

Doc. dr. sc. **Barbara Karleuša**
Prof. dr. sc. **Željko Arbanas**
Mr. sc. **Josip Rubinić**
Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci
V. C. Emina 5, 51 000 Rijeka, Hrvatska

Sedimentacijski procesi u akvatorijima luka smještenih na ušćima rijeka

Sažetak

U radu je tretirana problematika gradnje luka i lučkih sadržaja kao i osiguranja potrebnih prostora (dubina) u akvatorijima luka smještenim na lokacijama gdje vodotoci prolaze kroz luku ili njenu neposrednu blizinu. Najizraženiji negativni utjecaji vodotokova na luke su sedimentacijski procesi koji uzrokuju smanjenje dubine u lučkom akvatoriju što utječe na plovnost te otežavaju temeljenje i gradnju lučkih objekata. U radu je, na primjeru triju sjevernojadranskih hrvatskih luka: Rijeke, Raše i Plomina, prikazan međuodnos vodnog okruženja (voda iz rijeka: Rječine, Raše i Boljunčice) i spomenutih luka u kontekstu prisutnih sedimentacijskih procesa. Prikazom i analizom navedenih primjera u radu se ističe važnost sagledavanja problematike utjecaja donosa nanosa na lučki akvatorij ukoliko je on lociran u području ušća vodotoka. Ukazuje se i na problematiku proširenja postojećih lučkih površina na lokacijama recentnih naslaga u području ušća pojedinih vodotokova te daju preporuke za monitoring, planiranje i provođenje potrebnih aktivnosti vezanih uz navedenu problematiku, a koje treba uzeti u obzir pri kompleksnom planiranju takvih luka.

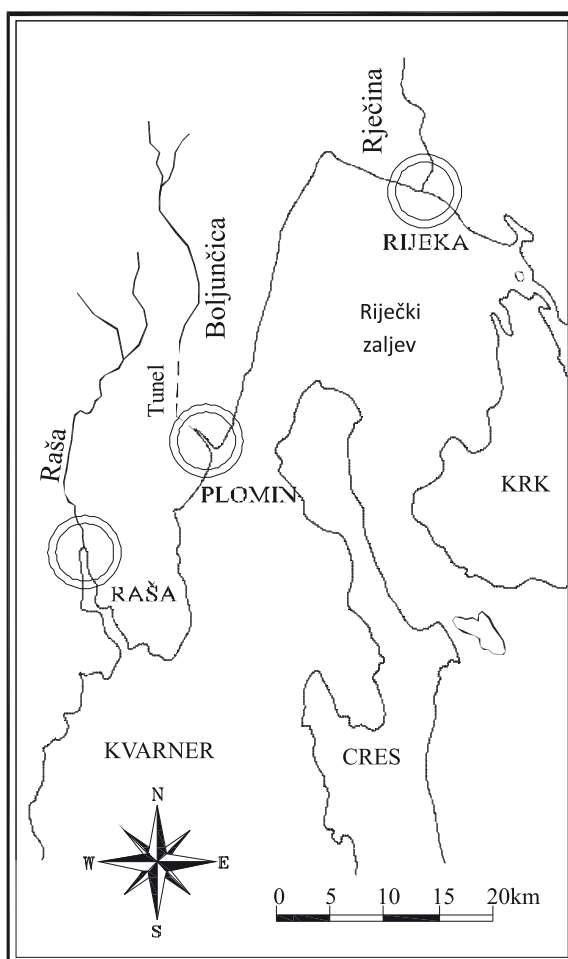
Ključne riječi: projektiranje i planiranje luka, sedimentacijski procesi, ušća vodotokova

1. Uvod

Luke obilježava neposredan i dinamičan odnos s vodnim okruženjem – kako u marinskim, tako i priobalnim slatkovodnim uvjetima. Pri tome su obično lučki sadržaji ti koji imaju negativan utjecaj na vodno okruženje u smislu pogoršanja stanja okoliša. Često su luke locirane na ušćima vodotokova – kako zbog povoljnijih uvjeta zaštite lučkih akvatorija od nepovoljnih maritimnih značajki, tako i zbog povoljnijih kopnenih prometnih veza koje, kroz obično gorovito priobalno zaleđe, vode do luka u dolinskim dijelovima vodotoka. Međutim, ukoliko se lokacije luka nalaze na ušćima značajnijih vodotokova, u većoj su mjeri prisutni i negativni utjecaji vodotoka na luke i njihove plovne putove. Jedan od najznačajnijih aspekata utjecaja vodotoka na takve

lučke akvatorije su sedimentacijski procesi. S obzirom da vodotoci sa sobom nose određene količine vučenog i suspendiranog nanosa, produciranog u gornjem dijelu toka, uslijed usporavanja vode u donjem dijelu toka i na samome ušću te geokemijskih reakcija u morskoj sredini taj se nanos unosi u akvatorije luka gdje se i sedimentira. Zbog dulje vremenske skale u kojoj se manifestiraju utjecaji te sedimentacije, često se pri planiranju luka i njihovih sadržaja oni nedovoljno poštuju i uzimaju u obzir. U radu je, na primjeru triju sjevernojadranskih luka Rijeke, Raše i Plomina (slika 1), prikazan međuodnos vodnog okruženja i spomenutih luka upravo u kontekstu prisutnih sedimentacijskih procesa.

Slika 1. Položaj luka Rijeka, Raša i Plomin te vodotokova Rječina, Raša i Boljunčica



Prikazom i analizom navedenih primjera, u ovome se radu želi istaknuti važnost sagledavanja problematike utjecaja donosa nanosa na lučki akvatorij ukoliko je on lociran u području ušća vodotoka, te ukazati na problematiku proširenja postojećih lučkih površina na lokacijama recentnih naslaga u području ušća pojedinih vodotokova. Cilj je ovog rada dati preporuke za monitoring, planiranje i provođenje potrebnih aktivnosti vezanih uz navedenu problematiku koje treba uzeti u obzir pri kompleksnom planiranju takvih luka.

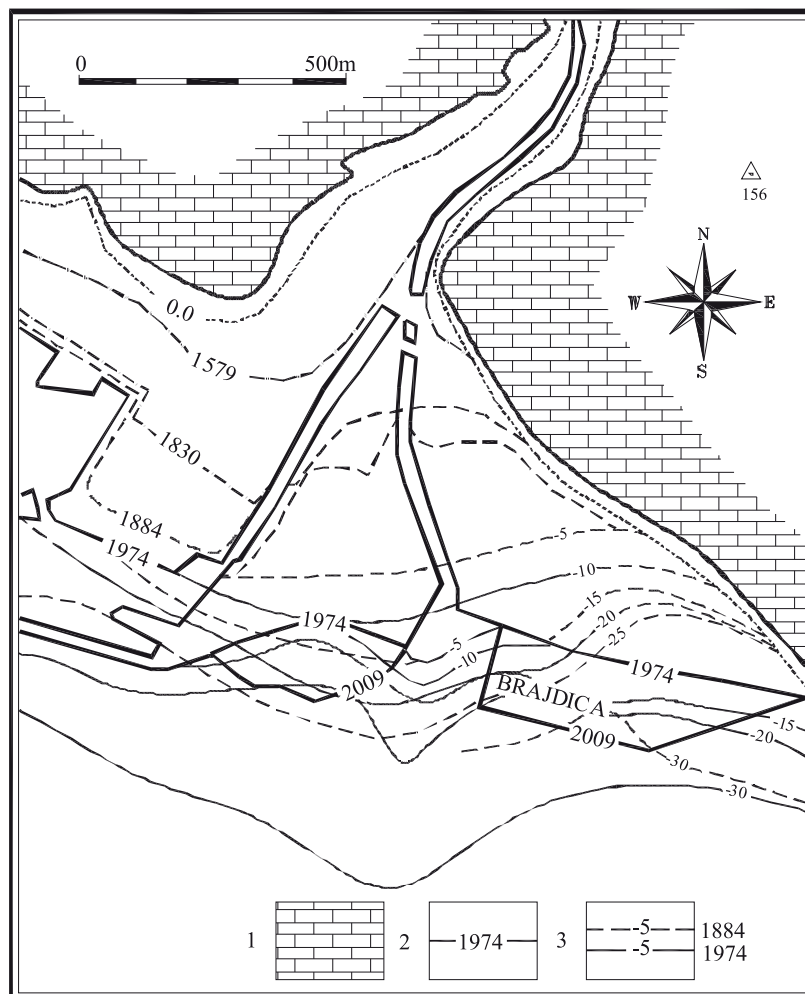
2. Problematika na primjerima

Jadransko more je, u geografskom smislu, najdublji prodor s juga u europsko kopno i na njegovom sjevernom dijelu završavaju plovni putovi raznih tereta za Srednju Europu. U prošlom stoljeću su na sjeveroistočnoj obali Jadrana izgrađene dvije velike luke i to na području Hrvatske luka Rijeka te na području Italije luka Trst, dok se u novije vrijeme razvila luka Koper na području Slovenije. Uz Rijeku na hrvatskom dijelu navedenog područja treba istaknuti još dvije luke iako manje po značaju i kapacitetu, a to su luke u Raškom i Plominskom zaljevu (slika 1.). Sve tri hrvatske luke karakterizira specifičnost vodotokova koji protječu kroz luku ili kroz njezinu neposrednu blizinu te sve posljedice koje iz toga proizlaze. Među njima treba istaknuti problem taloženja suspendiranog, odnosno samo ponegdje i vučenog nanosa kojeg vodotoci konstantno donose u lučki akvatorij i problem proširenja postojećih lučkih površina uslijed nepovoljnih uvjeta temeljenja na lokacijama recentnih naslaga u području ušća tih vodotokova.

2.1. Luka Rijeka

U luci Rijeka ističe se utjecaj vodotoka Rječine čije je korito upravo zbog donosa velikih količina nanosa neposredno u tadašnji lučki akvatorij, još 1855. godine, premješteno istočno. Međutim, utjecaj sedimentacije na ušću Rječine je i nakon toga vidljiv. Očituje se u vidu donosa novih količina nanosa u širi lučki akvatorij, čija je posljedica slijeganje izgrađenih građevina temeljenih na riječnim sedimentima i nasutom tlu [1,2]. Proces sedimentacije uzrokuje kontinuirano pomicanje obalne crte što je na slici 2. prikazano za vremenski period od 1579. do 1974. godine, a koji se i danas zbiva.

Slika 2. – Geološka karta i morfogeneza područja ušća Rječine: 1 – Gornjokredna i paleogenska vapnenačka stijena, 2 – Linija obale s oznakom godine, 3 – Izobate dna mora 1884. i 1974. godine, [1,3]



Razvoj luke i grada Rijeke temelji se na proširenju nasipavanjem morskog dna još od vremena rimske Tarsatice pa sve do početka 20. stoljeća kada se konačno oblikuje većina današnjih obala, lukobrana i lučki akvatorij [2]. Paralelno s napredovanjem nasipavanja gradili su se objekti na nasipanom platou na kojem su zbog procesa konsolidacije sedimentnih naslaga zabilježena i ekstremna slijeganja pojedinih građevina u blizini lučkih prostora. U razdoblju od 1901. do 1993. godine registrirano je slijeganje

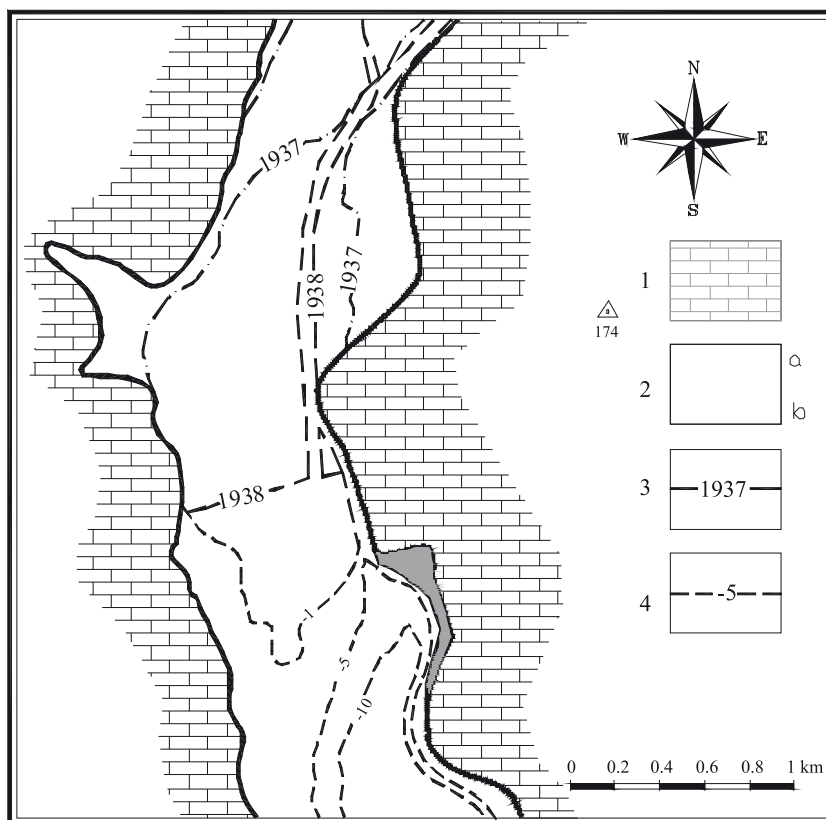
repera na građevini Casa Rossa u području zone kazališta u Rijeci za čitavih 90 cm, a proces konsolidacije još je u tijeku [2]. Takvo slijeganje uvjetovali su kako procesi konsolidacije uslijed nasipavanja platoa, tako i procesi konsolidacije u sedimentnom tijelu koga je na taj prostor prije izgradnje lučko-obalnih sadržaja doplavila Rječina. Problemi izgradnje riječke luke na nanosima Rječine vidljivi su već od samih početaka građenja na sadašnjem lučkom području. Preseljenjem korita Rječine započelo je uređenje obala sadašnjeg Mrtvog kanala koji je od druge polovice 18. stoljeća služio kao luka. Obale Mrtvog kanala izgrađene su izravno na naslagama sedimenta donesenog Rječinom, a zbog nepovoljnih geotehničkih značajki sedimentnog tijela temeljene su na drvenim pilotima pobijenim u pjeskovito prašinaste naslage. Izgradnja i nasipavanje riječke luke nastavljalo se na ušću Rječine tijekom 19. i prve polovice 20. stoljeća na sličan način. Na to su izravno utjecali geotehnički problemi uslijed nepovoljnih geotehničkih značajki sedimentnog tijela na ušću Rječine [1,4,5]. Gradnja novijih lučkih postrojenja suočena je s istim problemima. Kontejnerski terminal na Brajdici građen je kao masivna obalna građevina na nasutom dijelu obale povrh debelih sedimentnih naslaga u složenim uvjetima građenja [6]. Nove građevine riječke luke koje započinju s gradnjom početkom 2006. godine sele najznačajnija lučka postrojenja zapadno od postojećih obala. Izgradnja nove Zagrebačke obale, iako udaljene oko 1.5 km od samog ušća Rječine, još uvijek je uvjetovana nepovoljnim značajkama naslaga. Nakon analize većeg broja predloženih rješenja, odabran je prijedlog temeljenja na sanducima na postojećim pjeskovito - prašinstim naslagama. Predloženo rješenje bit će obala s najdubljim gazom odabrane konstrukcije, kakva sada nije izgrađena u svijetu.

2.2. Luka Raša

Vodotok Raša je na svom ušću, koje je ujedno i područje akvatorija istoimene luke, područje još intenzivnije izražene sedimentacije zbog razvijenih procesa erozije dijelova njenog sliva oblikovanim u siliciklastičnim stijenama. U zaljev se unosi prosječno $48.500 \text{ m}^3 \text{ god}^{-1}$ nanosa što rezultira taloženjem $78.000 \text{ t god}^{-1}$ nekonsolidiranog mulja koji, u nekim dijelovima estuarija, ima brzinu sedimentacije do 15 cm god^{-1} [7]. Intenzivno taloženje sedimenata uzrokovalo je pomicanje ušća vodotoka Raša za 4 km u posljednjih 240 godina [8,9]. Takvu je dinamiku taloženja i njen prostorni raspored, što je prikazano na slici 3, nužno uzeti u obzir ne samo pri planiranju proširenja lučkih kapaciteta na tom lokalitetu, već i pri redovitim aktivnostima na održanju potrebne dubine postojećeg lučkog akvatorija. Izgradnja novih lučkih postrojenja u području Bršice i Trgeta izvedena početkom 90-tih godina prošlog stoljeća zbog pomicanja ušća rijeke Raše nužno je izvedena u donjem dijelu Raškog zaljeva s još uvijek prihvatljivim dubinama gaza. Temeljenje obalnih građevina, zbog izrazito nepovoljnih deformacijskih značajki sedimenata, projektirano je i izvedeno dubinski na pilotima do slabo deformabilne stijenske podloge. Tako su onemogućene štetne posljedice slijeganja u procesu vremenske konsolidacije pri čemu bi najveći utjecaj imale posljedice slijeganja

uslijed vlastite težine sedimenata [10] te utjecaja interakcije miješanja slane i slatke vode u pornoj vodi sedimenata [11]. Posljedice slijeganja pristupnih prometnica nisu se mogle izbjeći.

Slika 3. Geološka karta i morfogeneza područja ušća Raše: 1 – Gornjokredna vapnenačka stijena, 2 – Holocenski aluvijalni i estuarijski sedimenti (a/crvena glina, b/siva glina), 3 - Linija obale s oznakom godine, 4 – Izobate dna mora 1975. godine, [3,8]

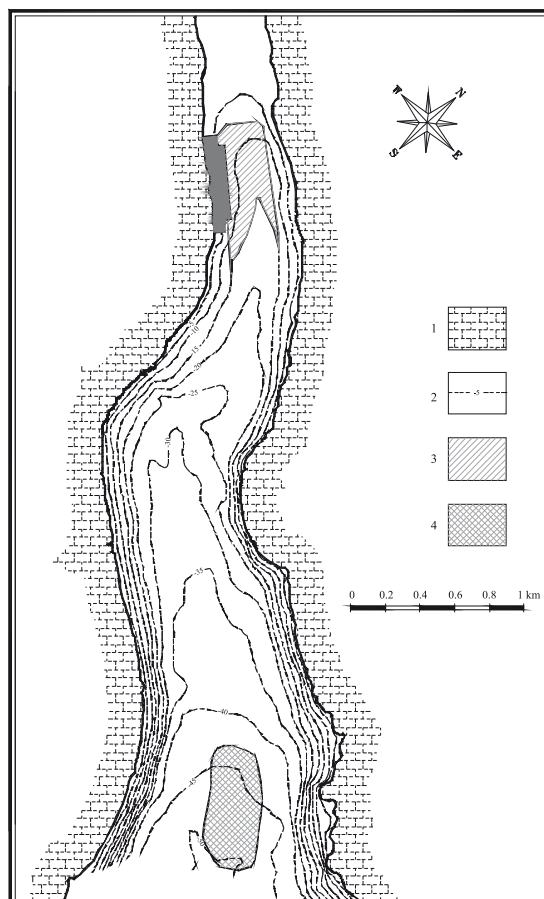


2.3. Luka Plomin

Najizraženiji primjer utjecaja procesa sedimentacije na lučki akvatorij je luka Plomin. Do prokopa oko 4,5 km dugog tunela Čepić-more 1932. godine kojim su u Plominski zaljev skrenute vode iz sliva Boljunčice te isušeno Čepićko jezero, luka Plomin je bila najznačajnija luka na istočnoj obali Istre. Dovođenjem vode Boljunčice u zaljev unose se i talože značajne količine nanosa, tako da je krajem devedesetih

godina prošlog stoljeća, zbog ubrzanih procesa sedimentacije koji do tada nisu bili odgovarajuće praćeni i čišćenjem akvatorija, na prostoru nekadašnjeg pristaništa za-bilježeno pomicanje obalne crte za 50-tak metara od obale. Postojeća obala na samom ušću Boljunčice u potpunosti je bila zatrpana tako da je dubina mora uz obalni zid polovicom 90-tih godina prošlog stoljeća iznosila manje od jednog metra [12]. No, zbog morfoloških značajki Plominskog zaljeva, relativno kratkoga vremenskog raz-doblja njegove izloženosti povećanom donosu sedimenata spomenutim tunelom, kao i provedenih radova na odmuljivanju Plominskog zaljeva, za akvatorij Plominske luke nije toliko primjeren prikaz progradacije ušća Boljunčice koliko je dinamika sedimen-tacije. Tijekom posljednjih tridesetak godina prirast nanosa na dnu zaljeva iznosi oko 3 metra, pri čemu na pojedinim dijelovima Plominskog zaljeva brzina sedimentacije čak premašuje 10 cm god^{-1} [13]. Nakon opsežnih produbljenja zaljeva u razdoblju 1997/98., pri čemu je premješteno oko milijun m^3 sedimentiranih naslaga te oblikovan novi lučki prostor, procesi erozije, donosa i sedimentacije nanosa su nastavljeni [14]. Može se očekivati da će uslijed ponovnog smanjivanja dubina mora biti neophodno povremeno produbljivati dno zaljeva i uklanjati sedimente nastale pomicanjem, kao i čistiti materijal s nestabilnih kosina u podmorju. Izgradnji nove luke u Plominskom zaljevu za potrebe dopreme ugljena za postrojenja termoelektrane Plomin, prethodile su analize odabira mikrolokacije luke, ali i odgovarajućeg načina temeljenja [15]. Pri tome je presudan činilac bio mjerodavni brod za dopremu ugljena određen svojim dimenzijama i gazom. S obzirom na zadane ulazne parametre, obalne i pretovarne konstrukcije pomaknute su u središte Plominskog zaljeva. Zbog vrlo loših geotehničkih značajki sedimenata, odabran je raščlanjen tip obalne građevine temeljen na pilotima izvedenim do stijenske podloge. Plitko temeljene obalne građevine nisu se mogle izvesti zbog očekivanih velikih deformacija sedimenta u podmorju, velike zahtijevane dubine obalne građevine te potrebnih velikih iskopa slabo vezanih sedimenata u podmorju. Unatoč odabiru temeljenja na pilotima uklanjanje muljevitog sedimenta iz središta zaljeva nije se moglo izbjeći.

Slika 4. – Geološka karta Plominskog zaljeva: 1 – Gornjokredna i paleogenska vapnenačka stijena, 2 – Izobate dna mora, 3 – Zona odmuljivanja, 4 – Zona deponiranja iskopanog materijala, [14]



3. Rezultati - preporuke

Kako bi se problemi vezani uz negativan upliv sedimentacijskih procesa na lučke akvatorije smještene na ušćima vodotokova na vrijeme prepoznali, a kasnije i primjereno pratili u cilju poduzimanja potrebnih sanacijskih zahvata ili izgradnje novih lučkih sadržaja, nužno je osigurati provođenje primjerenih istražnih radova (u prvom redu hidroloških, geotehničkih, hidrografskih, oceanografskih i sl.), kao i odgovarajući monitoring nakon što se planirani lučki objekti izgrade. Ne manje važna istraživanja su i ona vezana uz problem zaštite okoliša, pronos nanosa i s njime vezanih onečišćenja,

kao i promjene akvatorija i ušća vodotokova kao staništa brojnih vrsta važnih životnih zajednica kojima promjene uvjeta sedimentacije mogu prouzročiti neželjene posljedice [16,17,18]. Zbog kompleksnosti tog problema i suženog prostora za obrazloženje on nije predmet obrade u ovome radu već je ovdje samo naznačen.

Istražni radovi i monitoring trebali bi sadržavati sljedeće aktivnosti:

- osiguranje i analiza satelitskih snimaka riječkih ušća i utjecajnog prostora u moru i slivovima vodotokova,
- izrada geoloških karata prostora utjecaja i analiza morfologije ušća vodotokova i akvatorija,
- izrada karata erozije radi ocjene produkcije nanosa u slivovima gravitirajućih vodotokova,
- izrada hidrografskih mjerenja akvatorija i ušća vodotokova te komparacija s ranijim, pa i povijesnim kartama,
- uspostava hidroloških postaja za praćenje protoka i pronosa suspendiranog i po potrebi i vučenog nanosa i analiza njihovih podataka,
- mjerenje i analiza morskih struja u akvatoriju u različitim hidrološkim prilikama i stanjima termalne stratifikacije mora,
- utvrđivanje dinamike sedimentacije na temelju geokemijskih analiza,
- analiza granulometrijskog sastava sedimentiranog materijala po dubini, kao i sastava recentnog nanosa,
- utvrđivanje položaja, geometrije i sastava sedimentnog tijela,
- praćenja i analize kakvoća vode i mora i čestica suspendiranog nanosa,
- ekološka istraživanja prostora ušća vodotokova i morskog akvatorija.
- Tek na temelju provedenih istraživanja moguće je donositi primjerena tehnička rješenja, a u koja ulaze:
 - plan i tehnologija produbljivanja (čišćenja) akvatorija luke,
 - plan deponiranja izvađenog sedimentiranog materijala,
 - analiza utjecaja na okoliš zahvata vezanih uz produbljivanje (čišćenje) akvatorija luke i deponiranje izvađenog materijala,
 - tehnička rješenja za zadržavanje dijela nanosa u slivu,
 - preporučene metode gradnje – temeljenja objekata lučkih sadržaja,
 - plan monitoringa izgrađenih objekata lučkih prostora, te vode i mora na utjecajnom prostoru.

4. Zaključak

Prikazom i analizom navedenih primjera u ovom radu istaknuta je važnost sagledavanja problematike utjecaja donosa nanosa na lučki akvatorij ukoliko je on lociran u području ušća vodotoka te se skreće pozornost na uključivanje tih parametara u planiranje i projektiranje takvih luka. Također se ukazuje na problematiku izgradnje novih lučkih površina, odnosno temeljenja novih lučkih objekata na lokacijama recentnih naslaga u području ušća pojedinih vodotokova. Na temelju provedene analize

luka Rijeka, Raša i Plomin dane su preporuke za monitoring, planiranje i provođenje potrebnih aktivnosti vezanih uz problematiku sedimentacijskih procesa na ušćima vodotokova, koje treba uzeti u obzir pri kompleksnom planiranju luka u zonama utjecaja takvih vodotokova.

Literatura:

1. Č. Benac, Ž. Arbanas, Sedimentacija u području ušća Rječine, Pomorski zbornik 28 (1990) 1, 593-609, Rijeka.
2. E. Pavlovec, Č. Benac, Ž. Arbanas, Slijeganje priobalnog područja grada Rijeke, Građevinar 50 (1998) 4, 203-208, Zagreb.
3. Č. Benac, Ž. Arbanas, B. Jardas, The Morphogenesis and Evolution of the River Mouths in the Kvarner Area, Proceedings of International Symposium Geomorphology and Sea, 1992, 37-45, Zagreb.
4. Ž. Arbanas, Č. Benac, B. Jardas, A. Marković, Geotehnički problemi proširenja riječke luke, Suvremeni promet 5-6 (1994) 14, 204-208.
5. Ž. Arbanas, Č. Benac, B. Jardas, Geotehničke značajke priobalnog područja grada Rijeke, Pomorski zbornik 32 (1994) 1, 467-480, Rijeka.
6. R. Komen, A. Marković, B. Marić, I. Kleiner, A Massive Quay on Silty Sandy Deposits, Proceedings od 1st International Harbour Cogress in Amsterdam, 1988, 5.55-5.64.
7. M. Juračić, I. Sondi, J. Rubinić, V. Pravdić, Sedimentacija u neravnotežnom estuariju pod utjecajem rijeke: krški estuarij Raše – Hrvatska, Zbornik radova 1. Hrvatskog geološkog kongresa u Opatiji, 1995, 265-268, Zagreb.
8. Č. Benac, Ž. Arbanas, E. Pavlovec, Postanak i geotehničke osobitosti doline i zaljeva Raše, Pomorski zbornik 29 (1991), 475-492, Rijeka.
9. Ž. Arbanas, Č. Benac, J. Rubinić, The Geotechnical Properties of Sediment Body in the Estuary of the Raša River, Croatia, Proceedings of International Conference of Coastal Environment V, incorporating Oil Spill Studies - Alicante, WIT Press, 2004, 209-218, Southampton.
10. J. T. Greensmith, E. V. Tucker, Compaction and Consolidation. Sea - level Research; a Manual for the Collection and Evolution Data, UNESCO - IGCP, Geo Books, 1986, 591 – 603, New York.
11. L. Bjerrum, Engineering Geology of Norwegian Normally Consolidated Marine Clays as Related to Settlements of Buildings, Geotechnique 17 (1967), 81-118.
12. J. Rubinić, G. Bušelić, I. Kukuljan, I. Kosović, Hidrološka analiza suspendiranog nanosa u istarskim vodama, Hrvatske vode 27 (1999) 7, 127-137.
13. D. Barišić, G. Kniewald, A. Vertačnik, S. Lulić, Preliminarni rezultati radiometrijskih istraživanja recentnih sedimenata u plominskom zaljevu, Zbornik radova 2. Hrvatske Konferencije o vodama, Hrvatske vode od Jadrana do Dunava, u Dubrovniku, Hrvatske vode, 1999, 405-412, Zagreb.
14. Glavni projekt Rekonstrukcije TE Plomin II-infrastruktura, Rijeka projekt-niskogradnja, El.br. 97-013, 1997, Rijeka.
15. Geotehnički izvještaj za TE Plomin C 500, Institut građevinarstva Hrvatske, El.br. G1-K36.00.01-G06.0, 2009, Rijeka.
16. J. H. Vandermeulen, Environmental trends of ports and harbours: Implications for planning and management, Maritime Policy and Management 3 (1996) 1, 55-66.
17. SedNet, Sustainable management of sediment resources: Sediment quality and impact assessment of pollutants, Elsevier, 2006.
18. www.sednet.org (24.02.2010.)

Barbara Karleuša, Željko Arbanas, Josip Rubinić

Sedimentation processes in ports located on river mouths

Abstract

This paper deals with the problematic of sea port and port facility construction as well as with acquiring necessary space (depth) in port aquatoriums at locations near river mouths. Strongest negative effects of river mouths on ports are sedimentation processes which cause reduction of depth which affects navigability as well as port foundations and construction of new port facilities. In this paper three northern Adriatic Croatian ports are mentioned as examples; Rijeka, Raša and Plomin, in order to demonstrate the correlation between fresh water environment (fresh water from rivers Rječina, Raša and Boljunčica) and aforementioned ports in the context of present sedimentation processes. By demonstration and elaboration of these examples this paper stresses the significance of reviewing the problematic of sedimentation deposits in port aquatoriums if they are located in close proximity to river mouths. It points out the problem of current port area expansion at locations with recent deposits and recommends methods for monitoring, planning and implementation of activities associated with mentioned problematic which should be taken into account when coping with complex planning of such ports.

Key words: port design and construction, sedimentation processes, river mouths