

UNIVERZITET U BEOGRADU

UTICAJ NAPERA NA REKE
Pregled literature

Prevod sa engleskog:
prof. Miodrag B. Jovanović



Грађевински факултет
Београд, 2003.

Naslov originala



Literature review

The Effect of Groynes on Rivers

Mohamed F. M. Yossef



The Effect of Groynes on Rivers

Literature review

Mohamed F. M. Yossef

Delft University of Technology
Faculty of Civil Engineering and Geosciences
Section of Hydraulic Engineering
e-mail: M.F.Y.Yossef@citg.tudelft.nl

Delft Cluster project no. 03.03.04

23 August, 2002

Delft University of Technology
Faculty of Civil Engineering and Geosciences
Section of Hydraulic Engineering

23 August, 2002

Predgovor

Autor ovog prevoda je skupio obimnu literaturu iz oblasti uređenja rečnih tokova u toku pisanja svoje knjige „REGULACIJA REKA - Radovi i građevine” (Građevinski fakultet u Beogradu, 2022.)¹. Tema pod naslovom „Uticaj napera na reke” mu se učinila veoma značajnom za projektantsku praksu, pa je odlučio da izvorni tekst, koji je 2002. godine objavio Tehnički univerzitet u Deftu, prevede na srpski jezik u celini.

Prevod u potpunosti prati organizaciju originalnog teksta. Treba napomenuti da je reč o „slobodnom” prevodu, gde je autor često, umesto bukvalnog prevoda nekog termina sa engleskog jezika, koristio našu stručnu terminologiju. Pored toga, autor je dao sebi slobodu da iz izvornog teksta, po potrebi nešto doda (ili oduzme), bilo u cilju lakšeg razumevanja materije, bilo radi jasnijeg prevoda.

Naglašava se da su u prevodu zadržane *originalne oznake*, koje se razlikuju od onih koje je autor koristio na svojim predavanjima i u knjigama iz regulacije reka.

Većinu crteža (koji su u originalnom tekstu isuviše malih dimenzija ili nedovoljno jasni) autor je preradio i poboljšao.

Trebalo bi očekivati da će ovaj prevod, koji nesumnjivo popunjava određenu prazninu u našoj stručnoj literaturi, biti od koristi hidrotehničkim inženjerima koji se bave uređenjem vodotoka. To se naročito odnosi na plovne reke, gde je analiza uticaja naperskih sistema na strujanje u rečnom koritu od presudne važnosti za efikasnost regulacionih mera, odnosno održivost regulacionih radova i građevina.

Beograd, septembar 2003.

Autor

¹<https://grafar.grf.bg.ac.rs/handle/123456789/2810>
<https://web1.grf.bg.ac.rs/~mjovanovic/>

Sadržaj

1	Uvod	1
1.1	Istorijat	1
1.2	Ciljevi istraživanja	2
1.3	Vremenske i prostorne ramere problema	3
1.4	Sadržaj ovog izveštaja	4
1	Karakteristike napera	7
1.1	Opšte napomene	7
1.2	Poprečne građevine – naperi	8
1.2.1	Vrste napera	8
1.2.2	Projektni elementi	9
1.3	Naperi u Holandiji	11
1.3.1	Istorijat	11
1.3.2	Karakteristike međunaperskih polja duž reke Val	13
3	Uticao napera na reku	17
3.1	Strujanje u blizini napera	17
3.1.1	Strujanje u blizini usamljenog napera	17
3.1.2	Strujanje u međunaperskim poljima	20
3.1.3	Potopljeni naperi	25
3.2	Uticao napera na rečnu morfologiju	26
3.2.1	Opšte napomene	26
3.2.2	Deformacija korita u dugačkom suženju	27
3.2.3	Deformacija korita usled sistema napera	29

3.2.4	Lokalna erozija oko napera	30
4	Hidraulički poremećaji usled plovidbe	35
4.1	Strujanje vode izazvano plovidbom	35
4.1.1	Strujanje vode oko broda	35
4.1.2	Povratno strujanje i depresija nivoa	37
4.1.3	Talasi izazvani kretanjem broda	40
4.2	Uticao plovidbe na međunaperska polja	41
5	Morfološke promene	47
5.1	Opšte napomene	47
5.2	Procena erozije u međunaperskim poljima	48
5.2.1	Terenska merenja	48
5.2.2	Analitički pristup	52
5.3	Efekti promene postojeće geometrije napera	58
5.3.1	Sniženje napera	58
5.3.2	Produženje ili skraćenje napera	59
5.3.3	Smanjenje razmaka napera	59
	Dodatak DI: Konceptualni model	61
	Dodatak DII: Model Sibena i Dubena	67
	Bibliografija	75

Poglavlje 1

Uvod

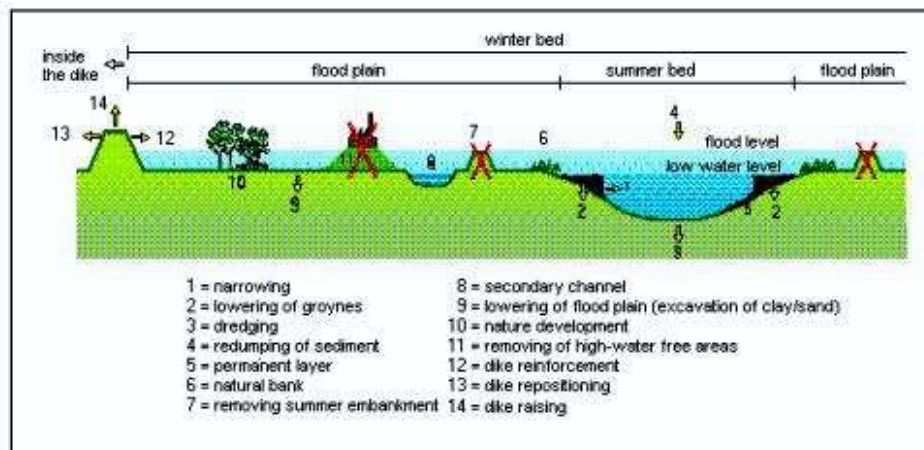
1.1 Istorijat

Svetski fond za biljni i životinjski svet je 1992. godine objavio izveštaj pod naslovom „*Žive reke*” (eng. „Living Rivers”). Cilj ovog plana je obnova prirodnog rečnog ambijenta, odnosno povratak karakterističnih biljaka i životinja u rečno okruženje. Pored ovog plana, inicirane su mnoge slične inicijative i započeti planovi koji se odnose na plovidbu, ekologiju i očuvanje životne sredine. Pri tome, hidrološko–hidraulička sigurnost dobija prioriteta nad svim pokrenutim inicijativama. Na primer, gajenje šuma u inundacijama ima ekološku opravdanost, ali sve dok toliko ne poveća hidrauličke otpore i nivoe da ugrozi uzvodne deonice.

Ponegde je moguće uspostaviti ravnotežu između ekoloških i hidrotehničkih zahteva. Na primer, sniženje visine napera može se shvatiti kao „inženjerska kompenzacija” u cilju usklađenja prirodnog rečnog režima i ambijenta sa hidroteničkim zahtevima. Ipak, nisu sasvim predvidljive morfološke posledice ove mere, pa samim tim nije izvesno da li bi plovidba mogla biti ugrožena. Ovaj primer pokazuje da je reka složen, koherentan sistem, u kome svaka inženjerska intervencija ima određene implikacije na rečne procese. Shodno tome, odluka o sprovođenju bilo kakve regulacione mere mora biti potkrepljena dobrim argumentima, kako bi svi akteri (projektanti i zainteresovani korisnici) bili informisani o prednostima i nedostacima predloženih mera, na osnovu čega bi se donela odluka o društvenoj opravdanosti razmatranih mera.

U okviru istraživačkog projekta „*Ruimte voor Rijntakken*” (eng. „Space for the Rhine Branches”, srp. „Prostor za rukavce Rajne”), osmišljeno je nekoliko mera za postizanje sniženja nivoa vode pri vršnim protocima,

putem povećanja ekspanzionog prostora za prihvatanje poplava. Niz od četrnaest mera je naveden u izveštaju pod naslovom „Planiranje pejzaža reke Rajne” (engl. „Landscape Planning River Rhine” – LPR), Slika 1.1.



Slika 1.1: Hidrotehničke regulacione mere prema predlogu projekta LPR

Jedna od predloženih mera je *sniženje postojećih* napera, za, recimo, 2 m. Razlog za ovakav predlog je da su, zbog velike erozije korita pri niskom vodostaju tokom proteklih decenija, naperi, izgrađeni između 1860. i 1920. godine, sada viši nego što je stvarno potrebno za održavanje plovne dubine u glavnom koritu. Sniženje napera duž određenih deonica – intervencija koja zahteva ogromna ulaganja – rezultirala bi u smanjenju efektivne rapavosti korita tokom poplava. Na taj način bi se povećao kapacitet reke za evakuaciju velikih voda. Povećana propusna moć doprinela bi obnavljanju nekih delova rečnog ekosistema, ali bi to zauzvrat, opet moglo povećati efektivnu rapavost. Sve je to važno imati u vidu ako je cilj da se obezbedi veća propusna moć za velike vode u kontekstu izmene visine napera.

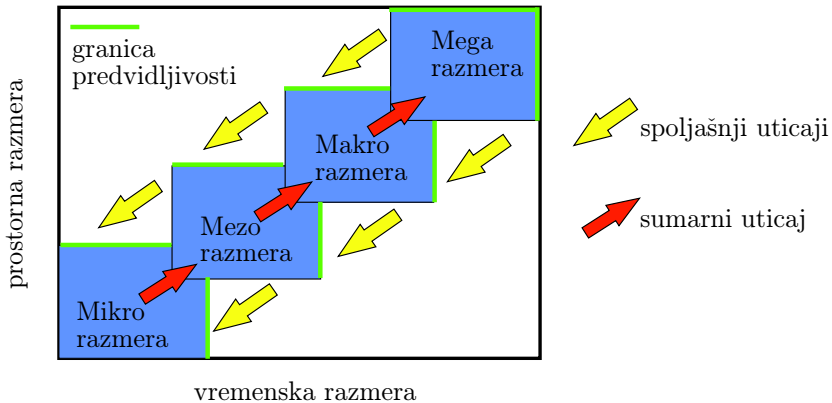
1.2 Ciljevi istraživanja

Smanjenje visine napera zahteva sistematsko istraživanje. Ako se snize kote krune napera, ravnoteža hidrodinamičkih sila koje deluju u međunaperskim poljima će se narušiti, sa mogućim značajnim morfološkim reperkusijama. Na primer, moguća je promena uzdužnog nagiba dna korita (poput regulacione mere poznate pod nazivom „normalizacija”, koja se primenjivala u regulaciji reka do prve polovine dvadesetog veka). To takođe može dovesti do potrebe bagerovanja u cilju održavanja neophodne plovne dubine.

Zato je veoma važno razumeti uticaj napera na morfologiju rečnog korita, kao i upoznati mehanizam razmene nanosa između glavnog korita i međunapernih polja.

1.3 Vremenske i prostorne ramere problema

Pre nego što se uđe u detalje, potrebno je sagledati prostorne i vremenske razmere problema koji se izučava. Prema klasifikaciji de Vrinda (de Vreind, 1999), rečni morfološki procesi mogu se razmatrati isključivo u kontekstu nekoliko prostorno–vremenskih razmera. Pretpostavljajući da se te razmere mogu donekle posmatrati odvojeno, može se konceptualno zamisliti *kaskada* razmera, kao što je prikazano na Slici 1.2.



Slika 1.2: *Kaskada morfoloških procesa sa odgovarajućim prostorno–vremenskim razmerama (prema de Vrindu, 1999)*

U mikro razmeru spadaju male nanosne formacije poput nabora i dina. Mezo razmeru karakterišu veće formacije kao što su naizmenični sprudovi, ili evolutivni oblici poprečnog preseka.

Makro razmera obuhvata meandre (uključujući vreme njihovog formiranja), kao i rečne deonice sa uzdužnim profilima i vremenom dostizanja njihovog ravnotežnog stanja nakon regulacionih radova. Najveća, mega razmera, obuhvata rečno korito na nivou celog slivnog područja.

U našem slučaju, usvojiće se pojednostavljena klasifikacija u odnosu na onu de Vrinda. Usvojiće se samo dve razmere – mala i velika. Mala razmera predstavlja kombinaciju mikro i mezo razmera de Vrinda. Velika razmera je ekvivalentna makro skali, dok je mega skala van okvira ove studije.

Analiza u maloj razmeri biće posvećena proučavanju lokalnog ponašanja jednog i nekoliko međunaperskih polja izloženih različitim hidrodinamičkim uticajima u relativno kratkom vremenskom periodu.

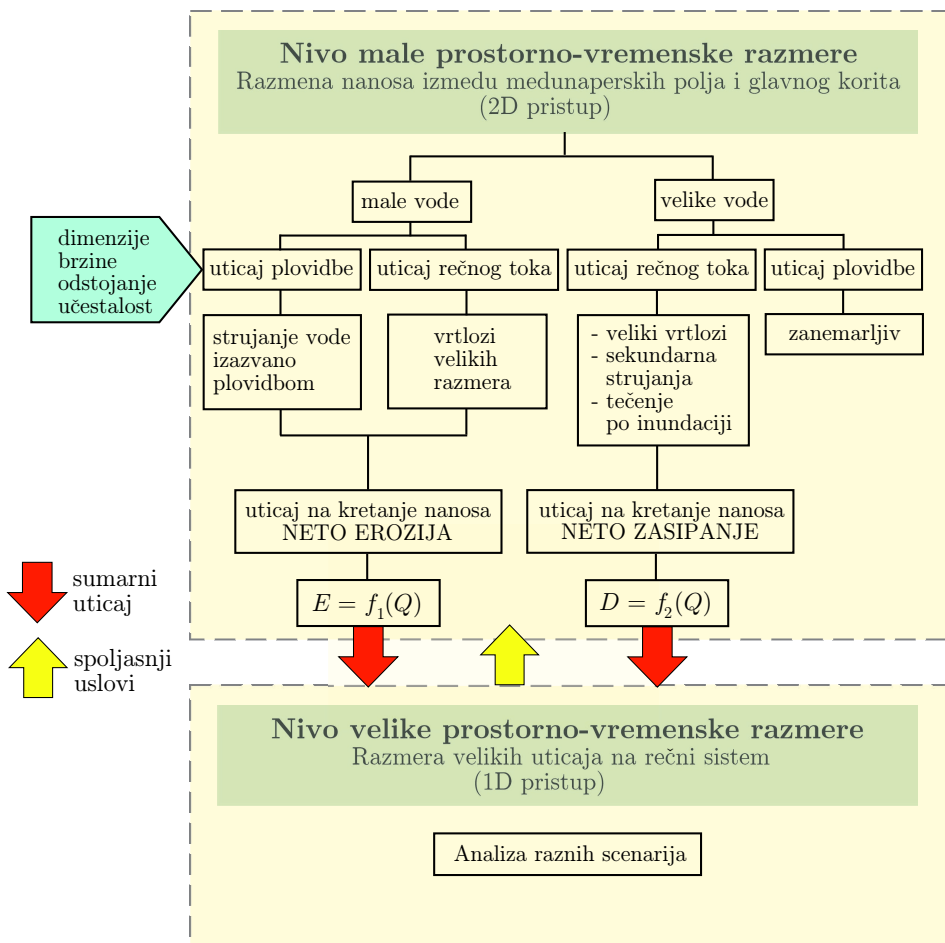
Analizom u velikoj razmeri biće obuhvaćen ceo rečni sistem. Rezultati analize u maloj razmeri biće sumirani da bi se sagledao kumulativni uticaj na nivou velike razmere. U dodatiku D1 je dat primer konceptualnog modela interakcije međunaperskih polja i glavnog rečnog korita.

Hidrodinamički uticaji koji upravljaju navedenom interakcijom imaju dve komponente. Prava komponenta je uticaj plovidbe, koji se ne sme zanemariti kod reka kao što je Rajna, jer je ona okosnica mreže unutrašnjih plovnih puteva severozapadne Evrope.

Drugu komponentu čini uticaj prirodnog rečnog strujanja. U periodima velikih voda, međunaperska polja se pune nanosom i zasipaju. S druge strane, strujanja izazvana kretanjem brodova utiču (naročito u malovodnim periodima) na eroziju nanosnih naslaga u međunaperskim poljima. Shematski prikaz interakcije različitih uticaja dat je na Slici 1.3.

1.4 Sadržaj ovog izveštaja

Cilj ovog izveštaja je prikaz osnovnih dosadašnjih saznanja o interakciji međunaperskih polja i glavnog korita. Poglavlje 2 se bavi tipovima napera i načnima njihove izgradnje. Primera radi, prikazana su međunaperska polja duž reke Val (Vaal River) – jedne grane reke Rajne. U Poglavlju 3 se razmatraju hidrodinamički i morfološki uticaji napera na reku. U Poglavlju 4 se opisuje kratnje vode izazvano plovidbom, kao i uticaj plovidbe na međunaperska polja. Poglavlje 5 sadrži pregled nekih pokušaja predviđanja interakcije međunaperskih polja i glavnog korita.



Slika 1.3: Pregled parametara koji utiču na interakciju međunaperskih polja i glavnog korita.

Poglavlje 1

Karakteristike napera

1.1 Opšte napomene

Uređenje – „regulacija” reke podrazumeva stabilizaciju rečnog korita u cilju održivosti projektovanog poprečnog preseka i nagiba dna rečnog korita. Regulacija reka datira još iz česnaestog veka, sa izgradnjom nasipa duž Žute reke u Kini, sa ciljem ograničenja toka unutar glavnog korita, uz kontrolisani transport nanosa do mora. Moderna regulacija reka je započeta u Evropi u devetnaestom veku, sa zahtevima industrijske revolucije koji su se uglavnom svodili na ustpostavljanje i održavanje neophodnih plovnih gabarita. Generalno, ciljevi uređenja reka su:

- zaštita od poplava odgovarajućom evakuacijom velikih voda;
- poboljšanje transportnog kapaciteta za rečni nanos;
- sprečavanje erozije obala;
- usmeravanje toka u ženom pravcu;
- smanjenje verovatnoće formiranja ledenih barijera;
- uspostavljanje i održavanje propisanih plovnih širina i dubina.

Prirodni procesi i ljudska aktivnost mogu na nekim deonicama poremetiti ravnotežu između dotoka nanosa i transportnog kapaciteta za nanos. Sezonske varijacije protoka, bagerovanje, pregađivanje reke, seča šuma i druge intervencije na slivnom području, primeri su uzroka poremećaja rečnog (hidrauličkog i psamološkog) režima. Da bi se takvi poremećaji umanjili, neophodne su regulacione građevine koje se mogu svrstati u tri osnovne kategorije:

- građevine za fiksiranje rečnog korita;
- podužne građevine;
- poprečne građevine (u odnosu na rečni tok).

Ovaj izveštaj se isključivo bavi naperima kao poprečim građevinama. Širi pregled svih sistema koji se koriste u regulaciji reka može se naći u brojnoj literaturi, na primer [29].

1.2 Poprečne građevine – naperi

Naperi su regulacione građevine koje se grade pod uglom u odnosu na rečni tok kako bi se voda skrenula dalje od kritičnih zona. Grade se od kamena, šljunka, zemlje i šipova, počevši od obale, sa korenom, a završavajući se na regulacionoj liniji, sa vrhom, ili glavom napera. Služe sa osiguranje korita, sprečavanje erozije obala, kao i za poboljšanje plovidbenih uslova.

1.2.1 Vrste napera

Naperi se razlikuju prema konstrukciji, dejstvu na tok i izgledu u planu. Za potpuni opis napera koristi se ova metodologija [29]:

Klasifikacija napera prema materijalu i metodi izrade. Naperi mogu biti propusni (protočni), propuštajući vodu da teče kroz telo napera smanjenom brzinom, ili nepropusni (neprotočni), potpuno blokirajući i preusmeravajući tok. Propusni naperi se grade pomoću šipova (čeličnih ili drvenih), dok se nepropusni naperi grade od kamena, šljunka i gabiona.

Klasifikacija napera prema potopljenosti. Naperi se projektuju da budu potopljeni ili nepotopljeni. Obično se nepropusni (neprotočni) naperi projektuju da budu nepotopljeni, jer prelivanje krune može izazvati ozbiljnu eroziju tela napera. S druge strane, propusni (protočni) naperi mogu biti preliveni, jer mnogo manje ometaju tok od čvrstih napera.

Klasifikacija napera prema dejstvu na rečni tok. Naperi se u ovom smislu mogu razlikovati kao privlačujuće, skrećuće ili odbijajuće građevine. Privlačeći naperi su usmereni nizvodno i služe da privuku protok ka sebi, ne odbijajući tok ka suprotnoj obali. Skrećući naperi su obično kratki i koriste se za lokalnu zaštitu obale. Služe za promenu pravca toka bez njegovog odbijanja. Odbijajući naperi su usmereni uzvodno i služe da skrenu tok ka suprotnoj obali.

Klasifikacija napera prema izgledu u planu. Različiti su oblici napera u planu. Najčeći primeri su: pravi naperi, naperi u obliku sliva T (tzv. T-naperi), slova L (L-naperi), dok su ređi oblici napera: „hokejaški” oblik i „obrnuti hokejaški” oblik. Poseban oblik su naperi sa krilima.

1.2.2 Projektni elementi

Najvažniji projektni elementi napera su: oblik, dužina, razmak, usmerenje, visina, nagib krune, poprečni presek, materijal za izgradnju i lokalna deformacija [1, 29, 31].

Oblik napera. Shodno ranije definisanoj topologiji prema obliku u planu, pravi naperi se grade pod uglom u odnosu na obalu. Imaju zaobljen vrh (glavu), sa većom zapreminom ugrađenog materijala u cilju zaštite od erozije tamo gde je brzina toka najveća. T–naper se obično postavlja pod pravim uglom u odnosu na obalu i na vrhu ima dva krila usmerena u pravcu toka. L–naperi izazivaju veće zasipanje međunaperskih polja, a manju eroziju korita u zoni glave (u odnosu na T–napere). Pružaju veću zaštitu obala i bolje uslove za plovidbu kada im dužina iznosi $45 \div 65\%$ dužine međunaperskog polja. „Hokejaški” oblik napera daje veću površinu erozionih jama od drugih napera.

Dužina napera. Zavisi od lokacije, namene, razmaka i ekonomičnosti gradnje. Ukupna dužina napera obuhvata dužinu korena napera (u obali) i radnu dužinu u koritu. Dužina napera se može utvrditi određivanjem željene širine i dubine toka u rečnom koritu (pri projektnim hidrološko–hidrauličkim uslovima). Iskustveno, preporučuje se da *radna dužina bude oko četvrtine prosečne širine vodnog ogledala, a da dužina ukorenjenja bude manja od četvrtine radne dužine.*

Razmak napera. Obično se meri po obali između početnih tačaka napera. Zavisi od širine korita, dužine napera, brzine toka, ugla u odnosu na obalu, orijentacije (usmeranja) napera u odnosu na tok, zakrivljenosti obale i namene napera. Često se izražava umnožavanjem dužine napera. Tako Ričardson (1975) *preporučuje razmak od $1,5 \div 1,6$ dužine napera [31]. Za povoljnu navigacionu dubinu preporučuje se razmak od $1,5 \div 2,0$ dužine napera. Za zaštitu obala od erozije obično se koristi razmak od $2 \div 6$ dužine napera, iako postoje slučajevi zaštite obale kratkim naperima na međusobnom odstojanju od $10 \div 100$ dužine, ali tamo gde su obale dopunski štice obaloutvrdom ili vegetacijom.*

Ako je razmak napera prevelik, može se formirati meandrirajući tok u međunaperskim poljima. Dugački i previše razmaknuti naperi mogu dovesti do deformacije rečnog korita i erozije obala, a time i do narušavanja plovidbe. Ali, ako je razmak namera prekratak, troškovi izgradnje će biti napotrebno uvećani, a sistem u celini će funkcionisati manje efikasno.

Usmerenje napera. Naperi mogu biti usmereni upravno ili koso u odnosu na tok. Kosi naperi mogu biti uzvodno ili nizvodno orijentisani. Svako usmerenje utiče drugačije na strujanje u reci i izaziva različite uslove transporta nanosa i deformacije korita. Naperi usmereni nizvodno „privlače” vodu ka sebi, dok upravni i uzvodni naperi skreću tok od obale.

Uzvodni naperi izazivaju intenzivnije taloženje suspendovanog nanosa od upravnih napera u međunaperskim poljima u kojima se formira povratno, recirkulaciono strujanje. Količina istaloženog nanosa se tako maksimizira primenom uzvodnih napera. Nizvodni naperi nisu pogodni za zaštitu obala, jer privlače tok, pri čemu ne samo da može erozijom biti ugrožena obala, već i koren samog napera. S druge strane, najbolje efekte sa stanovišta plovidbe pružaju upravo nizvodni naperi.

Visina nagib krune napera. Kote krune napera zavise od njegove namene i potencijalnih problema koji mogu nastati prelivanjem i pojavom leda. Za zaštitu obala, kota krune napera treba najmanje da odgovara koti krune obale. Da bi se sprečilo prelivanje leda, kota krune napera treba da bude iznad očekivanog nivoa ledenih santi. Naperi mogu imati nulti nagib krune, ili njihova kruna može imati određeni nagib ka reci (od korena do glave napera).

Kod napera koji štite obalu, u literaturi [1] se preporučuje nagib $0,1 \div 0,25$ ($1:10 \div 1:4$), zbog niza prednosti: manji utrošak materijala, manja izloženost eroziji dela napera pri obali i brže zasipanje međunaperskih polja. Kod napera koji služe plovidbi, najbolje efekte daju nizvodni naperi sa nultim nagibom krune. U literaturi [31] se preporučuje nulti nagib krune i kod upravnih napera.

Poprečni presek napera. Širina krune napera obično iznosi $1 \div 6$ m, a bočni nagibi tela napera su od $1:1,25$ do $1:5$. Minimalna širina krune od 1 m je uslovljena opremom za izgradnju, a veće širine krune samo olakšavaju tu gradnju.

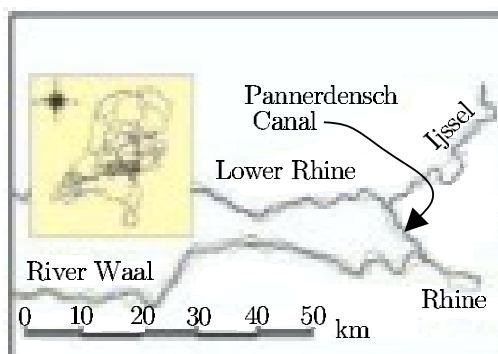
Građevinski materijali. Široki je spektar materijala koji se mogu koristiti za izgradnju napera, od drvenih šipova, stabala i grana drveća, kamena, šljunka, vreća ispunjenih peskom, do čeličnih cevastih šipova, prefabrikovanih betonskih elemenata i gabiona.

Lokalna deformacija korita. Pri projektovanju visine napera mora se obavezno uzeti u obzir i očekivana eroziona dubina u zoni glave napera.

1.3 Naperi u Holandiji

1.3.1 Istorijat

Prvi veći hidrotehnički radovi još od rimskog doba, preduzeti su na bifurkaciji reke Rajne, početkom 18. veka. Do tada su regulacioni radovi, u vidu izgradnje nasipa, brana i obaloutvrda, imali sključivo lokalni karakter, pretežno u cilju zaštite od poplava. Krajem 17. veka, na reku Val (Vaal), najveća granu u donjem toku Rajne, otpadalo je preko 95 % protoka Rajne. Protoci reka Nederejn (Nederrijn) i Ejsel (Ijssel) bili su toliko mali da je plovidba bila otežana (Slika 1.1).



Slika 1.1: *Grane reke Rajne.*

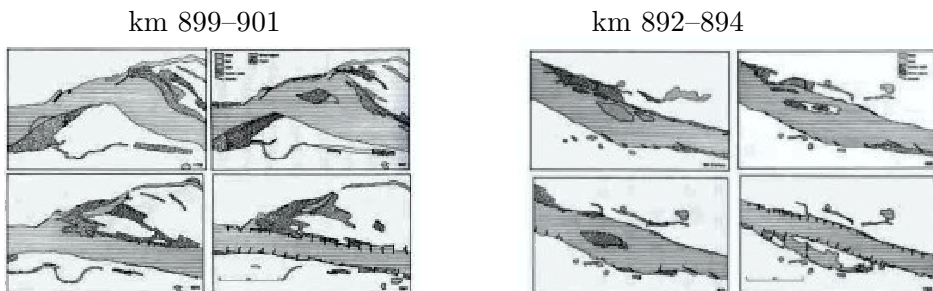
Oko 1775. godine, bifurkacija Nederejna i Ejsela je rekonstruisana iskopom novog kanala u gornjem toku Ejsela. Od tada, Ejsel je primao oko jedne trećine protoka grane Panerdenš (Pannerdensch), na koju je otpadala trećina ukupnog protoka Rajne, dok je grana Val (Vaal) nosila preostale dve trećine protoka. Stabilizacija korita ostvarena je izgradnjom napera (pod nadzorom inž. Bruningsa), koji je među prvima merio protok u reci. Do 1960-ih, korito reke Ode Rajna (Aude Rijn) nastavilo je da funkcioniše kao rasteretni kanal za odbranu od poplava u regionu [41].

Radovi na bifurkacijama su poboljšali raspodelu vode između rukavaca Rajne, ali nisu smanjili hazard od poplava. Pošto vodoprivredne vlasti odgovorne za integrisano rečno inženjerstvo nisu postojale do 19-og veka, pojedini zemljoposjednici su lokalno gradili obaloutvrde i nasipe kako bi zaštitili svoja zemljišta od erozije. Međutim, nepravilan raspored nasipa i prisustvo mnogih peščanih sprudova u koritu ne samo da su ometali tok, već su doveli i do formiranja ledenih barijera.

Formalnu zabranu nesistematske izgradnje napera donele su države Gelderland (Gelderland) 1602. godine. Ova zabrana, koja je usvojena 1715. godine, imala je mali efekat zbog nedostatka nadzora.

U godinama 1809 i 1820, velike površine su plavljene, a 1821. godine je imenovan vladin odbor da predloži rešenje problema. Odbor je 1825. završio svoj izveštaj, koji je objavljen 1827. godine. U međuvremenu, istaknuti inženjeri poput Blankena (Blanken), Gudrijana (Goudriaan) i Krajenhofa (Krayenhoff) dali su svoja mišljenja. Njihove preporuke su varirale od stvaranja novih preliva delimičnim uklanjanjem nasipa, preko izgradnje ustava, do izgradnje potpuno novog korita od ušća Rajne u Holandiji do Ejsela [41]. Ovakvi radikalni radovi nikada nisu ostvareni. Rešenje koje je konačno usvojeno, prezentirano je u izveštaju koji su podneli inspektori Feran (Ferrand) i van der Kun (Van der Kun) iz novoformirane vodoprivredne institucije Rejkswaterstat (Rijkswaterstaat, RWS). Predloženo je uklanjanje peščanih sprudova i sužavanje rečnih karita kako bi se ubrzao protok.

Sužavanje korita je imalo za cilj povećanje protočnog kapaciteta Donje Rajne. Način uređenja se najbolje može ilustrovati serijom situacionih planova za deonicu reke koja je bila relativno stabilna pre početka radova. Kako šira reka Val ima jaču tendenciju formiranja rukavaca od mnogo uže, a izraženo meandrirajuće reke Ejsel, suženje korita reke Val daje delotvornije rešenje. Različite aktivnosti koje su sprovedene da bi se neregulisana reka Val transformisala u reku sa jedinstvenim, suženim koritom, prikazane su na Slici 1.2.



Slika 1.2: Promene korita reke Vaal na karakterističnim sektorima u periodu od oko 200 godina [41].

Ono što stare situacione karte ne prikazuju jeste proces opšte erozije rečnog korita. Ova j proces je u donjem toku Rajne komplikovan; uglavnom je

posledica prosecanja rečnih krivina, bagerskih radova i sužavanja korita sistemima napera. Na ulazu Donje Rajne u Holandiju, opšta erozija korita se uglavnom dešavala u periodu 1925–1960 i iznosila je u proseku oko 1,0 m [41].

Od završetka regulacionih radova, prosečna opšta deformacija (erozija) korita u rukavcima Donje Rajne iznosi $0,4 \div 2,2$ m (Tabela 1.1), pri čemu je procena da korita rukavaca Rajne još nisu dostigla ravnotežno stanje [44]. Međutim, izvesno je da će erozija korita biti znatno sporija u poređenju sa onom iz ranijeg perioda.

Tabela 1.1: *Prosečna erozija korita grana reke Rajne* (prema [44]).

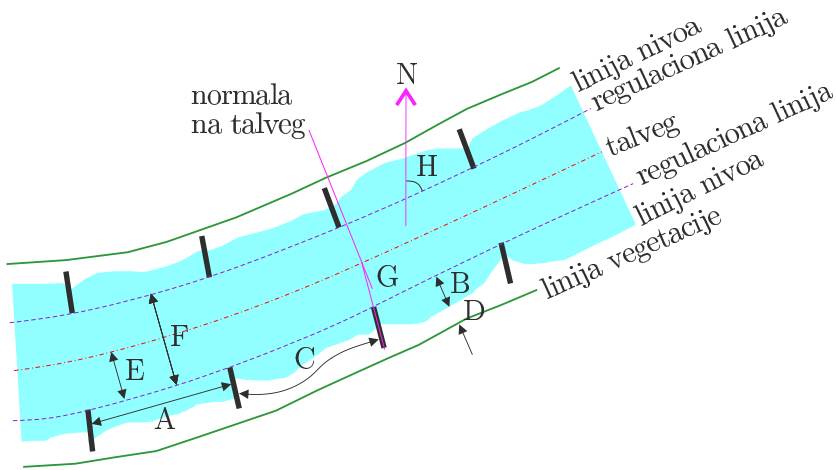
Rečna deonica	Rhine (km)	Period	Erozija korita (m)
IJssel	878,5 ÷ 1005	1938 ÷ 1990	-0,4
Lek & Neder-Rijn	878,5 ÷ 989,0	1933 ÷ 1990	-0,9
Pannerdensch Canal	867,5 ÷ 878,5	1926 ÷ 1990	-2,2
Waal	867,5 ÷ 952,0	1926 ÷ 1990	-0,7
Boven-Rijn	857,5 ÷ 867,5	1934 ÷ 1990	-1,2

1.3.2 Karakteristike međunaperskih polja duž reke Val

Na osnovu terenskih merenja u periodu 1996–1997, definisane su karakteristike međunaperskih polja du reke Val. Oznake karakterističnih veličina date su na Slici 1.3 [32]:

- A: pravolinijska dužina međunaperskog polja
- B: širina međunaperskog polja
- C: dužina međunaperskog polja duž strujnice
- D: širina zasutog polja („plaže”)
- E: rastojanje između regulacione linije i talvega
- F: širina rečnog korita (do međunaperskih polja)
- G: usmerenje napera u odnosu na talveg)
- H: usmerenje međunaperskih polja u odnosu na sever.

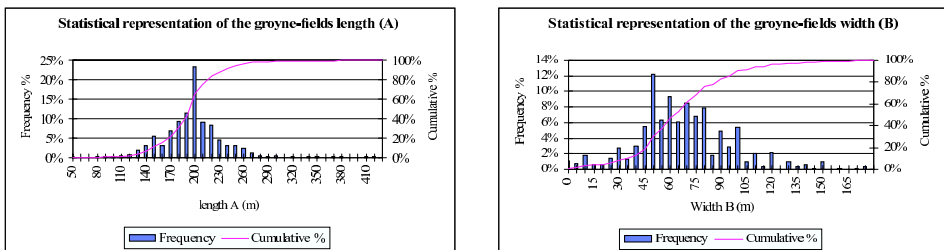
Još dva parametra su važna za karakterizaciju međunaperskih polja, a to su nagib deponije nanosa („plaže”) i srednja krupnoća zrna (D_{50}) u deponiji. Uvode se dva dodatna bezdimenzionalna parametra [32]: indeks zakrivljenosti CI i indeks putanje PI . Indeks zakrivljenosti se definiše kao odnos dužine polja duž strujnice (C) i pravolinijske duine polja (A): $CI = C/A$. Ovaj parametar daje uvid u zakrivljenost plaže u međunaperskom



Slika 1.3: Karakteristike međunaperskih polja (prema [32]).

polju. Najmanja vrednosti je $CI = 1$. Što je ta vrednost veća, strujnica je zakrivljenija. Indeks putanje PI se definiše kao odnos udaljenosti talvega od međunaperskog polja (E) i širine rečnog korita (F): $PI = E/F$. Vrednost PI treba uvek da bude manja od jedinice. Kada je $PI = 0,5$, talveg se poklapa sa osovinom korita. Parametar PI je od većeg značaja u krivinama, jer je indikator položaja dubokog dela korita.

Karakteristike međunaperskih polja duž reke Val sumirane su u Tabeli 1.2, a tačnost merenja karakterističnih parametara je prikazana je u Tabeli 1.3 i na Slici 1.4.



Slika 1.4: Reka Val: dužina (A) i širina (B) međunaperskih polja.

Na osnovu prethodne analize i uzimajući u obzir reprezentativnost korišćenih podataka, moguće je usvojiti sledeće vrednosti za međunaperska polja reke Vaal: $A = 200$ m, $B = 60$ m, $D = 25$ m, $F = 260$ m, $G = 0^\circ$, $H = 90^\circ$, $D_{50} = 350 \mu\text{m}$, nagib plaže: 1:25, $CI = 1,0$, $PI = 0,5$.

Tabela 1.2: Karakteristike međunaperskih polja duž reke Val.
(Sve dužine su u metrima)

Parametar	Sr. vr.	St. dev.	Min.	Maks.	Medijana	Mod
Dužina polja (A)	198,2	37,7	50	420	200	200
Širina polja (B)	67,9	28,6	0	175	65	50
Dužina duž strujnice (C)	215,1	43,5	100	480	210	200
Širina plaže (D)	25,1	21,2	0	150	20	0
Od reg. linije do talvega (E)	129,8	93,6	10	320	123,8	25
Širina rečnog korita (F)	279,5	35,2	252	412	260	260
Usmerenje napera (G)	-8,0°	8,7°	-30°	10°	-5°	0°
Usmerenje međunap. polja (H)	86,2°	31,4°	2°	150°	91°	96°
Zrno nanosa D_{50} (μm)	439,5	264,5	200	1300	347,5	225
Nagib plaže	0,042	0,008	0,03	0,05	0,04	0,05
Indeks zakrivljenosti (CI)	1,097	0,117	1	1,92	1,056	1
Indeks putanje (PI)	0,478	0,338	0,03	0,949	0,046	0,077

Tabela 1.3: Ocene tačnosti parametara.

Parametar	Tačnost	Broj podatka
Dužina polja (A)	± 5 m	799
Širina polja (B)	± 5 m	738
Dužina duž strujnice (C)	± 10 m	741
Širina plaže (D)	± 5 m	734
Od reg. linije do talvega (E)	± 5 m	736
Širina rečnog korita (F)	± 5 m	799
Usmerenje napera (G)	$\pm 3^\circ$	792
Usmerenje međunap. polja (H)	$\pm 3^\circ$	798
Zrno nanosa D_{50} (μm)	nepoznato	46
Nagib plaže	nepoznato	40

Materijal istaložen u međunaperskim poljima se uglavnom sastoji od dobro graduisanog peska od oko 70% po težini uzorka, krupnoće zrna između 250 μm i 500 μm . Na mestima koja su više izložena strujanju vode, materijal je manje graduisan i nalazi se ispod armirajućeg sloja sitnog šljunka. Na ovim lokacijama, više od 25% nanosa je krupnije od 2,0 mm, a oko 57% zrna ima krupnoću između 125 μm i 500 μm . Na ovom delu reke Val, količina gline i mulja u rečnom koritu je beznačajna. Nanos ne sadrži organski materijal, niti značajnu količinu truleži.

Poglavlje 3

Uticaj napera na reku

3.1 Strujanje u blizini napera

Strujno polje u blizini usamljenog napera značajno se razlikuje od onog kod sistema napera.

3.1.1 Strujanje u blizini usamljenog napera

Najjednostavniji slučaj je razmatranje usamljenog napera na pravolinijskoj deonici. Naper zauzima određeni deo poprečnog preseka rečnog korita i značajno utiče na kinematičku strukturu toka. Srednja brzina i jedinični protok se povećavaju zbog suženja korita. Povećanje brzine dovodi do povećanja hidrauličkih gradijenata i intenzivnije makroturbulencije toka¹.

Mnogi istraživači su se bavili strujanjem oko usamljenog napera, pa su definisali osnovne karakteristike takvih strujanja, razmatrajući:

- oblast odvajanja toka;
- migrirajuće horizontalne velike vrtloge;
- fluktuaciju nivoa vode.

Geometrija oblasti odvajanja toka. Oblast odvajanja (separacije) toka iza usamljenog, neprelivnog napera izučavali su brojni autori [7, 17, 25]. Takve studije su dale uvid u geometriju oblasti odvajanja nizvodno od napera u kanalu *pravougaonog* poprečnog preseka.

¹Opis strukture makroturbulentnog toka povezan je sa problemom lokalne erozije korita.

U studiji zone recirkulacije izazvane pešćanim sprudovima duž reke Kolorado, strujno polje je podeljeno na četiri zone [7]:

- zona glavnog toka;
- zona povratnog toka;
- zona smičućeg sloja;
- zona ponovnog spajanja.

Od vrha napera do suprotne obale kanala, u *zoni glavnog toka*, brzina toka se ubrzava zbog smanjenja širine korita. *Zona povratnog toka*, koja se nalazi nizvodno od napera, obično sadrži dva vrtloga. Centar većeg vrtloga se nalazi na udaljenosti od napera od oko 6 dužina napera. Drugi vrtlog je manji, a centar mu je otprilike na odstojanju od jedne dužine napera. Kako se brzine u zoni glavnog toka i zone povratnog toka znatno razlikuju, dolazi do formiranja smičućeg sloja između ove dve zone.

Zonu ponovnog spajanja većina istraživača definiše pomoću tačke u kojoj se (uzvodno skrenuta) granična strujnica ponovo spaja sa obalom. Međutim, ova tačka nije fiksna, već fluktuiira napred-nazad, uglavnom zbog povremene pojave vrtloga u sloju smicanja i prmenljivosti gradijenta pritiska između glavnog toka i zone recirkulacije. Čen i Ikeda (1997) su приметili da je dužina zone ponovnog spajanja skoro konstantna i jednaka $11 \div 17$ dužina napera [7].

Položaj vremenski osrednjene tačke ponovnog spajanja definisan je tačkom u kojoj je vremenski osrednjena brzina jednaka nuli. Prema navedenim autorima, ova tačka se nalazi na odstojanju od oko 14 dužina napera [7]. Upoređenjem rezultata numeričkih simulacija i eksperimentalnih merenja, Oujon i Dartus (1997) su ustanovili da je dužina ponovnog spajanja reda veličine 12,5 dužina napera [25]. Prema Tingsancaliju i Mahesvarnu (1990) ova dužina je oko 11,5 dužina napera [37].

U opsežnoj eksperimentalnoj studiji, Ishi i dr. (1983) su istraživali uticaj nekih bezdimenzionalnih brojeva na oblik oblasti razdvajanja u mirnom režimu tečenja [17]. Ustanovili su da oblik zone separacije gotovo i da ne zavisi od Frudovog broja (Fr). Kod upravnih napera čija je dužina 10% širine korita, dužina oblasti razdvajanja iznosi $10 \div 12$ dužina napera, a njena najveća širina je oko dve dužine napera. Sa povećanjem duine napera na 40% širine korita, dužina oblasti separacije se smanjuje sa 12 na 7 dužina napera, ali se ugao koji granična strujnica zaklapa sa osovnom glavnog toka ne menja i iznosi oko 15° .

Promenom ugla koji osovina napera zaklapa sa osovinom glavnog toka, sa 90° na 150° , tj. nizvodnim usmerenjem napera, geometrija oblasti separacije ostaje gotovo nepromenjena. S druge strane, smanjenjem ovog ugla sa 90° na 30° , tj. uzvodnim usmerenjem napera, relativna dužina ponovnog spajanja se smanjuje sa 14 na 11 dužina napera, ali relativna širina (dve dužine napera) i ugao ponovnog spajanja (10°) ostaju nepromenjeni.

Ugao razdvajanja na uzvodnom kraju je određen samo uglom usmerenja napera u odnosu na glavni tok. Varira od 30° do 60° kada se ugao usmerenja napera promeni sa 30° na 90° . Međutim, ugao razdvajanja ostaje konstantan (60°), za bilo koji ugao usmerenja napera *veći* od 90° .

Na osnovu datih rezultata može se zaključiti da oblast razdvajanja ima dužinu od 7 – 15 dužina napera. Relativna širina je manje promenljiva i ima vrednost koja je nešto manja od 2 dužine napera. U zavisnosti od relativne rapavosti čvrstih granica, ugao ponovnog spajanja nizvodno od napera kereće se od 15° do 10° , pri čemu veće vrednosti odgovaraju većim rapavostima. Ugao ponovnog spajanja uzvodno od napera varira od 30° do 60° , u zavisnosti od usmerenja napera.

Horizontalni veliki vrtlozi. Važan element strujnog polja u blizini napera su horizontalni veliki vrtlozi koji se odvajaju od vrha napera. Meranjem fluktuacija nivoa vode duž središnje linije otkidajućih vrtloga, Chen i Ikeda (1997) su otkrili da postoje periodične fluktuacije nivoa vode [7]. Ove fluktuacije imaju jasnu faznu razliku između izmerenih signala u dve uzastopne tačke duž središnje linije migrirajućih vrtloga. Vreme kašnjenja između vrha ova dva signala smatra se vremenom koje je migrirajućem vrtlogu potrebno da pređe odstojanje između date dve tačke. Primenom FFT metode za analizu periodičnosti i vremenskog kašnjenja između bilo kog para signala, autori su otkrili da je prosečna brzina migracije vrtloga skoro konstantna i da ima vrednost nešto veću (1,5%) od srednje brzine glavnog toka.

Nizvodno od napera, vrtlozi se spajaju jedni sa drugima i njihova dužina se povećava u nizvodnom smeru. Kako je brzina migracije konstantna, vremenska skala (razmera) vrtloga trebalo bi da se povećava i nizvodno. Chen i Ikeda (1997) su ustanovili rastući trend vremenske skale horizontalnih vrtloga [7]. Ovo povećanje ukazuje na to da postoji učestalo spajanje malih vrtloga nakon njihovog odvajanja od vrha napera, ali samo do odre-

đene udaljenosti, a zatim vremenska razmera horizontalnih vrtloga ostaje nepromenjena.

Fluktuacija nivoa vode. Sa nizvodnom migracijom horizontalnih velikih vrtloga, površina vode fluktuiraju, pa se svojstva vrtloga mogu izučavati merenjem fluktuacija nivoa vode. Generalno, nivo vode raste uzvodno od napera, a opada nizvodno, a kontinuirano fluktuiraju kako se horizontalni vrtlozi periodično odvajaju od vrha napera. Chen i Ikeda (1997) su računali kvadratu srednjih vrednosti fluktuacije nivoa u nekoliko poprečnih profila nizvodno od napera [7]. Otkrili su da u svakom poprečnom profilu postoji izražen vrh funkcije kvadrata srednjih vrednosti, što ukazuje na pojavu centra velikog vrtloga. Uticaj napera na fluktuacije nivoa proteže se na udaljenost od oko 10 dužina napera.

3.1.2 Strujanje u međunaperskim poljima

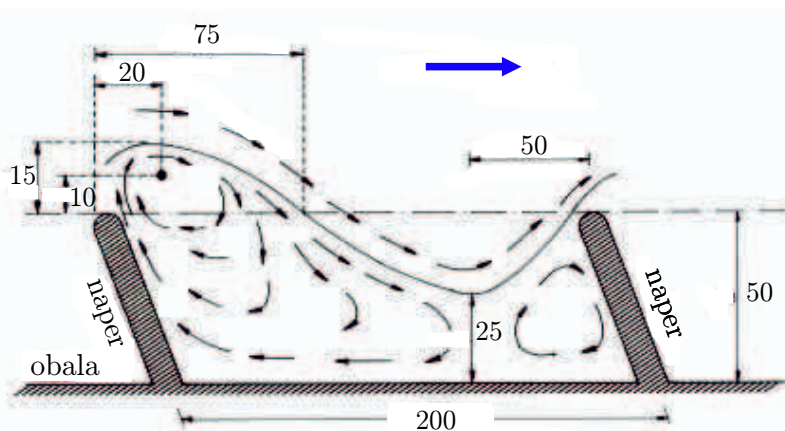
Kada naperi nisu potopljeni, međunaperska polja nisu deo aktivnog poprečnog preseka reke. Zbog toga, strujanje u međunaperskom polju nije direktno zavisno od protoka u glavnom koritu. Smanjenje brzine glavnog toka nema uticaja na tečenje u međunaperskim poljima, dok snižavanje nivoa vode ima uticaj [40]. U ovom drugom slučaju, efekat nagiba dna postaje izraženiji, pomerajući centar vrtloga u međunaperskom polju ka glavnom toku.

Generalno, strujanje unutar polja zavisi od geometrije polja, njegovog položaja (unutravsnja/spoljšnja krivina, pravolinijska deonica) i/ili od orijentacije napera [29].

Na Slici 3.1 prikazano je tipično strujanje u međunaperskom polju, eksperimentalno registrovano od strane WL/Delft Hydraulics na pravolinijskoj rečnoj deonici. Dimenzije međunaperskog polja: 200 m × 50 m, kao i protok, 1450 m³/s, odgovaraju prirodnim uslovima reke Val.

Jasno se može uočiti da recirkulaciono strujanje - veliki vrtlog, zahvata prve tri četvrtine polja neposredno iza uzvodnog napera, jer se skretanje glavnog toka ne može desiti na kratkom odstojanju.

Centar recirkulacionog strujanja nije u centru vrtloga, već je bliži vrhu napera i pomeren je ka glavnom koritu. Dalje nizvodno, glavni tok ne ulazi u međunapersko polje, a neposredno ispred nizvodnog napera se formira manji vrtlog koji ometa pražnjenje međunaperskog polja.



Slika 3.1: Strujanje u međunaperskom polju na pravolinijskoj deonici [6] (dimenzije u metrima).

Na osnovu modelskih ispitivanja napera [20], predloženo je 6 tipova strujne slike u međunaperskim poljima (Slika 3.2).

Tip 1: Ovaj tip recirkulacionog strujanja se prepoznaje tako što je glavni tok skrenut i usmeren van međunaperskog polja. Između napera javlja samo jedan vrtlog. On je dovoljno veliki da spreči prodor glavnog toka u međunapersko polje. Stoga je ovakva strujna slika povoljna za plovidbu, jer je na deonici sa sistemom napera dubina u glavnom koritu neporemećena.

Tip 2: Slučaj kada se javljaju dva vrtloga, ali je glavni tok i dalje usmeren van međunaperskog polja.

Tip 3: Sa povećanjem razmaka napera, razvija se trostruko strujanje u međunaperskom polju. Glavni tok se usmerava ka naperima, sa jačim vrtloženjem u blizini uzvodnog napera i sa izraženom turbulencijom duž korena i uzvodne površi nizvodnog napera.

Tip 4: Kod ovog tipa, stabilnost uzvodnog vrtloga je narušena i javlja se jedinstveno, intenzivno recirkulaciono strujanje u celom međunaperskom polju.

Tip 5: Tok, koji je skrenut uzvodnim naperom, usmeren je ka obali u međunaperskom polju. Vrtlozi koji se formiraju na oba kraja ovog polja, pružaju izvesnu zaštitu obale.

Tip 6: Sa daljim povećanjem razmaka napera, nizvodni vrtlog (koji je pružao zaštitu obale), nestaje, tako da glavni tok direktno napada obalu.



Tip 1



Tip 2

Glavni tok usmeren van međunaperskog polja



Tip 3



Tip 4

Glavni tok usmeren ka naperu



Tip 5



Tip 6

Glavni tok usmeren ka obali

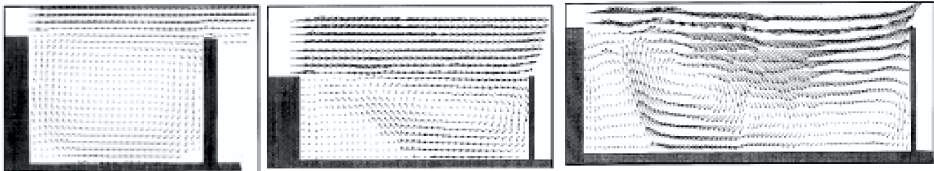
Slika 3.2: Strujanje u međunaperskom polju u zavisnosti od usmerenja glavnog toka [20, 29].

Unutar međunaperskog polja čija je izduženost (odnos dužine i širine polja) 2,5, najveća brzina duž obale iznosi oko 40 %, brzine izmerene u sličnoj krivini sa obaloutvrdom. Ovaj procenat je neto manji od 40 % kada se izduženost polja smanji na 1,5, a jednak je približno 50 % kada se razmak napera povećća na 3,5 dužina napera.

U svom zapažanju o uticaju geometrije na strujanje u međunaperskom polju, Uijteval (Uijtwaal, 1999) je zaključio da je odnos dužine i širine strujnog polja određen brojem i oblikom vrtloga koji se formiraju unutar međunaperskog polja [39].

Kada je odnos širine i visine međunaperskog polja blizak vrednosti 1, javlja se samo jedan vrtlog (Slika 3.3, levo). Veća izduženost međunaperskog polja (vrednost odnosa širine i visine polja) daje prostor za formiranje dva stagnirajuća vrtloga: velikog, koji se naziva *primarni vrtlog* na nizvodnom delu, a manjeg, *sekundarnog vrtloga*, na nizvodnom delu polja (Slika 3.3, u sredini). Slučaj ekstremno izdužnog međunaperskog polja (odnos dužine i širine 6), pokazuje prodor glavnog toka u međunapersko polje (Slika 3.3, desno). Dva vrtloga su u relativno stabilnom položaju, dok glavni tok prodire u nizvodni deo polja.

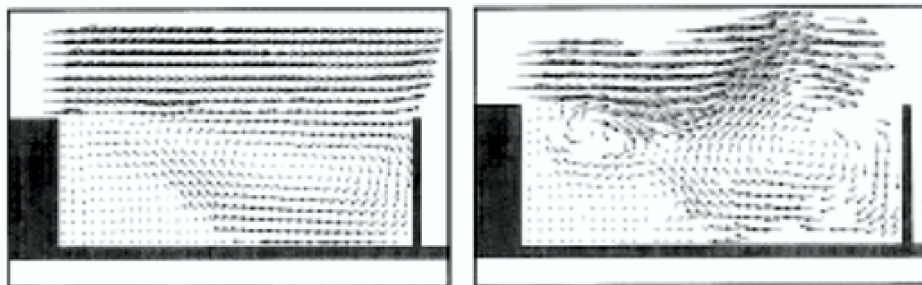
U svim slučajevima, vrtlog, nastao odvajanjem od vrha uzvodnog napera, kreće se duž graničnog sloja između međunaperskog polja i glavnog korita, da bi se na kraju stopio sa primarnim vrtlogom unutar polja.



Slika 3.3: Vremenski osrednjeno međunapersko strujno polje za odnos dužine i širine polja 1, 3 i 6 [39].

Navedeni autor je ukazao i na značajnu razliku između osrednjeg i trenutnog strujnog polja. Na Slici 3.4-levo, prikazano je osrednjeno strujno polje kada je vrednost odnosa dužine i širine međunaperskog polja 3.

Na nizvodnom delu međunaperskog polja može se uočiti veliki vrtlog koji pokriva dve trećine površine polja. U donjem levom uglu polja zapažs se drugi vrtlog, koji rotira mnogo sporije i u smeru suprotnom smeru skazaljke na satu. U gornjem levom uglu međunaperskog polja, gde se ovaj



Slika 3.4: Poređenje između osrednjenog i trenutnog strujnog polja [39].

drugi vrtlog graniči sa glavnim tokom, ne može se jasno odrediti karakter strujanja. Neodređeno polje brzine u ovom području je uglavnom posledica procesa osrednjavanja, koje zamagljuje dinamiku neustaljenog strujanja.

Trenutno strujno polje prikazano na Slici 3.4-desno, pokazuje snažno, vremenski zavisno, advekciono kretanje velikog vrtloga duž međunaperskog polja. Poređenjem ova dva strujanja (koja se odnose na isti eksperiment), movze se konstatovati značajno veći intenzitet vrtloženja na slici trenutnog strujnog polja.

Na prvi pogled, može se činiti da postoji nesaglasnost eksperimentalnih rezultata laboratorije WL—Delft Hydraulics (1987) i rezultata Ujtvala [39]. Međutim, detaljniji uvid u originalne laboratorijske podatke, pokazuje da se rezultati dobro slažu kada se uzmu trenutna strujna polja Ujtvala.

Detaljniji uvid u dokumentaciju pokazuje da u slučaju nepotopljenih napera, strujanje ima prtežno dvodimenzioni karakter. Trodimenziono turbulentno strujanje malih razmera ima sasvim sekundarnu ulogu u procesu razmene mase i impulsa između međunaperskog polja i glavnog korita [39]. Izraženo trodimenziono strujanje se ne može uspostaviti u plitkoj vodi, sa izuzetkom zone oko glave napera [22].

Raspoloživi rezultati ukazuju na značaj metoda numeričke simulacije u dinamici fluida, posebno u reprodukovanju vrtložnih tokova većih razmera, koji bitno utiču na procese razmene koji imaju svoje karakteristične dužine mešanja. Medutim, efektivna razmera dužine mešanja se teško može ustanoviti pomoću simulacionih modela zasnovanih na Rejnoldsovom osrednjavanju, jer ti modeli ne reprodukuju vremenski zavisna kretanja većih razmera koja karakterišu trenutna strujna polja. Rešenje je u korišćenju numeričkih modela za simulaciju velikih vrtloga (LES).

3.1.3 Potopljeni naperi

Pregled dostupne literature otkrio je nedostatak istraživanja koja se bave potopljenim naperima. Razlog može biti u tome što nije bilo potrebe za ovim istraživanjima, jer naperi uglavnom funkcionišu kao nepotopljene građevine. Drugi razlog bi mogao biti složenost i trodimenzionalnost strujanja, koje zahteva napredne tehnike merenja i/ili moćne računarske (hardverske i softverske) resurse. Ipak, rezultati nekih ispitivanja objavljeni su u literaturi [22, 26, 27, 28, 38].

Aja (Aya) i dr. su 1997. godine konstatovali naglo sniženje nivoa nizvodno od prelivnog napera, što znači da je nagib nivoa između napera manji od nagiba nivoa u glavnom koritu [28]. Peng i dr. su iste godine uporedili rezultate numeričke simulacije trodimenzionog toka sa eksperimentalnim rezultatima i potvrdili da strujanje kod potopljenih napera ima izrazito trodimenzioni karakter, naročito u blizini svakog napera [26]. Recirkulacija, koja nastaje iza napera, postepeno jenjava ka sledećem, nizvodnom naperu. Shodno tome se prilagođava dužina ponovnog spajanja. Položaj centra recirkulacionog strujanja se pomera i u vertikalnom pravcu, od vrha napera (gde je blizu dna korita), ka obali (gde je blizu površine). Na uzvodnoj strani napera, tok je usmeren naviše, ka kruni napera, jer ovaj blokira osnovno strujanje.

Takode treba napomenuti da prelivanje napera deluje kao svojevrsan mehanizam prigušenja velikih horizontalnih vrtloga, koji potpuno nestanu kada se dostigne dovoljno visok stepen potopljenosti.

Važan aspekt u analizi potopljenih napera je pojava sekundarnog strujanja. Ono je posledica hidraulivčkog poremećaja koga izaziva naper svojim prisustvom. Sekundarno strujanje ima sledeće karakteristike u (u vertikalnoj, poprečnoj ravni YZ):

- u zoni napera, sekundarni tok je pri površini usmeren od obale ka glavnom koritu, a obrnuto pri dnu;
- u recirkulacionom području iza napera, sekundarni tok pri površini se takođe kreće od obale ka glavnom koritu, a pri dnu, od glavnog korita ka međunaperskom polju.

Krebs i dr. (1999) [?] su ovo potvrdili, navodeći da kod potopljenih napera postoji poprečno strujanje pri dnu, od glavnog korita ka međunaperskom polju. Međutim, kod delimično potopljenih („izranjajućih”) napera, sekundarno strujanje je zanemarljivo.

Kao što je ranije rečeno, razmak napera bitno utiče na strujnu sliku u ravni XY, ali utiče i na strujanje u ravni YZ. Razdvojen prelivni tok preko uzvodnog napera može se ponovo spojiti u jedinstveni tok između napera, a poremećen smičući napon na dnu može ponovo dostići svoju pređašnju vrednost, samo ako su naperi dovoljno razmaknuti. Isuviše mali razmak napera sprečava ponovno spajanje toka i uspostavljanje odgovarajućeg tangencijalnog napona na dnu [26].

3.2 Uticaj napera na rečnu morfologiju

3.2.1 Opšte napomene

Termin „erozija” može se dovesti u vezu sa mnoštvom prirodnih procesa, kao što su erozija zemljišta, erozija plaže u međunaperskom polju ili erozija rečne obale. Ovaj proces može nastati pod dejstvom strujanja vode, vazduha ili udara talasa. U kontekstu stabilnosti brane, napera, mostovskog stuba i drugih građevina, za lokalizovanu eroziju se koriste i termini „potkopavanje” i „ispiranje” (engl. „scour”). Deonica reke takođe može biti podložna eroziji, ali tu pojavu obično kvalifikujemo terminima „opšta erozija” ili „degradacija korita”.

Erozija, koja se manifestuje kao lokalno spuštanje dna rečnog korita, može se podeliti na:

(i) eroziju koju izaziva suženje korita usled prisustva objekata, kada se na ograničenoj (relativno kratkoj) deonici menjaju geometrija i površina proticajnog preseka;

(ii) lokalno ispiranje koje nastaje usled poremećaja lokalne strujne slike, sa generisanjem makroturbulentne strukture toka u blizini objekta; ovo ispiranje je uvek intenzivnije od ispiranja (erozije) usled suženja, pri čemu se oba vida ispiranja često mogu superponirati.

Ispiranje može biti u uslovima „čiste vode” (bez pronosa nanosa) ili u uslovima „živog korita” (opšte pokretnog dna, tj. pri kretanju nanosa). Drugim rečima, ispiranje pri čistoj vodi podrazumeva da je materijal na dnu korita uzvodno od mesta ispiranja u stanju mirovanja. Ispiranje pri živom koritu podrazumeva opšti transport nanosa sa kontinualnim dotokom nanosa u zonu ispiranja.

Za razliku od ispiranja, degradacija podrazumeva odnošenje materijala sa dna rečnog korita na velikom odstojanju, u uzvodnom smeru, nizvodnom

smeru, ili u oba smera. Na primer, izgradnja brane obično izaziva nizvodno prostiranje opšte erozije (degradacije) korita. (Na taj način reka sama teži da kompenzuje deficit nanosa, čiji je transport zaustavila brana.) S druge strane, veštačko sniženje nivoa vode (na primer usled prekomernog bagerovanja) po pravilu izaziva degradaciju koja se prostire u uzvodnom smeru (pojavu koja se zove „regresivna erozija”). U oba slučaja, degradaciju prati promena uzdužnog nagiba dna rečnog korita.

Sa izgradnjom sistema napera, konfiguracija rečnog dna se menja usled kombinovanog efekta degradacije na potezu suženog korita i lokalne erozije oko glave svakog napera. Obe pojave su istraživali brojni autori. Ipak, sumarni efekat deformacije rečnog korita usled sistema napera, tj. objedinjeni uticaji opšte i lokalne erozije, predmet su izučavanja samo malog broja autora. U nastavku se prikazuju neki rezultati izučavanja uticaja napera na morfologiju rečnog korita.

3.2.2 Deformacija korita u dugačkom suženju

Degradacija korita koja nastaje izgradnjom sistema napera tretira se kao *erozija u dugom suženju*. Posledica smanjenja širine korita je povećanje brzine i tangencijalnog napona na dnu, što utiče na povećanje transportnog kapaciteta toka za odnošenje nanosa. Ako je suženje dovoljno dugačko i trajno, opšta erozija može zahvatiti rečno korito po celoj dužini.

Predloženo je nekoliko analitičkih modela za izračunavanje opšte erozije du dugačkom suženju. Jedan od najstarijih linijskih, uprošćenih modela, zasnovan na teoriji ravnotežnog stanja, je model Štrauba iz 1934. godine. Postoji još nekoliko analitičkih modela iz kasnijeg perioda.

Komura (1966) [21] i Gil (1981) [10] su došli do sličnih izraza za eroziju usled suženja. Komura je istraživao uticaj krunoće zrna i standardne devijacije raspodele krupnoće nanosa, pa je došao do ovakvog izraza:

$$\frac{d_2}{d_1} = \begin{cases} \left(\frac{B_1}{B_2} \right)^{6/7} \left(\frac{\tau_1}{\tau_2} \right)^{3/7} \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^{-1/7} & \text{- nepokretno dno („čista voda”)} \\ \left(\frac{B_1}{B_2} \right)^{6/7} \left(\frac{\tau_1}{\tau_2} \right)^{2/7} & \text{- pokretno dno.} \end{cases} \quad (3.1)$$

gde su d_1 i d_2 – dubine, B_1 i B_2 – širine korita i τ_1 i τ_2 – tangencijalni naponi na dnu, bez dugačkog suženja korita i sa njegovim suženjem.

Lejnov princip ravnoteže. Jedan od načina da se proceni „odgovor” reke na nametnuto dugačko suženje (ili bilo koju drugu prisilnu promenu hidrauličkih parametara toka), je primena „Lejnovog principa ravnoteže” iz 1955. godine [3, 18, 19]. Ovaj princip kaže da svaki stabilan tok karakteriše ravnoteža između protoka vode (Q), uzdužnog nagiba dna korita (i), pronosa nanosa (S) i krupnoće nanosa (srednjeg prečnika zrna D):

$$S \cdot D \propto Q \cdot i, \quad (3.2)$$

gde simbol \propto označava proporcionalnost.

Ova relacija se može i analitički izvesti primenom četiri jednačine koje opisuju rečni režim u prostoru i vremenu. Reč je o jednačinama održanja mase vode i nanosa, kao i jednačinama održanja količine kretanja vode i pronosa nanosa [18]. Lejnovu relaciju ravnoteže je kasnije modifikovao Klasen (Klaassen, 1995), uključivanjem više parametara, što je dovelo do dva izraza:

$$\begin{aligned} \text{(a) za nagib dna } (i): S \cdot D^p \cdot B^{(n-3)/3} &= m \cdot C^{(2n)/3} \cdot Q^{n/3} \cdot i^{n/3} \\ \text{(b) za dubinu vode } (h): S \cdot D^p \cdot B^{n-1} &= m \cdot Q^n \cdot h^{-n}, \end{aligned}$$

gde vrednosti eksponentata n i p zavise od jednačine za transport nanosa. Za velike vrednosti tangencijalnog napona na dnu: $n = 2 \div 5$; za formulu Englund-Hansen (1967): $n = 5$, $p = 1$. Za formulu MPM (Meyer-Peter i Muller, 1948) je: $p = (3/2) 0,047/(\theta' - 0,047)$, gde je: θ' – korigovani Šildsov (Shields) broj.

Da bi se obuhvatila godišnja varijacija protoka dodat je i ovaj izraz:

$$\text{(c) } V \cdot D^p \cdot B^{(n-3)/3} = m \cdot C^{2n/3} \cdot i^{n/3} \cdot N \sum P_i \cdot Q_i^{n/3},$$

gde je: $V = \int_{1\text{god}} S dt$ – godišnja količina nanosa, N – broj sekundi/god, a P_i – verovatnoća pojave protoka Q_i .

Kada se ovaj koncept primeni na uprošćeni slučaj konstantnog protoka vode i pronosa nanosa, dolazi se do jednostavnih izraza za promenu dubine vode i nagiba dna usled dugačkog suženja:

$$\frac{d_2}{d_1} = \left(\frac{B_2}{B_1} \right)^{-(n-1)/n} \quad (3.3)$$

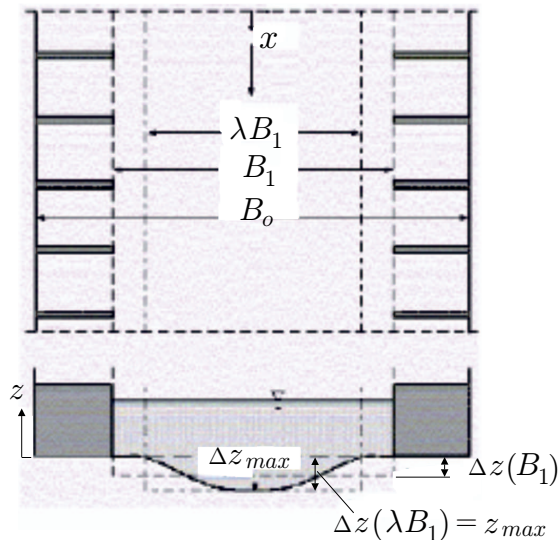
$$\frac{i_2}{i_1} = \left(\frac{B_2}{B_1} \right)^{(n-3)/n}. \quad (3.4)$$

3.2.3 Deformacija korita usled sistema napera

Opšta erozija (degradacija) korita izazvana sistemom napera može se tretirati kao erozija usled dugačkog suženja. Međutim, zbog odvajanja toka oko vrha svakog napera, uticaj sistema napera je nešto drugačiji od uticaja kompaktnog, neprekidnog dugačkog suženja. U literaturi [35] uveden je multiplikator (λ) koji konvertuje širinu suženja izazvanu izgradnjom sistema napera u njoj ekvivalentnu širinu kompaktnog dugačkog suženja. Faktor λ uzima sledeće vrednosti:

- za $S/L \rightarrow 0$, $\lambda \rightarrow 1$
- za $S/L \rightarrow \infty$, $\lambda \rightarrow (B_o/B_1)$,

gde je: S – razmak napera, L – dužina napera, B_o – širina kanala, a $B_1 = B_o - L$ – širina suženja (Slika 3.5).



Slika 3.5: Definicija koeficijenta λ [34].

Na osnovu eksperimenata sa sistemom napera u laboratorijskom kanalu, Suzuki i dr. (1987) su pokazali da kada je vrednost odnosa (S/L) veoma mala, naperi deluju kao celina [35]. Kada je vrednost S/L veoma velika, svaki naper deluje za sebe, nezavisno od drugih napera. Kada je vrednost $S/L = 4 \div 8$, degradacija korita je skoro ista kao kod dugačkog suženja ($\lambda = 1$). Kada je $S/L < 4$, erozija korita je veća nego kod dugačkog suženja ($\lambda < 1$), a manja, kada je $S/L > 8$ ($\lambda > 1$).

Vang (Wang) i Janapirut (Yanapirut) su 1988. sproveli sličan eksperiment kako bi proučili uticaj odnosa S/L , obuhvatiši opseg $S/L = 1,67 \div 5,0$. Analitički su izveli formulu za eroziju pri dostizanju ravnotežnog stanja (do koje su ranije došli i drugi autori):

$$\frac{d_2}{d_1} = \left(\frac{B_1}{B_2} \right)^{6/7}. \quad (3.5)$$

Ova formula je dimenzionom analizom proširena tako da obuhvati uticaj parametra S/L :

$$\frac{d_2}{d_1} = \left(\frac{B_1}{B_2} \right)^{6/7} \left(\frac{S}{L} \right)^{-1/7}. \quad (3.6)$$

Spanring (Spanring, 1999) [34] je primenio formulu Komure za terminalnu eroziju (dostizanja ravnotežnog stanja) da bi inverzno sračunao Suzukijevu vrednost multiplikatora λ . Naime, na osnovu poznatih ili sračunatih vrednosti Δz_{max} , mogu se sračunati vrednosti λ . One su u relativno uskom rasponu, sa srednjom vrednošću: $\lambda = 0,78$ ($\sigma_\lambda = 0,02$). Autor je takođe zaključio da se poprečni presek eroziona jame može dobro aproksimirati polinomom četvrtog stepena.

3.2.4 Lokalna erozija oko napera

Karakteristično svojstvo napera je lokalna erozija (ispiranje podloge) oko napera. Proces lokalne erozije oko napera (i mostovskih oporaca) može se podeliti u nekoliko faza: početnu fazu, fazu razvoja, fazu stabilizacije i fazu ravnoteže [16, 42]. Dva ključna svojstva su ravnotežna eroziona dubina i vreme evolucije eroziona jame.

Ravnotežna eroziona dubina. Izvedene su mnoge formule za prognozu najveće eroziona dubine. Opsežan pregled i detaljna poređenja razlivcitih formulacija lokalne erozije oko mostovskih oporaca i napera mogu se naći u literaturi [8, 9, 16, 20, 24].

Kroz laboratorijske eksperimente, nekoliko istraživača je nezavisno došlo do sličnog izraza za ravnotežnu (konačnu, terminalnu) dubinu lokalne erozije oko napera. Primer je izraz Ahmeda [16]:

$$y_{s,e} + h_o = K_A K'_A \left(\frac{q}{1-m} \right)^{2/3}, \quad (3.7)$$

gde je:

- $y_{s,e}$ – ravnotežna eroziona dubina;
- h_o – početna dubina vode;
- $m = b/B$ – odnos širine napera (b) i širine korita (B);
- K'_A – koeficijent $\approx 1,0 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}^{2/3}$;
- K_A – sumarni korekcionni koeficijent: $2 K_p K_s K_\alpha K_\mu$,
gde su *koeficijenti uticaja*:
- K_p – krivine ($0,85 \div 1,4$);
- K_s – nagiba građevine ($1,0$ – vertikalni; $0,85$ – nagib $1:1$);
- K_α – napadnog ugla ($30^\circ \div 150^\circ = 0,8 \div 1,1$);
- K_μ – proznosti *por* ($0,2$ za *por* = 1 , $0,5$ za *por* = $0,9 \div 0,6$).

Ovaj izraz je zasnovan na dimenzionalnoj analizi i eksperimentalnom radu. Nema teoretsku podlogu i ne obuhvata neke parametre za koje se ispostavilo da su od značaja. Lørsen (Laursen), koji je dao veliki doprinos izučavanju problema lokalne erozije, naglasio je značaj razlikovanja erozije koja se odvija u „čistoj vodi” i erozije u uslovima „životnog” – opšte pokretnog dna (kao što je već ranije spomenuto).

Gil (Gill, 1972) [9] je kroz analitička razmatranja nadgradio Štraubovu (Straub) formulaciju. Razdvojio je slučaj „čiste vode”, kada je tangencijalni napon na dnu manji od kritičnog napona za pokretanje zrna ($\tau < \tau_c$), od slučaja opšte pokretnog dna ($\tau > \tau_c$). Pri tome, uveo je uticaj krupnoće zrna (D) i parametra (n) koji predstavlja eksponent u izrazu za transportni kapacitet vodotoka za nanos:

$$S = m \cdot u^n, \quad (3.8)$$

gde je: S – prnos nanosa (transportni kapacitet), $m = b/B$ – odnos širine napera (b) i širine rečnog korita (B), a u – brzina toka. Gilova formula ima ovaj oblik:

$$y_{s,e} + h_o = h_o \begin{cases} \alpha \left(\frac{1}{1-m} \right)^{6/7} \left(\frac{\tau_1}{\tau_2} \right)^{3/7} & \text{- nepokretno dno („čista voda”)} \\ \alpha \left(\frac{1}{1-m} \right)^{(6/7)-(3/7n)} & \text{- pokretno dno } (\tau_c \gg \tau_1). \end{cases} \quad (3.9)$$

Na osnovu laboratorijskih eksperimenata je: $\alpha = 8,375 (D_{50}/h_o)^{0,25}$.

Hofmans i Verheij (Hoffmans, Verheij, 1997) su uporedili veliki broj formula sa eksperimentalnim podacima i predložili su sledeći izraz [16]:

$$y_{s,e} = h_o \left[\left(\frac{1}{1-m} \right)^{2/3} - 1 \right] + K_B b \operatorname{tgh} \left(\frac{h_o}{b} \right), \quad (3.10)$$

gde je: $y_{s,e}$ – eroziona dubina (u odnosu na početnu dubinu toka), $m = b/B$ je odnos širine napera (b) i širine korita (B), a K_B – korekcionni faktor (1,5 kod napera sa nagnutim stranicama).

Eroziona dubina kod sistema napera. Kada se obala štiti sistemom napera, eroziona dubina zavisi od položaja napera. Lokalna eroziona dubina oko napera koji je dovoljno daleko nizvodno od prvog napera u nizu, znatno se razlikuje od eroziona usamljenog napera. Ali s druge strane, eroziona dubina oko prvog (najuzvodnijeg) napera je slična onoj kod usamljenog napera. Zbog međusobnog uticaja susednih napera, njihova eroziona dubina je manja od eroziona dubine usamljenog napera.

Suzuki i dr. [35] su kroz laboratorijske eksperimente pokazali da lokalna eroziona dubina oko bilo kog napera dovoljno udaljenog od prvog napera, zavisi od razmaka napera (S) i njegove dužine (L):

$$\frac{Z_{s,DS}}{Z_{s,1}} = 0,07 \frac{S}{L} + 0,14 \quad (2 < \frac{S}{L} < 10), \quad (3.11)$$

gde je: $Z_{s,DS}$ – eroziona dubina oko bilo kog napera dovoljno daleko nizvodno od prvog napera, $Z_{s,1}$ – dubina erozije oko prvog napera. Dubina $Z_{s,1}$ se računa pomoću izraza za usamljeni naper.

Kada je $S/L > 12$, naperi su dovoljno razmaknuti da se više ne mogu posmatrati kao sistem napera, već se bilo koji naper u sistemu može tretirati kao usamljeni naper.

U literaturi [29] prikazana je batimetrija oko sistema napera postavljenih u dve krivine reke Varte (Warta River). Ustanovljeno je da lokalna eroziona dubina varira u zavisnosti od položaja napera. Najveća eroziona dubina javlja oko napera koji se nalazi neposredno nizvodno od temena krivine. Podužna promena eroziona dubine kod napera koji se nalaze duž konkavne obale u krivini je dosta slična promeni konfiguracije dna usled prirodne zakrivljenosti toka u krivini. Raspored eroziona dubine zavisi i od protoka i topografije korita u krivini.

Na osnovu terenskih merenja, predložen je izraz za procenu erozione dubine u krivini:

$$y_{s,e} = \beta H \left[\frac{h_o}{H} + \frac{Q_g}{Q_o} \cos \left(2\pi \frac{x}{L} \right) + \sin (\alpha - 90) \right]^{n-2}, \quad (3.12)$$

gde je:

- β – koeficijent (prema [29]: 0,275);
- α – ugao između osovine napera i smera toka;
- n – eksponent u izrazu za pronos nanosa ($s = m \cdot u^n$);
- H – srednja dubina na razmatranoj deonici;
- h_o – neporemećena dubina toka;
- L – dužina krivine;
- x – rastojanje od početka krivine;
- Q_o – protok u delu korita bez napera;
- Q_g – protok u delu korita sa naperima: $Q_g = h_o U S \sin \Delta\varphi/2$;
- S – razmak napera;
- U – brzina neporemećenog toka kod nožice napera;
- $\Delta\varphi$ – ugao između dva susedna napera.

Širi pregled problema lokalne erozije može se naći u literaturi [16, 29].

Vremenska razmera erozionog procesa. Za mostovske oporce (kao i napere) čija je dužina veća od dubine vode, Hofmans i Verhej (1997) su predložili sledeću formulu, koja važi za sve faze erozije [16]:

$$\frac{y_s}{y_{s,e}} = 1 - e^{a(t/t_s)^\gamma}, \quad (3.13)$$

gde je:

- $y_{s,e}$ – ravnotežna eroziona dubina (u odnosu na početnu dubinu) [m]
- y_s – eroziona dubina u bilo kom trenutku t [m];
- t – vreme [s];
- γ – konstanta ($\approx 0,4$);
- a – parametar početnog stanja.

Empirijski je utvrđeno da je:

$$a = \ln \left(1 - \frac{h_o}{h_o + y_{s,e}} \right), \quad (3.14)$$

gde je h_o – početna dubina toka.

Na osnovu dimenzione analize i mnogih eksperimenata je definisano vreme dostizanja ravnotežne eroziona dubine:

$$t_s = \frac{K \cdot h_o^2 \cdot \Delta^{1,7}}{(\alpha U_o - U_c)^{4,3}}, \quad (3.15)$$

gde je:

- K – koeficijent vremena ($K = 330$ sati $m^{2,3} s^{-4,3}$, za t_s u satima);
- Δ – relativna gustina nanosa (1,65);
- α – empirijski koeficijent intenziteta turbulencije (2÷9);
- U_o – srednja brzina toka [m/s];
- U_c – kritična brzina za pokretanje nanosa [m/s].

Geometrija eroziona jame. Ovaj aspekt erozionog procesa nije bio od ključnog značaja za istraživanje, pa se ovde navode samo neki rezultati.

Radžaratnam (Rajaratnam, 1983) [30] je eksperimentalno ispitivao raspored tangencijalnog napona u blizini napera i ustanovio je povećanje ovog napona i do 5,2 puta u odnosu na zonu neporemećenog toka (daleko od napera).

Kunle (Kuhnle) i dr. (1999) [23] su izučavali modele nepotoljenih i potopljenih napera u laboratoriji. Izradili su detaljne karte koje prikazuju geometriju erozionih jama i dali su njihove kvantitativne pokazatelje – površinu i zapreminu. Ustanovili su i da veći stepen prelivanja dovodi do pomeranja zone maksimalne eroziona dubine ka obali i formiranja sekundarne zone erozije nizvodno od napera.

Peng i dr. (1999) [27] su proučavali deformaciju korita (eroziju i taloženje) oko potopljenih napera putem numeričkih simulacija i uporedili su rezultate proračuna sa eksperimentalnim rezultatima. Primetili su da se erozija brzo razvija u početnoj fazi, tako da se 78% terminalne eroziona dubine dostiže unutar 25% terminalnog erozionog vremena (vremena dostizanja ravnotežnog stanja deformacije). Dali su prikaz poprečnih i podužnih profila erozionih jama i pokazali da se erodirani pesak taloži neposredno nizvodno od eroziona jame.

Klingman (Klingeman) i dr. (1984) [20] su ispitivali položaj erozionih jama i otkrili da su oblik i površina tih jama snažno povezani sa orijentacijom napera u odnosu na rečni tok.

Poglavlje 4

Hidraulički poremećaji usled plovidbe

Na plovnim rekama kao što je Rajna, koja se smatra kičmom mreže evropskih unutrašnjih plovnih puteva, plovidba ima značajan uticaj na morfologiju kako glavnog korita tako i međunaperskih polja. Stoga se plovidba mora uzeti u obzir kada se razmatra interakcija između međunaperskih polja i glavnog korita.

4.1 Strujanje vode izazvano plovidbom

Pre razmatranja strujanja vode u blizini napera koje je izazvano kretanjem plovila, analiziraće se strujanje vode oko broda, uključujući poremećaje nivoa vode.

4.1.1 Strujanje vode oko broda

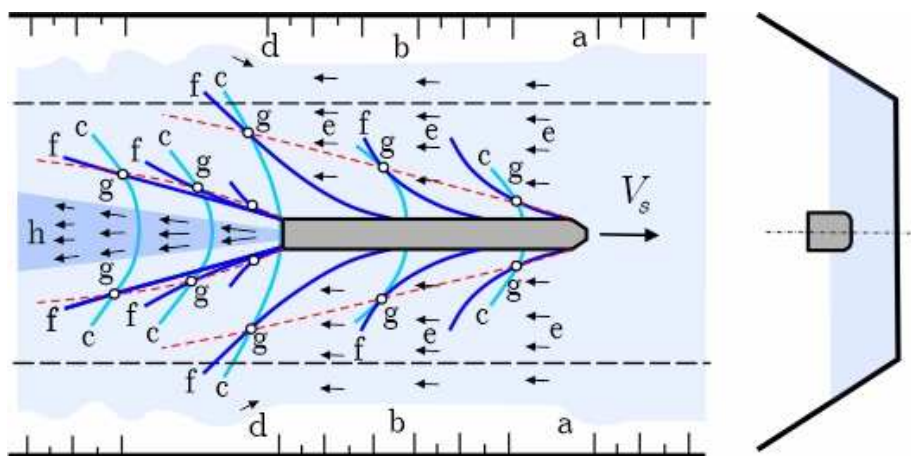
Brod u toku plovidbe stvara hidrauličke poremećaje u vidu talasa i strujanja. Dominantan je poremećaji su:

- depresija (sniženje nivoa oko broda);
- povratno strujanje oko trupa broda;
- strujanje indukovano radom brodskih propelera;
- sekundarni talasi.

Talasi nastali kretanjem broda predstavljaju *sekundarno strujanje* vode u plovnom putu. Veličina broda u odnosu na plovni put i brzina plovidbe diktiraju veličinu uticaja – hidrauličko „opterećenje” na kosine i dno plovnog puta [3, 15].

Tokom plovidbe, brod indukuje lokalno sniženje nivoa oko broda koje se naziva „depresija” (Slika 4.1). Sniženje nivoa počinje od pramca broda

i proteže se sve do njegove krme, stvarajući talas trajanja reda veličine $40 \div 12$ s, u zavisnosti od dužine broda. Depresija usled prolaska broda može izazvati isušenje plitkih oblasti duž obale u toku prolaska broda.



Slika 4.1: Strujanje izazvanom prolaskom broda u plovnom putu ograničene širine i dubine; a - čeonni talas; b - sniženi nivo vode (depresija); c - vrhovi transverzalnih (poprečni) talasa; d - tok za vraćanje nivoa; e - povratno strujanje; f - vrhovi divergentnih (odvajajućih) talasa; g - vrhovi presecanja divergentnih i transverzalnih talasa; h - strujanje generisano radom brodskih propelera (turbulentno, vihorno strujanje) (prema [29]).

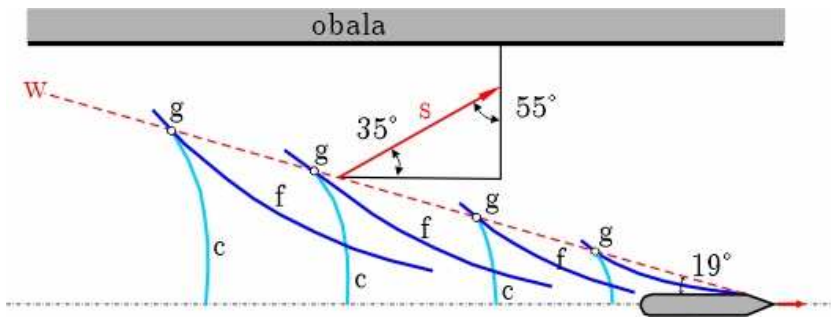
Povratno strujanje stvara se oko broda (e), naročito u zoni njegovog krmenog dela (gde je i depresiona dubina najveća). Sa uzvodnim kretanjem broda, povratno strujanje izaziva privremeno *povećanje brzine ambijentnog toka*. Kada se brod kreće nizvodno, povratno strujanje izaziva *smanjenje brzine ambijentnog toka*, a u uslovima malih voda, može čak izazvati privremeni preokret ambijentnog toka.

Strujanje izazvano radom propelera (h) ima izrazito prostorni (3D) karakter, ali predstavlja lokalni hidraulički poremećaj. Osobine mlaza usled rada propelera zavise od vrste i veličine propelera, oblika truba broda i instalisane snage pogonskog sistema.

Potisni udar mlaza, kao i njegovo usmerenje u odnosu na obalu (ugao krme), imaju uticaj na stabilnost dna i obala. U uslovima normalne plovidbe, efekti rada propelera su ograničeni na oblast neposredno nizvodno od broda ili potiskivanog sastava, duž trajektorije kretanja.

Sa čela broda ili vodeće barže u sastavu, talasi (f) se šire (divergiraju) od bokova sastava. Divergentni talasi presecaju poprečne (transverzalne) talase (c), stvarajući povećanje nivoa – „vrhove” talasne interferencije (g). Linija koja povezuje te vrhove označava *sekundarne talase* nastale kretanjem broda ili sastava (razlikuju se pramčani i krmeni sekundarni talasi). Pri plovidbi teretnih brodova ugao koji pramčani sekundarni talas zaklapa sa pravcem plovidbe ima ugao od $19^{\circ} 28' \approx 19^{\circ}$ (Slika 4.2).

Sekundarni talasi prostiru se pod izvesnim uglom u odnosu na obalu (oko 55°). Oni su uglavnom konzistentni po amplitudi i imaju kratke periode ($1 \div 5$ s). Međutim, kod brzih brodova, ovi talasi mogu imati značajnu visinu i dominiraju kao hidraulički poremećaj.



Slika 4.2: Strujanje izazvano kretanjem broda; c-transverzalni talas; f - divergentni talas; g - tačka interferencije divergentnih i transverzalnih talasa; w - sekundarni talas; s - pravac prostiranja sekundarnog talasa (prema [29]).

Poprečni, transverzalni talasi gube na intenzitetu sa odstojanjem od krme broda i imaju talasnu periodu od $2 \div 5$ s.

Uticao talasa se smanjuje sa povećanjem brzine povratnog toka i depresije nivoa oko broda. Imajući to u vidu, može se smatrati da mali, brzi brodovi imaju veći uticaj na eroziju obale usled sekundarnih talasa, dok veliki, sporoploveci brodovi/sastavi pretežno izazivaju eroziju povratnim strujanjem.

4.1.2 Povratno strujanje i depresija nivoa

Brod koji se kreće brzinom V_s u ograničenom plovnom putu (npr. plovnom kanalu), indukuje povratno strujanje (e) i depresiju nivoa (b) (Slika 4.1). Prema Bernoulli-jevoj teoremi, što je veća brzina povratnog strujanja, to je niži nivo oko broda.

Koristeći jednačine održanja mase i energije (Bernoulli), izvedeni su izrazi za prosečnu brzinu povratnog strujanja (U_r) i depresiju nivoa (Δh) (Schijf i PIANC, 1986, Przedwojski i dr. 1995, Groeneveld, 1997):

$$U_r = V_s \left(\frac{A}{A_w} - 1 \right) \quad (4.1)$$

$$\Delta h = \frac{V_s^2}{2g} \left[\alpha \left(\frac{A}{A_w} \right)^2 - 1 \right] \quad (4.2)$$

$$\alpha = 1,4 - 0,4 \left(\frac{V_s}{V_{lim}} \right), \quad (4.3)$$

gde je: V_s – brzina broda, A – površina neporemećenog poprečnog preseka plovog puta, A_w – površina poremećenog poprečnog preseka plovog puta usled prolaska broda: $A_w = A - \Delta h B - A_s$), A_s – površina poprečnog preseka uronjenog trupa plovila ($A_s = B_s T_s$), B – širina nivoa u neporemećenom preseku, B_s – najveća širina broskog trupa, T_s – najveći gaz broda.

Parametar V_{lim} predstavlja *graničnu* brzinu plovidbe u plovnom putu datih dimenzija, koja je nešto manja od brzine prostiranja talasa u „plitkoj” vodi, $c = \sqrt{gh}$, dakle:

$$V_{lim} = 0,5 \div 0,75 \sqrt{gh}, \quad (4.4)$$

gde je h – dubina u neporemećenom preseku plovog puta.

Jednačine (4.2)–(4.3) se mogu rešiti iterativno, a postoje i nomogrami (Groeneveld, 1997). Najveće vrednosti brzine povratnog toka i depresije zavise od tipa broda. Za potiskivane sastave, Verheij i Van der Val (Verheij, van der Wal, 1984) su dali ove preporuke [43]:

$$U_{rmax} = C U_r \quad (4.5)$$

$$\Delta h_{max} = C \Delta h, \quad (4.6)$$

pri čemu se vrednost koeficijenta C računa pomoću izraza:

$$C = 1,2 + 5 \times 10^{-4} \text{Fr} \frac{B}{y_t} \left(\frac{L_s^2}{h \sqrt{A_s}} \right), \quad (4.7)$$

gde je: $Fr = V_s / \sqrt{gh}$ – Froude-ov broj, y_t – udaljenje osovine broda od linije obale plovnog puta, L_s – dužina broda i A_s – površina poprečnog preseka uronjenog trupa broda.

Pregled raznih formulacija brzine povratnog toka usled saobraćaja na plovnim putevima dali su Boumik i dr. (Bhowmik et al, 1995) [4] i Hočstajn i Adams (Hochstein, Adams, 1989) [15]. Za uslove plovidbe na reci Val (Waal), činilo se da najprikladnije rezultate daju modeli Hočstajna i Adamsa i Ten Brinkea (ten Brinke et al, 1999) [5].

Kasnijem upoređenjem rezultata proračuna i rezultata merenja polja brzine u međunaperksim poljima duž reke Val, došlo se do zaključka da su izmerene maksimalne brzine povratnog toka u blizini obala znatno veće od računskih brzina (čak da su veće od sračunatih prosečnih brzina u samoj reci). To je dovelo u pitanje primenljivost modela Ten Brinkea za reku Val.

Model Hočstajna i Adamsa ima ovaj oblik:

$$U_r = V_s \left(\sqrt{(a-1)B+1} - 1 \right), \quad (4.8)$$

gde su parametri: $n = A/A_s$ i $a = (n/(n-1))^{2,5}$, a faktor B:

$$B = \begin{cases} 0,3 e^{1,8V_s/V_{cr}} & \text{za } V_s/V_{cr} \leq 0,65 \\ 1 & \text{za } 0,65 < V_s/V_{cr} \leq 1,0. \end{cases} \quad (4.9)$$

Veličina V_{cr} predstavlja „kritičnu brzinu” plovidbe (koja je nešto manja od brzine prostiranja talasa u plitkoj vodi):

$$V_{cr} = K \sqrt{\frac{gA}{B}}, \quad (4.10)$$

gde je: B – širina vodnog ogledala u neporemećenom preseku plovnog puta, a K – faktor ograničenja koji zavisi od dimenzija broda i „koefficijenta plovnosti” – odnosa $n = A/A_s$. Za reku Val je $K \approx 0,7$ i $B = 1,0$.

Raspored brzine povratnog toka u poprečnom pravcu (upravno na obalu) može se definisati izrazom:

$$U_r(y) = k_1 e^{-y/k_2}, \quad (4.11)$$

gde je:

$$k_1 = U_r(0) = \alpha U_r \quad (4.12)$$

$$k_2 = y_s \left[\alpha \left(1 - e^{-\alpha f(\alpha)} \right) \right] \quad (4.13)$$

$$\alpha = \max(0, 114 B/B_s + 0, 715; 1) \quad (4.14)$$

$$f(\alpha) = 0, 42 + 0, 5 \ln \alpha. \quad (4.15)$$

U navedenim izrazima je: $U_r(y)$ – brzina povratnog toka na odstojanju y od osovine broda, y_s – odstojanje osovine broda do linije obale, a B_s – najveća širina broda.

4.1.3 Talasi izazvani kretanjem broda

Sekundarne talase stvaraju brodovi koji se kreću relativno velikim brzinama. Sastoje se od divergentnih (razilazećih) i transverzalnih (poprečnih) talasa. Rezultat interference ovih talasa predstavljaju vrhovi brodom izazvanih talasa. Smer prostiranja ovih vrhova talasa zaklapa ugao od 35° sa linijom obale. Ustanovljeno je da su vrhovi talasne interference slični talasima usled vetra, iako drugačijeg porekla. Visina vrhova talasne interference *pri obali* mogu se predvideti pomoću izraza:

$$H_i = \alpha_i h \left(\frac{h}{y_s} \right)^{0,33} Fr^4 \quad \text{za } V_s < 0, 8 V_{lim}, \quad (4.16)$$

gde je: V_{lim} – granična brzina plovidbe (4.4), y_s – odstojanje između boka broskog trupa i obale, α_i – koeficijent koji zavisi od oblika broskog trupa:

$$\alpha_i = \begin{cases} 1, 0 & \text{– potiskivani sastavi, natovarni samohodni brodovi} \\ 0, 5 & \text{– prazne barže tipa Evropa} \\ 0, 35 & \text{– prazni konvencionalni samohodni brodovi} \end{cases} \quad (4.17)$$

Navedeni izrazi su zasnovani na Kelvin-ovoj teoriji i uslove „duboke vode”. Ako se ista teorija primeni za talasnu dužinu dobija se:

$$\lambda = 0, 67 \frac{2\pi}{g} V_s^2 \quad \text{važi za: } Fr < 0, 7; H_i < 0, 67 h. \quad (4.18)$$

Perioda talasa je:

$$T = \sqrt{\frac{2\pi\lambda}{g}}. \quad (4.19)$$

Van Rejn (Van Rijn, 1993) daje izraz za maksimalnu brzinu toka na dnu:

$$u_{bmax} = \frac{\pi H_i}{T \sinh(k h)}, \quad (4.20)$$

gde je: $k = 2\pi/\lambda$ – talasni broj, a h – dubina toka.

4.2 Uticaj plovidbe na međunaperska polja

Prethodna razmatranja su zasnovana na pretpostavci idealnog slučaja plovidbe u blizini osovine kanala pravougaonog poprečnog preseka. Međutim, ako je plovni put u reci, situacija je mnogo složenija, jer postoji brojni uticajni faktori, kao što su: ekscentrična trajektorija u odnosu na osovinu toka, obale u nagibu, geometrijske nepravilnosti korita itd. Uzimanje ovih faktora čini proračun mnogo složenijim. Situacija je još komplikovanija ako je prisutan i sistem napera.

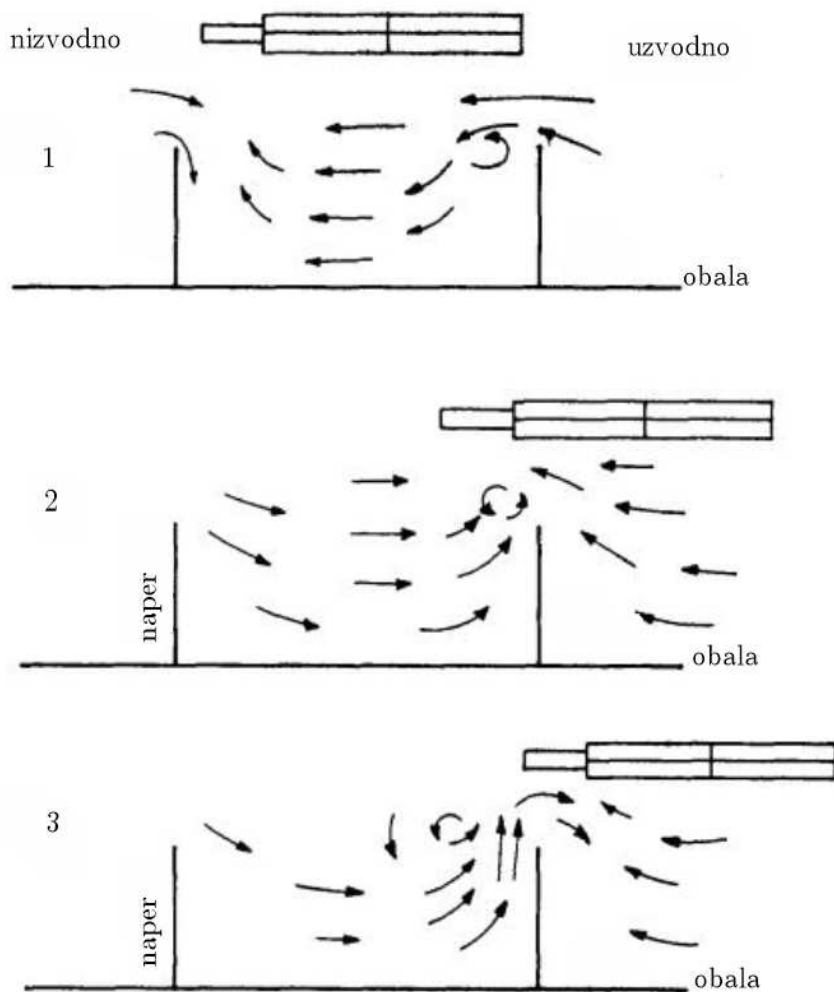
Postoje pokušaji da se ustanovi efekat plovidbe na kretanje nanosa u međunaperskim poljima pre uvođenja potiskivanih sklopova od šest barži na reci Val. Sprovedena su terenska merenja tokom probne godine [14], kao i laboratorijskih eksperimenti (WL/Delf_Hydraulics, 1987), sa ciljem da se utvrdi uticaj potiskivanih sastava od šest plovila. Dimezije sastava date su u Tabeli 4.1). U literaturi [36] detaljno je opisana metoda proračuna tečenja u međunaperskim poljima izazvanog prolaskom brodova.

Tabela 4.1: Potiskivani sastavi

Sistav	2×2	3×2	2×3
Dužina (m)	193,0	229,5	193,0
Širina (m)	22,8	22,8	34,2
Gaz (m)	2,7	2,7	2,7

Na Slici 4.3 prikazane su tri etape uzvodne plovidbe potiskivanih sastava u blizini međunaperskih polja.

Najveći intezitet povratnog strujanja nastaje odmah nakon prolaska pramca broda pored napera. Povratno strujanje se snabdeva vodom sa uzvodnog međunaperskog polja, kao i iz tekućeg polja. U zoni glave napera formira se vrtlog, a manji vrtložni trag na nizvodnom kraju brzo u potpunosti nestaje. Sa prolaskom sastava, dolazi do ponovnog punjenja vodom međunaperskog polja.

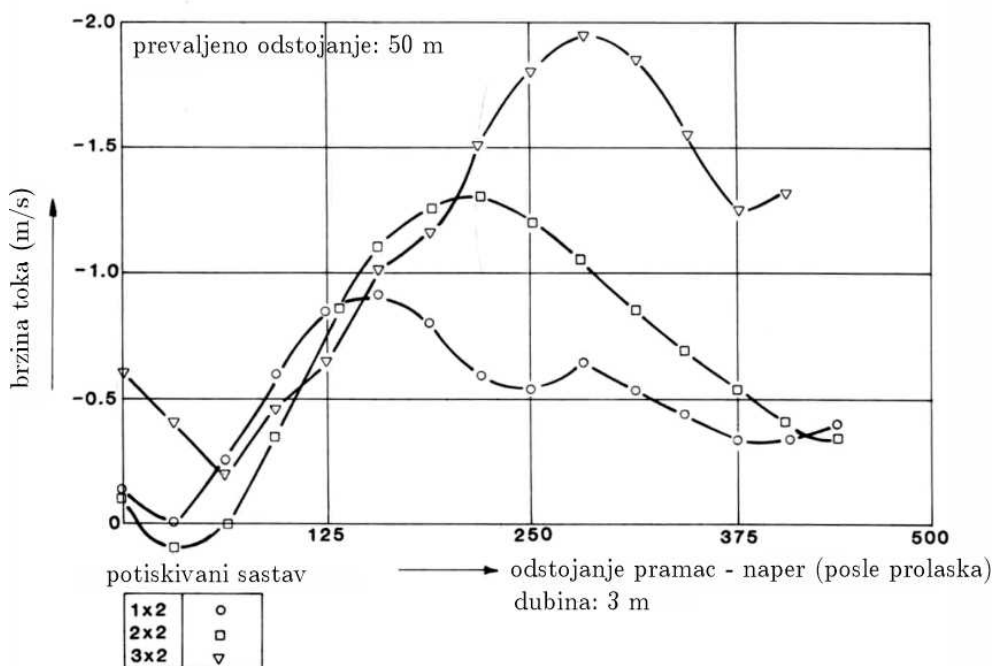


Slika 4.3: Tečenje u međunaperskom polju za vreme prolaska potiskivanog sastava (prema [6]).

Kada krmeni deo sastava prođe jedno polje, voda biva istisnuta iz tog polja od strane uzvodnog napera, koji stoji upravno na osovinu plovnog puta. Vrtlog nastao neposredno nizvodno od napera biva, posredstvom glavnog toka, odnet dalje nizvodno.

Intenzitet brzine kompleksnog toka indukovanog prolaskom brodova zavisi od dimenzija broda, njegove brzine, odstojanja do međunaperskih polja, dimenzija napera i protoka u reci.

Tečenje usled prolaska tri tipa potiskivanih sastava, (3×2 , 2×2 i 1×2) ispitivano je pomoću fizičkih modela [6]. Rezultati su prikazani na Slici 4.4. Pored toga, obavljena su i terenska merenja u toku probne 1984. godine, da bi se dodatno istražio uticaj sastava 3×2 , 2×2 i 2×3 [14]. Na osnovu oba istraživanja, došlo se do zaključaka koji slede.



Slika 4.4: Brzina povratnog toka u toku prolaska potiskivanog sastava [6].

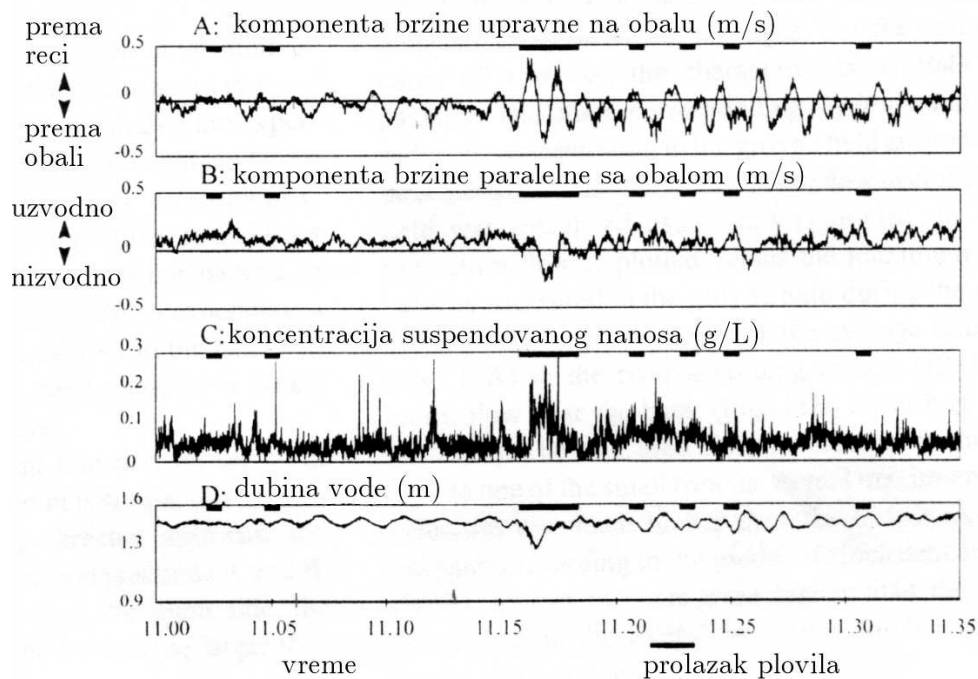
- Može se očekivati da povećanje povratnog strujanja i priliva u međunaperska polja izazovu veće brzine neposredno nizvodno od napera. Stoga, povećanje brzine broda, njegovih dimenzija i snage, povećava brzinu toka u blizini napera.

- Brzine toka u pravcima x, y rastu gotovo linearno sa povećanjem relativne brzine plovidbe svih razmatranih sastava.
- Modelska ispitivanja pokazuju da brzine u međunaperskom polju rastu sa smanjenjem udaljenosti sastava od napera.
- Eksperimenti pokazuju da su maksimalne brzine povratnog strujanja kod malih međunaperskih polja manje od onih kod velikih polja, zbog manjeg prilivnog uticaja.
- Terenskim merenjem utvrđene su brzine u međunaperskom polju pri prolasku sva tri tipa potiskivanih sastava. Sastav 2×2 izaziva najveće povratno strujanje od 1,1 m/s, što je $2 \div 3$ puta veća brzina strujanja u međunaperskom polju od one kada nema plovidbe. Široka konfiguracija sastava, 2×3 ima manji uticaj od dugačke 3×2 , ali obe formacije izazivaju veći intenzitet strujanja od formacije 2×2 . Dugački sastavi imaju veći intenzitet strujanja za 45 % od formacije 2×2 , konkretno 1,6 m/s, dok široki sastavi povećavaju intenzitet strujanja za 15 %, konkretno 1,25 m/s.
- Depresija nivoa je skoro ista za sva tri navedena sastava. Snizenje nivoa blizu vrha napera iznosi oko 27 cm, a oko 20 cm u blizini obale.
- Eksperimenti na terenu pokazuju da, dok potiskivani sastavi izazivaju značajno povećanje strujanja u međunaperskom polju, uticaj najvećeg samohodnog broda od oko 2000 t, je zanemarljiv.
- Sa povećanjem protoka u reci, uvećava se površina poprečnog preseka, što dovodi do smanjenja povratnog i prilivnog toka u međunaperskom polju, a time i smanjuju brzine toka izazvanog plovidbom. Pored toga, stepen obstrukcije preseka usled prisustva međunaperskog polja je manji, što je takođe faktor koji smanjuje uticaj plovidbe.

Efekat jednog potiskivanog sastava izučvan je i pomoću terenskih merenja [5]. Ustanovljena je depresija od $15 \div 20$ cm i povratni tok od $30 \div 40$ cm/s, što je manje od vrednosti navedene u [14], pri čemu za to nema jasnog objašnjenja. Intenzitet ovog strujanja je bio dovoljan da izazove resuspenziju nanosa u međunaperskom polju.

Primer uticaja plovidbe na brzinu toka u među naperskom polju, fluktuacije nivoa i koncentraciju suspendovanog nanosa, prikazan je na Slici 4.5. Uticaj prolaska datog potiskivanog sastava na koncentraciju nanosa, depresiju nivoa i brzinu povratnog toka, uočava se u periodu od 11:50 do 11:20 h.

Ovi rezultati su saglasni sa rezultatima terenskih merenja prikazanim u literaturi [14].



Slika 4.5: Primer terenskih zapisa koji pokazuju uticaj plovidbe na brzinu povratnog toka, dubinu i koncentraciju suspendovanog nanosa (prema: [5]).

Poglavlje 5

Morfološke promene

5.1 Opšte napomene

Tema ovog poglavlja je morfološka interakcija između međunaparskih polja i glavnog korita. Reč je o problemu koji je svojstven holandskoj praksi. Naime, kod većine reka, ova morfološka interakcija se ne smatra velikim problemom, pa se zanemaruje. Zna se da posle izgradnje naparskih sistema, po pravilu dolazi do produbljenja rečnog korita. Međutim, reka Val (Waal), na kojoj se obavlja jedan od najvećih rečnih prometa na svetu, specifična je po tome što brodovi/sastavi koji na njoj plove obično imaju dužinu koja je veća od razmaka napera i često se nađu relativno blizu napera. Ovo ima za posledicu izražen transport nanosa iz međunaparskih polja u glavno rečno korito.

Morfološka interakcija između međunaparskih polja i glavnog korita predstavlja kombinaciju plovidbenih uticaja i rečnog strujanja. Pri različitim protocima, relativni uticajni faktori imaju različitu težinu. Smatra se da erozija peskovitog nanosa nastaje usled intenziviranog strujanja koje izaziva plovidba. S druge strane, istaložavanja nanosa u međunaparskim poljima verovatno dolazi kao posledica velikih protoka kada su naperi potpuno potopljeni. Tada se nanos kreće od glavnog korita ka međunaparskim poljima, a odatle ka inundacijama [5].

Dokle god su erozija i zasipanje u ravnoteži u vremenskoj razmeri od nekoliko godina, deponija nanosa („plaža”) između napera je tzv. „*dinamič-koj ravnoteži*”. Ovaj slučaj je tokom nekoliko poslednjih dekada prisutan na holandskom sektoru reke Rajne. Međutim, ukoliko se hidrodinamičke sile promene, ova situacija se može promeniti. Na primer, to može nastati ako se promeni intezitet rečnog saobraćaja, ili ako se promeni raspored protoka

u granama Rajne (što je malo verovatno). Na rečnu morfodinamiku može takođe uticati i promena geometrije postojećih napera (njihovo sniženje, skraćenje, produženje itd.).

Nema mnogo studija interakcije između međunaperskih polja i glavnog korita. Pored toga, izučavanje uticaja plovidbe na međunaperska polja je fokusirano na periode malih voda. To je samo jedna strana problema, vezanih za eroziju plaža u međunaperskim poljima kada na strujanje dominantni uticaj ima plovidba. S druge strane, nedostaju istraživanja vezana za periode velikih voda, tako da je neizvesno koliko nanosa biva nadoknađeno u međunaperskim poljima u vreme poplava.

Uticaj plovidbe na morfologiju međunaperskih polja ispitivan je terenskim merenjima [5, 12, 13, 14], kao i pomoću modelskih ispitivanja (WL/Delft_Hydraulics, 1987). Opšti zaključak je da je opisavanje ovog složenog fenomena veoma teško. Uopšte, postoje velika neizvesnost u proceni količini nanosa i načinu njegovog transporta za vreme prolaska brodova.

5.2 Procena erozije u međunaperskim poljima

U nastavku se prikazuju rezultati nekih terenskih merenja, kao i nekih pokušaja da se analitički opiše interakcija između međunaperskih polja i glavnog korita. Prvo se daje kratak pregled rezultata terenskih merenja, a zatim se daju analitički izrazi koji opisuju navedenu interakciju.

Terenska merenja imaju veliki značaj, jer pružaju uvid u ponašanje sistema u hidrauličkim uslovima koji su vladali tokom merenja. Iako se u mnogim slučajevima može uspešno obaviti interpolacija ovih rezultata, njihova ekstrapolacija može dovesti do značajno pogrešnih zaključaka. Često se do boljeg razumevanja fizike problema može doći pomoću analitičkih modela. Generalno, analitički modeli jesu uprošteni u opisivanju stvarnosti, ali mogu (variranjem početnih uslova) doprineti većem spoznaju fizičkih uticaja. Utvari, kombinacija terenskih merenja, modelskih ispitivanja i računskih modela je najefikasniji način istraživanja sa ciljem da se što vernije opišu prirodni procesi.

5.2.1 Terenska merenja

Jedno od prvih istraživanja morfoloških promena u međunaperskim poljima objavio je de Bruin (de Bruin, 1977) [14]. Ovaj autor je kvantifikovao eroziju u međunaperskim poljima na sektoru Hulhuizen-Zaltbommel (Hulhui-

zen–Zaltbommel) reke Val od oko $3 \div 4 \times 10^6 \text{ m}^3$ u periodu 1960–1976 (17 godina). Ova procena je načinjena na osnovu fotografskih snimanja u periodima malih voda. Navedena zapremina nanosa je ekvivalentna prosečnom dotoku nanosa u glavno korito od oko $0,0075 \text{ m}^3/\text{s}$.

Tokom terenskih merenja koja su obavili Havinga i dr. (1984) [14] uočeno je da samo potiskivani sastavi mogu izazvati dovoljno povećanje brzine strujanja da pokrene nanos iz međunaperskih polja. Da bi se stekao utisak o zapremini pokrenutog nanosa iz jednog međunaperskog polja u toku prolaska plovila, mogu se koristiti informacije sumirane u Tabeli 5.1.

Tabela 5.1: *Podaci za deonicu Hulhuizen–Zaltbommel*

Dužina deonice	65 km
Broj međunaperskih polja	560
Učestalost potiskivanih sastava	8/dan
Erozija međunaperskih polja	$4 \times 10^6 \text{ m}^3/17 \text{ god} \approx 235\,300 \text{ m}^3/\text{god}$.

Ako eroziju izazivaju isključivo potiskivani sastavi, proizilazi da jedno međunapersko polje gubi oko $0,14 \text{ m}^3$ nanosnog materijala samo u jednom prolazu sastava. Na toj deonici neto promena rečnog dna u periodu 1960–1976 je bila zanemarujuće mala. U istom periodu se rečno dno na deonici Hulhizen–Nejmegen (Hulhuizen–Nijmegen) dužine 15 km, spustilo za oko 0,2 m, dok se dno na deonici Nejmegen–Zaltbommel (Nijmegen–Zaltbommel) dužine 57 km, podiglo za oko 0,06 m. To govori da je vrednost erozije koju je 1977. procenio de Bruin previlika.

Havinga i dr. (Havinga et al, 1984) su izmerili koncentraciju nanosa i brzinu strujanja za vreme prolaska plovila na deonici prikazanoj na Slici 5.1–a. Cilj merenja je bio da se kvantifikuje efekt povećanja rečnog transportnog kapaciteta sa ulaskom u upotrebu potiskivanih sastava od 6 plovila.

Na osnovu merenja autori su utvrdili trajanje transporta nanosa od oko 60 s, kao i to da se oticanje nanosa primarno dešava na uzvodnom kraju međunaperskog polja. Procenili su da je reč o dužini od oko 20 m, pri čemu se izvesno oticanje nanosa dešava i na nizvodnom kraju međunaperskog polja, neposredno po prolasku sastava. Oni su takođe procenili oticaj nanosa iz međunaperskog polja za različite konfiguracije potiskivanog sastava. Sumarni pregled ovih rezultata dat je u Tabeli 5.2. Prema datim podacima proizilazi da je zapremina erodiranog nanosa iz međunaperskog polja samo oko 40% one koju je procenio de Bruin.

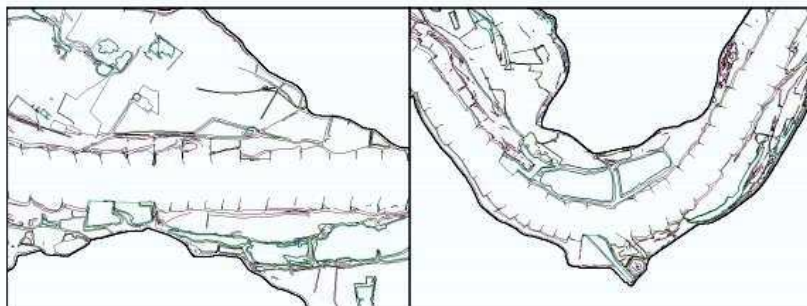
Tabela 5.2: *Pronos nanosa iz jednog međunaperskog polja usled prolaska različitih potiskivanih sastava*

Konfiguracija sastava	Maks. jedinični pronos $10^6 \text{ m}^2/\text{s}$	Zapremina odnetog materijala $\text{m}^3/\text{prolasku}$
2×2	9,8	0,035
3×2	19,6	0,070
2×3	12,0	0,040

Dodatni zaključak studije autora Havinga i dr. (1984) je u vezi sa uticajem konfiguracije sastava na pronos nanosa u jednom prolazu sastava. Imajući u vidu Poglavlje 4 – tačka 4.2, dugački sastavi izazivaju mnogo jači povratni tok koji duže traje od onog kod kratkih sastava. Shodno tome, odgovarajući fluks nanosa iz međunaperskog polja je mnogo veći kod dugačkih nego kod kratkih sastava.

Šta više, isti autori su primetili da je nanos na dnu u stanju mirovanja kad nema plovidbe, a da granična vrednost brzine toka za njegovo pokretanje iznosi $0,2 \div 0,3 \text{ m/s}$. Tome treba dodati i to da je priliv nanosa iz glavnog korita u međunaperska polja mnogo manji u periodima kada nema prolaska brodova. Dotok nanosa u međunapersko polje dešava se duž njegovog nizvodnog dela, primarno pod uticajem povratnog, recirkulacionog (vrtložnog) strujanja.

De Has i Van Esen (De Haas, van Essen, 1987) [12] su izučavali međunaperska polja na provolinijskoj deonici reke Val blizu mesta Druten, koja je prikazana na Slici 5.1-a.



Slika 5.1: *Reka Val (Waal): a – sektor Druten; b – sektor St. Andries.*

Rezultati su u saglasnosti za zaključkom da postoji dotok nanosa iz rečnog korita u odsustvu plovidbe. U ovom slučaju, merenja su obavljena u toku relativno velikog protoka ($2000 \div 3000 \text{ m}^3/\text{s}$). Zato je i procenjeni pronos

nanosa relativno veliki, reda veličine $3,6 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ za svako međunapersko polje. Pri plovidbi, taj pronos je veći, ali o tome nema podataka.

Pored pravolinijske deonice Druten, navedeni autori su ispitivali i međunaperska polja u spoljašnjoj krivini na sektoru St. Andries [13] (Slika 5.1–b). U ovom slučaju, nije detektovan priliv nanosa iz reke, već je primećena erozija. To se može objasniti time što su naperi locirani u dubljem delu korita, pri čemu helikoidna struktura toka u krivini pogoduje eroziji međunaperskih polja duž konkavne obale.

Kasnija istraživanja preduzeo je ten Brinke (1999) [5]. Obavljena su merenja na sektoru prikazanom na Slici 5.1–a. Primer rezultata je dat na Slici 4-4. Može se videti da se vrhovi uticaja turbulencije poklapaju sa prolaskom potiskivanih sastava. Procenjeno je da u 15 % vremena prosečan pronos nanosa iz svakog međunaperskog polja iznosi $4,5 \text{ kg/s}$ ($0,003 \text{ m}^3/\text{s}$). Ova vrednost je ekvivalentna od $0,18 \text{ m}^3/\text{prolasku}$ (sa trajanjem prolaska od 60 s), tako da u odnosu na vrednosti iz Tabele 5.2, ona je 2,5 veća od najveće vrednosti do koje su došli Havinga i dr. (1984) [14].

Navedena vrednost je korišćena za procenu bilansa nanosa iz međunaperskog polja u glavno korito. Sa oko 500 međunaperskih polja duž obala reke Waal, priliv nanosa u glavno korito iznosi $7 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{god}$. Međutim, ova zapremina je nerealno previsoka, jer se zna da je transport nanosa u reci Val približno $0,5 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{god}$. Objasnjenje za ovo neslaganje može se potražiti u sledećim uzrocima:

- Studija je obavljena pri relativno niskim protocima od oko $1000 \text{ m}^3/\text{s}$, u odnosu na srednji protok koji iznosi $1467 \text{ m}^3/\text{s}$. To znači da je uticaj plovidbe relativno veliki, pri čemu je on tim veći, što je vodostaj niži.
- Predmetna deonica je pravolinijska, tako da se rezultati ne mogu smatrati validnim za ceo rečni tok. Međunaperska polja se različito „ponašaju” u zavisnosti od njihovog položaja duž vodotoka. Polja u krivinama se značajno razlikuju od onih na pravolinijskim deonicama. Pri tome, u krivinama nije svejedno da se radi o konkavnoj ili konveksnoj obali.
- Za procenu ukupne godišnje zapremine nanosa za vremensku osnovu uzeta je godina dana, zanemarujući uticaj krive protoka. U periodu velikih voda, uticaj protoka se može zanemariti. To vodi smanjenju vremena u kome se javlja erozija međunaperskih polja.

5.2.2 Analitički pristup

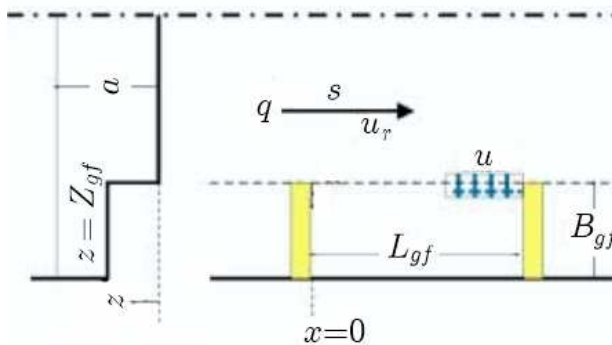
Prvi pokušaj analitičkog pristupa u rešavanju problema potiče od autora Havinga i dr. (1984) [14], sa primarnim ciljem da se ispita uticaj potiskivanih sastava od 6 plovila. Izvršena je uporedna analiza uticaja sastava od 4 plovila i sastava od 6 plovila. Pri tome je pretpostavljeno da je trenutna morfološka situacija posledica saobraćaja sastava od 4 plovila.

Za poređenje je uzeta u obzir maksimalna brzina povratnog strujanja kod oba sastava, a kao referentni nivo je uzeto postojeće dno međunaparskih polja. Autori su procenili da korišćenje sastava od 6 plovila vodi sniženju plaža u međunaparskih polja za red veličine od oko $1 \div 2$ m. Ovaj model se neće razmatrati, jer je zasnovan na veoma grubim pretpostavkama.

Analitički model razvijen u WL/Delft_Hydraulics (1987) je zasnovan na jednačini održanja mase. Sastoji se od dva dela. Prvi deo opisuje zasipanje međunaparskih polja u „normalnim” prirodnim uslovima. Drugi deo se odnosi na eroziju međunaparskih polja. Oba dela pretpostavljaju da su naperi nepotopljeni.

Zasipanje međunaparskih polja. U ovoj, prvoj komponenti modela, pretpostavlja se da nema plovidbe i da se zasipanja odvija kao posledica dotoka nanosa iz reke. Dotok nanosa se dešava na nizvodnim kraju međunaparskog polja (Slika 5.2).

Ako se integrali koncentracija nanosa s/q (odnos jediničnog pronosa nanosa i jediničnog protoka vode) po dubini i po dužini dotoka, može se proceniti ukupna zapremina nanosa pristiglog iz reke u međunaparsko polje.



Slika 5.2: Skica za model WL/Delft_Hydraulics (1987).

Kako strujanje u međunaparskom polju odlikuju vrtlozi, može se smatrati da je prispeli nanos ravnomerno raspoređen unutar međunaparskog polja,

na površini $L_{gf} \times B_{gf}$. Cilj je da se ustanovi evolucija peščanog nivoa u polju, odnosno visina $Z_{gf}(t)$.

Pretpostavke na kojima je zasnovan model su:

(i) Aktivna dužina priliva nanosa iznosi oko 20% dužine međunaperskog polja L_{gf} (Slika 5.2).

(ii) Brzina kojom nanos ulazi u međunapersko polje (u) iznosi oko 35% brzine rečnog toka (u_r): $u = 0,35 u_r$.

Ulazni protok nanosa iznosi:

$$\Delta Q = \underbrace{0,2 L_{gf}}_{\text{aktivna dužina}} \underbrace{0,35 u_r}_{\text{ulazna brzina}} \underbrace{(a - Z_{gf})}_{\text{dubina vode}}. \quad (5.1)$$

Koncentracija ulazećeg nanosa je:

$$c_i = \rho_s (1 - \epsilon) \frac{a - Z_{gf}}{a} \left(\frac{s}{q} \right), \quad (5.2)$$

gde je: ρ_s – gustina nanosa, ϵ – poroznost nanosa, Z_{gf} – visina dna plaže, a – dubina vode, s – jedinični pronos nanosa u reci, q – jedinični protok vode u reci.

Integraljenjem brzine dotoka nanosa po dužini na kojoj se odvija taj dotok, kao i koncentracije nanosa po dubini u međunaperskom polju, dobija se:

$$B_{gf} L_{gf} \frac{\partial Z_{gf}}{\partial t} = \frac{1}{\rho_s (1 - \epsilon)} \int_0^{L_{gf}} \int_0^a u(x, z) c(x, z) dz dx. \quad (5.3)$$

Dvostruka integracija se može iskazati i na ovaj način:

$$B_{gf} L_{gf} \frac{\partial Z_{gf}}{\partial t} = \frac{1}{\rho_s (1 - \epsilon)} \Delta Q c_i, \quad (5.4)$$

a uvodeći konstantu:

$$A_1 = \frac{0,07 u_r}{B_{gf} a} \left(\frac{s}{q} \right), \quad (5.5)$$

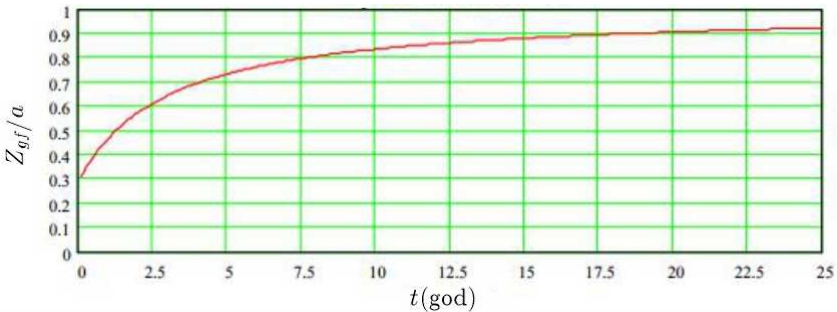
dolazi se do jednostavnijeg izraza:

$$\frac{\partial Z_{gf}}{\partial t} = A_1 (a - Z_{gf})^2. \quad (5.6)$$

Rešenje ove jednačine je:

$$Z_{gf} = a - \frac{1}{A_1 t + \left(\frac{1}{a - z_o} \right)} \quad (5.7)$$

gde je: z_o – početna visinska kota plaže. Analitičko rešenje (5.7) je prikazano na Slici 5.3.



Slika 5.3: Zasipanje međunaperskog polja u odsustvu plovidbe.

Može se uočiti da za $Z_{gf} = a$, međunapersko polje biva potpuno ispunjeno nanosom. Ovo naravno, nije realno, ali taj zaključak je direktna posledica pretpostavki na kojima je zasnovan model.

Erozija međunaperskih polja izazvana plovidbom. Drugi deo modela WL/Delft_Hydraulics se odnosi na slučaj erozije međunaperskih polja. Uticaj plovidbe je uzet kao ključni parametar koji se odnosi na brzinu kojom nanos odlazi iz međunaperskog polja u reku. Izlazna brzina v_* ima najveću vrednosti (v_{max}) u blizini vrha uzvodnog napera (u odnosu na smer plovidbe), a eksponencijalno se smanjuje sa odstojanjem ka nizvodnom naperu.

Kao u prvoj komponenti modela, integrali se pronos nanosa po celoj dužini međunaperskog polja, kao i po vremenu prolaska sastava. Za pronos nanosa (ukupni – „total sediment load”) koristi se formula Engelund–Hansen. Ukupna zapremina nanosa (E), odnetog erozijom plaže u toku prolaska sastava (T_s), može se definisati izrazom:

$$E = \int_0^{T_s} \int_0^{L_{gf}} (m v_*^n) e^{\delta(x-L_{gf})} dx dt, \quad (5.8)$$

gde su: m i n – parametri formule Engelund-Hansen, a δ je rekukcioni parametar.

Rezultat integracije (5.8) je:

$$E = \frac{T_s (m v_*^n)}{\delta} \left(1 - e^{-\delta L_{gf}} \right). \quad (5.9)$$

Ako se pretpostavi da je vrednost člana ($e^{\delta L_{gf}}$) zanemarljivo mala, evolucija visine plaže u međunaperskom polju usled erozije izazvane prolaskom brodova, ima ovakav oblik:

$$\frac{dZ_{gf}}{dt} = -\frac{f_s T_s}{B_{gf} L_{gf} \delta} (m v_{max}^n), \quad (5.10)$$

gde je: f_s – učestalost (frekvencija) plovidbe, T_s – trajanje prolaska plovila, δ – redukcionni parametar.

Rezultat integracije (5.10) je:

$$\boxed{Z_{gf} = z_o - \frac{f_s T_s}{B_{gf} L_{gf} \delta} (m v_*^n) t.} \quad (5.11)$$

Reč je o linearnoj zavisnosti po vremenu, što daje neprihvatljive rezultate za duga trajanja. Uzrok tome je nedostatak bilo kakvog mehanizma usporevanja procesa. Na primer, ako izlazna brzina odlazećeg nanosa zavisi od kote dna plaže, a formula za transport nanosa ima neku kritičnu brzinu pokretanja zrna, erozija će težiti nekoj konačnoj, terminalnoj vrednosti kada je uspostavljena morfodinamička ravnoteža.

U poslednjem koraku integracije (5.8) se smatra da su vrednosti parametara konstantne po vremenu. Međutim, ako se implicitno uvedu uticaji krive protoka na parametre koji su u vezi sa plovidbom, može se doći do realnijih (pouzdanijih) rezultata.

Ravnotežna visina dna međunaperskog polja. Uslov morfodinamičke ravnoteže je jednakost brzine erozije i brzine zasipanja međunaperskog polja:

$$\left(\frac{\partial Z_{gf}}{\partial t} \right)_{\text{erozija}} + \left(\frac{\partial Z_{gf}}{\partial t} \right)_{\text{zasipanje}} = 0. \quad (5.12)$$

Pojednostavljenjem i uvođenjem konstante:

$$A_2 = \frac{m a^2}{0,07 L_{gf} s \delta}, \quad (5.13)$$

dolazi se konačno do ravnotežne visine dna:

$$\boxed{Z_{eq} = a - \sqrt{A_2 f_s T_s v_*^n}} \quad (5.14)$$

Dalje, kombinovanjem izraza dobijenih za eroziju i zasipanje međunaperskih polja, može se doći do izraza za dugoročnu evoluciju visine dna (Slika 5.4):

$$\frac{\sqrt{A_3}}{A_1} \ln \left[\frac{1 + \sqrt{A_3} (a - Z_{gf})}{1 - \sqrt{A_3} (a - Z_{gf})} \right] = t + \frac{\sqrt{A_3}}{A_1} \ln \left[\frac{1 + \sqrt{A_3} (a - z_o)}{1 - \sqrt{A_3} (a - z_o)} \right]$$

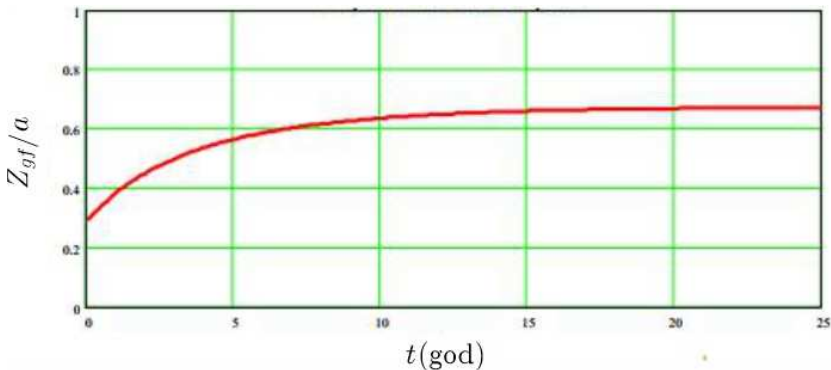
za $|\sqrt{A_3} (a - Z_{gf})| < 1$ (5.15)

$$\frac{\sqrt{A_3}}{A_1} \ln \left[\frac{1 + \sqrt{A_3} (a - Z_{gf})}{\sqrt{A_3} (a - Z_{gf}) - 1} \right] = t + \frac{\sqrt{A_3}}{A_1} \ln \left[\frac{1 + \sqrt{A_3} (a - z_o)}{\sqrt{A_3} (a - z_o) - 1} \right]$$

za $|\sqrt{A_3} (a - Z_{gf})| > 1$, (5.16)

gde je konstanta:

$$A_3 = \frac{A_1 B_{gf} L_{gf} \delta}{f_s T_s (m v_{max}^n)} \quad (5.17)$$



Slika 5.4: Dugoročna evolucija visine dna u međunaperskom polju.

Izložena koncepcija kombinacije prorodnih hidroloških uticaja i uticaja plovidbe ima nedostatke u obe komponente modela. Visina naslaga u međunaperskom polju ne raste neograničeno, već ona teži ravnotežnoj vrednosti (Z_{eq}) koja nastaje kada se izjednače zasipanje i erozija.

Model WL/Delft_Hydraulics (1987) ima i druge nedostatke koji, kao što je ranije rečeno, mogu dovesti do potpuno nereálnih rezultata. Naime, model je veoma „osetljiv” na neke parametre, kao što su redukcioni parametar (δ) i frekvencija plovitbe (f_s). Međutim, osnovna ideja i pretpostavke na kojima model počiva su valjana osnova za unapređenje samog modela, kao i za razvoj njemu sličnih modela.

Model Sieben i Douben (2000). Kompletno izvođenje jednačina koje čine ovaj model dato je u Dodatku II. Prema ovom modelu, ravnotežna visina dna međunaparskog polja može se predvideti pomoću izraza za konačnu promenu Δz :

$$\frac{\Delta z}{z} = A + B \ln \theta, \quad (5.18)$$

gde su A i B konstante, a θ je Šildsov (Shields) parametar.

Autori su takođe pokušali da procene efekte interakcije između glavnog korita i međunaparskih polja na morfologiju glavnog korita, pa su došli do sledećih jednačina:

(i) Model prostog talasa:

$$\left[1 - \frac{ck}{(1-\epsilon)} \frac{B_{gf}}{B_{mc}} k \left(1 - \frac{\Delta z}{a} \right)^2 \right] \frac{\partial Z_{mc}}{\partial t} + \frac{u}{a} \frac{dq_s}{du} \frac{\partial Z_{mc}}{\partial x} = \quad (5.19)$$

$$\left[\frac{B_{gf}}{B_{mc}} \frac{1}{(1-\epsilon)} \left(c - ck \left(1 - \frac{\Delta z}{a} \right) - 1 + \epsilon \right) \right] \frac{\partial Z_{gf}}{\partial t}.$$

(ii) Parabolični model:

$$\left[1 - \frac{ck}{(1-\epsilon)} \frac{B_{gf}}{B_{mc}} k \left(1 - \frac{\Delta z}{a} \right)^2 \right] \frac{\partial Z_{mc}}{\partial t} + \frac{u}{3i} \frac{dq_s}{du} \frac{\partial^2 Z_{mc}}{\partial x^2} = \quad (5.20)$$

$$\left[\frac{B_{gf}}{B_{mc}} \frac{1}{(1-\epsilon)} \left(c - ck \left(1 - \frac{\Delta z}{a} \right) - 1 + \epsilon \right) \right] \frac{\partial Z_{gf}}{\partial t}.$$

Prvi model – „model prostog talasa”, može se koristiti za male morfološke promene, a dugi – „parabolički model”, za velike promene. (Za oznake videti Dodatak II).

Autori su takođe dali izraz za vremensku razmeru morfoloških promena:

$$T_m = \frac{a}{k w'} \frac{(1 - \epsilon)}{\chi (q_s/q)}, \quad (5.21)$$

gde je: T_m [s] – vremenska razmera. Za reku Val, autori su procenili da je vremenska razmera morfoloških promena međunaperskih polja reda veličine 50 dana.

5.3 Efekti promene postojeće geometrije napera

Posledice sniženja, produženja ili skraćanja napera, kao i smanjenja njihovog razmaka, izučavao je Verhej (Verheij, 1997) [42]. Zaključio je da sniženje napera ima najveći uticaj pri nivoima vode između stare i nove kote krune napera. Ova mera takođe vodi ka izvesnom zasipanju glavnog korita. U spoljašnjoj krivini (duž konkavne obale), sniženje napera može izazvati malo smanjenje širine plovnog puta, kao i izvesno delimično smanjenje dubine u poprečnom preseku. U poređenju sa postojećim stanjem, sniženje napera ima nepovoljan uticaj na zasipanje međunaperskih polja nakon velikih voda.

5.3.1 Sniženje napera

Efekat smanjenja visine napera je zanemarljiv sve dok je nivo vode ispod snižene visine napera (u proseku 50÷70 % vremena u zavisnosti od kote krune napera). Kada nivo vode premaši sniženu visinu napera, ovaj biva potopljen i deo protoka odlazi preko napera u međunaperska polja. Ovo ima i pozitivne i negativne posledice.

Pozitivan efekat je povećanje propusne moći korita, kao i blaži gradijent brzine u prelaznoj zoni između glavnog korita i međunaperskih polja. Lokalne proloke koje se formiraju pri vrhovima napera biće pliće usled smanjenog jediničnog protoka i smanjene dubine preliivanja napera. Shodno tome, smanjiće se i istaložavanje nizvodno od proloka u vidu „naperskih plameni”.

Kao negativan efekat, javlja se smanjenje protoka u glavnom koritu (u odnosu na prethodno stanje) i efektivna širina toka se povećava. To vodi tendenciji opšteg zasipanja glavnog korita usled smanjenja brzine toka. Duž konkavnih obala u krivinama, u periodima preliivanja napera, intenzivnije je strujanje u međunaperskim poljima, što može povećati priliv nanosa u inundacije.

Kako interakcija glavno korito–međunaperska polja usled plovidbe nije dovoljno izučena, uticaj sniženja napera se sa ove tačke gledišta ne može predvideti. U tački 5.2 je rečeno da se u međunaperskim poljima javlja erozija usled plovidbe pri malim vodama, a zasipanje pri velikim vodama, ali je odmah jasno da prelaz iz erozije u zasipanja i obrnuto, veoma zavisi od visine napera. Može se samo pretpostaviti da će smanjenje visine napera bitno uticati na postojeću ravnotežu između navedenih procesa. Za sada, rezultat nije poznat.

5.3.2 Produženje ili skraćenje napera

Produženje napera generalno dovodi do produbljenja glavnog korita. U zavisnosti od lokalnih uslova, treba voditi računa da produženje napera može dovesti do ograničenja širine plovnog puta. S druge strane, skraćenje napera ima potpuno suprotne efekte od produženja.

Produženje svih napera u sistemu, na dugim deonicama, ima u izvesnom smislu isti efekat kao „dugačka suženja” korita, a to je produbljenje korita na tim deonicama. Ovo ima negativne morfološke posledice na uzvodne deonice, jer se menja i nagib linije nivoa. Međutim, produženje ili skraćenje samo pojedinih napera je od lokalnog značaja, bez bitnog uticaja uzvodno i nizvodno od tih napera.

Promena dimenzija napera menja geometriju međunaperskih polja. Veličina turbulentnih struktura koje su uslovljene odnosom dužine i širine polja biće promenjena. Ipak, relativno mala promena dužine napera (do desetak metara) nema bitnog uticaja i on se može zanemariti.

Generalno, može se samo konstatovati da produženje ili skraćenje napera ima i pozitivne i negativne posledice. Sa stanovišta plovidbe, izgleda da skraćenje napera nije poželjno, dok se produženje napera može smatrati povoljnim.

5.3.3 Smanjenje razmaka napera

Imajući u vidu tačku 3.1.2, veličinu horizontalnog vrtloga (recirkulacionog strujanja) određuje odnos dužine i širine međunaperskog polja. Smanjenje razmaka napera omogućava formiranje jednog „stabilnijeg” vrtloga, sa jačim grupisanjem strujnica. Morfološki uticaj na glavno korito je minorno, ali ipak, u vidu izvesnog produbljenja korita.

Utica j koji u ovom momentu nije sasvim jasan je utica j na strujanje izazvano prolaskom brodova koje indukuje transport nanosa. S jedne strane, moglo bi se očekivati da manji razmak napera pruža bolju zaštitu međunaperskih polja. S druge strane, mogu se javiti veća sniženja nivoa sa većim iznošenjem nanosa iz međunaperskih polja.

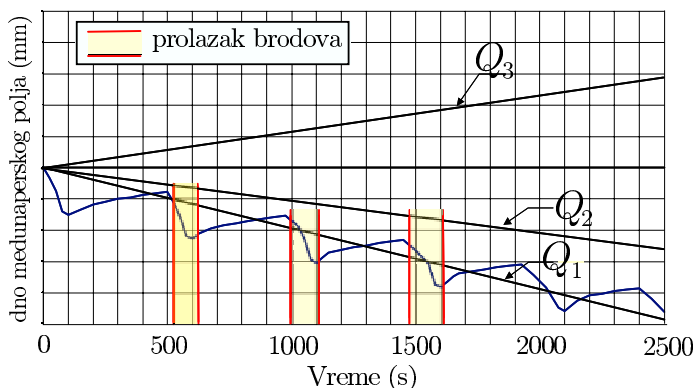
Razmak napera treba preventstveno da bude određen stabilnošću linije razdvajanja strujanja pri raznim protocima. Kod velikih plovnih reka, veliko smanjenje razmaka napera produbljuje glavno korito za nekoliko procenata. Najmanji razmak napera treba da odredi dužina erozione jame (proloke) koja se neizbežno javlja kod svakog napera.

Dodatak 1: Konceptualni model

Opis modela. Naperi se grade sa ciljem zaštite obala od erozije i uspostavljanja stabilnog plovnog koridora sa odgovarajućom plovnom širinom i dubinom. Uspešnost regulacije plovne reke pomoću napera zavisi od ravnoteže hidrodinamičkih sila koje deluju na peščane naslage u međunaperskim poljima.

Morfodinamička ravnoteza podrazumeva izjednačenje uticaja dva procesa: (a) erozije međunaperskog polja koju izazivaju strujanje i talasi prilikom prolaska brodova i (b) zasipanja međunaperskog polja koje nastaje u periodima velikih voda. Dokle god je ova ravnoteža uspostavljena na vremenskoj skali od nekoliko godina, kaže se da su međunaperska polja „u dinamičkoj ravnoteži” [5].

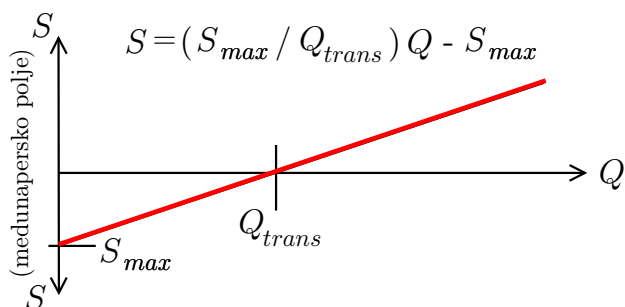
U razmatranju interakcije između morfologije glavnog korita i međunaperskog polja, pretpostaviće se da je erozija međunaperskog polja primarno uslovljena strujanjem izazvanim prolaskom brodova, u periodima srednjih i niskih protoka. U periodama velikih voda, nema uticaja plovidbe (WL/Delft_Hydraulics, 1987). U tim periodima se javlja zasipanja međunaperskih polja u meri koja zavisi od protoka u reci.



Slika I-1. Kombinovani efekat plovidbe i tri različita protoka.

Shematski prikaz osnovne pretpostavke dat je na Slici I-1. U periodima prolaska brodova, javlja se erozija; u perioda kada nema plovidbe, javlja se zasipanje. Kombinovani efekat može se uprošćeno prikazati pravom linijom, pri čemu su tri linije vezane za tri protoka: $Q_1 < Q_2 < Q_3$. Na sadašnjem nivou, nije moguće definisati neku složeniju funkciju kombinovanog efekta prirodnih procesa i plovidbe, što će možda u budućnosti biti moguće.

Za svaki protok, može se proceniti pronos nanosa pomoću nagiba linije na Slici I-2.



Slika I-2. Veza između protoka i pronosa nanosa.

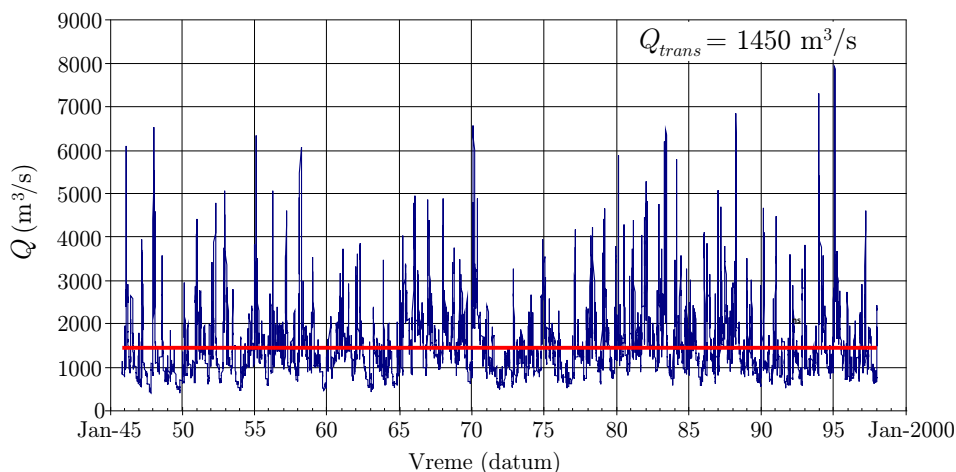
Zatim se može ustanoviti veza između protoka Q [m^3/s] i fluksa nanosa S [m^2/s] na prelazu između glavnog korita i međunapernih polja.

Ponovo se grubo uzima da je veza $S - Q$ linearna: $S = aQ + b$ (Slika I-2). Može se videti da je: S – sedimentni fluks [m^2/s] iz međunapernog polja u glavno korito po metru dužnom granične linije između polja i glavnog korita; $a = S_{max}/Q_{trans}$ – konstanta; $b = -S_{max}$ – konstanta; S_{max} – najveća vrednost fuksa nanosa iz međunapernog polja u glavno korito; Q_{trans} – protok pri kome fluks nanosa menja smer.

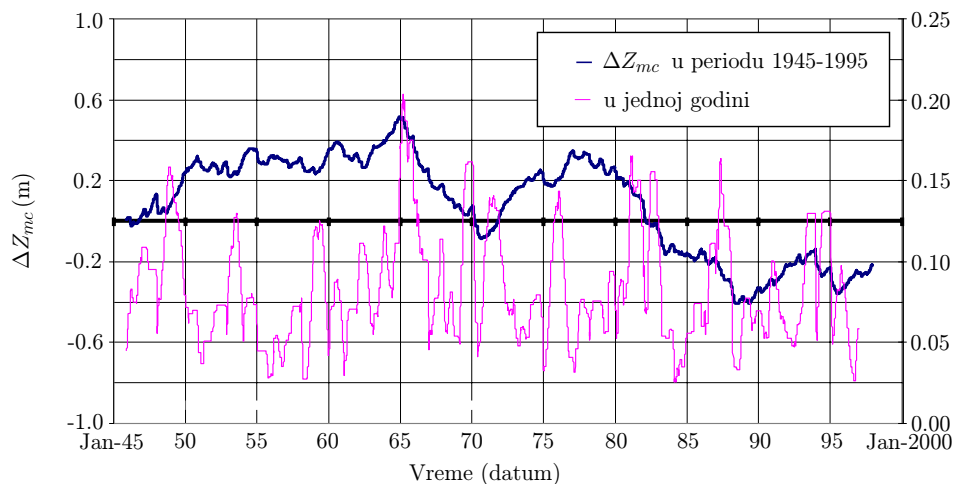
Vrednosti konstanti a i b se mogu usvojiti na osnovu vrednosti S_{max} i Q_{trans} koje se dobijaju na osnovu terenskih merenja i/ili numeričkih simulacija. Navedena zavisnost je krajnje uprošćeni način da se podjednako uzmu u obzir efekti plovidbe i velikih voda razmatranog vodotoka. Ponavlja se da je uticaj plovidbe prisutan isključivo u periodama srednjih i malih voda, a da nestaje u periodima velikih voda. Uticaj plovidbe određuje vrednost S_{max} .

U periodima kada nema plovidbe, nešto od nanosa koji je odlazio u glavno korito biće zadržan u međunapernim poljima, u količini koja zavisi od protoka. Uticaj protoka određuje nagib linije. Kombinovani efekat plovidbe i protoka u reci određuje vrednost tranzicionog protoka Q_{trans} .

Primena. Polazi se od poznatih podataka: srednje širine korita reke Val od 250 m i srednje širine međunapernih polja od 60 m. Primenom zakona održanja mase po jedinici dužine rečnog korita, najpre je razmotren slučaj bez dotoka i gubitaka u sistemu. Pomoću višegodišnjeg hidrograma na Slici I-3, definisano je morfološko stanje kao posledica interakcije glavnog korita i međunapernog polja (Slika I-4).



Slika I-3. Hidrogram reke Val u periodu 1945–1998.

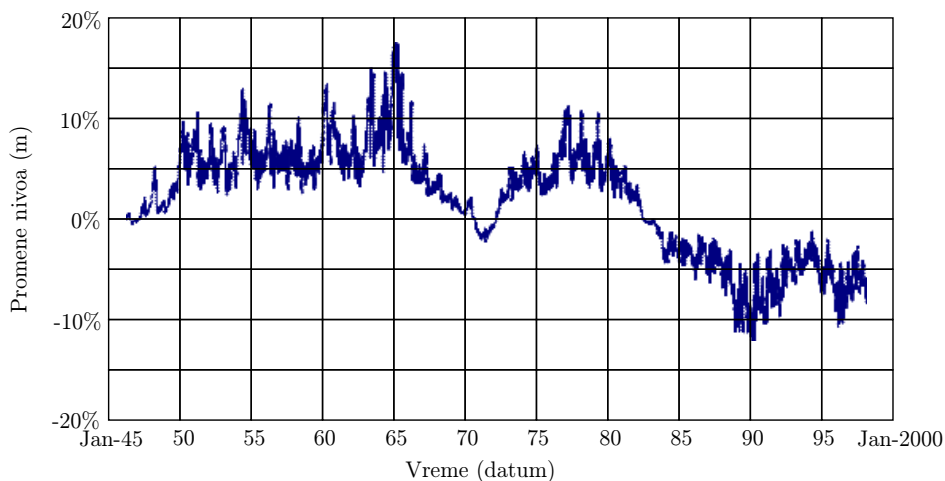


Slika I-4. Promena dna glavnog korita u periodu 1945–1998.

Vrednost S_{max} je procenja na osnovu terenskih merenja koja su obavili Brinke i dr. 1999. godine [5]. Ustanovili su fluks nanosa iz međunaperskog polja u glavno korito od $4,5 \text{ kg/s}$ u 15 % vremena, kao i gustinu suvog nanosa od 1500 kg/m^3 . Ekvivalentni jednoliki fluks nanosa u celom razmatranom periodu iznosi oko $2,25 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. Usvojene su vrednosti tranzicionog (prelaznog) protoka $Q_{trans} = 1450 \text{ m}^3/\text{s}$ i poroznosti $\epsilon = 40 \%$.

Analiza. Dobijeni rezultati upućuju na dinamiku interakcije glavno korito – međunaperska polja. Ako se pretpostavi da je glavno korito u morfološkoj ravnoteži na početku analiziranog perioda, ustanovljen je opseg promene kote dna u glavnom koritu reda veličine $\pm 0,5$ m u celom razmatranom periodu oko oko 50 godina. Najveća promena kote dna u jednoj (reprezentativnoj) godini iznosila je 0,2 m (Slika I-4).

Sračunate promene kote nivoa usled promene kote dna prikazane su na Slici I-5. Ove promene su prikazane kao procentualno povećanje/sniženje nivoa izazvane interakcijom između međunaperskih polja i glavnog korita. Može se zaključiti da samo usled navedene interakcije, sračunate kote nivoa mogu varirati u rasponu $\pm 17,5$ %.



Slika I-5. Sračunate promene nivoa u glavnom koritu usled interakcije između glavnog korita i međunaperskih polja.

Proračun linija nivoa je obavljan po principima kvazi-stacionarnih stanja, tako što su konstantni protoci u određenim periodima usvajani na osnovu u registrovanog (prirodnog) hidrograma. Ovaj hidrogram je ključan za analizu, jer, s obzirom na morfološku vremensku razmeru, nije moguće dostizanje ravnotežnog stanja rečnog dna.

S tim u vezi, treba ukazati na sledeće okolnosti. Velike vode imaju više nivoe ako su im prethodili periodi malih voda, u kojima, zbog malog protoka, dolazi do zasipanja korita. S druge strane, velike vode u kratkom razmaku imaju niže nivoe, zbog erozije korita u vreme nedavne prethodne poplave.

Analizom su obuhvaćeni efekti oba uticajna faktora: S_{max} i Q_{max} . Promena vrednosti S_{max} menja varijacije dna korita u proporciji 1:1, pri čemu se ne menjaju oblik i tačke tranzicije (prelaska). Suprotno, promena vrednosti Q_{max} potpuno menja sliku varijacija rečnog dna, koje bivaju mnogo izraženije.

Zaključci. Prikazani konceptualni model je uspeo da prikaže dinamiku interakcije između međunaperskih polja i glavnog korita. Izvesno je međutim, da su mu potrebna poboljšanja.

Opisani pristup može da preceni promenu rečnog dna i to podjednako eroziju ili zasipanje. Šta više, javlja se mogućnost beskonačne promene, što je u prirodi nemoguće. Ovo je posledica toga što u ovoj pojednostavljenom modelu ne postoji mehanizam prigušenja morfološkog procesa, tj. izvesnost dostizanja ravnotežnog dna korita.

Uticaj hidrološke predistorije, tj. hidrograma je veoma veliki u ovom modelu. Odsustvo ravnotežnog stanja rečnog dna ima tu posledicu da nije zadovoljena morfološka vremenska razmera, pa se uticaj hidroloških uslova prostire na nerealno dug period (teži beskonačnosti).

Izbor vrednosti S_{max} može biti jednostavan i lak, jer jedino on utiče na varijacije rečnog dna. S druge strane, izbor vrednosti Q_{max} zahteva veliku pažnju i što tačniju procenu, jer potpuno menja dinamiku rečnog dna.

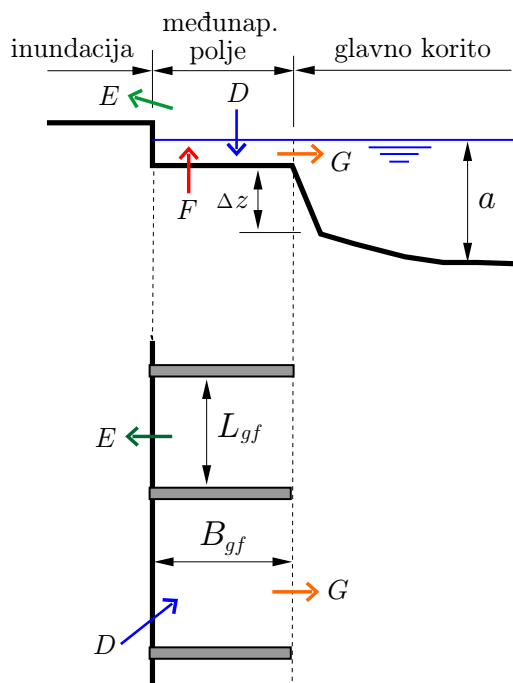
Preporuke za dalji rad. Veoma je značajno definisati dva različita stanja ravnoteže dna međunaperskih polja. Prvo stanje je vezano za najniži nivo dna u međunaperskom polju, posle kog nestaje plovidbom indukovana erozija. Drugo ravnotežno stanje je vezano za najviši nivo dna, posle kog nestaje zasipanje izazvano velikim protocima u reci.

Morfološka vremenska razmera vezana za međunaperska polja i njihovu interakciju sa glavnim koritom u vezi je sa dužinom perioda u kome se prenose hidrološki uticaji, odnosno uticaji pomenute interakcije na velike vode.

Dodatak II: Model Sibena i Dubena (Sieben, Douben) [33]

Osnovni cilj ovog uprošćenog modela je da omogući bolje razumevanje morfološke evolucije međunaperskih polja. Važno ograničenje modela je što je primenljiv na uslove male i srednje vode, kada naperi nisu preliveeni.

Održanje mase. Visina plaže u međunaperskom polju (indeks gf) je rezultat ravnoteže između priliva nanosa (D) i vertikalnog fluksa (F) nanosa (Slika II-1).



Slika II-1. Skica za model Sibena i Dubena (2000).

Bilansna jednačina glasi:

$$(1 - \epsilon) A_{gf} \frac{\partial Z_{gf}}{\partial t} + F = D - E, \quad (5.1)$$

gde je: ϵ – poroznost, $A_{gf} = L_{gf} B_{gf}$ – površina međunaperskog polja, F – fluks nanosa u vertikalnom pravcu (resuspenzija), D – fluks taloženja nanosa, E – fluks nanosa ka inundaciji, G – erozioni pronos nanosa koji odlazi iz međunaperskog polja.

Fluks nanosa u vertikalnom pravcu je definisan izrazom:

$$F = w' A_{gf} (C_e - C), \quad (5.2)$$

gde je: w' – brzina resuspenzije nanosa (m/s), C_e – koncentracija nanosa u ravnotežnim uslovima, C – stvarna trenutna koncentracija nanosa u međunaperskom polju.

Koncentracija nanosa. Trenutnu, stvarnu koncentraciju, kao i koncentraciju u ravnotežnim uslovima nije lako utvrditi, jer se radi o veoma služenom strujanju u međunaperskom polju. Pretpostaviće se da se ove koncentracije mogu definisati veoma uprošćenim izrazima:

$$C_e = C_{re} \theta_{gf}^{b/s} \quad (5.3)$$

$$C = e^{-k(\Delta z/z)} \chi \frac{q_s}{q}, \quad (5.4)$$

gde je: C_e – koncentracija nanosa u međunaperskom polju u ravnotežnim uslovima, C – stvarna koncentracija, C_{re} – referentna koncentracija nanosa u glavnom koritu, b – empirijski faktor, K – faktor prigušenja po dubini, χ – faktor usmerenja koji vezuje koncentraciju u međunaperskom polju i koncentraciju u glavnom koritu, q_s – jedinični pronos nanosa u glavnom koritu (m²/s), q – jedinični protok vode (m²/s).

Vrednosti parametara C_{re} i b određuju se na osnovu terenskih merenja. Procena faktora usmerenja χ za reku Val [33], pokazala je da bezdimenziona koncentracija nanosa u međunaperskom polju usled prirodnih, hidroloških uslova iznosi $C_{flow} = 2 \times 10^{-5}$, a da je najveće koncentracija usled plovidbe: $C_{nav} = 10 \times 10^{-4}$, što znači da je približno: $C_{nav} = 10 C_{flow}$.

Ako se uzme da je prosečno vreme prolaska brodova duž međunaperskog polja oko 100 s, kao i da je prosečna učestalost tih prolazaka svaka 3 minuta, može se smatrati da oko polovina nekog posmatranog vremenskog perioda otpada na vreme prolazaka brodova. To znači da velika koncentracija C_{nav} traje oko 50 % vremena i da se grubo može pretpostaviti vrenost $\chi = 6$.

Pored poremećaja uzazvanog plovidbom, na relativnu dubinu $\Delta z/a$ u međunaperskom polju, ima i dugih uticaja koji nisu uzeti u obzir ovim modelom.

Efektivni tangencijalni napon u polju. Pri proceni efektivnog tangencijalnog napona u međunaperskom polju treba razlikovati dve situacije. Prva

se odnosi na „normalno” stanje strujanja u reci u odsustvu plovidbe, a druga, na stanje kada se na rečno stujanje superponira strujanje izazvano plovidbom.

U uslovima „normalnog” stanja, može se pretpostaviti da je brzina toka u međunaperkom polju proporcionalno brzini toka u glavnom koritu, sa faktorom proporcionalnosti $\alpha = 0,1 \div 0,4$. Ovaj opseg vrednosti je procenjen na osnovu terenskih merenja i laboratorijskih eksperimenata, kao i numeričkih simulacija.

Situacija kombinovanog strujanja sa plovidbom je esperimentalno izučavana od strane WL/Delft_Hydraulics (1987). Zaključak je da se oticaj iz međunaperskog polja može osrednjiti po vremenu prolaska broda na sledeći način:

$$Q_{out} = \frac{\Delta h B_{gf} L_{gf}}{T_{pass}}, \quad (5.5)$$

gde je: Q_{out} – protok razmene između međunaperskog poja i glavnog korita, Δh – sniženje nivoa usled prolaska brodova, T_{pass} – prosečno vreme prolaska brodova [s].

Tipične vrednosti su $\Delta h = 0,2 \div 0,5$ m i $T_{pass} = 100$ s.

Brzina izlaznog toka u_{out} se može definisati na ovaj način:

$$u_{out} = \frac{\Delta h}{T_{pass}} \frac{B_{gf}}{a - \Delta z}. \quad (5.6)$$

Ako se pretpostavi linearna veza bezdimenzionog tangencijalnog napona između međunaperskog polja (θ_{gf}) i glavnog korita (θ): $\theta_{gf} = f \theta$, gde je f – faktor proporcionalnosti.

Ako se zna da je:

$$\theta = \frac{u_{mc}}{C_h \Delta D_{50}}, \quad (5.7)$$

gde je: u_{mc} – brzina u glavnom koritu, C_h – Šezijev (Chezy) koeficijent otpora u glavnom koritu, Δ – relativna gustina nanosa i D_{50} – srednja krupnoća zrna, može se izvesti izraz za faktor proporcionalnosti:

$$f = \alpha^2 \left[p \left(\frac{u_{out}}{\alpha u_{mc}} \right)^2 + 1 \right], \quad (5.8)$$

gde je p – procenat vremena koji otpada na prolazak brodova.

U slučaju reke Waal, tipična vrednost ovog faktora iznosi: $f = 0,03$.

Ravnotežna visina dna. Da bi se ostvarala psamološko–morfološka ravnoteža međunaperskog polja, potrebno da nestane fluks nanosa F ($F \rightarrow 0$), što znači da bude ispunjen uslov: $C = C_{eq}$. Tada se varijacije nivoa dna međunaperskog polja mogu definisati izrazom:

$$e^{-k(\Delta z/a)} \chi \frac{q_s}{q} = C_{re} f \theta^{n/2}. \quad (5.9)$$

Mora se razumeti da se radi o dinamičkoj ravnoteži, koja se može opisati na sledeći način.

Strujanje izazvano prolaskom brodova stvara veću koncentraciju nanosa u međunaperskom polju, dok je koncentracija u glavnom koritu (q_s/q) uglavnom konstantna. Vrednost faktora prigušenja na levoj strani jednačine (5.9): $-k(\Delta z/a)$ mora biti povećana, tako što se smanji visina dna u međunaperskom polju (Δz), što znači da nastaje erozija.

S druge strane, kada nema plovidbe, vrednost faktora prigušenja se mora smanjiti preko povećane vrednosti visine Δz , što znači da nastaje zasipanje međunaperskog polja.

Odnos q_s/q se može definisati kombinacijom formula Engelund–Hansen za pronos ukupnog (vučenog i suspendovanog) nanosa i jednačine Chezy za otpore:

$$\frac{q_s}{q} = X \theta^{(n-3)/2} \quad (5.10)$$

$$X = \frac{0,084 i C_h}{\Delta \sqrt{g}}. \quad (5.11)$$

Konačno, ravnotežna visina dna međunaperskog polja može se izraziti na ovaj način:

$$\frac{\Delta z}{z} = A + B \ln \theta, \quad (5.12)$$

gde je:

$$A = \ln \left(\frac{C_{re} f^{b/2}}{\chi X} \right)^{-1/k} \quad (5.13)$$

$$B = \frac{b - n + 3}{-2k}. \quad (5.14)$$

Vremenska razmera evolucije međunaperskog polja. Kada nema dotoka nanosa u međunapersko polje ($D = 0$) i oticaja nanosa u inundaciju ($E = 0$), jednačina održanja mase se može napisati u sledećem obliku:

$$(1 - \epsilon) \frac{\partial z}{\partial t} + w' (C_{re} \theta^{b/2} - e^{-k(\Delta z/a)} \chi \frac{q_s}{q}) = 0. \quad (5.15)$$

Ako se stavi:

$$\frac{\Delta z}{z} = \frac{\Delta z_e}{a} + \frac{\Delta z'}{z}, \quad (5.16)$$

jednačina održanja mase (5.15) ima alternativni oblik:

$$(1 - \epsilon) \frac{\partial \Delta z'}{\partial t} + w' \left[C_{re} \theta^{b/2} - e^{-k[(\Delta z_e/a) + (\Delta z'/a)]} \chi \frac{q_s}{q} \right] = 0. \quad (5.17)$$

Razvojem u Taylorov red, može se doći do ovih izraza:

$$\frac{\partial(\Delta z'/a)}{\partial t} + \frac{\Delta z'/a}{T_m} = 0 \quad (5.18)$$

$$T_m = \frac{a}{k w'} \frac{(1 - \epsilon)}{\chi (q_s/q)}, \quad (5.19)$$

gde je: T_m [s] – morfološka vremenska razmera za promenu visine dna u međunaperskom polju. Sieben (2000) je procenio da je ova vremenska razmera u slučaju reke Waal oko 50 dana.

Razmena nanosa. Korišćenjem opisanog modela, može se grubo proceniti razmena nanosa između međunaperskog polja i glavnog korita. Jednačina održanja mase je:

$$A_{gf} \frac{\partial c(a - \Delta z)}{\partial t} - F + G L_{gf} = 0. \quad (5.20)$$

Da bi se odredila veličina horizonatalnog fluksa G , treba najpre odrediti promenu suspendovanog nanosa (prvi član gornje jednačine), kao i veličinu vertikalnog fluksa F – iz jedančine (5.2).

Za horizontani fluks G se movže napisati:

$$G L_{gf} = -A_{gf} (a - \Delta z) \frac{\partial c}{\partial t} = -A_{gf} c \frac{\partial(a - \Delta z)}{\partial t} + w' A_{gf} (c_e - c). \quad (5.21)$$

Za $c \gg 1$ sledi:

$$G \equiv -L_{gf} (1 - \epsilon) \frac{\partial Z_{gf}}{\partial t} + \frac{D - E}{L_{gf}}. \quad (5.22)$$

Bilans nanosa se za glavno korito može onda ovako definisati:

$$B_{mc} \frac{\partial Z_{mc}}{\partial t} + \frac{\partial B q_s}{\partial x} = \frac{G}{(1 - \epsilon)} - \frac{\forall_{bag}}{(1 - \epsilon)}, \quad (5.23)$$

gde se indeks „ mc ” odnosi na glavno korito, a \forall_{bag} je zapremina izbagerovanog materijala.

Za $c \ll 1$, ako se za G iskoristi izraz (5.22), sledi:

$$B_{mc} \frac{\partial Z_{mc}}{\partial t} + \frac{\partial B q_s}{\partial x} = -L_{gf} \frac{\partial Z_{gf}}{\partial t} + \frac{D - E}{L_{gf} (1 - \epsilon)}. \quad (5.24)$$

U daljem izvođenju, na ovom mestu nije naodmet podsetiti se nekih teorij-skih postavki koje je dao de Vries (1996).

(i) Model prostog talasa za male morfološke promene:

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{c_o}{\alpha_o} \frac{\partial z}{\partial x} = 0$$

Kako je:

$$\frac{c_o}{\alpha_o} = \frac{1}{1 - Fr^2} \left(\frac{u_o}{a} \frac{dq_s}{du} \right),$$

dolazi se konačno do izraza:

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{n q_s}{a (1 - Fr^2)} \frac{\partial z}{\partial x} = 0.$$

(ii) Parabolični model za velike morfološke promene:

$$\frac{\partial z}{\partial t} - K_o \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} = 0.$$

Ako je:

$$K_o = \frac{c_o}{A_o} = \frac{1}{3i/a} \left(\frac{u_o}{a} \frac{dq_s}{du} \right),$$

sledi konačno:

$$\frac{\partial z}{\partial t} - \frac{n q_s}{3i} \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} = 0.$$

Ako se ove postavke primene na jednačinu (5.24), dolazi se do dve jednačine koje opisuju promenu dna u glavnom koritu pri interakciji sa međunaperskom poljem. Zanimajući „gubitak” – bagerovanje, ili „priliv” nanosa, te dve jednačine imaju ovaj oblik:

(i) Model prostog talasa:

$$\left[1 - \frac{ck}{(1-\epsilon)} \frac{B_{gf}}{B_{mc}} k \left(1 - \frac{\Delta z}{a} \right)^2 \right] \frac{\partial Z_{mc}}{\partial t} + \frac{u}{a} \frac{dq_s}{du} \frac{\partial Z_{mc}}{\partial x} = \quad (5.25)$$

$$\left[\frac{B_{gf}}{B_{mc}} \frac{1}{(1-\epsilon)} \left(c - ck \left(1 - \frac{\Delta z}{a} \right) - 1 + \epsilon \right) \right] \frac{\partial Z_{gf}}{\partial t}.$$

(ii) Parabolični model:

$$\left[1 - \frac{ck}{(1-\epsilon)} \frac{B_{gf}}{B_{mc}} k \left(1 - \frac{\Delta z}{a} \right)^2 \right] \frac{\partial Z_{mc}}{\partial t} + \frac{u}{3i} \frac{dq_s}{du} \frac{\partial^2 Z_{mc}}{\partial x^2} = \quad (5.26)$$

$$\left[\frac{B_{gf}}{B_{mc}} \frac{1}{(1-\epsilon)} \left(c - ck \left(1 - \frac{\Delta z}{a} \right) - 1 + \epsilon \right) \right] \frac{\partial Z_{gf}}{\partial t}.$$

Bibliografija

- [1] Alvarez, J. A. M. (1989). *Design of groins and spur dikes*, Proceedings 1989 National Conference On Hydraulic Engineering, New Orleans, 296-301.
- [2] Aya, S., Fujita, I., and Miyawaki, N. (1997). *2-d models for flows in river with submerged groins*, 27 th IAHR Congress, San Francisco, CA. USA, 829-837.
- [3] Bhowmik, N. G. (1989). *Physical impacts of human alterations within river basins - the case of the kanakakee, mississippi and illinois rivers*, XXII IAHR Congress, Ottawa, Canada, B139-B146.
- [4] Bhowmik, N. G., Xia, R., Mazumder, S., and Soong, T. W. (1995). *Return flow in rivers due to navigation traffic*, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 121(12), pp. 914-918.
- [5] ten Brinke, W. B. M., Kruyt, N. M., Kroon, A., and van den Berg, J. H. (1999). *Erosion of sediments between groynes in the river waal as a result of navigation traffic*, Spec. Publs int. Ass. Sediment, 28, pp. 147-160.
- [6] Brolsma, J. U. (1988). Six-barge pushtow trials, PIANC, Den Haag.
- [7] Chen, F. Y., and Ikeda, S. (1997). *Horizontal separation in shallow open channels with spur dikes*, Journal of Hydrosience and Hydraulic Engineering, 15(2), pp. 15-30.
- [8] Darghi, B. (1982). *Local scour around bridge piers - a review of theory & practice*, TRITA-VBI- 114, Royal institute of technology, Stockholm, Sweden.
- [9] Gill, M. A. (1972). *Erosion of sand beds around spur dikes*, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 98(HY9), pp. 1587-1602.
- [10] Gill, M. A. (1981). *Bed erosion in rectangular long contraction*, Journal of Hydraulic Division, ASCE, 107(HY3), pp. 273-284.
- [11] Groeneveld, R. (1997). *Inland waterways - ports, waterways and inland navigation*, CT4330, Delft University of Technology, Delft.
- [12] de Haas, A. D., and van Essen, J. A. F. (1987a). *Onderzoek naar de invloed van duwvaart op de water- en zandbeweging in het kribvak durten*, DBW/RIZA 87.007, RIZA, Arnhem.
- [13] de Haas, A. D., and van Essen, J. A. F. (1987b). *Onderzoek naar de invloed van duwvaart op de water- en zandbeweging in het kribvak st. Andries*, DBW/RIZA 87.008, RIZA, Arnhem.

- [14] Havinga, H., Slootweg, H., and Zeekant, J. (1984). *Kribvakmeting t.B.V. Zesbaksduwvaart op de waal bij druten*, 84.9, Rijkswaterstaat, district Zuidoost, Arnhem.
- [15] Hochstein, A. B., and Adams, E., Jr. (1989). *Influence of vessel movements on stability of A restricted channels*, Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, ASCE, 115(4), pp. 444-456.
- [16] Hoffmans, G. J. C. M., and Verheij, H. J. (1997). Scour manual, A.A. Balkema, Rotterdam.
- [17] Ishii, C., Asada, H., and Kishi, T. (1983). *Shape of separation region formed behind a groyne of non-overflow type in rivers*, XX IAHR Congress, Moscow, USSR, 405-412.
- [18] Jansen, P. P., van Bendegom, J., van den Berg, J. H., de Vries, M., and Zanen, A. (1979). Principles of river engineering - the non tidal alluvial rivers, Delftse Uitgevers Maatschappij, Delft.
- [19] Klaassen, G. J. (1995). *Lanes balance revisited*, 6th International Symposium on River Sedimentation, New Delhi, India.
- [20] Klingeman, P. C., Kehe, S. M., and Owusu, Y. A. (1984). *Streambank erosion protection and channel scour manipulation using rockfill dikes and gabions*, WRR-98, Oregon State University, Water Resources Research Institute, Corvallis, Oregon.
- [21] Komura, S. (1966). *Equilibrium depth of scour in long constrictions*, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 92(HY5), pp. 17-37.
- [22] Krebs, M., Zanke, U., and Mewis, P. (1999). *Hydro-morphodynamic modelling of groin fields*, 28 th IAHR congress, Graz, Austria.
- [23] Kuhnle, R. A., Alvonso, C. V., and Shields, F. D. J. (1999). *Geometry of scour holes associated with 90o spur dikes*, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 125(9).
- [24] Noshi, H. M. (1997). *Abutment scour in uniform and stratified bed*, PhD., Colorado State University, Fort Collins, Colorado, USA.
- [25] et Ouillon, S., and Dartus, D. (1997). *Three-dimensional computation of flow around groyne*, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 123(11), pp. 962-970.
- [26] Peng, J., Kawahara, Y., and Tamai, N. (1997). *Numerical analysis of three-dimensional turbulent flows around submerged groynes*, 27th IAHR congress,, San Francisco, USA. Dartus

- [27] Peng, J., Tamai, N., Kawahara, Y., and Huang, G. W. (1999). *Numerical modelling of local scour around spur dikes*, 28th IAHR congress, Graz, Austria.
- [28] Przedwojski, B. (1995). *Bed topography and local scour in rivers with banks protected by groynes*, Journal of Hydraulic Research, 33(2), pp. 257-273.
- [29] Przedwojski, B., Blazejewski, R., and Pilarczyk, K. W. (1995). *River training techniques- fundamentals, design and application*, A.A. Balkema, Rotterdam.
- [30] Rajaratnam, N. (1983). *Flow near groin-like structures*, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 109(3), 463-480.
- [31] Richardson, E. V., Stevens, M. A., and Simons, D. B. (1975). *The design of spurs for river training*, XVIIth , IAHR congress, Sao Paulo, Brazil, 382-388.
- [32] Schans, H. (1998). *Representativitet van kribvakmetingen uit 1996 en 1997 ten opzichte van de hele waal*, ICG 98/15, Universiteit Utrecht, Fysische Geografie, Utrecht.
- [33] Sieben, J., and Douben, N. (2000). *Globale inschatting van morfologische effecten in het zomerbed door herinrichting van uiterwaarden*, 2000.027X, RIZA, Arnhem.
- [34] Spannring, M. (1999). *Degradation of the river bed after building of groynes*, 28th IAHR congress, Graz, Austria.
- [35] Suzuki, K., Michiue, M., and Hinokidani, O. (1987). *Local bed form around a series of spur dikes in alluvial channels*, XXII IAHR Congress, Lausanne, Belgium, 316-321.
- [36] Termes, A. P. P., van der Wal, M., and Verheij, H. J. (1991). *Waterbeweging door scheepvaart op rivieren en in kribvakken*, Q1046, WL—Delft Hydraulics, Delft.
- [37] Tingsanchali, T., and Maheswari, S. (1990). *2-d depth averaged flow computation near groyne*, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 116(1), pp. 71-85.
- [38] Tominaga, A., Ijima, K., and Nakano, Y. (2001). *Flow structures around submerged spur dikes with various relative height*, 29th IAHR CONGRESS, Beijing, China, 421427.
- [39] Uijtewaal, W. S. J. (1999). *Groyne field velocity patterns determined with particle tracking velocimetry*, 28th IAHR congress, Graz, Austria.

- [40] Uijttewaal, W. S. J., Lehmann, D., and van Mazijk, A. (2001). *Exchange process between a river and its groyne fields - model experiments*, Journal of hydraulic Engineering, ASCE, 127(11), pp. 928-936.
- [41] van Urk, G., and Smit, H. (1989). *The lower rhine geomorphological changes*, Historical changes of large alluvial rivers: Western europe, G. E. Pettes, ed., John Wiley & Sons. Ltd, 167-182.
- [42] Verheij, H. J. (1997). *Effectiviteit van kribben*, Q2360, WL—Delft Hydraulics, Delft.
- [43] Verheij, H. J., and van der Wal, M. (1984). *Prototype tests with respect to the stability of bank protection with various types of ships in the hartel canal in 1983 (text in dutch)*, M 1115, WL — Delft Hydraulics, Delft.
- [44] Visser, P. J. (2000). *Bodemontwikkeling rijnsysteem*, Delt University of Technology, Hydraulic and Offshore Engineering Section, Delft.
- [45] de Vriend, H. J. (1999). *Long-term morphodynamics of alluvial rivers and coasts*, Environmental applications of mechanics and computer science, cism courses and lectures, G. Bianchi, ed., Springer Wien, New York, 1-19.
- [46] de Vries, M. (1996). *River engineering*, f10, Delft University of Technology, Delft.
- [47] Wang, T. W., and Yanapirut, N. (1988). *Channel bed degradation caused by constriction*, 6th Congress, Asian and Pacific Regional Division, IAHR, Kyoto, Japan, 285-292.