

## GEOTEHNIČKO RJEŠENJE VERTIKALNE OBALE NA LUČKOM PODRUČJU LUKE VUKOVAR

KREŠO IVANDIĆ<sup>1</sup>, FILIP DODIGOVIĆ<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Sveučilište u Zagrebu Geotehnički fakultet, Hallerova aleja 7, 42000 Varaždin, Hrvatska

### Sažetak

Luka Vukovar smještena je na 1335. km nizvodnog toka rijeke Dunav, na desnoj obali u duljini oko 850 m. Kao međunarodna luka na plovnom putu klase E-80, suočena je s rastućim zahtjevima riječnog prometa i potrebom za pouzdanom, dugoročno stabilnom obalnom infrastrukturom. Projekt „Vertikalna obala na lučkom području luke Vukovar“ obuhvaća izgradnju nove vertikalne obalne konstrukcije s uklopima uzvodno i nizvodno, privremenim radnim platoom za izvođenje radova te trajnom zaštitom dna vodotoka. Geotehnički projekt uključuje definiranje geotehničkog modela, izbor temeljne i potporne konstrukcije, provjeru stabilnosti privremenog platoa, te proračun mehaničke otpornosti i uporabljivosti sukladno Eurokodu 7. Cilj rada je sažeto prikazati geotehnički koncept vertikalne obale, tehničko rješenje privremenog platoa i ključne rezultate numeričkih i hidrauličkih analiza.

### Ključne riječi

Luka Vukovar, dijafragma, piloti, uzvodni i nizvodni uklop, numerička analiza, stabilnost, eksploatacija.

## 1 Uvod

Luka Vukovar predstavlja jedno od najznačajnijih riječnih prometnih čvorišta Republike Hrvatske na paneuropskom prometnom koridoru VII – Dunav. Smještena na desnoj obali Dunava, ona ima značajnu ulogu u međunarodnom robnom prometu, povezivanju riječnog, željezničkog i cestovnog prometa te gospodarskom razvoju istočne Hrvatske. U kontekstu modernizacije i povećanja kapaciteta lučke infrastrukture, planirana je izgradnja nove vertikalne obale koja omogućuje siguran pristanak plovila većih gabarita, učinkovit pretovar tereta i dugoročnu funkcionalnost lučkog prostora.

Projektiranje i izvedba vertikalnih obala na velikim rijekama predstavljaju složen inženjerski zadatak, osobito u uvjetima debelih aluvijalnih naslaga, visoke razine podzemne vode i promjenjivih hidrauličkih opterećenja. Takvi geotehnički uvjeti karakterizirani su izraženom heterogenošću tla, značajnim udjelom slabo nosivih i deformabilnih slojeva te snažnom interakcijom konstrukcije s vodotokom tijekom faze izvođenja i eksploatacije. Dodatnu složenost predstavlja potreba za osiguravanjem stabilnosti i uporabivosti konstrukcije u svim fazama gradnje, često uz primjenu privremenih hidrotehničkih mjera poput zaštitnih pera i nasipa.

Za razliku od klasičnih gravitacijskih ili plitko temeljenih obalnih konstrukcija, suvremena rješenja vertikalnih obala u aluvijalnim nanosima sve češće se oslanjaju na kombinirane sustave dubokog temeljenja. Takvi sustavi uključuju dijafragme, pilote, pilastere i sidrene elemente, čime se postiže povoljnija raspodjela opterećenja, kontrola deformacija i povećana sigurnost konstrukcije. Poseban naglasak pritom se stavlja na pravilno definiranje geotehničkog modela tla, odabir odgovarajuće koncepcije temeljenja te na razmatranje faznosti izvođenja kao sastavnog dijela geotehničkog proračuna.

Cilj ovoga rada jest prikazati geotehničko rješenje vertikalne obale na lučkom području luke Vukovar, s naglaskom na koncepciju temeljenja i interakciju konstrukcije s tlom u složenim aluvijalnim uvjetima. Rad se temelji na glavnom geotehničkom projektu, a projektna dokumentacija interpretira s aspekta inženjerske logike i primjenjivosti rješenja, a ne kao puki opis projektantskih detalja. Posebna pozornost posvećena je obrazloženju odabira konstrukcijskog sustava, ulozi pojedinih elemenata temeljenja te načinu na koji je faznost izvođenja integrirana u cjelokupno geotehničko rješenje.

## 2 Geotehnički uvjeti lokacije

Područje zahvata smješteno je na desnoj obali rijeke Dunav, unutar postojećeg i planiranog lučkog područja luke Vukovar. Prostorni obuhvat zahvata prikazan je na Slici 1, gdje je vidljivo da se nova vertikalna obala proteže uz postojeću obalnu liniju u zoni intenzivnog lučkog korištenja. Lokacija se nalazi u području tipičnih aluvijalnih naslaga velikih nizinskih rijeka, formiranih dugotrajnim sedimentacijskim procesima u promjenjivim hidrauličkim uvjetima.

Geotehnički uvjeti lokacije definirani su na temelju opsežnih ranijih i dopunskih istražnih radova, uključujući istražno bušenje, in situ penetracijska ispitivanja (CPTU, DMT), geofizička mjerenja te laboratorijska ispitivanja uzoraka tla. Na osnovi interpretacije dostupnih podataka izrađen je geotehnički model tla, koji predstavlja osnovu za projektiranje temeljne konstrukcije vertikalne obale.

### 2.1 Uslojenost temeljnog tla

Karakteristični geotehnički profil lokacije prikazan je na Slici 2. Tlo je izraženo slojevito, s jasno uočenim izmjenama različitih litoloških članova, tipičnih za aluvijalno okruženje Dunava. U površinskoj zoni prisutan je sloj nasipa i antropogenih materijala promjenjivih debljina, koji je nastao tijekom dugogodišnjeg korištenja i dogradnje lučkog područja. Ovaj sloj karakterizira neujednačen sastav i nepovoljna mehanička svojstva, zbog čega se u projektiranju ne uzima kao nosivi sloj.

Ispod površinskog nasipa slijede slojevi pijeska i šljunka, pretežno srednje do dobro zbijeni, koji lokalno pokazuju povoljnija nosiva svojstva, ali i značajnu varijabilnost u pogledu granulometrijskog sastava i zbijenosti. Ovi slojevi predstavljaju važnu komponentu u prijenosu opterećenja s konstrukcije na dublje dijelove temeljnog tla, ali sami po sebi nisu dostatni za prihvatanje cjelokupnog opterećenja vertikalne obale.

U dubljim zonama profila prisutni su slojevi glina i praporovitih materijala, umjerene do veće stišljivosti, koji predstavljaju geotehnički najosjetljiviji dio profila. Upravo ovi slojevi uvjetuju potrebu za dubokim temeljenjem i kontrolom deformacija, jer bi plitko temeljenje u takvim uvjetima rezultiralo neprihvatljivim slijeganjima i dugotrajnim deformacijama konstrukcije.

### 2.2 Hidrološki i hidrogeološki uvjeti

Hidrološki uvjeti lokacije izravno su povezani s režimom vodostaja rijeke Dunav, koji se tijekom godine znatno mijenja. Razina podzemne vode nalazi se u izravnoj hidrauličkoj vezi s rijekom te se u pravilu stabilizira na relativno malim dubinama ispod površine terena. Opisani uvjeti značajno utječu na izbor tehnologije izvođenja, osobito u fazama iskopa i izvedbe temeljnih elemenata.

Visoka razina podzemne vode, u kombinaciji s propusnim pijesko-šljunkovitim slojevima, nameće potrebu za osiguravanjem stabilnosti iskopa i kontrolom prodora vode tijekom gradnje. Zbog toga su u projektu predviđene privremene hidrotehničke mjere, poput zaštitnog pera i privremenog nasipa, koje omogućuju izvođenje temeljne konstrukcije u kontroliranim uvjetima.

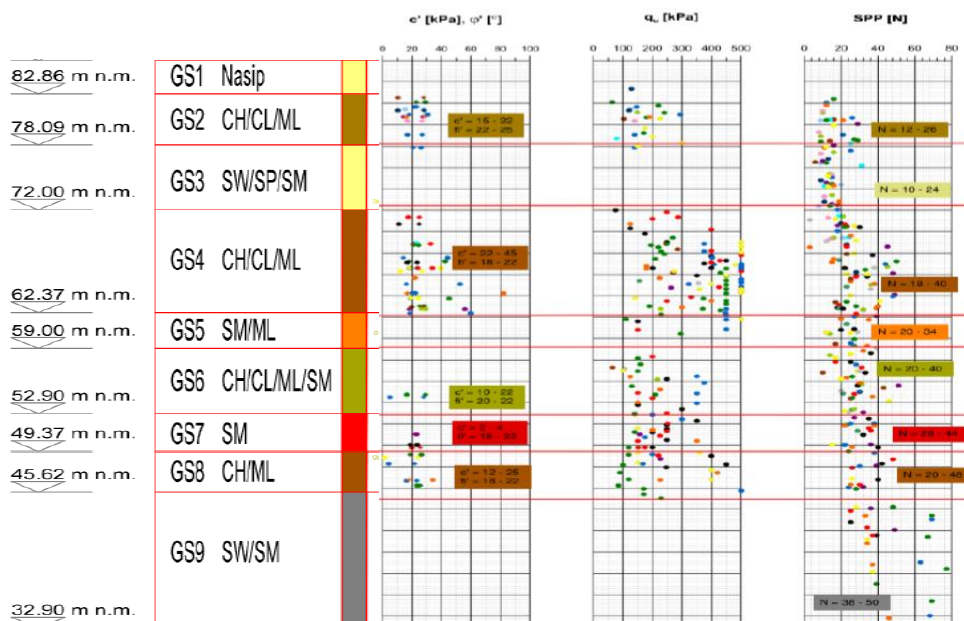
### 2.3 Projektno relevantne geotehničke zadaće

Iz perspektive projektiranja vertikalne obale, ključni geotehnički problemi lokacije mogu se sažeti u nekoliko temeljnih točaka: izražena slojevitost i heterogenost tla, prisutnost slabo nosivih i deformabilnih glinovitim slojeva u dubini, visoka razina podzemne vode te snažna interakcija konstrukcije s vodotokom tijekom svih faza izvođenja. „Takva rješenja, osobito plitko temeljene ili gravitacijske obalne konstrukcije, ocijenjena su nepovoljnima prvenstveno zbog očekivanih neprihvatljivih slijeganja i dugotrajnih deformacija u dubljim glinovitim slojevima, otežane kontrole stabilnosti u uvjetima visoke razine podzemne vode te potrebe da se sigurnost osigura u svim fazama izvođenja uz primjenu privremenih hidrotehničkih mjera.

Opisani geotehnički uvjeti predstavljali su polazište za razvoj koncepcije temeljenja vertikalne obale, koja je detaljno razrađena u sljedećem poglavlju, uz naglasak na prijenos opterećenja, kontrolu deformacija i dugoročnu stabilnost konstrukcije.



Slika 1. Situacija vertikalne obale



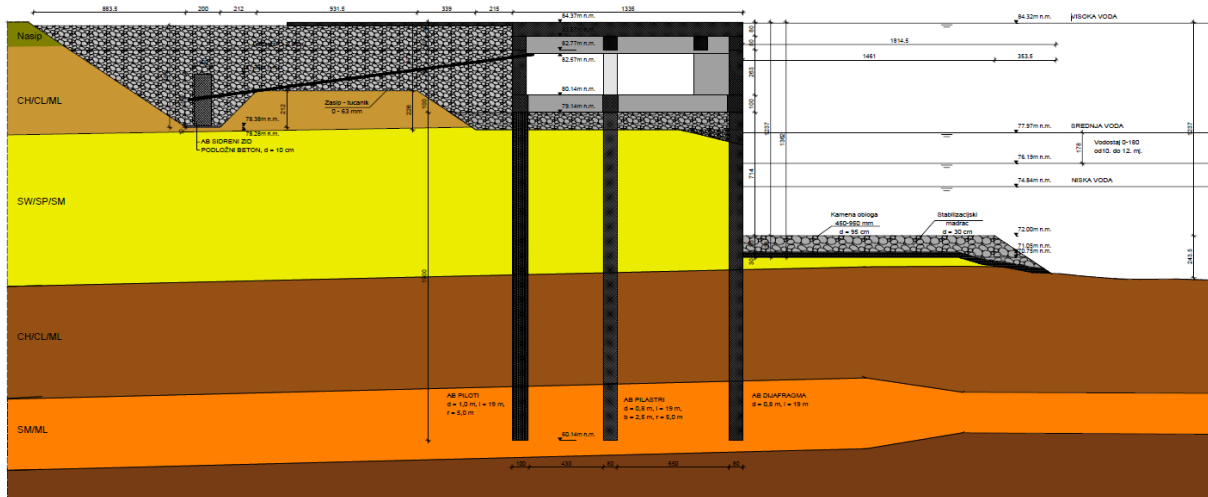
Slika 2. Geotehnički profil s rezultatima istražnih radova.

### 3 Konceptija geotehničkog rješenja vertikalne obale

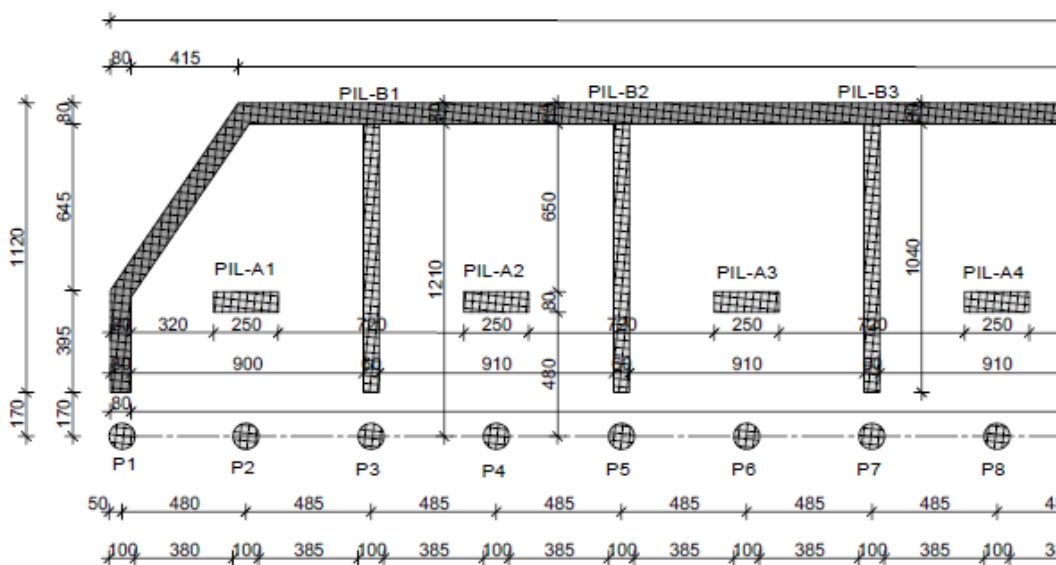
Projektirana vertikalna obala na lučkom području luke Vukovar koncipirana je kao složena armiranobetonska konstrukcija temeljena na kombiniranom sustavu dubokog temeljenja. Odabrano rješenje rezultat je prilagodbe nepovoljnim geotehničkim uvjetima lokacije, ograničenjima prostora u postojećem lučkom području te zahtjevima za dugoročnom stabilnošću i uporabivošću konstrukcije. Osnovni cilj usvojene koncepcije temeljenja jest siguran prijenos opterećenja s nadzemne konstrukcije na dublje, povoljnije slojeve tla uz istodobnu kontrolu deformacija i pomaka obalne linije.

#### 3.1 Opći opis konstrukcijskog sustava

Vertikalna obala projektirana je kao kontinuirana armiranobetonska konstrukcija, podijeljena dilatacijama na više konstruktivnih cjelina. Karakteristični poprečni presjek konstrukcije u fazi eksploatacije prikazan je na Slici 3, dok je tlocrtna dispozicija temeljnih elemenata prikazana na Slici 4. U konstruktivnom smislu, obala se sastoji od nadtemeljnog dijela, koji osigurava funkcionalnost lučke površine, te temeljne konstrukcije, koja ima ključnu ulogu u osiguranju stabilnosti i nosivosti.



Slika 3. Karakteristični poprečni presjek vertikalne obale.



Slika 4. Tlocrtna dispozicija elemenata nosive konstrukcije.

Temeljna konstrukcija sastoji se od kontinuirane armiranobetonske dijafragme uz obalnu liniju, kompoziciji pilota i pilastera u zaleđu, te sustava čeličnih zatega sa sidrenim zidom. Takva kombinacija elemenata omogućuje povoljan statički i deformacijski odgovor konstrukcije u uvjetima visokih bočnih opterećenja od djelovanja tla i vode, kao i u fazama izvođenja kada su opterećenja i rubni uvjeti izrazito nepovoljni.

### 3.2 Elementi nosivog sklopa

Armiranobetonska dijafragma, smještena uz liniju obale, predstavlja primarni nosivi element u kontaktu s rijekom. Njezina uloga nije ograničena samo na preuzimanje bočnih tlakova tla i vode, već i na osiguravanje globalne stabilnosti obalne konstrukcije. Dijafragma je temeljena na značajnoj dubini, čime se omogućuje prijenos opterećenja ispod zone najnepovoljnijih, deformabilnih slojeva tla.

Piloti i pilasteri, raspoređeni u zaleđu dijafragme, imaju dvojaku funkciju. S jedne strane sudjeluju u prijenosu vertikalnih opterećenja s nadtemeljnog dijela konstrukcije, a s druge strane djeluju kao dodatni stabilizacijski elementi koji povećavaju krutost cijelog sustava. Njihov raspored i međusobna povezanost s dijafragmom omogućuju redistribuciju opterećenja i smanjenje koncentracija naprezanja u temeljnom tlu.

Posebno važan element koncepcije temeljenja čini sustav čeličnih zatega, usidrenih u zaleđu konstrukcije pomoću armiranobetonskog sidrenog zida. Aktivacijom zatega postiže se znatno smanjenje horizontalnih pomaka dijafragme, čime se izravno poboljšava deformacijsko ponašanje cijele obalne konstrukcije. Sustav zatega omogućuje da se dio bočnih opterećenja prenese dublje u zaleđe, izvan zone neposrednog utjecaja rijeke.

U projektnoj koncepciji zatege nisu promatrane kao sekundarni ili pomoćni elementi, već kao integralni dio nosivog sustava. Njihova uloga posebno dolazi do izražaja u dugoročnom ponašanju konstrukcije, gdje kontrola pomaka ima presudnu važnost za uporabivost lučke obale

### 3.3 Interakcija konstrukcije i tla

Usvojena koncepcija temeljenja temelji se na jasnom razumijevanju interakcije konstrukcije i tla. Umjesto oslanjanja na jedan dominantan nosivi element, projektom je predviđen sustav u kojem više elemenata zajednički sudjeluje u prijenosu opterećenja. Takav pristup omogućuje veću robusnost sustava i smanjuje osjetljivost konstrukcije na lokalne nepovoljne geotehničke uvjete. Ovakav koncept posebno je pogodan za aluvijalne sredine, u kojima su heterogenost tla i promjenjivi hidrološki uvjeti dominantni čimbenici u projektiranju.

Geotehnički uvjeti lokacije definirani su na temelju opsežnih ranijih i dopunskih istražnih radova, uključujući istražno bušenje, in situ penetracijska ispitivanja (CPTU, DMT), geofizička mjerenja te laboratorijska ispitivanja uzoraka tla. Na osnovi interpretacije dostupnih podataka izrađen je geotehnički model tla, prikazan na Slici 2, koji predstavlja osnovu za projektiranje temeljne konstrukcije vertikalne obale.

## 4 Faznost izvođenja i interakcija tlo–konstrukcija

Faznost izvođenja predstavlja jedan od ključnih aspekata geotehničkog rješenja vertikalne obale na lučkom području luke Vukovar. Zbog nepovoljnih geotehničkih i hidroloških uvjeta, kao i zbog potrebe za izvođenjem radova u neposrednoj blizini aktivnog vodotoka, konstrukcija nije mogla biti promatrana isključivo u konačnom, eksploatacijskom stanju. Naprotiv, pojedine faze izvođenja predstavljaju kritične situacije u pogledu stabilnosti i deformacijskog ponašanja, koje su imale presudan utjecaj na odabir koncepcije temeljenja. Projektom je predviđena fazna izvedba, u kojoj se geotehnička sigurnost osigurava kombinacijom privremenih hidrotehničkih mjera, dubokih temeljnih elemenata i postupne aktivacije nosivog sustava.

#### **4.1 Privremene hidrotehničke mjere i priprema gradilišta**

Početna faza izvođenja obuhvaća formiranje privremenih hidrotehničkih objekata, čija je svrha osigurati stabilne i kontrolirane uvjete za izvođenje temeljne konstrukcije. U tu svrhu projektom je predviđena izgradnja privremenog zaštitnog pera i privremenog nasipa uz obalnu liniju, čime se omogućuje formiranje radnog platoa i izvođenje iskopa u relativno suhim uvjetima.

U ovoj fazi interakcija između tla, vode i privremenih konstrukcija izrazito je naglašena. Privremeni nasip preuzima dio hidrauličkog opterećenja rijeke, dok zaštitno pero smanjuje utjecaj strujanja i erozije dna. Stabilnost ovih privremenih struktura projektirana je tako da osigura dovoljnu razinu sigurnosti tijekom cijelog trajanja izvođenja temeljnih radova.

#### **4.2 Izvedba dijafragme i dubokih temeljnih elemenata**

Nakon uspostave sigurnih radnih uvjeta pristupa se izvođenju kontinuirane armiranobetonske dijafragme, koja predstavlja temeljni nosivi element u kontaktu s rijekom. Izvedba dijafragme u ovoj fazi ima dvostruku ulogu: osim što čini dio konačne konstrukcije, ona već tijekom izvođenja preuzima značajan dio bočnih opterećenja od tla i vode. Paralelno s izvedbom dijafragme izvode se piloti i pilasteri u zaleđu konstrukcije. Iako u ovoj fazi još nisu u potpunosti aktivirani u konačnom statičkom sustavu, ovi elementi već doprinose povećanju ukupne krutosti temeljnog sklopa i smanjenju deformacija. Interakcija tla i konstrukcije u ovoj fazi izrazito je nelinearna, jer se rubni uvjeti postupno mijenjaju s napredovanjem radova.

#### **4.3 Aktivacija sustava zatega i prijelaz u konačno stanje**

Nakon izvedbe osnovnih temeljnih elemenata i nadtemeljnog dijela konstrukcije pristupa se ugradnji i napinjanju čeličnih zatega. Aktivacijom zatega dolazi do značajne promjene u statičkom i deformacijskom ponašanju cijelog sustava. Horizontalni pomaci dijafragme se smanjuju, a dio bočnih opterećenja prenosi se na sidreni zid u zaleđu, čime se rasterećuje zona neposrednog kontakta s rijekom.

Ova faza predstavlja prijelaz iz privremenog u trajno stanje konstrukcije. Uklanjanjem privremenog nasipa i zaštitnog pera, opterećenja od vode i tla ponovno se uspostavljaju u konačnom obliku, ali sada u uvjetima u kojima je nosivi sustav u potpunosti aktiviran. Takav redoslijed izvođenja omogućuje kontrolirano ponašanje konstrukcije i izbjegavanje nepovoljnih deformacija koje bi mogle nastati u slučaju jednokratnog opterećivanja.

#### **4.4 Geotehnički aspekti interakcije tlo–konstrukcija**

Kroz sve faze izvođenja naglašena je interakcija između konstrukcije i temeljnog tla. Umjesto promatranja konstrukcije kao krutog tijela, projektom je usvojen pristup u kojem se ponašanje tla i konstrukcije razmatra zajednički. Time je omogućeno realno sagledavanje deformacijskih mehanizama i pravodobno prepoznavanje kritičnih faza.

Posebna pozornost posvećena je kontroli horizontalnih pomaka, slijeganja i rotacija konstrukcije, kako u fazi gradnje, tako i u eksploataciji. Za verifikaciju projektnih pretpostavki najvažnijima se smatraju horizontalni pomaci dijafragme i obalne konstrukcije, apsolutni vertikalni i horizontalni pomaci geodetskih točaka te slijeganja i deformacije tla uz dijafragmu mjerene inklinometrima i deformetrima.

### **5 Proračunski koncept i rezultati**

Geotehnički proračun vertikalne obale na lučkom području luke Vukovar proveden je u skladu s načelima Eurokoda 7, uz razmatranje relevantnih graničnih stanja nosivosti i uporabivosti. Zbog složenosti

konstrukcijskog sustava i nepovoljnih geotehničkih uvjeta, proračun nije bio usmjeren isključivo na provjeru pojedinih elemenata, već na cjelokupno ponašanje sustava tlo–konstrukcija u različitim fazama izvođenja i eksploatacije.

### 5.1 Proračunski pristup i granična stanja

U projektiranju su razmatrana granična stanja nosivosti (GEO i STR) te granična stanja uporabivosti (SLS). Posebna pozornost posvećena je provjeri globalne stabilnosti sustava, otpornosti na bočna opterećenja od tla i vode te kontroli deformacija koje su od presudne važnosti za funkcionalnost lučke obale.

Proračuni su provedeni uz jasno razdvajanje faze izvođenja i faze eksploatacije. Tijekom izvođenja, kritične situacije povezane su s privremenim hidrotehničkim mjerama i djelomično aktiviranim nosivim sustavom, dok je u konačnom stanju naglasak stavljen na dugoročno deformacijsko ponašanje konstrukcije. Takav pristup omogućio je realno sagledavanje najnepovoljnijih kombinacija opterećenja i rubnih uvjeta.

Jedan od ključnih rezultata proračuna odnosi se na deformacijsko ponašanje dijafragme i cijelog temeljnog sklopa. Analize su pokazale da bi, bez primjene sustava zatega, horizontalni pomaci obalne konstrukcije bili znatno veći i u nekim fazama neprihvatljivi s aspekta uporabivosti. Uvođenjem zatega postiže se znatno povećanje krutosti sustava te povoljnija raspodjela bočnih opterećenja.

Rezultati proračuna potvrđuju da usvojena koncepcija temeljenja osigurava dostatnu razinu sigurnosti u pogledu nosivosti i stabilnosti, kako u fazi gradnje, tako i tijekom eksploatacije. Kombinacija dijafragme, pilota, pilastera i zatega rezultira robusnim sustavom koji je manje osjetljiv na lokalne nepovoljne geotehničke uvjete i varijabilnost parametara tla.

Takav sustav omogućuje redistribuciju opterećenja u slučaju lokalnih odstupanja od projektnih pretpostavki, što je posebno važno u aluvijalnim sredinama. Proračunski rezultati ukazuju na to da je dugoročno ponašanje konstrukcije kontrolirano i da se očekivani pomaci i slijeganja nalaze unutar prihvatljivih granica.

## 6 Zaključak

U radu je prikazano geotehničko rješenje vertikalne obale na lučkom području luke Vukovar, projektirano u složenim uvjetima aluvijalnih naslaga, visoke razine podzemne vode i snažne interakcije s vodotokom. Analizirani geotehnički uvjeti lokacije jasno su pokazali da primjena konvencionalnih rješenja temeljenja ne bi mogla osigurati zadovoljavajuću razinu sigurnosti i uporabivosti, osobito u pogledu dugoročnog deformacijskog ponašanja konstrukcije.

Usvojena koncepcija temeljenja, temeljena na kombinaciji armiranobetonske dijafragme, pilota, pilastera i sustava zatega, omogućuje povoljan prijenos opterećenja na dublje slojeve tla te učinkovitu kontrolu horizontalnih pomaka i slijeganja. Posebna vrijednost rješenja očituje se u njegovoj robusnosti, odnosno sposobnosti sustava da redistribuira opterećenja i zadrži stabilnost i u uvjetima lokalnih nepovoljnosti temeljnog tla.

Naglašena faznost izvođenja pokazala se ključnim elementom geotehničkog koncepta. Uvođenjem privremenih hidrotehničkih mjera i postupnom aktivacijom nosivog sustava osigurana je stabilnost konstrukcije tijekom svih faza gradnje, što je osobito važno za izvođenje radova u neposrednoj blizini aktivnog vodotoka. Takav pristup potvrđuje važnost integriranog razmatranja konstrukcije, tla i faznosti izvođenja već u ranim fazama projektiranja.

Prikazano geotehničko rješenje ima širu primjenjivost na slične projekte vertikalnih obala u aluvijalnim sredinama velikih rijeka, gdje su heterogenost tla i hidrološka ograničenja dominantni čimbenici. Iskustva stečena na projektu luke Vukovar potvrđuju da suvremeni pristupi dubokom temeljenju, u kombinaciji s pažljivo razrađenom faznošću izvođenja i sustavom tehničkog promatranja, predstavljaju pouzdanu osnovu za dugoročnu sigurnost i funkcionalnost lučkih obalnih konstrukcija.

## Literatura

Geoekspert d.o.o. (2007) Zbirno izvješće o geotehničkim istražnim radovima, Luka Vukovar. Geotehničko izvješće. Zagreb, Hrvatska.

Hrvatski zavod za norme (2011) HRN EN 1990:2011 Eurokod – Osnove projektiranja konstrukcija. Zagreb: Hrvatski zavod za norme.

Hrvatski zavod za norme (2012) HRN EN 1997-1:2012 Eurokod 7 – Geotehničko projektiranje – 1. dio: Opća pravila. Zagreb: Hrvatski zavod za norme.

Institut IGH d.d. (2014) Geotehničko izvješće, Obnova luke Vukovar – Nova luka Istok. Zagreb, Hrvatska.

Institut IGH d.d. (2022) Geotehnički elaborat, Vertikalna obala na lučkom području luke Vukovar. Zagreb, Hrvatska.