana je stabilnost končno izvedene podmorske brežine v projektiranem nagibu 1 : 3 in z upoštevanjem zalednega nasipnega platoja, ki je bil zgrajen v mesecih november in december 1992. Za stabilnostne analize (z variranjem različnih parametrov oziroma podatkov, skupno 1440 računov) smo uporabili numerično lamelno metodo (računalniški program "Bishop"). Obravnavane najverjetnejše krožne potencialne porušnice prikazuje slika 5. V stabilnostnih računih smo upoštevali pet različnih zemljskih plasti (M_1 do M_5) in tri različne vodostaje (V_1 do V_3), kar je prav tako razvidno s slike 5. Oznake plasti pomenijo:

- M_1 ... kamniti nasipni material t.j. odpadni kamnolomski material apnenčaste osnove s $\phi \leq 20$ cm in z ne več kot 20% frakcij s $\phi \leq 0.2$ mm
- M_2 ... temnosivi melj do glinasti melj (MI-ML) v židkem do lahko gnetnem konsistenčnem stanju
- M_3 ... siva mastna glina (CI-CH) židke konsistence
- M_4 ... siva mastna glina lahko gnetne konsistence
- M_5 ... sivozelena Japorasta glina, težko gnetna do poltrdna.

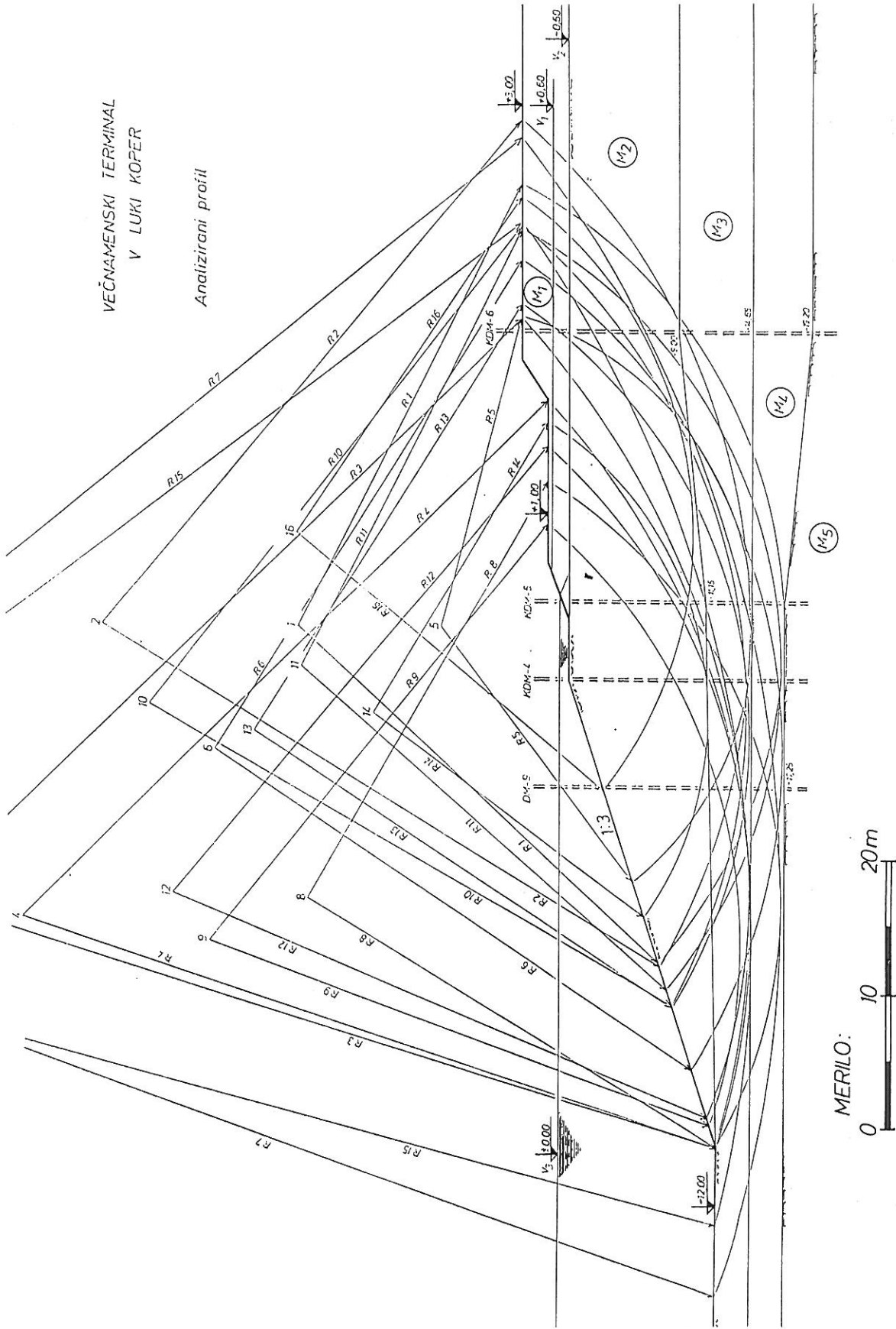
Vrednosti strižnih parametrov smo za glinasto meljaste zemljinske plasti variirali tako, da smo zajeli s preiskavami ugotovljene vred-



Slika 4. Prikaz analiziranega prečnega profila in sestave tal

VEČNAMENSKI TERMINAL
V LUKI KOPER

Analizirani profil

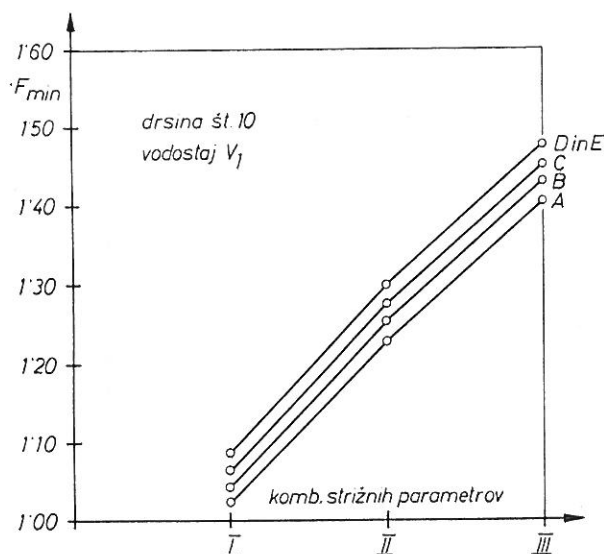


nosti. V treh kombinacijah (I, II, III) smo upoštevali kohezijske vrednosti $c_u \neq 0$ (nedrenirana strižna trdnost ob ničnem strižnem kotu $\varphi = 0$ in v treh kombinacijah (IV, V, VI) vrednosti strižnih kotov $\varphi' \neq 0$ ob nični koheziji $c' = 0$. Uporabljene vrednosti strižnih parametrov so za vseh šest kombinacij (od I do VI) prikazane v preglednici 1.

Preglednica 1. Upoštewane kombinacije značilnosti posameznih plasti

PLAST	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅	
Prostorninska teža:						
γ (kN/m ³)	21	18	17	18	19	
Strižni parametri:						
Kombinacija I	c_u (kPa)	0	16	21	22	80
	φ (°)	36	0	0	0	0
Kombinacija II	c_u (kPa)	0	18	26	30	80
	φ (°)	36	0	0	0	0
Kombinacija III	c_u (kPa)	0	20	30	38	80
	φ (°)	36	0	0	0	0
Kombinacija IV	c' (kPa)	0	0	0	0	0
	φ' (°)	36	24	16	18	26
Kombinacija V	c' (kPa)	0	0	0	0	0
	φ' (°)	36	26	18	20	26
Kombinacija VI	c' (kPa)	0	0	0	0	0
	φ' (°)	36	28	20	24	26

V stabilnostnih analizah, izvršenih s totalnimi napetostmi smo upoštevali v petih variantah (A do E) različni odstotek presežnih pornih tlakov glede na normalne navpične napetosti zaradi obtežbe terena s kamnitim nasipom. V varianti A smo upoštevali 100%,



Slika 6. Rezultati stabilnostnih analiz (najnižje vrednosti varnostnih količnikov F_{min} pri drsini št. 10, vodostaj V_1) za različne upoštewane kombinacije strižnih parametrov ($c_u \neq 0$, $\varphi = 0$)

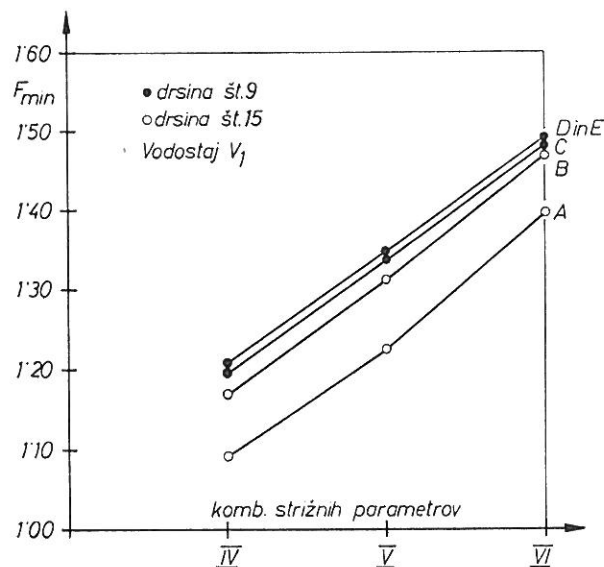
v varianti E pa nične presežne porne tlake. V vmesnih variantah smo odstotek presežnih pornih tlakov zniževali po 25%. Čeprav so vrednosti presežnih pornih tlakov zaradi obtežbe z nasipom v različnih točkah temeljnih tal različne smo v računih privzeli, da se intenziteta pornih tlakov spreminja le v horizontalni smeri pod nasipom, v skladu s spreminjanjem višine nasipa, po globini pa smo ohranjali enake vrednosti.

Iz množice dobljenih rezultatov opravljenih stabilnostnih računov povzemamo le najneugodnejše. Tako prikazujemo na sliki 6 v grafični obliki izračunane najmanjše vrednosti varnostnih količnikov F (najneugodnejša krožna drsina št. 10 in vodostaj V_1) v odvisnosti od uporabljenih strižnih značilnosti (kombinacije I, II in III, kjer je za glinasto meljaste materiale upoštevana nedrenirana strižna trdnost z vrednostjo kohezije $c_u \neq 0$ in $\varphi = 0$) in glede na variantno upoštevanje odstotnega deleža pornih tlakov (varianete A do E).

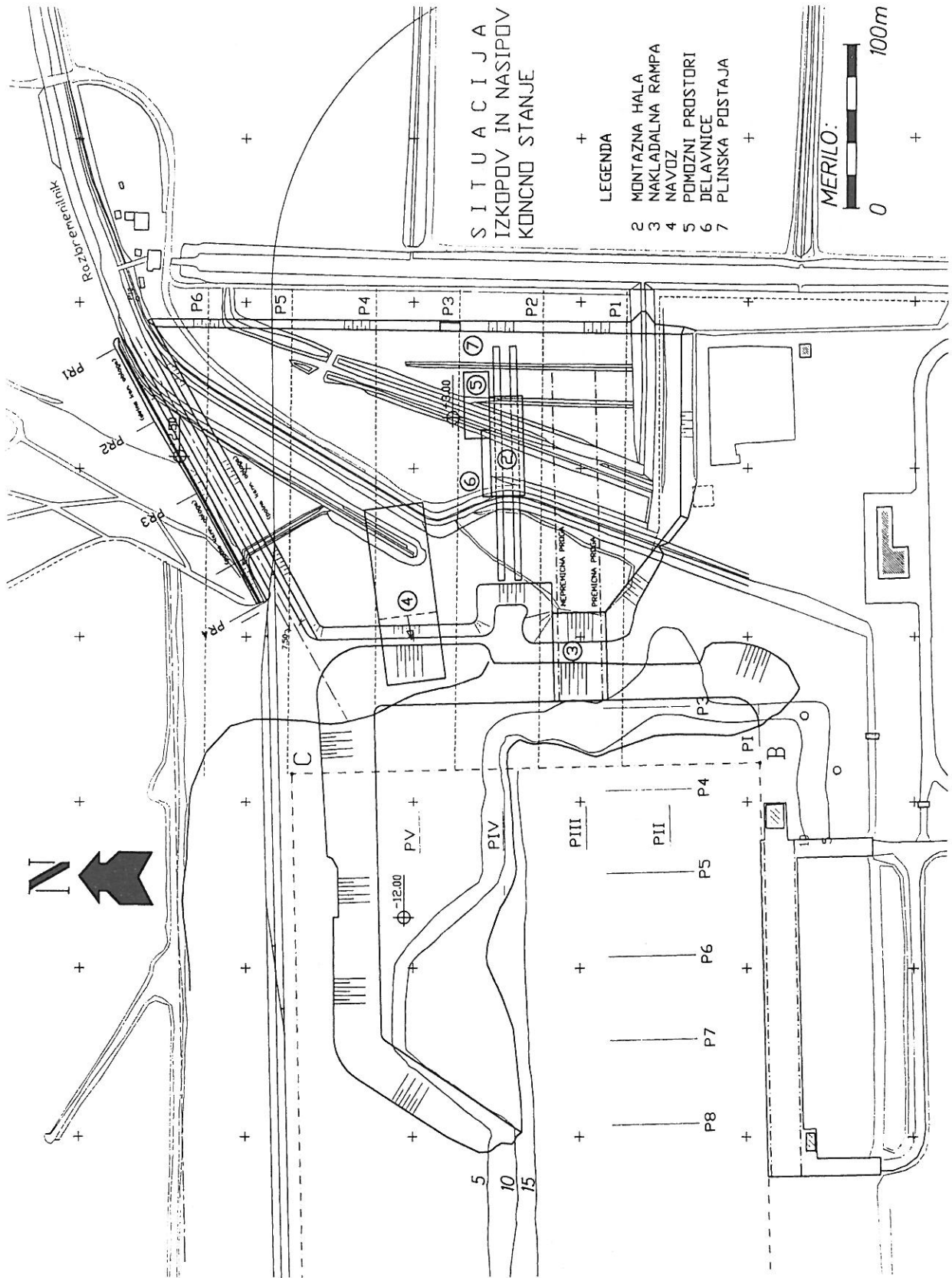
Podobno so na sliki 7 prikazani najmanjši ugotovljeni varnostni količniki F (za najneugodnejši drsini št. 9 oziroma št. 15 in najneugodnejši vodostaj V_1) v odvisnosti od uporabljenih kombinacij strižnih značilnosti (kombinacije IV, V in VI, kjer so za glinasto meljaste zemljine izbrane vrednosti $c' = 0$ in $\varphi' \neq 0$ glede na laboratorijske preiskave strižne trdnosti v rotacijskih strižnih aparatih.

ZAKLJUČEK

Izračunani varnostni količniki za analizirano podmorsko brežino kažejo, da daje stabilnostna naliza, ki upošteva za normalno konsolidirane glinasto meljaste morske sedimente nedrenirano kohezijsko strižno trdnost, preiskano s krilno sondo "in-situ" (kombinacija parametrov II oz. III), vrednosti med $F_{min} = 1.27$ in 1.45. Z rotacijskim strižnim aparatom ugotovljenim strižnim značilnostim glinasto meljastih zemljinskih vzorcev, najbolj ustrezajo v računih uporabljeni strižni parametri v kombinaciji V oziroma VI, ki izkazu-



Slika 7. Rezultati stabilnostnih analiz (najnižje vrednosti varnostnih količnikov F_{min} , drsini št. 9 oz. 15, vodostaj V_1) za različne upoštewane kombinacije strižnih parametrov ($c' = 0$, $\varphi' \neq 0$)



Slika 8. Predvidena končna situacija nasipov in izkopov z vrisanimi objekti večnamenskega terminala v Luki Koper

jejo kot najnižje vrednosti F_{min} med 1.32 in 1.48. Pri tem menimo, da je varianta A, v kateri so upoštevani 100% presežni porni tlaki glede na končno višino nasipa, najmanj realna, zaradi postopne gradnje nasipa.

Podmorski odkop je bil izvršen s hidravličnim bagrom (refulerjem) v času od oktobra 1992 do aprila 1993. Odkopavanje je potekalo postopoma v plasteh po 2 m vse do globine -12.00 m. Odkopana brežina je stabilna, čeprav so pregledi geodetskih posnetkov prečnih profilov po končanem odkopu pokazali, da so izvedeni nagibi marsikje strmejši od projektiranega in jih bo potrebno pri nadaljevanju del popraviti. To pa potrjuje realnost prej omenjenih izračunanih varnostnih količnikov.

ZAHVALA

Avtor se zahvaljuje Laboratoriju za mehaniko tal IMFM za pomoč pri izdelavi tega prispevka, Luki Koper in Vodnogospodarskemu inštitutu Ljubljana pa za uporabljeno dokumentacijo v zvezi z dosedanjo izgradnjo večnamenskega terminala.

LITERATURA

- Sovinc, I. (1981). Buckling of piles with initial curvature. Proc. of 10th Inter. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., Stockholm, Vol. 2, 851-856.
- Sovinc, I. (1992). Geomehansko strokovno mnenje o I. fazi gradnje terminala Metalne maribor v Luki Koper. Arhiv LMT, št. 1/39-92.
- Sovinc, I. (1992). Preliminarno poročilo o stabilnostnih analizah zapadnega dela večnamenskega terminala v Luki Koper. Arhiv LMT, št. 1/44-92.
- Sovinc, I. Vogrinčič, G. (1992). Poročilo o laboratorijskih preiskavah vzorcev zemljin, vzeti na lokaciji večnamenskega terminala v Luki Koper. Arhiv LMT, št. 1/45-92.
- Sovinc, I. (1993). Pregled prečnih profilov izkopa podmorskih tal na večnamenskem kovinskem terminalu v Luki Koper. Arhiv LMT, št. 1/7-93.
- Šuklje, L. (1967). Mehanika tal, Univerza v Ljubljani, Ljubljana.
- Vogrinčič, G. (1993). Strokovno mnenje o stabilnostnih analizah podmorskega odkopa na večnamenskem terminalu v Luki Koper. Arhiv LMT št. 1/3-93.