

# NUMERIČKA ANALIZA DJELOVANJA BRANE NA SPRJEČAVANJE PRODORA SLANE VODE DUŽ KORITA RIJEKE NERETVE

**prof. dr. sc. Goran Lončar,**  
**dipl. ing. građ.**  
Sveučilište u Zagrebu,  
Građevinski fakultet  
Kačićeva 26, Zagreb, Hrvatska  
goran.loncar@grad.unizg.hr

**doc. dr. sc. Nino Krvavica,**  
**dipl. ing. građ.**  
Sveučilište u Rijeci,  
Građevinski fakultet  
Ul. Radmile Matejčić 3,  
Rijeka, Hrvatska  
nino.krvavica@uniri.hr

**prof. dr. sc. Hrvoje Gotovac,**  
**dipl. ing. građ.**  
Sveučilište u Splitu,  
Fakultet Građevinarstva,  
arhitekture i geodezije  
Ul. Matice hrvatske 15, Split, Hrvatska  
hrvoje.gotovac@gradst.hr

**doc. dr. sc. Dijana Oskoruš,**  
**dipl. ing. građ.**  
Državni hidrometeorološki zavod,  
Grič 3, Zagreb, Hrvatska  
oskorus@cirus.dhz.hr

**Tin Kulić, mag. ing. aedif.**  
Sveučilište u Zagrebu,  
Građevinski fakultet  
Kačićeva 26, Zagreb, Hrvatska  
tin.kulic@grad.unizg.hr

3D numeričkim modelom provedena je numerička analiza dinamike pronosa slane vode u koritu rijeke Neretve na dionici 0+000.0 m - 25+000.0 m. Osim postojećeg stanja korita rijeke analizirane su i hipotetske situacije sa izvedbom jedne brane u profilu 2+000.0 m (velika dubina i mala širina) ili 4+000.0 m (mala dubina i velika širina), te izvedbom 4 brane u profilima 2/4/6/8+000.0. Regulacija podizanja i spuštanja brane vezana je uz srednji izmjereni protok na mjernoj postaji Metković u prethodnom razdoblju od 24 h ( $Q_{SR-24}$ ) ili 6 h ( $Q_{SR-6}$ ). U situacijama  $Q_{SR-24} > 300$  i  $350 \text{ m}^3/\text{s}$ , odnosno  $Q_{SR-6} > 300 \text{ m}^3/\text{s}$ , brana je potpuno spuštena, dok se za manje srednje vrijednosti protoka brana podiže do određene razine (od -2 m do -5 m) kroz jedan sat. Korišten je 3D numerički model Mike 3fm, zasnovan na metodi konačnih volumena. Za kalibraciju numeričkog modela korišteni su izmjereni protoci, razine i salinitet na monitoring postajama u 2018. godini, dok su za validaciju modelskih rezultata korišteni podaci iz 2017. godine. Podaci o temperaturi i salinitetu mora u akvatoriju ušća Neretve preuzeti su iz nacionalnih programa praćenja morskog okoliša. Modelska dinamika uzvodno-nizvodne translacije slanog klina u nestacionarnim uvjetima strujanja u suglasju je s mjerenjima. Modelska debljina razdjelne zone između slatke i slane vode veća je od izmjerene, kao posljedica numeričke difuzije i usvojene proračunske diskretizacija u vertikalnom smjeru od 1 m. Mjerene vrijednosti i rezultati modeliranja upućuju na zaključak da pri nestacionarnim protocima većim od  $700 \text{ m}^3/\text{s}$  dolazi do potpunog istiskivanja slanog klina iz riječnog korita, dok pri protoku manjem od  $150 \text{ m}^3/\text{s}$  slani klin napreduje do uzvodne stacionaže 20+909.0 m (Metković) i dalje uzvodnije. Ukoliko se želi spriječiti intruzija slanog klina uzvodno od stacionaže brane (2+000.0 m ili 4+000.0 m) potrebno je izvesti branu s podizanjem do dubine -2 m, uz uvjet podizanja brane  $Q_{SR-24} < 300 \text{ m}^3/\text{s}$ .

**Ključne riječi:** rijeka Neretva, ušće, numerički model, prodor slane vode, brana

## 1. UVOD

Dolina rijeke Neretve je jedno od najvažnijih poljoprivrednih područja u Republici Hrvatskoj. Međutim, posljednjih je godina poljoprivredna aktivnost ovoga područja ugrožena zbog sve prisutnijih zaslanjenja površinskih i podzemnih voda (Romić i sur., 2008.; 2018., 2019.). Navodnjavanje melioriranih površina doline rijeke Neretve konceptualno je riješeno u okvirima Nacionalnog projekta navodnjavanja i gospodarenja poljoprivrednim zemljištem i vodama u Hrvatskoj (NAPNAV) (Agronomski fakultet u Zagrebu, 2005.). Idejnim rješenjem navodnjavanja u Donjoj Neretvi (Romić i Vranješ, 2006.) definirana je količina vode potrebna za navodnjavanje, a koju je moguće u potpunosti osigurati zahvatom na rijeci Neretvi. Pritom je naglašeno kako se odgovarajućim konstruktivnim mjerama mora spriječiti površinsko prodiranje mora koritom rijeke Neretve do pozicije vodozahvata.

Poznato je da more u priobalnim područjima može prodirati uzvodno duž korita rijeka i više desetaka kilometara. Višegodišnjim terenskim istraživanjima na rijeci Neretvi (Ljubenković i Vranješ, 2012.; Romić i sur. 2018., 2019.), ustanovljeno je da more prodire u jasno odvojenom pridnom sloju slane vode uzvodno sve do iza Metkovića. Slično uslojeno tečenje prisutno je i u drugim priobalnim rijekama Jadranskog sliva, kao što su Krka (Legović, 1991.), Jadro (Ljubenković i Vranješ, 2013.) i Rječina (Krvavica i sur., 2012., 2016.). Duljina prodora mora prvenstveno ovisi o mareografskim (razina mora, plima i oseka) i hidrološkim uvjetima (protok rijeke), ali i o geometriji kanala. Kako bi se prepoznali dominantni utjecaji na duljinu prodora slane vode (slanog klina) te predvidjele moguće promjene u budućnosti, posljednjih godina se koriste različiti računalni modeli. Jedan od jednostavnijih pristupa su empirijske metode kojima je moguće odrediti nelinearnu zavisnost između protoka rijeke, razine mora te duljine prodora slanog klina (Krvavica i sur. 2012.). Kako bi se detaljnije opisala i dinamika prodora slanog klina te bolje razumjeli mehanizmi složene interakcije između slane i slatke vode, potrebno je primijeniti numeričke modele. U tu svrhu, nedavno je razvijen originalni numerički model dvoslojnog tečenja plitkih voda koji je primijenjen na rijekama Neretvi (Ljubenković i Vranješ, 2012.) i Jadro (Ljubenković, 2015.). Nešto napredniji dvoslojni model plitkih voda nedavno je primijenjen na Rječini (Krvavica i sur. 2017.a, 2017.b) i Neretvi (Oskoruš i sur., 2019.). Sve navedene numeričke analize potvrdile su da duljina prodora slanog klina ovisi prvenstveno o uzvodnom protoku rijeke i njegovom trajanju, dok razina mora za uvjete plime i oseke koji vladaju tijekom standardnih oceanografskih i atmosferskih uvjeta na području Jadrana ima znatno slabiji utjecaj.

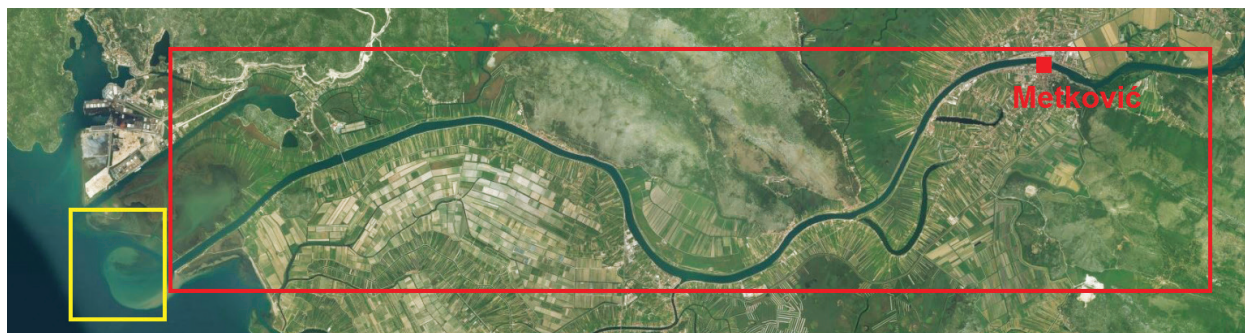
S obzirom da je terenskim mjerenjima i numeričkim simulacijama ustanovljeno da u rijeci Neretvi slani klin prodire uzvodnije od planiranog vodozahvata za potrebe navodnjavanja, kao moguće rješenje nametnula

se ideja o izgradnji brane (Vranješ i Romić, 2011.). Optimalno dimenzionirana brana morala bi spriječiti prodor morske vode tijekom sušnog perioda te na taj način osigurati dovoljne količine vode zadovoljavajuće kakvoće za navodnjavanje. Dodatan uvjet je da brana ne smije otežati ili spriječiti plovnost rijekom Neretvom do luke Metković. Po pitanju plovnosti Neretve od ušća do Metkovića može se napomenuti da je sadašnjim stanjem osigurana plovnost za brodove maksimalnog gaza do 4,5 m, maksimalne duljine 80 m i visine 14 m. Zbog ovog uvjeta, predložena je pokretna brana za koju je valorizirano nekoliko potencijalnih lokacija (Vranješ i Romić, 2011.). Predloženo je pregradno mjesto 1,8 km nizvodno od Opuzena (stacionaža ~8+000.0) s usporenim (podignutom) razinom vode 50 do 60 cm na preljevu brane. Na taj način se omogućava distribucija vode gravitacijski po cijelom području doline. Varijantna tehnička rješenja pomične pregrade provjerena su na fizikalnim modelima (Vranješ i Romić, 2011.). Nakon provedenih analiza, projektirano je predloženo rješenje u Idejnom projektu sustava navodnjavanja Donja Neretva, podsustav Opuzen (Projektirni biro Split, 2014.) Za predmetno rješenje provedene su i numeričke simulacije protjecanja kroz pregradni presjek (Travaš, Krvavica, Žic, 2015.) kako bi se ocijenio utjecaj spuštene pregrade na protočnu moć korita Neretve tijekom velikih voda te kako bi se odredile maksimalne površinske brzine vode nizvodno od pregrade tijekom spuštanja iste. Napravljen je fizikalni i numerički model (Vranješ i sur., 2015.), kojim su analizirana stanja tečenja za vrijeme spuštanja ili podizanja pregrade.

S obzirom na trenutno stanje istraženosti utjecaja pregrade na Neretvi, cilj ovoga rada je analizirati nestacionarna stanja strujanja duž korita Neretva te procijeniti utjecaj alternativnih rješenja brane na prodor morske vode. Hipotetska brana definirana je s nekoliko alternativa.

U ovom radu su osim analiza nestacionarnih stanja strujanja provedene i simulacije utjecaja hipotetske brane (tanke vertikalne nepropusne pregrade) s varijacijom pozicije njenog postavljanja (stacionaže 2+000.0 m, 4+000.0 m i 2/4/6/8+000.0), visine podizanja (-2 m, -4 m i -5 m), kriterija podizanja brane ( $Q_{SR-24}$  ili  $Q_{SR-6}$ ), i vrijednosti prekoračenja kriterija koje dovodi do podizanja/spuštanja brane. Brana je simulirana kao idealno prijanjajuća po cijeloj širini korita, pa se ispiranje zaostalog klina mora iz uzvodnog dijela korita u nizvodnu dionicu od brane dešava samo prelijevanjem preko brane. Cjelokupni proces prodora mora u dolinu rijeke Neretve ne događa se samo kroz korito rijeke, nego i kroz duboki aluvij doline, te kroz okršenu stijenu koja ima bazis na 150 - 200 m ispod razine mora. Ovaj dio transporta slane vode nije analiziran u sklopu provedenih numeričkih simulacija.

U drugom poglavlju dan je pregled raspoloživih i primijenjenih podataka za uspostavu rubnih uvjeta modela, te kalibraciju i verifikaciju modela. Navedene



Slika 1: Obuhvat modelirane dionice rijeke Neretve do stacionaže 25+000m i akvatorija uokolo ušća (žuti kvadrat – morski dio)

su i osnovne informacije o primijenjenom numeričkom modelu, korištenoj prostornoj diskretizaciji i pripadnoj parametrizaciji. Rezultati kalibracijskih i validacijskih simulacija dani su u trećem poglavlju, dok se u četvrtom poglavlju prikazuju rezultati simulacija u uvjetima izvedbe varijanti hipotetske brane na 2+000.0 m i 4+000.0 m, odnosno brana na 2/4/6/8+000.0 m. Utjecaj periodičkog spuštavanja i podizanja brane za potrebe održavanja plovnosti u razdoblju malih protoka analiziran je i komentiran u petom poglavlju. Šesto poglavlje rezervirano je za zaključne komentare provedenog istraživanja.

## 2. MATERIJALI I METODE

### 2.1. Poprečni profili korita i batimetrija akvatorija

Na raspolaganju je detaljni premjer 92 poprečna profila iz 2012. godine na dionici vodotoka od ušća do stacionaže 21+409.8m, na međusobnoj udaljenosti od 80 do 350 m (Geodetski zavod – Split, 2012). Dubine mora u akvatoriju uokolo ušća definirana je nautičkom kartom za akvatorij Luka Ploče od strane Hrvatskog hidrografskog instituta. Prostorna domena modela obuhvaća akvatorijalno područje ušća u radijusu 1000 m – 1500 m (žuti kvadrat, [slika 1](#)), te korito rijeke Neretve do stacionaže 25+000.0 m (crveni kvadrat, [slika 1](#)).

Kako bi se ostvarila svrsishodna implementacija 3D modela, s prihvatljivim vremenom provedbe simulacija za odgovarajuće vremensko razdoblje, uz standardni računalni resurs (Procesor Intel Core i7-3770 CPU, 3.4 GHz, paralelan rad na dvije jezgre) i stabilnu proračunsku proceduru (poštivanje Chauchy-Friedrich-Levy ili CFL uvjeta), napravljena je prilagodba izmjerenih poprečnih profila. Stoga je korištena pojednostavljena prostorna diskretizacija na dijelu korita rijeke Neretve s primjenom srednje širine profila  $B_{SR}$ . Pojednostavljenje je provedeno na sljedeći način ([slika 2](#)):

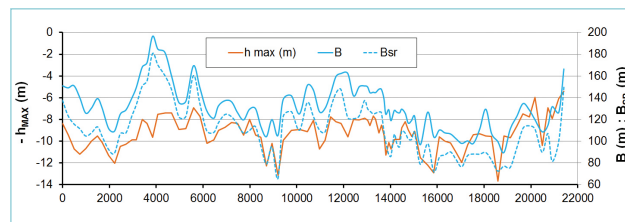
- kroz najdublju točku poprečnog profila izvučena je paralelna „crvena“ linija s „plavom“ linijom geodetske nule;
- vertikalna udaljenost  $h_{MAX}$  od linije geodetske nule do najniže kote dna profila dijeli se na pola,

te se na toj dubini polaže horizontalna „zelena“ linija od lijeve do desne obale (duljina te linije predstavlja  $B_{SR}$ );

Tako je za svaki profil definiran pripadan par vrijednosti ( $h_{MAX}$ ,  $B_{SR}$ ). Na [slici 3](#) prikazane su usvojene vrijednosti  $h_{MAX}$  i  $B_{SR}$  temeljem prethodno opisanog postupka. U osnovi, pojednostavljena diskretizacija cjelokupne prostorne domene je 3D, iako se uzduž Neretve koristi samo jedna numerička ćelija po širini korita i odgovarajući broj vertikalnih slojeva (praktički 2D u vertikalnoj ravnini). Primarna intencija ovog pojednostavljenja je da se smanji broj proračunskih čvorova i potrebno vrijeme proračuna, uz svjesnost da je time onemogućeno praćenje zaostale slane vode u 'džepovima' korita (retardacija saliniteta), odnosno bilo koja nehomogenost saliniteta u transferzalnom smjeru. Nadalje, proračunate brzine strujanja također imaju devijaciju od stvarnog 3D stanja, dok se dubine točno simuliraju provedbom kalibracijskih procedura (komentirano u nastavku).



Slika 2: Prilagodba izmjerenih poprečnih profila kroz primjenu diskretizacije s jednom dubinom ( $h_{MAX}$ ) i srednjom širinom ( $B_{SR}$ )

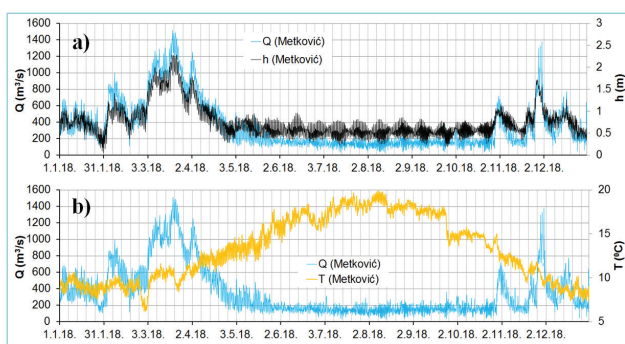


Slika 3: Usvojene vrijednosti  $h_{MAX}$  i  $B_{SR}$  temeljem prethodno opisanog postupka

### 2.2. Monitoring Neretve i akvatorija uokolo ušća Neretve

Protok i temperatura rijeke Neretve praćeni su na mjernoj postaji Neretva-Metković (stacionaža 20+909, [slika 1](#)), a na raspolaganju su podaci satne razlučivosti u razdoblju 1.1.2017.-1.1.2019 ([slika 4](#)). Protok je dobiven

integracijom izmjerenih brzina strujanja ADCP uređajem u proticajnom profilu. Nadalje, na istoj mjernoj postaji provodi se i kontinuirano limnigrafsko registriranje razine vodnog lica Neretve (slika 4), te se mjeri električna provodljivost vode u površinskom i pridnom sloju. Salinitet se preračunava iz izmjerene električne provodljivosti temeljem odgovarajućeg empirijskog obrasca. Mjerenje kontinuirane razdiobe saliniteta u vertikalnom profilu nije provedeno tijekom 2017. i 2018. godine. Međutim, u profilima Opuzen (9 + 850.0) i Komin (7 + 500.0) vertikalni profili saliniteta izmjereni su u nekoliko termina tijekom 2015. i 2016. godine (prikazano u kasnijim poglavljima ovog rada). Dinamika razine slobodne površine mora tijekom 2017. i 2018. godine mjerena je na limnigrafskoj postaji Mala Neretva-Ušće (slika 5).



Slika 4: Vremenski nizovi mjenjenih protoka i razine vodnog lica u satnoj rezoluciji na mjernoj postaji Metković za 2018. godinu (a), te protoka i temperature vode za 2017. godinu (b)

Na slici 5 prikazane su pozicije postaja na kojima je praćena temperatura i salinitet mora u sklopu recentnih nacionalnih programa monitoringa („Projekt Jadran“ i „Jadranski projekt“). Na postaji JPG-7 mjereni su vertikalni profili temperature i saliniteta mora u 5 termina tijekom provedbe *Jadranskog projekta* u razdoblju 2007. – 2008. (slika 6), dok su na postaji PL102 (*Projekt Jadran*) mjerene temperatura i salinitet mora u površinskom sloju mora, na dubinama 5 i 10 m, te u pridnom sloju na dubini 18m (slike 7 i 8).

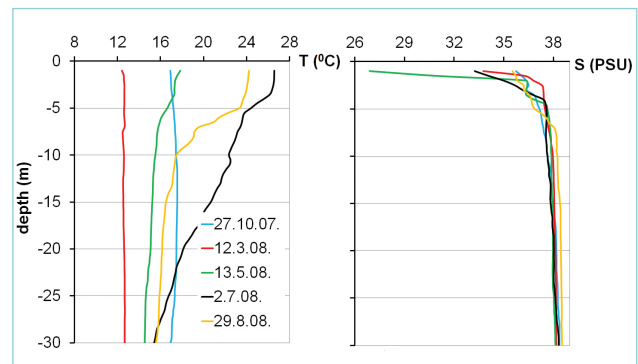


Slika 5: Pozicije mjernih postaja u sklopu monitoringa u akvatoriju uokolo ušća Neretve

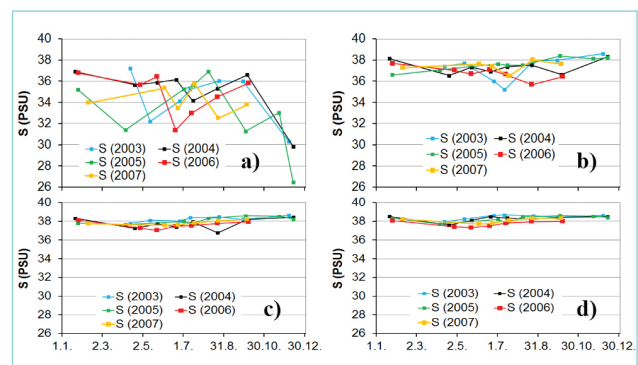
Rezultati sa slike 6 pokazuju da se pri protoku od 430 m³/s (izmjereno na postaji Žitomislići) u površinskom sloju mora na poziciji postaje JPG-

7 pojavljuje salinitet 27 PSU (13.5.2008), dok je pri protoku 162 m³/s (29.8.2008.) registriran salinitet 35.5 PSU (1 PSU = 1 g/l). Izražena promjena saliniteta mora zamire nakon dubine 5 m u svim terminima mjerenja (slika 6). Slični rezultati dobiveni su i mjerenjem saliniteta na poziciji mjerne postaje PL102 sa slike 5. Može se uočiti izraženi varijabilitet saliniteta u površinskom sloju mora tijekom godine i između pojedinih godina, kao posljedica uzvodne regulacije protoka Neretve (slika 7). Na dubini 5 m salinitet se pojavljuje u rasponu vrijednosti 35 – 38.2 PSU, ovisno o protocima Neretve, dok salinitet na dubini većoj od 10 m varira unutar samo 1 PSU (slika 7).

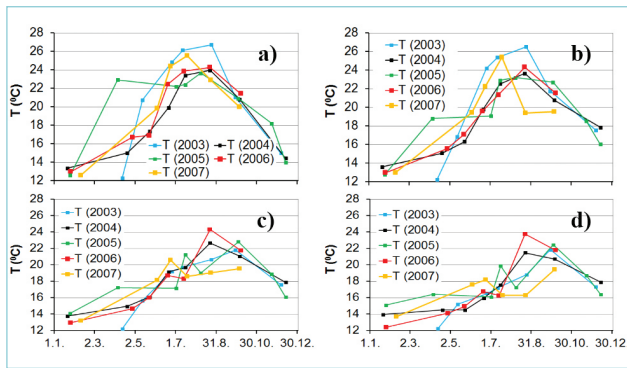
Temperatura mora u akvatoriju uokolo ušća je kroz cijelu godinu više od temperature Neretve na poziciji Metković, a tijekom ljetnih mjeseci ta razlika doseže ≈ 2 – 7°C (slika 8). Obzirom da promjena gustoće vode pri promjeni temperature od 5 °C približno odgovara promjeni gustoće vode pri promjeni 1 PSU saliniteta, može se konstatirati da razlika u temperaturi vode znatno manje utječe na dinamiku prodora slanog klina u korito Neretve od samog saliniteta. Sa slike 8 se može uočiti da su promjene temperature mora najviše izražene između 5 i 10 m dubine. Prezentirani mjerene vrijednosti temperature i saliniteta mora korišteni su i u sintezi rubnih uvjeta za skalarna polja na otvorenoj granici mora, a kako je to objašnjeno u narednom poglavlju



Slika 6: Vertikalne raspodjela temperature i saliniteta mora u mjernom CTD profilu tijekom razdoblja 27.10.2007 – 1.11.2008. (postaja JPG-7,  $\varphi = 43.033$  ;  $\lambda = 17.329$ )



Slika 7: Izmjereni salinitet mora na poziciji mjerne postaje PL102 u sklopu Projekta Jadran u razdoblju 2003. –2007. godine (a – površina, b – dubina 5m, c – dubina 10m, d – dubina 18m)

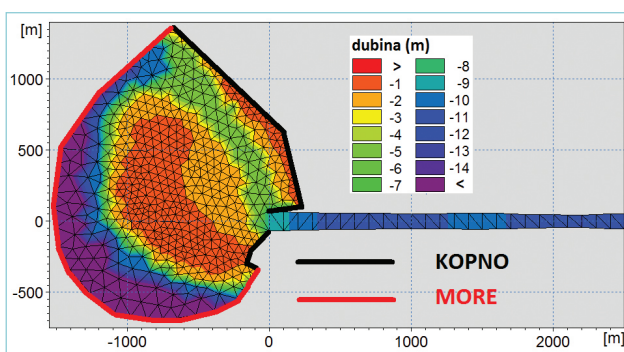


Slika 8: Izmjerena temperatura mora na poziciji mjerne postaje PL102 u sklopu Projekta Jadran u razdoblju 2003.-2007. godine (a – površina, b – dubina 5m, c – dubina 10m, d – dubina 18m)

### 2.3. Uspostavljeni 3D numerički model (Mike 3fm)

Numerički model Mike 3fm ([www.dhigroup.com](http://www.dhigroup.com)) zasnovan je na metodologiji konačnih volumena, uz nestrukturiranu prostornu diskretizaciju s triangularnim i/ili kvadrilateralnim ćelijama, te s inkorporiranom Smagorinsky formulacijom turbulencije u horizontalnom i  $k-\epsilon$  formulacijom turbulencije u vertikalnom smjeru (Lončar i sur., 2011.). Prostorna diskretizacija u horizontalnom smjeru je varijabilna. U zoni mora udaljenost između težišta susjednih triangularnih ćelija je od 20 m do 80 m, a uzduž modelirane dionice toka Neretve od 50 do 80 m (slika 9). Širina proračunskih ćelija od stacionaže 0+000m do 21+409.8m je varijabilna i odgovara prethodno proračunatim  $B_{SR}$  (slika 3). Od stacionaže 21+409.8m do uzvodnog rubnog uvjeta (25+000m) širina proračunskih ćelija je konstantna i istovjetna širini na stacionaži 21+409.8m. U vertikalnom smjeru korištena su dva "sigma" sloja od slobodnog vodnog lica do dubine 0.5 m, te "z" slojevi debljine 1 m do dna.

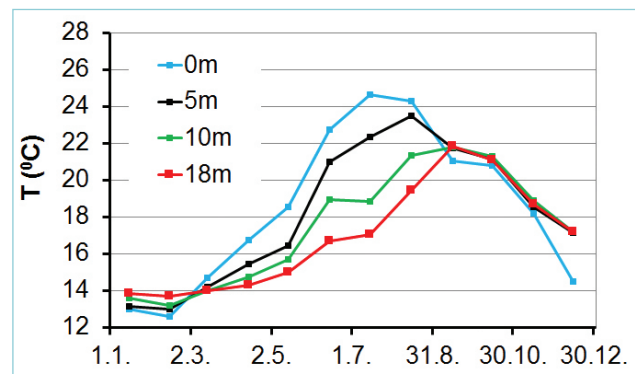
Na modeliranom području postavljene su „krute“ i „otvorene“ granice (slika 9). Krute granice odgovaraju kontaktnoj liniji akvatorijalnog dijela sa linijom obale. Te granice su nepropusne i kroz njih nema fluksa polja brzina (crna boja – kopno). Na otvorenoj granici mora postavljena je vremenska serija izmjerenih razina vodnog



Slika 9: Primijenjena modelna diskretizacija za akvatorij ušća i riječne dionice do stacionaže 2+500m

lica na limnografskoj postaji Mala Neretva – Ušće (slika 5; crvena boja – more).

Nažalost, tijekom recentnog razdoblja korištenog za kalibraciju i validaciju numeričkog modela (2017.-2018.), nisu bila provedena mjerenja temperature i saliniteta mora. Stoga je nestacionarno polje saliniteta mora interpretirano kroz korelaciju površinskog saliniteta mora s izmjerenim protocima u 2007. i 2008.godini, te usvajanjem linearne promjene od površine mora do dubine 5 m, gdje je salinitet stacionaran i aproksimiran s vrijednosti 37 PSU. Od 5 m do 10 m usvojena je linearna promjena od 37 do 38 PSU, te 38 PSU dalje do dna. Za polje temperature korištena je vertikalna razdioba dobivena osrednjavanjem izmjerenih vrijednosti (slika 8) po mjesecima za razdoblje od 2003. do 2008. godine (slika 10). Na otvorenoj granici rijeke Neretve (stacionaža 25+000m) korišteni su vremenski nizovi izmjerenih protoka i temperature na mornoj postaji Metković sa satnom rezolucijom podataka (slika 4). Salinitet je parametriziran s vrijednosti 0 PSU.



Slika 10: Primijenjena vertikalna razdioba temperatura mora na otvorenoj granici modela Mike 3fm (osrednjene izmjerene vrijednosti po mjesecima za razdoblje 2003.-2008.)

Zatvaranje modela turbulencije oslanja se na  $k-\epsilon$  formulaciju (Ferziger, 1987.; Rodi, 1987.) u vertikalnom smjeru i Smagorinsky koncept (1993.) u horizontalnom smjeru. Vrijednost konstante  $c_{3\epsilon}$  u  $k-\epsilon$  modelu turbulencije usvojena je s vrijednosti 0 (Plate i sur., 1997.). Faktori proporcionalnosti za polja turbulentne kinetičke energije ( $TKE$ ) i disipacije ( $\epsilon$ ) usvojeni su s vrijednostima 1 ( $TKE$ ) i 1.3 ( $\epsilon$ ) u horizontalnom i vertikalnom smjeru. Za empirijski parametar  $c_s$  u Smagorinsky modelu usvojena je vrijednost 0.1 (Sagaut, 2006., Lu, 2007.). Koeficijenti turbulentne disperzije za skalarna polja temperature i saliniteta definirani su faktorima proporcionalnosti (Prandtllov broj), a za potrebe proračuna usvojene su vrijednosti  $K_{D-Z} = 10^{-6}$  (vertikalni smjer) i  $K_{D-XY} = 1$  (horizontalni smjer). Uvjet morskih razina na otvorenoj granici uvučen je kroz jaku formulaciju temeljem teorije karakteristika (Sleigh i Gaskel, 1998.). Hrapavost je definirana s apsolutnom hrapavosti i predstavlja kalibracijski parametar (usvojena je homogena vrijednost 0.18m).

### 3. REZULTATI KALIBRACIJSKIH I VALIDACIJSKIH SIMULACIJA

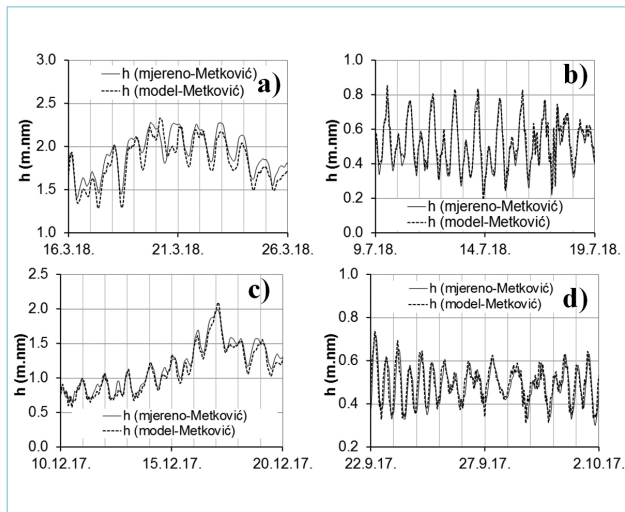
Na **slici 11** prikazana je usporedba modeliranih i izmjerenih razina vodnog lica Neretve na lokaciji Metković za dvije sekvence (malog i velikog protoka) u 2018. i 2017. godini. Na **slici 12** prikazana je usporedba modeliranog i izmjerenog pridnenog saliniteta Neretve na lokaciji Metković za 2018. i 2017. godinu. Na **slici 13** prikazano je polje saliniteta u vertikalnom presjeku uzduž simetrale Neretve za tri sukcesivna termina uzvodnog napredovanja slanog klina (11.5.2018. 15:00, 13.5.2018. 15:00 i 15.5.2018. 15:00) i termin maksimalnog dosegla slanog klina (2.8.2018.9:00).

Modelska dinamika razine vodnog lica i prodora slanog klina (**slike 11 i 12**) u suglasju je s izmjerenom, uz napomenu da rezultati numeričkog modela pokazuju brže povlačenje slanog klina nakon povećanja protoka nego što je to razvidno iz rezultata mjerenja. Mjerene

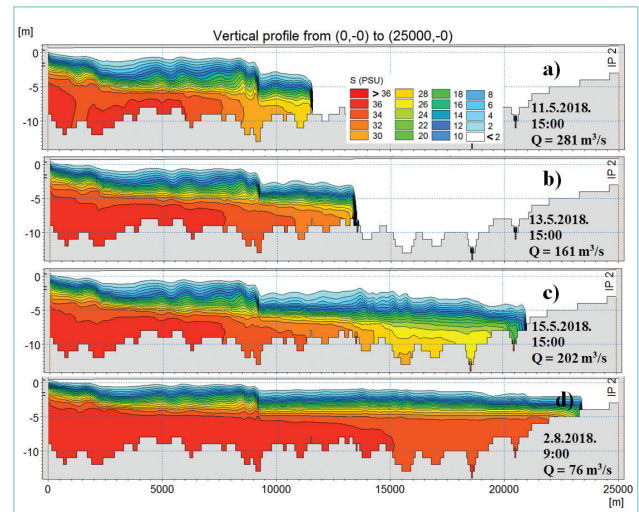
vrijednosti rezultati modeliranja upućuju na zaključak da pri nestacionarnom protoku  $> 700 \text{ m}^3/\text{s}$  dolazi do potpunog istiskivanja slanog klina iz riječnog korita, dok pri protoku  $< 200 \text{ m}^3/\text{s}$  slani klin penetrira do uzvodne stacionaže 20+909.0 m (Metković).

Rezultati prikazani na **slici 13** pokazuju da korištena vertikalna rezolucija proračunske mreže  $\Delta z = 1 \text{ m}$  daje zonu tranzicije saliniteta od 2 PSU do 36 PSU kroz 4.4 m. Na **slici 14** prikazani su izmjereni vertikalni profili saliniteta na lokaciji Komin (7 + 500.0) i Opuzen (9 + 850.0) u terminu 28.7.2015, pri srednjem dnevnom protoku Neretve od  $137 \text{ m}^3/\text{s}$  (izmjereno na postaji Metković). Izmjereni profili ukazuju na izraženu uslojenost toka s tranzicijskom zonom saliniteta od samo 0.5 m, a što nije uspješno reproducirano numeričkim modelom.

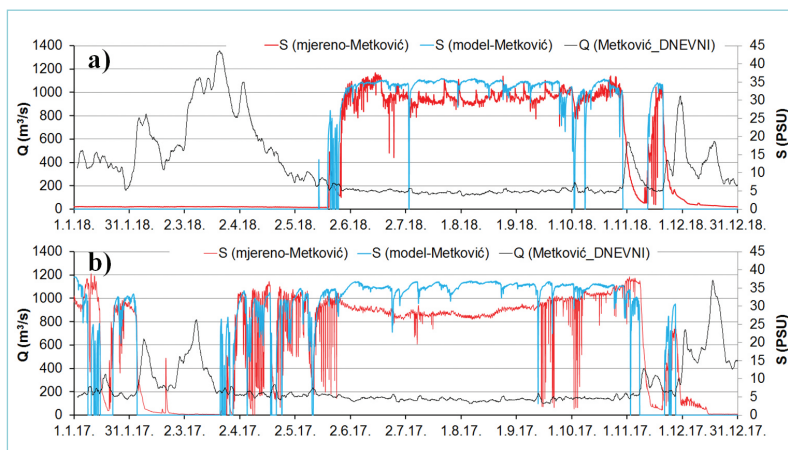
Za odabrani  $\Delta z = 1 \text{ m}$  disperzija modela i svi njegovi oblici šire tranzicijsku zonu više od 1m.



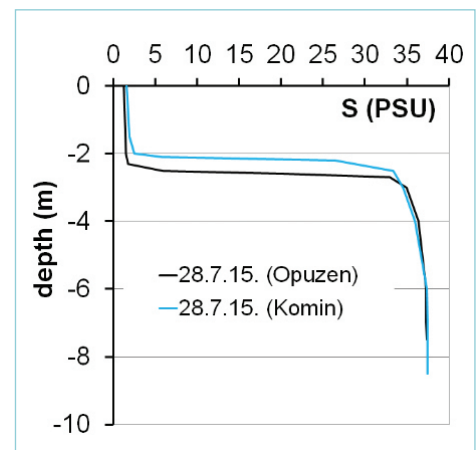
**Slika 11:** Usporedba modeliranih i izmjerenih razina vodnog lica Neretve na lokaciji Metković za sekvencu velikog protoka (a, c) i malog protoka (b, d) u 2018. (a, b) i 2017. (c, d) godini



**Slika 13:** Polje saliniteta u vertikalnom presjeku uzduž simetrale Neretve u uvjetima uzvodnog napredovanja slanog klina (a - 11.5.08, b - 13.5.08, c - 15.5.08) i maksimalnog uzvodnog dosegla slanog klina (d - 2.8.2018)



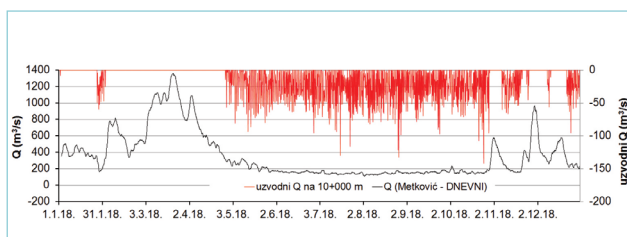
**Slika 12:** Usporedba modeliranog i izmjerenog pridnenog saliniteta Neretve na lokaciji Metković za 2018. (a) i 2017. godinu (b)



**Slika 14:** Izmjereni salinitet u vertikalnim profilima na lokaciji Komin i Opuzen u 2015. godini (Agronomski fakultet u Zagrebu, 2018.)

Ukoliko bi se željela potencijalno opisati zona miješanja od  $\sim 0.5$  m, trebalo bi koristiti jako visoku rezoluciju proračunske mreže, primjerice oko  $\Delta z = 0.1$  m. Jedno od „modelskih“ oružja, koje nažalost nije bilo raspoloživo u okviru korištenog numeričkog modela, je adaptivna metoda kojom se pronalazi zona velikog gradijenta saliniteta, te se tamo automatski proglašuje proračunska mreža. No, treba naglasiti da korišteni model dobro prepoznaje dinamiku kretanja slanog klina, što opravdava primijenjeni modelski pristup i daljnju prezentaciju glavnih rezultata ovog rada.

Na slici 15 prikazana je dinamika uzvodne komponente protoka kroz profil na stacionaži 10+000 m uslijed uzvodnog napredovanja donjeg zaslanjenog sloja vode, tzv. slanog klina, zajedno s vremenskom serijom dnevnih protoka na mjernoj postaji Metković. Sa slike 15 se može uočiti da pojava uzvodnog protoka na profilu na 10+000m nastupa pri dnevnim protocima Neretve manjim od  $300 \text{ m}^3/\text{s}$ . Također je razvidno da uzvodni protok dostiže maksimalnu vrijednost od  $140 \text{ m}^3/\text{s}$ . Shodno navedenom, zaključuje se da bi brana za sprječavanje prodora slatkog klina trebala biti aktivirana-podignuta pri protocima približno od  $300 \text{ m}^3/\text{s}$ .



Slika 15: Dinamika uzvodne komponente protoka na profilu 10+000 m i vremenska serija dnevnih protoka na postaji Metković

Tablica 1: Osnovna obilježja provedenih simulacija s usvojenim pozicijama brane (L-udaljenost od ušća) i usvojenim uvjetom podizanja i spuštanja brane temeljem srednjeg izmjerenog protoka na mjernoj postaji Metković u prethodnom razdoblju od 24 h ( $Q_{SR-24}$ ) ili 6 h ( $Q_{SR-6}$ )

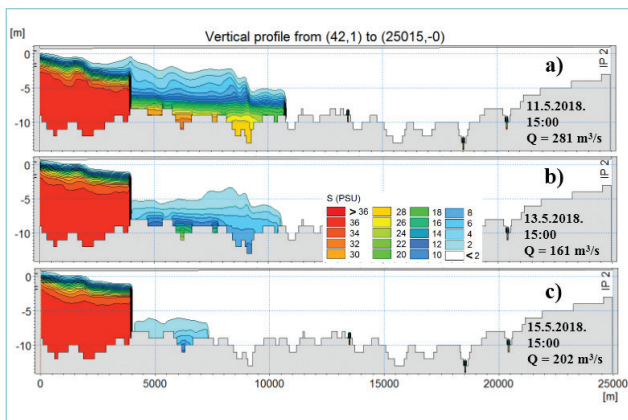
simulacija	Stacionaža L (m)	uvjet podizanja $Q_{SR}$ ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	visina dizanja t (m)
1	4000	<300 (24h)	-2
2	4000	<300 (6h)	-2
3	4000	<300 (24h)	-4
4	4000	<300 (6h)	-4
5	2000	<300 (24h)	-2
6	2000	<300 (6h)	-2
7	2000	<300 (24h)	-4
8	2000	<300 (6h)	-4
9	2000	<350 (24h)	-2
10	2/4/6/8000	<300 (24h)	-5

## 4. REZULTATI SIMULACIJA S HIPOTETSKIM BRANAMA

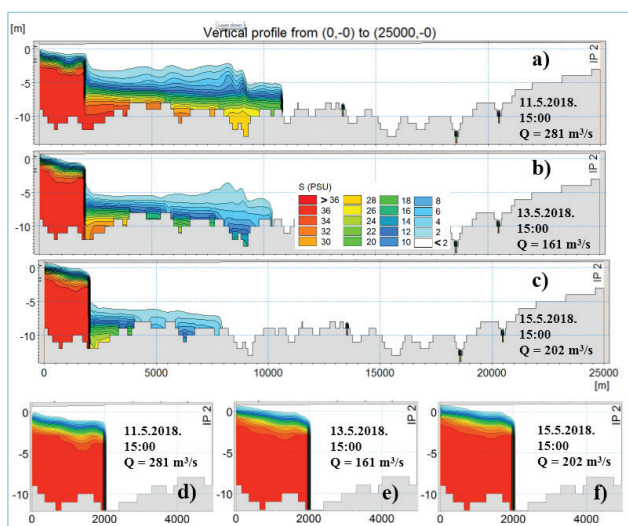
U tablici 1 prikazana su osnovna obilježja provedenih simulacija s usvojenim pozicijama brane (2+000.0 m, 4+000.0 m, te 2/4/6/8+000.0), te usvojenim uvjetom podizanja i spuštanja brane temeljem srednjeg izmjerenog protoka na mjernoj postaji Metković u prethodnom razdoblju od 24 h ( $Q_{SR-24} < 300$  i  $350 \text{ m}^3/\text{s}$  → podizanje brane) ili 6 h ( $Q_{SR-6} < 300 \text{ m}^3/\text{s}$  → podizanje brane). Nadalje, podizanje brane je simulirano u tri varijante, do dubine  $t = -2$  m,  $t = -4$  m i  $t = -5$  m a odvija se jednoliko kroz razdoblje od 3600 s (1h). Sve navedene simulacije provedene su za 2018. godinu.

Na slikama 16 i 17 prikazano je polje saliniteta u vertikalnom presjeku uzduž simetrale Neretve za tri sukcesivna termina (11.5.2018. 15:00, 13.5.2018. 15:00 i 15.5.2018. 15:00) u uvjetima simulacija 1 i 5. Utjecaj brane je razvidan kroz usporedbu s rezultatima prikazanim na slici 13. Rezultati sa slika 16 i 17 ukazuju na pojavu slane vode uzvodno od brane i nakon njenog podizanja. Podizanje brane prekida prostornu kontinuiranost slanog klina koji se prethodno protezao i uzvodnije od stacionaže brane, a tijekom nastavnih 4-5 dana dolazi do potpunog ispiranja uzvodnog dijela korita slatkim vodom. Slične situacije su registrirane i 28.1., 27.4., 30.4., 3.5., 10.5., 6.11. i 24.11. Razlika u rezultatima simulacija 1 i 5 je sadržana u tome da vrijeme ispiranja uzvodnog dijela korita od slane vode traje prosječno 1 dan dulje u uvjetima simulacije 5. Potrebno je napomenuti da tijekom cjelokupnog simulacijskog razdoblja nije registrirana pojava prelaska slane vode preko podignute brane. Promjenom uvjeta podizanja brane na  $Q_{SR-24} < 350 \text{ m}^3/\text{s}$  (simulacija 9, slika 17) osigurava se odsustvo slane voda uzvodno od tijela brane tijekom cijelog promatranog razdoblja (2018.). Zaključno se može konstatirati da usvajanje uvjeta iz simulacija 1 i 5 ( $Q_{SR-24} < 300 \text{ m}^3/\text{s}$ , podizanje brane do  $-2$  m dubine) osigurava jednakovrijedno rješenje koje je praktički neovisno o izboru stacionaže brane (2+000.0 m ili 4+000.0 m).

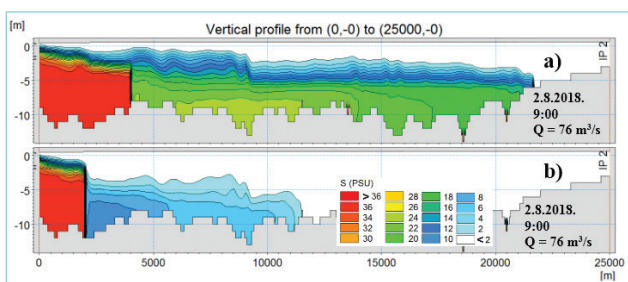
Na slici 18 prikazano je polje saliniteta u vertikalnom presjeku uzduž simetrale Neretve za termin 2.8.2018. 9:00 (maksimalni uzvodni doseg slanog klina, slika 13) u uvjetima simulacija 3 i 7. Rezultati upućuju na značajan utjecaj smanjene visine podizanja brane do dubine  $t = -4$  m. Postavljanjem brane na stacionaži 4+000.0 (simulacija 3) sve do 26.5. dobivaju se rezultati vrlo bliski onima iz simulacije 1, no nakon toga dolazi do praktički kontinuiranog prelaska slane vode preko brane te daljnjeg uzvodnog napredovanja slanog klina. Povoljnija situacija pojavljuje se u uvjetima simulacije 7 (brana na stacionaži 2+000.0 m), kada prelazak slane vode preko brane nastupa tek 9.7., te je značajno manjeg intenziteta. Zaključno se konstatira da branu treba podizati do  $-2$  m dubine.



Slika 16: Polje saliniteta u vertikalnom presjeku uzduž simetrale Neretve za uvjete simulacije 1 (a,b,c - brana na stacionaži 4+000.0 m, uvjet podizanja brane do dubine -2 m  $Q_{SR-24} < 300 \text{ m}^3/\text{s}$ )



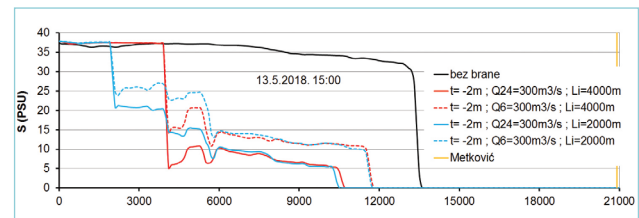
Slika 17: Polje saliniteta u vertikalnom presjeku uzduž simetrale Neretve za uvjete simulacije 5 (a,b,c - brana na stacionaži 2+000.0 m, uvjet podizanja brane do dubine -2 m  $Q_{SR-24} < 300 \text{ m}^3/\text{s}$ ) i simulacije 9 (d,e,f -  $Q_{SR-24} < 350 \text{ m}^3/\text{s}$ )



Slika 18: Polje saliniteta u vertikalnom presjeku uzduž simetrale za uvjete simulacije 3 (a) i 7 (b)

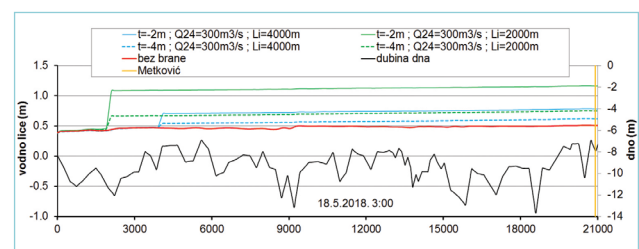
Promjena uvjeta podizanja brane s  $Q_{SR-24}$  (simulacije 1, 3, 5 i 7) na  $Q_{SR-6}$  (simulacije 2, 4, 6 i 8) djeluje nepoželjno u smislu povećanog broja situacija pojave slane vode uzvodno od brane i vremena potrebnog za ispiranje uzvodnog dijela korita (simulacije 2 i 6), te još intenzivnijeg prelaska slane vode preko brane (simulacije 4 i 8). Na slici 19 prikazana je usporedba modelskih rezultata saliniteta uzduž simetrale korita Neretve na

dubini -8 m za dionicu 0+000.0m → 21+000.0 m. Prikaz je dan za 13.5.2018. 15:00 u uvjetima simulacija 1, 2, 5 i 6 ( $Q_{SR-24} < 300 \text{ m}^3/\text{s}$  i  $Q_{SR-6} < 300 \text{ m}^3/\text{s}$ , podizanje brane do dubine -2m). Sa slike 19 se može uočiti da pri uvjetu  $Q_{SR-6}$  voda povećanog saliniteta dosiže veće uzvodne stacionaže za ~ 1.5 km. Zaključno se iznosi da je uvjet  $Q_{SR-24}$  povoljniji od  $Q_{SR-6}$  u kontekstu željenog sprječavanja uzvodnog širenja klina slane vode.



Slika 19: Usporedba modelskih rezultata saliniteta uzduž simetrale korita Neretve na dubini -8 m za dionicu 0+000.0 m → 21+000.0 m

Na slici 20 prikazana je usporedba razina vodnog lica uzduž simetrale korita Neretve na dionici 0+000.0m → 21+000.0 m za 18.5.2018. 3:00. Prikaz je dan komparativno za stanje bez brane i u uvjetima simulacija 1, 3, 5 i 7 (tablica 1). Obzirom da se na stacionaži Metković pri maksimalnim protocima Neretve pojavljuju razine vodnog lica veće od 2.2 m (slike 4 i 11), formirani uspor uslijed podizanja brane neće izazvati plavljenje uzvodnih površina.

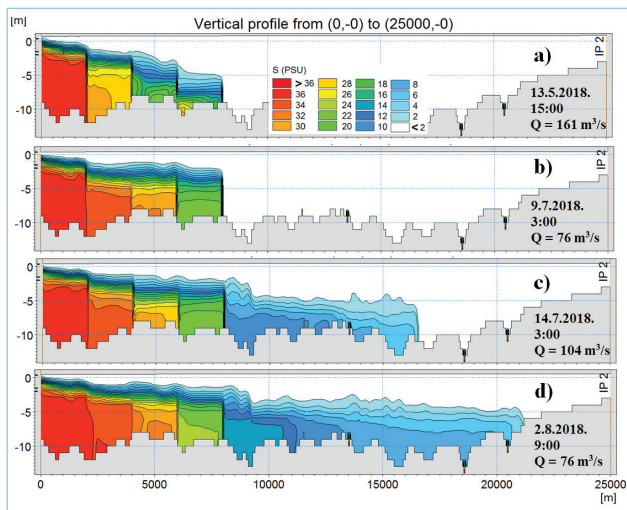


Slika 20: Razine vodnog lica uzduž simetrale korita Neretve za dionicu 0+000.0m → 21+000.0 m u uvjetima simulacija 1, 3, 5 i 7 za 11.5.2018. 18:00

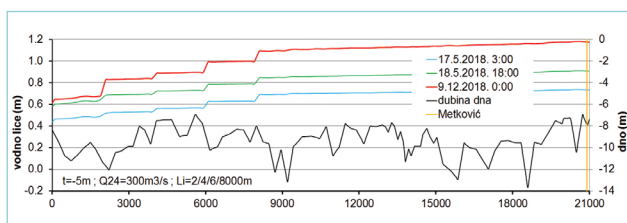
Na slici 21 prikazano je polje saliniteta u vertikalnom presjeku uzduž simetrale Neretve za termine (13.5.2018. 15:00, 9.7.2018. 3:00, 14.7.2018. 3:00 i 2.8.2018. 9:00) u uvjetima simulacije 10 (vidi usporedno s rezultatima prikazanim na slikama 13, 16, 17 i 18). Sa slike 21 se može prepoznati zadržavanje slane vode u odjeljcima ograničenim s podignutim branama na stacionažama 2/4/6/8+000.0 m sve do 9.7.2018 3:00 (slika 21a,b). Nakon toga dolazi do prodora slane vode uzvodno od brane postavljene na 8+000.0 m, prelaskom slane vode preko podignute brane do dubine -5 m (slika 21c). U nastavnom periodu malih protoka izostaje ispiranje uzvodnog dijela korita slatkom vodom, a slana voda napreduje sve do Metkovića (slika 21d). Svakako treba napomenuti da podizanje brane do -5 m dubine u simulaciji 10 omogućuje plovost Neretve do Metkovića



za maksimalni gaz broda od 4.5 m, uz pretpostavku da brod može svladati denivelacije vodnog lica koje se pojavljuju iznad svake brane. Tijekom analiziranog razdoblja najveća denivelacija pojavila se 9.12.2018. 0:00 iznad brane na 2+000.0 m, te je iznosila 0.14 m (slika 22). Primijenjeni numerički model nije imao u fokusu istraživanje ovog hidrauličkog detalja, pa navedena vrijednost denivelacije ima informativnu vrijednost.



Slika 21: Polje saliniteta u vertikalnom presjeku uzduž simetrale Neretve za uvjete simulacije 10 (a,b,c,d - brane na stacionažama 2/4/6/8+000.0 m, uvjet podizanja brane do dubine -5 m  $Q_{SR-24} < 300 \text{ m}^3/\text{s}$ )



Slika 22: Razine vodnog lica uzduž simetrale korita Neretve za dionicu 0+000.0m -> 21+000.0 m u uvjetima simulacije 10

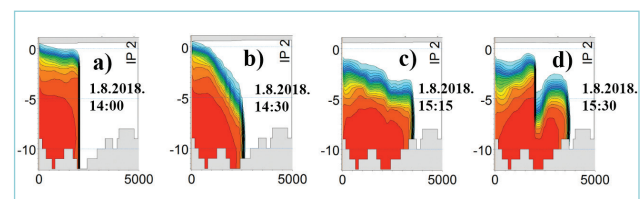
## 5. MANEVRIRANJE S BRANOM RADI OSIGURANJA PLOVNOСТИ

Izvedba brane na Neretvi je svrsishodna samo ukoliko se postiže integralno rješenje problema vezanog uz zaslanjivanje korita, a da se time ipak ne naruši trenutna kontinuirana plovnost do Metkovića za brodove maksimalnog gaza 4.5 m. U tom smislu, poželjno je izvesti branu što bliže ušću, s ciljem skraćivanja dionice na kojoj se okolni vodonosnik prihranjuje slanom vodom iz otvorenog vodotoka. Također je potrebno osigurati kontinuirano slatku vodu uzvodno od brane za zbrinjavanja melioracijskih potreba za vodom. Zadovoljenje prethodno navedene dvije potrebe moguće je postići usvajanjem uvjeta  $Q_{SR-24} < 350 \text{ m}^3/\text{s}$  za podizanje brane do dubine -2m. To dokazuju rezultati simulacije 9. No, time ostaje neriješeno pitanje plovidbe.

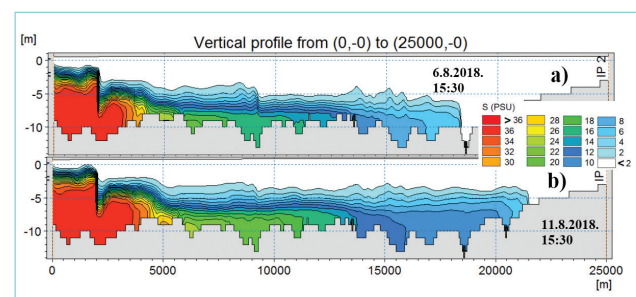
Ukoliko se taj problem rješava spuštanjem brane u nekom kraćem razdoblju, u kojem bi se propustili brodovi, otvara se pitanje o intenzitetu uzvodnog pronosa soli tijekom razdoblja spuštene brane. Kako bi se dobio odgovor na to pitanje, napravljena je dodatna simulacija u kojoj se analizira razdoblje malih protoka 1.8.2018. – 11.8.2018. U ovoj simulaciji brana je inicijalno podignuta do dubine -2 m, a čime je osigurano zadržavanje slane vode nizvodno od brane. Spuštanje brane se ostvaruje svakog kalendarskog dana s početkom u 14:00 h. Spuštanje se odvija kroz 15 minuta, nakon toga brana je spuštana kroz narednih 60 minuta, te se ponovno podiže do dubine -2 m kroz 15 minuta.

Na slici 23 prikazano je polje saliniteta u vertikalnom presjeku uzduž simetrale Neretve neposredno prije početka prvog spuštanja brane (1.8.2018. 14:00), 15 minuta nakon potpunog spuštanja brane (1.8.2018. 14:30), nakon isteka 60 minuta spuštene brane (1.8.2018. 15:15), te nakon ponovnog podizanja brane (1.8.2018. 15:30). Na slici 24 dan je prikaz za 6.8 i 11.8., odmah nakon ponovnog podizanja brane u datom kalendarskom danu (15:30).

Prikazani rezultati sa slika 23 i 24 pokazuju da tijekom razdoblja malih protoka Neretve analizirana regulacija podizanja i spuštanja brane (jednom dnevno sat vremena spuštana brana) uzrokuje propuštanje slane vode uzvodno od brane sve do Metkovića. Međutim, ta voda ipak ima znatno manji pridneni salinitet od one koja se pojavljuje bez brane (slika 23d), te će znatno manja količina soli prodirati u okolni vodonosnik. S druge strane, eventualni uzvodni zahvat vode za melioracijske potrebe bio bi ugrožen pojavom vode saliniteta većeg od 2 PSU.



Slika 23: Polje saliniteta u vertikalnom presjeku uzduž simetrale Neretve (a - neposredno prije početka spuštanja brane u prvom danu, b - 15 minuta nakon potpunog spuštanja brane, c - nakon 60 minuta spuštene brane, d - nakon ponovnog podizanja brane)



Slika 24: Polje saliniteta u vertikalnom presjeku uzduž simetrale Neretve (a - 120h nakon spuštanja/podizanja brane 6.8.2018., b - nakon spuštanja/podizanja brane 11.8.2018.)

## 6. ZAKLJUČAK

Provedena je numerička analiza dinamike saliniteta u koritu rijeke Neretve pri postojećem stanju i u uvjetima izvedbe zaštitne brane u profilima 2+000.0 m i 4+000.0 m, odnosno brana u profilima 2/4/6/8+000.0 m. Spuštanje i podizanje brane regulirano je uvjetom srednjeg protoka u Metkoviću za prethodno razdoblje od 24 h ( $Q_{SR-24}$ ) ili 6 h ( $Q_{SR-6}$ ). Kroz 10 simulacija promatrani su slučajevi podizanja brane pri  $Q_{SR-24} < 300$  i  $350 \text{ m}^3/\text{s}$ , te pri  $Q_{SR-6} < 300 \text{ m}^3/\text{s}$ . Podizanje i spuštanje brane se odvija kroz 3600 s a analizirane su situacije s podizanjem brane do dubine -2 m, -4 m i -5 m. Kalibracija i validacija numeričkog modela oslanja se na izmjereni protok, razinu vodnog lica i salinitet u 2017. i 2018. godini. U okviru provedbe numeričkih simulacija nije se ušlo u detalje načina izvedbe brane i njeno konstruktivno rješenje.

Usporedbom rezultata mjerenja i modeliranja potvrdila se primjerena parametrizacija numeričkog modela u segmentu hrapavosti i viskoznosti, a što rezultira pouzdanim rezultatima dubina. Modelski rezultati pridnenog saliniteta na poziciji Metković također ukazuju na pouzdanost modelskih rezultata u smislu interpretacije trajanja zaslanjivanja na stacionažama do Metkovića, dok modelska vertikalna raspodjela saliniteta ukazuje na utjecaj numeričke difuzije i pretjerano intenzivnog miješanja u vertikalnom smjeru.

Rezultati modelskih simulacija s branom pokazali su da se sprječavanje uzvodnog širenja slanog klina uzvodno od brane može ostvariti usvajanjem uvjeta za podizanje brane  $Q_{SR-24} < 300 \text{ m}^3/\text{s}$ , uz podizanje brane do dubine  $t = -2$  m. Navedeni uvjet istovjetan je za analizirane lokacije – stacionaže brane (2+000.0 m ili 4+000.0 m). Podizanje brane do dubine  $t = -4$  m ne prekida uzvodno napredovanje slanog klina u željenoj mjeri, budući da se slana voda širi uzvodno

prelaskom preko brane. Obzirom da je prepoznato modelsko preintenzivno miješanje slane i slatke vode u vertikalnom smjeru, izneseni komentar o neprimjerenosti izbora  $t = -4$  m treba uzeti s rezervom. Primjenom uvjeta za podizanje brane  $Q_{SR-24} < 350 \text{ m}^3/\text{s}$  postiže se kontinuirano slatka voda uzvodno od brane tijekom cijelog razdoblja simulacija.

Izvedba četiri brane na stacionažama 2/4/6/8+000.0 m, sa istovjetnom regulacijom i podizanjem do dubine -5m (mogućnost kontinuirane plovnosti do Metkovića za brodove gaza 4.5 m), ne omogućava kontinuirano zadržavanje slane vode uzvodno od 8+000.0 m.

Regulacija podizanja i spuštanja brane za vrijeme malih protoka (jedan sat spuštana brana) uzrokuje uzvodno napredovanje slane vode sve do Metkovića, a čime se ugrožava i eventualni uzvodni zahvat vode za melioracijske potrebe.

Potrebno je napomenuti da se zbog planirane daljnje izgradnje hidroenergetskog sustava na području gornje Neretve trebaju očekivati bitne izmijene dotoka u područje donje Neretve, posebice u sušnom razdoblju (negativne posljedice). S druge strane, deficit vode za sve potrebe u dolini realno se može nadomjestiti samo iz rijeke Neretve, pa relevantno tehničko rješenje mora osiguravati minimum utroška pogonske energije. Upravo zbog toga je branom (pregradom) potrebno osigurati visoku kotu nezaslanjene vode, koja će efikasno spriječiti prodor mora.

U nastavku istraživanja analizirati će se mogućnosti izbora drugih lokacija-stacionaža postavljanja brane, te utjecaj povećanja vertikalne razlučivosti proračunske mreže na smanjenje numeričke difuzije i rezultate numeričkih simulacija, odnosno mogućnost pouzdanijeg definiranja tranzicijske zone saliniteta u vertikalnom smjeru. Također će se detaljnije razraditi samo tehničko rješenje pregrade te će se istražiti međudjelovanje s bližim i daljim okruženjem na razini sliva. ■

## LITERATURA

- Agronomski fakultet u Zagrebu (2005.): *Nacionalni projekt navodnjavanja i gospodarenja poljoprivrednim zemljištem i vodama u Hrvatskoj*, Zagreb.
- Agronomski fakultet u Zagrebu (2018.): *Monitoring tala u dolini rijeke Neretve – petogodišnje izvješće za Hrvatske vode*, Zagreb.
- Ferziger, J.H. (1987): Simulation of Incompressible Turbulent Flows, *J. Comp. Physics*, 69, str. 1–48.
- Krvavica, N., Mofardin, B., Ružić, I., Ožanić, N. (2012.): Mjerenje i analiza zaslanjivanja na ušću Rječine, *Gradevinar*, 64(11), str. 923–933.
- Krvavica, N., Travaš, V., Ožanić, N., (2016): A field study of interfacial friction and entrainment in a microtidal salt-wedge estuary. *Environmental Fluid Mechanics*, 16(6), str. 1223–1246.
- Krvavica, N., Kožar, I., Travaš, V., Ožanić, N. (2017a): Numerical modelling of two-layer shallow water flow in microtidal salt-wedge estuaries: Finite volume solver and field validation, *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 65(1), str. 49–59.
- Krvavica, N., Travaš, V., Ožanić, N., (2017b): Salt-Wedge Response to Variable River Flow and Sea-Level Rise in the Microtidal Rječina River Estuary, Croatia. *Journal of Coastal Research*, 33(4), str. 802–814.
- Legović, T. (1991.): Exchange of water in stratified estuary with an application to Krka (Adriatic sea), *Marine Chemistry*, 32, str. 121–135.
- Lončar, G., Beg Paklar, G., Janeković, I. (2011): Influence of density stratification on the effluent plume dynamics, *Oceanologia*, 53 (2), str. 565–585
- Lu., H. (2007): *One-equation Les modeling of rotating turbulence*, Dissertation, University of Wisconsin, 120 str.
- Ljubenkov, I., Vranješ, M. (2013.): Zaslanjivanje ušća rijeke Jadro – mjerenje i hidrodinamičko modeliranje, *Hrvatske Vode*, 21(85), str. 225–234.
- Ljubenkov, I. (2015.): Hydrodynamic modeling of stratified estuary: case study of the Jadro River (Croatia), *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 63(1), str. 29–37.
- Oskoruš, D., Krvavica, N., Švonja, M. (2019): Metoda proračuna dnevnih protoka Neretve u Metkoviću. U: Biondić, D., Holjević, D., Vizner, M. (ur.), *7. hrvatska konferencija o vodama „Hrvatske vode u zaštiti okoliša i prirode“*, Zbornik radova.
- Plate, E.J., Fedorovich, E.E., Viegas, D.X., Wyngaard, J.C. (1997.): *Bouyant Convection in Geophysical Flows*, NATO ASI series, Series C: Mathematical and Physical Sciences – vol 513, Springer-Science + Business Media, 490 str.
- Projektni biro Split d.o.o. (2014.): *Idejni projekt „Sustav navodnjavanja Donja Neretva, podsustav Opuzen“*.
- Rodi, W. (1993): *Turbulence Models and Their Application in Hydraulics – A State of the Art Review*, IAHR Monographs, CRC Press, 124 str.
- Romić, D., Zovko, M., Romić, M., Ondrašek, G. and Salopek, Z., (2008.): Quality aspects of the surface water used for irrigation in the Neretva Delta (Croatia), *Journal of Water and Land Development*, 12, str. 59–70.
- Romić, D., Zovko, M., Bubalo Kovačić, M., Ondrašek, G., Bakić Begić, H., Romić, M. (2019.): Procesi, dinamika i trend zaslanjivanja voda i tla u poljoprivrednom području doline Neretve, U: Biondić, D., Holjević, D., Vizner, M. (ur.), *7. hrvatska konferencija o vodama „Hrvatske vode u zaštiti okoliša i prirode“*, Zbornik radova.
- Romić, D., Bubalo Kovačić, M., Zovko, M., Romić, M., Castrignano, A. (2018.): Zaslanjivanje vode i tla u dolini Neretve – prirodni procesi i antropogeni utjecaj, U: Rubinić, J., Ivanković, I., Bušelić, G. (ur.), *Zbornik radova znanstveno-stručnog skupa s međunarodnim sudjelovanjem “Hidrologija u službi zaštite i korištenja voda, te smanjivanja poplavnih rizika – suvremeni trendovi i pristupi”*, Brela, 18. – 20. listopada 2018.
- Romić, D., Vranješ, M. (2006.): *Navodnjavanje u donjoj Neretvi*, Studija, Agronomski fakultet Sveučilišta u Zagrebu i Građevinsko-arhitektonski fakultet Sveučilišta u Splitu.
- Sagaut, P. (2006): *Large Eddy Simulation for Incompressible Flows*, Springer Science & Business Media, 556 str.
- Sleigh, D. H., Gaskel, P. H. (1998): An unstructured finite volume algorithm for predicting flow in rivers and estuaries, *Computer and Fluids*, 27(4), str. 479–508.
- Smagorinsky, J. (1993): Some historical remarks on the use of nonlinear viscosities, In: *Large eddy simulations of complex engineering and geophysical flows* (B. Galperin and S. Orszag Eds.), Cambridge Univ. Press, 1993, str. 1–34.
- Travaš, V., Krvavica, N., Žic, E. (2015.): Numerički model protjecanja kroz pregradni presjek i stanje vodostaja rijeke Neretve, Građevinski fakultet, Sveučilište u Rijeci, Rijeka.
- Vranješ, M., Romić, D. (2011.): Pregrađivanje rijeke Neretve, U: Biondić, D., Holjević, D., Tropan, Lj. (ur.), *Zbornik radova 5. Hrvatske konferencije o vodama „Hrvatske vode pred izazovom klimatskih promjena“*, Opatija, 18.–21. svibnja 2011.
- Vranješ, M., Sinovčić, I., Malenica, L. (2015.): *Numerički model pokretne pregrade u rijeci Neretvi*, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Sveučilišta u Splitu, 84 str.

### Numerical analysis of dam action preventing saltwater intrusion along the Neretva riverbed

**Abstract.** A numerical analysis of saltwater transfer in the Neretva river bed in the section 0+000.0 m – 25+000.0 m was conducted using a 3D numerical model. In addition to the existing state of the riverbed, hypothetical situations including a construction of one dam in the profile 2+000.0 m (large depth and small width) or 4+000.0 m (small depth and large width) as well as the construction of 4 dams in the profiles 2/4/6/8+000.0 were also analyzed. The regulation of dam lifting and lowering is related to the mean measured discharge at the monitoring station Metković in the previous 24-hour period ( $Q_{SR-24}$ ) or 6-hour period ( $Q_{SR-6}$ ). In the situations where  $Q_{SR-24} > 300$  and  $350 \text{ m}^3/\text{s}$  and  $Q_{SR-6} > 300 \text{ m}^3/\text{s}$ , the dam was fully lowered whereas at smaller mean discharge values the dam is lifted up to a certain level (from -2 m to -5 m) during one hour. The 3D numerical model Mike 3fm, based on the finite volume method, was implemented. The discharges, levels and salinity measured at monitoring stations in 2018 were used for the model calibration and the 2017 data for the model results validation. Data on the sea temperature and salinity in the waters of the Neretva river mouth were taken from the national marine environment monitoring programmes. The model dynamics of the upstream-downstream translation of the salt "wedge" in non-stationary circulation conditions is in line with the measurements. The model thickness of the dividing zone between the freshwater and saltwater is larger than the one measured as a result of the numerical diffusion and adopted discretization of the calculation in the vertical direction of 1 m. The measured values and modeling results point to the conclusion that a complete extrusion of the salt "wedge" from the riverbed occurs at non-stationary discharges larger than  $700 \text{ m}^3/\text{s}$  whereas the salt "wedge" advances upstream to 20+909.0 m (Metković) and further at discharges lower than  $150 \text{ m}^3/\text{s}$ .

If the intrusion of the salt "wedge" upstream of the dam (2+000.0 m or 4+000.0 m) is to be prevented, a dam with a lifting to the depth of -2 m, under the condition of dam lifting at  $Q_{SR-24} < 300 \text{ m}^3/\text{s}$ , must be executed.

**Key words:** Neretva River, river mouth, numerical model, saltwater intrusion, dam

### Numerische Analyse der Wirkung der Schleuse auf die Verhinderung von Salzwasserintrusion entlang des Flusses Neretva

**Zusammenfassung.** Mit Hilfe eines numerischen 3D-Modells wurde die numerische Analyse der Dynamik des Salztransportes im Fluss Neretva auf der Strecke 0+000.0 m – 25+000.0 m durchgeführt. Neben dem aktuellen Zustand des Flussbettes wurden auch hypothetische Situationen analysiert, in welchen eine Schleuse mit Profil von 2+000.0 m (große Tiefe und kleine Breite) oder 4+000.0 m (kleine Tiefe und große Breite) und vier Schleusen mit Profilen von 2/4/6/8+000.0 m ausgeführt wurden. Die Regulierung von Öffnung und Schließung der Schleuse hängt vom mittleren Durchfluss ab, der an der Messstation Metković in den vorläufigen 24 ( $Q_{SR-24}$ ) oder 6 ( $Q_{SR-6}$ ) Stunden gemessen wurde. In den Situationen  $Q_{SR-24} > 300$  und  $350 \text{ m}^3/\text{s}$ , bzw.  $Q_{SR-6} > 300 \text{ m}^3/\text{s}$ , ist die Schleuse geschlossen, während im Falle von niedrigeren mittleren Durchflusswerten die Schleuse bis zu einer bestimmten Höhe (von -2 m bis -5 m) auf eine Stunde geöffnet wird. Das numerische 3D-Modell Mike 3fm, das auf der Methode der finiten Elemente gründet, wurde eingesetzt. Zur Kalibrierung des numerischen Modells wurden die in 2018 an Überwachungsstationen gemessenen Werte von Durchflüssen, Wasserständen und Salinität genutzt, während zur Validierung der Modellergebnisse die Angaben aus dem Jahr 2017 genutzt wurden. Die Angaben zur Temperatur und Salinität an der Mündung der Neretva wurden aus den nationalen Programmen zur Überwachung der Meeresumwelt übernommen. Die Modelldynamik des Vordringens des Salzkeils flussaufwärts und flussabwärts bei der nichtstationären Strömung stimmt mit den Messungen überein. Die Modelldichte der Übergangzone zwischen Süßwasser und Salzwasser ist höher als die gemessene Dichte, was als Folge der numerischen Diffusion und angenommenen Diskretisierung in der vertikalen Richtung von einem Meter gesehen wird. Die gemessenen Werte und die Ergebnisse der Modellierung weisen auf die Schlussfolgerung hin, dass bei nichtstationären Durchflüssen, die größer als  $700 \text{ m}^3/\text{s}$  sind, zu einer völligen Verdrängung des Salzkeils aus dem Flussbett kommt, während bei dem Durchfluss unter  $150 \text{ m}^3/\text{s}$  der Salzkeil bis zur Stationierung 20+909.0 m (Metković) und weiter flussaufwärts vordringt. Wenn man die Intrusion des Salzkeils flussaufwärts von der Stationierungsschleuse (2+000.0 m oder 4+000.0 m) verhindern will, sollte eine Schleuse gebaut werden, die bis zur Tiefe -2 m unter der Bedingung der Schleusenöffnung  $Q_{SR-24} < 300 \text{ m}^3/\text{s}$  geöffnet wird.

**Schlüsselwörter:** Fluss Neretva, Mündung, numerisches Modell, Salzwasserintrusion, Schleuse