

Primljen / Received: 1.9.2022.

Ispravljen / Corrected: 26.10.2022.

Prihvaćen / Accepted: 18.11.2022.

Dostupno online / Available online: 10.12.2022.

# Produbljivanje morskog dna za potrebe izgradnje LNG terminala na otoku Krku

## Autori:

Izv.prof.dr.sc. **Leo Matešić**, dipl.ing.građ.

Geokon-Zagreb d.d.

Sveučilište u Rijeci

Građevinski fakultet

[Leo.Matesic@geokon.hr](mailto:Leo.Matesic@geokon.hr)Prof.emer.dr.sc. **Čedomir Benac**, dipl.ing.geol.

Sveučilište u Rijeci

Građevinski fakultet

[cbenac@gradri.uniri.hr](mailto:cbenac@gradri.uniri.hr)

Autor za korespondenciju



Josip Prcela, dipl.ing.građ.

Pomgrad Inženjering d.o.o., Split

[josip.prcela@strabag.com](mailto:josip.prcela@strabag.com)

Andrea Tadić, mag. ing. aedif.

Sveučilište u Rijeci

Građevinski fakultet

[andrea.tadic@uniri.hr](mailto:andrea.tadic@uniri.hr)

Stručni rad

**Leo Matešić, Čedomir Benac, Josip Prcela, Andrea Tadić**

## Produbljivanje morskog dna za potrebe izgradnje LNG terminala na otoku Krku

Kod Omišlja na otoku Krku, gdje je predviđena izgradnja pristaništa za ukapljeni plin, hidrografskim mjerenjima ustanovljene su tri pličine na dubinama 13,5 i 13,6 m. Zbog sigurnosti plovidbe, morsko dno je moralo biti dublje od 15,4 m. Pomoću hidroakustičkih metoda istraživanja i autonomne ronilice ustanovljena je geološka građa morskog dna. Plićine su oblikovane u čvrstoj karbonatnoj stijenskoj masi. Primijenjena je posebna tehnologija iskopa bez miniranja. Iskopano je 11.000 m<sup>3</sup> stijenske mase koja je deponirana u blizini. Izmijenjeno je stanište površine oko 12.500 m<sup>2</sup>.

### Ključne riječi:

morsko dno, iskop, nasipavanje, karbonatna stijena, Riječki zaljev, Jadransko more

Professional paper

**Leo Matešić, Čedomir Benac, Josip Prcela, Andrea Tadić**

## Deepening of the seabed for the construction of the LNG terminal on the island of Krk

Near Omišalj on the island of Krk, where the construction of a pier for liquefied gas is planned, hydrographic measurements revealed three shoals at depths of 13.5 and 13.6 metres. For the safety of navigation, the seabed had to be deeper than 15.4 m. The geological fabric of the seabed was determined using a hydroacoustic survey and remote operating vehicle. Shallows are formed in a solid carbonate rock mass. Special technology of excavation without blasting was applied. 11,000 m<sup>3</sup> of rock mass was excavated which was deposited nearby. The seabed habitat with an area of about 12,500 m<sup>2</sup> was changed.

### Key words:

seabed, excavation, fill, carbonate rock, Rijeka Bay, Adriatic Sea

## 1. Uvod

Obalne građevine obično su vrlo skupe, a tip konstrukcije jako zavisi od prirodnih značajki lokacije, među njima od geološke građe i posljedično od geotehničkih značajki morskog dna [1, 2]. Posljednjih desetljeća u svijetu su znatno uznapredovale metode istraživanja podmorja posebice zbog razvoja *offshore* konstrukcija [3, 4]. Poboļšane su metode istraživačkog bušenja plitkog seizmičkog profiliranja (delta-t-V tomografija). Posebno je napredovala upotreba hidroakustičkih metoda mjerenja. Upotrebom višefrekventnog dubinomjera (*Multibeam*) moguće je brzo i precizno izmjeriti reljef podmorja. Pomoću panoramskog dubinomjera (*Side Scan Sonar*) moguće je precizno razlučiti stjenovito dno od površine pokrivena sedimentima. Profiliranjem pomoću strukturno-geološkog dubinomjera (*Sub Bottom Profiler*) može se ustanoviti reljef osnovne stijene pokriven sedimentima, kao i debljina tih sedimenata. Prva mjerenja morskog dna uporabom modernih hidroakustičkih metoda obavljena su na području hrvatskog dijela Jadranskog mora 1994. godine primjenom tada nove GPS tehnike pozicioniranja [5].

Priobalni jadranski pojas Republike Hrvatske specifičan je po tome što je većim dijelom potopljeni krš [6], a obalne linije otoka Krka poprimile su svoj današnji oblik prije otprilike šest tisućljeća [7]. Osim fenomena specifičnih za krš na kopnu kao što su ponikve, ponori i fosilne doline, na zapadnoj obali otoka Krka moguće je i na metarskim razmacima naići na dvije izrazito različite geotehničke sredine: čvrstu stijensku masu i žitki mulj [8, 9].

U širem području Riječkog zaljeva, kao i u rubnim akvatorijima: Bakarskom i Omišaljskom zaljevu, izgrađeno je više vrlo složenih obalnih građevina [10-12]. Pokazalo se da je geološka građa i posljedično geotehnički uvjeti vrlo različiti i često vrlo složeni [13-15]. Zbog najčešće vrlo strmog nagiba morskog dna, obalne građevine imaju složene armiranobetonske konstrukcije ili su izgrađene na prethodno formiranom nasipu [16]. Značajnije obalne građevine koje su izgrađene u posljednja dva desetljeća,

nisu do sada opisane u znanstveno-stručnoj literaturi. Produblivanje morskog dna iskopom stijenske mase metodom miniranja u području Kvarnera, obavljeno je sedamdesetih godina 20. stoljeća prilikom izgradnje Krčkog mosta i obale ispred nekadašnjeg petrokemijskog postrojenja DINA kod Omišlja na otoku Krku. U 21. stoljeću tom metodom izvršeno je produblivanje ulaza u Puntarsku dragu na otoku Krku.

Poznato je da se ispred postojećeg pristaništa kod uvala Sepen nalaze tri pličine koje su bile označene signalnim plutačama. Njihov položaj jasno je vidljiv i na karti mjerila 1:25.000 [17] (slika 1.).

Te pličine su predstavljale opasnost za plovidbu projektom predviđenih brodova/tankera. Gaz projektiranog broda za ukapljeni plin iznosi 12 m, pa je minimalna dubina dna trebala biti 14,40 m zbog sigurnog manevriranja [18]. Istraživanjima je ustanovljeno da će trebati iskopati velike količine od 11.000 m<sup>3</sup> čvrste karbonatne stijenske mase i odložiti oko 15.000 m<sup>3</sup> iskopanog materijala u rastresitom stanju. To je svakako jedno od najvećih podvodnih iskopa u čvrstoj stijenskoj masi na području teritorijalnog mora Republike Hrvatske. Budući da nije bilo dopušteno miniranje, primijenjene su inovativne tehnike mehaničkog iskopa koje su opisane u ovom radu.

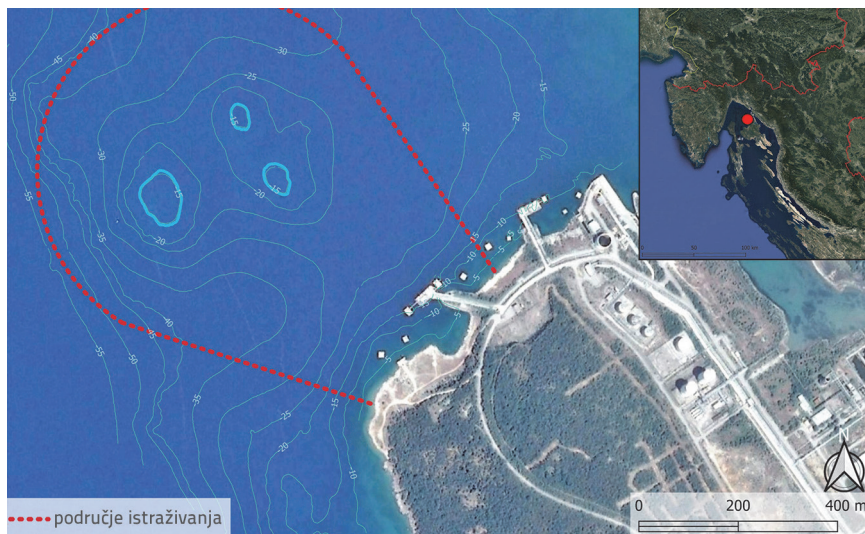
## 2. Mjerenja i istraživanja

Istraživanja za planirani pristan budućeg terminala za ukapljeni plin (eng. *liquefied natural gas* – LNG), koji se nalazi na zapadnoj obali Krka, obavljena su tijekom zime i proljeća 2016. na temelju prethodno izrađenog programa istraživanja za razinu glavnog projekta. Zbog saznanja da se u akvatoriju nalaze pličine koje bi mogle biti opasne za plovidbu planiranih brodova koji će prevoziti ukapljeni plin, istraživanjem je obuhvaćeno i relativno veliko područje (slika 1.).

Budući da nije postojala detaljna geodetska karta morskog dna, točnosti potrebne za izradu glavnog projekta, u program istraživačkih radova uvrštena su i geodetska mjerenja. Osim toga, obavljena su i hidroarheološka istraživanja, jer se u

blizini nalaze ostaci kasnoantičkog naselja Fulfinium kao i srednjovjekovne sakralne građevine [19]. Hidrografskim mjerenjima ustanovljena su tri podmorska uzvišenja, oblikovana u relativno čvrstoj karbonatnoj stijenskoj masi. Najblići dijelovi tih uzvišenja bili su na dubinama 13,5 m do 13,6 m [20].

U akvatoriju ispred budućeg pristana LNG terminala istraživanja su obavljena u dvije faze. U prvoj fazi su obavljena hidroakustička mjerenja i inženjerske geološke kartiranja. Svrha tih istraživanja bila je dobiti dovoljno točan reljef podmorja i ustanoviti geološku građu. U drugoj fazi obavljeno je istražno bušenje na morskome dnu i laboratorijska obrada uzoraka radi određivanja optimalne metode iskopa.



Slika 1. Plićine ispred postojećeg pristaništa i prikaz morskog dna obuhvaćenog istraživanjem

## 2.1. Hidrografska mjerenja

Obavljena su sljedeća mjerenja u istraženom akvatoriju [20]:

- mjerenje dubine dna pomoću višefrekventnog dubinomjera (*Multibeam*)
- mjerenje panoramskim dubinomjerom (*Side Scan Sonar*)
- mjerenje strukturno-geološkim dubinomjerom (*Sub Bottom Profiler*).

Višefrekventni dubinomjer korišten je za precizno mjerenje reljefa podmorja. Pomoću panoramskog dubinomjera bilo je moguće razlučiti zone stjenovitog dna od zona gdje se na površini nalaze pjeskoviti sedimenti. Profiliranjem pomoću strukturno-geološkog dubinomjera ustanovljen je reljef osnovne stijene pokriven sedimentima, kao i debljina tih sedimenata.

Neposredno prije hidrografskog mjerenja izvedeno je uobičajeno mjerenje vertikalnih profila brzine prostiranja zvuka do dubine od 30 m radi kasnije korekcije rezultata mjerenja. Osim toga, obavljen je i uobičajen pregled dna pomoću magnetometra, kako bi se otkrili mogući veći metalni predmeti.

Plovidba se odvijala po unaprijed planiranim profilima. Početna i završna točka, te centralne linije pretraživanja okomito na obalnu liniju određene su geografskim koordinatama na sferoidu GRS 80 i Gauss-Kruegerovoj projekciji (Transvezal Mercator), a dubine su svedene na novu hrvatsku geodetsku nulu HVRS 71.

U svrhu kvalitetnog i stalnog pozicioniranja te vođenja navigacije tijekom hidrografsko-geološko-magnetometrijske izmjere, upotrebljavana su dva sustava za precizno pozicioniranje koja su radila paralelno: DGPS-1 (SeaSTAR 8200 HP sustav DGPS – Fugro) sa satelitskim telemetrijskim sustavom i DGPS-2 (Hemisphere GPS Crescent VS110 DGPS + Heading Receiver GPS, Beacon SBAS) s telemetrijskim sustavom također preko

satelita. DGPS-1 je bio primarni, DGPS-2 sekundarni navigacijski sustav. Točnost mjerenja bila je 10 cm.

Korištenjem programskih paketa Hrvatskog hidrografskog instituta (HIDRIS, HYDR Opro, AutoCAD 2002, ZWCAD 2010 i dr.) obrađeni su izmjereni podaci, obavljeno je filtriranje pogrešaka te je obavljeno crtanje karte dubina s izobatama dna i mrežom koordinata u zadanom mjerilu 1:2.000, a priobalni dio, gdje je planirana izgradnja nove obalne konstrukcije, izrađen je u mjerilu 1:500. Batimetrijske karte usklađene su s geodetskim mjerenjem obalne crte i kopnenog dijela područja budućeg LNG terminala u sustavu HTRS 96/TM [21].

Na temelju rezultata mjerenja dubina ustanovljeno je da je reljef dna vrlo razveden. Precizno je određen položaj i oblik triju podmorskih uzvišenja čiji su najbliži dijelovi na dubini 13,6 m na pličinama br.1 i 2, kao i 13,5 na pličini 3, prema HVRS 71 (slika 2.).

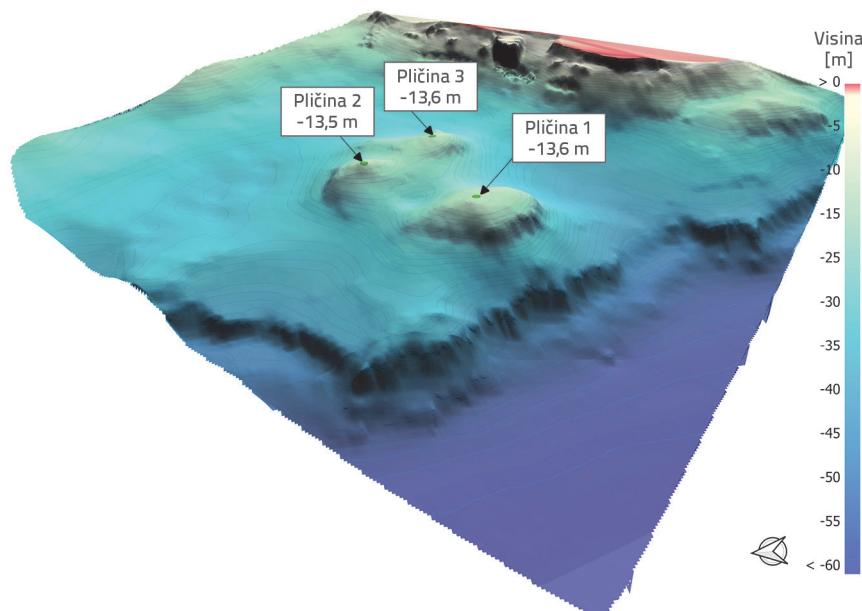
Pretraživanje akvatorija panoramskim dubinomjerom (*Side Scan Sonar*) obavljeno je na osam paralelnih profila približne međusobne udaljenosti 100 m (okomito na obalu) te na dva paralelna profila međusobne udaljenosti 50 m (paralelno s obalom). Ustanovljeno je da su izdanci stijenske mase vidljivi na pličinama, a dublji dijelovi akvatorija su pokriveni pjeskovitim sedimentima.

Pomoću strukturno-geološkog dubinomjera snimljena su četiri paralelna profila. Oscilator tog uređaja bio je tegljen po krmi broda i uronjen oko 0,5 m ispod površine, a iza oscilatora također su tegljeni hidrofonu na dubini 0,2 m. Radna frekvencija radi bolje penetracije iznosila je od 1,5 kHz do 4 kHz., a snaga emisije bila je 200 J. Maksimalna moguća dubina penetracije ultrazvučnih valova kroz sedimente bila je 18 m.

## 2.2. Inženjerskegeološko kartiranje

Nakon izrade radne verzije geodetske karte podmorja, kao i pregleda rezultata snimanja pomoću panoramskog dubinomjera i strukturno-geološkog dubinomjera određena je ruta pregleda pomoću daljinski upravljane ronilice (eng. *Remotely Operated Vehicle* – ROV) (slika 3.).

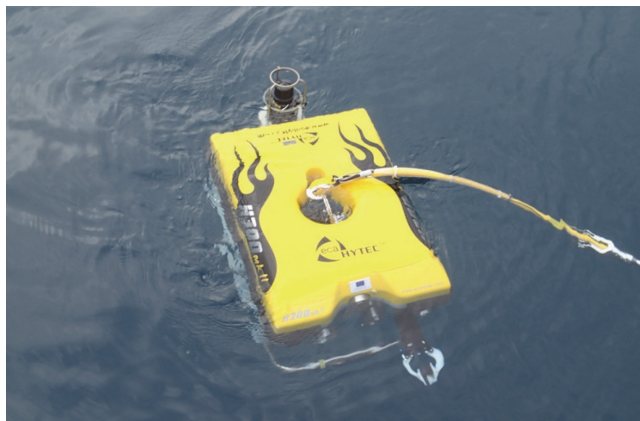
Ta ronilica je tijekom snimanja bila pozicionirana upotrebom Tracking ORE LXT sustava. Na tom uređaju bio je instaliran davač signala (transmitter) koji u komunikaciji s prijnikom svake dvije sekunde daje podatke nužne za izračunavanje njene pozicije. Ronilicom su detaljno pregledani oni dijelovi istraženog akvatorija koji su se pokazali zanimljivim nakon preliminarne analize mjerenja dubina, kao i snimanja pomoću panoramskog i geološko-strukturnog dubinomjera



Slika 2. Trodimenzionalni prikaz reljefa podmorja, prema [20]



[20]. To su bila već opisana podmorska uzvišenja kao i priobalni dio gdje je predviđena izgradnja nove obalne konstrukcije.



Slika 3. Daljinski upravljana ronilica (ROV) (foto: Č. Benac)

Tijekom pregleda morskog dna obavljeno je kontinuirano videosnimanje, a na pojedinim mjestima i fotografiranje. Upotrebom odgovarajućeg računalnog programa na monitoru na brodu Hidra bio je vidljiv položaj ronilice u geografskim koordinatama kao i međusobni položaj broda i tog uređaja. Također se moglo pratiti videosnimanje u realnom vremenu. Cijeli sustav je bio povezan s primarnom i sekundarnom navigacijom broda.

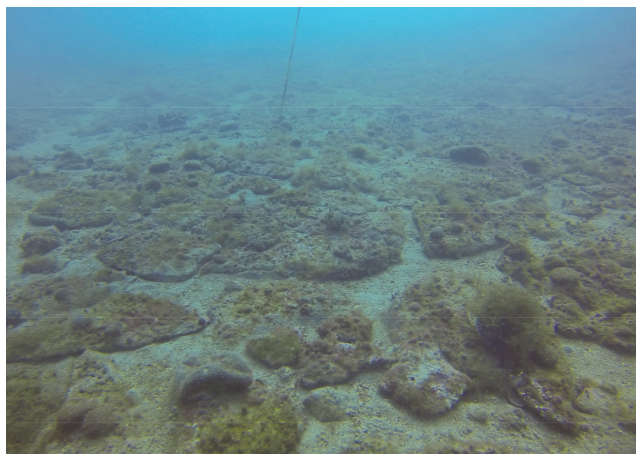
Nakon toga, ciljano je obavljen pregled dijelova podmorja pomoću opreme za autonomno ronjenje. Ustanovljeno je da su pličine pretežito stjenovite građe, odnosno izdanci osnovne karbonatne stijene vidljivi su na površini. Pregledani dijelovi podmorja su fotografirani. Na udubljenjima između pličina osnovna stijena je pokrivena pjeskovitim sedimentima debljine nekoliko metara (slike 4. i 5.).



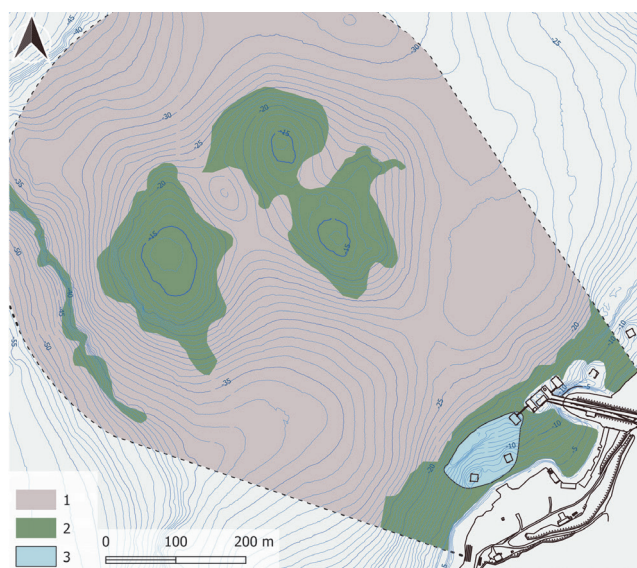
Slika 4. Izdanci osnovne karbonatne stijene na pličini 1 (foto: Č. Benac)

Na temelju rezultata pregleda podmorja pomoću autonomne ronilice i geološkog kartiranja, napravljena je geološka karta u mjerilu nove batimetrijske karte 1:2.000. Izdanci osnovne

karbonatne stijene vidljivi su na dvije izolirane zone. Jedna zona obuhvaća pličinu br. 1, a druga pličine br. 2 i 3 (slika 6.).



Slika 5. Izdanci osnovne karbonatne stijene na pličini 3 (foto: Č. Benac)



Slika 6. Inženjerskogeološka karta pomorskog dijela LNG terminala, prema [22]: 1 – marinski sedimenti (pijesak i prah), 2 – karbonatna stijena vidljiva na morskom dnu, 3 – nasip (kršje i blokovi)

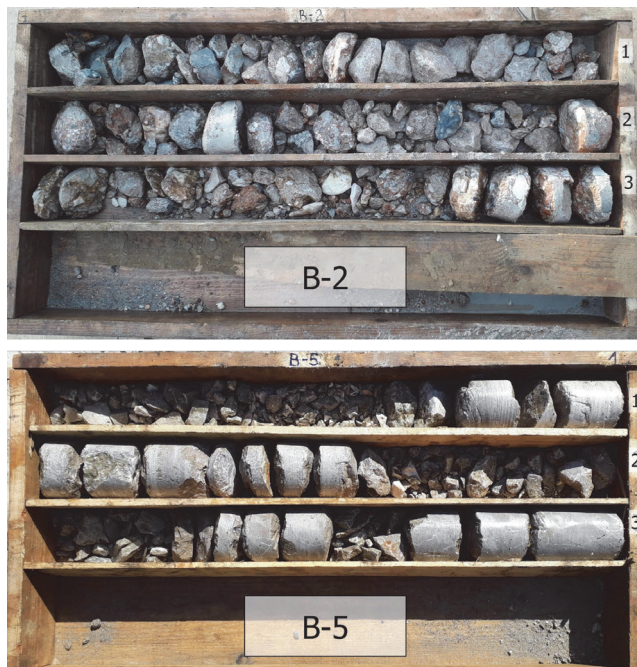
Na temelju korelacije s geološkom građom obližnjeg kopna moglo se zaključiti da se karbonatna stijenska masa sastoji od tri litogenetska člana. To su dolomitični vapnenci i breče gornje krede ( $K_2^{1,2}$ ), rudistni vapnenci gornje krede ( $K_2^{2,3}$ ) i paleogenske vapnenačke breče ( $E_3O_1$ ) [23]. Budući da nije bilo predviđeno vađenje uzoraka stijenske mase, geološke granice među navedenim litostratigrafskim članovima nije bilo moguće odrediti. Na izdancima je bilo vidljivo da je stijenska masa mjestimično je izrazito ispucana i okršena. Na temelju rezultata prethodnih istraživanja bilo je poznato da intenzivna okršenost seže nekoliko desetaka metara ispod razine mora [24].



### 2.3. Naknadna geotehnička istraživanja

Tijekom produbljanja dna obavljeno je istražno bušenje i laboratorijska analiza uzoraka. Istražno bušenje izvedeno je s ploveće platforme. Način bušenja bio je rotacijski s kontinuiranim jezgrovanjem. Profil bušenja bio je 101 mm. Na pličini br.1. izvedene su četiri bušotine (BH-1, 2, 3, 4), na pličini br. 2. dvije bušotine (BH-5, 6), a na pličini br. 3 nije obavljeno bušenje (slika 7). Dubina bušotina bila je 3 m u osnovnu stijensku masu. Na temelju obavljene inženjerskogeološke klasifikacije ustanovljena su tri litogenetska tipa stijena: paleogenske vapnenačke breče, dolomitični vapnenci i breče kao i rudistni vapnenci gornje krede [25]. Takvi litostratigrafski tipovi vidljivi su i na obližnjem kopnu [22, 23].

Na šest uzoraka stijene iz jezgre odabrane iz svake bušotine obavljena su laboratorijska ispitivanja [25]. Gustoća u suhom stanju ispitana je na dva uzorka. Iznosila je 2,65 g/cm<sup>3</sup> (BH-1) i 2,58 g/cm<sup>3</sup> (BH-2). Metodom *Point Load Testa* (PLS) provedeno je ispitivanje čvrstoće stijene na jezgrama iz bušotina BH-1 do BH-5. Preračunana vrijednost jednoosne tlačne čvrstoće iznosila je USC = 70,5 – 86,5 MPa. Na jezgri iz bušotine BH-6 provedeno je standardno ispitivanje jednoosne tlačne čvrstoće, a dobivena vrijednost bila je USC = 54 MPa. To su uobičajene vrijednosti za karbonate stijene na području Riječkog zaljeva [8].



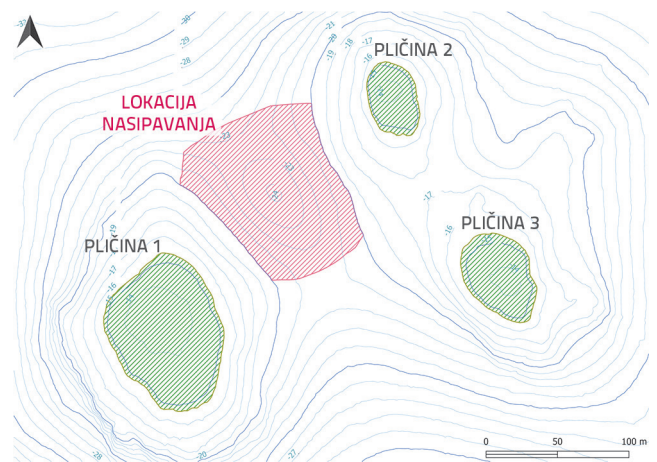
Slika 7. Fotografije bušotina (B-2 na pličini 1 i B-5 na pličini 2) [25]

### 3. Iskopavanje i nasipavanje

Na temelju Maritimne studije određeno je da bi dubina dna trebala biti 14,40 m zbog sigurnog manevriranja broda [18]. Uzimajući u obzir očekivane nepravilnosti koje se događaju prilikom iskopa i nasipavanja u inženjerskoj praksi, kao i moguću

dugoročnu sedimentaciju čestica zbog djelovanja valova i strujanja morske vode, konačno je određeno da minimalna dubina treba biti 15,0 m. Radi usklađivanja geodetskih podloga kopnenih i pomorskih građevina, na projektu je određeno da se visinske kote izražavaju u sustavu HVRS71. Budući da razlika između geodetskih karata u sustavu HVRS71 i hidrografske nule iznosi 32,2 cm [21], usvojeno je da minimalna kota morskog dna treba biti -15,40 m [27].

Nakon što su ucrtane konture iskopa na kartu izobata mjerila 1:2.000, pokazalo se da će najviše iskopa biti na pličini 1, a najmanje na pličini 2. Ukupni izračunani volumen iskopa na sve tri pličine iznosio je 8.500 m<sup>3</sup>. S obzirom na očekivane uvjete rada i nepreciznost izvedbe podmorskog iskopa, procijenjen iznos volumena iskopa bio je oko 11.000 m<sup>3</sup>, od čega na lokaciji pličine 1 čak 7.500 m<sup>3</sup>. Projektom je određeno da će se iskopani materijal nasipati u dovoljno velikoj depresiji između pličina. Procijenjeni ukupni volumen nasipa iznosio je oko 15.000 m<sup>3</sup> (slika 8.).



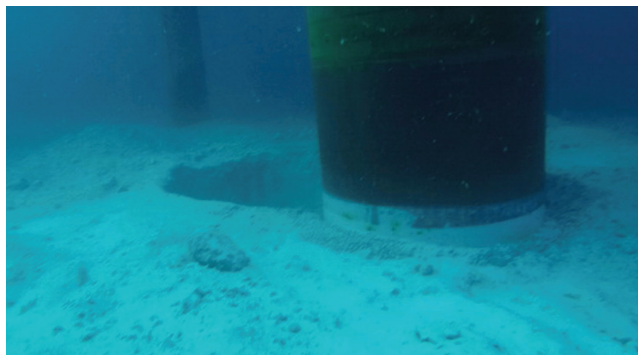
Slika 8. Lokacije iskopa i nasipavanja, prema [27]

Na temelju inženjerskogeološke karte, napravljene na geodetskoj karti mjerila 1:2.000 ustanovljeno je da će se iskopi radi produbljanja morskog dna do dubine 15,4 m prema HVRS 71 obavljati u čvrstoj karbonatnoj stijenskoj masi (slika 6.).

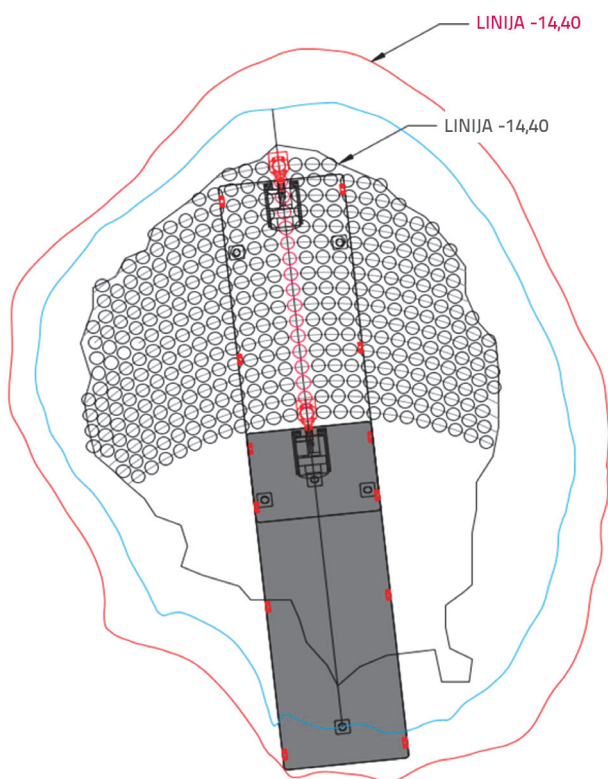


Slika 9. Plovila na lokaciji pličine 1 [28]

U fazi pripreme izvršeno je obilježavanje akvatorija instaliranjem privremene pomorske signalizacije, a zatim je obavljeno geodetsko označavanje područja iskopa i nasipavanja, kao i pozicioniranje plovila. Radovi su planirani tako da se iskop obavi na jednoj pličini. Nakon postizanja projektirane dubine sva plovila s opremom će biti premještena na sljedeću lokaciju (slika 9.).



Slika 10. Iskop pomoću bušilice [28]



Slika 11. Prikaz iskopa metodom bušenja na pličini 1, prema [28]

Budući da iskop stijenske mase upotrebom eksploziva nije bio dopušten, na temelju rezultata obavljenog istražnog bušenja i laboratorijskih analiza uzoraka, što je opisano u poglavlju 2.3., razrađena je metodologija iskopa klasičnim načinom razbijanja i iskopa stijenske mase pomoću pneumatskog čekića, teškog

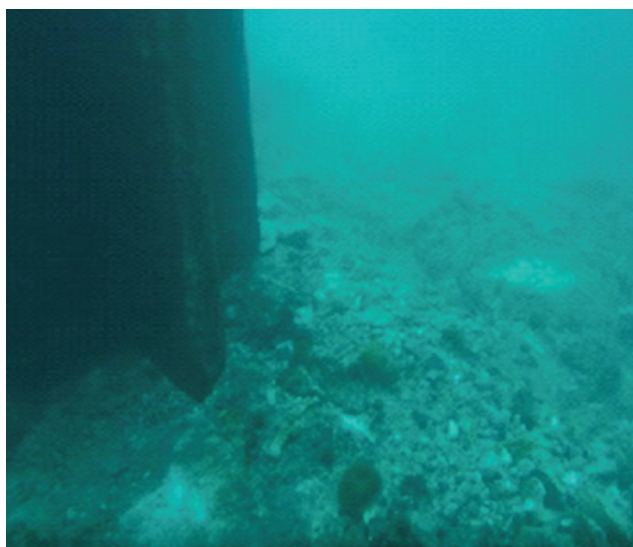
bata s posebno oblikovanom glavom i hidrauličke glodalice [28]. Pokazalo se da je na početku radova količina iskopa bila samo 18 m<sup>3</sup>/dan. Zato je razrađena nova tehnologija upotrebom bušilice promjera 1.800 mm, čija je prosječna brzina bušenja iznosila 60 cm/h. Taj stroj je bio predviđen za izvedbu pilota na pristaništu LNG terminala. Bušenje je obavljeno 35 cm dublje od projektom zahtijevane dubine (slika 10), a prema precizno određenoj shemi (slika 11.).

Nakon završetka bušenja stijenska masa je razlomljena i usitnjavana pomoću pneumatskog čekića i "rakete" (slike 12. i 13.).

Nakon toga je stijenska masa dodatno usitnjena pomoću hidrauličke glodalice (slika 14.).



Slika 12. Iskop pomoću pneumatskog čekića [28]



Slika 13. Iskop pomoću teškog bata s posebno oblikovanom glavom, tzv. "rakete" [28]





Slika 14. Nedovoljna učinkovitost iskopa pomoću hidrauličke glodalice [28]

Opisanom promjenom tehnologije postignut je prosječni dnevni iskop od 25 m<sup>3</sup>/dan, a maksimalni do 35 m<sup>3</sup>/dan. Na taj način omogućen je završetak radova do ugovorenog roka. Kako bi se mogao ukloniti višak iskopanog materijala između bušotina, bušenje je obavljeno 35 cm dublje od planirane kote iskopa. Tijekom iskopa hidrauličnom glodalicom dio materijala je ispunio dna bušotina. Tako je količina izbušenog materijala bila veća od količine uklonjenog materijala do planirane kote.

Nasipavanje u depresiji između pličina bilo je optimalno rješenje odlaganja iskopanog materijala (slika 8.). Nasipavanje je izvedeno tako da je iskopani materijal ukrcavan na teglenicu tipa klapeta (senker), čije se dno nakon pozicioniranja nad potrebnim mjestom, otvaralo i istreslo iskopani materijal (slika 15.).



Slika 15. Utovar iskopanog materijala u klapetu [28]

Uz uobičajeni stručni nadzor kod građenja, sudjelovali su ronici s autonomnom opremom. Nadzor nad plovilima obavljala je nadležna lučka kapetanija iz Rijeke. Zbog primjene opisane tehnologije radovi na produbljanju dna trajali su dulje nego da je bila dopuštena upotreba eksploziva. Početak radova bio je u prosincu 2019., a završetak u veljači 2021. Nakon završetka radova na produbljanju morskog dna u zoni zahvata obavljeno je mjerenje dubina dna te izrađen hidrografski elaborat izvedenog stanja prema kojem će se morati uskladiti pomorske karte.

#### 4. Rasprava

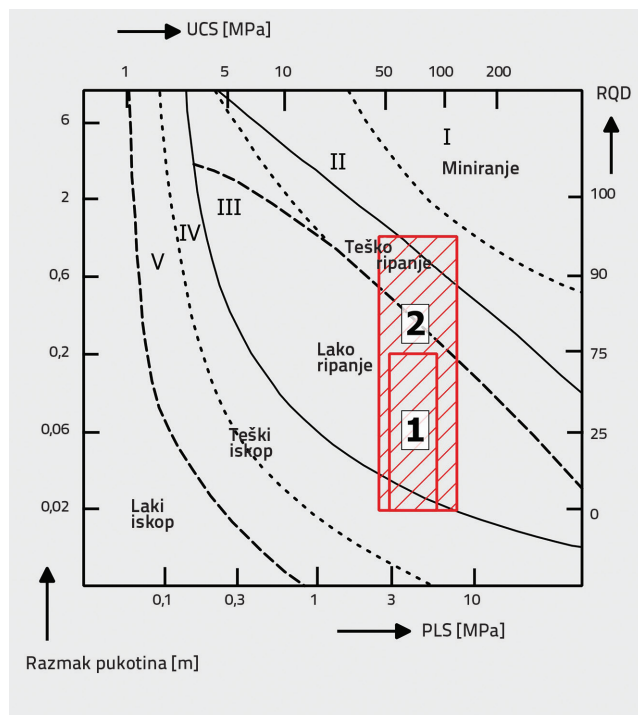
Iako su na Topografskoj karti Hrvatske mjerila 1:25.000 bila vidljiva podmorska uzvišenja, tek je geodetskim snimanjem podmorja ustanovljen točan reljef u mjerilu karte 1:2.000. Na temelju Maritimne studije [18] sva tri uzvišenja proglašena su opasnim za plovidbu i zato su trebala biti iskopana do dubine 15,4 m prema HVRS 71.

Pokazalo se da se upotrebom ROV-a i opreme za autonomno ronjenje može izraditi dovoljno precizna inženjerskogeološka karta podmorja. Već tada je ustanovljeno da će iskop u cijelosti biti u relativno čvrstoj karbonatnoj stijenskoj masi. U sklopu istražnih radova provedena su i detaljna podmorska geofizička ispitivanja delta-V-t metodom plitke seizmike u području vertikalne obale pristana. Zbog toga su ti podaci korišteni u procjeni značajki stijenske mase kao što su čvrstoća i stupanj ispućanosti. Podaci dobiveni dodatnim istraživanjima tijekom 2020. godine iz samo šest plitkih bušotina su točkasti i ne moraju biti reprezentativni za projektiranje optimalnog načina iskopa. Naime, izmjereni RQD indeks u bušotinama je varirao od 0 % do 75 %. Na temelju inženjerskogeološkog kartiranja područja iskopa razmak između pukotina je 5 do 100 cm što je ekvivalent RQD = 20 do 95 %. Obavljeno je ispitivanje jednoosne tlačne čvrstoće metodom PLT (ASTM D5731) na pet uzoraka (72 do 87 MPa) i ispitivanje jednoosne tlačne čvrstoće s modulom elastičnosti (ASTM D7012-14) na jednom uzorku (54 MPa), prosječna vrijednost je 75 MPa [26]. Istovjetna ispitivanja su obavljena na većem broju uzoraka za potrebe dogradnje pristaništa za LNG terminal u istim litostratigrafskim jedinicama i u zoni sličnog strukturno-tektonskog sklopa. PLT je ispitan na 27 uzoraka, a raspon procijenjene jednoosne tlačne čvrstoće je 59 do 99 MPa (prosječno 80 MPa). Ispitivanje jednoosne tlačne čvrstoće s modulom elastičnosti obavljeno je na 11 uzoraka, a raspon jednoosne tlačne čvrstoće je 45 do 119 MPa (prosječno 77 MPa) [22].

Tablica za određivanje načina iskopa na temelju podataka jednoosne tlačne čvrstoće i razmaka između pukotina, odnosno RQD indeksa, vrlo je korisna [29]. Podaci dobiveni na temelju ispitivanja velikog broja uzoraka pokazuju da karbonatna stijenska masa ima takve karakteristike da se iskop treba djelomično obaviti prethodnim miniranjem, a na drugim dijelovima strojevima i opremom koja se koristi za teško kopanje i lako kopanje. Nasuprot tomu, podaci dobiveni na temelju malog broja uzoraka iz bušotina na pličinama [25, 26] pokazuju da se stijenska masa može većinom iskopati opremom za lako kopanje, a manjim dijelom za teško kopanje (slika 16.).

Međutim, opisane metode i podaci o brzini napredovanja prilikom produbljanja stjenovitih uzvišenja pokazuju da ovi drugi podaci nisu bili realni (slika 14.). Zbog toga je bilo potrebno promijeniti tehnologiju iskapanja upotrebom bušilice promjera 1.800 mm kako bi se olakšalo razbijanje stijenske mase.

Iz fotografija koje su snimljene tijekom i nakon iskopavanja vidljiva je i u potpunosti uništena biocenoza hridinastog dna, a nasipavanjem se uništila i biocenoza pjeskovitog dna. To je ukupna površina oko 12.500 m<sup>2</sup> (slika 17.).



Slika 16. Usporedba mogućnosti iskopa stijenske mase: 1 – rezultati laboratorijske analize na užem području iskopa; 2 – rezultati laboratorijske analize na širem području iskopa (prema [29])



Slika 17. Morsko dno nakon iskopa [28]

U Netehničkom sažetku studije utjecaja na okoliš je navedeno: "Utjecaj od produblivanja pličina i nasipavanja nije samo ograničenog opsega nego je kratkotrajan i reverzibilan. Naime, neposredno nakon izvođenja zahvata početak će se stvarati novo ravnotežno stanje i najkasnije za 1-2 godine morska

biocenoza takvog područja potpuno će se u regenerirati te će se uspostaviti stanje slično trenutačnom. Sve se to odnosi i na materijal iz iskopa, uglavnom kameno kršje, koji će se odložiti na definiranoj lokaciji i funkcionirati kao nova atraktivna životna površina" [30]. Sa znanstvenog stajališta, bilo bi zanimljivo periodičnim monitoringom pratiti kojom brzinom se naseljavaju novi organizmi. Ti podaci mogu biti iznimno važni za procjenu utjecaja sličnih građevinskih zahvata na okoliš.

## 5. Zaključak

Geodetskim snimanjem podmorja ustanovljen je točan reljef u mjerilu karte 1:2.000. Određena su tri uzvišenja opasna za plovidbu koja su trebala biti snižena do dubine 15.4 m prema HVRS 71.

Inženjerskogeološkim kartiranjem podmorja, primjenom hidroakustičkih tehnika mjerenja i pregledom pomoću autonomne ronilice i autonomne ronilačke opreme, ustanovljeno je da će se iskop u cijelosti obaviti u relativno čvrstoj karbonatnoj stijenskoj masi. Nakon što su ucrtane konture iskopa na kartu izobata mjerila 1:2.000, pokazalo se da će najviše iskopa biti na pličini 1, a najmanje na pličini 2. Ukupni izračunani volumen iskopa na sve tri pličine bio je oko 11.000 m<sup>3</sup>. Projektom je određeno da će se iskopani materijal nasipati u dovoljno velikoj depresiji između pličina. Ukupno je nasipano oko 15.000 m<sup>3</sup> kamenog kršja i blokova. To je jedan od najvećih podmorskih iskopa izveden u stijenskoj masi na području hrvatskoga dijela Jadranskog mora.

Iskop pomoću miniranja nije bio dopušten. Zato je na temelju rezultata obavljenog istražnog bušenja, laboratorijskih analiza uzoraka, kao i rezultata geofizičkih ispitivanja delta-V-t metodom plitke seizmike na području pristana, bila razrađena metodologija iskopa klasičnim načinom lomljenja i iskopa stijenske mase pomoću pneumatskog čekića, rakete i hidraulične glodalice. Međutim, pokazalo se da je čvrstoća stijenske mase veća od predviđene, a posljedica je bila sporo napredovanje radova. Zbog toga je razrađena nova tehnologija uporabom bušilice promjera 1.800 mm, prije klasičnog načina lomljenja i iskopa stijenske mase. To je bitno ubrzalo radove.

Ovako opsežni radovi u podmorju neminovno su prouzročili ekološku štetu jer je uništena biocenoza na hridinastom i pjeskovitom dnu površine oko 12.500 m<sup>2</sup>.

## Zahvala

Autori zahvaljuju kolegama Dobroslavu Šestanoviću, dipl.ing. građ. i Duji Gligu, mag.ing.aedif. iz tvrtke Pomgrad Inženjering d.o.o. iz Splita, na svesrdnoj pomoći tijekom pribavljanja podataka, bez kojih ne bi bilo moguće izraditi ovaj rad.

Ovaj rad je djelomično financiran sredstvima Sveučilišta u Rijeci (Uniri-tehnic-18-97).



## LITERATURA

- [1] Bruun, P.: Port Engineering, Second edition, Gulf Publishing Company, Houston - London - Paris - Zuerich - Tokyo, 1990.
- [2] Tsinker, G.P.: Handbook of port and harbor engineering, Chapman & Hall, New York, 1997.
- [3] NAVFAC: Handbook for Marine Geotechnical Engineering (SP-2209-OCN), eds. D., Thompson, B.D., Jarah, Naval Facilities Engineering Command, Engineering Service Center, Port Hueneme, 2012.
- [4] Tsai, C.C., Lin, C.H.: Review and Future Perspective of Geophysical Methods Applied in Nearshore Site Characterization, Journal of Marine Science and Engineering, 10 (2022) 3, 344, doi: 10.3390/jmse10030344
- [5] Benac, Č., Senjanović, P., Čerina, P.: Podmorski istraživački radovi u projektu 110 kV otočne veze. Zbornik radova 1. Hrvatskog geološkog kongresa, Opatija, 1 (1995), pp. 75-79.
- [6] Pikelj, K., Juračić, M.: Eastern Adriatic Coast (EAC): Geomorphology and Coastal Vulnerability of a Karstic Coast, Journal of Coastal Research, 29 (2013) 4, pp. 944-957.
- [7] Benac, Č., Juračić, M., Matičec, D., Ružić, I., Pikelj, K.: Fluviokarst and classical karst: Examples from the Dinarics (Krk Island, Northern Adriatic, Croatia), Geomorphology, 184 (2013), pp. 64-73, doi: 10.1016/j.geomorph.2012.11.016
- [8] Benac, Č.: Inženjerskogeološke osobitosti obalnog pojasa i podmorja Riječkog zaljeva. Disertacija. Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb, 1994.
- [9] Juračić, M., Benac, Č., Crmarić, R.: Seabeded and surface sediments map of the Kvarner Bay, Adriatic Sea, Croatia. Geologica Croatica, 52 (1999), pp.131-140.
- [10] Kleiner, I., Nonveiller, E., Vulić, Ž.: Fundiranje luke za rasute terete u Bakru, Građevinar, 20 (1968) 8, pp. 229-240.
- [11] Kleiner, I., Sobol, I.: Tankerska luka Omišalj na otoku Krku, Građevinar, 30 (1978) 9, pp. 385-394.
- [12] Komen, R., Marković, A., Marić, B., Kleiner, I.: A Massive Quay on Silty Sandy Deposits. Proceedings of 1<sup>st</sup> International Congress of Ports and Harbours, Amsterdam, 5 (1988), pp. 55-64.
- [13] Kleiner, I., Vulić, Ž.: Istražni radovi za potrebe projektiranja i izgradnje luka, Zbornik radova JUREMA, 24 (1979) 7, pp. 111-122.
- [14] Komen, R., Benac, Č.: Geotehničke karakteristike tla na priobalnom području Rijeke, Građevinar, 35 (1983) 4, pp. 161-168.
- [15] Magdalenić, A., Jurak, V., Benac, Č.: Inženjerskogeološka problematika izgradnje luke u jugoistočnom dijelu Bakarskog zaljeva, Pomorski zbornik, 30 (1992), pp. 633-654.
- [16] Prager, A., Komen, R.: Problem temeljenja pomorskih građevina", Zbornik radova Fakulteta graditeljskih znanosti, 5 (1980), pp. 147-174.
- [17] GEOPORTAL, Republika Hrvatska, Državna geodetska uprava, <https://geoportal.dgu.hr>, 15.06.2022.
- [18] Maritмна studija LNG terminal Krk, Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet u Rijeci, Rijeka, 2017.
- [19] Izvešće o arheološkom istraživanju i rekognosciranju (LOT1-T3-1), OMEGA ENGINEERING d.o.o., Dubrovnik, 2016.
- [20] Hidrografski elaborat istraživanja na pomorskom dijelu LNG terminala Krk (LOT1-T2-1-1), Hrvatski hidrografski institut, Split, 2016.
- [21] Geodetski projekti/elaborati za glavne projekte LNG terminala Krk (LOT1-T4-2), Geodezija d.o.o., Šibenik, 2016.
- [22] Geotehnički elaborat istraživanja temeljnog tla na pomorskom (priobalnom) dijelu LNG terminala, (LOT1-T2-3), Geokon-Zagreb d.d., 2016.
- [23] Geološka karta Republike Hrvatske 1:300.000. Hrvatski geološki institut, Zagreb, 2009.
- [24] Inženjerskogeološka obrada bušotina na lokaciji petrokemije Krk, u zoni uvale Sapan. Institut za geološka istraživanja, Zagreb, 1976.
- [25] Kontrolna bušenja – LNG terminal na Krku. Rijekaprojekt-Geotehničko istraživanje, Rijeka, 2020.
- [26] LNG terminal Omišalj. Izveštaj o provedenim ispitivanjima uzoraka stijene, GEOTEST, Zagreb, 2020.
- [27] Građevinski projekt-Geotehnički projekt produbljenja morskog dna (I-06-970-GP1-G1.0), Geokon-Zagreb d.d., 2018.
- [28] Tehnička dokumentacija i fotodokumentacija. Pomgrad Inženjering d.o.o., Split, 2020.
- [29] Waltham, T.: Foundations of Engineering Geology, Third Edition, Spon Press, London-New York, 2009.
- [30] Studija o utjecaju na okoliš izmjena zahvata prihvatnog terminala za UPP na otoku Krku uvođenjem faze plutajućeg terminala za prihvat, skladištenje i uplinjavanje UPP-a, EKONERG d.o.o., Zagreb, 2018.