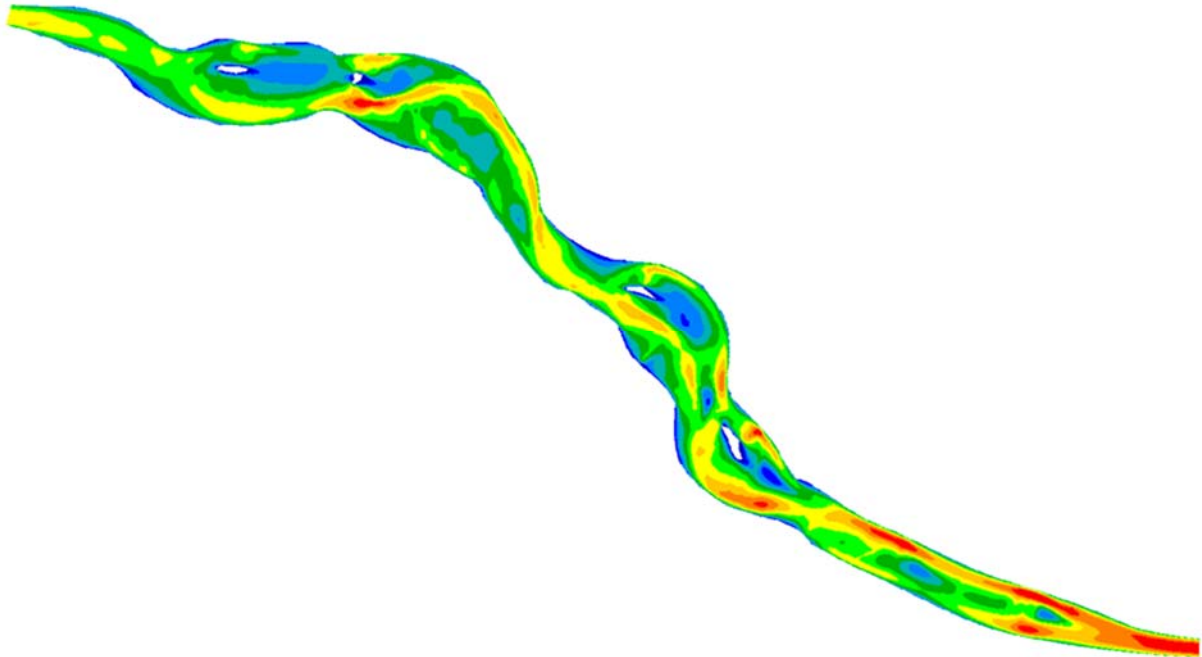




Interreg 
SLOVENIJA – AVSTRIJA
SLOWENIEN – ÖSTERREICH
Evropska unija | Evropski sklad za regionalni razvoj
Europäische Union | Europäischer Fonds für regionale Entwicklung



**ČEZMEJNI NAČRT ZA INOVATIVNO TRAJNOSTNO UPRAVLJANJE
MEJNE MURE IN IZBOLJŠANJE OBVLADOVANJA
POPLAVNE OGROŽENOSTI**

**GRENZÜBERSCHREITENDER MANAGEMENTPLAN ZUR INNOVATIVEN
NACHHALTIGEN BEWIRTSCHAFTUNG DER GRENZMUR UND ZUR
VERBESSERUNG DES HOCHWASSERRISIKOMANAGEMENTS**

Dosežek D.T1.3.2

Študija o premeščanju plavin

Izvleček

Prekinitvev prehodnosti plavin in uravnava ter skrajšanje struge so na mejnem odseku Mure med Avstrijo in Slovenijo (mejni Muri) povzročile močno morfološko spremenjenost in poglobljanje rečnega dna, kar ima za posledico ekološke in tehnične težave. Poleg tega grozi zaradi majhne debeline prodnate plasti preboj rečnega dna v terciarne plasti in izguba prodnate plasti. Hkrati je mejna Mura povezana z velikimi površinami obrečnega gozda in dolvodno brez prekinitve toka povezana z Dravo in Donavo, kar daje temu odseku velik ekološki potencial. V Načelni vodnogospodarski zasnovi za mejno Muro iz leta 2001 se je bočni eroziji pripisala pomembna vloga za uspeh renaturacijskih ukrepov. Ti so bili vendar izvedene zgolj v omejenem obsegu, zaradi česar se je tudi zmanjšal učinek tega ukrepa. Danes je višina rečnega dna na rekordnem nizkem nivoju in zahteva nujno ukrepanje. V okviru EU projekta goMURra v sklopu programa Interreg SI-AT se je pripravil nov načrt upravljanja s predlogi za renaturacijske ukrepe. Predmetna študija naj omogoča razvoj renaturacijskih ukrepov, ki upoštevajo potreben vnos proda za naravnejšo morfolojo mejne Mure.

Najprej smo razvili orodje za ocenjevanje obsega potrebnih zemljišč za naravnejšo morfologijo. Potem smo z upoštevanjem prostorskih omejitev (ovir) razvili tipe ukrepov in iz tega izpeljali potencialne geometrije za referenčni odsek, v katerem prostorske razmere dopuščajo izvedbo vseh tipov ukrepov. Osnova raziskave je hipoteza, po kateri se bo potreben vnos proda za stabilizacijo dna zmanjšal z večjo širino struge in z večjo ukrivljenostjo (sinusnostjo) in z manjšim padcem, medtem ko se bo povečala ekološka korist. Numerične simulacije hidravlike, premeščanja plavin, morfodinamike in vodostajev visoke vode so nam omogočile preverjanje hipoteze in drugih učinkov ukrepov.

Določili smo trije tipe ukrepov: Pri tipu A je mejna Mura na omejeni dolžini široka približno 150 m, pri tipu B je predviden prehodni koridor širine 220 m in pri tipu C je koridor širši od 220 m, kar omogoča največjo vijugavost in s tem najmanjši padec. Izračuni modelov potrjujejo zmanjšanje premestitvene zmogljivosti v razvitih tipih ukrepov z redukcijo za 9 % v tipu A, za 31 % v tipu B in za 56 % v tipu C. Širša porazdelitev hidrodinamičnih spremenljivk in večje omočene površine nakazujejo večjo ponudbo habitatov. Manjši radiji in razvejanost povzročita večjo morfodinamiko, ki se izraža kot bočna erozija in razvoj prodišč ter otokov. Različni tipi ukrepov, preizkušeni na referenčnem odseku, so reprezentativni za celotno mejno Muro, kar glede na razpoložljive površine omogoča zaporedno razvrščanje tipov ukrepov vzdolž celotne mejne Mure. Mejna Mura bi z dodatnimi površinami povzročila manj stroškov za nujno potreben vnos proda, medtem ko bi se povečala ekološka vrednost. Največji učinek bi povzročil koridor ukrepa C, znotraj katerega bi se mejna Mura lahko prosto razvila. Dolgoročno bo potrebno stremeti po povečani prehodnosti plavin iz porečja.

Kurzfassung

Die Unterbrechung des Sedimentkontinuums und die Laufbegradigung und -verkürzung führten im Abschnitt der Mur an der Staatsgrenze zwischen Österreich und Slowenien (Grenzmur) zu einer starken morphologischen Beeinträchtigung und zu einer Eintiefung der Flusssohle, woraus ökologische und technische Probleme folgten. Zudem droht die geringe Mächtigkeit des Kieshorizonts mit einem Verlust des Kiesbetts und mit einem Durchschlag der Sohle in das Sediment des Tertiärs. Gleichzeitig ist die Grenzmur eingebettet in einem großen zusammenhängenden Auwald und flussab ohne Kontinuumsunterbrechung verbunden mit der Drau und der Donau, sodass dieser Abschnitt über ein großes ökologisches Potenzial verfügt. Im Wasserwirtschaftlichen Grundsatzkonzept für die Grenzmur aus dem Jahr 2001 wurde der Ufererosion eine bedeutende Rolle für den Erfolg von Rückbaumaßnahmen beigemessen; diese fand in einer daraufhin umgesetzten Maßnahme aber nur in begrenztem Ausmaß statt, woraufhin sich die generelle Wirksamkeit der Maßnahme reduzierte. Heute haben die Sohlhöhen der Grenzmur ein Rekordtief erreicht und zeigen somit dringenden Handlungsbedarf. Im Rahmen des EU Interreg SI-AT-Projekts goMURra wird ein neuer Managementplan mit Vorschlägen zu Renaturierungsmaßnahmen erarbeitet. Die vorliegende Studie dient der Entwicklung von Renaturierungsmaßnahmen, die den Bedarf an Geschiebeeintrag für eine natürlichere Morphologie der Grenzmur berücksichtigen.

Zunächst wurden Werkzeuge zur Abschätzung des Raumbedarfs für eine natürlichere Morphologie eingesetzt. Dann wurden unter Berücksichtigung der Raumwiderstände Maßnahmentypen entwickelt und

mögliche Geometrien für einen Referenzabschnitt abgeleitet, in welchem die räumlichen Gegebenheiten die Umsetzung aller Maßnahmentypen zuließen. Grundlage für die Untersuchung bildete eine Hypothese, wonach der benötigte Geschiebeeintrag zur Stabilisierung der Sohlhöhen durch die Zurverfügungstellung einer größeren Breite und einer stärkeren Sinuosität (und damit abnehmendem Gefälle) sinkt, während der ökologische Nutzen steigt. Numerische Simulationen der Hydraulik, des Sedimenttransports, der Morphodynamik und der Hochwasserspiegellagen dienten schlussendlich einer eingehenden Überprüfung der Hypothese und anderer Maßnahmenwirkungen.

Es wurden drei Maßnahmentypen festgelegt: Bei Typ A ist die Grenzmur auf begrenzter Länge etwa 150 m breit, bei Typ B ist ein durchgehender Korridor mit einer Breite von etwa 220 m vorgesehen, und Typ C bietet einen durchgehenden Korridor, der breiter als 220 m ist und die größte Sinuosität und damit das geringste Gefälle ermöglicht. Die Modellläufe bestätigten die Verringerung der Geschiebetransportkapazität in den entwickelten Maßnahmentypen, mit einer Reduktion von 9 % in Typ A, 31 % in Typ B und 56 % in Typ C. Breitere Verteilungen hydrodynamischer Variablen und größere benetzte Flächen deuten auf ein höheres Angebot an Habitaten hin. Kleinere Radien und Verzweigungen führen zu einer erhöhten Morphodynamik wie Ufererosion und Entwicklung von Kiesbänken und Inseln. Die verschiedenen in der Referenzstrecke getesteten Maßnahmentypen sind repräsentativ für die gesamte Grenzmur, was je nach örtlicher Platzverfügbarkeit eine Aneinanderreihung der Maßnahmentypen entlang der gesamten Grenzmur ermöglicht. Durch die Bereitstellung von mehr Raum für die Grenzmur würden sich die Kosten für dringend notwendige Geschiebezugaben reduzieren, während der ökologische Wert steigt. Die Bereitstellung eines Korridors (Maßnahmentyp C), in welchem sich die Grenzmur frei entwickeln kann, zeigte die größte Wirkung. Langfristig ist eine erhöhte Durchgängigkeit des Sediments aus dem Einzugsgebiet anzustreben.

Abstract


In the section of the Mura River along the state border between Austria and Slovenia (border Mura), channelisation and the interruption of the sediment continuum led to a strong morphological impairment and to an incision of the river bed, which resulted in ecological and technical problems. In addition, the little remaining thickness of the gravel layer implies the threat of losing the gravel bed or of a breakthrough into Tertiary sediment. At the same time, the border Mura is embedded in a large continuous alluvial forest and is connected to the Drava and the Danube downstream without a continuum interruption, so that this section has great ecological potential. In the basic water management concept for the Grenzmur from 2001, bank erosion was attributed an important role for the success of restoration measures; however, in a subsequent measure implemented, this only occurred to a limited extent, which reduced the general effectiveness of the measure. Today, the bed levels of the border Mura reached a record low and show an urgent need of action. Within the framework of the EU Interreg SI-AT project goMURra, a new management plan is being developed. The present study assists in developing restoration measures, which account for the need of bedload for restoring the morphology of the Mura River.

First, tools were applied for estimating the space requirements for a more natural morphology. Then, measure types were developed while considering spatial constraints, and possible target geometries were derived. We hypothesized that with increasing channel width and with increasing sinuosity (and hence decreasing slope), less bedload supply would be needed for stabilizing bed levels while ecological benefits would increase. Numerical simulations of hydraulics, sediment transport, morphodynamics and flood water levels then served an in-depth testing of the hypothesis and of other measures' effects in a reference reach, where the space availability would allow the implementation of each of the types.

Three measure types were established: In type A, the border Mura is about 150 m wide over limited length, in type B a continuous corridor is provided at a width of about 220 m, and type C offers a continuous corridor wider than 220 m, allowing the highest curvature and hence providing the smallest channel slope. The model runs confirmed the reduction of bedload transport capacity in the developed measure types, reaching 9 % in type A, 31 % in type B and 56 % in type C. Wider distributions of flow variables and larger wetted areas indicate a higher provision of habitats. Smaller radii and braiding cause an increased morphodynamics such as riverbank erosion and bar deposition. The different measure types tested in the reference reach are representative for the entire border Mura, which allows stringing together measure types along the entire border Mura, depending on local space availability. By providing more space to the

border Mura, maintenance costs for artificial bedload supply would decrease while strongly increasing the ecological benefits. The provision of a corridor (measure type C), which allows free lateral dynamics of the border Mura, showed the largest effects. Over long term, an increased sediment connectivity to the catchment is needed.

Informacije o dokumentu

Datum oddaje	11/2021
Vodilni partner dosežka	Urad štajerske deželne vlade, Oddelek 14 Upravljanje voda, viri in trajnost (A14) Wartingergasse 43, 8010 Graz
	
Drugi udeleženi partnerji	-

Raven diseminacije

Javno	[X]
Omejeno na skupino določeno s strani projektnega konzorcija	-
Interni dokument za rabo znotraj projektnega konzorcija	-

Avtorji

DI Dr. Mario Klösch Ass.Prof. Priv.-Doz. DI Dr. Michael Tritthart DI Ulrich Beikircher Roman Dunst, BSc DI Markus Eder Univ.Prof. DI Dr. Dr.h.c. Helmut Habersack	Univerza za naravne vire in biotehniške znanosti, Inštitut za vodne gradnje, hidravliko in raziskovanje vodotokov, Muthgasse 107, 1190 Wien po naročilu projektnega partnerja A14
--	---



Prevod

Mag. Dr. Andrea Haberl-Zemljič	Prevajalska pisarna Interlineas - Hauptplatz 2, 8490 Bad Radkersburg
--------------------------------	---

Strokovni pregled

DI Tanja Schriebl	A14
-------------------	-----

Verzije

0.0	Osnutek (11/2021)
1.0	končna verzija (11/2021)
2.0	Končna verzija s popravki (01/2022)

ERRATA

Verzija 2.0 vključuje naslednje popravke napram verziji 1.0:

Št.	Poglavje	Popravek
1	7. DOPOLNITVENE ANALIZE GLEDE UČINKOV UKREPOV	Popravek opisa trajanja učinka ukrepov glede razpoložljivih količin proda v drugem odstavku poglavja.
2	7. DOPOLNITVENE ANALIZE GLEDE UČINKOV UKREPOV	Popravek naslova ordinatne osi na sliki 78 in pripadajoči popravek opisa slike.
3	7. DOPOLNITVENE ANALIZE GLEDE UČINKOV UKREPOV	Popravek naslova irdinatne osi na sliki 81, dopolnitev slike z dodatno obrazložitvijo prikazane vsebine in ustrezen popravek opisa slike.
4	8. POVZETEK IN ZAKLJUČEK	Popravek podane informacije o začetku gradnje hidroelektrarn na Muri v prvem odstavku poglavja.
5	8. POVZETEK IN ZAKLJUČEK	Popravek opisa trajanja učinka ukrepov glede razpoložljivih količin proda v sedmem odstavku poglavja.

KAZALO VSEBINE

1.	UVOD	13
2.	CILJ	14
3.	UVOD V PODROČJE RAZISKAVE	15
3.1.	Položaj in hidrološki opis	15
3.2.	Stanje mejne Mure v preteklosti	17
3.3.	Človeški posegi	18
3.3.1.	Regulacije	18
3.3.2.	Zadrževanje plavin na prispevnem območju	19
3.3.3.	Sprememba parametrov, relevantnih za rečno morfologijo in premeščanje rinjenih plavin	20
3.4.	Vpliv na položaj rečnega dna	23
3.4.1.	Podatkovna podlaga	24
3.4.2.	Metodologija ocenjevanja	24
3.4.3.	Rezultati o razvoju rečnega dna	25
3.5.	Do zdaj izvedeni protiukrepi in njihov učinek	28
3.5.1.	Načelna vodnogospodarska zasnova za mejno Muro	28
3.5.2.	Ukrep Gosdorf I	29
3.5.3.	Ukrep v Sichelndorfu	35
3.5.4.	Posledice za celotni odsek mejne Mure	35
3.6.	Analiza vzroka in učinka	37
3.6.1.	Osnove	37
3.6.2.	Prenos osnov in ugotovitev na mejno Muro	40
3.7.	Izpeljana nujnost ukrepanja	41
4.	PREDHODNA OCENA POTREBNIH POVRŠIN	42
4.1.	Analiza zgodovinskih kart	42
4.2.	Teoretični pristopi glede sedimentnega režima	44
4.2.1.	Diagram Da Silva (Da Silva, 1991; Ahmari in Da Silva, 2011)	45
4.2.2.	Napovednik prodišč («river bar predictor») (Crosato in Mosselman, 2009) ..	47
4.2.3.	Režimska enačba (Parker et al., 2007)	48
4.3.	Inženirske računske metode	50

4.4.	Ocena potrebne dolžine	52
4.5.	Ocene povečane potrebe po površinah	53
4.6.	Povzetek ocene potrebnih površin	53
5.	RAZVOJ RAZLIČIC UKREPOV	55
6.	NUMERIČNO MODELIRANJE	62
6.1.	Metodologija	62
6.1.1.	Opis modelov.....	62
6.1.2.	Struktura modela.....	67
6.1.3.	Scenariji modelov	80
6.2.	Rezultati.....	82
6.2.1.	Hidrodinamika	82
6.2.2.	Premeščanje plavin	92
6.2.3.	Vodostaji visoke vode.....	99
7.	DOPOLNITVENE ANALIZE GLEDE UČINKOV UKREPOV	100
8.	POVZETEK IN ZAKLJUČEK.....	103
9.	LITERATURA.....	105

SLIKE

Slika 1. Položaj mejne Mure in prispevno območje. Podrobnost: Razdelitev odseka mejne Mure v skladu z Načelno vodnogospodarsko zasnovo (2001) (Klösch et al., 2011, na podlagi podatkov hidrološkega atlasa).	15
Slika 2. Porazdelitev zgodovinske Mure na odseke z uporabo morfoloških kriterijev. Odsek 1: nihajoča, 2: uravnana, 3: razvejana/vijugasta, 4: uravnana, 5: razvejana/vijugasta (Habersack et al., 2001b).	17
Slika 3. Izsek iz karte druge vojaške izmere za odsek Mure med Mureckom/Tratami in Halbenrainom/Apačami (1821–1836) (Vir: avstrijski državni arhiv).....	17
Slika 4. Časovni potek preboja od leta 1879 do 1881 v načrtih regulacije Hochenburger (po Habersack et al., 2001a).....	19
Slika 5. Hidroelektrarne na prispevnem območju mejne Mure (Wagner et al., 2015)	20
Slika 6. Sprememba morfoloških parametrov na mejni Muri: a) premer, b) padec in c) širina. Odseki so bili razdeljeni v skladu z geomorfološkim opisom (glede lokacije odsekov glejte Slika 1 in Slika 2) (Habersack et al., 2001b; modificirali Klösch et al., 2011).....	21
Slika 7. Zgodovinska struga mejne Mure in mejna Mura v letu 2000 na odseku med Mureckom/Cmurekm in Bad Radkersburgom/Radgono (Habersack et al., 2001b).....	21
Slika 8. Primerjava površin glede na dolžino različnih vodotokov ob mejni Muri (stacionaža 108–110; 1876 in 2000) (Jungwirth et al., 2001)	22
Slika 9. Lega in površina prodišč na odseku med Mureckom/Cmurekom in Radkersburgom/avstrijsko Radgono	23
Slika 10. Srednja sprememba višine dna in sprememba višine dna v profilu z največjo poglobitvijo (114,840 km) na mejni Muri med letom 1974 in začetkom večjih ukrepov v letu 2006. Različna razdalja med prečnimi profili je bila upoštevana pri izračunu srednje spremembe višine rečnega dna na celotnem odseku s ponderiranjem.....	25
Slika 11. Povprečne spremembe rečnega dna v profilih po dolžini za obdobje od leta 1974 do začetka izvedbe večjih ukrepov v letu 2006. Najmočnejše erozije so se pokazale pri rkm 114,840, dolvodno od naravnega praga pri Gosdorfu, ki je zaradi erozije dna vedno bolj štrlela z dna.	26
Slika 12. Razvoj dna v prečnem profilu pri rkm 114,840, v katerem je bila že leta 2006 majhna razdalja do terciarnih plasti.....	27
Slika 13. Kumulirani odvzem proda (sedimenta) v obdobju od 1974 do 2006 iz mejne Mure	28
Slika 14. Izvedena širitev Mure pri Gosdorfu s komponentami ukrepa (Habersack et al., 2008).	30
Slika 15. Razvoj povprečne višine rečnega dna in najnižje točke profila v prečnih profilih dolvodno od širitve pred izvedbo ukrepa in po njej pri Gosdorfu (Habersack et al., 2013)....	31
Slika 16. Položaj raziskovanih odsekov obrežja na odseku ukrepa pri Gosdorfu	31
Slika 17. Bočna erozija od izvedbe ukrepov v Gosdorfu, za bregove, ki so prikazani na Slika 16, a) prečni profil v odseku brega dolvodno z okrepljenim tokom zaradi obstoječega praga, b) prečni profil na ravnem odseku brega dolvodno.....	32

Slika 18. Bočna erozija na ravnem odseku brega pri Gosdorfu zaradi poplavnega dogodka dne 22. julija 2012 (Habersack et al., 2013)	33
Slika 19. Pot zrnca proda z b-osjo 33 mm, izračunana s formulo Klöscha in Habersacka (2018) z uporabo podatkov v publikaciji Habersacka et al. (2013) (Vir: hidrografski podatki: Hidrografska služba avstrijske Štajerske).	34
Slika 20. Zrnavostna sestava obrečnega sedimenta, ugotovljena na podlagi podatkov Načelne vodnogospodarske zasnove (Stalna slovensko-avstrijska komisija za mejno Muro, 2001) in kot je bila verjetno povprečna sestava dodanega proda pri Gosdorfu. Do zrnavosti 33 mm je dodani prod verjetno že bil iznesen iz mejne Mure.....	34
Slika 21. a) Odsek ukrepa pri Sieldorfu/Žetincih z vrisanim položajem profila in b) s spremembo v prečnem profilu v obdobju med letoma 2012 in 2018. Analiza je bila izvedena z orodjem HyMoLink (Klösch et al, 2019a).	35
Slika 22 .Povprečna sprememba rečnega dna in sprememba rečnega dna v profilu z največjo poglobitvijo (114,840 km) mejne Mure od leta 1974. Različna distanca med prečnimi profili je bila s ponderiranjem upoštevana v izračunu povprečne spremembe rečnega dna celotnega odseka.	36
Slika 23. Povprečna sprememba rečnega dna v profilih, prikazana po dolžini toka za celotno obdobje od leta 1974, vključno z razvojem po začetku izvedbe večjih ukrepov v letu 2006. .	36
Slika 24: Razvoj rečnega dna v prečnem profilu ob rkm 114,840 do meritve leta 2018, kjer je razdalja do terciarnih plasti majhna.....	37
Slika 25. Odvisnost morfologije in stabilnosti od količine vnosa proda in velikosti zrn (Church, 2006).....	39
Slika 26. Razvoj razvejane struge z več rokavi v ozek kanal po zmanjšanju vnosa proda (Marti in Bezzola, 2009)	40
Slika 27. Odvisnost morfologije od koncentracije rinjenih plavin po Muellerju in Pitlicku (2014). Q_{bf} je pretočnost (pretok do roba struge), Q^* je brezdimenzijski pretok, $s =$ je specifična gostota sedimenta (ρ_s / ρ) in D_{50} je mediana premera zrn. Koncentracija rinjenih plavin C se izračuna iz relacije med volumenskim premeščanjem rinjenih plavin ob pretoku do roba polne struge in pretokom polne struge. C_t je koncentracija rinjenih plavin na prehodu med strugo z enim in več rokavi.	40
Slika 28. Odseki na zgodovinskih kartah odseka mejne Mure (slika levo spodaj se nanaša na stanje dolvodno od mejne Mure pri Radencih) z velikimi širinami stalno omočene struge ...	43
Slika 29. Dolžine in širine prodišč in otokov za dolžine pod 600 m ob mejni Muri v skladu s prvo vojaško izmero (jožefinsko izmero) (1764–1787)	44
Slika 30. Srednja krivulja zrnavosti volumetrijskih vzorcev izkopov izvedenih v okviru Načelne vodnogospodarske zasnove (Hengl et al., 2001)	45
Slika 31. Diagram Da Silva z vnesenimi potmi Mure od sedanjega, reguliranega stanja prek povečanja širine do začetka razvejanja.....	47
Slika 32. Izračun modusa prodišč, ki opiše morfologijo v skladu z napovednikom prodišč («river bar predictor») za različne širine struge.	48
Slika 33. Širina koridorja, ki je rezultat širine struge, padca in polmerov krivin α opiše odklonski kot na prelomnici. Velikost zrn na površini struge je rezultat obratne uporabe režimske enačbe.	50

Slika 34. Odvisnost premestitvene zmogljivosti od padca in širine mejne Mure (po Habersacku in Schneiderju, 2000).....	51
Slika 35. Prikaz prečnega profila čez deset let po modelu »widest« po renaturaciji bregov ob vnosu proda v skladu z zmogljivostjo premeščanja rinjenih plavin v gorvodnem odseku, ki je ostal reguliran.....	52
Slika 36. Izračunane najmanjše dolžine L_A odseka širitve na Muri za različne obsege širitve po Hunzingerju (1998). Upoštevati je treba, da šele najmanjše dolžine dopuščajo nastajanje morfologije v skladu s širino. Da potem ta morfologija prevladuje na večjem delu odseka, je treba omogočiti večje dolžine (npr. $2 \times L_A$).	53
Slika 37. Tipi ukrepov, izpeljani iz analiz o potrebnih površinah in razpoložljivih površinah za mejno Muro.....	56
Slika 38. Tloris, prenesen na referenčni odsek, z morfološkimi značilnostmi ukrepov tipa A.	56
Slika 39. Tloris, prenesen na referenčni odsek, z morfološkimi značilnostmi ukrepov tipa B.	57
Slika 40. Tloris, prenesen na referenčni odsek z morfološkimi značilnostmi ukrepov tipa C na odseku med rkm 109,54 in 103,39 v skladu s stacionažo, ki je obveljala v času priprave Načelne vodnogospodarske zasnove (na sliki je prikazana aktualna stacionaža).	57
Slika 41. Geometrija v referenčnem odseku, ki predstavlja tip A.	58
Slika 42. Geometrija v referenčnem odseku, ki predstavlja tip B.	59
Slika 43. Geometrija v referenčnem odseku, ki predstavlja tip C.	59
Slika 44. Geometrija, ki je rezultat meritve iz leta 2019 v okviru projekta goMURra v referenčnem odseku, ki predstavlja tip 0 (nobenih sprememb stopnje regulacije).....	60
Slika 45. Struktura rečnega dna z zamenjalno plastjo (po ATV-DVWK, 2003).....	66
Slika 46. Tip 0 s hrapavostjo 0,087 m v glavnem toku in 0,150 m ob robu	68
Slika 47. Tip A s hrapavostjo 0,087 m v glavnem toku in 0,150 m ob robu ter na otočnih površinah.....	69
Slika 48. Tip B s hrapavostjo 0,087 m v glavnem toku in 0,150 m ob robu ter na otočnih površinah.....	69
Slika 49. Tip C s hrapavostjo 0,087 m v glavnem toku in 0,150 m na robu ter na otočnih površinah.....	70
Slika 50. Prikaz izbrane računske mreže na primeru tipa 0	71
Slika 51. Zrnnavostno razvrščanje v strugi iz volumskih vzorcev, ki smo jih vzeli v okviru Načelne vodnogospodarske zasnove za mejno Muro.....	73
Slika 52. Zrnnavostno razvrščanje z analizo linijskega vzorca plavin za ocenjevanje vrhnjega sloja tipa 0 v projektu mejna Mura	73
Slika 53. Zrnnavostno razvrščanje rečnega dna iz ocen obrežnega pasu v projektu mejna Mura	74
Slika 54. Ciljno stanje celotne mejne Mure in izbrane pozicije prečnih profilov, ki se raziskujejo za celoten odsek mejne Mure glede potencialnih vplivov na vodostaj ob visoki vodi.....	75
Slika 55. Scenarij povprečnega dviga dna za 80 cm v prečnih profilih različnih odsekov ukrepov, ki so glede geometrije prečnih profilov in poplavne površine reprezentativni za položaj na odseku ukrepov a) tipa A in b) tipa B in c) tipa C.	78
Slika 56. Nevtralno (brez prenosa deleža, ki preide v lebdeče snovi) premeščeni profili s poplavno površino, ki so glede geometrije prečnih profilov in poplavne širine reprezentativni za položaj na odseku ukrepov a) tipa A, b) tipa B in c) tipa C.	79

Slika 57. Srednje letno poglabljanje dna v obdobju od 1974 do 2003 na referenčnem odseku	80
Slika 58. Hidrogram pretoka leta 1986 v vodostaju Mureck/Cmurek in skrajšanje krivulje trajanja z omejitvijo na pretoke nad $150 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$	82
Slika 59. Hitrosti toka pri pretoku enoletne poplave v trenutni morfologiji referenčnega odseka	83
Slika 60. Strižne napetosti pretoka enoletne poplave v trenutni morfologiji referenčnega odseka	84
Slika 61. Hitrosti toka ob pretoku enoletne poplave v morfologiji tipa A na referenčnem odseku	85
Slika 62. Strižne napetosti pretoka enoletnih poplav v morfologiji tipa A na referenčnem odseku	85
Slika 63. Hitrosti toka pretoka ob enoletni poplavi v morfologiji tipa B na referenčnem odseku	86
Slika 64. Strižne napetosti pretoka ob enoletni poplavi v morfologiji tipa B na referenčnem odseku	87
Slika 65. Hitrosti toka ob pretoku enoletne poplave v morfologiji tipa C na referenčnem odseku	88
Slika 66. Strižne napetosti pretoka ob enoletni poplavi v morfologiji tipa C na referenčnem odseku	89
Slika 67. Porazdelitve hitrosti toka v različnih tipih ukrepov	90
Slika 68. Porazdelitev globin vode pri različnih tipih ukrepov	90
Slika 69. Porazdelitev strižnih napetosti pri različnih tipih ukrepov	91
Slika 70. Srednje strižne napetosti pri treh tipih ukrepov (A, B in C) v razmerju do srednje velikosti v trenutni geometriji	92
Slika 71. Rezultat umerjanja modela premeščanja rinjenih plavin, izvedenega na podlagi primerjave merjenih in modeliranih vrednosti poglabljanja	93
Slika 72. Potreben vnos plavin različic ukrepov za sedimentni režim v ravnotežju, z navedbo zmanjšanja potrebnih vnosov plavin v primerjavi s trenutnim stanjem.....	94
Slika 73. Premestitvena zmogljivost oz. potreben vnos plavin v odvisnosti od hidrologije	94
Slika 74. Morfodinamika pri tipu 0 po izračunu hidrograma pretoka leta 1986.....	97
Slika 75. Morfodinamika pri tipu A po izračunu hidrograma pretoka leta 1986	98
Slika 76. Morfodinamika pri tipu B po izračunu diagrama pretoka leta 1986	98
Slika 77. Morfodinamika pri tipu C po izračunu diagrama pretoka leta 1986	99
Slika 78. Trajanje učinka pridobljenega proda na tekoči kilometer različnih tipov ukrepov upošteva potreben vnos proda za odsek pri pripadajočem tipu ukrepa.....	100
Slika 79. Zadrževalni čas rinjenih plavin v različnih tipih ukrepov	101
Slika 80. Bočna zamenjava sedimenta na renaturiranih odsekih ukrepov z odlaganjem rinjenih plavin: a) bočna erozija pri Gosdofu, b) odlaganje prodišča pri kraju Sieldorf/Žetinci kot posledica vnosa sedimenta pri Gosdofu in erozije dna gorvodno	102
Slika 81. Učinkovitost rinjenih plavin različic ukrepov, prikazana glede na trajanje učinka pridobljenega proda na tekoči kilometer različnih tipov ukrepov upošteva potreben vnos proda za odsek pri pripadajočem tipu ukrepa in glede na zadrževalni čas potujočega zrna proda na mejni Muri ob izvedbi pripadajočega tipa ukrepa na celotni mejni Muri.....	102

PREGLEDNICE

Preglednica 1. Značilni pretoki Mure na postaji Mureck (Hidrografska služba, 2020)	16
Preglednica 2. Projekti širitve reke z vnosom proda in mivke ob mejni Muri od leta 2003 (Geofoto, 2017)	29
Preglednica 3. Primerjava izbranih rečnomorofoloških parametrov za odsek med Mureckom in Radkersburgom (Habersack in Schneider, 2000)	43
Preglednica 4. Morfološki parametri tipov ukrepov.	61
Preglednica 5. Pregled izbrane hrapavosti v modelu RSim-3D	68
Preglednica 6. Erozijski parametri	75
Preglednica 7. Prikaz zdajšnje, regulirane geometrije struge v obliki trapezne struge.	76
Preglednica 8. Lastnosti odsekov ukrepov.	77
Preglednica 9. Vrednosti hrapavosti, ki smo jih izbrali za različne elemente Mure.	80
Preglednica 10: Letne prodonosnosti različic ukrepov na osnovi premestitvene zmogljivosti	93
Preglednica 11. Presežek materiala iz inicialnih ukrepov tipov ukrepov	100

1. UVOD

Reka Mura, današnja mejna reka med Avstrijo in Slovenijo, je v zgodovini oblikovala dinamično rečno pokrajino iz več rečnih rokavov, tako da je nenehno spreminjala svojo strugo. Dinamika razvejanega/vijugastega poteka je ob visoki vodi polega poplav pomenila tudi spreminjanje struge. S tem pa je mejna Mura vedno bolj ovirala rabo tal ob njej (kmetijstvo, naselja, mlinarstvo). Že v srednjem veku so ljudje tako začeli z regulacijo struge, dokler mejna Mura proti koncu 19. stoletja ni bila docela regulirana.

Na začetku je bilo zaželeno povečanje premestitvene zmogljivosti, ker se je s poglobitvijo dna povečala pretočna kapaciteta med obrežjema. Sčasoma pa je postala napredujoča erozija dna tudi zaradi gradnje hidroelektrarn in prečnih objektov na prispevnem območju problem za okoljsko prebivalstvo in živalski ter rastlinski svet ob Muri. Vodni objekti so bili vedno bolj izpostavljeni izpodjedanju in destabilizaciji obrežnih zavarovanj. Zmanjšano napajanje vodonosnika zaradi poglobljajoče se Mure je povzročilo deloma težave pri oskrbi s pitno vodo in v kmetijstvu. Zoženje in uravnavanje je pomenilo izgubo habitatov za favno in floro, ker se je obrečni gozd zaradi izgubljene povezanosti z mlinščicami vedno bolj ločeval od reke in je redkeje prišlo do poplav, hkrati pa se je znižala gladina podtalnice. Poskusno vrtnanje je poleg tega pokazalo manjšo debelino plasti proda in nevarnost preboja dna v fini sediment terciarnih plasti.

Načelna vodnogospodarska zasnova iz leta 2001 (Stalna slovensko-avstrijska komisija za Muro, 2001) je predlagala protiukrepe, ki naj bi vsaj začasno povzročili stabilizacijo rečnega dna z umetnim vnosom proda in dopuščanjem erozije. Poseben pomen pri tem se je poleg umetnemu vnosu proda pripisalo eroziji prodnatega obrežja po odstranitvi obrežnih zavarovanj, ki naj bi odsek mejne Mure čez daljše obdobje oskrbovala s prodom in naj bi preprečevala poglobljanje dna. Učinek ukrepov, opisanih v nadaljevanju, je bil dokazan, vendar je bil manjši, kot je bilo pričakovano, in poglobljanje dna se je nadaljevalo. Manjša debelina prodnatega sloja in izmerjen obseg erozije opozarjata na dejstvo, da je ukrepanje nujno.

2. CILJ

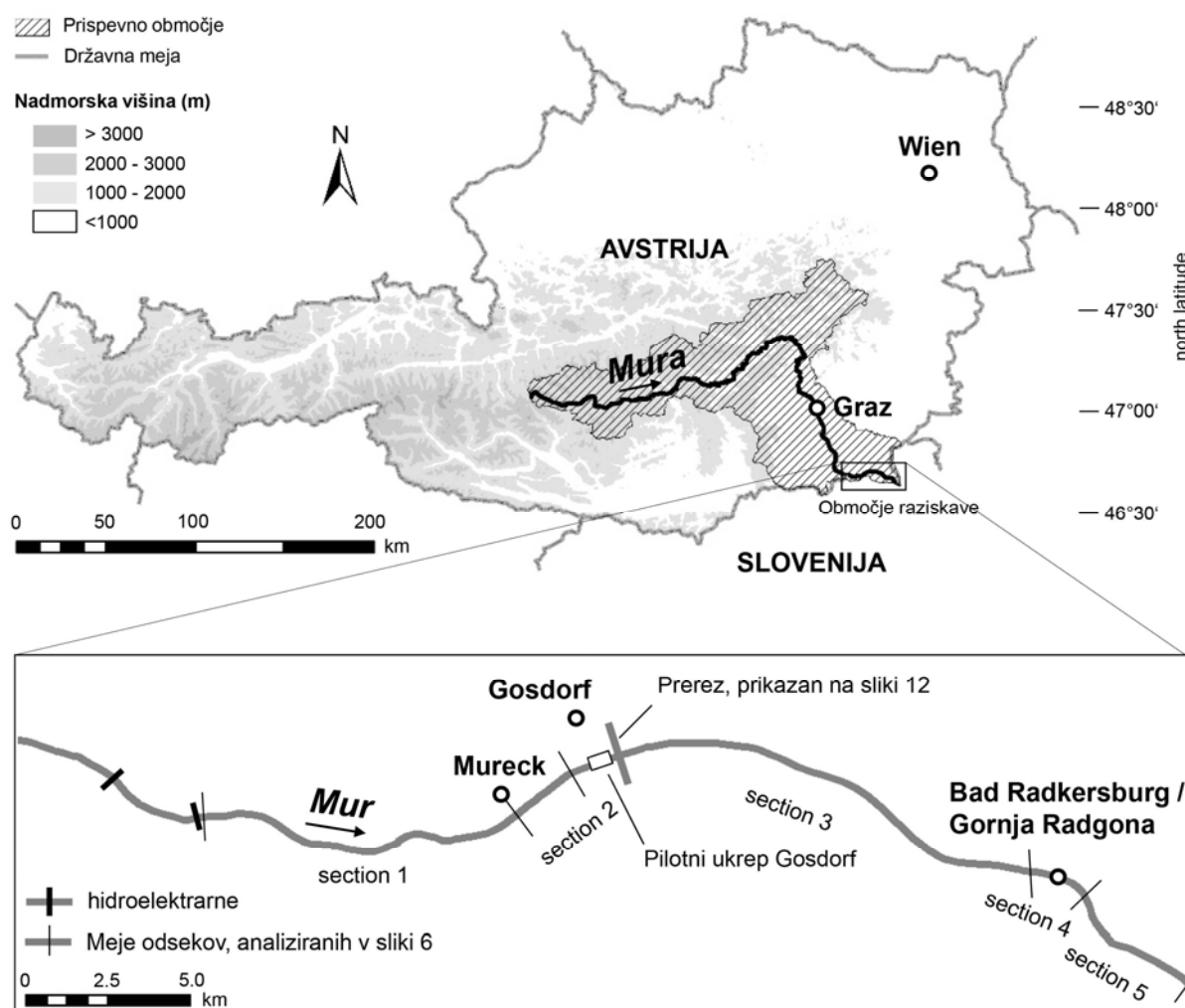
Še vedno obstoječa nevarnost preboja dna ter upoštevanje določil Vodne direktive EU (Evropska komisija, 2000) ter zagotovitev protipoplavne zaščite zahtevajo razvoj novega načrta upravljanja, ki gradi na novih dognanjih glede vzrokov in posledic. Osrednjega pomena pri tem je upoštevanje premeščanja plavin (sedimenta). Predmetna študija je del projekta EU v okviru programa Interreg SI-AT goMURra in raziskuje učinek novih ukrepov. Najprej je treba ugotoviti ustrezne površine ob mejni Muri za učinkovite ukrepe. Sledi primerjava s karto prostorskih omejitev (v dosežku D.T1.3.1 predmetnega projekta). Nadaljnji korak je preverjanje tipov ukrepov, izpeljanih iz tega, z numerično simulacijo. Pri tem je ključnega pomena zmanjšanje potrebnih vnosov proda za stabilizacijo dna ob hkratni ponovni vzpostavitvi naravnejše morfologije in ustreznih morfoloških procesov.

3. UVOD V PODROČJE RAZISKAVE

V nadaljevanju sledita opis glavnih lastnosti območja raziskave in povzetek dozrajšjih ugotovitev kot osnova za raziskavo.

3.1. Položaj in hidrološki opis

Izvir Mure je v avstrijskih Alpah na nadmorski višini 1900 m nad Jadranskim morjem. Mura se po približno 450 km pri Legradu na Hrvaškem izliva v Dravo. Prispevna površina Mure znaša skupaj 13.824 km². Na raziskovalnem odseku predstavlja Mura državno mejo med Avstrijo in Slovenijo (Slika 1) na dolžini 34 km.



Slika 1. Položaj mejne Mure in prispevno območje. Podrobnost: Razdelitev odseka mejne Mure v skladu z Načelno vodnogospodarsko zasnovo (2001) (Klößch et al., 2011, na podlagi podatkov hidrološkega atlasa).

Mura do konca raziskovalnega odseka (dolvodno od Radgone) dosega dolžino 355 km in ima prispevno površino v obsegu 10.340 km². Značilna za ta odsek sta padec dna v obsegu 1,4 ‰ in srednji pretok v obsegu 146,5 m³ s⁻¹ (Hidrografska služba avstrijske Štajerske). Enoletne

poplave dosegajo pretok v obsegu $730 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Ta pretok in drugi značilni pretoki so navedeni v Preglednica 1.

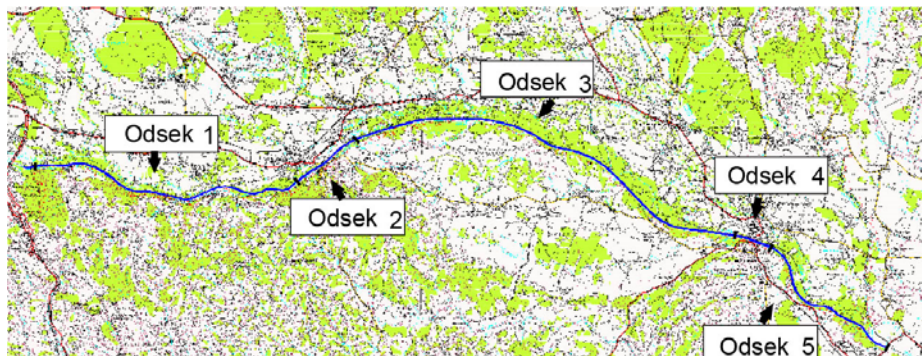
Preglednica 1. Značilni pretoki Mure na postaji Mureck (Hidrografska služba, 2020)

Značilni pretok	Pretok ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$)
MQ	146,5
HQ1	730
HQ5	1000
HQ10	1250
HQ30	1490
HQ50	1600
HQ100	1800

Ker je prispevno območje v Alpah, prihaja med taljenjem snega v mesecu maju do največjih pretokov; druge konice pretokov se praviloma pojavijo julija in avgusta (Hidrografska služba avstrijske Štajerske).

3.2. Stanje mejne Mure v preteklosti

Reka Mura je nekoč oblikovala rečno krajino, za katero je bilo značilno, da se je glavna struga večkrat razdelila v manjše struge. Habersack et al. (2001b) so Muro razdelili na pet odsekov (Slika 2).



Slika 2. Porazdelitev zgodovinske Mure na odseke z uporabo morfoloških kriterijev. Odsek 1: nihajoča, 2: uravnana, 3: razvejana/vijugasta, 4: uravnana, 5: razvejana/vijugasta (Habersack et al., 2001b).

Tam, kjer je Mura tekla vzdolž severnega pobočja Slovenskih goric, je kazala nihajoči ali uravnan potek in omejeno širino. V nasprotju s tem je rečni sistem med Mureckom/Cmurekom in Radkersburgom/Radgono dosegel posebej veliko širino, ker se je Mura na Apaškem polju lahko razprostirala, ne da bi jo omejevalo severno pobočje Slovenskih goric. Na tem območju je bil rečni sistem s stranskimi rokavi in otoki širok do 1,2 km.

V skladu z navedbami Lamprechta (1953) in Habersacka et al. (2001b) je Mura nekoč tudi tam tekla vzdolž pobočja Slovenskih goric, preden jo je podor pri Vratji vasi v 15. stoletju preusmeril na severovzhod. Ta preusmeritev Mure na severovzhod je zaradi ponavljajočih se preusmeritev pri poplavih trajala do sistematske regulacije v 19. stoletju. Slika 3 kaže karto druge vojaške izmere iz zgodnjega 19. stoletja za ta odsek reke.



Slika 3. Izsek iz karte druge vojaške izmere za odsek Mure med Mureckom/Tratami in Halbenrainom/Apačami (1821–1836) (Vir: avstrijski državni arhiv).

3.3. Človeški posegi

Človeški posegi v mejno Muro so na eni strani regulacija na obravnavanem odseku, na drugi strani ukrepi na celotnem prispevnem območju, ki zaradi prečnih objektov vplivajo predvsem na sedimentni režim.

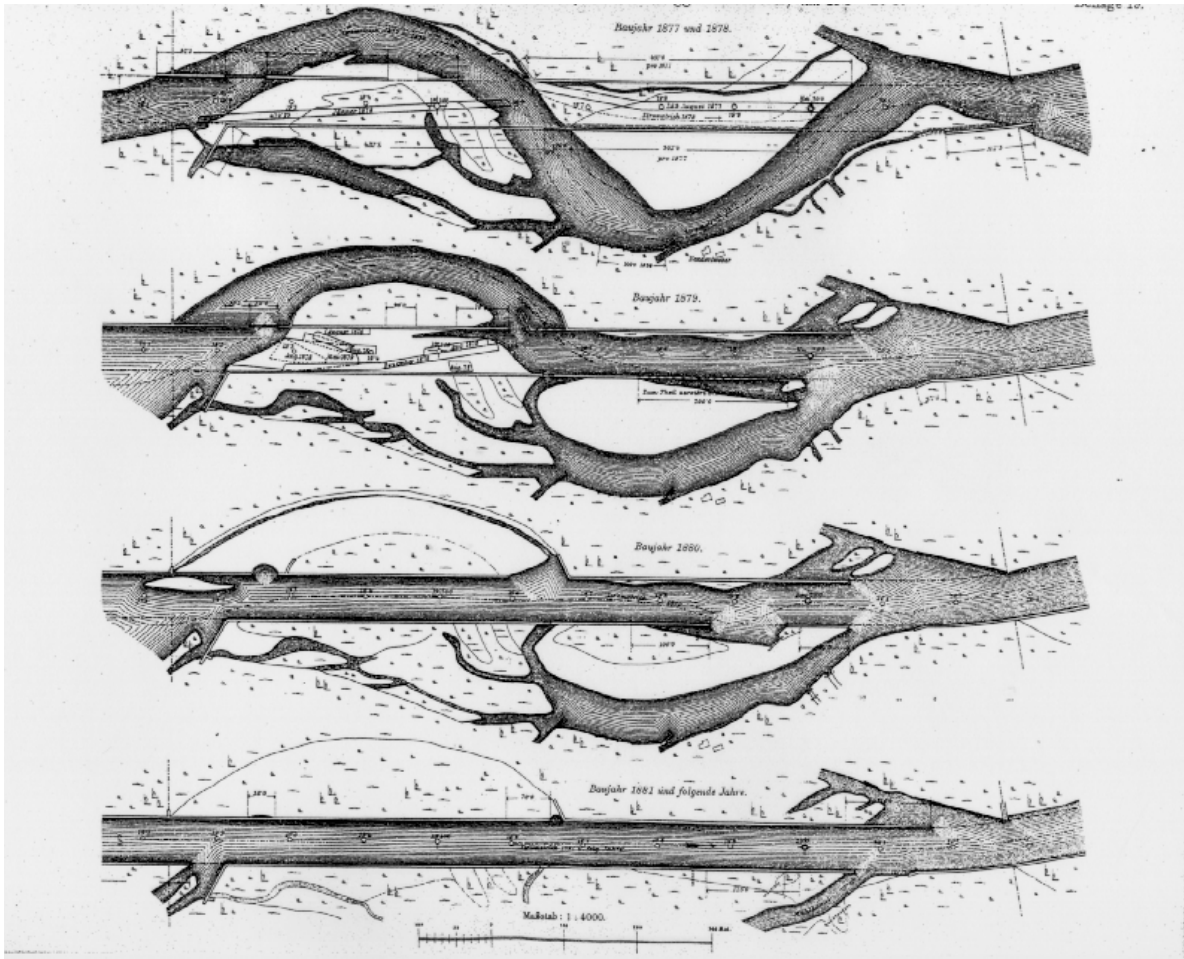
3.3.1. Regulacije

Gradbeni ukrepi na reki so dokumentirani že od 16. stoletja naprej, pri čemer je bila plovba na Muri prisotna že od druge polovice 14. stoletja naprej, kar dopušča možnost gradbenih ukrepov že v tem času (Habersack et al., 2001a). Polega zavarovalnih objektov so bile zgrajene tudi mlinščice, ki so Muro v primeru poplav usmerile v stransko strugo (Lamprecht, 1953; Habersack et al., 2001a).

Leta 1775 se je obseg gradbenih ukrepov še povečal, ker so negativne posledice ponovne premestitve struge Mure na Apaškem polju v severni smeri obremenile tako prebivalstvo kot infrastrukturo (mostove in ceste). Vodnogradbeni ukrepi, ki so poleg zavarovanj obsegali tudi preboje (Tremel, 1946; Habersack et al., 2001a), so bili že leta 1781 ustavljeni, ker je prišlo do ukinitve proračunskih sredstev za izboljšanje plovnosti. Manjkajoče vzdrževanje je povzročilo, da so gradnje spet propadle (Habersack et al., 2001a).

Leta 1860 so se začela delno sistematska regulacijska dela, namenjena ustavitvi preusmeritve struge in zagotovitvi splavarstva. Vendar ti cilji niso bili doseženi. Po mnenju strokovnjakov je bila edina rešitev sistematska regulacija (Hochenburger, 1894).

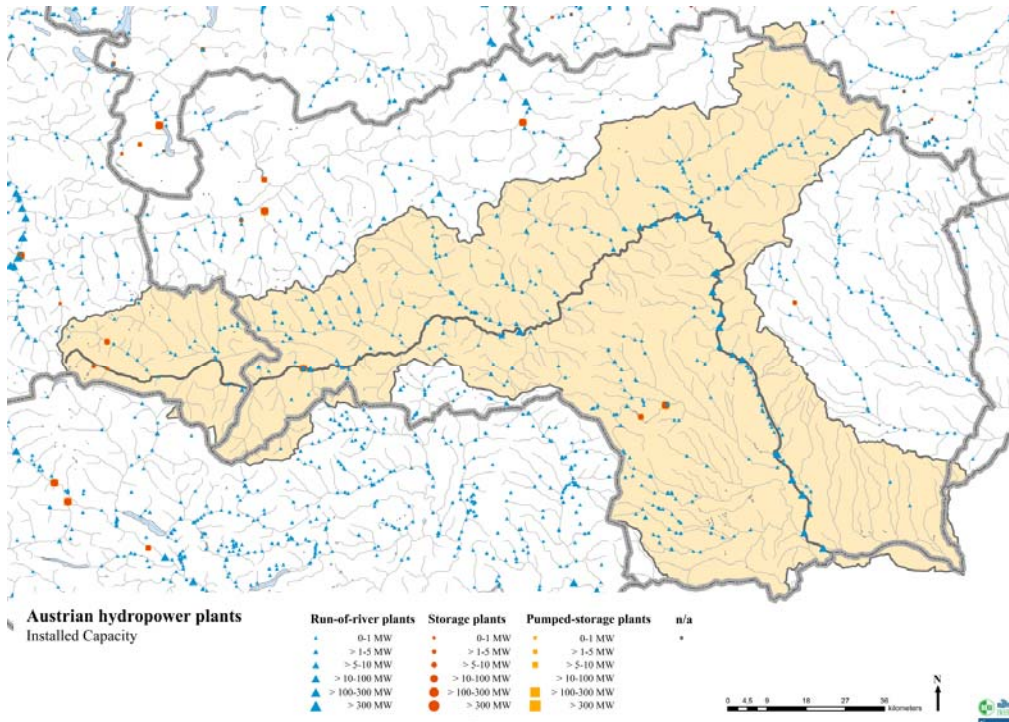
Končno se je reka Mura v letih od 1874 do 1891 dolvodno od izliva Sulm do madžarske meje sistematsko regulirala z normalno širino pri nizkem vodostaju 76 m in z uravnavanjem s preboji z gradnjo prevodnih kanalov. Normalni načrti, ki so bili izdelani za predvidljive pogoje, so omogočili izvedbo. Na Slika 4 je prikazan časovni potek preboja.



Slika 4. Časovni potek preboja od leta 1879 do 1881 v načrtih regulacije Hohenburger (po Habersack et al., 2001a)

3.3.2. Zadrževanje plavin na prispevnem območju

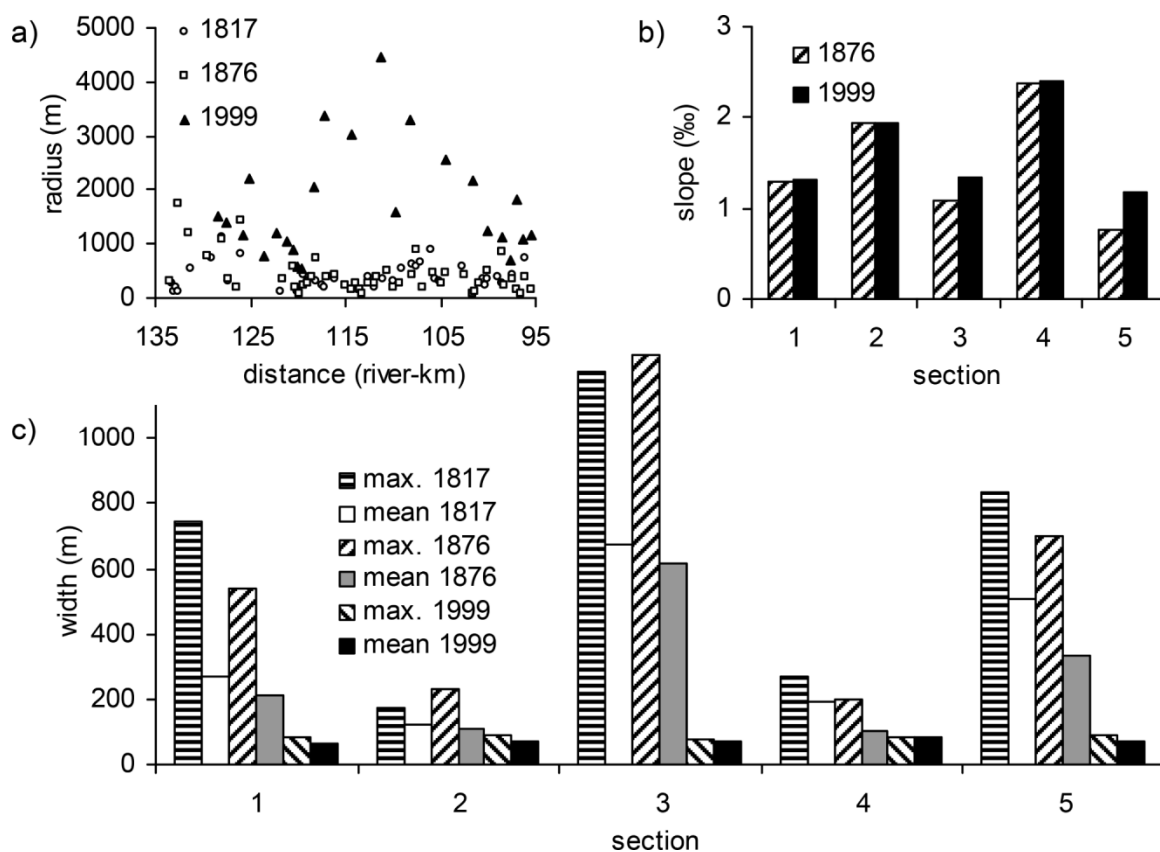
Nekaj časa po sistematski regulaciji mejne Mure po načrtih Hohenburgerja je bila v letih od 1899 do 1903 pri Lebringu zgrajena prva hidroelektrarna na Muri (Austria-Forum, 2021). Danes je ob Muri več hidroelektrarn, kar je skupaj z vodosilnimi napravami in zapornicami na prispevnem območju zaradi zadrževanja rinjenih plavin v akumulacijskih objektih privedlo do skorajda popolne prekinitve toka rinjenih plavin. Slika 5 prikazuje območje mejne Mure in zgrajene hidroelektrarne. Hengl et al. (2001) so v raziskavah za načelno vodnogospodarsko zasnovo računali z zelo majhnim vnosom proda v mejno Muro. Upravlavec hidroelektrarn Verbund namerava izboljšati prepustnost in je prilagodil obratovanje hidroelektrarn od Mellacha do Spielfelda/Špilja tudi zato, da bi se odzval na spremenjene pretočne vrednosti ob visokem vodostaju in povečano premeščanje plavin iz zgornjega toka (Verbund, 2015).



Slika 5. Hidroelektrarne na prispevnem območju mejne Mure (Wagner et al., 2015)

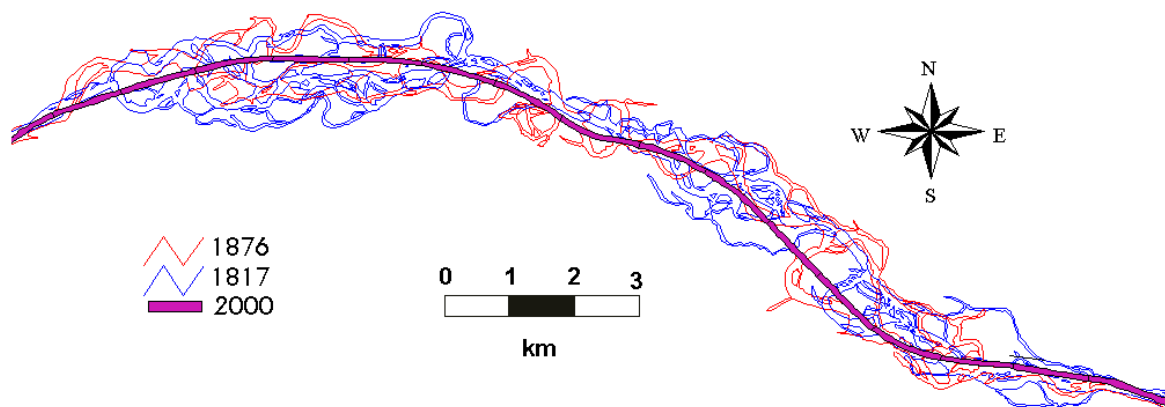
3.3.3. Sprememba parametrov, relevantnih za rečno morfologijo in premeščanje rinjenih plavin

Regulacijski ukrepi so povzročili močno redukcijo širine struge (od do 1200 m širine za premestitev struge do 76 m ozke trapezne struge, Slika 6c) in zaradi uravnave močno povečane radije (Slika 6a), zaradi česar se je padec struge s pribl. 1,2 ‰ povečal na 1,4 ‰ (Slika 6b). V predmetnem poročilu se uporabljajo rečne stacionaže, ki jih uporabljajo študije Načelne vodnogospodarske zasnove (Stalne slovensko-avstrijske komisije za Muro).



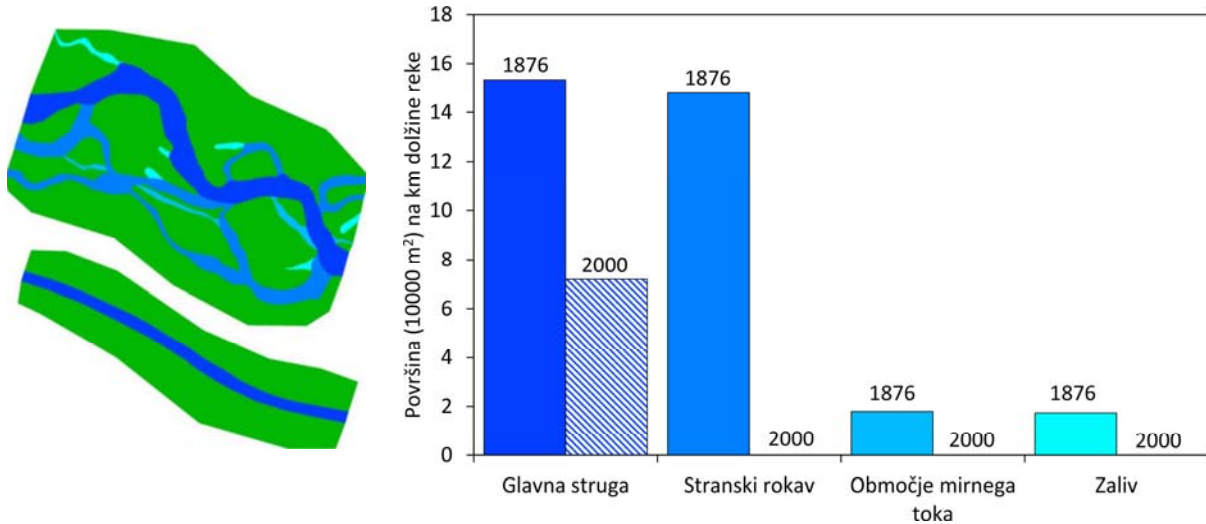
Slika 6. Sprememba morfoloških parametrov na mejni Muri: a) premer, b) padec in c) širina. Odseki so bili razdeljeni v skladu z geomorfološkim opisom (glede lokacije odsekov glejte Slika 1 in Slika 2) (Habersack et al., 2001b; modificirali Klösch et al., 2011).

Sprememba morfologije je najmočnejša na odseku med Mureckom/Cmurekom in Bad Radkersburgom/avstrijsko Radgono, kjer je Mura imela največ prostora za premestitev struge (Slika 7).



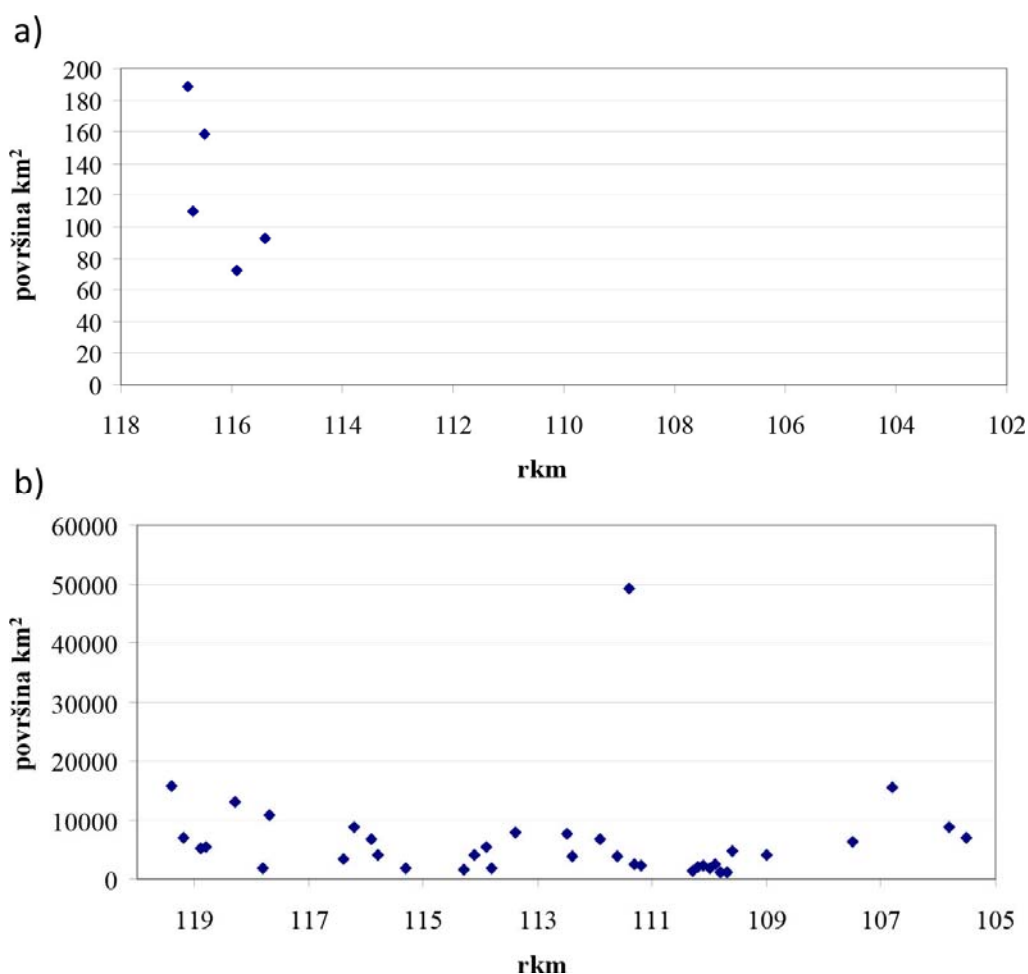
Slika 7. Zgodovinska struga mejne Mure in mejna Mura v letu 2000 na odseku med Mureckom/Cmurekm in Bad Radkersburgom/Radgono (Habersack et al., 2001b)

Ob tem sta se izgubila raznolikost različnih tipov vodotokov in tudi del omočenih površin (Slika 8).



Slika 8. Primerjava površin glede na dolžino različnih vodotokov ob mejni Muri (stacionaža 108–110; 1876 in 2000) (Jungwirth et al., 2001)

V nasprotju s položajem reke pred sistematsko regulacijo, ko se je Mura razdelila v več rokavov in so se izoblikovali otoki, na mejni Muri leta 2000 ni bilo več otokov (Habersack et al., 2001b). Tudi število prodišč se je močno znižalo, enako velja za površine prodišč. To velja še posebej za odsek na Apaškem polju med Mureckom/Cmurekom in Radkersburgom/avstrijsko Radgono, kjer so prodišča na dolgem odseku popolnoma izginila (Slika 9).



Slika 9. Lega in površina prodišč na odseku med Mureckom/Cmurekom in Radkersburgom/avstrijsko Radgono

Drastična sprememba teh vrednosti ni pomembna zgolj za rečno morfologijo. Povečana globina vode v ožji strugi in povečan padec sta povečala premestitveno zmogljivost mejne Mure. Poleg tega se je z napredujočim poglobljanjem ob hkratnem povišanju utrjenih brežin zaradi nalaganja finih plavin v obliki obrežnih naravnih nasipov povečala pretočna kapaciteta, s čimer so se zaostrili okvirni pogoji za premeščanje plavin. Dodatno je skorajda nični vnos proda v mejno Muro velikega pomena za rečno morfologijo. Glede povezave teh parametrov s premeščanjem plavin in z rečno morfologijo glejte razdelek 3.6.

3.4. Vpliv na položaj rečnega dna

Zoženje in uravnavanje struge, ki ju je prinesla regulacija Hochenburg proti koncu 19. stoletja, sta povečali globino vode in padec struge, s čimer sta se povečali strižna napetost pri dnu in prodonosnost. Gradnja hudourniških pregrad in hidroelektrarn je zmanjšala vnos sedimenta z zbirnega območja.

Taki okvirni pogoji ob mejni Muri za sedimentni režim so omogočali poglobljanje rečnega dna, proti kateremu je priporočala ukrepe že Načelna vodnogospodarska zasnova za mejno Muro iz leta 2001 (Stalne slovensko-avstrijske komisije za Muro, 2001), v okviru katere so bili ti potem tudi izvedeni. V okviru vzporednega projekta »lifelineMDD« programa

transnacionalnega sodelovanja Interreg Podonavje (Danube) je bila izvedena študija o sedimentni bilanci in o premeščanju plavin v biosfernem rezervatu Mura-Drava-Donava (Klösch et al., v pripravi). Na tem mestu so predstavljeni rezultati za mejno Muro. Analiza razvoja rečnega dna omogoča vpogled v trenutno stanje dna mejne Mure in njegov razvoj. Oceniti je treba tudi vpliv do zdaj izvedenih ukrepov, ki jih je treba upoštevati v aktualnem načrtu upravljanja.

3.4.1. Podatkovna podlaga

Kot podatkovno podlago za analizo razvoja rečnega dna smo uporabili meritve prečnih profilov na odseku mejne Mure, ki se redno izvajajo od leta 1974. Najprej smo letno izmerili prečne profile; po letu 1983 smo meritve izvedli do leta 2015 s triletnim intervalom (s skrajšanim intervalom med letoma 1998 in 2000 med pripravo Načelne vodnogospodarske zasnove za mejno Muro (Stalna slovensko-avstrijsko komisija za Muro, 2001). Zadnje razpoložljive meritve prečnega profila so iz obdobja od leta 2016 do 2018.

Do leta 1989 smo posneli geometrije 14 prečni profilov. Pokrit odsek je obsegal stacionaže od rkm 123,968 (gorvodno) do rkm 98,079 (dolvodno). Od leta 1992 je bil gorvodni odsek dopolnjen za tri prečne profile in se je potem razprostiral do rkm 129,000. Od leta 2003 je bilo izmerjenih 40 prečnih profilov med rkm 130,730 in 95,036. Leta 2009 smo metodologijo meritve z merilno letvijo zamenjali z nestično meritvijo z ultrazvočnim globinomerom.

3.4.2. Metodologija ocenjevanja

Poudarek je na srednjem položaju rečnega dna, katerega ocenjevanje kaže razvoj rečnega dna, ki je reprezentativen za celoten rečni prerez. V dozdajšnjih analizah so bile opredeljene stacionaže v vsakem prečnem profilu na vznožju obrežja, da bi vmes razmejili dno in s tem tudi območje ocenjevanja. Te stacionaže smo v nadaljnjih meritvah obdržali in vmes ugotovili srednji položaj rečnega dna. Ta metoda je bila primerna za regulirano strugo, v kateri se vznožje obrežja ni spremenilo. V vmesnem času pa je prišlo do odstranitve obrežnih zavarovanj oz. do renaturacije, zaradi česar se je spremenil tudi položaj nekaterih prečnih profilov. To pomeni, da je rečno dno zunaj določenega območja ocenjevanja in je pogojevalo tudi, da je bilo treba iskati novo metodologijo za analize sprememb rečnega dna. Ena izmed možnosti bi bila, da bi območje ocenjevanja sproti prilagajali novim stacionažam obrežnega vznožja. Vendar se je pokazalo, da je velikokrat težko opredeliti obrežno vznožje v naravnem profilu, še posebej pri položnih bregovih.

Zaključno smo uporabili metodo, ki ocenjuje debelino rečnega dna na omočenem območju z določenim pretokom. Zato smo uporabili analitično orodje »Chevo« (Tool for standardized assessment of channel evolution, Klösch et al., 2019 b), ki je bilo razvito v okviru projekta Alpine Space HyMoCARES, ki se je izvajal v programu Interreg EU.

Kot referenčni pretok, katerega višina gladine razmejuje rečno dno, smo izbrali srednji pretok ($146,5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, merjeno na v. p. Mureck v izvedbi hidrografske službe avstrijske Štajerske). Analizo smo ponovili z višjim pretokom ($606 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), da bi preizkusili odvisnost rezultatov od izbora pretoka reke Mure.

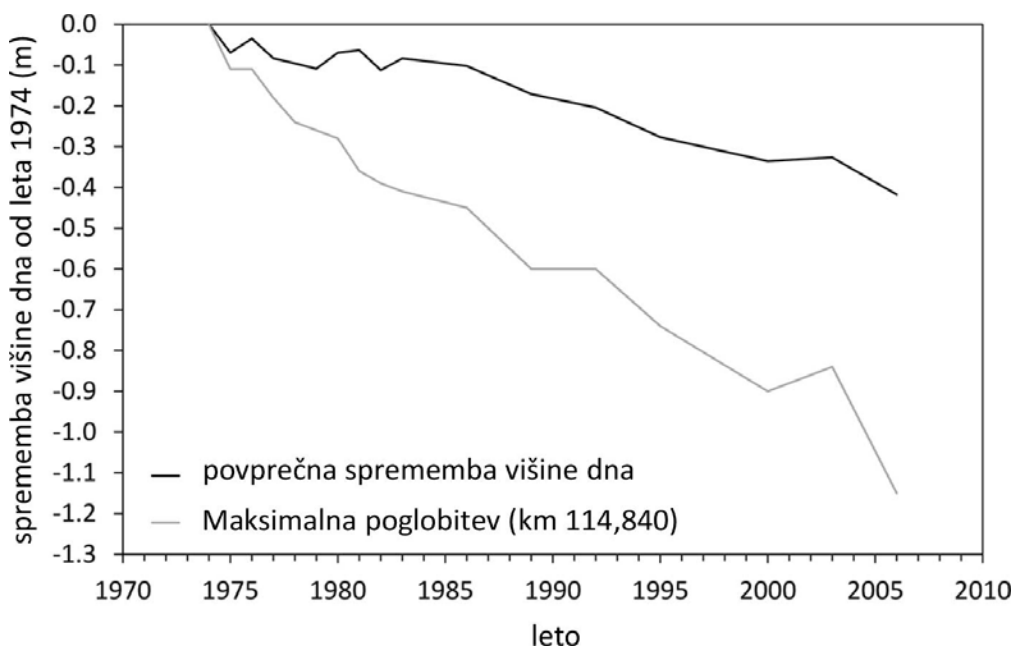
Da bi zagotovili konsistenco rezultatov, smo to metodo uporabili za celotno časovno serijo. Ob tem smo analizo omejili na prečne profile, merjene od leta 1974, ker smo tako lahko dosledno ocenjevali enako ločljivost odseka mejne Mure. Za primerjalni namen smo vključili obdobje od leta 2003, od katerega naprej se je močno povečalo število prečnih profilov z vključitvijo vseh prečnih profilov.

3.4.3. Rezultati o razvoju rečnega dna

Najprej je prikazan razvoj rečnega dna za obdobje pred izvedbo prvega renaturacijskega ukrepa (Gosdorf 1). Do tega trenutka smo izvedli zgolj manjše širitve struge (glejte razdelek 3.5). To obdobje se lahko obravnava kot reprezentativno za razvoj regulirane struge mejne Mure brez relevantnih protiukrepov.

3.4.3.1. Rezultati glede spremembe višine dna

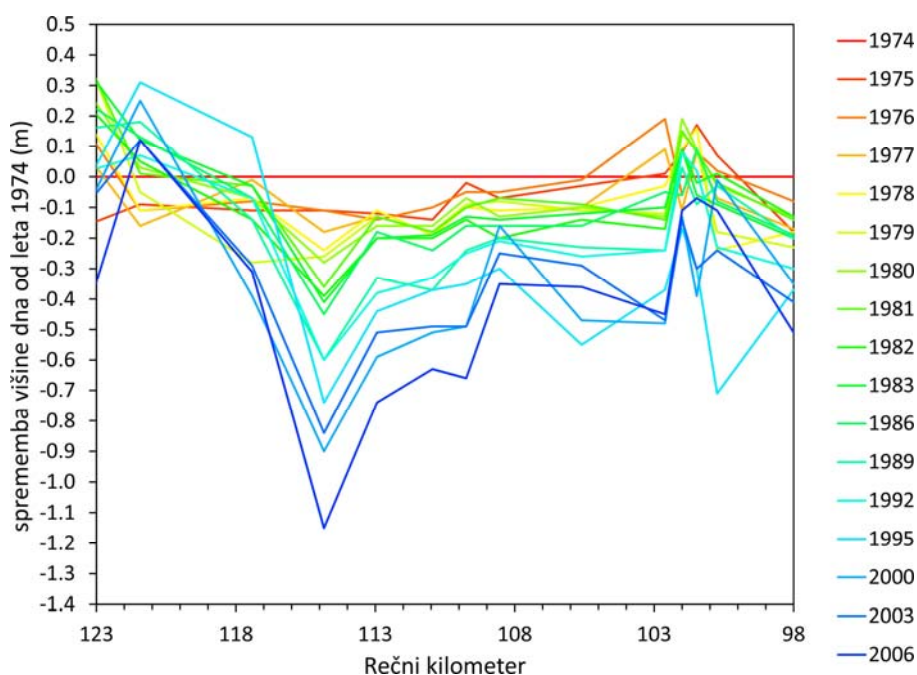
Ocenjevanje kaže kontinuirano poglobljanje srednje višine rečnega dna mejne Mure (Slika 10). V povprečju se je dno poglobilo za 42 cm, kar ustreza letnemu poglobljanju v obsegu 1,3 cm. V prečnem profilu 114,840, dolvodno od naravnega praga, ki zaradi poglobljanja dna čedalje bolj štrli iz struge, je bilo izmerjeno največje poglobljanje (1,15 m v obdobju 1974– 2006, kar ustreza letnemu poglobljanju v obsegu 3,6 cm).



Slika 10. Srednja sprememba višine dna in sprememba višine dna v profilu z največjo poglobitvijo (114,840 km) na mejni Muri med letom 1974 in začetkom večjih ukrepov v letu 2006. Različna razdalja med prečnimi profili je bila upoštevana pri izračunu srednje spremembe višine rečnega dna na celotnem odseku s ponderiranjem.

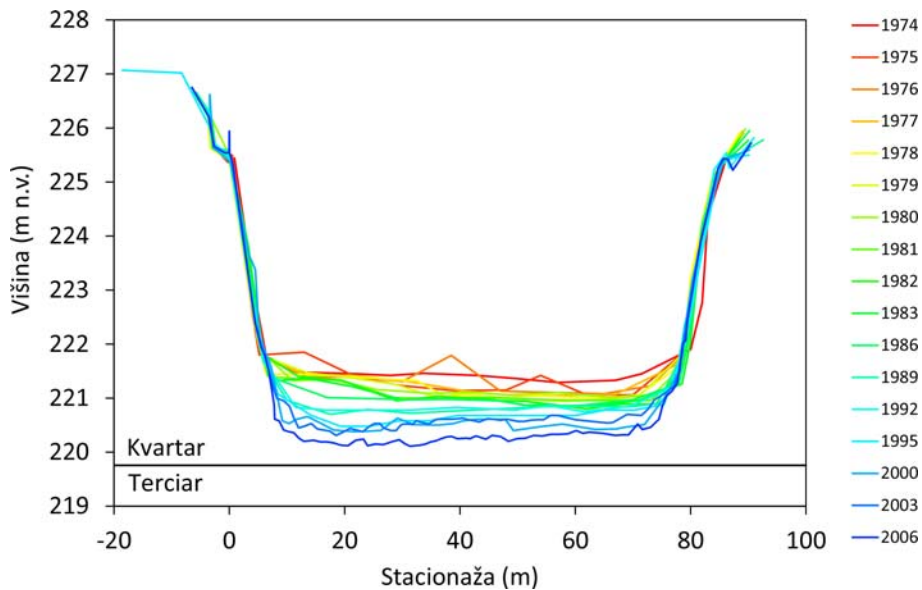
Kot se kaže v poglobitvi v prečnem profilu 114,840, poglobitev ni enakomerno porazdeljena po mejni Muri. Manjše poglobljanje med Spielfeldom/Špilje in Gosdorfom/Gosinjo vasjo dopušča možnost, da naravni pragovi, ki štrlijo iz struge, delujejo kot stabilizacija dna. Dolvodno od Gosdorfa se zdi, da pride do rotacijske erozije, zaradi katere se padec mejne

Mure prilagodi na čezmerno premestitveno zmogljivost (prodonosnost) ob hkratnem močno zmanjšanem vnosu proda.



Slika 11. Povprečne spremembe rečnega dna v profilih po dolžini za obdobje od leta 1974 do začetka izvedbe večjih ukrepov v letu 2006. Najmočnejše erozije so se pokazale pri rkm 114,840, dolvodno od naravnega praga pri Gosdorfu, ki je zaradi erozije dna vedno bolj štrlela z dna.

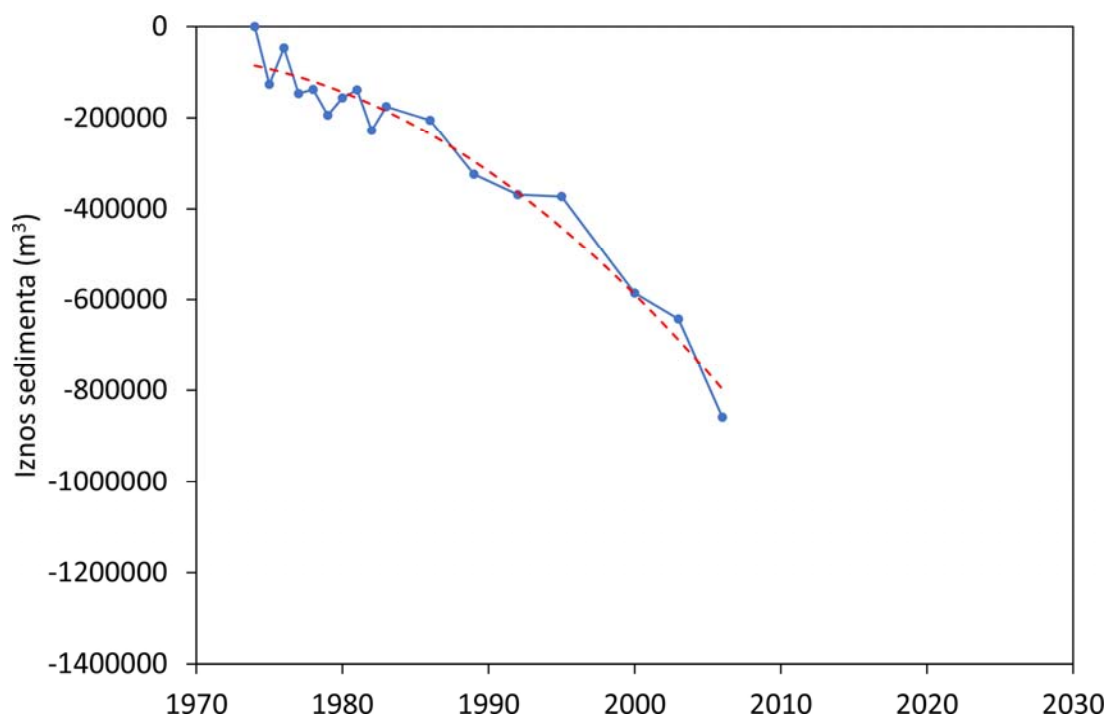
Habersack et al. (2001a) so v osnutkih za različne ukrepov uporabili podatke iz vrtin na obrežnem terenu za ugotovitev debeline kvartarnih prodnih plasti in višinske lege meje do finega terciarnega sedimenta. Ob tem je prečni profil 114,840 kazal samo majhno razdaljo do kvartarnih plasti, tako da je treba pri nadaljevanju poglobljanja dna računati z izgubo prodnate posteljice, s prebojem terciarnih plasti in morebitnim prebojem dna (nenadna, močna erozija v terciarne plasti) (Slika 12). Za primerjavo je bilo ocenjevanje za obdobje od leta 2003 do 2018 ponovljeno z isto metodo (izračun povprečne višine dna v omočenem delu rečnega dna) z večjim številom profilov, da bi preverili odvisnost ocenjevanja od prostorske resolucije. Namesto zgolj 14 profilov, ki so bili na voljo v celotnem obdobju, jih je bilo zdaj na voljo 39. Tudi to ocenjevanje je v letu 2018 pokazalo globlje dno kot v letu 2003 ($-15,5$ cm ob uporabi 39 profilov namesto $-14,3$ cm ob uporabi zgolj 14 profilov, ob referenčnem pretoku $606 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$).



Slika 12. Razvoj dna v prečnem profilu pri rkm 114,840, v katerem je bila že leta 2006 majhna razdalja do terciarnih plasti.

3.4.3.2. Rezultati glede sedimentne bilance

Prečni profili so bili uporabljeni tudi za izračun sedimentne bilance. V ta namen smo pomnožili razlike v prečnih površinah z vplivno širino (polovična distanca do sosednjih profilov). Upoštevali smo vnos proda pred letom 2006 (Preglednica 2). Z odseka mejne Mure je bilo v obdobju od 1974 do 2006 odvzeto skupno 860.000 m³ proda (sedimenta) (Slika 13). Rezultat bolj ali manj odraža razvoj srednje višine dna, vendar v poteku zaradi majhnih sprememb ob bregovih odstopa od razvoja višine dna.



Slika 13. Kumulirani odvzem proda (sedimenta) v obdobju od 1974 do 2006 iz mejne Mure

3.5. Do zdaj izvedeni protiukrepi in njihov učinek

V odzivu na vodnogospodarske in ekološke probleme ob mejni Muri je bila po naročilu Stalne slovensko-avstrijske komisije za mejno Muro v letih 1998 do 2001 pripravljena Načelna vodnogospodarska zasnova, ki je po temeljnih raziskavah vsebovala tudi osnutek protiukrepov. Največji izmed teh ukrepov, Gosdorf 1, je bil intenzivno spremljan. Rezultati monitoringa so povzeti na tem mestu.

3.5.1. Načelna vodnogospodarska zasnova za mejno Muro

V okviru priprave Načelne vodnogospodarske zasnove za mejno Muro (Stalna slovensko-avstrijska komisija za Muro, 2001) so bile izvedene intenzivne raziskave o vodnogospodarskih tematskih področjih (poplavih, spremembah rečnega dna, osnovah premeščanja rinjenih plavin, rečni morfologiji, vodnih gradnjah, modelu premeščanja rinjenih plavin, nizki vodi in o ekoloških tematskih področjih (ribjem staležu, ugotovitvi struktur, »makrozoobentos«). Na podlagi rezultatov so bili predlagani ukrepi, ki so zajemali umetno dodajanje proda in dopuščanje bočne erozije. Pri tem so izhajali iz dejstva, da bo Mura po odstranitvi obrežnih zavarovanj samodejno zahtevala dodaten prostor z bočno erozijo in da bo erodirani obrežni sediment uporabila kot začasni vir rinjenih plavin (proda).

Pri izboru rečnih odsekov so upoštevali zgodovinsko in napovedano poglobljanje dna, debelino proda nad terciarnimi plastmi, delež obrežnega sedimenta, ki je relevanten za rinjene plavine in razpoložljive površine (Habersack et al., 2001a).

Odseki ukrepov, izvedenih potem, njihovo obdobje izvedbe in vnesena količina proda ob izvedbi so navedeni v Preglednica 2.

Preglednica 2. Projekti širitve reke z vnosom proda in mivke ob mejni Muri od leta 2003 (Geofoto, 2017)

Leto izvedbe	Občina	Odsek reke (rečni kilometer)	Količina proda in mivke (m ³)
2004/2005	Oberschwarza	128,500–128,890	14.000
	Weitersfeld		40.000
2006	Donnersdorf	109,740	20.000
2007	Gosdorf	115,554–116,040	69.000
		114,980–115,554	81.000
2011	Radkersburg Umgebung - Sicheldorf/Žetinci	96,020–97,334	18.000

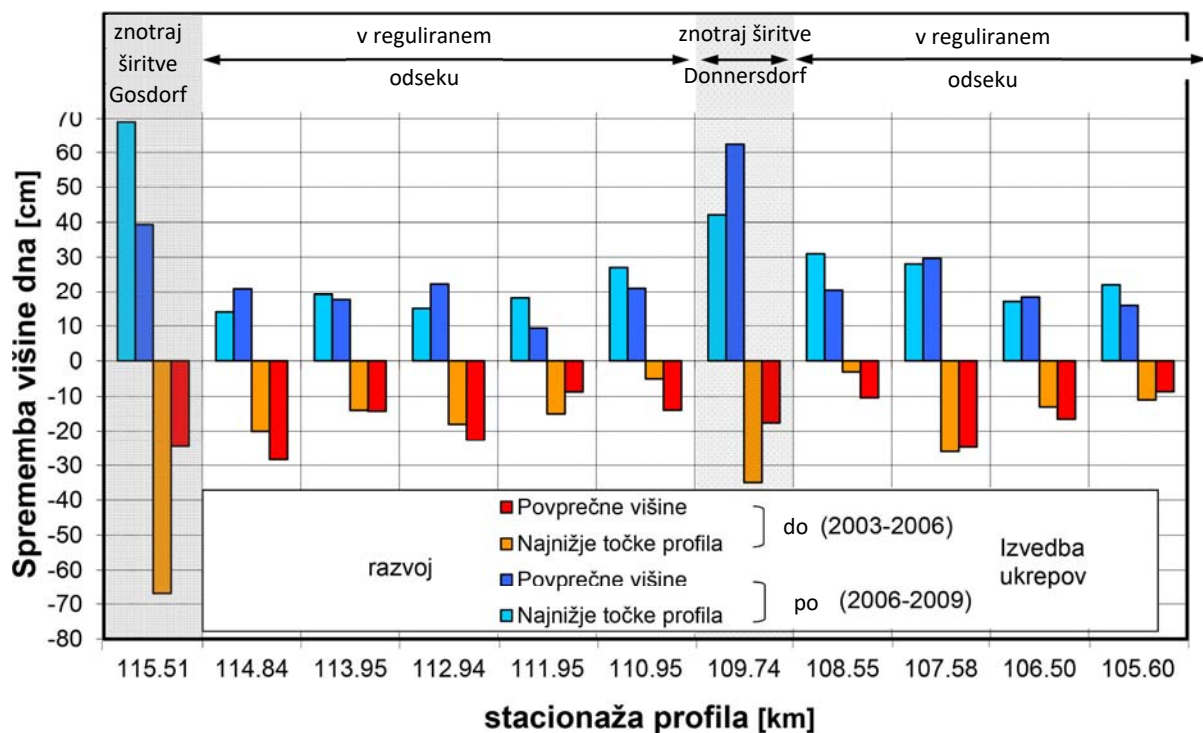
3.5.2. Ukrep Gosdorf I

V letih 2006 in 2007 je bil pri Gosdorfu na odseku med rkm 114,980 in 116,040 izveden večji ukrep v skladu s priporočili Načelne vodnogospodarske zasnove (Slika 1). Načelna vodnogospodarska zasnova je na tem odseku ugotovila največjo nujnost za izvedbo ukrepa, ker je bila tukaj podana majhna razdalja do terciarnih plasti. Na avstrijski strani brega so bila odstranjena obrežna zavarovanja in izkop proda (sedimenta) v obsegu 150.000 m³ je bil takojšnji prispevek za lokalni dvig rečnega dna in napajanje reguliranega odseka dolvodno. Mura naj bi se poleg tega širila po lastni dinamiki, naj bi sprejela erodirani obrežni prod v strugo in zaradi širše struge zmanjšala premestitveno zmogljivost (prodonosnost). V okviru modela za premeščanje rinjenih plavin, ki je bil izdelan na osnovi Načelne vodnogospodarske zasnove (Hengl et al., 2001), ki je bila uporabljena za optimizacijo izvedbe ukrepov ob mejni Muri, so izhajali iz tega, da se bo Mura v 17 letih razširila na 150 m in da bo v tem obdobju oskrbovana iz sedimenta, nastalega zaradi bočne erozije. V skladu z izračuni Načelne vodnogospodarske zasnove naj bi dodatne izvedbe ukrepov v obdobju do 60 let omogočile stabilizacijo rečnega dna. S tem bi prebrodili dolgo obdobje do morebitne rešitve za ponovno vzpostavitev kontinuuma sedimenta na verigi hidroelektrarn.



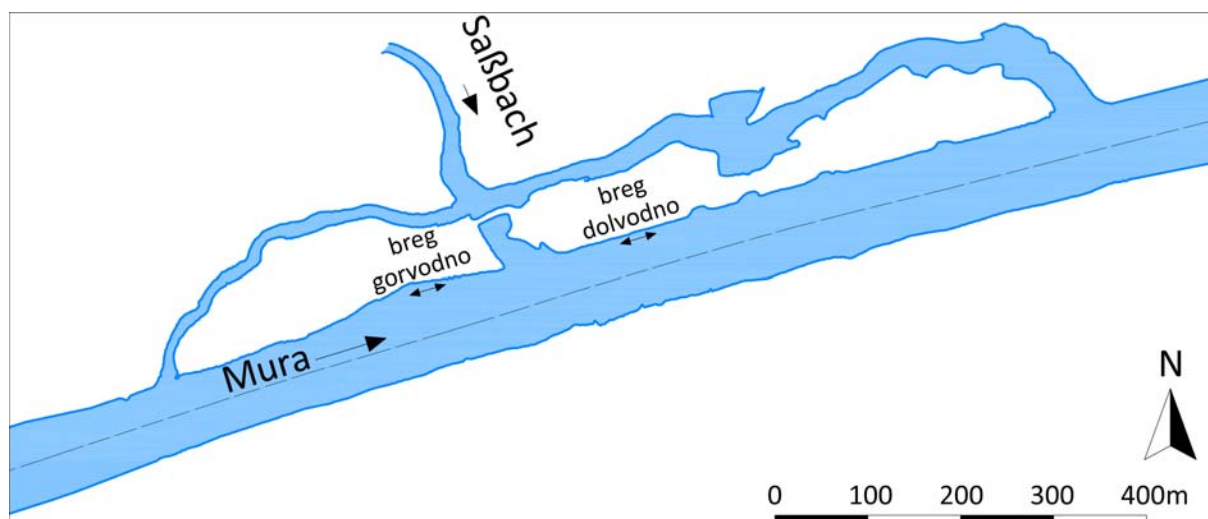
Slika 14. Izvedena širitve Mure pri Gosdorfu s komponentami ukrepa (Habersack et al., 2008).

Meritve so pokazale pozitivni učinek ukrepa na odseku širitve, in tudi na reguliranem odseku dolvodno (Slika 15). Povprečna višina rečnega dna je bila leta 2009 ne samo v stabilnem položaju, temveč je bila za 40 cm višja. Tudi na reguliranem odseku dolvodno se poglobljanje dna ni samo ustavilo, temveč se je vsaj začasno obrnilo.



Slika 15. Razvoj povprečne višine rečnega dna in najnižje točke profila v prečnih profilih dolvodno od širitve pred izvedbo ukrepa in po njej pri Gosdorfu (Habersack et al., 2013)

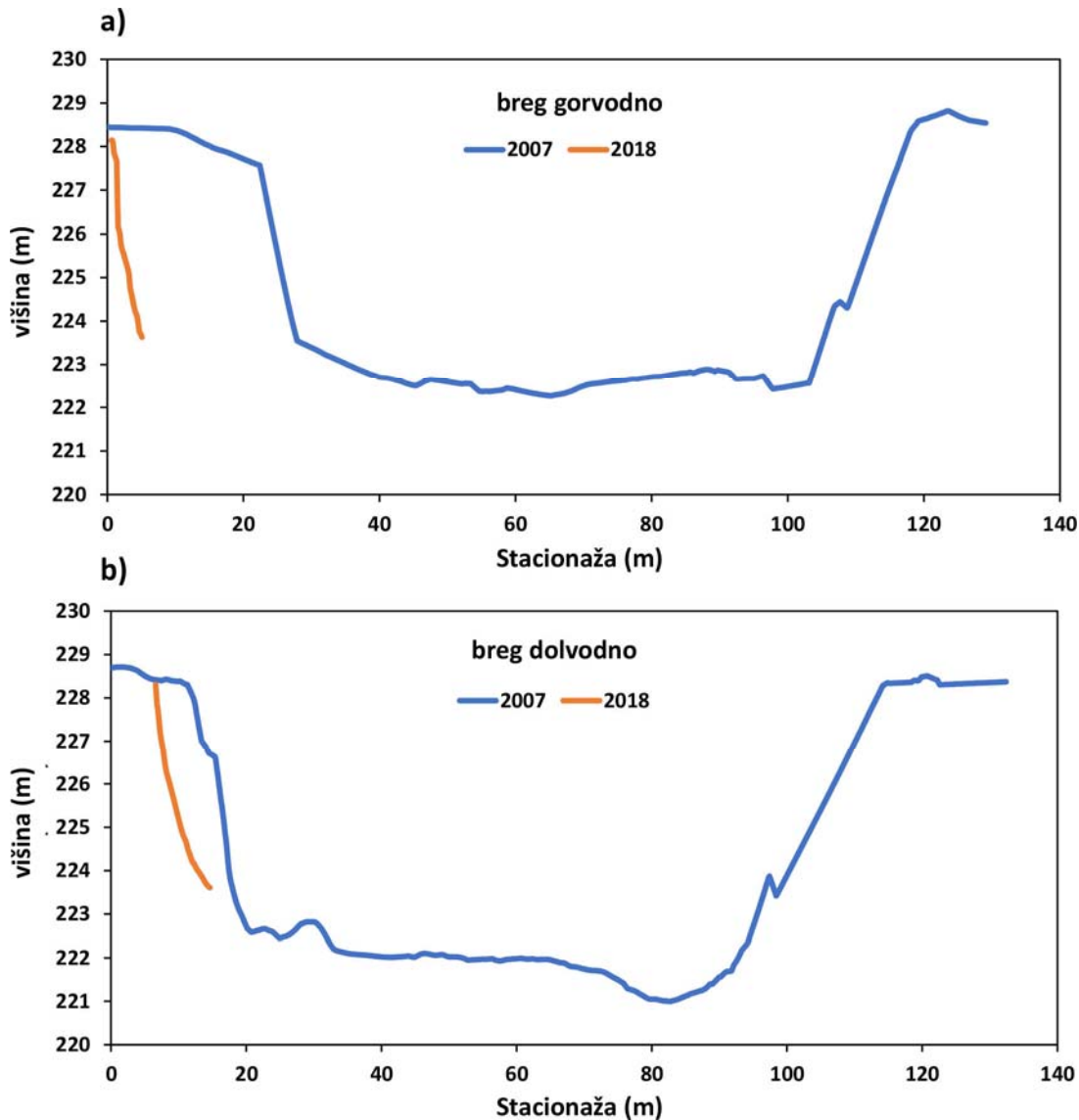
Meritve so tudi pokazale, da širitev struge in vnos proda z obrežja ni izpolnil pričakovanja. Slika 16 kaže položaj obrežnih profilov, ki so jih Habersack et al. (2013) večkrat fotogrametrično posneli.



Slika 16. Položaj raziskovanih odsekov obrežja na odseku ukrepa pri Gosdorfu

Slika 17 kaže primerjavo najmlajših fotogrametričnih posnetkov iz leta 2018 s stanjem neposredno po izvedbi ukrepa leta 2007. Dolvodno od praga, katerega posledica je okrepljen

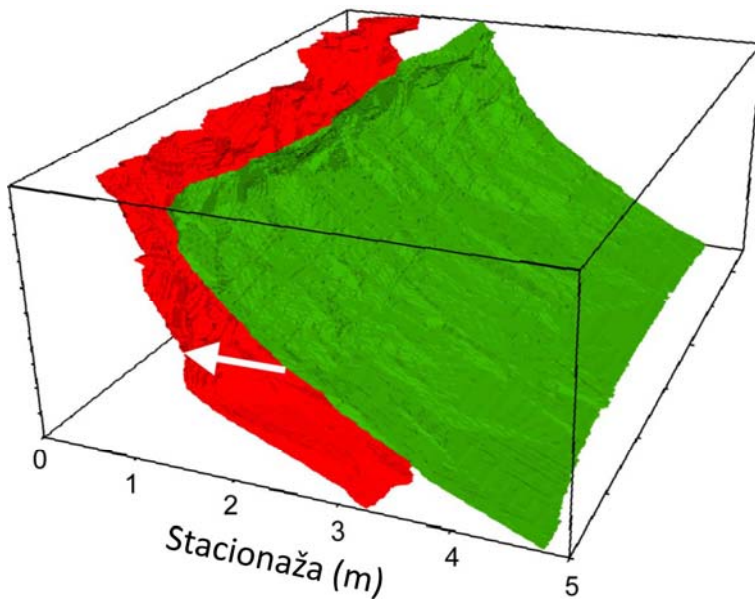
tok ob levem bregu, se je pojavila bočna erozija v obsegu približno 28 m, na ravnem odseku dolvodno je prišlo do erozije zgolj na 10 metrih brega.



Slika 17. Bočna erozija od izvedbe ukrepov v Gosdorfu, za bregove, ki so prikazani na Slika 16, a) prečni profil v odseku brega gorvodno z okrepljenim tokom zaradi obstoječega praga, b) prečni profil na ravнем odseku brega dolvodno.

Pri tem se je močno znižal obseg bočne erozije. Poplavni dogodek z dne 22. julija 2012 je s konico pretoka v obsegu $1228 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (skoraj desetletna povratna doba s pretokom $1250 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$)

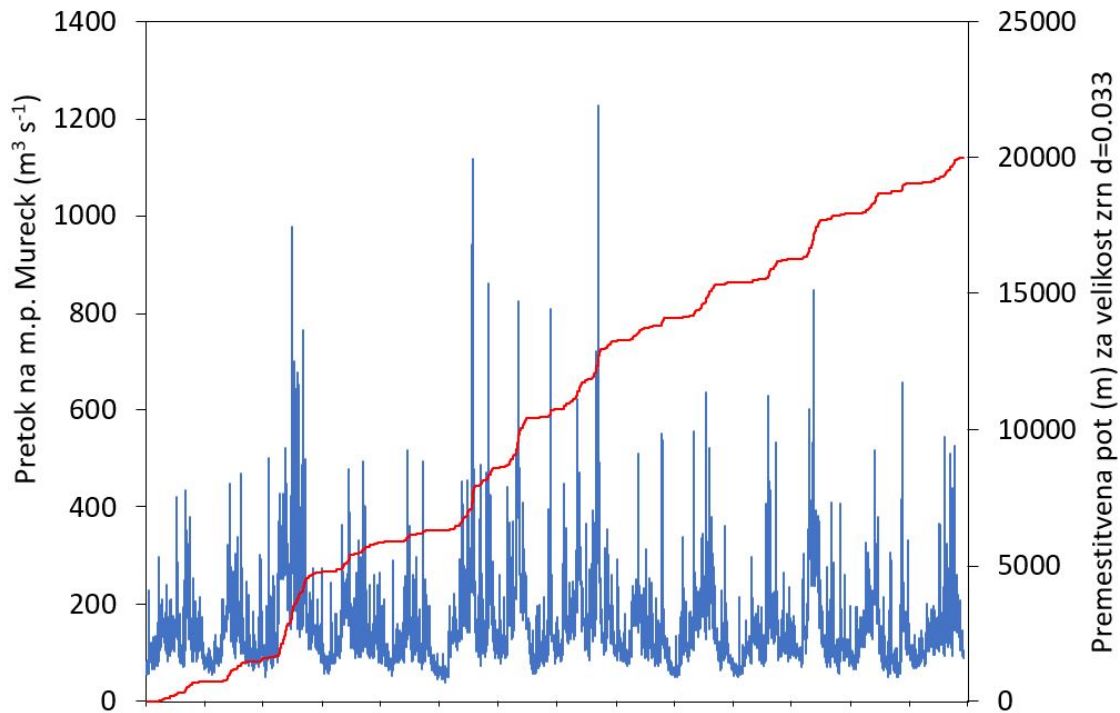
na ravnem odseku brega dolvodno povzročil lateralno erozijo v obsegu samo 1 m (Slika 18, Habersack et al., 2013).



Slika 18. Bočna erozija na ravnem odseku brega pri Gosdorfu zaradi poplavnega dogodka dne 22. julija 2012 (Habersack et al., 2013)

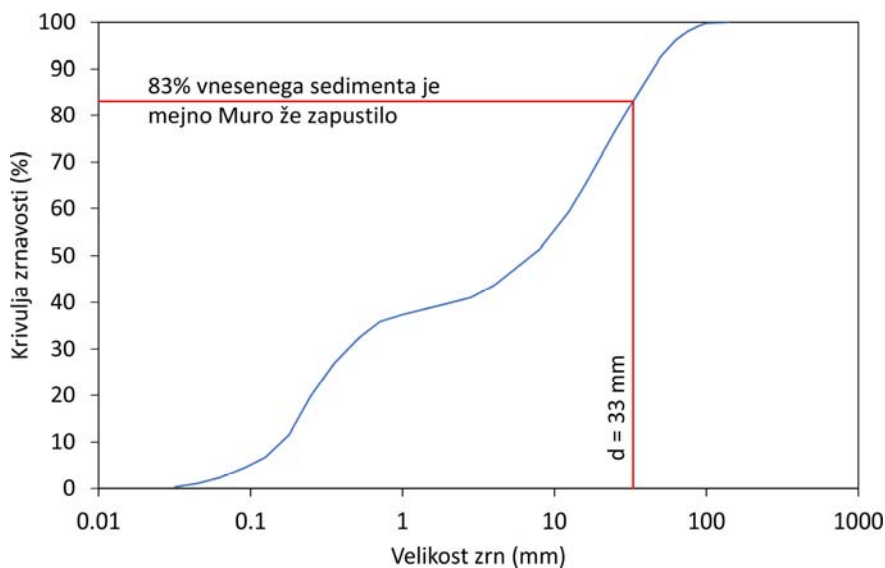
Na podlagi tega je poleg umetnega dodatka proda sledil samo majhen vnos proda na osnovi erozije obstoječih plavin, ki ga je geodetski zavod Geofoto (2017) določil z volumnom 27.000 m³.

Hkrati so se usedline na odseku širitve med večjim pretokom razmeroma hitro premestile z odseka širitve, tako da je vneseni prod razmeroma hitro deloval kot napajanje. V regulirani strugi dolvodno je obremenitev rečnega dna ostala nespremenjena in rinjene plavine so tam dosegle relativno visoke hitrosti. Klösch in Habersack (2018) sta na podlagi preizkusov s »tracerji«
rinjenih plavin izpeljala formulo hitrosti premeščanja plavin (prodonostnosti), ki je bila prilagojena in uporabljena za podatke Habersacka et al. (2013), da bi ugotovili hitrost »tracerjev«
in zadrževalni čas v odseku mejne Mure. V skladu s tem računom naj bi rinjene plavine z zrnavostjo 33 mm (b-os) 20 km dolg odsek mejne Mure dolvodno od Gosdorfa zapustile konec leta 2020 (Slika 19).



Slika 19. Pot zrnca proda z b-osjo 33 mm, izračunana s formulo Klöscha in Habersacka (2018) z uporabo podatkov v publikaciji Habersacka et al. (2013) (Vir: hidrografske podatki: Hidrografska služba avstrijske Štajerske).

Če predpostavljamo, da so vsa zrnca do te velikosti Muro že zapustila, to pomeni, da je 83 % dodanega volumna proda že iznesenih (Slika 20).

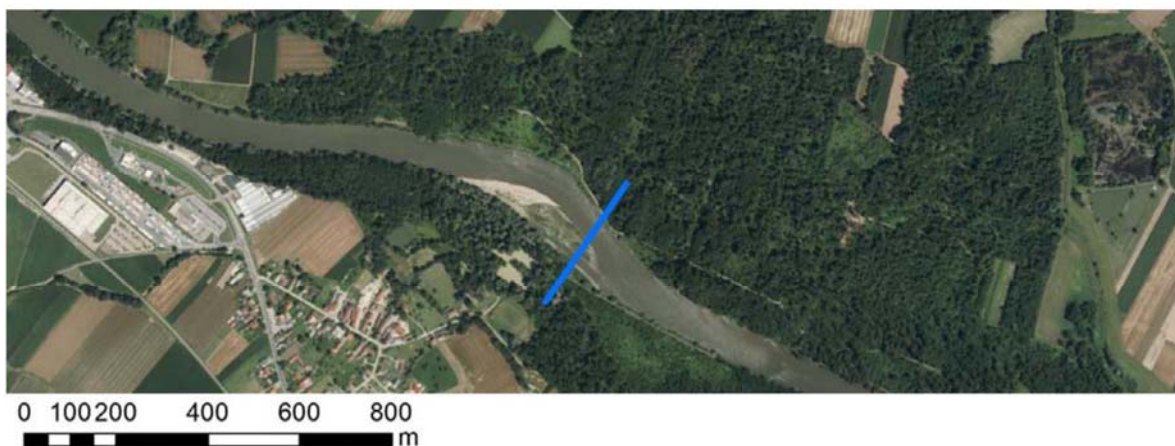


Slika 20. Zrnavostna sestava obrečnega sedimenta, ugotovljena na podlagi podatkov Načelne vodnogospodarske zasnove (Stalna slovensko-avstrijska komisija za mejno Muro, 2001) in kot je bila verjetno povprečna sestava dodanega proda pri Gosdorfu. Do zrnivosti 33 mm je dodani prod verjetno že bil iznesen iz mejne Mure.

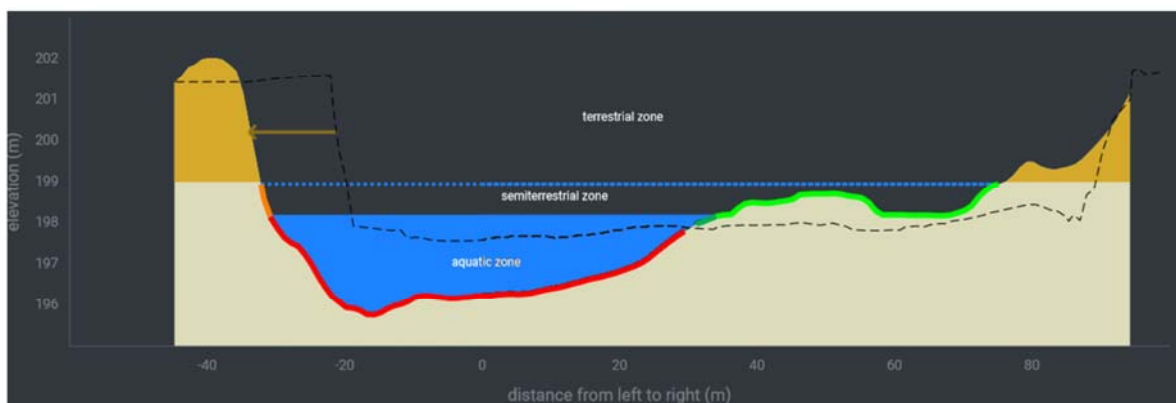
3.5.3. Ukrep v Sieldorfu

V okviru projekta EU Interreg Danube Transnational Projekts lifelineMDD smo raziskali tudi druge odseke mejne Mure z uporabo redno merjenih prečnih profilov (Klösch et al., v pripravi). Na odseku ukrepa v Sieldorfu/Žetincih ob koncu odseka mejne Mure dolvodno od Bad Radkersburga/avstrijske Radgone je bilo poleti 2012 vzdolž avstrijskega brega odstranjenih 1,4 km obrežnih zavarovanj (Slika 21 a). Ta odsek ukrepa je pridobil na vnosu proda iz bočne erozije gorvodno in od vnosa zaradi izvedenih ukrepov gorvodno, s tem da se je na notranjem bregu odseka oblikovalo prodišče. Na zunanjem bregu rečnega ovinka so bile močnejše erozije (Slika 21 b).

a)



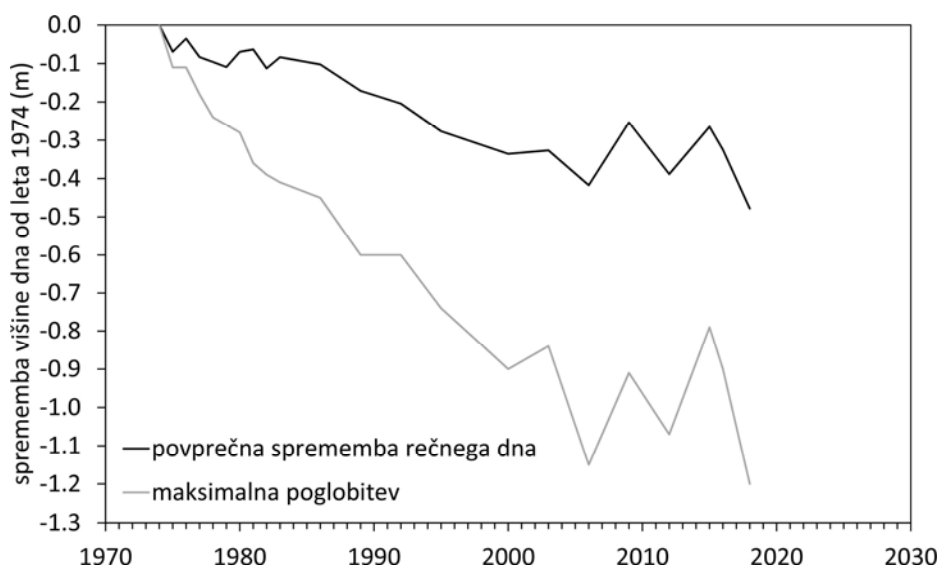
b)



Slika 21. a) Odsek ukrepa pri Sieldorfu/Žetincih z vrisanim položajem profila in b) s spremembo v prečnem profilu v obdobju med letoma 2012 in 2018. Analiza je bila izvedena z orodjem HyMoLink (Klösch et al, 2019a).

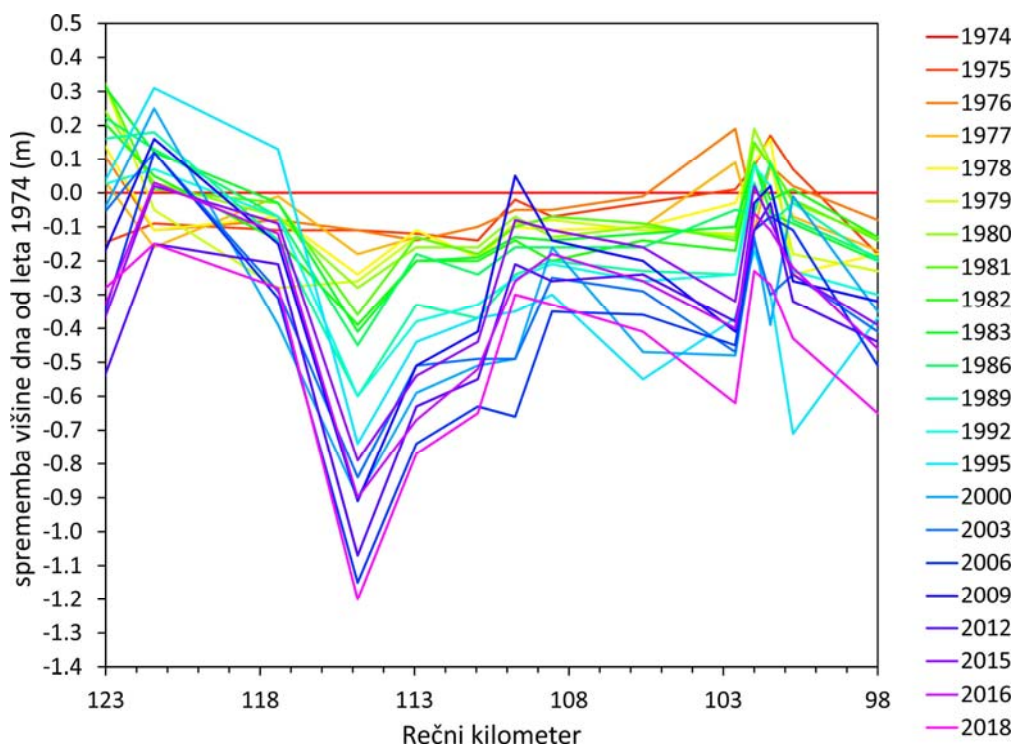
3.5.4. Posledice za celotni odsek mejne Mure

Nadaljnje ponovitve meritev prečnih profilov so pokazale, da se je poglobljanje dna nadaljevalo prej kot pričakovano (Slika 22). V skladu z zadnjo meritvijo leta 2018 je rečno dno z višino 48 cm pod nivojem primerjalnega leta 1974 doseglo novo rekordno minimalno debelino.



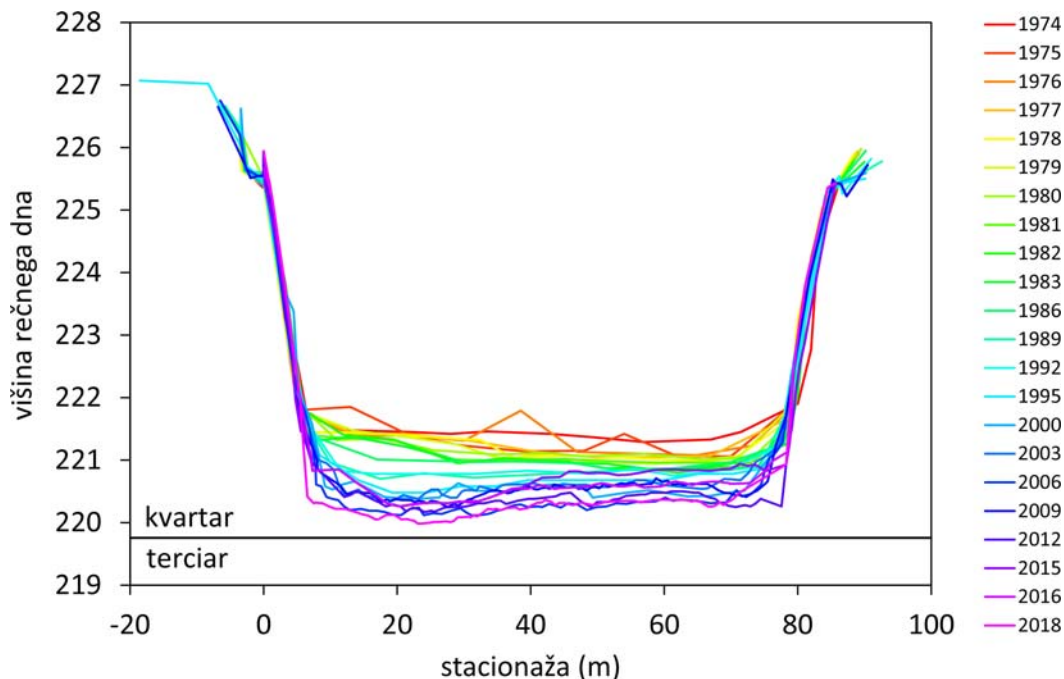
Slika 22 .Povprečna sprememba rečnega dna in sprememba rečnega dna v profilu z največjo poglobitvijo (114,840 km) mejne Mure od leta 1974. Različna distanca med prečnimi profili je bila s ponderiranjem upoštevana v izračunu povprečne spremembe rečnega dna celotnega odseka.

Na nekaterih odsekih je dno v skladu z zadnjo meritvijo leta 2018 globlje kot kdajkoli; erozija se je spet pojavila tudi v prečnem profilu 114,840 in je z globino 1,20 m (spet ugotovljeno s prečnim prerezom) pod primerjalno višino leta 1974 dosegla točko, ki še nikoli ni bila tako nizka.



Slika 23. Povprečna sprememba rečnega dna v profilih, prikazana po dolžini toka za celotno obdobje od leta 1974, vključno z razvojem po začetku izvedbe večjih ukrepov v letu 2006.

To pomeni, da se je zmanjšala tudi razdalja do terciarnih plasti s finejšo zrnavostjo. Če ne bo nasprotnih ukrepov, je treba v bližnji prihodnosti računati s popolno izgubo prodnatega sloja. Po preboju dna, torej po preboju do terciarnih plasti zaradi erozije dna, grozi močna erozija odvisno od upora proti eroziji. V reki Salzach je preboj dna povzročil erozijo dna v obsegu nekaj metrov med enim poplavnim dogodkom (Hengl, 2004).



Slika 24: Razvoj rečnega dna v prečnem profilu ob rkm 114,840 do meritve leta 2018, kjer je razdalja do terciarnih plasti majhna.

3.6. Analiza vzroka in učinka

Ugotovitve, ki smo jih razbrali iz razvoja mejne Mure pred izvedbo ukrepov in po njej, bodo še raziskane glede povezav z okvirnimi pogoji rečne morfologije.

3.6.1. Osnove

3.6.1.1. Osnove o premeščanju rinjenih plavin

Strižna napetost τ se v enakomernih strugah pod stacionarnimi pogoji lahko izračuna na podlagi naslednje formule:

$$\tau = \rho g R I \quad \text{enačba (1)}$$

Pri tem so ρ gostota vode, g gravitacijski pospešek na površju Zemlje, R hidravlični radij in I naklon struge. Hidravlični radij se izračuna z

$$R = \frac{A}{U} \quad \text{enačbo (2)}$$

Pri tem sta A prečna površina pretoka in U omočen obod. V širokih strugah, kot je struga Mure, se R približuje vrednosti globine vode.

Pokazalo se je, da smo premeščanje rinjenih plavin lahko izračunali na podlagi strižne napetosti. Strižna napetost je vključena tudi v formuli Wonga in Parkerja (2007), tako kot v skorajda vseh običajnih formulah za premeščanje rinjenih plavin:

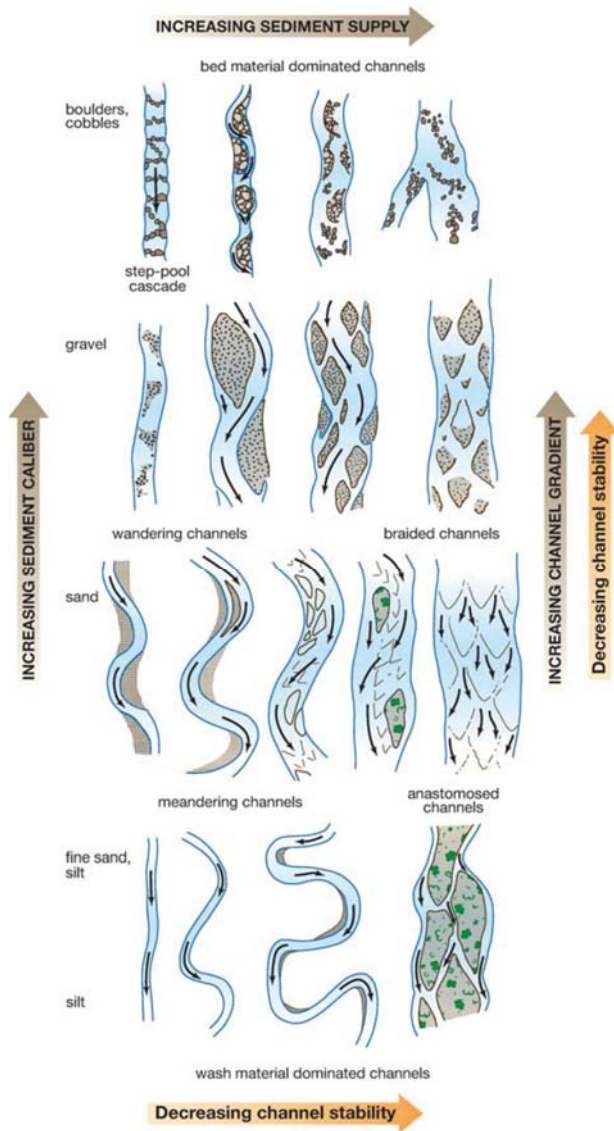
$$q_b = 3.97 \sqrt{\frac{\rho_s - \rho}{\rho} g d^3} \left[\frac{\tau}{(\rho_s - \rho) g d} - 0.0495 \right]^{\frac{3}{2}} \quad \text{enačba (3)}$$

Pri tem so q_b premeščanje rinjenih plavin na m širine struge, ρ_s gostota sedimenta in d premer zrn. Pomemben je tudi eksponent, ki skrbi za eksponentno rast premeščanja rinjenih plavin ob naraščajoči strižni napetosti.

Na podlagi tukaj izkazane odvisnosti strižne napetosti od globine vode in od naklona sta ta parametra odločilnega pomena za premeščanje rinjenih plavin in ju je treba upoštevati pri razvoju tipov ukrepov v okviru projekta goMURra.

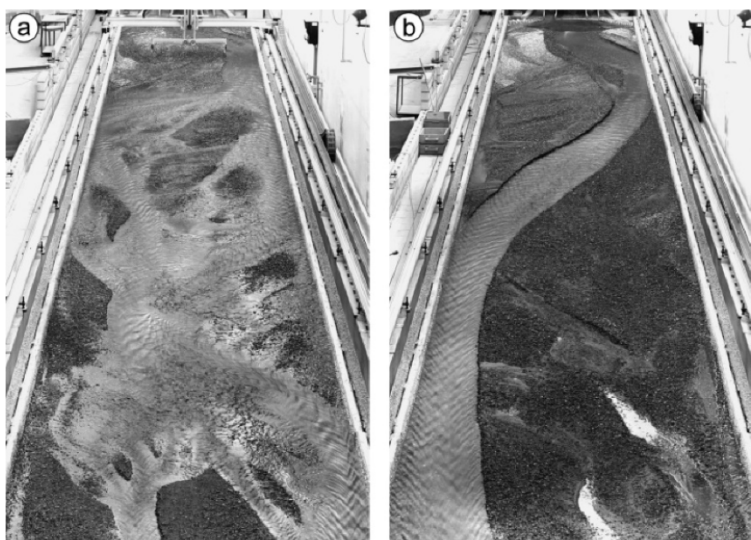
3.6.1.2. Osnova glede medsebojnega vpliva med vnosom proda in morfologijo

Schumm (1985) in Church (2006) sta na podlagi opazovanj ugotovila povezave med količino sedimenta, zrnastostjo in morfologijo. V skladu z njunimi opazovanji je nastala morfologija močno odvisna od vnosa proda. Za reko, ki si strugo lahko oblikuje v lastnih naplavinah (aluvialu), pomeni večji vnos proda širšo strugo in (ali) močnejšo vijugavost ter močnejšo težnjo po razdelitvi v več rokavov (Slika 25).



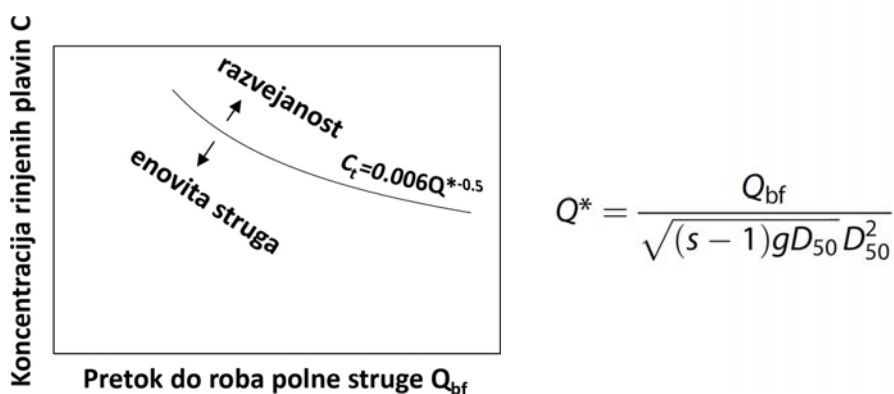
Slika 25. Odvisnost morfologije in stabilnosti od količine vnosa proda in velikosti zrn (Church, 2006)

Nasprotno pa se širina struge in bočna dinamika močno zmanjšujeta, če se zmanjšuje vnos proda. Marti in Bezzola (2009) sta to morfološko povezavo v laboratorijskem preizkusu potrdila (Slika 26).



Slika 26. Razvoj razvejane struge z več rokavi v ozek kanal po zmanjšanju vnosa proda (Marti in Bezzola, 2009)

Mueller in Pitlick (2014) sta ugotovila odvisnost morfologije od koncentracije rinjenih plavin. Reke z znano prodnostjo sta razvrstila glede na morfologijo. Na ta način sta lahko opredelila mejno vrednost za prehod od struge z enim rokavom do struge z več rokavi (Slika 27). Mejna vrednost je odvisna od pretočnosti struge (pretoka, ko gladina doseže rob struge).



Slika 27. Odvisnost morfologije od koncentracije rinjenih plavin po Muellerju in Pitlicku (2014). Q_{bf} je pretočnost (pretok do roba struge), Q^* je brezdimenzijski pretok, s = je specifična gostota sedimenta (ρ_s/ρ) in D_{50} je mediana premera zrn. Koncentracija rinjenih plavin C se izračuna iz relacije med volumenskim premeščanjem rinjenih plavin ob pretoku do roba polne struge in pretokom polne struge. C_t je koncentracija rinjenih plavin na prehodu med strugo z enim in več rokavi.

3.6.2. Prenos osnov in ugotovitev na mejno Muro

Vloga globine vode in padca na premestitveno zmogljivost je bila že upoštevana v Načelni vodnogospodarski zasnovi. V skladu s tem smo že takrat raziskali potencial obojega, torej zmanjšanja padca zaradi podaljšanja toka in zmanjšanja globine vode s širitvijo struge. Vendar takrat še ni bil znan majhen bočni erozijski pritisk, ki se bo pojavil po odstranitvi obrežnih zavarovanj.

Vnos sedimenta pri Gosdorfu skoraj izključno izvira iz erozije dna na gorvodnem odseku, tako da je koncentracija rinjenih plavin tam zelo majhna. Temu primerno je tudi širitveni pritisk zelo majhen. Ker se pa pričakovana širitev na podlagi lastne dinamike ni pojavila, ukrep ni mogel pokazati svojega učinka stabilizacije rečnega dna. Šele pri večjem vnosu bi se lahko izoblikovala

prodišča, ki bi pretok bočno odvrnila in s tem povečala bočno erozijo. Ravni potek struge na odseku širitve pri Gosdorfu, v katerem se pretok ne koncentrira vzdolž bregov, je položaj še zaostrel. Da bi se struga širila do polne širine, razpoložljive na odseku z omejeno dolžino, bi morali ustvariti popolnoma vijugasto strugo.

Ukrep, ki je bil izveden v okolici Radkersburga/Radgone pri vasi Sieldorf/Žetinci, je bil podvržen drugim okvirnim pogojem. Na eni strani je pridobila zaradi sedimenta, ki je prihajal iz erozije dna celotnega odseka in ki je bil vnesen na ta odsek skupaj z vnosom proda z odsekov ukrepov. Ukrivljeni tok je pospešil erozijo zunanjega brega in vnesen sediment je na notranjem bregu tvoril prodišče, ki je zaradi svojega obsega povzročilo nadaljnjo erozijo na zunanjem bregu.

Prod, ki je bil vnesen v mejno Muro v okviru ukrepov, je kazal zelo visoke hitrosti premeščanja, kar pomeni kratek zadrževalni čas rinjenih plavin v mejni Muri, kar spet nakazuje majhen obseg izmenjave rinjenih plavin s strugo. Tudi hitrost premeščanja rinjenih plavin je odvisna od strižne napetosti. Zmanjšanje strižne napetosti ob hkratnem povečanem vnosu bi to hitrost premeščanja rinjenih plavin znižalo in privedlo do več bočne in vertikalne izmenjave sedimenta, zaradi česar bi se podaljšal zadrževalni čas sedimenta na odseku.

3.7. Izpeljana nujnost ukrepanja

Merjeni delež erozije na dnu mejne Mure in vedenje o majhni debelini prodnega sloja kažeta na nujnost ukrepanja. Izguba prodnega sloja v povezavi z možnostjo preboja dna bi bila z več ekoloških in tehničnih vidikov katastrofalen pojav. Pogoji za obnovo z ekološko usmerjenimi ukrepi bi bili zaradi enormne izgube volumna sedimenta zelo oteženi. Upoštevati je treba, da erozija dna do morebitnega preboja dna ni računski, neprekinjeni proces, temveč da je to odvisno od hidrologije naključnih dogodkov. Naslednji večji dogodek že lahko povzroči obsežne spremembe.

Povzetek ugotovitev ob mejni Muri kaže, da morajo prihodnji ukrepi vsebovati velike spremembe toka in širitve struge, katere dinamično morfologijo je treba ohraniti z zadostnim vnosom proda.

4. PREDHODNA OCENA POTREBNIH POVRŠIN

Poleg velikosti zrna materiala rečnega dna sta širina struge in padec ključna parametra za zmanjšanje strižne napetosti in premestitvene zmogljivosti rinjenih plavin in s tem za stabilizacijo dna (dodatno vlogo igrajo bočno premeščanje rinjenih plavin, bočna erozija, oblike dna in hrapavosti itd.). V tem poglavju bomo ocenili širino struge in padec, ki sta potrebna za ustvarjanje dinamičnega ravnovesja, za zmanjšanje poglobljanja dna in za naravno morfologijo ter za odgovor na vprašanje, katero širino bi reka sploh sprejela. Za dimenzioniranje širitve struge sta Habersack in Klösch (2012) navedla štiri pristope:

- analizo zgodovinskih kart,
- teoretične pristope glede sedimentnega režima,
- inženirske računske metode,
- numerične simulacije.

Z numeričnimi simulacijami v predmetnem projektu je treba podrobno preveriti funkcionalnost različic ukrepov. Za prvo splošno oceno potrebnih površin in za izpeljavo različic ukrepov se uporabljajo preprostejši pristopi.

4.1. Analiza zgodovinskih kart

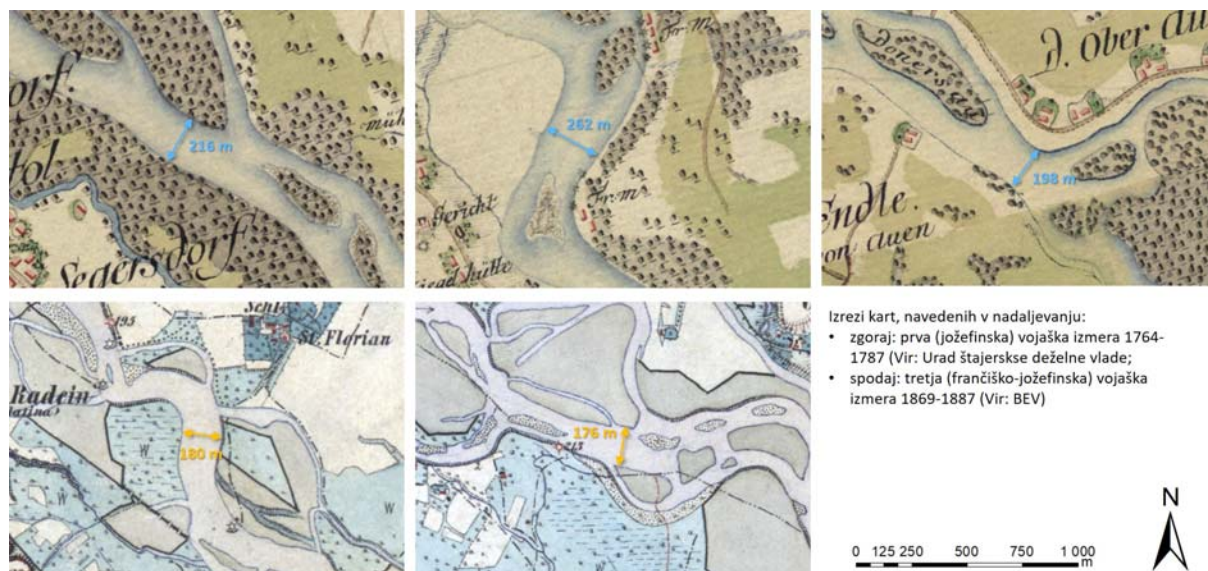
Analiza zgodovinskih kart glede morfoloških parametrov in parametrov, relevantnih za premeščanje rinjenih plavin, je bila izvedena že v okviru Načelne vodnogospodarske zasnove (Slika 6). V skladu s to analizo je bila Mura v zgodovinskem stanju široka do 1200 metrov (Habersack et al., 2001b). Take širine so bile mogoče na odseku med Mureckom/Cmurekom in Radkersburgom/Radgono, kjer Mura po klasifikaciji Nansona in Knightona (1995) najbolj ustreza morfološkemu tipu reke, ki je bočno aktivna, prepletena in razvejana in ima stranske rokave (»laterally active, braided anabranching river«). Tako morfologijo zaznamuje razdelitev pretoka zaradi visoko ležečih poraščanih otokov v več rokavov, ob hkratnem razvejanju v posameznih strugah zaradi mlajših prodišč. Zanj je značilna visoka bočna dinamika.

Habersack in Schneider (2000) sta zgodovinske karte analizirala glede izbranih rečnomorfoloških parametrov in sta pridobljene vrednosti primerjala s stanjem v letu 1999, ki se od današnjega stanja neznatno razlikuje. Ob tem se je posebej za odsek med Mureckom/Cmurekom in Radkersburgom/avstrijsko Radgono kazala močna redukcija širin premeščanja struge (razmerje omočene širine do širine premeščanja struge se je povečalo s srednje vrednosti pribl. 0,47 na vrednost 1,00), močno povečanje polmerov (s pod 400 m na skoraj 3000 m) ter redukcija števila strug z do sedmih vzporednih strug na eno samo strugo (Preglednica 3).

Preglednica 3. Primerjava izbranih rečnomorfoloških parametrov za odsek med Mureckom in Radkersburgom (Habersack in Schneider, 2000)

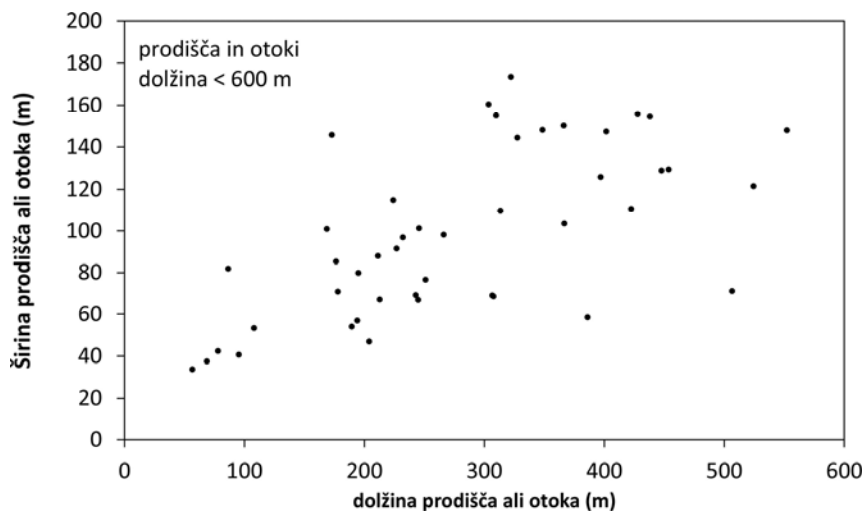
Leto	Širinsko razmerje (omočena širina/širina premeščanja struge)			Polmeri (m)			Število strug		
	1817	1876	1999	1817	1876	1999	1817	1876	1999
Maksimum	1,00	1,00	1,00	905	909	4457	do 7	2–4 (5)	1
Minimum	0,21	0,18	1,00	109	83	1592			
Povprečje	0,47	0,52	1,00	379	348	2847			
Standardni odklon	0,21	0,29		190	188	996			

Raziskave Habersacka in Schneiderja (2000) so bile dopolnjene z meritvami maksimalno omočenih širin. To je skupaj z drugimi izvedenimi analizami prispevalo k definiciji najmanjše širine, od katere naprej se lahko računa z razvejanjem reke zaradi izoblikovanja prodišč. V manj podrobni prvi vojaški izmeri (jožefinski izmeri) iz obdobja 1764–1787 so merili omočene širine do 262 m (Slika 28). Podrobnejša druga vojaška izmera je bolj izpovedna. Tam so največje širine mejne Mure znašale do 180 m. Ne poznamo pa pretoka, ki je prevladoval v obdobju kartiranja, prav tako nam ni znano, kako je ta pretok vplival na kartiranje prodišč.



Slika 28. Oseki na zgodovinskih kartah odseka mejne Mure (slika levo spodaj se nanaša na stanje dolvodno od mejne Mure pri Radencih) z velikimi širinami stalno omočene struge

Dodatno smo na podlagi prve vojaške izmere ugotovili informacije o dolžinah in širinah prodišč in otokov, ki so bili vključeni v ciljno stanje in uporabljeni v modelu »Widest«. Za dolžine do 600 m se je pokazalo širinsko in dolžinsko razmerje v obsegu ok. 1 : 5 (Slika 29).

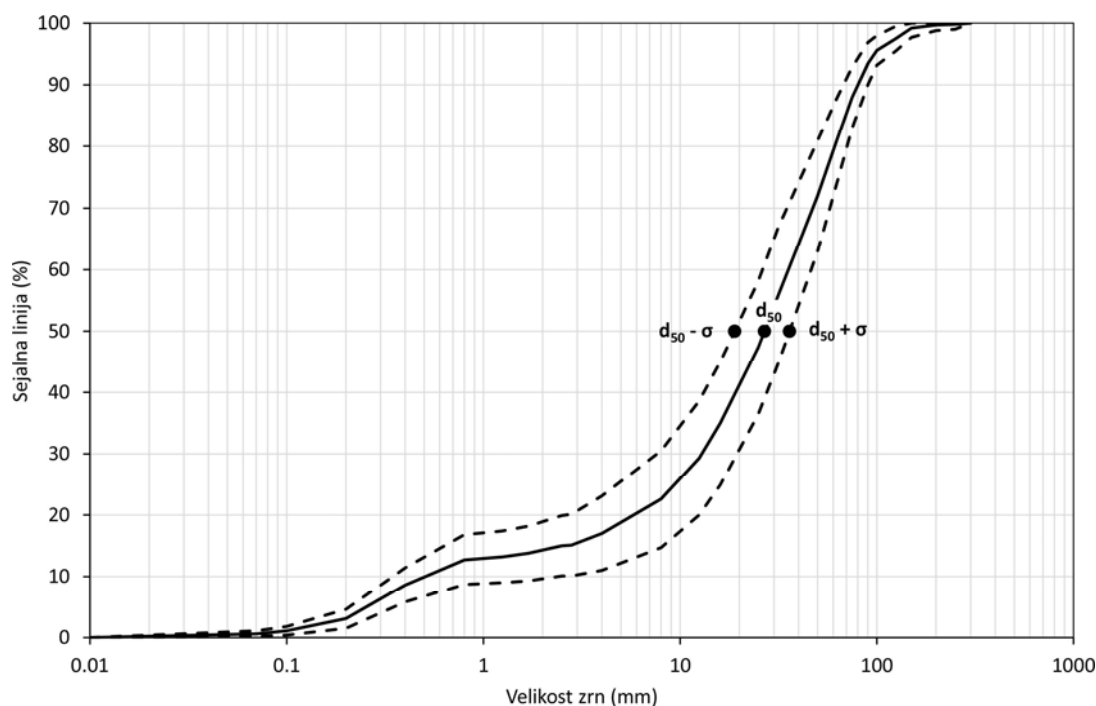


Slika 29. Dolžine in širine prodišč in otokov za dolžine pod 600 m ob mejni Muri v skladu s prvo vojaško izmero (jožefinsko izmero) (1764–1787)

4.2. Teoretični pristopi glede sedimentnega režima

Taki teoretični pristopi uporabljajo merjene lastnosti naravnih rek, ki niso bile regulirane in ki so glede sedimentnega režima v ravnotežju (ni agradacij ali poglobljanja). Uporabljajo se tudi kontrolirani pogoji laboratorijskih poskusov, da bi ugotovili povezave med morfološko relevantnimi vrednostmi. Pri tem se povezujejo lastnosti, kot so pretočnost struge, širina, globina in zrnavost ter iz teh izpeljane empirične formule, na podlagi katerih se lahko izračuna določena širina.

Vsem uporabljenim metodam je skupno, da morata biti podani reprezentativna velikost zrn in pretok kot vhodna parametra. Kot velikost zrn smo predpostavili d_{50} (mediana zrnovostne sestave) vzorcev iz Načelne vodnogospodarske zasnove. Ob tem smo izbrali podatke srednje krivulje zrnivosti volumetrijskih vzorcev izkopov iz tematskega področja 1.6 (Hengl et al., 2001) Načelne vodnogospodarske zasnove, kjer smo iz zrnovostne sestave izračunali tudi standardni odklon zrnovostne sestave (Slika 30). Mediana d_{50} te zrnovostne sestave znaša torej 26,9 mm oz. 18,9 mm in 36,0 mm z odbitkom/s seštevkom standardnega odklona. Te tri vrednosti uporabljamo v naslednjih izračunih.



Slika 30. Srednja krivulja zrnivosti volumetrijskih vzorcev izkopov izvedenih v okviru Načelne vodnogospodarske zasnove (Hengl et al., 2001)

Dodatno smo v skladu s priporočili Biedenhama et al. (2000) ocenili strugotvorni pretok. Avtorji priporočajo, da se za strugotvorni pretok uporablja a) pretok do roba polne struge (pretočnoat struge) ali b) poplave z določeno povratno dobo (pretok med MJHQ in poplavo s petletno povratno dobo HQ5) ali c) da se izračuna efektivni pretok, ki premešča pretežni del rinjenih plavin. Za mejno Muro je na voljo dovolj podatkov, da se uporabljajo vse tri metode. Ker pa potrebujemo pretok za naravnejšo morfologijo, se zdajšnji geometrijski podatki regulirane ali samo malo razširjene struge ne morejo uporabljati za ocenjevanje pretoka. Pretok do roba polne struge zaradi poglobljanja ne ustreza naravni strugi in efektivni pretok bi bil za regulirano strugo premajhen, ker bi bila kritična strižna napetost zaradi ozke struge že pri majhnih pretokih presežena. Iz tega razloga smo za analize uporabili metodo za ocenjevanje strugotvornega pretoka, ki je neodvisna od geometrije struge: visokovodni pretok z določeno povratno dobo. V analizah smo uporabili pretoke, ki so na robu spektra, ki ga omenja Biedenhama (2000): MJHQ (to je ob mejni Muri na vodostaju Mureck/Cmurek pretok v obsegu $721 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) in HQ₅ ($1000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ na vodostaju Mureck/Cmurek).

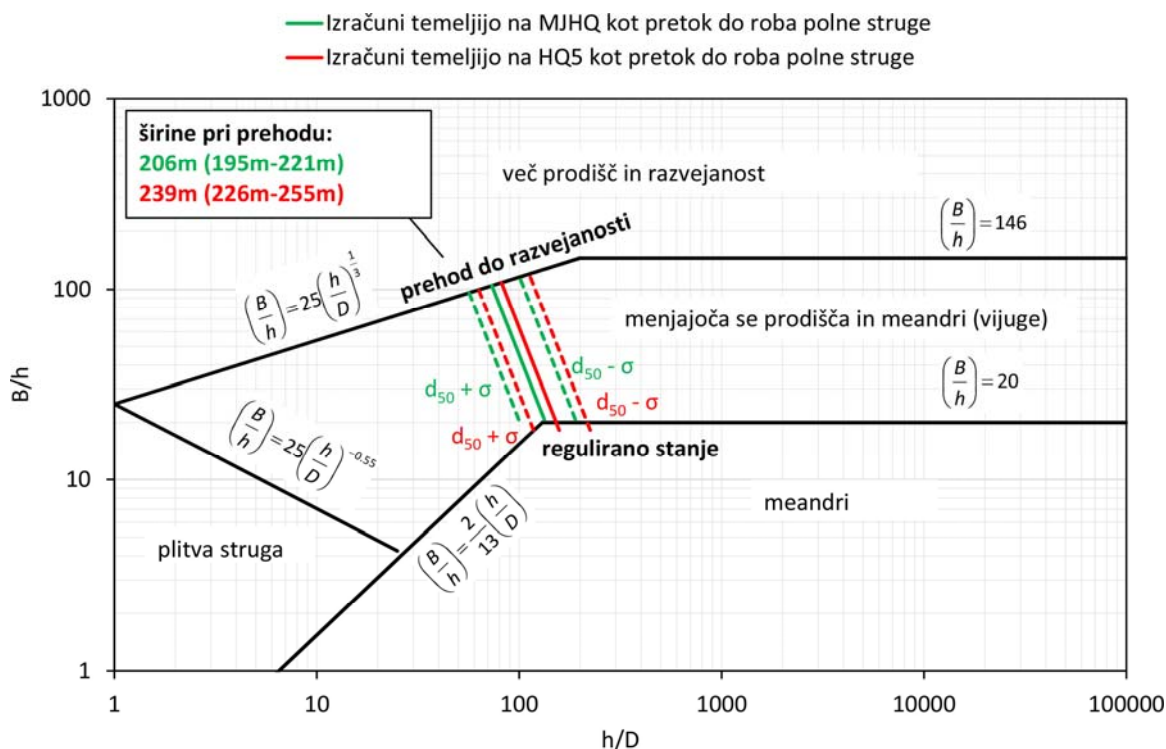
4.2.1. Diagram Da Silva (Da Silva, 1991; Ahmari in Da Silva, 2011)

Da Silva (1991) je preverila povezave med razmerjem širine/globine in razmerjem globine/premerom zrn z vsakokratno obstoječo morfologijo reke. V tej zvezi je v diagramu razlikovala različne morfologije neke reke in je meje opredelila z ustreznimi formulami. Ahmari in Da Silva (2011) sta diagram še izpilila.

Na podlagi preprostega izračuna v trapezni strugi sta izračunala globino vode za različne širine dna in vnesla vrednosti za razmerje med globino vode h in premerom zrn d ter za razmerje med širino B in globino vode. To raziskavo sta izvedla za MJHQ ($721 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) in za HQ₅ ($1000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) ter za tri različne velikosti zrn, da bi ugotovili občutljivost v zvezi s tem. Potem sta raziskala, kakšna naj bi bila širina struge, da bo morfologija prešla v področje diagrama z mnogimi prodišči in rokavi, ker je bila lastnost razvejanosti v več strug bistvena lastnost mejne Mure v zgodovini.

Zdajšnje, regulirano, stanje Mure je bilo odvisno od uporabljenega pretoka in od uporabljene velikosti zrn na področju diagrama meandrov in na področju diagramov spreminjajočih se prodišč (Slika 31). Da se izravnana, regulirana Mura deloma razvršča kot meandrirajoča reka, je povezano z dejstvom, da so se področja diagrama izpeljala izključno na podlagi podatkov naravnih rek in da razmerje med širino in globino v regulirani reki lahko ustreza tem razmerjem v meandrirajoči reki.

V primeru povečanja širine struge se spremeni tudi globina vode, zaradi česar so se vnosi v diagram premaknili na področje levo zgoraj. Ob uporabi MJHQ kot strugotvornem pretoku bo mejna Mura prestopila prag do razvejane morfologije ob širini 206 m in ob velikosti zrn 26,9 mm (oz. 195 m ob uporabi za standardni odklon povečane vrednosti velikosti zrn in 221 m ob uporabi za standardni odklon zmanjšane vrednosti velikosti zrn). Ob uporabi petletne poplave HQ₅ kot strugotvornega pretoka bo mejna Mura prestopila prag do razvejane morfologije ob širini 239 m in ob velikosti zrn 26,9 mm (oz. 226 m ob uporabi za standardni odklon povečane vrednosti velikosti zrn in 255 m ob uporabi za standardni odklon zmanjšane vrednosti velikosti zrn). Upoštevati je treba, da je reprezentacija prečnega profila v trapezni strugi ob večjih širitvah omejena, ker pride v naravnem stanju do agradacij in poglobitev, ki povzročijo nekoliko odstopajočo globino vode, kar bi pripeljalo do odstopajočih rezultatov. V razširjeni strugi, ki je v dinamičnem ravnovesju, pričakujemo tudi manjše velikosti zrn kot v regulirani strugi. To se lahko upošteva za standardni odklon zmanjšane velikosti zrn. V zvezi s tem izstopa dejstvo, da izpeljane širine za prehod Mure od ene struge do razvejane struge približno ustrezajo največjim širinam posameznih strug, ki jih vidimo na zgodovinskih kartah (Slika 28). Izpeljana širina je najmanjša širina, ki je potrebna za razvejanost. Da bi dobili morfologijo, ki ustreza naravni strugi, so potrebne večje širine. Treba je upoštevati, da vnos proda pri tem ni upoštevan, da pa je predpogoj za razvejanost struge.



Slika 31. Diagram Da Silva z vnesenimi potmi Mure od sedanjega, reguliranega stanja prek povečanja širine do začetka razvejanja

4.2.2. Napovednik prodišč («river bar predictor») (Crosato in Mosselman, 2009)

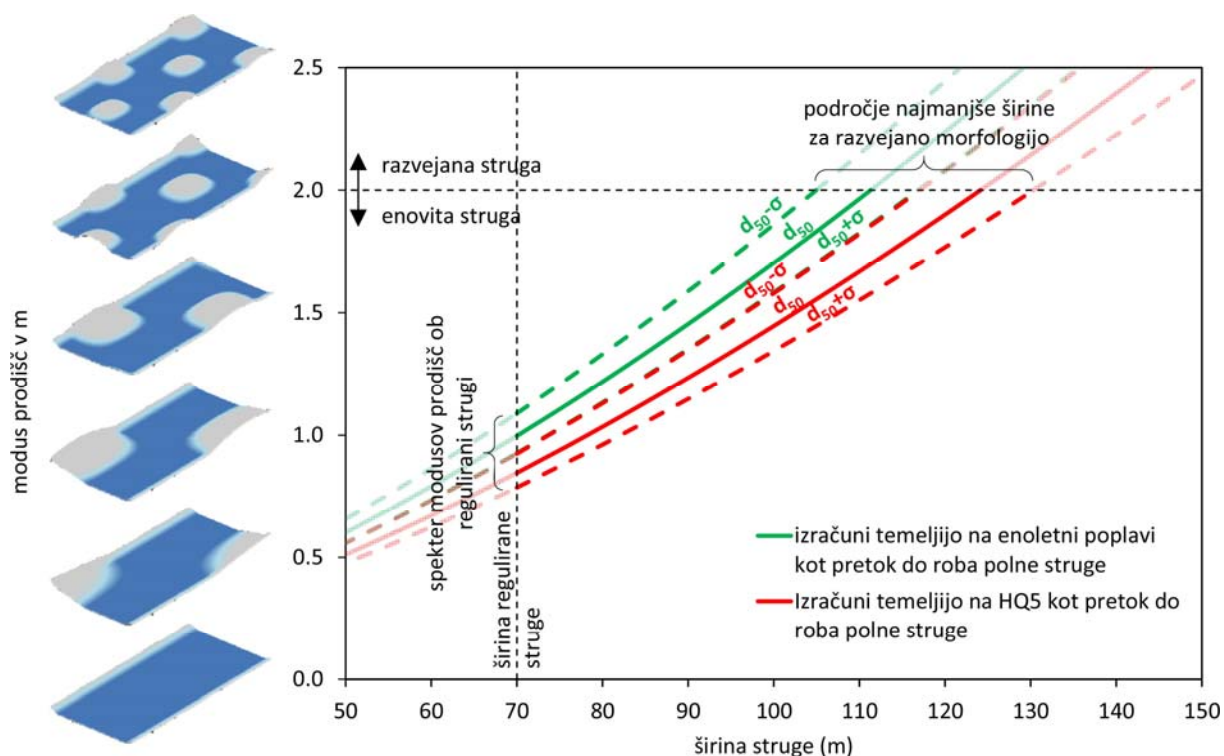
Crosato in Mosselman (2009) sta razvila preprost linearni model na fizikalni podlagi za napovedovanje števila prodišč v prečnem prerezu reke, ki se razvijejo ob določeni širini struge pod pogojem dinamičnega ravnotežja sedimentnega režima. Izbrana širina naj ne bi presegla največje možne naravne širine. Model tudi zaradi linearnega značaja ni primeren za razmerja med širino in globino, ki so večja od 100 (taka razmerja so zaradi velike globine vode strugotvornega pretoka le redko dosežena). V modelu se izračuna modus m prodišč, ki opiše število prodišč v prečnem prerezu:

$$m^2 = 0.17g \frac{(b-3)}{\sqrt{\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} D_{50}}} \frac{B^3 i}{C Q_w} \quad \text{enačba (4)}$$

Pri tem je m število prodišč v prečnem profilu (vendar upoštevajte naslednje slike in tabelo), g je pospeševanje na površini zemlje (m s^{-2}), b je stopnja nelinearnosti premeščanja plavin proti srednji hitrosti toka (predlagana je vrednost 4 za b v peščenih strugah in vrednost 10 v prodnatih strugah), B je širina reke (m), i je padec, ρ_s gostota trdnih snovi, ρ_w gostota vode, D_{50} mediana velikosti zrn struge, C Chézyjev koeficient ($\text{m}^{(1/2)}\text{s}^{-1}$) in Q_w pretok (m^3s^{-1}).

Chézyjev koeficient hrapavosti t je bil pri tem izračunan s Stricklerjevo vrednostjo iz rezultata računa.

Napovednik prodišč («river bar predictor») dodeli aktualnemu reguliranemu stanju modus prodišč v višini 0,8, kar bi v primeru dinamičnega ravnotežja ustrezalo manj izrazitim, spreminjajočim se prodiščem (Slika 32). Modus velikosti 2, pri katerem se izoblikujejo prodišča na sredini reke, bi bil verjeten ob uporabi MJHQ kot strugotvornega pretoka od širine 111 m, ob uporabi petletne poplave HQ₅ kot strugotvornega pretoka bi bil verjeten od širine 124 m (oba rezultata z d_{50} od 26,9 mm). Obe vrednosti sta relativno majhni, če upoštevamo možne širine v zgodovinskem stanju in velike širine, ki sledijo z uporabo diagrama Da Silva, ki je v praksi priznan. Sprememba velikost zrnca za vrednost standardnega odklona širine spremeni samo za ok. 5 %. Ob tem pa ni jasno, kako visoko štrlijo prodišča iz vode, če dosežejo modus velikosti 2 in če razdelijo tudi večje pretoke.



Slika 32. Izračun modusa prodišč, ki opiše morfologijo v skladu z napovednikom prodišč («river bar predictor») za različne širine struge.

4.2.3. Režimska enačba (Parker et al., 2007)

Režimske enačbe ustvarjajo razmerje med pretokom, plavinami in morfološki velikostmi; tako se na primer opiše povprečna širina reke kot funkcija pretoka in velikosti zrnca. Enačbe se empirično izpeljejo iz podatkovnih zbirk. Pri tem se upoštevajo podatki naravnih rečnih sistemov, ki velikokrat izvirajo iz meritev pred izvedbo gradbenih ukrepov ob vodotokih. Dodatno je treba upoštevati, da se te režimske enačbe izpeljejo samo iz rek z enovito strugo in da so zato v omejenem obsegu primerne za mejno Muro.

Z enačbami enačba (5), (6) in (7), katerih avtorji so Parker et al. (2007), lahko ocenjujemo globino vode, širino in padec zgolj na podlagi znanega pretoka in velikosti zrnca.

$$H_{bf} = \frac{0.382}{g^{1/5}} Q_{bf}^{2/5} \quad \text{enačba (5)}$$

$$B_{bf} = \frac{4.63}{g^{1/5}} Q_{bf}^{2/5} \left(\frac{Q_{bf}}{\sqrt{g D_{S50} D_{S50}^2}} \right)^{0.0667} \quad \text{enačba (6)}$$

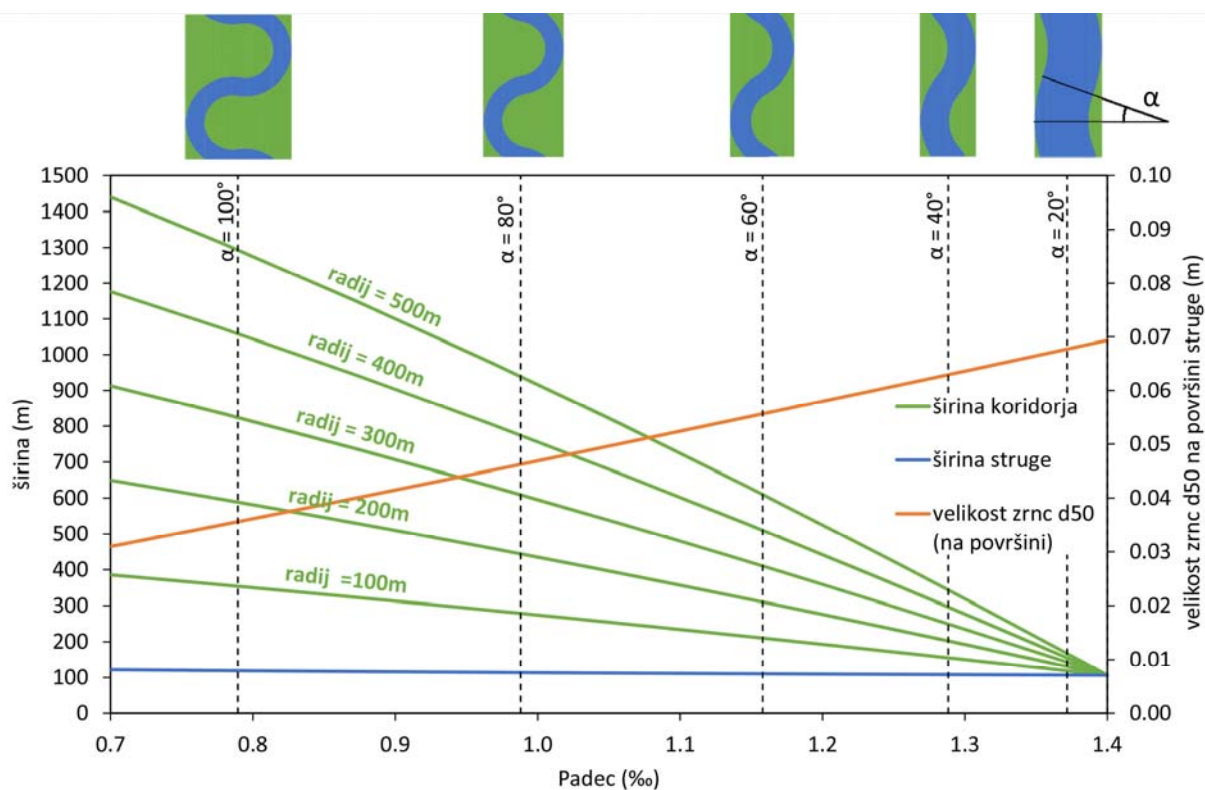
$$S = 0.101 \left(\frac{Q_{bf}}{\sqrt{g D_{S50} D_{S50}^2}} \right)^{-0.344} \quad \text{enačba (7)}$$

Ob tem je H_{bf} globina voda ob pretoku do roba polne struge, B_{bf} širina pretoka do roba polne struge, S padec, Q_{bf} pretok do roba polne struge, g pospeševanje na površini zemlje in D_{S50} mediana velikosti zrn na površini struge.

Upoštevati je treba, da Parker et al. (2007) uporabljajo mediano plavin *na površini* struge. Vendar je nejasno, s katero metodo je bila določena velikost zrn v Parker et al. (ibid.); hkrati je v Načelni vodnogospodarski zasnovi na voljo zelo majhno število analiz linijskih vzorcev. Zato smo analizo izvedli za celoten spekter možnih velikosti zrn.

Preden smo metodo uporabili za širši spekter vhodnih podatkov, smo sprva poskusili pripraviti primerjavo z zgodovinskim stanjem. Padec v obsegu 1,1 ‰, ki ustreza približno padcu zgodovinskega stanja, se doseže z enačbo (7) ob pretoku petletne poplave HQ₅ z izbranim premerom D_{S50} 52,4 mm. Z uporabo enake velikosti zrn in z enakim pretokom v enačbi (6) pa dobimo samo širino 112 m, kar podcenjuje širino naravnega stanja. Hkrati dobimo nerealistično veliko globino vode (3,83 m), ki ni veliko manjša kot zdajšnja globina (srednja vrednost v prečnih profilih leta 2018 ok. 4,34 m), kljub poglobljanju dna. Če poskusimo računati tudi s pretokom do roba polne struge v obsegu 721 m³ s⁻¹ (HQ₁), moramo izbrati premer zrn na površini v obsegu 46 mm, da bi dosegli padec v obsegu 1,1 ‰, pri čemer je širina struge potem 114 m. Tudi ta vrednost se zdi premajhna v primerjavi s širinami na zgodovinskih kartah. Režimska enačba po Parkerju et al. se zdi zaradi izpeljave iz rek s samo eno strugo neustrezna, in dobljene širine niso orientacijske vrednosti za ukrepe.

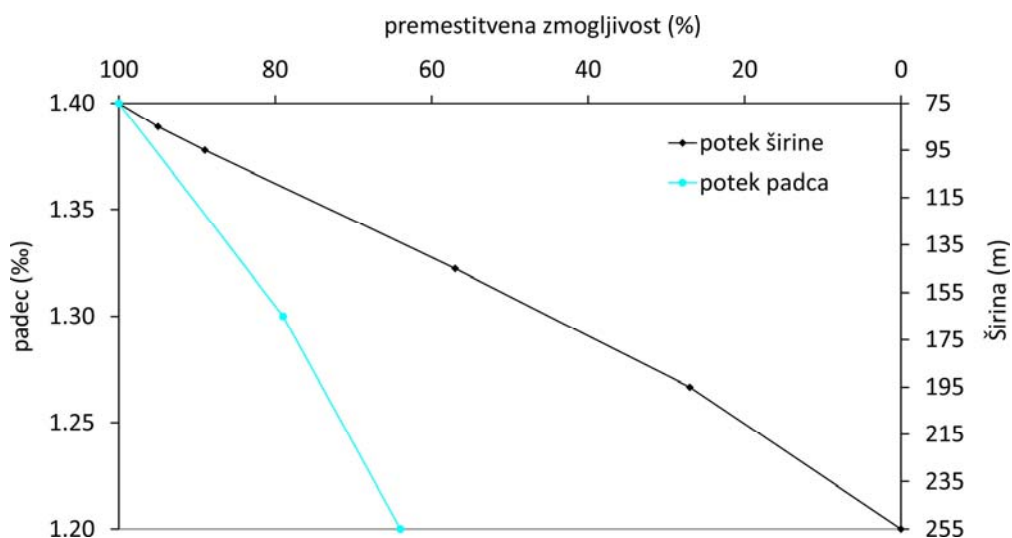
Zmanjšanje padca na zgodovinsko vrednost pribl. 1,1 ‰ bi lahko bilo doseženo samo z bolj vijugastim tokom, ki potrebuje določeno širino koridorja. Širina takega koridorja je bila izračunana za različne padce in polmere. Slika 33 kaže, kako se poveča potreben koridor z zmanjšanjem padca in s povečanjem radija. Mediana radijev v sredinskem odseku mejne Mure je znašala pribl. 300 m. Širina koridorja za upoštevanje tamkajšnjega, zgodovinskega, padca 1,1 ‰ (padca, ki je bil prisoten na sredinskem odseku), bi morala biti 469 m. To je najmanjša vrednost, ker smo tukaj razporedili krožne loke po vrsti, medtem ko je polmer v naravi veljal samo za teme meandra. V tej analizi smo za izračun širine struge uporabili petletno poplavo HQ₅ kot nadomestilo za strugotvorni pretok.



Slika 33. Širina koridorja, ki je rezultat širine struge, padca in polmerov krivine. α opiše odklonski kot na prelomnici. Velikost zrnca na površini struge je rezultat obratne uporabe režimske enačbe.

4.3. Inženirske računske metode

Po inženirskih računskih metodah se običajno uporablja prečni profil, da bi lahko ocenili učinek večje širine struge na premeščanje plavin po širitvi. Habersack in Schneider (2000) sta v že izvedenih raziskavah za Načelno vodnogospodarsko zasnovo primerjala učinek podaljšanja poteka toka z učinkom širitve struge na premestitveno zmogljivost. Znotraj prostorskih možnosti je učinek širitve struge močnejši (Slika 34).

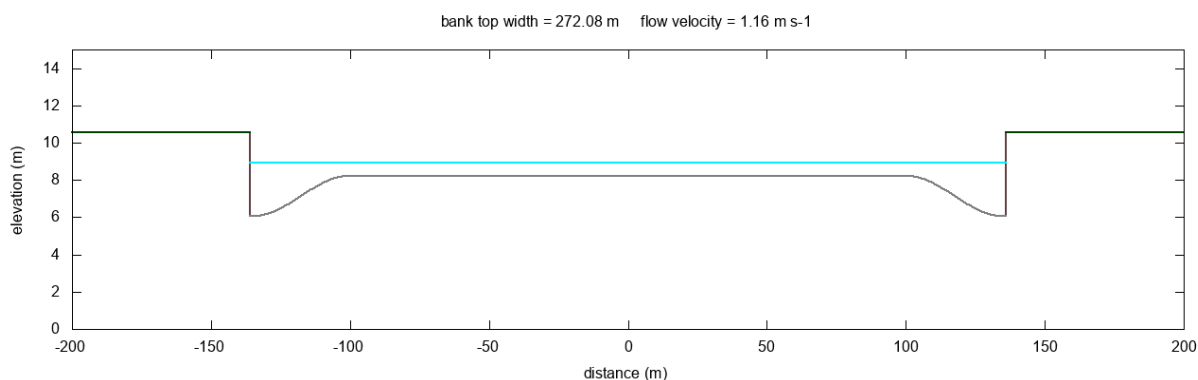


Slika 34. Odvisnost premestitvene zmogljivosti od padca in širine mejne Mure (po Habersacku in Schneiderju, 2000).

Za širitev struge znotraj modela se v poenostavljenih inženirskih obravnavah prečni profili zgolj podaljšajo z vrinjanjem vodoravnih odsekov ali se prečni profil na splošno prikaže s poenostavljeno geometrijo, na primer s trapezom. Ob tem se zavestno spregledajo agradacije, ki povzročajo neenakomerno geometrijo in s tem neenakomerno prečno porazdelitev strižnih napetosti.

Klösch et al. (2019) so z modelom »widest« razvili inženirsko obravnavo, ki prikazuje nastajanje prodišča v obliki funkcije kosinusa in izračuna bočno erozijo odvisno od nastalih strižnih napetosti. Ob tem se upoštevajo morfološki učinki, ki jih ugotavlja Hunzinger (1998) v laboratoriju, ter se posnemajo interakcijski procesi med nastajanjem prodišč in bočno erozijo, ki so jih Klösch et al. (2015) opazili med pretočnimi dogodki. Da bi dobili vrednosti za parametre bočne erozivnosti, smo uporabili razmerje med pretokom in bočno erozijo za ravnem odseku pri kraju Gosdorf, ki so ga Habersack et al. (2013) izpeljali iz meritev. Z dvodimenzionalnim hidrodinamičnim modeliranjem smo ugotovili strižne napetosti v bližini obrežij, tako da smo končno lahko izpeljali kritično strižno napetost za začetek erozije in koeficient erozivnosti iz relacij med strižnimi napetostmi in erozijskimi hitrostmi. Ob tem je treba upoštevati, da je razmerje, ki so ga ugotovili Habersack et al. (2013), temeljilo zgolj na nekaterih podatkovnih točkah. Predvsem ugotovljena kritična strižna napetost je bila izpeljana iz zelo majhnih sprememb bregov, ki bi lahko bile izraz merilne negotovosti.

Če bi vnos proda gorvodno ustrezal premestitveni zmogljivosti v regulirani strugi, potem bi se širina v renaturiranem odseku v desetih letih povečala z 72 na 272 m (Slika 35). V tej analizi smo izhajali iz razmerja dolžine do širine prodišč in otokov v obsegu 5, tako kot smo to ugotovili na zgodovinski karti prve vojaške izmere (Slika 29). Upoštevati je treba, da je izpovednost tega modela ob zelo močnem povečanju širine omejena, (1) ker bi se lahko od določene širine razvilo več kot zgolj eno prodišče, in (2) ker bi se širina potem razvila tudi nesimetrično (porazdelitev pretoka bi bila različna na obeh straneh, prav tako nastajajoča morfodinamika). Ob tem je treba poudariti, da se bočna erozija pojavi zgolj v primeru delujočega vnosa proda.



Slika 35. Prikaz prečnega profila čez deset let po modelu »widest« po renaturaciji bregov ob vnosu proda v skladu z zmogljivostjo premeščanja rinjenih plavin v gorvodnem odseku, ki je ostal reguliran.

4.4. Ocena potrebne dolžine

Renaturacijski odsek potrebuje najmanjšo dolžino zato, da reka z morfološkega vidika dejansko sprejema razpoložljivo širino. Hunzinger (1998) je iz laboratorijskih poskusov na simetričnih, obojestranskih širitvah z ravnim vtokom izpeljal formule za izračun take najmanjše dolžine. Na podlagi ene izmed takih formul lahko izračunamo dolžino širitve v obliki lijaka na vtoku širitve L_w :

$$L_w = \frac{B_A - B_K}{2} [2.21 - 2.81 \ln(1 - F)] \quad \text{enačba (8)}$$

Pri tem je B_A širina širitvenega odseka in B_K širina gorvodnega reguliranega odseka. Spremenljivka F se izračuna:

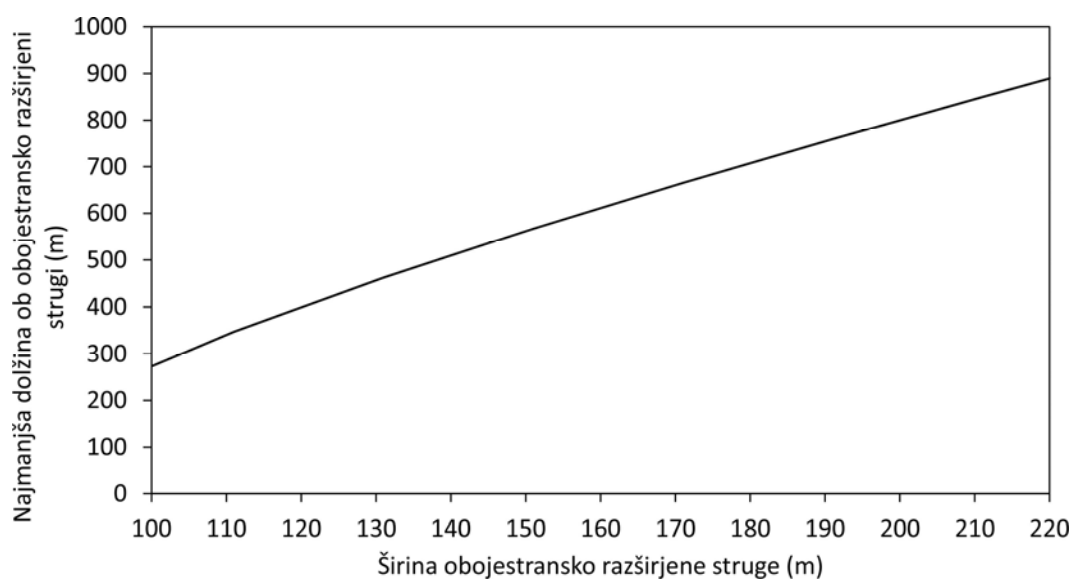
$$F = 0.21 e^{\frac{7.1}{\frac{B_A}{B_K} + 3.5}} \quad \text{enačba (9)}$$

Najmanjša dolžina L_A se izračuna z naslednjo formulo:

$$L_A \geq 2L_w + L_v \quad \text{enačba (10)}$$

Pri tem je L_A celotna dolžina širitve in L_v dolžina zožitve, s katero širitve preide v regulirano strugo. Kot zožitve od širitve v reguliran odsek na odseku zožitve L_v dolvodno je v skladu s Hunzingerjem ob 25° (merjeno med obrežno črto zožitve in prvotnim bregom) kazal le malo energijske izgube in akumulacijski učinek ob visokih pretokih naj bi bil majhen.

Če uporabljamo kot v obsegu 25° za izračun L_v , so rezultat najmanjše dolžine odsekov širitve ob mejni Muri, izhajajoč iz širine dna 71 m (širina ob sredinskem vodostaju znaša pribl. 76 m), prikazane na Slika 36. Ob navedenih najmanjših dolžinah se morfologija komaj izoblikuje v celoti, preden se struga spet zoži v lijaku zožitve. To pomeni, da je treba dati na voljo dvojno dolžino, da bi dosegli morfologijo, ki bi ustrezala širitvi vzdolž velikega dela dolžine brega.



Slika 36. Izračunane najmanjše dolžine L_A odseka širitve na Muri za različne obsege širitve po Hunzingerju (1998). Upoštevati je treba, da šele najmanjše dolžine dopuščajo nastajanje morfologije v skladu s širino. Da potem ta morfologija prevladuje na večjem delu odseka, je treba omogočiti večje dolžine (npr. $2 \times L_A$).

Treba je upoštevati, da so bile formule izdelane za obojestranske širitve. Ob enostranskih širitvah z enakimi širitvami bi rezultat lahko bile večje najmanjše dolžine. V obeh primerih je najmanjša dolžina odvisna tudi od pogojev dotoka; ob zavojih reke pričakujemo druge najmanjše dolžine.

4.5. Ocene povečane potrebe po površinah

Reke, katerih sedimentni režim je v dinamičnem ravnotežju in ki se oblikujejo v lastnem aluvialu, imajo sicer v glavnem čez dolge odseke enake lastnosti, se pa morfološko zahtevana širina lahko lokalno časovno zelo razlikuje in se lahko prelaga celotni tok struge. Če naj bi nastala nemotena morfologija, je treba minimizirati stik z umetnimi prisilnimi točkami (na primer z obrežnimi zavarovanji ali jezbicami), ker bi preprečena bočna erozija privedla do globinske erozije in vplivala na morfologijo. Model »widest« (razdelek 4.3) kaže za hidrogram pretoka v obdobju med letoma 2010 in 2019 na vodostaju Mureck/Cmurek zaradi agradacij na dnu okrepljeno bočno erozijo v povprečnem obsegu pribl. 10 m ob bregu. Tam, kjer je dovolj prostora, je treba upoštevati ustrezne rezerve površin na območju obrežnega sveta, da je znotraj zagotovljenega koridorja omogočeno prelaganje struge ali več rokavov.

4.6. Povzetek ocene potrebnih površin

V skladu z zgodovinskimi kartami so posamezni rokavi dosegli širino do 262 m, ne da bi na teh mestih prišlo do razvejanja struge zaradi agradacij. Po diagramu Da Silva je predlagana najmanjša širina v obsegu pribl. 220 m, ki bi bila potrebna, da bi dosegli razvejano morfologijo. V skladu s tem naj bi za strugo samo (brez upoštevanja koridorja za zmanjšanje padca in možnosti za bočno dinamiko) dali na voljo najmanjšo širino v obsegu 220 m, če želimo doseči stanje z dinamičnimi razvejitvami. Če ne damo na voljo večje širine v obliki koridorja, ta

najmanjša širina ne bo omogočila večjega podaljšanja poteka toka in bi povzročila zgolj minimalno zmanjšanje padca.

Pokazalo se je, da je naravni padec lahko dosežen ob naravnih radijih vijug šele z močno podaljšanim potekom toka v koridorju s širino nad 469 metrov. Če naj dobijo zunanji bregovi manevrski prostor in če dobi struga sama širino za razvejanje (na primer ob prej izračunani širini 220 m), mora biti koridor še širši. Povečanje širine struge, ki omogoči izoblikovanje sredinskih prodišč in dinamiko razvejanja ter dodatna zagotovitev širokega koridorja za večjo vijugavostjo struge (sinusnost) bi ustrezno zmanjšali tako globino vode kot tudi padec dna, kar bi povzročilo močno zmanjšano premestitveno zmogljivost. Hkrati bi lahko zaradi dinamike struge in vijugastega poteka ter erozije naravnih bregov v zagotovljenem koridorju dosegli močan ekološki učinek.

Model »widest« (Klösch et al., 2019) kaže, da agradacije v strugi povzročijo močne erozije bregov (ok. 10 m na leto v raziskovalnem obdobju) in da lahko struga zaradi razdelitve v dve strugi pridobi relativno hitro velike širine. V skladu s tem mora biti v najboljšem primeru na voljo tudi dovolj prostora za tako bočno dinamiko. Tovrstna dinamika predpostavlja dovolj velik pretok rinjenih plavin.

Če se renaturacija izvede samo čez omejeno dolžino, je treba v odvisnosti od obsega širitve upoštevati najmanjšo dolžino. Ob širitvi v obsegu pribl. 150 m znaša predlagana najmanjša dolžina za simetrično, obojestransko širitev pribl. 1000 m. Če se izvede širitev zgolj enostransko, bi bil potreben daljši odsek.

Treba je upoštevati, da smo to orodje razvili na podlagi podatkov oz. teorij, ki izhajajo iz dinamičnega ravnotežja sedimentnega režima; za doseganje določene morfologije je nujen tudi dovolj velik vnos proda.

5. RAZVOJ RAZLIČIH UKREPOV

Izhajajoč iz analiz o potrebnih površinah (poglavje 4) in glede na razpoložljive površine v skladu s karto prostorskih omejitev (dosežek D.T1.3.1) smo opredelili tri tipe ukrepov. Vsi trije naslavlajo parametre, odločilne za stabilizacijo dna (tj. širino struge in padec dna), v odvisnosti od velikosti zagotovljene površine v različnem obsegu. S hipotezo predpostavljamo, da čim večji je tip ukrepa, tem manjša je premestitvena zmogljivost, tako da so potrebne količine rinjenih plavin za stabilizacijo višine dna manjše. Navedene tri tipe ukrepov je mogoče opisati na način, predstavljen v nadaljevanju.

Tip ukrepov A: V tem primeru se struga s širitvijo glavnega rokava ali z uvedbo stranskega razširi na povprečno 150 metrov. Taka širitev struge povzroči majhno zmanjšanje premestitvene zmogljivosti. Padec se pri tem ne spremeni ali zelo malo spremeni, tako da pride do zmanjšanja padca v zelo majhnem obsegu. Potrebna količina proda za stabilizacijo višin dna po pričakovanjih ostane visoka. Dolžina širitve je omejena, znaša pa najmanj en kilometer. Najmanjša dolžina zagotavlja, da bo morfologija širino dejansko tudi sprejela.

Tip ukrepov B: Tukaj se ustvarja kontinuirani koridor širine pribl. 220 m, ki poleg večje širine struge dopušča tudi rahlo vijugast potek toka, zaradi česar se padec neznatno zmanjša, ker se omogoča sinusnost ali vijugavost. Izhaja se iz srednjega stabilizacijskega učinka ukrepa, za ohranitev višine dna pa bi bila potrebna srednja količina vnosa proda.

Tip ukrepov C: V tem primeru je struga široka pribl. 220 m, kar je nadrejeni koridor z večjo širino, ki dopušča razvoj širine struge po lastni dinamiki in močnejšo vijugavost toka, ki padec precej zmanjša. Utrditve bi bile v tem primeru, če bi bile potrebne, locirane na zunanjih brežinah zavojev. Ob močnem povečanju širine struge ob hkratnem zmanjšanju padca je treba izhajati iz dejstva, da je stabilizacijski učinek na dno največji, kar pomeni, da je potreben vnos proda majhen. Zaradi majhne stopnje posegov, velikih površin različnih struktur in pričakovane morfodinamike lahko pri tem tipu pričakujemo največji ekološki učinek.

Za primerjavo smo opredelili tudi **tip ukrepov 0**, pri katerem geometrija ustreza aktualnemu stanju, ustrezen vnos proda pa stabilizira dno. V skladu s hipotezo predpostavljamo, da tip 0 potrebuje največji vnos proda za ohranitev višine dna. Tipa ukrepov 0 ne gre zamenjati z dejanskim stanjem, ker trenutno ni vnosa proda in se dno pogloblja.

Razčlenitev v tri tipe mora omogočiti numerično raziskavo učinkov različno velikih ukrepov. Odvisno od razpoložljivih površin je mogoče izbrati tudi hibridne oblike za izvedbo ob mejni Muri.

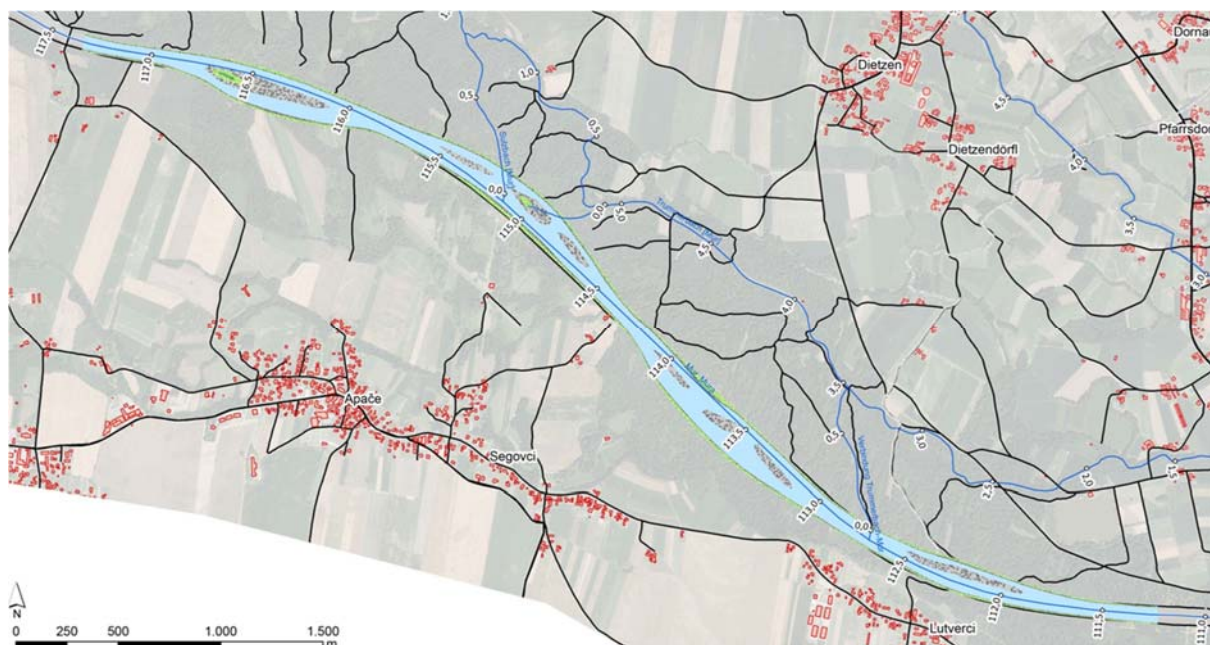
Slika 37 povzema značilnosti in pričakovane učinke ukrepov.

	Kanalizirano obstoječe stanje	Renaturacija tipa A	Renaturacija tipa B	Renaturacija tipa C
Tloris				
Potreba po prostoru	Kanalizirana struga (~80m)	Majhna (150 m)	Srednja (220 m)	Velika (220 m in več)
Širina	Širina kanalizirane struge	Manjše razširitve ali stranski rokavi	Večje razširitve s prodišči	Struga 220m, rečni kordior > 220m – večja rečna dinamika, bočna erozija, prodišča
Krivine in padec dna	Nizka ukrivljenost, velik padec	Nič/malo povečana ukrivljenost, padec ohranjen	Nekoliko povečana ukrivljenost, manjša sprememba padca	Večja ukrivljenost, znižan padec dna
Zaščita brežin	Vse brežine zavarovane	Velik delež brežin zavarovanih	Obrežna zavarovanja pogosta	Obrežna zavarovanja predvsem na zunanjih brežinah, kjer potrebno
Stanje parametrov	Širina struge Krivine	Širina struge Krivine	Širina struge Krivine	Širina struge Krivine
Vpliv na stabilizacijo dna	Ničen	Majhen	Srednji	Velik
Potreba po vnosu plavin	Zelo velika	Velika	Srednja	Majhna

Slika 37. Tipi ukrepov, izpeljani iz analiz o potrebnih površinah in razpoložljivih površinah za mejno Muro

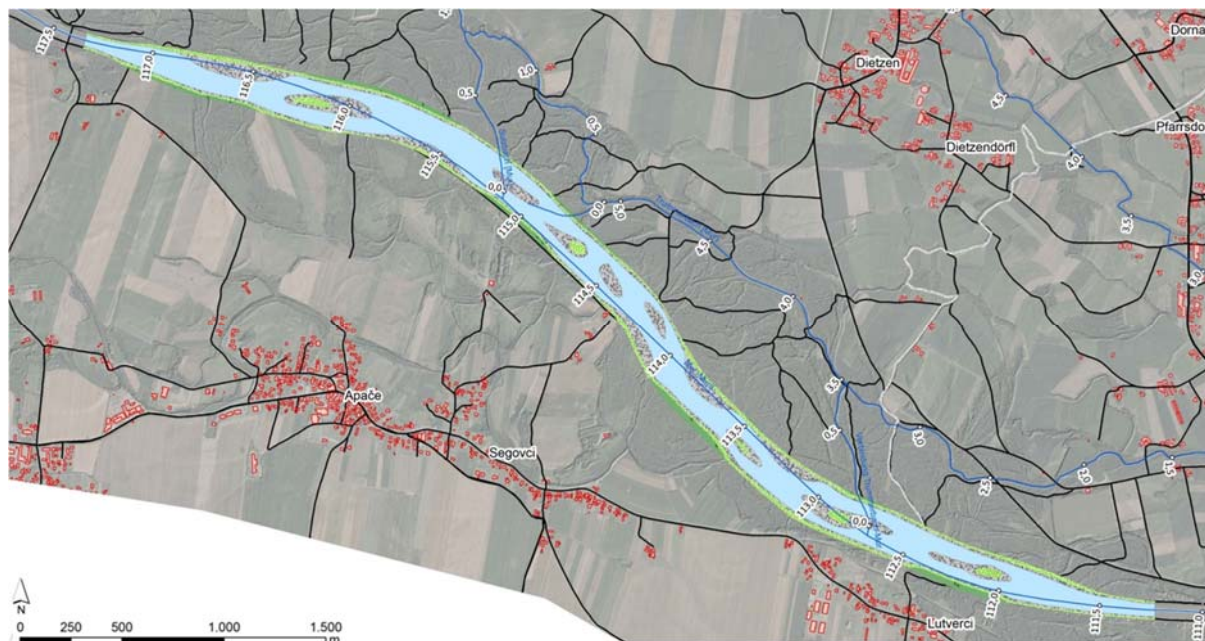
Navedeni tipi ukrepov so bili preneseni na 6 km dolgi odsek mejne Mure pri Apačah/Halbenrainu (Obrajni). Prikazane so tudi možne morfološke strukture razvitih ciljnih stanj v tlorisu. Ta odsek je bil izbran, ker bi bili izvedljivi vsi trije ukrepi v skladu s karto o prostorskih uporih (D.T1.3.1).

Slika 38 kaže zaporedje štirih odsekov tipa A.



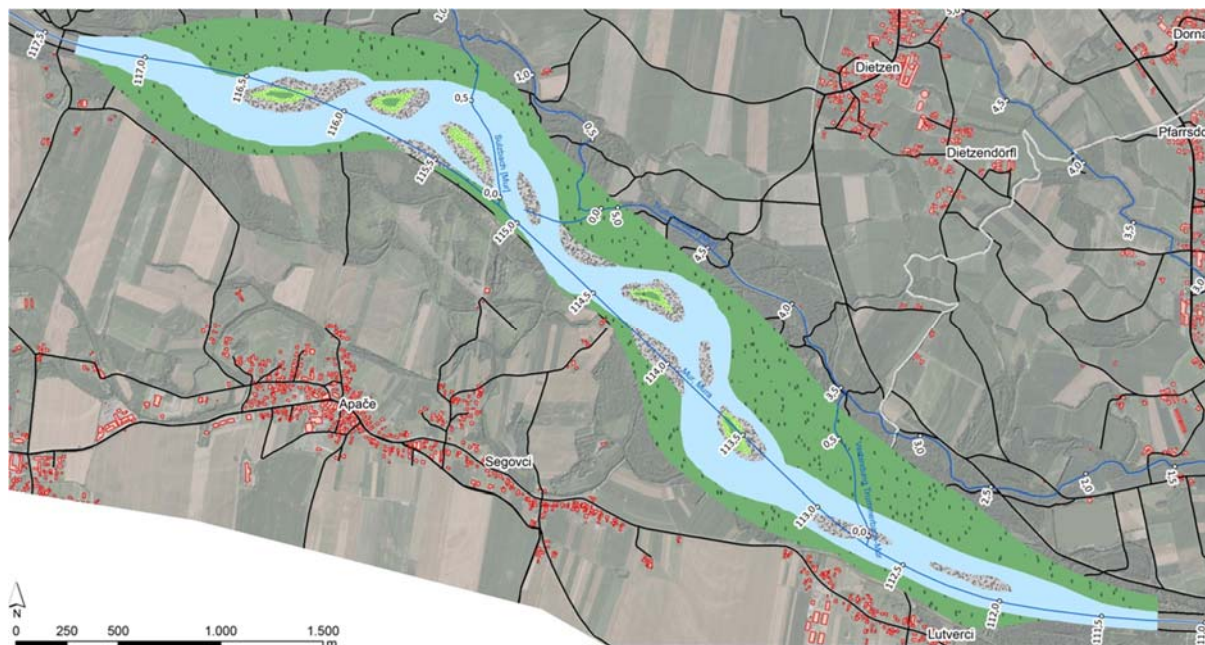
Slika 38. Tloris, prenesen na referenčni odsek, z morfološkimi značilnostmi ukrepov tipa A.

Slika 39 kaže kontinuirani koridor širine pribl. 220 m v skladu z ukrepi tipa B.



Slika 39. Tloris, prenesen na referenčni odsek, z morfološkimi značilnostmi ukrepov tipa B.

Slika 40 kaže možno morfologijo tipa C, za katero je na voljo širok koridor za premestitve struge ali več strug.

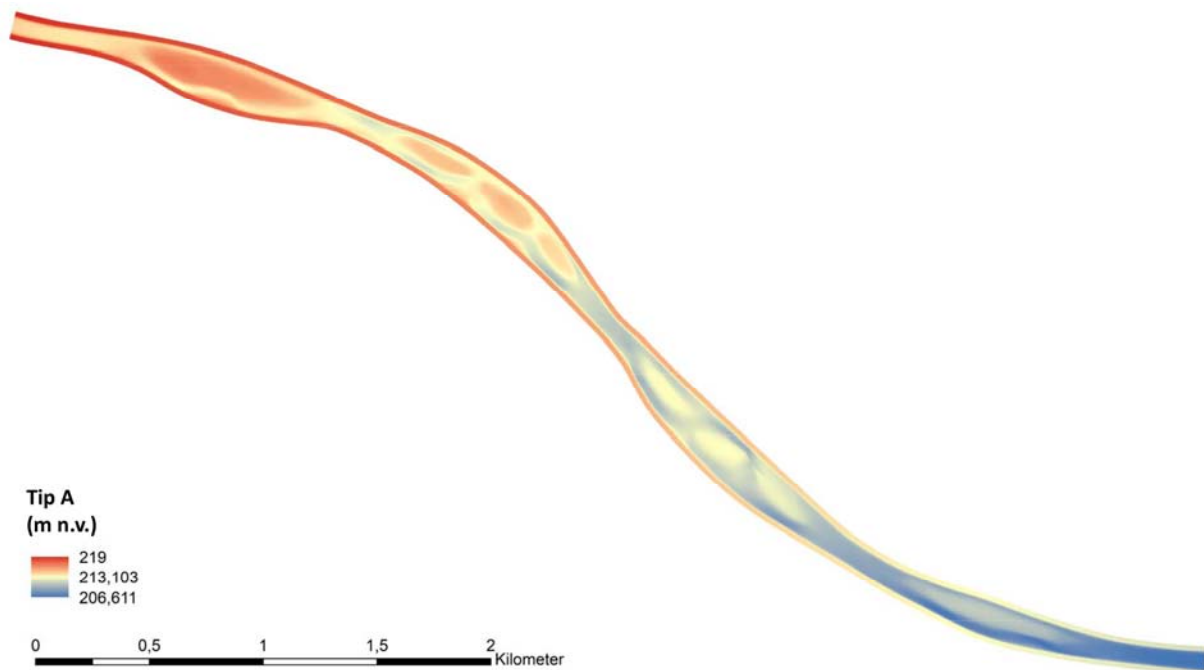


Slika 40. Tloris, prenesen na referenčni odsek z morfološkimi značilnostmi ukrepov tipa C na odseku med rkm 109,54 in 103,39 v skladu s stacionažo, ki je obveljala v času priprave Načelne vodnogospodarske zasnove (na sliki je prikazana aktualna stacionaža).

Tlorise smo v nadaljevanju uporabili za razvoj tridimenzionalnih geometrij. V ta namen smo v rednih razmakh pribl. 50 m opredelili prečne profile, pri katerih smo odčitali stacionaže vodostaja ter prehode do površin s pionirsko vegetacijo in z obrečnim gozdom. Dodatno smo prevzeli verjeten položaj globokih predelov (območij hitrega toka, tolmunov). Z izračunom

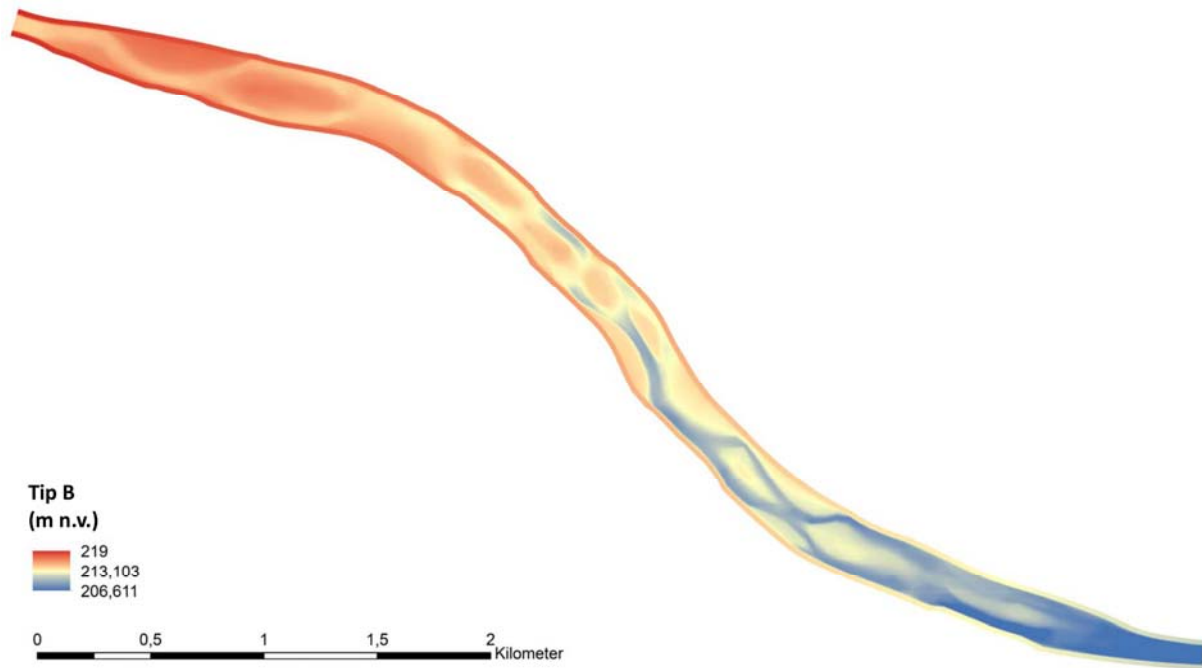
vodostajev v prečnih profilih smo porazdelitev globin prilagajali tako dolgo, da so bili vodostaji ob srednjem pretoku približno na pozicijah v tlorisnih načrtih.

Slika 41 kaže terenski model, ki smo ga na ta način izračunali za tip A.



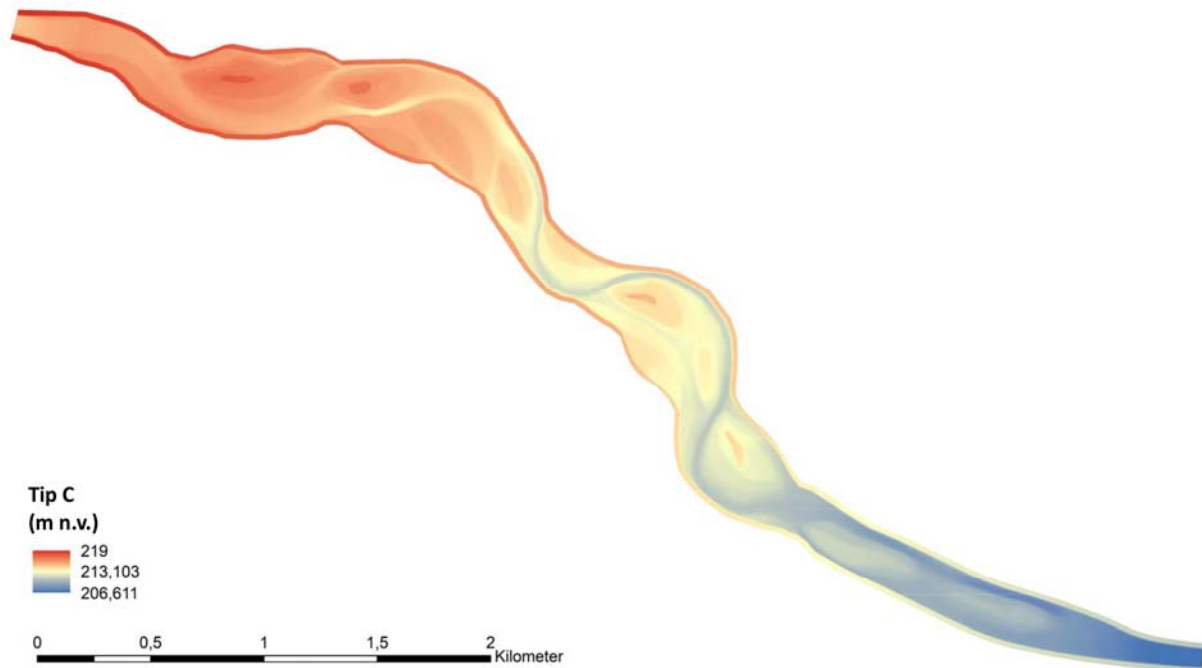
Slika 41. Geometrija v referenčnem odseku, ki predstavlja tip A.

Terenski model tipa B v referenčnem odseku je prikazan na Slika 42.



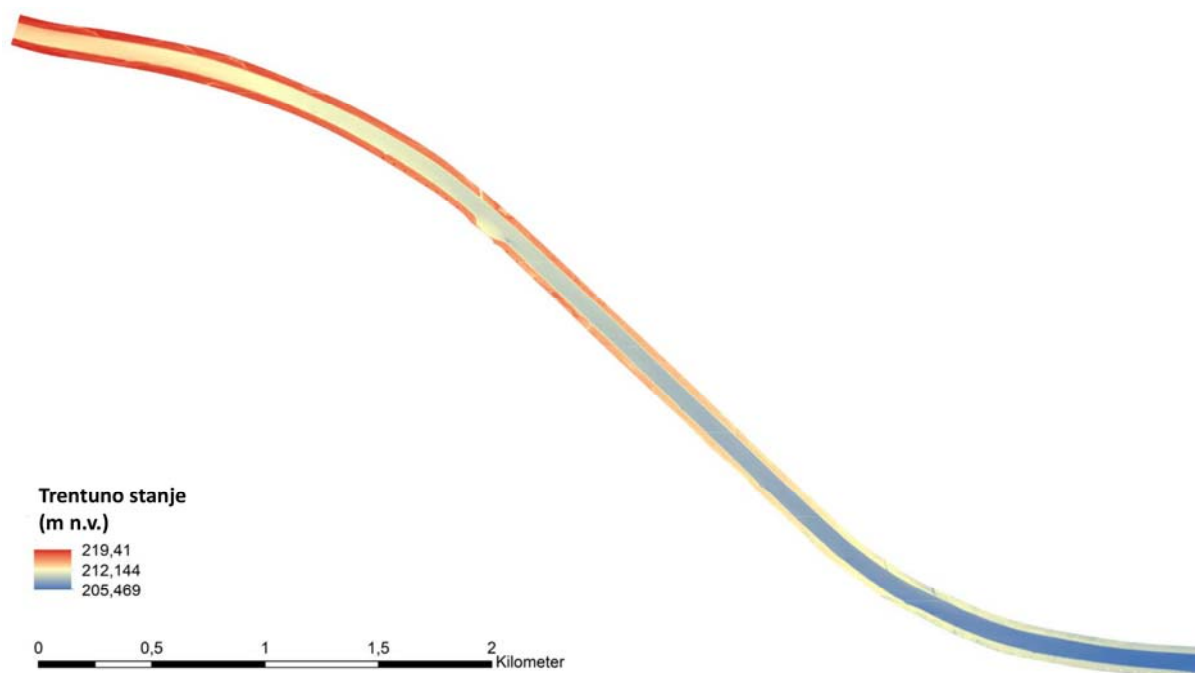
Slika 42. Geometrija v referenčnem odseku, ki predstavlja tip B.

Slika 43 kaže terenski model za tip C.



Slika 43. Geometrija v referenčnem odseku, ki predstavlja tip C.

Za geometrijo tipa 0 smo uporabili terenski model meritve iz leta 2019 (Slika 44), ker zaradi ozke regulacije tudi ob zadovoljivem vnosu voda ne pričakujemo relevantne morfološke razlike do trenutnega stanja.



Slika 44. Geometrija, ki je rezultat meritve iz leta 2019 v okviru projekta goMURra v referenčnem odseku, ki predstavlja tip 0 (nobenih sprememb stopnje regulacije).

Tako so bile končno na voljo štiri morfologije v tridimenzionalni obliki, ki smo jih lahko raziskovali glede njihovega vpliva na tok in premeščanje rinjenih plavin.

Na osnovi teh geometrij smo dobili za tipe ukrepov morfološke parametre, prikazane in povzete v tabeli 4. Širino struge smo ugotovili z delitvijo omočene površine skozi dolžino sredinske črte. Na referenčnem odseku znašajo širine struge v tipu 0 76 m, v tipu A povprečno 139 m in v tipu B povprečno 199 m ter v tipu C povprečno 247 m. Povprečne vrednosti vsebujejo tudi gorvodne in dolvodne prehode v regulirano strugo, zaradi česar širine nekoliko odstopajo od prej navedenih značilnih širin tipov ukrepov. Zaradi večje vijugavosti se padec zmanjša (izračunano za glavno strugo) od 1,294 ‰ v tipu 0 na 1,285 ‰ v tipu A, do 1,250 ‰ v tipu B ter za več kot 11 % do 1,146 ‰ v tipu C.

Pomembni za morfodinamiko so na eni strani radiji, ker je njihova velikost odločilna za obstoj strmih bregov in s tem za proces bočne erozije. Bočna erozija ustvarja strme brežine, ki so habitat za ptičje vrste, ki gnezdijo ob brežinah in prispeva tudi odmrle drevesne ostanke, ki spet skrbijo za lokalno morfodinamiko in nudijo zatočišče ribam. Hkrati povzročajo širitev po lastni dinamiki premikanje obrežne črte zaradi bočne erozije, kar sproti spremeni okvirne pogoje za tok v strugi in s tem tudi za morfologijo struge. Medtem, ko znašajo radiji na referenčnem odseku nad 2000 m, se radij v tipu A zmanjša na 1300 m in v tipu B na 400 m, v tipu C pa na 200 m, pri čemer se pri tipu C pojavi največ nezavarovanih bregov in strmo obrežje na več mestih lahko povzroči bočno erozijo.

Na drugi strani pa tendenca do razvejanja kaže dinamiko prodišč in otokov, ki spet nudijo ugodne pogoje za ptičje vrste, pionirsko vegetacijo in sukcesijo do obrečnega gozda. Plitvine blizu brega nudijo zaščito mladim ribam. Zaradi dinamike so usedline na dnu sestavljene iz rahlega proda, ki nudi ugodne pogoje za ribje vrste, ki ikre odlagajo v prod, ker v temrodu lahko izkopljejo jamice za oplojene ikre. Iz geometrij se izračuna indeks razvejanja (skupna dolžina rokavov, deljena skozi dolžino glavnega rokava po Mosleyju, 1981) od 1,0 v tipu 0 (ni razvejanja), 1,8 v tipu A in tipu B ter 1,9 v tipu C. V tipu C lahko pričakujemo največjo dinamiko prodišč in otokov, ker se bregovi lahko premikajo relativno svobodno in ker se redno spremenijo okvirni pogoji za razvoj prodišč. Povečana morfodinamika povzroča lateralno izmenjavo sedimenta, tako da je večji del sedimenta udeležen pri morfodinamiki.

Preglednica 4. Morfološki parametri tipov ukrepov.

	tip 0	tip A	tip B	tip C
Povprečna širina struge	76 m	139 m	199 m	247 m
Povprečni padec glavnega rokava	0,001294	0,001285	0,001250	0,001146
Radiji glavnega rokava	> 2000 m	> 1300 m	> 400 m	> 200 m
Indeks razvejanosti	1,0	1,8	1,8	1,9

6. NUMERIČNO MODELIRANJE

Numerično modeliranje se uporablja za preverjanje hipoteze, po kateri širitev struge in zmanjšanje padca dna povzročita stabilizacijski učinek na dno in zmanjšata potrebne količine plavin. Preverili smo tudi, ali se ta učinek kaže pri tipih ukrepov A, B in C. Poleg tega smo raziskali potreben vnos proda in druge lastnosti tipov ukrepov, kar smo potem uporabili kot osnovo za ocenjevanje ukrepov.

6.1. Metodologija

Za analize različic ukrepov smo uporabili različne pristope modeliranja:

1. Tridimenzionalni, hidrodinamično-numerični model RSim-3D (Tritthart, 2005) s posnemanjem tudi sekundarnih tokov omogoča naravno posnemanje strižnih napetosti, ki so zaradi pomena za pretok rinjenih plavin (prodonosnosti) v ospredju pozornosti. Rezultati hidrodinamično-numeričnega modela dopuščajo tudi ocenjevanje ekološko relevantnih parametrov, kot je porazdelitev globin vode in hitrosti toka.
2. Model premeščanja plavin iSed (Tritthart et al., 2011) v nadaljevanju uporablja strižne napetosti, izračunane z modelom RSim-3D, da se sklepa na premestitveno zmožljivost in povprečno potrebo po produ.
3. Pri izračunu morfodinamike se za hidrodinamični del zaradi hitrosti uporablja dvodimenzionalni model Hydro_AS-2D (Nujic, 1998), ki je na voljo na trgu, ki se spet kombinira z modelom premeščanja plavin iSed.
4. Reprezentativno za celotni odsek se s simulacijo hidrodinamike ocenjuje možni učinek ukrepov na gladine poplav. Za to raziskavo se uporablja enorazsežni hidrodinamično-numerični model HEC-RAS (US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center).

V nadaljevanju sledi opis modelov RSim-3D, iSed, Hydro_AS-2D in HEC-RAS.

6.1.1. Opis modelov

6.1.1.1. 3D-hidrodinamično-numerični model RSim-3D

Tridimenzionalno, hidrodinamično-numerično modeliranje je bilo izvedeno s tridimenzijskim modelom tokov RSim-3D (Tritthart, 2005). To je računalniški program, ki je bil razvit najprej na Tehniški univerzi na Dunaju in pozneje na Inštitutu za vodne gradnje, hidravliko in raziskovanje vodotokov (prej Inštitut za vodno gospodarstvo, hidrologijo in konstruktivno vodno gradnjo) Univerze za naravne vire in biotehniške znanosti na Dunaju (BOKU) za izračun hitrosti tokov in položajev vodne gladine ob vodotokih, za katere so značilni turbulentni in kompleksni tokovi.

V nasprotju z dvodimenzionalnimi modeli, ki računajo na osnovi poenostavljenih enačb tokov, tako imenovanih enačb plitvih voda, se v tridimenzionalnih modelih tokov uporabljajo popolne Reynoldsove transportne enačbe za opis turbulentnih tokov v vseh treh prostorskih smereh:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + u \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + v \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + w \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} - \frac{\partial \overline{u'^2}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial y} - \frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial z} + f_x \\
 \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + u \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + v \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + w \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \nu \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial z^2} - \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{v'^2}}{\partial y} - \frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial z} + f_y \\
 \frac{\partial \bar{w}}{\partial t} + u \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} + v \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} + w \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + \nu \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial z^2} - \frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial y} - \frac{\partial \overline{w'^2}}{\partial z} + f_z
 \end{aligned} \quad (11)$$

Tukaj pomenijo x , y in z tri prostorske smeri v globalnem koordinatnem sistemu ter čas t kot četrti modelna dimenzija v primeru nestacionarnega računa. Rezultati \bar{u} , \bar{v} in \bar{w} so časovno ugotovljene hitrosti tokov v treh prostorskih razsežnostih, medtem ko \bar{u}' , \bar{v}' in \bar{w}' opisujejo srednje vrednosti turbulentnih fluktuacij hitrosti. \bar{p} predstavlja srednji tlak v vsakokratni računski točki, ki zaradi konveksnih ali konkavnih tokovnicah lahko odstopa od hidrostatičnega tlaka. $\bar{\rho}$ označuje gostoto vode in ν kinematično viskoznost. Spremenljivke f_x do f_z opisujejo delovanje zunanje sile v treh prostorskih smereh, na primer Coriolisovo silo.

To pomeni, da je treba rešiti vseh šest diferencialnih enačb: po eno enačbo na prostorsko smer (enačba 1), dve enačbi za dojetanje turbulence in enačbo kontinuitete. Tudi računski mreža mora izpolnjevati zahteve tridimenzionalnega opisa tekočega kontinuuma in mora zato biti vertikalno razčlenjena v računske celice (v našem primeru smo jo razdelili na šest globinskih plasti), kar še bolj poveča obseg računskih operacij. Uporaba tridimenzionalnega hidrodinamično-numeričnega modela v nasprotju z modeli nižjih razsežnosti dopušča odslikavanje številnih dodatnih tokovnih pojavov, kar je treba upoštevati pri tehtanju obsega računskih operacij:

- vertikalna porazdelitev hitrosti in pojavi v zvezi s tem, na primer sekundarni tokovi;
- nagib vodne površine zaradi sekundarnega toka, ki ga povzročijo centrifugalne sile v zavojih poteka struge;
- vertikalne vrtinčne strukture turbulence;
- hitrostni profili v primeru konveksnih ali konkavnih tokovnicah (na primer pri ne enakomernih oblikah struge).

Numerični model Mod RSim-3D uporablja računske celice na podlagi poliedrov s pretežno šestkotno obliko tlorisa za diskretizacijo prostora. To omogoča zajem recirkulirajočih področij tokov z večjo natančnostjo kot s tetraedri ali heksaedri, kot je bilo pokazano v nekaterih znanstvenih delih. Enačbe tokov se rešujejo po metodi končnih volumnov, kar pomeni, da se posamezne diferencialne enačbe najprej integrirajo in šele potem efektivno rešujejo. Na ta način lahko rešujemo nestalnosti – če pride na primer do hidravličnega skoka – brez numeričnih težav. Za modeliranje turbulence se uporablja model $k-\epsilon$ v standardni formulaciji, ki opisuje premeščanje turbulentne kinetične energije (torej turbulentnih struktur) na območju toka z dvema diferencialnima enačbama. Model se lahko uporablja tako za

stacionarne kot tudi za nestacionarne izračune, pri čemer je obseg računskih operacij v drugem primeru izjemno visok in zaradi tega v predmetnih računih ni bil uporabljen.

Vhodni podatki, ki jih potrebujemo za tridimenzionalni numerični model vodotokov, se ne razlikujejo od podatkov za dvodimenzionalni model, ker so za neznane parametre (na primer za robne pogoje za turbulentno kinetično energijo) namenjene približevalne formule, na podlagi katerih se manjkajoči robni pogoji lahko samodejno ocenijo. Iz tega razloga za modeliranje potrebujemo naslednje:

- digitalni model struge oz. podrobni posnetek dna reke in obrežnega pasu,
- strukturne robove (npr. krone nasipa ali prometnih poti),
- poznavanje porazdelitve hrapavosti,
- hidrogram pretoka gorvodno,
- hidrogram vodostaja dolvodno.

Na tem mestu je treba pripomniti, da 3D-modeli praviloma ne uporabljajo vrednosti hrapavosti po Manningu oz. Stricklerju, ki so sicer običajne v hidravliki, temveč operirajo z absolutnimi višinami hrapavosti, na primer z ekvivalentno peščeno hrapavostjo po Nikuradseju. Iz tega razloga tudi ni treba prilagoditi kalibrirane hrapavosti ob različnih pretokih. Seveda pa prinaša preračun znanih vrednosti po Stricklerju v absolutne višine hrapavosti nekaj negotovosti.

6.1.1.2. Model premeščanja plavin iSed

Osnova za modeliranje premeščanja plavin je hidrodinamično-numerična ugotovitev pretočnega polja ter vodne globine in strižnih napetosti. Pri razvoju modela premeščanja plavin iSed (Tritthart et al., 2009) je bila v ospredju možnost kombinacije z obstoječimi modeli hidrodinamike. To pomeni, da se parametri toka ne izračunajo v modelu samem, temveč so rezultat hidrodinamično-numeričnega modela, ki je na voljo samodejno za vsak časovni interval. iSed z modularno zgradbo dopušča kombinacijo z 2D- in s 3D-modeli.

Ko je podana rešitev za pretočno polje, se za numerični izračun premeščanja trdnih snovi v skladu s postopki premeščanja izvede porazdelitev v lebdeče snovi in rinjene plavine (prod), pri čemer se prodonosnost ugotovi z rešitvijo vsakokratne enačbe. Na koncu vsakega časovnega intervala se izvede bilanca vseh računskih celic modela, pri čemer se iz ugotovljene prodonosnosti izpelje morfološka sprememba (erozija ali sedimentacija) za vsak računski voz. Ker je premestitvena zmogljivost različnih frakcij zrn različna, je z izračuni po frakcijah v zaključnem koraku mogoče izračunati nove krivulje zrnivosti. S tako modificirano geometrijo modelov se potem spet aktivira hidrodinamični model in postopek se začne znova.

V nadaljevanju pojasnjujemo posamezne komponente numeričnega modela za premeščanje plavin glede na njihovo funkcijo.

Pretok rinjenih plavin (prodonosnost)

V model premeščanja plavin iSed smo uvozili štiri različne empirične formule prodonosnosti – vse preurejene za frakcionirano premeščanje in s popravki za ekspozicijo: Meyer-Peter/Müller (1948), van Rijn (1984), Egiazaroff (1965) in Hunziker (1995). V okviru modeliranja ob Muri smo uporabili formulo po Meyer-Peter/Müllerju v prilagojeni obliki:

$$q_{si} = p_i c_{MP} \sqrt{\frac{\rho_s - \rho}{\rho}} g d_i^3 \left[\left(\frac{d_i}{d_{ref}} \right)^\alpha \frac{u^{*2}}{\frac{\rho_s - \rho}{\rho} g d_i} - \theta_c \right]^{\frac{3}{2}} \quad (12)$$

Poleg že podanih opredelitev pomeni q_{si} premestitveno zmogljivost frakcije zrn i , d_i reprezentativni premer frakcije zrn, d_{ref} je referenčni premer zrn (izbrali smo $d_{ref} = d_{50}$), ρ_s pomeni gostoto sedimentnih zrn, ρ gostoto vode, g gravitacijo na zemlji in c_{MP} tako imenovani preddejavnik po Meyer-Peter/Müllerju. Za kritični parameter mobilnosti θ_c se uporablja Shieldsova krivulja v obliki parametra (Shields, 1936). Spremenljivka α označuje parameter ekspozicije formule.

Evolucija rečnega dna

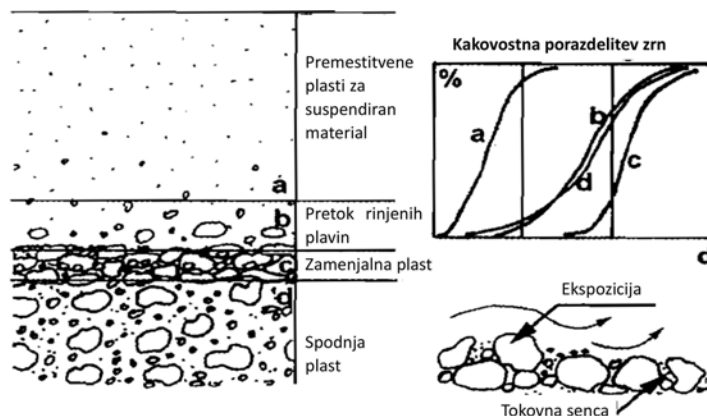
Časovna evolucija rečnega dna na vsakem računskem vozlu sledi Exnerjevi enačbi:

$$(1 - n_p) \frac{\partial z_i}{\partial t} + \frac{\partial q_{si,x}}{\partial x} + \frac{\partial q_{si,y}}{\partial y} = s_{dep,i} - s_{ero,i} \quad (13)$$

Tukaj pomeni z_i višinsko spremembo dna zaradi premeščevalnih postopkov frakcij zrn i , $q_{si,x}$ in $q_{si,y}$ pomeni pretok rinjenih plavin v smeri x - in y , $s_{dep,i}$ in $s_{ero,i}$ pomenita potek depozicije oz. erozije za vsakokratno frakcijo zrn in n_p delež por pri plavinah. Porazdelitev pretoka rinjenih plavin v prostorske smeri se izvaja analogno z vektorsko porazdelitvijo hitrosti toka blizu dna. Ker je enačba (13) diferencialna, se za njeno rešitev uporablja metoda končnih volumnov, kar pomeni, da se integrirana enačba bilance rešuje na podlagi Gaussove kvadrature numerično na kontrolnem volumnu. Vsota višinskih sprememb vseh frakcij končno poda vertikalno spremembo položaja rečnega dna.

Zrnavnostno razvrščanje

V modelu premeščanja plavin iSed so implementirani vsi parametri večplastne zgradbe rečnega dna z večplastnim modelom. Dodatno se uporablja pojem zamenjalne plasti (Slika 45).



Slika 45. Struktura rečnega dna z zamenjalno plastjo (po ATV-DVWK, 2003)

Zamenjalna plast je vrhnja plast rečnega dna, v kateri potekajo vsi mešalni procesi. Debelina te plasti d_{Trans} običajno znaša na področju d_{90} do $4 \times d_{90}$ materiala rečnega dna; uporabnik jo predpostavlja, je parameter za umerjanje modela. Ob pojavu erozije se erozijski material nadomešča z materialom iz globljih plasti, ob sedimentaciji pa se ta material dopolni z materialom, ki se premešča do vsakokratnega računskega vozla. Na podlagi višinskih sprememb zaradi posameznih frakcij zrn (gl. odsek 0) je na ta način mogoče ugotavljanje nove krivulje zrnivosti.

Bočna erozija

Za upoštevanje bočne erozije uporabnik s polilinijami najprej označi v modelu premeščanja plavin iSed črto nožišča obrežja. V določeni razdalji do vozlov te črte hidrodinamični model izračuna strižno napetost, ki se potem v ločenem modelu prečnih profilov (SIMBERO – SIMulation of Bank EROsion) nanaša na spodnji del obrežja. Model posnema model po Osmanu in Thornu (1988), ki pri prekoračenju kritične strižne napetosti sproži tokovno erozijo ob nožišču obrežja in ob izgubi stabilnosti rušenje brežin. Tokovna erozija v tem modelu določi umik nožišča obrežja v odvisnosti od strižne napetosti.

Rušenje brežin je pri tem modelu pomembno za hitrost erozije, ker tudi določi izoblikovanje bregov ter s tem geometrijo in hidrodinamiko v prečnem profilu (in strižne napetosti vzdolž brega). Stabilnost brežin se določi v odvisnosti od specifične teže, kohezije in kota trenja. Sila teže vzdolž drsne površine, ki je rezultat tega, deluje destabilizacijsko. Stabilizacijsko delujejo kohezija v drsni površini in sila trenja, ki nastane zaradi obremenitve drsne površine z lomljeno brežino. Če destabilizacijska sila prekorači stabilizacijsko silo, pride do rušenja brežin in se lomljena brežina odstrani iz geometrije modela prečnega profila. V modelu premeščanja plavin se rečnemu dnu doda strugotvorni delež brežine iz bočne erozije.

6.1.1.3. 2D-hidrodinamično-numerični model Hydro_AS-2D

Dvodimenzijski hidrodinamično-numerični model Hydro_AS-2D rešuje tokovne enačbe za povprečne globine (enačbe plitvih voda) in uporablja za prostorsko diskretizacijo metodo končnih elementov. Najprej se v računalniškem programu SMS (Surface-Water Modelling System; Aquaveo, LLC, Provo, UT) izdelava računsko mreža, ki jo sestavljajo trikotni in štirikotni elementi. V nadaljevanju se dodelijo hrapavosti in opredelijo robni pogoji oz. modelski

parametri. Končno se lahko izvede dvodimenzionalen hidrodinamični izračun v programu Hydro_AS-2D, različica 5.

Enačbe plitvih voda izhajajo iz podmene, da obstaja porazdelitev hidrostatičnega tlaka v globini. Izpeljana je iz integracije tridimenzionalne kontinuitetne enačbe in Reynoldsove enačbe oz. Navier-Stokesovih enačb za nestisljive tekočine. Za padec trenja I_R se uporablja pristop po Darcy-Weisbachu. Za uporno sovrednost I se uporablja Manning-Stricklerjev obrazec. V dvodimenzionalnih simulacijah na osnovi enačb plitvih voda še naprej velja podmena, da je hidravlični polmer enak globini vode. Viskoznost vrtincev za prikaz turbulence se v modelu Hydro_AS-2D ugotavlja na podlagi kombinacije empiričnega pristopa s konstantno viskoznostjo. Konstantna viskoznost se pri tem nanaša na celotni element. Koeficienti enačb se opredelijo s povprečjem.

6.1.1.4. 1D-hidrodinamično-numerični model HEC-RAS

Model HEC-RAS strugo posnema s serijo prečnih profilov in rešuje enorazsežne enačbe Saint-Venant. Učinkov zavojev rek ali oblikovnih sprememb prečnih profilov na hidravliko ni mogoče upoštevati.

6.1.2. Struktura modela

6.1.2.1. Struktura modela za raziskavo hidrodinamike

Za analizo hidrodinamike se uporablja tridimenzionalni model RSim-3D. Tridimenzionalni izračun omogoča upoštevanje tudi globinskih pojavov v toku. Ob tem se najprej ugotovi konvergentna rešitev hidrodinamike. Za vsak raziskani pretok so torej podane tokovne razmere.

V tem razdelku razlagamo podatkovne osnove in strukturo modelov, tako posameznih hidrodinamičnih modelov kot tudi modela premeščanja rinjenih plavin iSed.

Model struge

Koordinate digitalnih modelov terena (DGM) se izvozijo kot podatki XYZ. V nadaljevanju se iz njih triangulirajo novi rasterski podatkovni sloji z velikostjo celic 1 m x 1 m in se uvozijo v 3D-hidrodinamični model RSim-3D.

Hrapavost

Vrednosti za hrapavost se odvezemajo iz modela mejne Mure podjetja RIOCOM, ki je bil uporabljen za projekt CROSSRISK v okviru programa Interreg SI-AT za preiskave poplav.

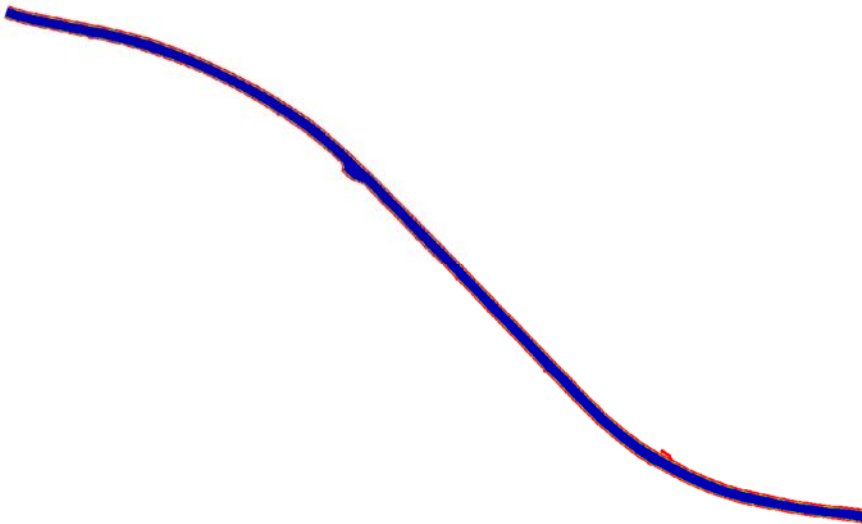
V hidrodinamičnem modelu RSim-3D obstaja možnost prikaza hrapavosti z ekvivalentno peščeno hrapavostjo po Nikuradseju namesto hrapavosti po Manningu oz. Stricklerju. Prednost tega načina je, da hrapavosti ni treba prilagoditi vodostaju in da jo lahko prenesemo na druge vrednosti pretokov.

Na območju obravnave izberemo dve različni hrapavosti (glejte Preglednica 5). Ti temeljita na izkušnjah iz projektov v bližini oziroma se ocenita iz krajevnih danosti.

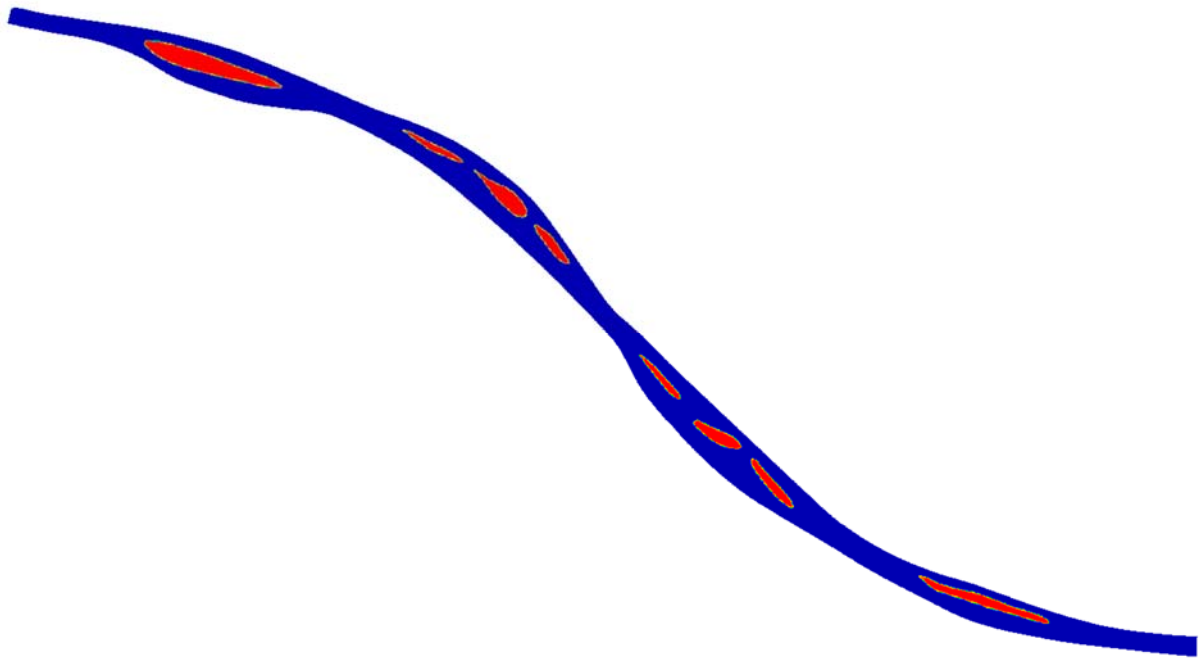
Preglednica 5. Pregled izbrane hrapavosti v modelu RSim-3D

Struktura	Ekvivalentna peščena hrapavost po Nikuradseju [m]
Glavni tok	0,087
Otoki	0,150
Obrežni pas	0,150

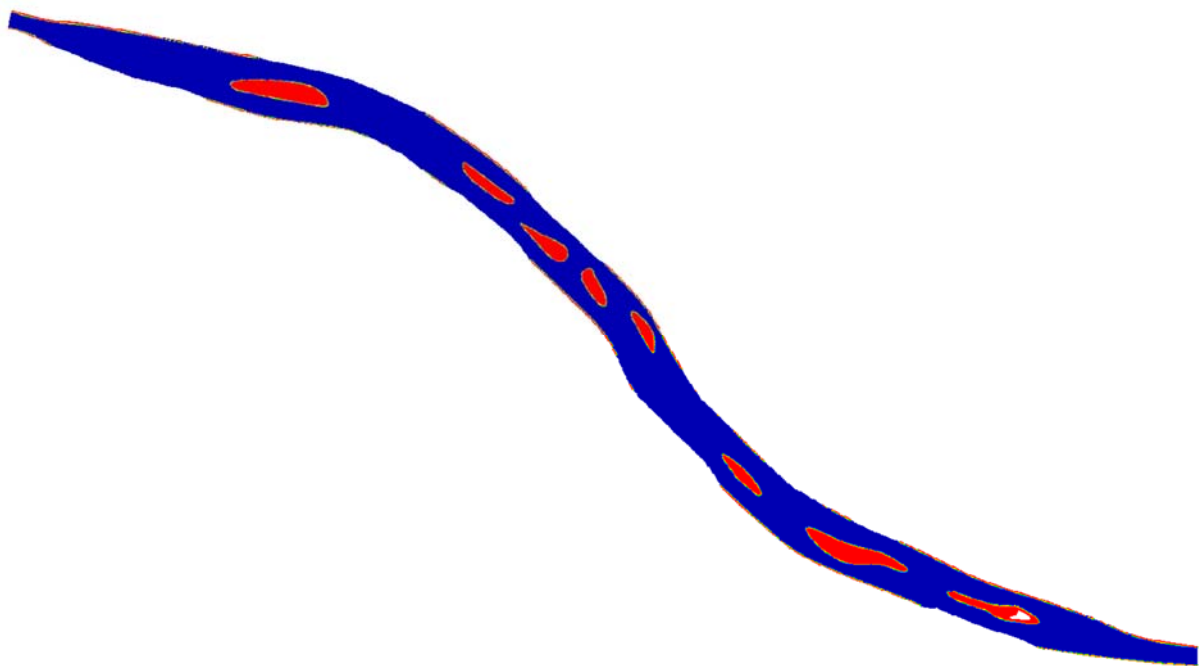
Hrapavost je porazdeljena na območju obravnave tako, kot je prikazano na Slika 46 - Slika 49.



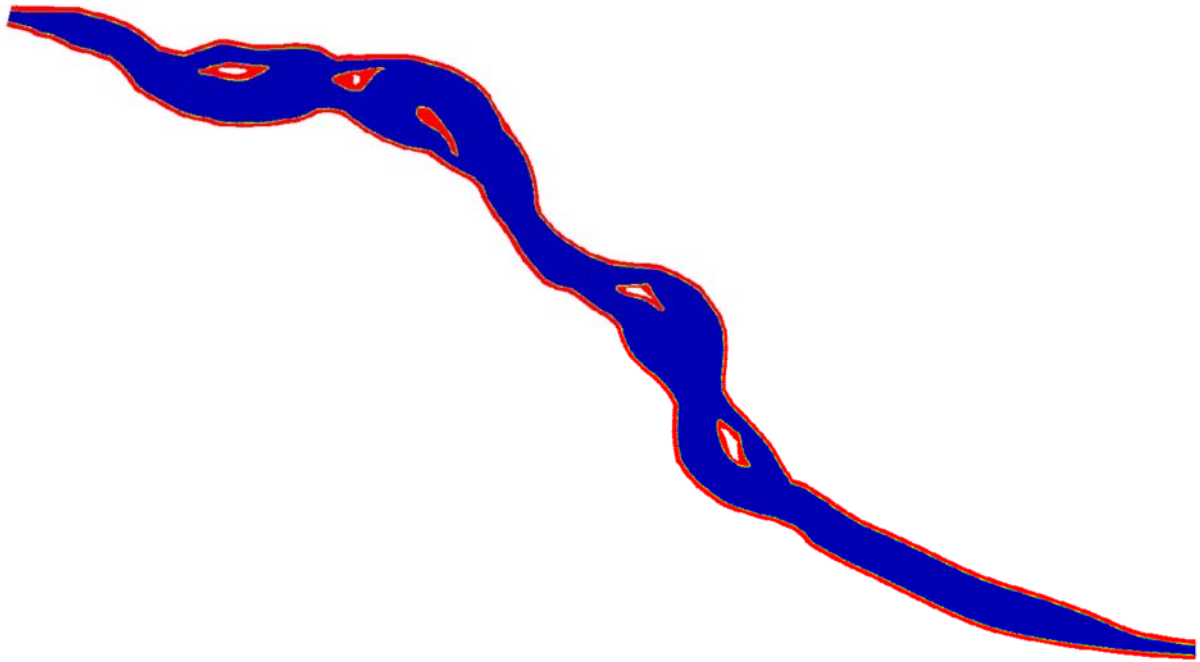
Slika 46. Tip 0 s hrapavostjo 0,087 m v glavnem toku in 0,150 m ob robu



Slika 47. Tip A s hrapavostjo 0,087 m v glavnem toku in 0,150 m ob robu ter na otočnih površinah



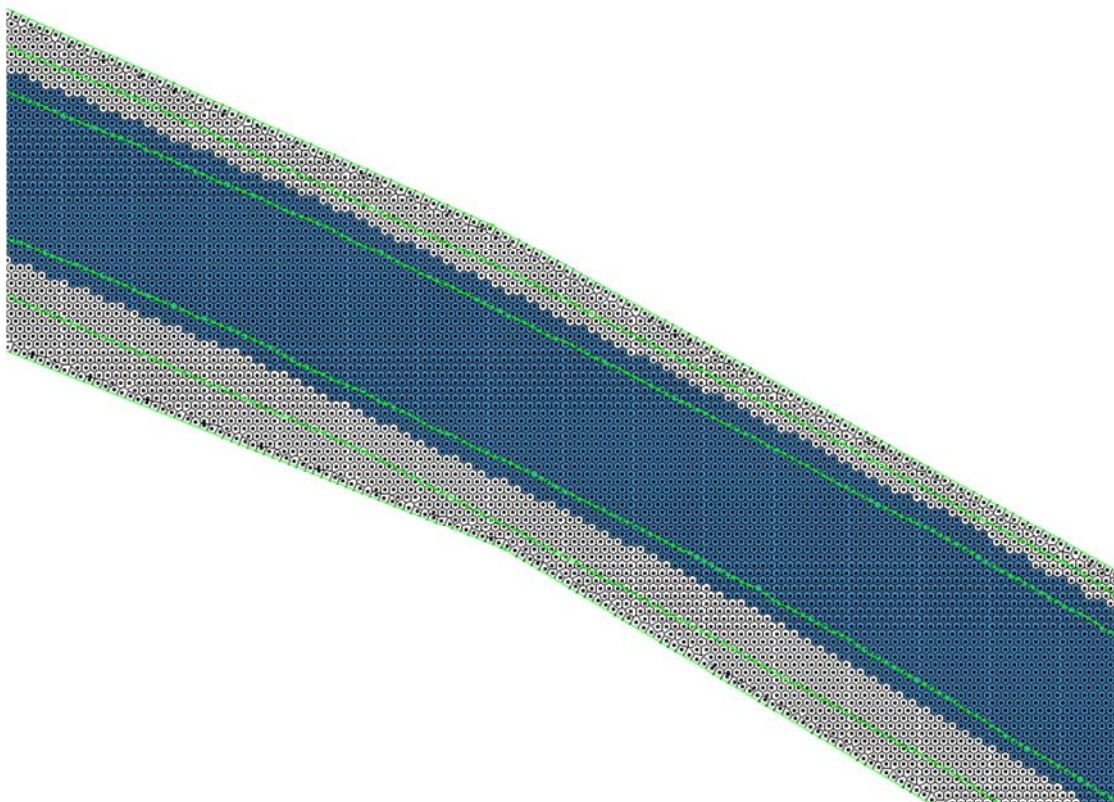
Slika 48. Tip B s hrapavostjo 0,087 m v glavnem toku in 0,150 m ob robu ter na otočnih površinah



Slika 49. Tip C s hrapavostjo 0,087 m v glavnem toku in 0,150 m na robu ter na otočnih površinah

Računska mreža RSim-3D

Za hidrodinamično modeliranje se vzpostavi tridimenzionalna računska mreža. Velikost celic znaša 4 m. Računska mreža se v vertikalni smeri razdeli v šest plasti. Slika 50 kaže odsek ob stacionaži 108,545 s tam izbrano porazdelitvijo računske mreže za primer tipa 0. Modro označene celice kažejo ocenjeno omočeno površino vode ob scenariju tipa 0 s pretokom $700 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.



Slika 50. Prikaz izbrane računske mreže na primeru tipa 0

Robni pogoji RSim-3D

Kot robne pogoje na vtočnem predelu (stacionaža 109,540) smo izbrali 20 pretokov, ki morajo pokriti celotno območje pretokov, ki premeščajo plavine.

Kot robni pogoji na iztočnem predelu (stacionaža 103,385) se uporabljajo pripadajoči vodostaji, ki smo jih izračunali vnaprej z dvodimenzionalnim modelom.

Predhodna ocena vodostajev

Preden se lahko začne hidrodinamično modeliranje po modelu RSim-3D, je treba vnaprej oceniti vodostaje za ugotovitev začetnega pogoja. V ta namen se uvozijo rezultati vodostajev iz dvodimenzionalnega modela za vsakokratni pretočni scenarij v raster RSim-3D.

6.1.2.1. Struktura modela za raziskovanje premestitvene zmogljivosti in morfodinamike

Modela premeščanja plavin iSed se najprej uporabljata za določitev premestitvene zmogljivosti in s tem potrebe po produ za ohranitev dinamičnega ravnotežja sedimentnega režima. V drugem koraku se simulira tudi morfodinamika v ciljnih stanjih tipov ukrepov.

Za analizo premestitvene zmogljivosti model premeščanja plavin lahko uporablja rezultate tridimenzionalne simulacije RSim-3D. Za analizo morfodinamike se model premeščanja plavin

kombinira za dvodimenzionalnim modelom Hydro_AS-2D, kar omogoča koriščenje prednosti krajših računskih časov za zahtevno modeliranje morfodinamike, ki je časovno obsežnejše.

V nadaljevanju opisujemo vhodne podatke za vzpostavitev modela premeščanja plavin.

Nastavitev parametrov modela

Parametri modela, ki jih je treba nastaviti, so deli procesov pretoka plavin in bočne erozije.

Kot formular za pretok rinjenih plavin smo izbrali formulo po Meyer-Petru in Müllerju (1948). Da bi pospešili proces umerjanja, smo parametra preddejavnik c_{MP} in kritična, brezdimenzijska strižna napetost τ_c , ki se pojavita v njem, spremenili v medsebojni odvisnosti. Spreminjanje obeh parametrov se izvede na podlagi parametra a , ki spremeni oba parametra formule za pretok plavin tako, da pride do povečanja ali zmanjšanja strižne napetosti, ki deluje na rečno dno:

$$c_{MP} = 8a^{\frac{3}{2}} \quad (14)$$

$$\tau_c = \frac{0,047}{a} \quad (15)$$

Za določitev premestitvene zmogljivosti smo izbrali pristop ene velikosti zrna, da se rezultat zaradi izpiranja deleža finih delcev z dna ne bi spremenil. V simulacijah morfodinamike smo uporabili modeliranje več velikosti zrn modela iSed.

S popravno funkcijo (»hiding exposure«) smo lahko izbrali mobilnost zrn ne glede na srednji premer zrn.

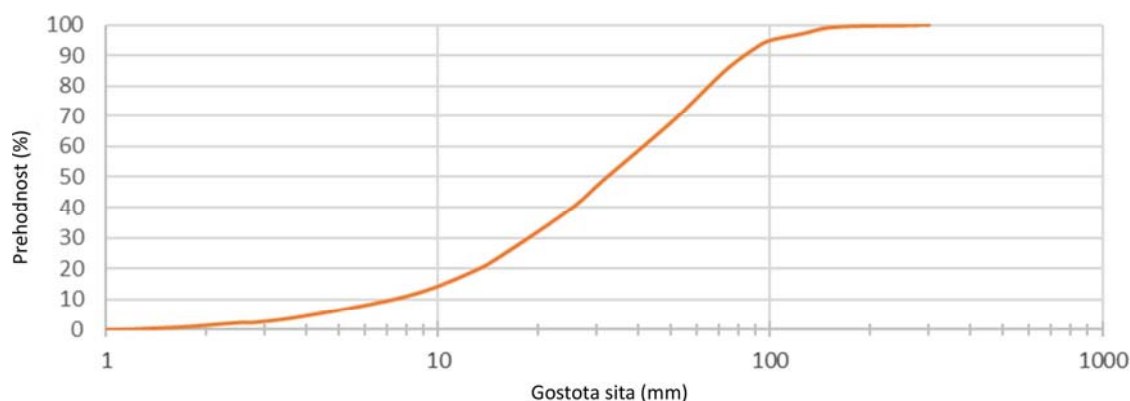
V nadaljevanju smo morali opredeliti debelino aktivne plasti rečnega dna. Ta opredeli prehod med vrhno plastjo in spodnjo posteljico. Za izvedbo določimo parameter v obsegu 20 cm. To pomeni, da je v tem predelu podana mešana zrnastostna sestava iz vrhnje plasti in posteljice.

Končno smo uporabili še omejitvene parametre za učinkovitost, pravilnost in stabilnost modela. Na ta način smo opredelili minimalno globino celic v hidrodinamiki z 0,01 m in maksimalni časovni interval po kriteriju Courant-Friedrichs-Lewy.

Opredelitev plavin

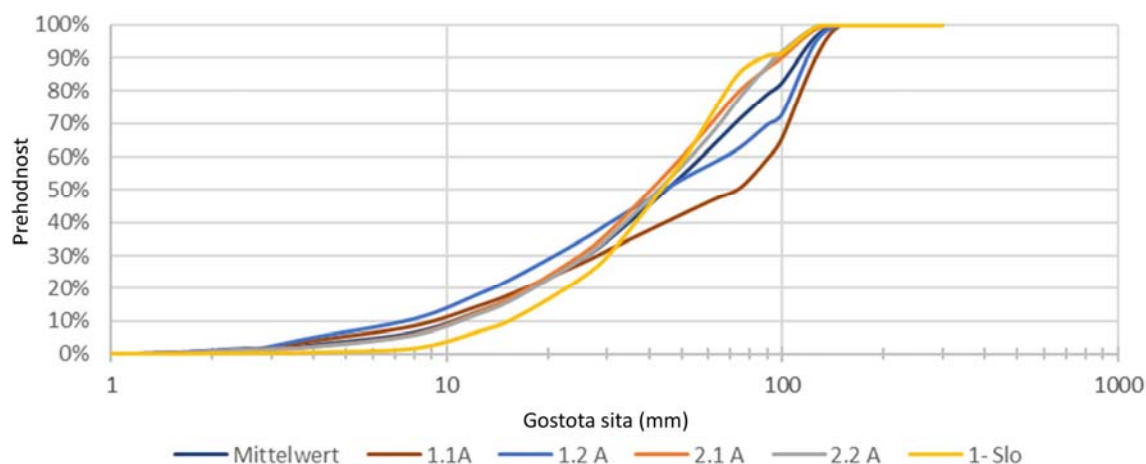
Pri opredelitvi plavin smo razlikovali med dvema stanjema:

Opredelitev plavin (sedimenta) v zdajšnjem stanju. Simulacija zdajšnjega stanja se uporablja za umerjanje modela. Opredeljena je z aktualnim dnem, da bi na podlagi obstoječih meritvenih podatkov umerili model. Ob tem smo za spodnjo plast modela uporabili zrnastostno razvrščanje volumskih vzorcev, ki smo jih vzeli v okviru razvoja Načelne vodnogospodarske zasnove za mejno Muro. Če izločimo delež < 1 mm (pod predpostavko, da ni strugotvoren), dobimo srednji premer zrn v obsegu 41,4 mm (Slika 51).



Slika 51. Zrnastostno razvrščanje v strugi iz volumskih vzorcev, ki smo jih vzeli v okviru Načelne vodnogospodarske zasnove za mejno Muro.

Analize linijskega vzorca plavin Načelne vodnogospodarske zasnove za mejno Muro so bile uporabljene za posnemanje vrhnje plasti (Slika 52).



Slika 52. Zrnastostno razvrščanje z analizo linijskega vzorca plavin za ocenjevanje vrhnjega sloja tipa 0 v projektu mejna Mura

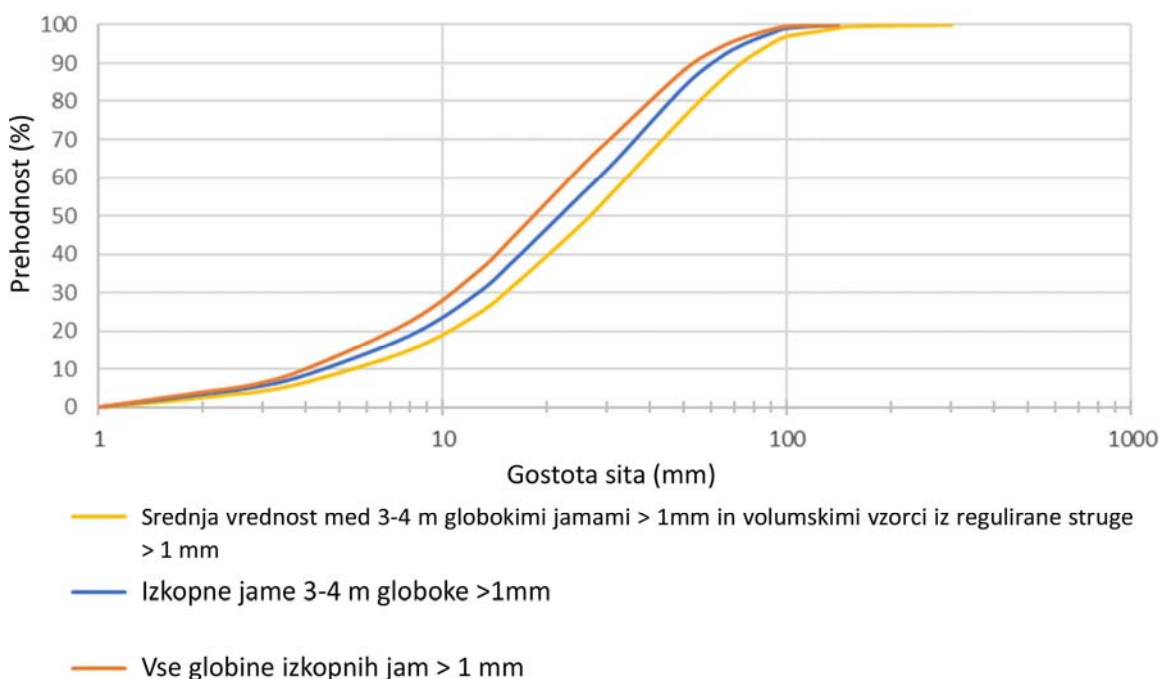
Predpostavljamo debelino vrhnje plasti v obsegu 0,1 m. Spodnja posteljica se modelira z debelino 1,4 m, tako da dobimo skupno debelino rečnega dna 1,5 m. Razvrščanje se izvede površinsko homogeno. Obrežni pas se opredeli kot neerozijski.

Opredelitev plavin pri tipih ukrepov (tip 0, tip A, tip B in tip C). Pri opredelitvi dna pri tipih ukrepov izhajamo iz dejstva, da plavine ustrezajo finejšemu sedimentu na obrežnem pasu. To je na eni strani v skladu s potencialnim scenarijem, da se sediment iz obrežnega pasu doda mejni Muri, na drugi strani pa je rezultat opazovanj, da imajo reke, katerih sedimentni režim je v dinamičnem ravnotežju, finejši substrat kot reke, pri katerih se pojavi primanjkljaj sedimenta.

Vzorci obrežnega pasu Načelne vodnogospodarske zasnove za mejno Muro se nanašajo na štiri globine: 0 m do 1 m, 1 m do 2 m, 2 m do 3 m, 3 m do 4 m. Na podlagi zrnastnega razvrščanja vseh lokacij vzorcev smo izračunali srednjo vrednost zrnastnega razvrščanja in izločili tisti delež rinjenih plavin, ki ni strugotvoren (predpostavljena meja velikosti zrna med rinjenimi plavinami in lebdečimi plavinami je pri 1 mm).

Izhajali smo iz predpostavke, da umetno dodane plavine ali eventualni vnos proda gorvodno ustreza povprečni velikosti zrna plavin na obrežnem pasu (Slika 53). Srednja velikost zrn tega sedimenta znaša po izločitvi deleža < 1 mm 24,8 mm. Pri simulacijah morfodinamike smo dodali to velikost zrn na vtočnem predelu.

Za ugotovitev premestitvene zmogljivosti smo izhajali iz dejstva, da razvrščanje plavin povzroča razvrščanje, ki je bolj grobo, in da plavine na površini še najbolj ustrezajo spodnji plasti vzorcev obrežnega pasu, ki po izločitvi deleža < 1 mm kaže srednji premer zrn 28,5 mm (Slika 53).



Slika 53. Zrnastostno razvrščanje rečnega dna iz ocen obrežnega pasu v projektu mejna Mura

Tipi različic A, B in C se prav tako izvedejo s homogenimi plavinami. Obrežni pas se opredeli kot erozijski sediment.

Parametrizacija bočne erozije

Za prodnate brežine, ki zaradi deleža finih delcev deloma pridobijo kohezivne lastnosti, meritev kohezije ni; tokovna erozija ob tej vrsti brežin je ostala na splošno neraziskana. Dodelili smo vrednost v obsegu 5 kN m^{-2} kot kohezijsko vrednost, da bi prikazali kote brežin, ki smo jih ugotovili na terenu, ki deloma ležijo daleč nad strižnim kotom izključno prodnatega materiala ($32\text{--}37^\circ$).

Da bi kljub temu dobili vrednosti za parametre erozivnosti glede tokovne erozije, smo uporabili razmerje med pretokom in bočno erozijo za ravni odsek v Gosdorfu, naveden v razdelku 4.3 ki so ga izpeljali Habersack et al. (2013) na podlagi meritev. Dvodimenzionalno hidrodinamično modeliranje je dalo strižne napetosti v bližini brežin za več pretokov, tako da smo lahko funkcijo avtorjev Habersacka et al. pretvorili v delež erozije/razmerje strižne napetosti in smo lahko izpeljali kritično strižno napetost in koeficient erozivnosti iz funkcije. Pri tem je treba

upoštevati, da bi razmerje, ki so ga izpeljali avtorji Habersack et al. (2013), lahko temeljilo zgolj na redkih podatkovnih točkah. Predvsem ugotovljena kritična strižna napetost je bila izpeljana iz zelo majhnih sprememb bregov, ki bi lahko bili tudi rezultati meritvene negotovosti.

V Preglednica 6 so navedeni uporabljeni vrednosti parametrov za modeliranje bočne erozije.

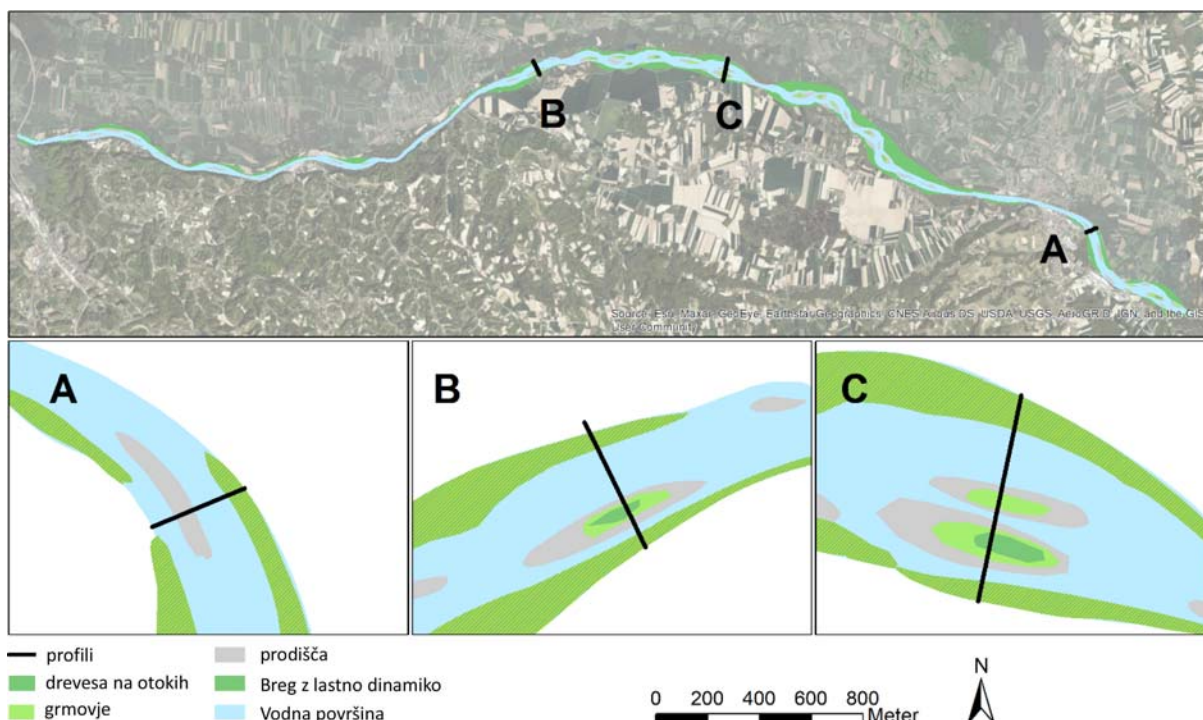
Preglednica 6. Erozijski parametri

Specifična teža (kN m^{-3})	18,5
Kohezija (kN m^{-2})	5,0
Notranji strižni kot ($^{\circ}$)	34,5
Kritična strižna napetost (N m^{-2})	15,0
Koeficient erozije ($\text{m}^2 \text{s kg}^{-1}$)	0,0008

6.1.2.2. Struktura modela za raziskovanje vplivov na vodostaj ob poplavah

Izbira prečnih profilov

Za analizo vodostajev ob visoki vodi smo izbrali tri prečne profile celotnega odseka, po en prečni profil odseka ukrepov tipa A, prečni profil na odseku ukrepov tipa B in prečni profil na odseku ukrepov tipa C (Slika 54). Izbrali smo pozicije prečnih profilov, ki vsebujejo tudi agradacijske strukture, značilne za vsakokratni tip, da bi lahko vključili te posebne pogoje (kot najslabši možen izid = worst case) za hidrodinamiko.



Slika 54. Ciljno stanje celotne mejne Mure in izbrane pozicije prečnih profilov, ki se raziskujejo za celoten odsek mejne Mure glede potencialnih vplivov na vodostaj ob visoki vodi.

Priprava reprezentativnih geometrij prečnih profilov

Na osnovi tlorisa ciljnega stanja smo potem za te prečne profile izdelali geometrije. Ob tem smo s hidrodinamičnimi izračuni pazili na to (tako kot pri izdelavi geometriji za referenčni odsek), da prodišča ob srednjem pretoku štrlijo iz vode, tako kot je prikazano v tlorisu.

Ob tem smo raziskali dva scenarija:

1. Moramo izhajati iz tega, da se bo rečno dno glede na vnos proda dvignilo. V tem scenariju smo predpostavili, da bo prišlo do dviga rečnega dna v povprečnem obsegu 80 cm v tipih A, B in C, kar smo ustrezno prenesli v prečne profile. Agradacije so ob tem pretežno na območjih, kjer bodo v skladu s ciljnim stanji (slika 54) prodišča in/ali otoki.
2. V tem scenariju je prečni profil tako preoblikovan od reguliranega do renaturiranega stanja, da se volumen sedimenta prodnatega strugotvornega deleža ni spremenil. To odraža teoretični scenarij, po katerem se celotni sediment, ki je bil premeščen zaradi umetnih zemeljskih del ali na podlagi lastne dinamike, porazdeli znotraj prečnega profila. Samo sedimentni volumen finega sedimenta iz trenutnega stanja ni bil prenesen v novo geometrijo, ker se ali ne vnese ali pa hitro odnaša kot lebdeče snovi. To predstavlja teoretični scenarij najslabšega primera, ker se dejansko velik del sedimenta iz izkopnih del neprekinjeno doda gorvodno namesto da bi ga lokalno vgradili v eni potezi, in ker se sediment iznaša že med izkopom. Jame, ki so bile analizirane v okviru Načelne vodnogospodarske zasnove za mejno Muro (2001), so kazale, da ima ta plast finega sedimenta povprečno debelino v obsegu 1,24 m. Ta debelina plasti finega sedimenta v obsegu 1,24 m je bila odbita ob prenosu sedimentnega volumna od trenutnega stanja v geometrijo profila ciljnega stanja.

Za trenutno stanje smo zdajšnjo strugo za vse tri odseke ukrepov prikazali kot trapezno strugo (Preglednica 7), ki odraža povprečno geometrijo in v zadovoljivem obsegu predstavlja regulacijo.

Preglednica 7. Prikaz zdajšnje, regulirane geometrije struge v obliki trapezne struge.

Širina rečnega dna	71 m
Višina brega	4.34 m
Kot brežine	34.5°
Vzdolžni padec	0.0014

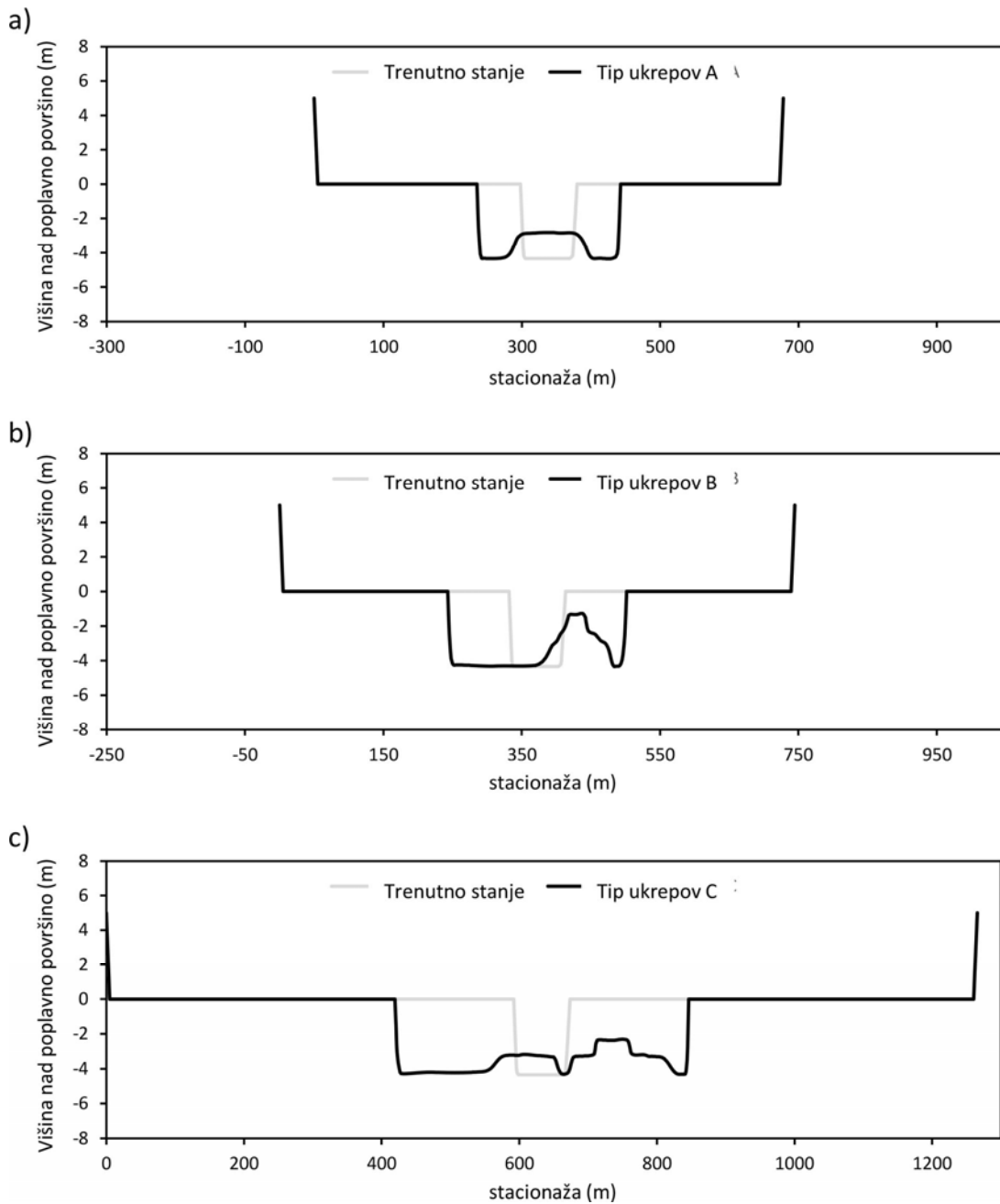
Na podlagi karte o pretokih za HQ 100 Dežele Štajerske smo ugotovili v rednih razmakih širine omočenih površin ob dogodku HQ100 vzdolž odsekov treh tipov ukrepov. Vzpetin, ki štrlijo iz poplavnih površin, nismo vključili v ugotovitev širin. Prav tako smo izvedli meritve širin zgolj znotraj protipoplavnih nasipov, če so obstajali. Mediane teh širin za tip A, tip B in tip C -odseke smo potem dodelili vsakokratnim prečnim profilom kot reprezentativno celotno širino (struga s poplavno površino). Te celotne širine znašajo za tip A 668 m, za tip B 735 m in za tip C 1255 m.

Ker so poplavne širine različnih odsekov ukrepov različne, smo izračunali tudi zdajšnje stanje s temi tremi širinami, da bi za vsak tip imeli na voljo vsakokratno primerjalno stanje. Tabela 8 kaže značilne mere izdelanih geometrij. Padec smo izračunali iz povprečnega padca celotne, regulirane mejne Mure (1,4 ‰) z upoštevanjem podaljšanjem toka na podlagi sredinskih črt v tipih ukrepov A, B in C.

Preglednica 8. Lastnosti odsekov ukrepov.

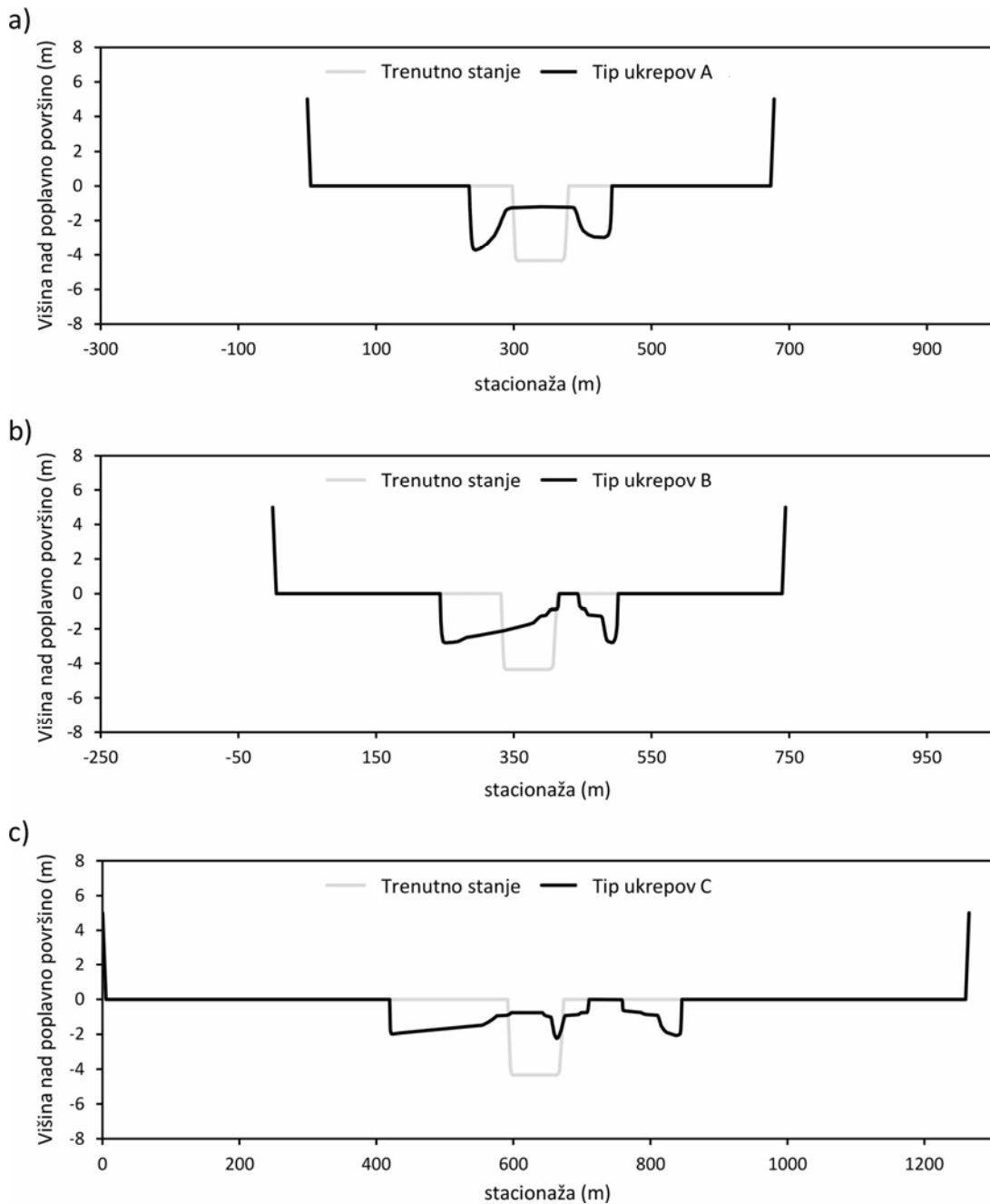
Tip ukrepa	Širina struge (m)	Širina s poplavno površino (m)	Padec (-)
A	207	668	0,001290
B	259	735	0,001280
C	426	1255	0,001191

Na sliki 55 so prikazane geometrije prečnih profilov z značilnimi poplavnimi širinami za tip A, Tip B in Tip C v skladu s scenarijem 1 (povprečni dvig dna za 80 cm).



Slika 55. Scenarij povprečnega dviga dna za 80 cm v prečnih profilih različnih odsekov ukrepov, ki so glede geometrije prečnih profilov in poplavne površine reprezentativni za položaj na odseku ukrepov a) tipa A in b) tipa B in c) tipa C..

Na Slika 56 so prikazane geometrije prečnih profilov z značilnimi poplavnimi širinami za tip A, tip B in tip C v skladu s scenarijem 2 (premestitev sedimenta znotraj prečnega profila)



Slika 56. Nevtralno (brez prenosa deleža, ki preide v lebdeče snovi) premeščeni profili s poplavno površino, ki so glede geometrije prečnih profilov in poplavne širine reprezentativni za položaj na odseku ukrepov a) tipa A, b) tipa B in c) tipa C. .

Struktura hidrodinamičnega modela

Na podlagi prečnih profilov smo z enodimenzijskim hidrodinamičnim modelom HEC-RAS (US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center) izdelali modele mejne Mure, pri katerih smo simulirali višine vodostaja ob enakomernih, stacionarnih pretokih. Spekter simuliranih pretokov seže od srednjega pretoka do pretoka stoletne poplave Q_{100} . Ob tem smo različnim tipom ukrepov dodelili vsakokratni padec dna, ki je rezultat dolžine toka in višinske razlike rečnega dna med vtočnim iz iztočnim profilom na referenčnem odseku. Preglednica 9 kaže uporabljene vrednosti hidravlične hrapavosti, ki smo jih zasledili pri drugih modelih in v

literaturi. Hrapavost dna tega modela ni bila posebej umerjena, ker se izračun za zdajšnje stanje izvrši v trapeznem profilu, ki ne dopušča neposredne primerjave z realnostjo, in ker gre tukaj predvsem za relativno primerjavo med aktualnim stanjem in tipi ukrepov. Tipa ukrepov B in C vsebujeta v strugi tudi vegetacijske površine, ki smo ju upoštevali z ustrezno izbrano hrapavostjo.

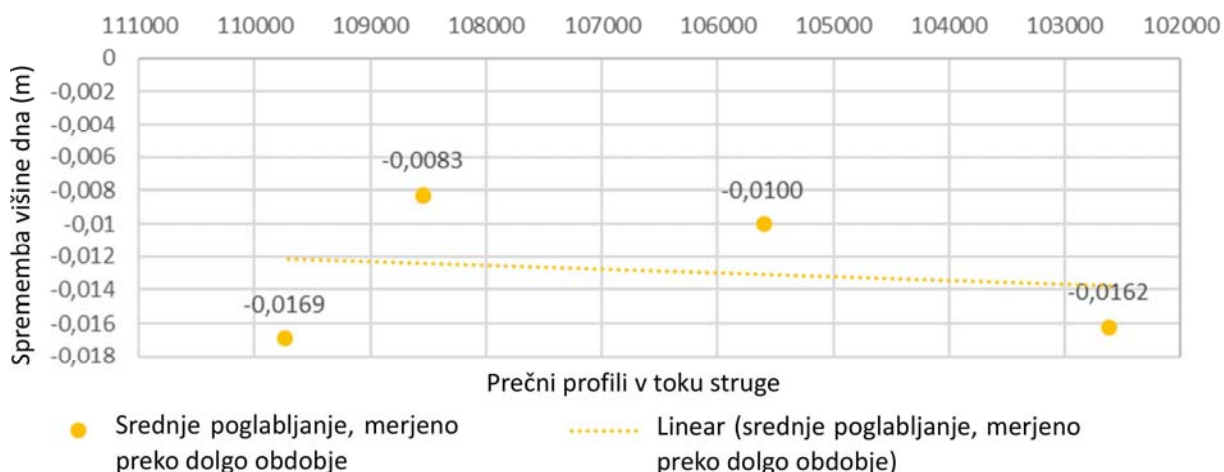
Preglednica 9. Vrednosti hrapavosti, ki smo jih izbrali za različne elemente Mure.

Rečni element	Manning-n ($s\ m^{-1/3}$)
Protipoplavni nasip	0,0286
Obrežni pas in otoki	0,1200
Struga in prodišča	0,0313
Pionirska vegetacija	0,0833

6.1.3. Scenariji modelov

6.1.3.1. Računski postopki za umerjanje modela premeščanja plavin

Erozija dna v zdajšnjem stanju referenčnega odseka je podatkovna podlaga za umerjanje modela. Pri tem smo upoštevali srednjo erozijo dna v obdobju 1974–2003, v katerem še nismo izvedli nobenih ukrepov proti poglobljanju dna in so bili torej okvirni pogoji konstantni. Kot podatkovna podlaga za posnemanje negativne spremembe višine dna so na referenčnem odseku za obdobje od 1974 do 2003 na voljo štirje izmerjeni profili. Samo dva profila sta znotraj referenčnega odseka (km 105,602 in km 108,450 v skladu stare stacionaže, ki so jo uporabili v Načelni vodnogospodarski zasnovi za mejno Muro). Gorvodni profil (km 109,740) in dolvodni profil (km 102,615, oba po stari stacionaži) referenčnega odseka smo prav tako vključili.



Slika 57. Srednje letno poglobljanje dna v obdobju od 1974 do 2003 na referenčnem odseku

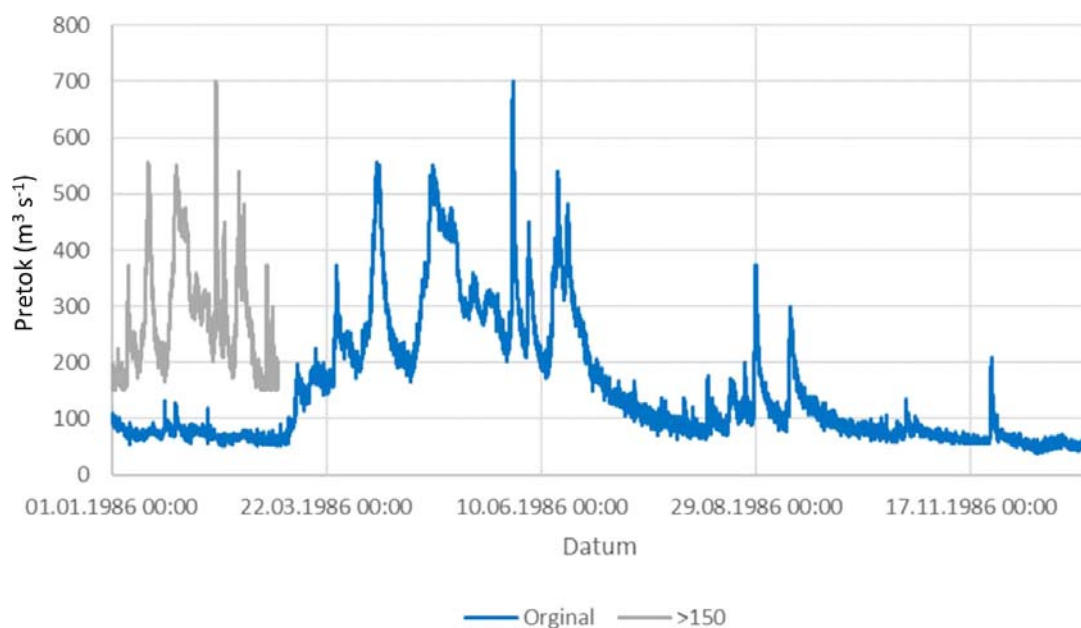
Medtem ko na začetku odseka mejne Mure neposredno dolvodno od hidroelektrarne Spielfeld/Špilje med letoma 1974 in 2003 nismo vključili vnosa proda, smo morali dolvodno na referenčnem odseku vračunati prod iz erozije dna na odseku mejne Mure gorvodno. Ta vnos je bil prevzet iz analize sedimentnega režima, v kateri smo prodonosnost za profil na vtočnem predelu referenčnega odseka iz sosednjih prečnih profilov interpolirali. V skladu s to analizo je bil povprečni vnos ok. 10.700 m^3 na leto. Ker je to material z dna, smo glede velikosti zrn vnesenega proda (sedimenta) uporabili volumske vzorce za Načelno vodnogospodarsko zasnovu za mejno Muro, po kateri znaša srednji premer zrn po izločitvi deleža finih delcev $< 1 \text{ mm}$ $41,4 \text{ mm}$.

6.1.3.2. Računski postopki za ugotovitev premestitvene zmogljivosti

Na podlagi kombinacije modelov RSim-3D in iSed se zdaj za vsak tip ukrepov izračuna spekter pretokov z rinjenimi plavinami in bo ugotovljena premestitvena zmogljivost na dnu. Z linearno regresijo izpeljemo formulo za razmerje med pretokom plavin in pretokom, ki se potem lahko uporablja za hidrogram pretoka. Na osnovi hidrograma pretoka od leta 1976 do leta 2019 nato izračunamo dolgoletna povprečja za tipe ukrepov.

6.1.3.3. Računski postopki za ugotovitev morfodinamike

Za ugotovitev morfodinamike se modelira hidrogram pretoka povprečno mokrega leta, ki vsebuje tudi dogodek kot enoletno poplavo s kombinacijo dvodimenzijskega modela Hydro_AS-2d z modelom za premeščanje rinjenih plavin iSed. Hidrogram pretoka leta 1986 smo izbrali kot reprezentativno velikost. Z izločitvijo časovnih obdobj, v katerih je bil pretok pod $150 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (ustreza srednjemu pretoku), se lahko bistveno skrajša krivulja trajanja in s tem čas, ki je potreben za izračun (Slika 58).



Slika 58. Hidrogram pretoka leta 1986 v vodostaju Mureck/Cmurek in skrajšanje krivulje trajanja z omejitvijo na pretoke nad $150 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$

6.1.3.4. Računski postopki za ugotovitev vplivov na vodostaje ob poplavah

V izdelanih prečnih profilih za tipe A, B in C ter za tip 0 smo izvedli stacionarne izračune v enakomernih strugah. Še posebej pomemben je v tej analizi glede vplivov na protipoplavno zaščito pretok ob enoletnih poplavah.

6.2. Rezultati

V tem razdelku predstavljamo rezultate numeričnega modeliranja hidrodinamike, premestitvene zmogljivosti in morfodinamike.

6.2.1. Hidrodinamika

Sprva bomo opisali rezultate tridimenzionalne, hidrodinamično-numerične simulacije z modelom Modells RSim-3D za opis lastnosti različnih tipov ukrepov. Kot zaključek sledita sinteza teh rezultatov in razprava. Ob tem je posebnega pomena strižna napetost, ki določa pretok plavin in tudi porazdelitev substrata. Poleg vpliva porazdelitve substrata je ekološko relevantna tudi porazdelitev hitrosti tokov in vodnih globin. V nadaljevanju predstavljamo rezultate na primeru pretoka enoletnega poplavnega dogodka.

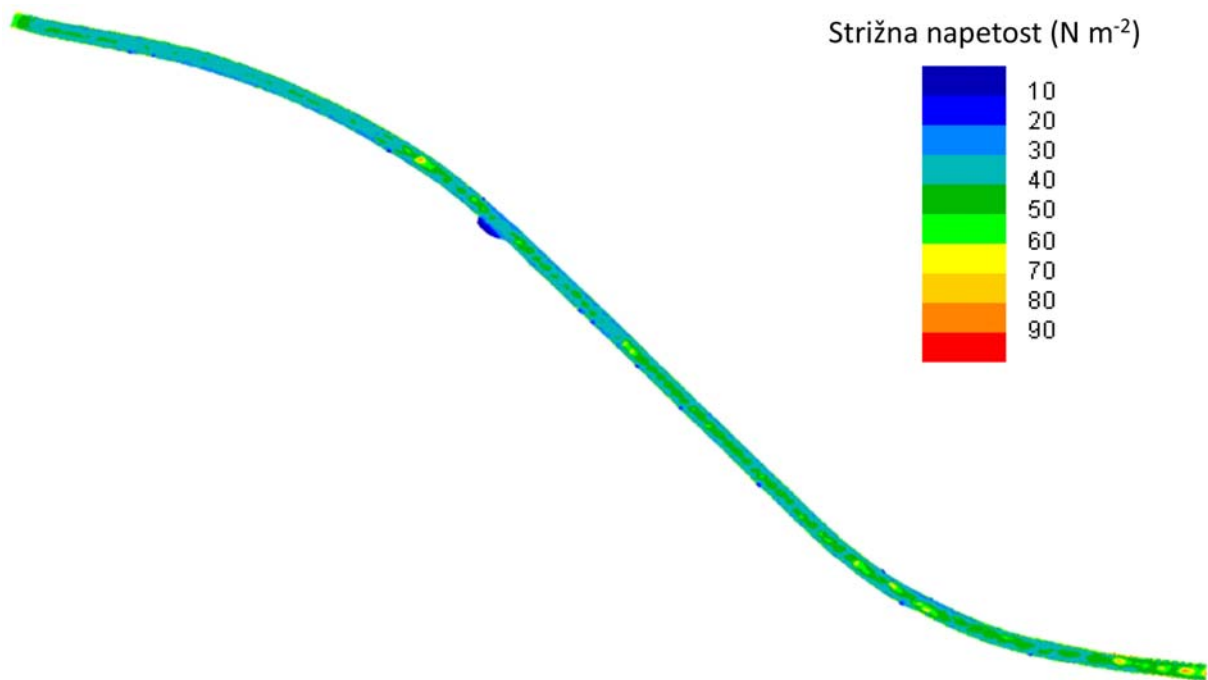
6.2.1.1. Tip 0

Tip 0 tukaj predstavlja aktualno morfologijo, katere položaj dna se stabilizira z ustreznim vnosom proda. Izhajamo iz dejstva, da se morfologija zaradi ozke regulacije tudi ob zadostnem vnosu proda glede obdržanja rečnega dna bistveno ne razlikuje od aktualne morfologije poglobljajoče se struge. Slika 59 kaže hitrost toka pri pretoku enoletne poplave. Ob tem se kažejo samo visoke hitrosti toka, ki se zmanjšajo samo v bližini bregov.



Slika 59. Hitrosti toka pri pretoku enoletne poplave v trenutni morfologiji referenčnega odseka

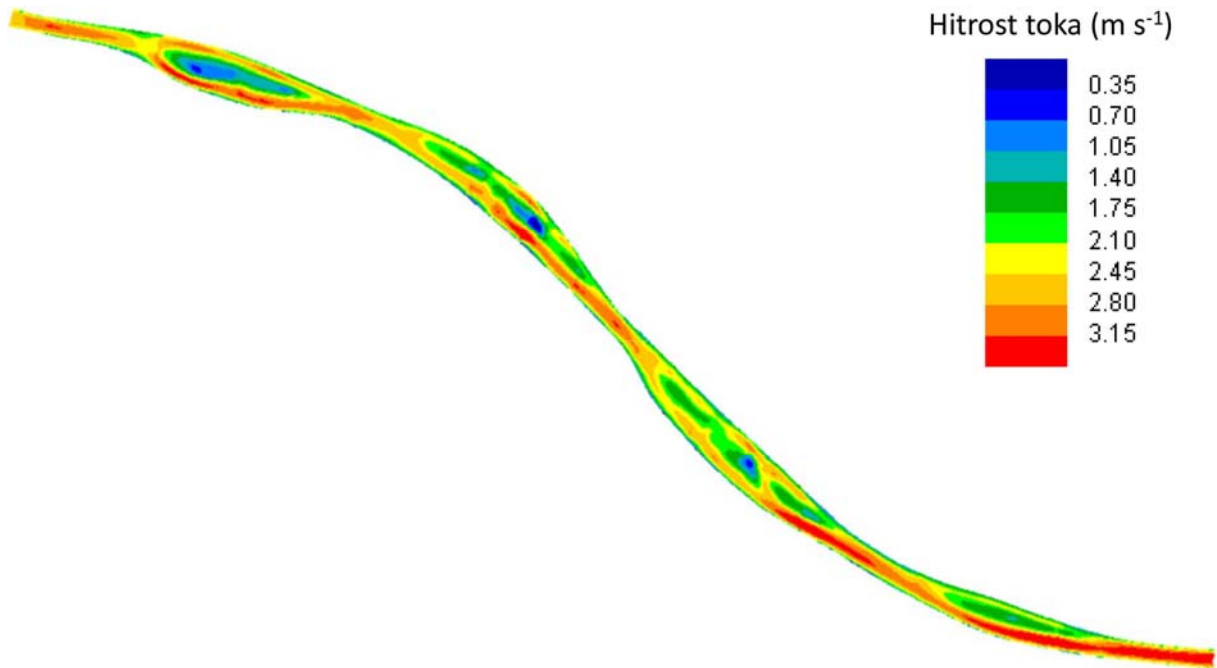
Strižne napetosti kažejo podobno sliko (Slika 60). Tudi tukaj se pojavljajo visoke vrednosti, pri čemer so vrednosti manjše vzdolž bregov, ker uravnavanje struge ne dopušča vijugastega poteka ali strmih bregov. Ob homogeni porazdelitvi strižne napetosti lahko pričakujemo, da se bodo rinjene plavine premestile brez močne interakcije z lokalno prisotnimi sedimenti na odseku.



Slika 60. Strižne napetosti pretoka enoletne poplave v trenutni morfologiji referenčnega odseka

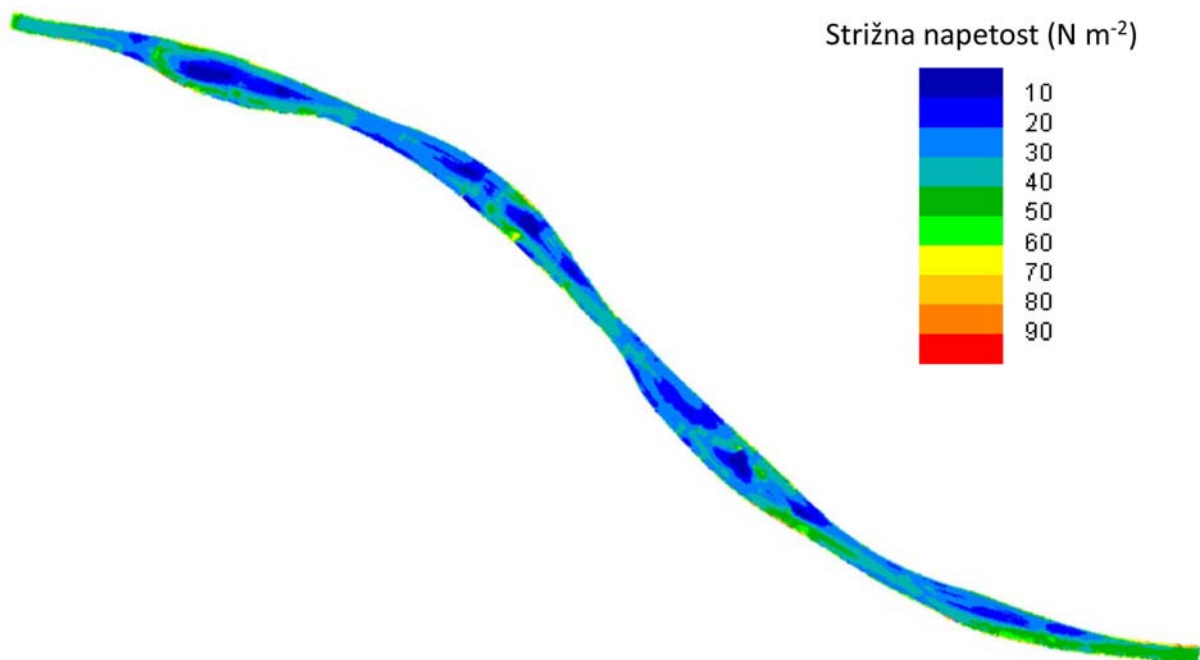
6.2.1.2. Tip A

Tip A kaže glede hitrosti tokov bolj diferencirano sliko (Slika 61). Večji širina in porazdelitev pretokov na glavne in stranske rokave povzročata nastanek prostorsko omejenih območij mirnejšega toka, ki je lahko različnim živalim zatočišče tudi ob večjih pretokih.



Slika 61. Hitrosti toka ob pretoku enoletne poplave v morfologiji tipa A na referenčnem odseku

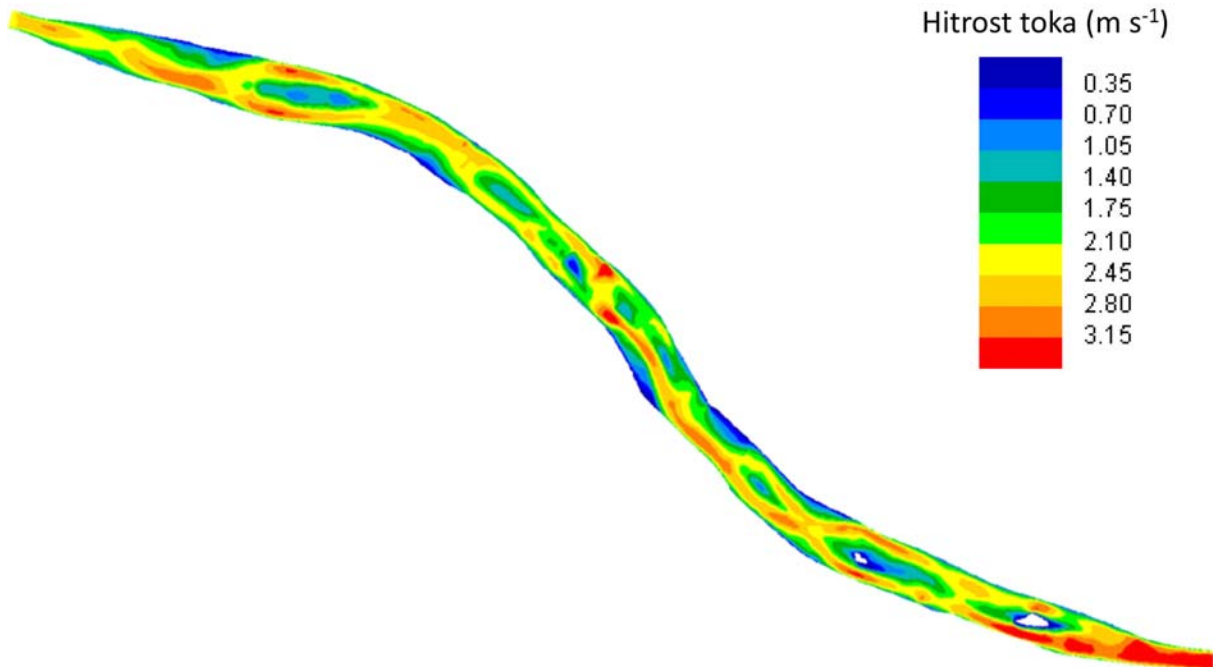
Bolj raznoliko porazdelitev kažejo tudi strižne napetosti, zaradi česar lahko pričakujemo agradacije in erozijska območja, kar bo prispevalo k morfološki dinamiki. Močnejša interakcija vnesenih sedimentov z morfologijo pomeni daljši zadrževalni čas sedimentov na odseku. Ker so zunanji bregovi še zmeraj zavarovani, je ta morfološka dinamika vsekakor omejena.



Slika 62. Strižne napetosti pretoka enoletnih poplav v morfologiji tipa A na referenčnem odseku

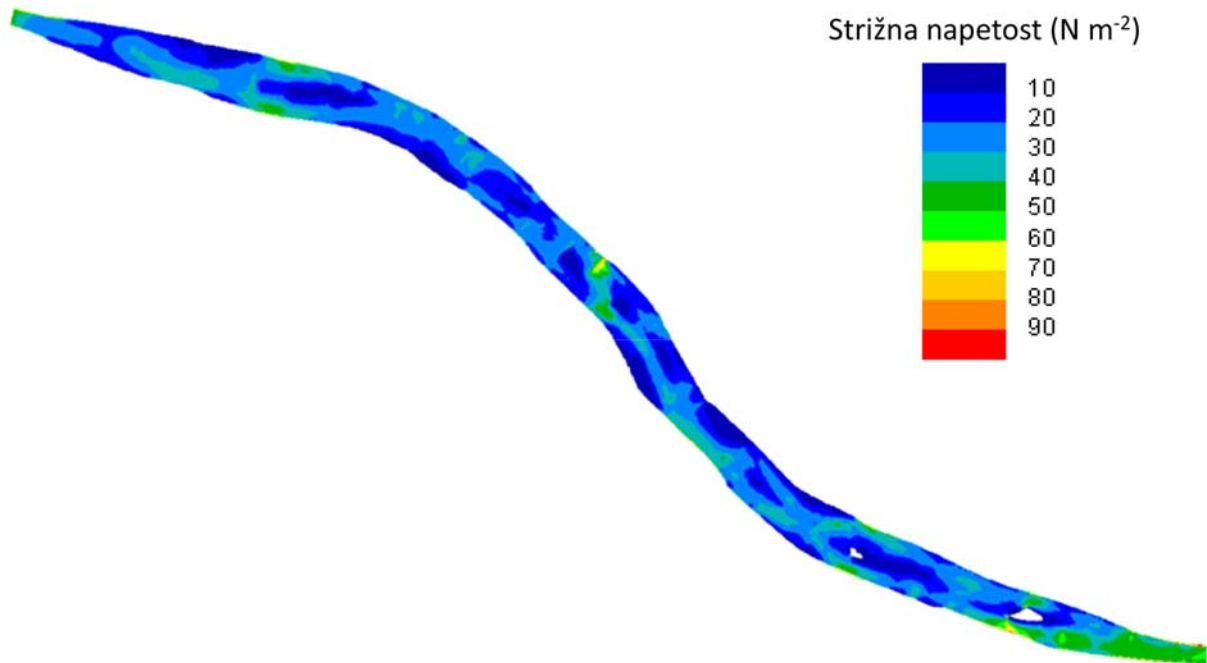
6.2.1.3. Tip B

Pri tipu B deluje razpoložljiva površina, kar pomeni, da sledijo območjem z višjo hitrostjo toka območja z manjšo hitrostjo. Tudi pri prikazanem pretoku ob poplavi se kaže širok spekter hitrosti tokov na odseku, posamezni otoki štrlijo nad vodno gladino in vzdolž črte vodostaja ob brežinah je mogoče pričakovati v strugi območja mirnega toka.



Slika 63. Hitrosti toka pretoka ob enoletni poplavi v morfologiji tipa B na referenčnem odseku

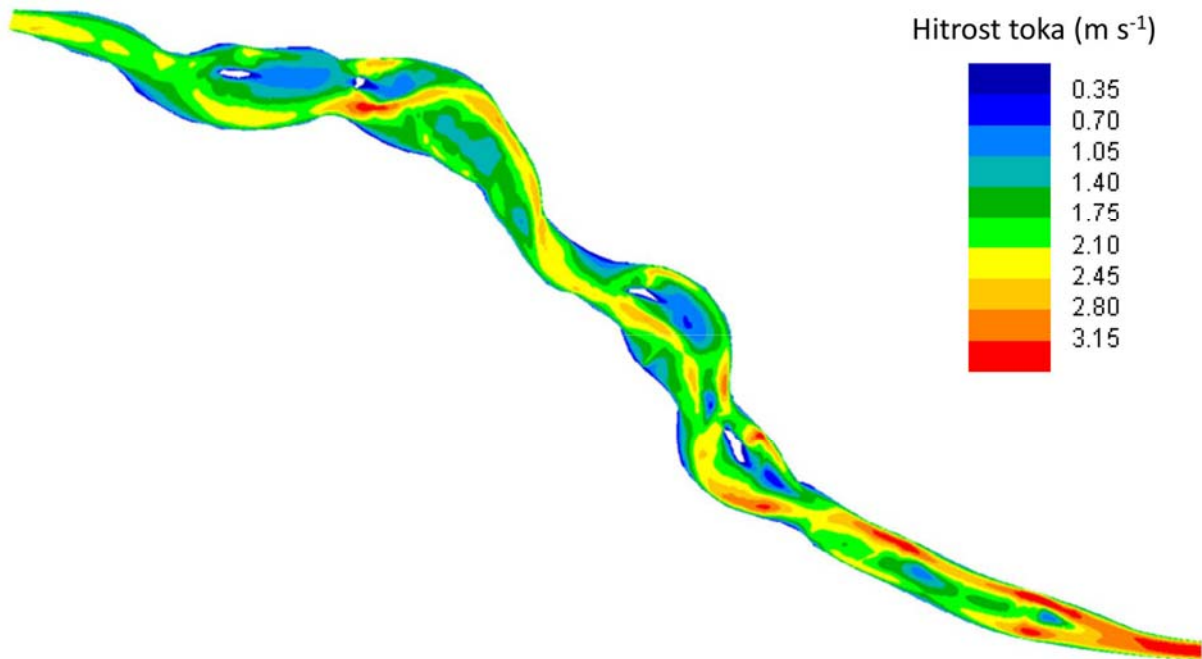
Učinek večje širine se v povprečju kaže v manjši strižni napetosti. Obstajajo samo še posamezna območja z močno obremenitvijo dna. Največje vrednosti so dosežene na lokalnih in zoženih odsekih s približno 50 N/m^2 . Zaradi zaporedja majhnih in velikih strižnih napetosti je treba znotraj koridorja računati s stalnimi premestitvami. Večje strižne napetosti se v glavnem pojavljajo vzdolž utrjenih zunanjih bregov, kjer je treba računati z globinsko namesto z bočno erozijo, kar vpliva na morfologijo.



Slika 64. Strižne napetosti pretoka ob enoletni poplavi v morfologiji tipa B na referenčnem odseku

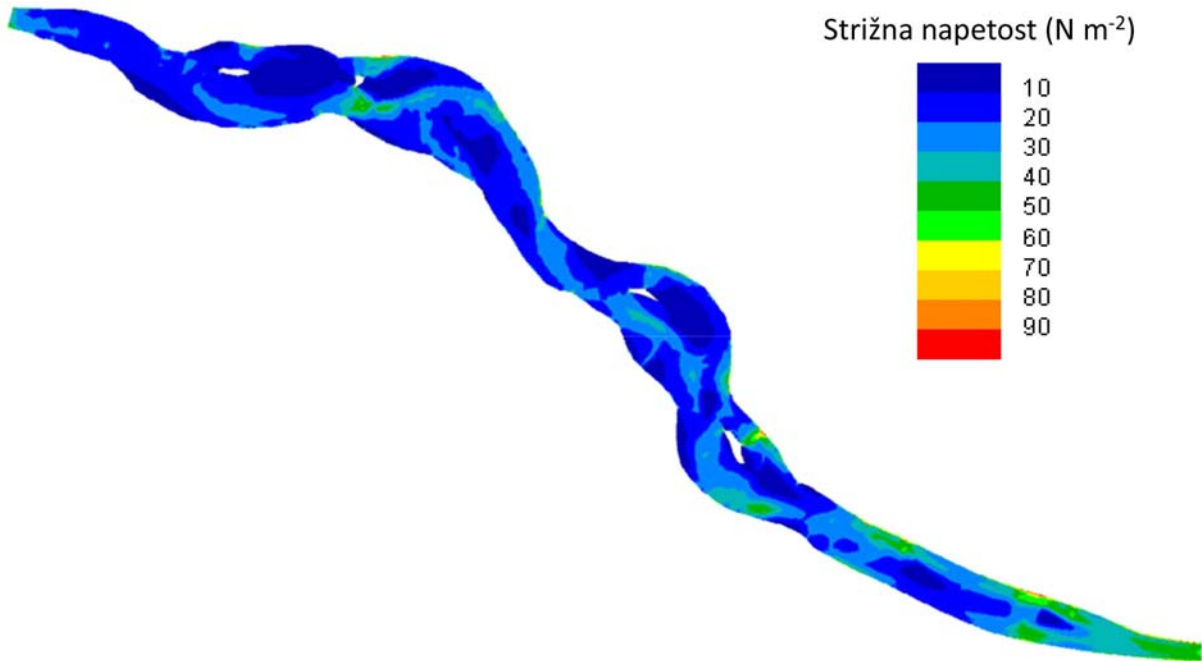
6.2.1.4. Tip C

Pri tipu C se močno in jasno kaže učinek razpoložljive širine na porazdelitev hitrosti toka (Slika 65). Oblikujejo se območja mirnega toka na velikih površinah in zaradi otokov, ki večkrat štrlijo čez gladino vode, se v senci tega toka pojavljajo tudi območja stoječe vode. Višje hitrosti toka so močno zmanjšane.



Slika 65. Hitrosti toka ob pretoku enoletne poplave v morfologiji tipa C na referenčnem odseku

Rezultati strižne napetosti pri tipu C kažejo, da se tukaj lahko širijo večji pretoki v strugi, ki se odvajajo brez velikih obremenitev dna. Hkrati se strižne napetosti močno razlikujejo, tako da je treba računati z velikim sortiranjem substrata in z visoko morfodinamiko. Ker so zunanji bregovi erozivni, se nenehno spreminjajo okvirni pogoji za morfologijo. Treba je računati na veliko morfodinamiko. Medtem ko je treba računati na prehodno premeščanje skozi odsek v tipu 0, premeščanje proda pri tipu C v skladu s porazdelitvijo strižnih napetosti poteka v manjših prostorskih razmerah (od območja hitrega toka vzdolž nožišča brežine do naslednjega prodišča).

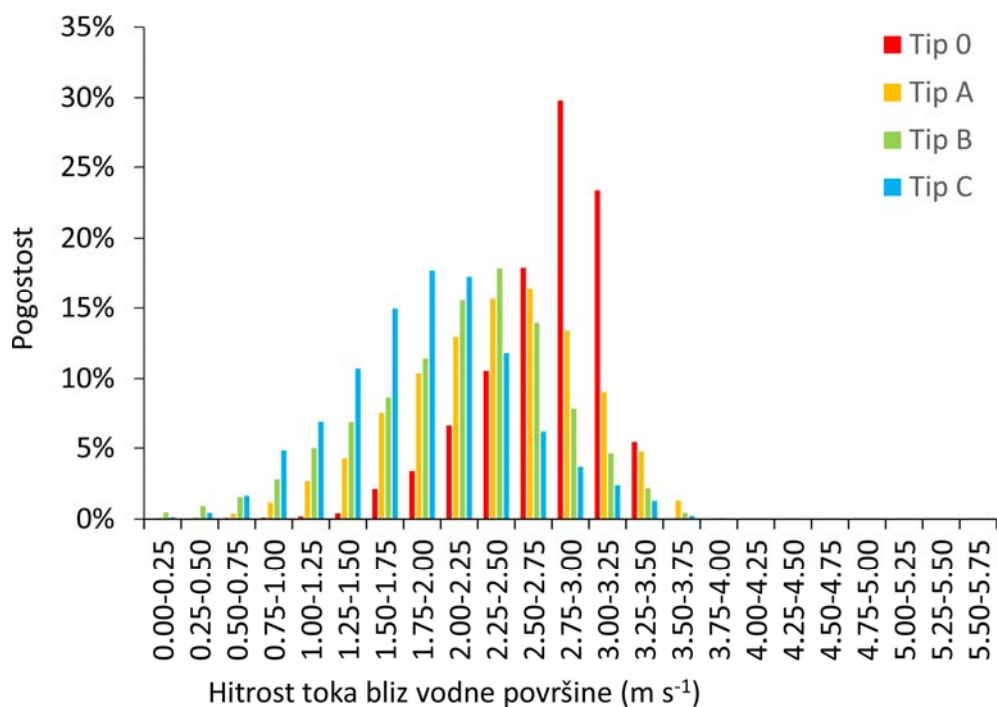


Slika 66. Strižne napetosti pretoka ob enoletni poplavi v morfologiji tipa C na referenčnem odseku

6.2.1.5. Povzetek

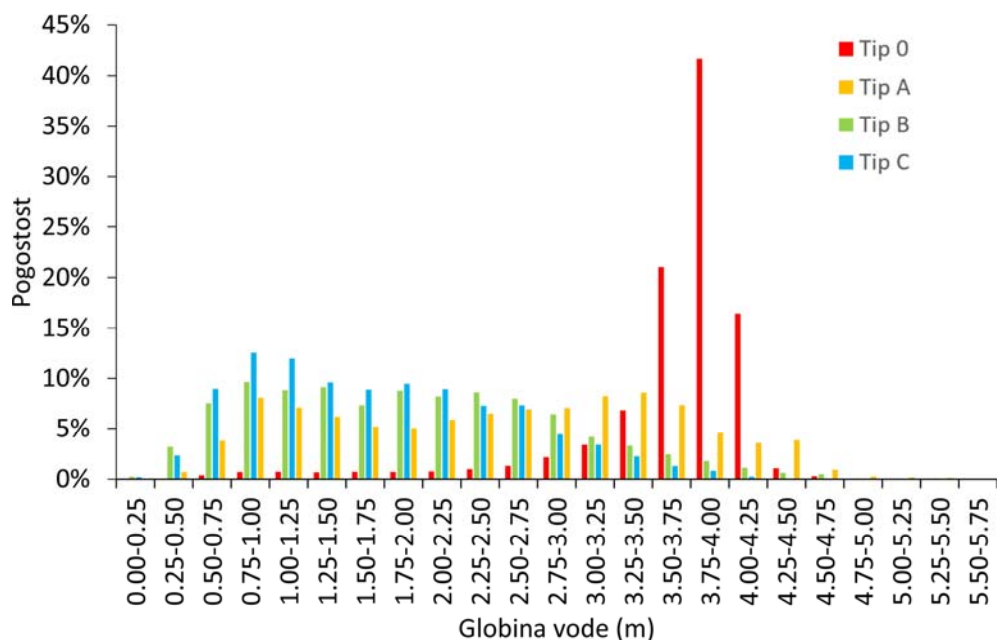
V nadaljevanju zaporedoma obravnavamo hidrodinamične parametre. Sledijo analize porazdelitve hitrosti toka na površini gladine, strizne napetosti in globine vode ob pretoku enoletnega poplavnega dogodka.

Čim obsežnejši so ukrepi, tem bolj heterogena je porazdelitev hidrodinamičnih velikosti ob hkratnem premikanjem pogostejših velikosti k manjšim vrednostim. Medtem ko obstoječa geometrija velikokrat poda hitrosti toka med $2,75 \text{ m s}^{-1}$ in $3,00 \text{ m s}^{-1}$, so pri tipu C najpogostejše hitrosti toka med $1,75$ in $2,00 \text{ m s}^{-1}$ (Slika 67). Medtem ko se je najpogostejši razred hitrosti toka v obstoječi geometriji pojavil na 30 % površin, je pri tipu C najpogostejši razred hitrosti toka zaradi heterogene porazdelitve samo še na 18 % površine.



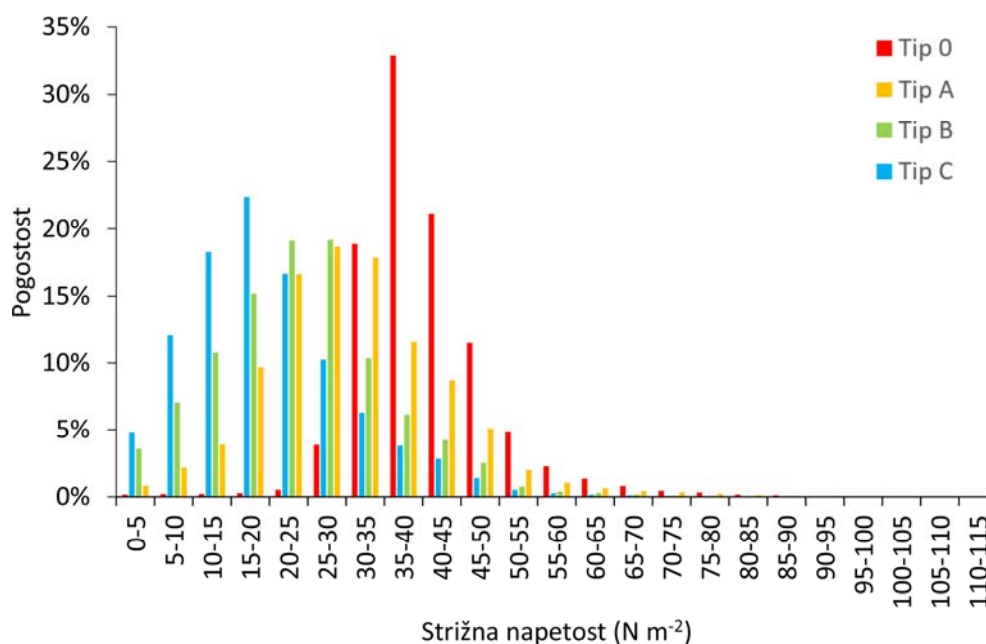
Slika 67. Porazdelitve hitrosti toka v različnih tipih ukrepov

Učinek ukrepov postane jasen predvsem v porazdelitvi globin vode (Slika 68). V trenutnem stanju se kaže ploska struga, v kateri jasno prevladujejo globine med 3,75 m in 4,00 m na 42 % površin. Pri tipih ukrepov noben razred globine vode ne doseže večje pogostosti od 13 %, močno pa prevladujejo majhne globine vode.



Slika 68. Porazdelitev globin vode pri različnih tipih ukrepov

Podobna slika se kaže za porazdelitev strižnih napetosti (Slika 69). Medtem ko so v obstoječi geometriji prevladovale strižne napetosti v razredu od 35 N m⁻² do 40 N m⁻² na 33 % površine struge, se je delež površin tega razreda zreduciral na 4 %, strižne napetosti med 15 in 20 % pa prevladujejo z deležem površin, ki znaša 22 %.

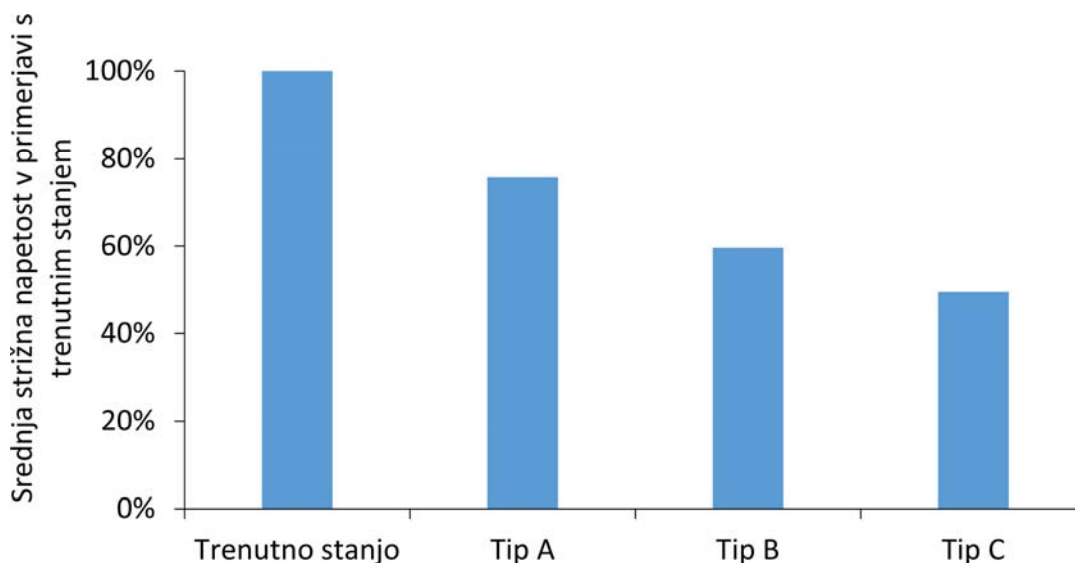


Slika 69. Porazdelitev strižnih napetosti pri različnih tipih ukrepov

Heterogene porazdelitve kažejo večjo ponudbo različnih habitatov, tudi ob visoki vodi ima živalski svet v Muri zatočišča. Plitvine z majhno hitrostjo toka tvorijo območja plitve vode vzdolž bregov in ščitijo mlade ribe. Zaradi visoke variance in hkrati majhne vrednosti strižnih napetosti lahko pričakujemo dinamiko, ki redno mobilizira prod in ga spet odlaga. Zaradi svežega in rahlega načina odlaganja proda je primeren za ribje vrste, ki odložijo ikre v prod in kopljejo jamice za odlaganje iker.

Srednja strižna napetost se zmanjšuje v primerjavi s trenutnim stanjem za 24 % pri tipu ukrepov A, za 40 % pri tipu B ter za 51 % pri tipu C (Slika 70). Ta redukcija kaže na močno spremembo okvirnih pogojev za pretok rinjenih plavin. Ker pa se spremeni velikost omočene površine s tipom ukrepov, ker se pretok rinjenih plavin začne šele nad določenim pragom

vrednosti in ker ni linearno povezan s strižno napetostjo, lahko šele simulacija premeščanja plavin končno poda razloge za razlike v pretoku rinjenih plavin.



Slika 70. Srednje strižne napetosti pri treh tipih ukrepov (A, B in C) v razmerju do srednje velikosti v trenutni geometriji

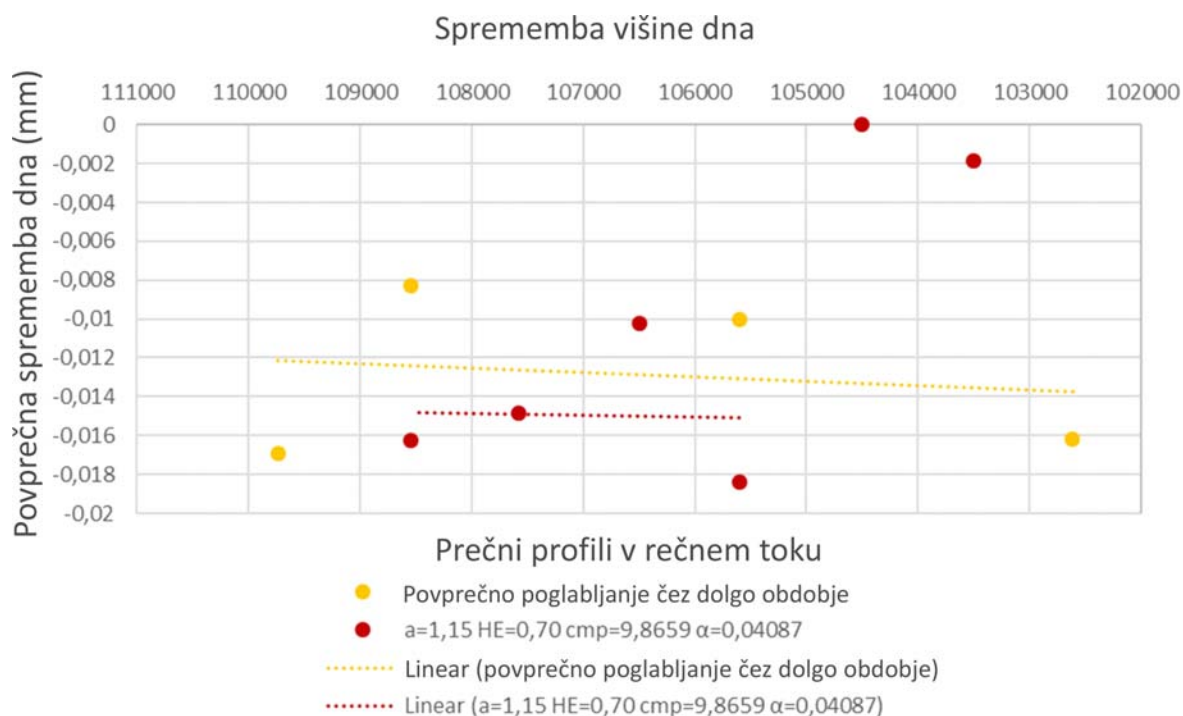
6.2.2. Premeščanje plavin

Najprej je prikazan rezultat umerjanja, nato pa morfodinamične spremembe pri tipih ukrepov A, B in C na podlagi letnega hidrograma.

Rezultat umerjanja modela

Na podlagi vrednosti 9,87 za predhodni faktor in 0,041 za kritično, brezdimenzijsko strižno napetost ter popravka »hiding-exposure« v vrednosti 0,70 smo dosegli dobro splošno ujemanje rezultatov modela z merjenimi podatki.

Že podatki izmerjenih profilov so pokazali določeno nihanje. V skladu z modelom ne pride do homogenega poglobljanja na referenčnem odseku. To je verjetno posledica lokalnih tokovnih razmer. Poleg tega je treba na tem odseku omeniti tudi učinek iznihajočega se vzdolžnega padca. Za profile na iztočnem predelu je v modelu značilna manjša poglobitev dna. Vrednosti na iztočnem predelu se obravnavajo kot ekstremne in se pri umerjanju ne upoštevajo.



Slika 71. Rezultat umerjanja modela premeščanja rinjenih plavin, izvedenega na podlagi primerjave merjenih in modeliranih vrednosti poglobljanja

V nadaljevanju prikazujemo premestitvene zmogljivosti, ugotovljene pri tipih ukrepov, ki odražajo potrebo po plavinah posameznih ukrepov. Zaključno je opisana simulirana morfodinamika pri tipih ukrepov.

6.2.2.1. Premestitvena zmogljivost

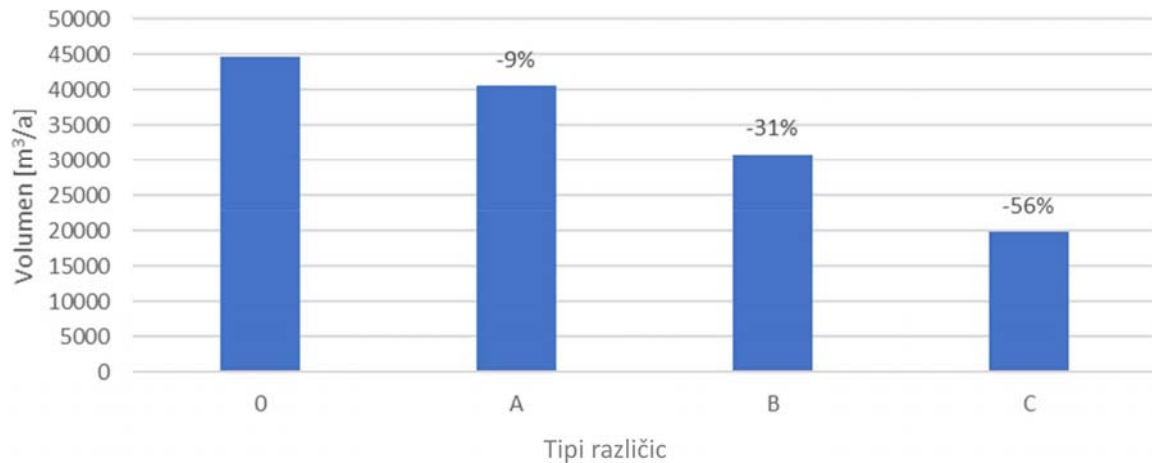
Izračun na podlagi kombinacije modelov RSim-3D in iSed

Z modelom RSim-3D smo najprej za vsak tip ukrepov izračunali 20 pretokov, s katerimi smo v enakih prostorskih intervalih pokrili celotno območje pretoka, ki v skladu s predhodnimi izračuni omogoča pretok plavin. Na podlagi teh izračunov smo potem lahko izračunali celotno prodnosnost za hidrogram pretoka (1974–2019) na vodostaju Mureck/Cmurek in srednjo letno prodnosnost (Preglednica 10).

Preglednica 10: Letne prodnosnosti različnih ukrepov na osnovi premestitvene zmogljivosti

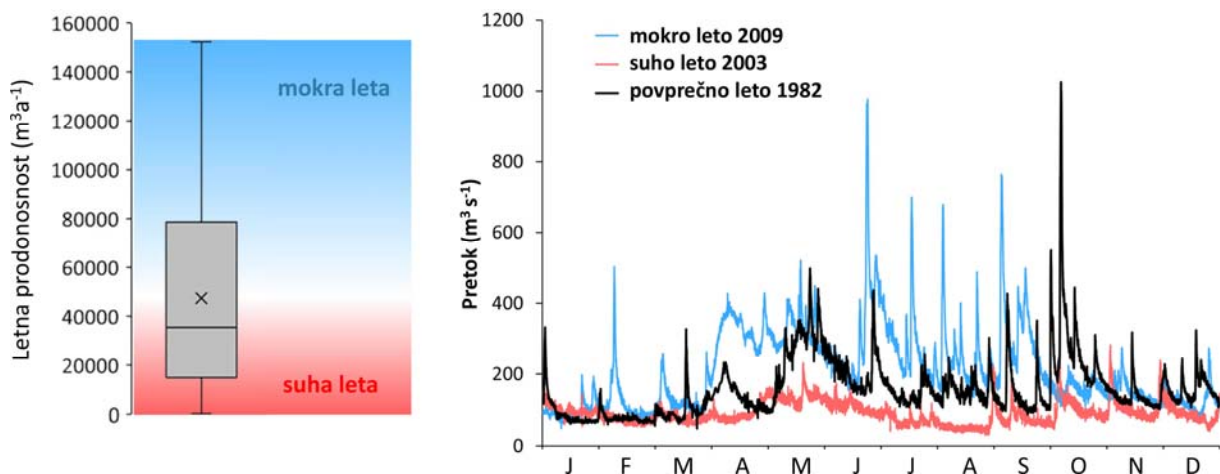
Ukrep	Masa ($t a^{-1}$)	Volumen brez deleža por ($m^3 a^{-1}$)	Volumen z deležem por ($m^3 a^{-1}$)
		Predpostavka gostote trdnih snovi v obsegu 2650 kg m^{-3}	Predpostavka deleža por v obsegu 30 %
Tip 0	82.902	31.284	44.691
Tip A	75.236	28.391	40.558
Tip B	57.243	21.601	30.859
Tip C	36.643	13.828	19.754

Rezultat izračuna razmerij teh vrednosti prikazuje Slika 72. Če se premestitvena zmogljivost izenači s potrebnim vnosom plavin za sedimentni režim v ravnotežju, potrebuje tip A za 9 % manj plavin, tip B za 31 %, in tip C za 56 % manj dodatnih vnosov plavin kot trenutna geometrija.



Slika 72. Potreben vnos plavin različic ukrepov za sedimentni režim v ravnotežju, z navedbo zmanjšanja potrebnih vnosov plavin v primerjavi s trenutnim stanjem

Premestitvena zmogljivost je torej zelo odvisna od hidrologije. Potreben vnos plavin lahko niha med vrednostjo blizu ničle in vrednostjo nad 150.000 m³ (Slika 73).



Slika 73. Premestitvena zmogljivost oz. potreben vnos plavin v odvisnosti od hidrologije

Obrazložitev rezultatov

Z analizo premestitvene zmogljivosti smo ugotovili potreben vnos plavin ob različnih tipih ukrepov. V tem razdelku preverjamo doslednost teh rezultatov na podlagi primerjav z različnimi podatki. Ker so na voljo izključno podatki o trenutnem položaju in ni podatkov iz večjih renaturacijskih ukrepov z relevantnim vnosom sedimenta, za primerjave upoštevamo premestitveno zmogljivost v obsegu 45.000 m³, ki smo jo izračunali za tip 0. Ta prodonosnost se zdaj primerja z obstoječimi podatki o pretoku plavin ali iznosu plavin in z drugo računsko metodo.

Prodonosnost zaradi erozije dna ob mejni Muri. Če ne upoštevamo možnega, majhnega vnosa plavin v mejno Muro gorvodno s strani hidroelektrarne pri Ceršaku, meritve prečnih profilov na odseku mejne Mure dopuščajo izračun prodonosnosti. V prečnem profilu ob koncu odseka mejne Mure je povprečna prodonosnost v obdobju od 1974 do 2018 znašala skorajda 29.000 m³. Da je tudi vrednost na koncu erozijskega odseka mejne Mure bistveno manjša kot izračunan potreben vnos plavin, lahko razložimo z morebitno večjo erozijsko odpornostjo poglobljajočega se dna zaradi oblikovanja vrhnje plasti in z grobo razvrstitvijo zrnivosti v primerjavi s fino zrnavostjo dodanega materiala. Če uporabljamo zaporedne meritve, dobimo kot maksimalno prodonosnost prečnega profila skorajda 130.000 m³ a⁻¹ (na koncu odseka mejne Mure v obdobju 1974–1975). Ob tem je treba upoštevati, da samo dve meritvi omejitata zaključke glede višine dna, sedimentnega režima in prodonosnosti. Meritvene negotovosti lahko imajo pomembno vlogo in dobljena vrednost je tudi močno odvisna od hidrologije analiziranega obdobja.

Iznos sedimenta v okviru renaturacije v Gosdorfu. V obdobju od izvedbe gradbenih del naprej je bil odsek pri Gosdorfu štirikrat izmerjen, tako da je bil dokumentiran iznos vnesenega sedimenta iz izkopa stranskega rokava, pri čemer je del iznosa izviral iz bočne erozije. Če izhajamo iz števila tovornjakov Okrajnega urada za gradnje (*Baubezirksleitung*), je bil od novembra 2006 v Muro vnesen sediment v obsegu 150.000 m³. Habersack et al. (2013) so za obdobje od maja 2007 do decembra 2009 na podlagi meritev ugotovili iznos v obsegu 42.750 m³, dodatno k 82.500 m³, ki je bil iznesen že med vnosom materiala. Če temu dodamo še vnos iz erozije dna gorvodno (pribl. 3000 m³ a⁻¹), dobimo v obdobju od maja 2007 do decembra 2009 povprečen iznos v obsegu pribl. 44.000 m³ a⁻¹. Ta vrednost je skoraj identična z vrednostjo premestitvene zmogljivosti, ki smo jo izračunali za tip 0. Dodatno je treba upoštevati, da je bil iznos v obdobju raziskave neenakomeren (visok delež iznosa med izvedbo gradnje) in da ni jasno, v katerem obsegu hidrologija v kratkem raziskovalnem obdobju treh let ustreza povprečnim pogojem. Ker je bil sediment sestavljen predvsem iz dodanega materiala, je dobljena vrednost glede zrnivosti mogoče dobro primerjati s potrebnim dodatkom v prihodnosti.

Poenostavljen izračun v trapeznem profilu. Plitva struga regulirane Mure dopušča posnetek s preprostim trapeznim profilom, v katerem smo za obrazložitev rezultatov izračunali pretok plavin. Ob tem je bila uporabljena formula po Wongu in Parkerju (2006), ki temelji na formuli Meyerja-Petra in Müllerja (1948), odpovedali smo se upoštevanju faktorja narebrenosti in smo namesto tega uporabili rahlo spremenjene parametre formule. Če upoštevamo enak premer zrn kot pri modelu premestitvene zmogljivosti (28,5 mm), dobimo na osnovi razpoložljivega

hidrograma pretoka srednjo letno prodonosnost v obsegu $48.000 \text{ m}^3 \text{ a}^{-1}$, ki se zgolj neznatno razlikuje od rezultata tukaj uporabljene metode.

Meritve pretoka plavin na mejni Muri. Habersack et al. (2013) so v avstrijski Radgoni/Bad Radkersburgu izvedli meritve plavin, na podlagi katerih smo lahko izdelali funkcijo pretoka plavin. Vendar so za to bile na voljo zgolj tri meritve iz leta 2012 in največji pretok je znašal $380 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Če uporabljamo funkcijo pretoka plavin avtorjev Habersacka et al. (2013) za celotni hidrogram pretoka v obdobju med letoma 1976 in 2019, dobimo srednjo letno prodonosnost v obsegu zgolj $9000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Zaradi navedene negotovosti ta vrednost ni orientacijske narave. Meritev Habersacka et al. (2013) iz leta 2010 nakazuje, da je pretok plavin lahko tudi bistveni višji.

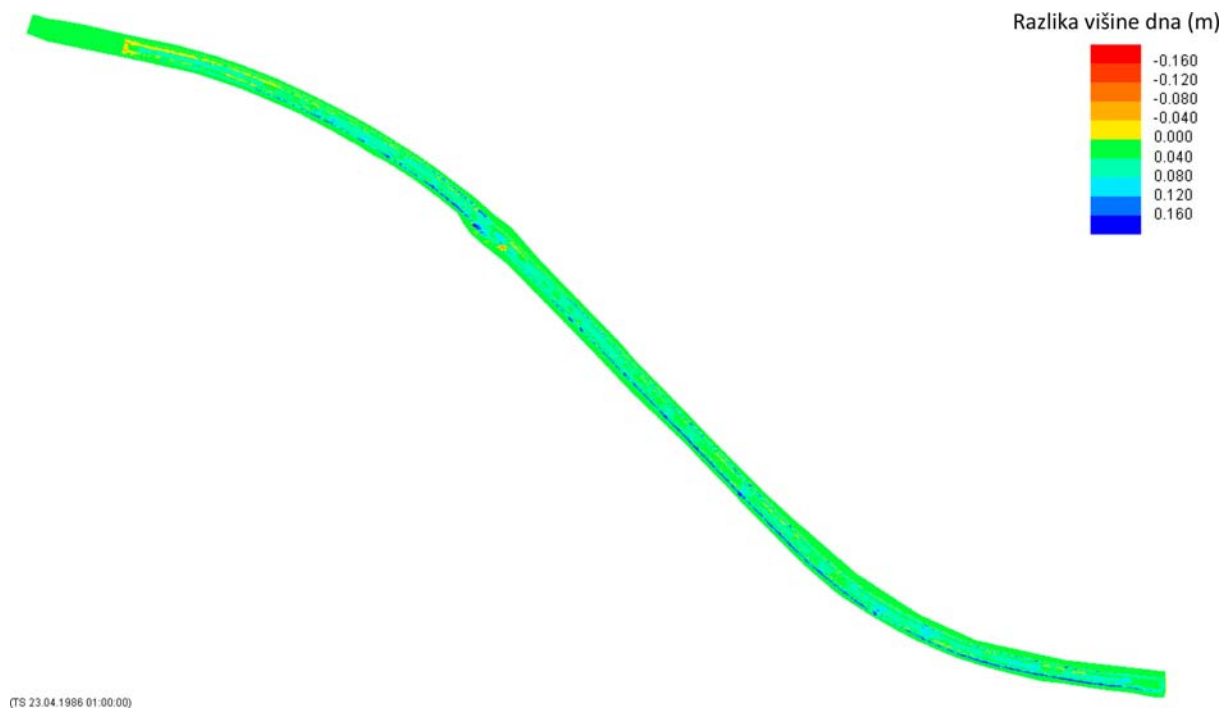
Primerjava z merjenimi vrednostmi prodonosnosti na zgornji Dravi. Na zgornjem delu Drave v Dellachu v dolini Drave od devetdesetih let prejšnjega stoletja poteka intenzivno raziskovanje prodonosnosti, ki se lahko uporablja za primerjalne namene. Na podlagi meritev s košarami v obdobju od leta 2007 do 2019 je bila ugotovljena srednja prodonosnost v obsegu 53.000 t (Habersack et al., 2021), kar ob upoštevanju specifične gostote 2650 kg m^{-3} in deleža por v obsegu 30% ustreza volumski prodonosnosti $28.000 \text{ m}^3 \text{ a}^{-1}$. V skladu z ugotovitvami Habersacka in Laronneja (2002) znaša širina struge tam pribl. 40 m , (71 m ob regulirani mejni Muri), padec $1,9 \text{ ‰}$ ($1,4 \text{ ‰}$ v regulirani mejni Muri), in velikost zrn $38,7 \text{ mm}$ (v izračunih premestitvene zmogljivosti je bila uporabljena velikost zrn $28,5 \text{ mm}$). Obrazložitevna primerjava z drugimi rekami je problematična, ker bi v Muri ob zadostnem vnosu plavin prevladoval drugi sedimentni režim kot na zgornji Dravi, kjer se tudi pojavi poglobljanje dna (trenutni razvoj na zgornji Dravi z upoštevanjem renaturacijskih ukrepov avtorjem ni znan). Vsaj glede velikosti se zdi izračunan potreben vnos plavin za tip 0 realističen.

Povzetek obrazložitve. V skladu s primerjavo se zdi izračunan potreben vnos plavin za tip 0 razumljiv. Zato lahko izhajamo iz tega, da so tudi izračunane vrednosti za premestitveno zmogljivost v treh tipih ukrepov (A, B in C) realistične, ker so bile določene z enako kombinacijo modelov.

6.2.2.2. Morfodinamika

Rezultati modeliranja morfodinamike

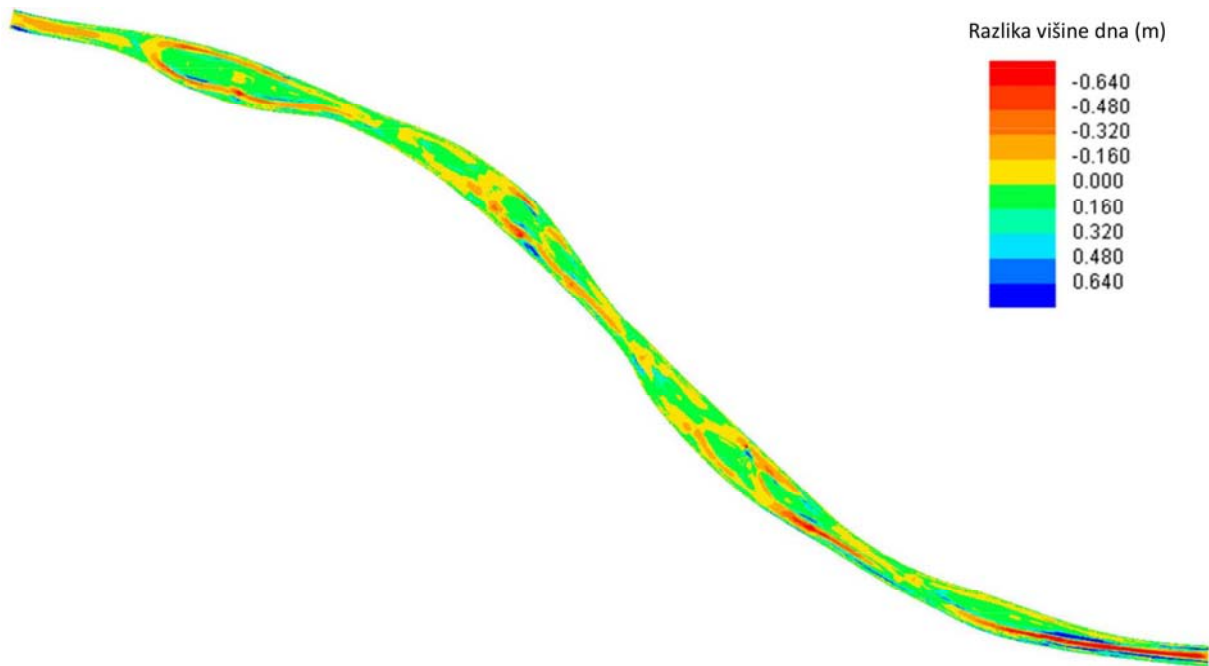
Primerjava tipov ukrepov kaže, da v regulirani strugi trenutnega stanja tudi ob zadovoljivem vnosu plavin strukture, ki bi bile značilne za reke, ne nastanejo (Slika 74), medtem ko se pri tipih ukrepov A, B in C odvijajo naravni morfodinamični procesi.



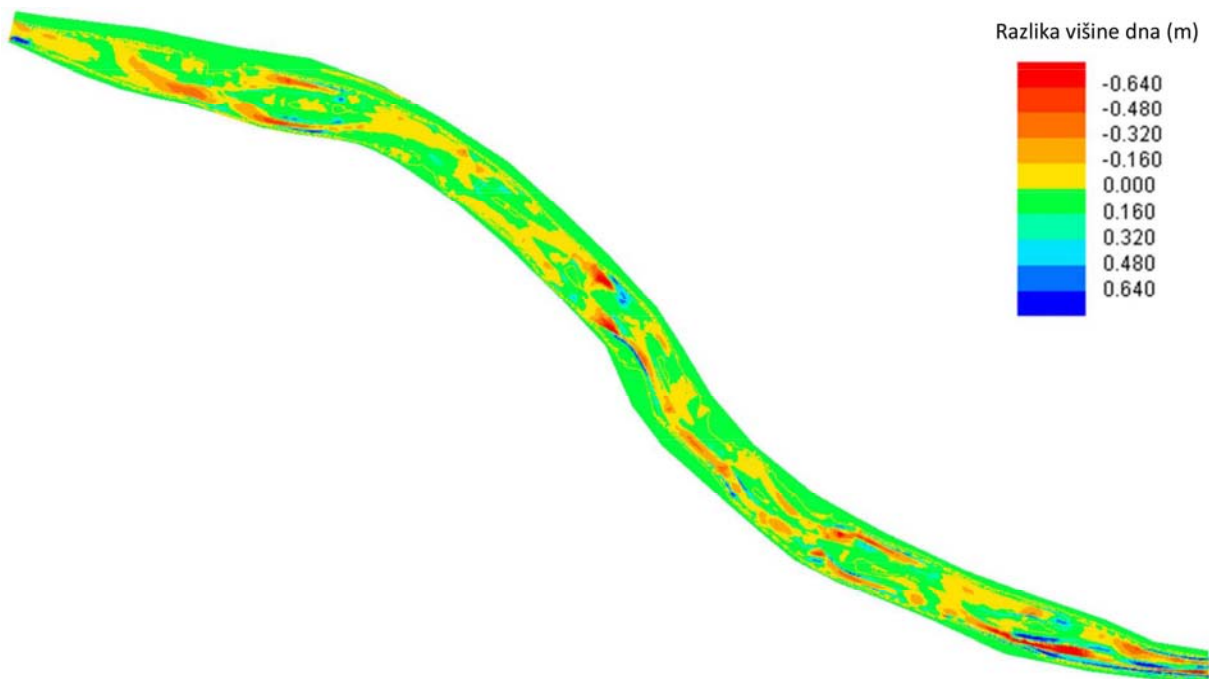
Slika 74. Morfodinamika pri tipu 0 po izračunu hidrograma pretoka leta 1986

Morfodinamični procesi pri tipu A (Slika 75) in tipu B (Slika 76) potekajo v ozkih pasovih, medtem ko se pri tipu C (Slika 77) pojavljajo velike površine, ki oblikujejo morfodinamiko.

Preprečena bočna erozija na zunanjih bregovih tipov A in B povzroča premestitve vzdolž bregov odvisno od pretoka, ki povzročijo tudi večje erozije.

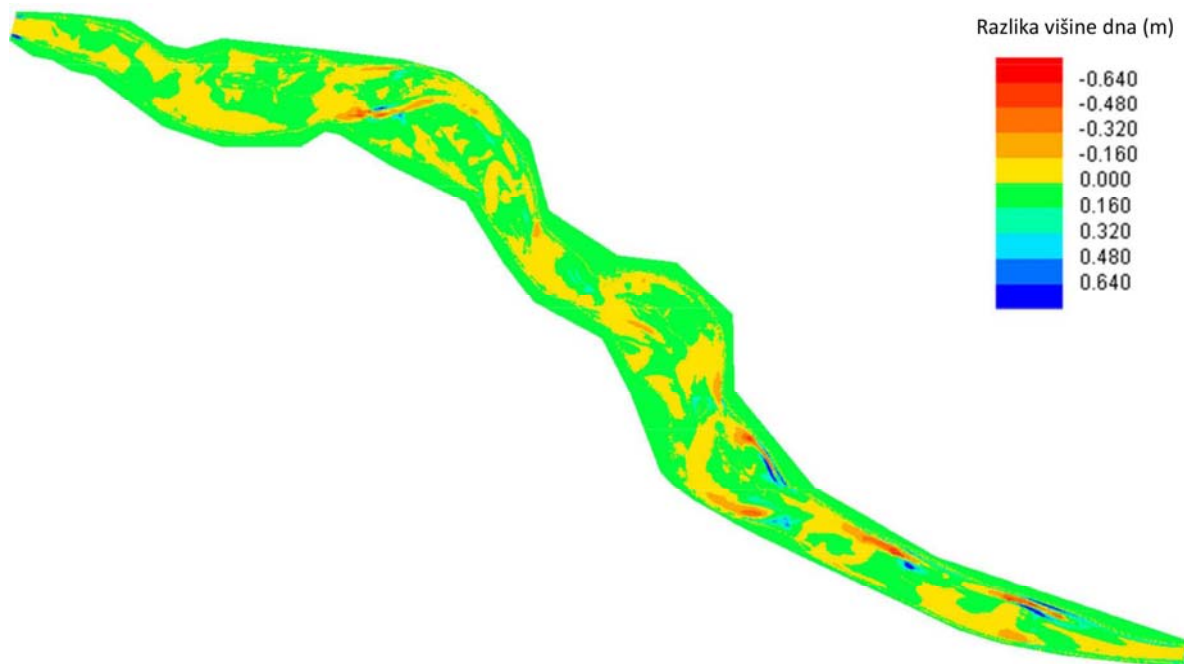


Slika 75. Morfodinamika pri tipu A po izračunu hidrograma pretoka leta 1986



Slika 76. Morfodinamika pri tipu B po izračunu diagrama pretoka leta 1986

Velikost površin, znotraj katerih potekajo premestitve, se povečuje z velikostjo tipa ukrepa. V skladu s tem je pri tipu C največja površina udeležena pri premestitvah (Slika 77).



Slika 77. Morfodinamika pri tipu C po izračunu diagrama pretoka leta 1986

Dodatni izračuni kažejo intenzivno dinamiko predvsem pri tipu C. Poleg prestrukturiranja, degradacije in agradacije pride tudi do agradacije v obliki podkev na tistih območjih, kjer se tokovni prerez razširi, kar spada med znane morfodinamične pojave (prim. Tritthart et al., 2011).

6.2.3. Vodostaji visoke vode

Raziskali smo dva scenarija; po prvem se rečno dno dvigne za 80 cm in po drugem se premešča celotni prod znotraj prečnega profila. Če bi se izkazalao, da pri teoretičnem ekstremnem drugem scenariju ni negativnih vplivo na protipoplavno zaščito, lahko realno pričakujem na splošno izboljšane pogoje za protipopavno zaščito.

Rezultati raziskave vodostajev visoke vode kažejo, da se vodostaji stoletnega poplavnega dogodka v prvem scenariju kot tudi v drugem scenariju ne dvignejo. Ob povprečnem dvigu rečnega dna za 80 cm (senarij 1) se višina vodostaja stoletnega poplavnega dogodka zmanjša za 1,34 m v tipu A, za 1,77 m v tipu B in za 2,54 m v tipu C. V drugem scenariju (premeščanje celotnega proda znotraj prečnega profila) znaša padec vodostaja še zmeraj 0,10 m v tipu A, 0,19 m v tipu B in 0,07 v tipu C. Kot navedeno gre pri drugem modeliranem scenariju za teoretični scenarij, ki je scenarij za najslabši primer glede vodostaja visoke vode. Zaradi ukrepov lahko pričakujemo v skladu s predmetno analizo izboljšanje protipoplavne zaščite, ker lahko izhajamo iz padca vodostaja visoke vode.

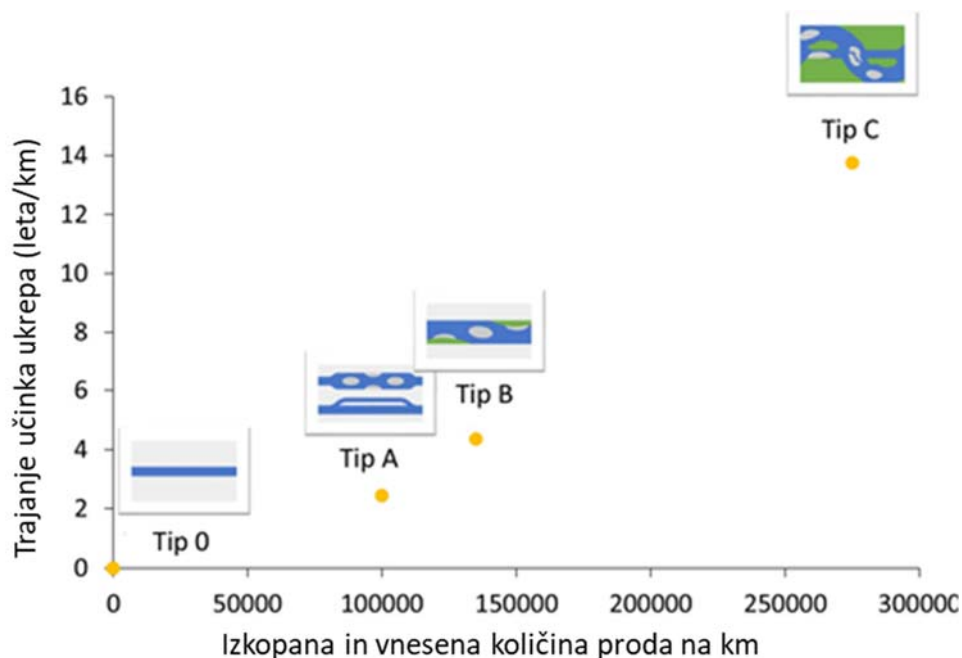
7. DOPOLNITVENE ANALIZE GLEDE UČINKOV UKREPOV

V razdelku 6.2.2 smo ugotovili, da se z velikostjo ukrepa zmanjšuje premestitvena zmogljivost in s tem potrebne količine rinjenih plavin (proda) za stabilizacijo dna. Potrebne količine proda se lahko primerja z ocenjenim presežkom materiala (D.T1.3.1) pri izvedbi ukrepov (Preglednica 11). Večji ukrepi, posebej ukrepi tipa C, omogočajo večje količine za vnos rinjenih plavin, ki se zaradi manjše premestitvene zmogljivosti hkrati počasneje odplavijo.

Preglednica 11. Presežek materiala iz inicialnih ukrepov tipov ukrepov

Tip ukrepov	Kubature premikov materiala (m ³ na kilometer dolžine reke)	Potrebne količine proda (m ³)
0	0	44.691
A	100.000	40.558
B	135.000	30.859
C	275.000	19.754

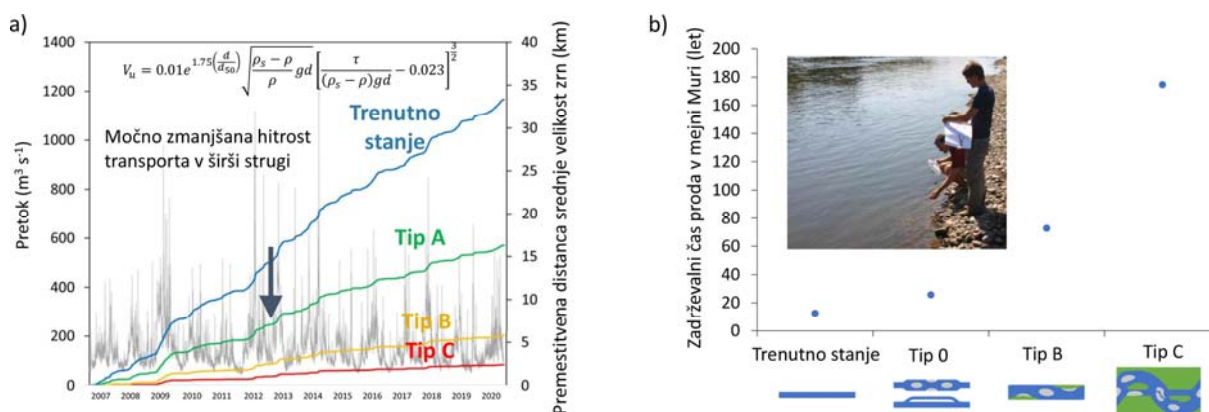
Na podlagi razmerja med presežnimi kubaturami iz različnih tipov ukrepov in vsakokratnih potrebnih količin proda lahko izračunamo trajanje učinka ukrepov (Slika 78). V skladu s tem bi izvedba po tipu C povzročila najdaljši časovni učinek: Izvedba ukrepa C dolžine 1 km bi zagotovilo zadostno količino, kolikor jo zahteva celoten odsek tipa C za obdobje 14 let. Medtem ko pri tipu 0 ni materialnega presežka in se od začetka naprej letno doda pribl. 45.000 m³ proda ali pa bi jih bilo treba dati na voljo zaradi izboljšane prehodnosti gorvodno.



Slika 78. Trajanje učinka pridobljenega proda na tekoči kilometer različnih tipov ukrepov upošteva potreben vnos proda za odsek pri pripadajočem tipu ukrepa.

V zvezi z vnosom proda (rinjenih plavin) je v letih po izvedbi ukrepov pri tipih A, B in C mogoče pričakovati nastanek višjih položajev dna, ki ustrezajo novim okvirnim pogojem. Ob izračunu trajanja učinkov povečana potreba po plavinah za razvoj tega novega položaja dna ni bila upoštevana. Poleg tega pa delež finega sedimenta, ki ni strugotvoren, ni bil odbit od kubatur materiala, ki ga je treba dodati. Obseg teh deležev bi bilo treba posebej ugotoviti pri izvedbi ukrepov.

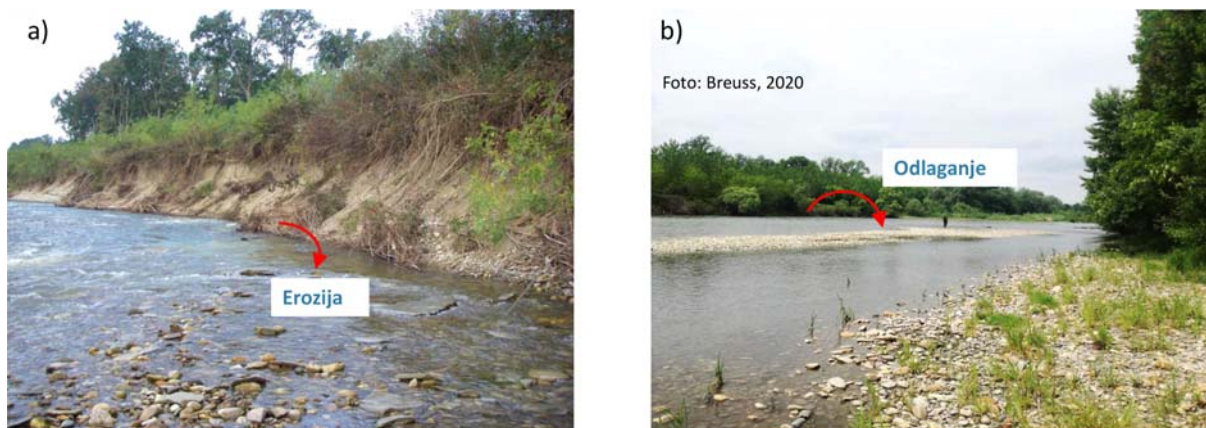
Daljši učinek dodanega proda v večjih ukrepih je tudi takrat opazen, če analiziramo premestitvene hitrosti sedimenta v različnih tipih ukrepov. Klösch in Habersack (2018) sta za analizo hitrosti rinjenih plavin dveh velikosti zrn ob mejni Muri uporabila poskuse »tracerjev« po Habersacku et al. (2013). Na podlagi teh rezultatov smo za predmetno raziskavo izpeljali formulo za hitrost rinjenih plavin v mejni Muri. Tipi ukrepov se s trapeznimi strugami posnemajo za različne tipe ukrepov v širinah, značilnih za posamezne tipe. Izračunali smo strižne napetosti, ki se pojavijo v tej zvezi. Na osnovi te hitrosti rinjenih plavin bi presežni material iz obrežnega pasu velikost zrn 24,8 mm (v zvezi s formulo ustreza dolžini osi b 28 mm) pri tipu 0 v obdobju od izvedbe ukrepa v Gosdorfu prepotoval pribl. 33 km, pri tipu A samo pribl. 16 km in pri tipu B pribl. 6 km, medtem ko pri tipu C samo pribl. 2400 m (Slika 79a). Na podlagi teh vrednosti se za dolžino odseka mejne Mure poda zadrževalni čas za to velikost zrn v obsegu približno 13 let ob trenutni geometriji struge, medtem ko bi se zadrževalni čas pri tipih A, B in C podaljšal na 26 let, 73 let oz. 175 let.



Slika 79. Zadrževalni čas rinjenih plavin v različnih tipih ukrepov

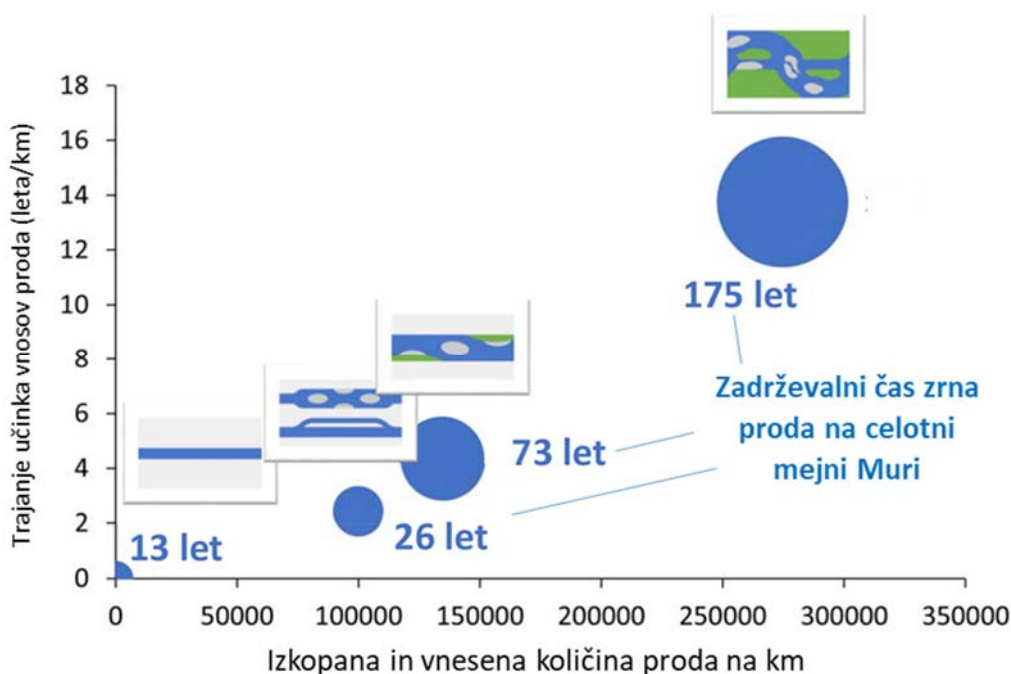
Bistvena razlika med pretokom rinjenih plavin v trenutni geometriji in pretokom rinjenih plavin v razširjenih različicah je izmenjava sedimenta zaradi morfodinamičnih procesov. Medtem ko rinjene plavine v trenutni geometriji prepotujejo strugo brez interakcije z okolico, omogočijo večje širine struge izmenjavo sedimenta na mestu ob hkratni eroziji na drugem mestu (Slika 80). Predvsem kadar se omogoči bočna erozija in s tem tudi bočne premestitve, se sediment

začasno odlaga za daljša časovna obdobja. Zaradi nenehnega obdelovanja dna se prepreči nastajanje močne vrhnje plasti ali nalaganje mulja.



Slika 80. Bočna zamenjava sedimenta na renaturiranih odsekih ukrepov z odlaganjem rinjenih plavin: a) bočna erozija pri Gosdorfu, b) odlaganje prodišča pri kraju Sichelendorf/Žetinci kot posledica vnosa sedimenta pri Gosdorfu in erozije dna gorvodno

Pravkar ugotovljena učinkovitost ukrepov se zaradi ekonomskega pomena lahko označi kot učinkovitost rinjenih plavin. Na Slika 81 je prikazan povzetek te učinkovitosti rinjenih plavin, ki jo sestavljata trajanje učinka in zadrževalni čas rinjenih plavin v mejni Muri. Čim večji je ukrep, tem več razpoložljivega materiala je za vnos plavin. Skupaj z zmanjšano premestitveno zmogljivostjo se podaljša trajanje učinka ukrepa. Zmanjšana premestitvena zmogljivost izhaja tudi iz daljšega zadrževalnega časa rinjenih plavin v mejni Muri.



Slika 81. Učinkovitost rinjenih plavin različnih ukrepov, prikazana glede na trajanje učinka pridobljenega proda na tekoči kilometer različnih tipov ukrepov upošteva potreben vnos proda za odsek pri pripadajočem tipu ukrepa in glede na zadrževalni čas potujočega zrna proda na mejni Muri ob izvedbi pripadajočega tipa ukrepa na celotni mejni Muri.

8. POVZETEK IN ZAKLJUČEK

Mejna Mura, nekoč reka, ki je imela do sedem vzporednih strug in širino do 1,2 km, je bila proti koncu 19. stoletja sistematično regulirana. Širina je bila omejena na 76 m, potek struge je bil izravnán s preboji in utrjen z obrežnim zavarovanjem. Dodatno se je kmalu po tem začela gradnja hidroelektrarn ob Muri s koncem 19. stoletja. Hidroelektrarne in hudourniške pregrade so prekinile prehodnost plavin.

Regulacija je zaradi gradenj povzročila neposredne ekološke učinke in je skupaj s povečano premestitveno zmogljivostjo v strugi z zadrževalnim časom rinjenih plavin v zbirnem območju povzročila, da se je ekološko stanje zaradi poglobljanja dna vedno bolj poslabševalo. Poleg tega je poglobljanje dna negativno vplivalo tudi na antropogeno rabo tal vzdolž mejne Mure in na stabilnost regulacijske infrastrukture. Ne nazadnje grozita tudi popolna izguba prodnate posteljice in preboj dna do finih terciarnih plasti, ker se prodnata plast vedno bolj zmanjšuje.

Protiukrepi, izvedeni v okviru Načelne vodnogospodarske zasnove za mejno Muro iz leta 2001 so najprej kazali stabilizacijski učinek. Ker pa je bilo zaradi neznatnega vnosa rinjenih plavin gorvodno v odseku širitve pri Gosdorfu samo malo širitvenega pritiska in je bilo le malo rinjenih plavin z bregov dodanih na podlagi lastne dinamike, je bil učinek tega ukrepa bolj kratkoročen, kot pa je bilo predvideno. Posodobljena analiza višine rečnega dna ob mejni Muri je pokazala, da se je poglobljanje dna po kratki stabilizaciji nadaljevalo z nepričakovano hitrostjo. Trenutno je srednja višina rečnega dna pod nivojem pred izvedbo protiukrepov. Zaradi še zmanjšane razdalje do terciarnih plasti in višjega pritiska na biotsko raznovrstnost je postalo ukrepanje za stabilizacijo višine dna še nujnejše.

Na podlagi ocen smo ugotovili potrebne površine za naravnejšo morfologijo. S primerjavo s karto prostorskih uporov v poročilu D.T1.3.1 smo potem opredelili tri tipe ukrepov, ki ustrezajo različni razpoložljivosti površin vzdolž mejne Mure. Postavili smo hipotezo, da se potrebne količine rinjenih plavin (proda) za stabilizacijo višine rečnega dna zmanjšujejo z velikostjo ukrepov. Ključna parametra za učinek ukrepov sta širina struge in padec struge, ki sta tudi sestavni del pri razvoju tipov ukrepov. Tipi ukrepov obsegajo širitev struge od trenutno 76 m na približno 150 m ob omejeni dolžini (tip A) ali ob velikih dolžinah na približno 200 m (tip B) ter razpoložljivost celotnega koridorja, znotraj katerega se Mura lahko prosto razvija (tip C). Zaradi večje ukrivljenosti (sinusnosti) se padec znižuje (s trenutnih 1,4 na 1,2 ‰ pri tipu C) z velikostjo ukrepa in poleg širitve struge dodatno stabilizira rečno dno.

Za različne tipe ukrepov smo izdelali modele struge, znotraj katerih smo izvedli numerične analize hidrodinamike in premeščanja plavin. Simulacije kombinacije modelov tridimenzijskega hidrodinamično-numeričnega modela in večdimenzijskega modela premeščanja plavin potrjujejo stabilizacijski učinek ukrepov in so s kubaturo pribl. 45.000 m³ rinjenih plavin na leto za trenutno stanje izkazali največjo potrebo po rinjenih plavinah. Z ukrepi bi potrebne količine rinjenih plavin v skladu z izračunano premestitveno zmogljivostjo zmanjšali na pribl. 41.000 m³ pri tipu A, na pribl. 31.000 m³ pri tipu B in na pribl. 20.000 m³ pri tipu C. Zaradi porazdelitve globin, hitrosti toka in strižne napetosti, simulirane s tridimenzionalnim modelom, lahko pričakujemo, da se bo z velikostjo ukrepov povečala tudi ekološka korist zaradi heterogene porazdelitve velikosti in da je ta korist največja pri tipu C.

Tudi modeliranje morfodinamike kaže, da se z velikostjo ukrepa povečata morfološki in ekološki učinek.

Za vzdrževanje ukrepov je dodatno k zmanjšanju količin potrebnih količin rinjenih plavin relevantno tudi, da z izvedbo ukrepov pridobimo izkopni material, ki ga lahko dodamo Muri. Pri tipu C bo na voljo največ materiala ob hkrati najmanjši potrebni količini rinjenih plavin. Medtem ko bi morali pri tipu ukrepa 0 (trenutna geometrija z zadostnim vnosom proda) tako začeti z letnim vnosom proda v obsegu pribl. 45.000 m³, bi imeli s tipom C zaradi pridobljenega materiala iz izkopnih del na tekoči kilometer izvedbe ukrepa do 14 let časa, dokler bi morali spet nadaljevati letni vnos proda v obsegu 20.000 m³ iz drugega vira.

Skupaj z vnosom proda bo sčasoma prišlo do nove višine rečnega dna. Ugotoviti je treba, kateri delež materiala je potreben za oblikovanje nove višine dna. Dolgoročno stremimo k izboljšani prehodnosti iz porečja gorvodno. Pri tem je treba počakati in registrirati učinek prilagojenega obratovanja hidroelektrarn dolvodno od Gradca. V primeru morebitnih sprememb ob hidroelektrarni Ceršak mora biti zagotovljena prehodnost rinjenih plavin.

Tudi analiza premestitvenih hitrosti je pokazala različno učinkovitost rinjenih plavin glede na tip ukrepa. Ukrepi upočasnijo premestitveno hitrost in povečajo zadrževalni čas rinjenih plavin v mejni Muri. Zaradi vzdolžne in prečne povezljivosti plavin lahko pričakujemo povečano izmenjavo sedimenta, ki preprečuje značilne pojave poglobitve rečnega dna, kot sta oblikovanje močne vrhnje plasti in zamuljenje. Posebej pri tipu ukrepov C redna morfodinamika z ravnovesjem razmerja erozij na določenih mestih in agradacij na drugih mestih zagotavlja nadaljnji obstoj raznolikih habitatov.

Izvedba ukrepov tipa C med Gosdorfom in avstrijsko Radgono/Radkersburgom naj se v časovnem oziru obravnava prednostno. S tem bi se stabiliziralo in morfološko izboljšalo območje z največjim poglobljanjem dna in z najmanjšo debelino prodnate plasti do terciarnih plasti, ki znaša tam manj kot 0,5 m. To bi hkrati učinkovito podprlo gorvodni odsek, ki temu sledi, v katerem je prodnata plast prav tako močno stanjšana.

9. LITERATURA

Ahmari H, Da Silva AM (2011): Regions of bars, meandering and braiding in da Silva and Yalin's plan, *Journal of Hydraulic Research*, 49:6, 718-727.

ATV-DVWK (2003). Feststofftransportmodelle für Fließgewässer. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall, Hefen, Deutschland.

Austria-Forum (2021). https://austria-forum.org/af/Wissenssammlungen/Damals_in_der_Steiermark/Wie_Graz_unter_Strom_kam, abgefragt am 27.9.2021.

Biedenham DS, Copeland RR, Thorne CR, Soar PJ, Hey RD, Watson CC (2000). Effective Discharge Calculation: A Practical Guide. US Army Corps of Engineers, Engineer Research and Development Center, Washington DC.

Church, M. (2006). Bed material transport and the morphology of alluvial river channels. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 34, pp. 325-354.

Crosato, A., and Mosselman, E. (2009), Simple physics-based predictor for the number of river bars and the transition between meandering and braiding, *Water Resour. Res.*, 45, W03424, doi:[10.1029/2008WR007242](https://doi.org/10.1029/2008WR007242).

Da Silva, A M (1991): Alternate bars and related alluvial processes. Thesis of master science, Queens University Kingston, Ontario Canada.

Evropska Komisija (2000). Direktiva Evropskega parlamenta in Sveta 2000/60/ES z dne 23. oktobra 2000 o določitvi okvira za ukrepe Skupnosti na področju vodne politike

Egiazaroff, I.V. (1965). Calculation of nonuniform sediment concentration. *J. Hydraulics Div. ASCE* 91(HY4), 225–247.

Geofoto (2017). Flussquerprofilaufnahmen in der Grenzmurstrücke, km 95,0 – 130,7, po naročilu Ministrstva za okolje in prostor Republike Slovenije in Urada Štajerske deželne uprave.

Habersack H, Aigner J, Rindler R, Schwarz S, Tritthart M (2021). Geschiebemessungen an Drau & Isel, Messperiode 2018 -2019. Im Auftrag des Bundesministeriums für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus, Wien.

Habersack H., Hornich R., Klösch M. (2008): Flussaufweitung an der Grenzmur - ein Beitrag zur Sohlstabilisierung. Internationales Symposium Neue Anforderungen an den Wasserbau 2008, Zürich, Switzerland, 11.09.2008 - 12.09.2008 In: Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich, Neue Anforderungen an den Wasserbau; ISSN 0374-0056

Habersack H, Nachtnebel HP, Hengl M, Poppe M, Schneider J, Fazarinc R (2001a). Rečne gradnje. Končno poročilo za tematsko področje 1.5 Načelne vodnogospodarske zasnove za mejno Muro – Faza I., po naročilu Stalne slovensko-avstrijske komisije za Muro.

Habersack H, Nachtnebel HP, Hengl M, Poppe M, Schneider J, Fazarinc R (2001b). Rečna morfologija. Končno poročilo za tematsko področje 1.4 Načelne vodnogospodarske zasnove za mejno Muro – Faza I., po naročilu Stalne slovensko-avstrijske komisije za Muro.

Habersack H, Klösch M (2012). Monitoring und Modellierung von eigendynamischen Aufweitungen an Drau, Mur und Donau. *Österr Wasser- und Abfallw* 64, 411–422 (2012). <https://doi.org/10.1007/s00506-012-0007-9>

Habersack H, Klösch M, Blamauer B (2013). Geschiebetransport und Seitenerosion an der Grenzmur. DS 3.1: Monitoring rinjenih in lebdečih plavin, EU Interreg SI-AT Projekt DRA-MUR-CI.

Habersack H, Laronne JB (2002). Evaluation and improvement of bed load discharge formulas based on Helley-Smith sampling in an Alpine gravel bed river. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(5), 484-499.

Habersack, H.-M., Schneider, J., 2000. Ableitung und Analyse flussmorphologisch relevanter Parameter von historischen Karten. *Wasser & Boden*, 52. Jg., 6/2000, S. 55–S. 59.

Hengl H, Habersack H, Nachtnebel HP, Schneider J, Hunziker R, Mikos M (2001). Model transporta proda. Končno poročilo za tematsko področje 1.6 Načelne vodnogospodarske zasnove za mejno Muro – Faza I., po naročilu Stalne slovensko-avstrijske komisije za Muro.

Hengl M (2004). Processes in river morphology and extreme floods, paper presented at Conference FloodRisk of the Austrian Ministry of Agriculture, For., Environ. and Water Management, Vienna.

Hochenburger F (1894): Darstellung der in der Periode 1874 - 1891 durchgeführten Arbeiten der Mur-Regulierung in Steiermark. Bearbeitet über Auftrag des k.k. Ministeriums des Innern, 119 S., Wien

Hunziker, R.P. (1995). Fraktionsweiser Geschiebetransport (Bedload transport in size fractions). VAW Mitteilung 138, ETH Zürich, Switzerland.

Hunzinger, L.M. (1998): Flussaufweitungen – Morphologie, Geschiebehaushalt und Grundsätze zur Bemessung, Mitteilung Nr. 159 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich.

Jungwirth M, Zauner G, Pinka P, Hinterhofer M, Holzer G, Krusnik C, Melcher A, Povz M, Schlager E, Unfer G, Wiesner C, Zitek A (2001). Ribji stalež v Muri. Končno poročilo za tematsko področje 2.1 Načelne vodnogospodarske zasnove za mejno Muro – Faza I., po naročilu Stalne slovensko-avstrijske komisije za Muro.

Klösch M, Hornich R, Baumann N, Puchner G, Habersack H (2011). Mitigating Channel Incision via Sediment Input and Self-Initiated Riverbank Erosion at the Mur River, Austria In: Bennett S. J., Castro J. M., Simon A., *Stream Restoration in Dynamic Fluvial Systems: Scientific Approaches, Analyses, and Tools* 194; American Geophysical Union; ISBN 978-0-87590-483-2

Klösch M, Blamauer B, Habersack H (2015). Intra-event scale bar–bank interactions and their role in channel widening. *Earth Surf. Process. Landforms*, 40, 1506– 1523. doi: [10.1002/esp.3732](https://doi.org/10.1002/esp.3732).

Klösch M, Habersack H (2018) Deriving formulas for an unsteady virtual velocity of bedload tracers. *Earth Surf. Process. Landforms*, 43: 1529– 1541. doi: [10.1002/esp.4326](https://doi.org/10.1002/esp.4326).

Klösch M, Bertrand M, Boz B, Carolli M, Chouquet I, Dunst R, Egger G, Fragola G, Gaucher R, Gmeiner Ph, Goltara A, Hauer C, Holzapfel P, Humar N, Langendoen EJ, Javornik L, Liébault F, Maldonado E, Marangoni N, Molnar P, Pessenlehner S, Pusch M, Recking A, Rossi D, Rozman D, Šantl S, Stephan U, Habersack H (2019a). D.T2.3.1. Technical notes on tools to support planning and design of hydromorphological management and restoration measures, Delovni sklop 2, EU-Interreg Alpski prostor, projekt HyMoCARES.

Klösch M, Pessenlehner S, Dunst R, Langendoen EJ, Liébault F, Goltara A, Aigner J, Reeb F, Bertrand M, Habersack H (2019b). D.T2.2.1. Technical note on a multi-scale framework for assessing the hydromorphological conditions of rivers.

Klösch M, Dunst R, Habersack H (in Vorbereitung). Sediment balance and transport study. Deliverable D.T1.2.3 in Delovni sklop 2 projekta lifelineMDD, Danube Transnational Programme DTP3-308-2.3, EU-Interreg.

Lamprecht O (1953): Die Wüstungen im Raume Spielfeld - Radkersburg. Veröffentlichungen der Historischen Landeskommission für Steiermark, 24. Band, 64 S., Graz

Marti C, Bezzola GR (2009). Bed Load Transport in Braided Gravel-Bed Rivers. In *Braided Rivers* (eds I. Jarvis, G. H. Sambrook Smith, J. L. Best, C. S. Bristow and G. E. Petts). doi:10.1002/9781444304374.ch9

Meyer-Peter E, Müller R (1948). Formulas for bed-load transport. Proc. 2nd IAHR Congress, Stockholm, 39–64.

Mosley, M. P. (1981). Semi-determinate hydraulic geometry of river channels, South Island, New Zealand. *Earth Surface Processes and Landforms*, 6(2), 127–137. doi:10.1002/esp.3290060206.

Mueller ER, Pitlick J (2014). Sediment supply and channel morphology in mountain river systems: 2. Single thread to braided transitions, *J. Geophys. Res. Earth Surf.*, 119, 1516–1541, doi:10.1002/2013JF003045.

Nanson GC, Knighton AD (1996). Anabranching rivers: Their cause, character and classification. *Earth Surf. Process. Landforms*, 21: 217-239. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9837\(199603\)21:3<217::AID-ESP611>3.0.CO;2-U](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(199603)21:3<217::AID-ESP611>3.0.CO;2-U)

Nujic M. 1998. Praktischer Einsatz eines hochgenauen Verfahrens für die Berechnung von tiefengemittelten Strömungen. Mitteilungen des Institutes für Wasserwesen der Universität der Bundeswehr München: Munich; Nr. 62.

Osman, A. M., and Thorne, C. R. (1988). "Riverbank stability analysis. I: Theory." *J. Hydraul. Eng.*, 114(2), 134-150.

- Parker G, Wilcock PR, Paola C, Dietrich WE, and Pitlick J (2007), Physical basis for quasi-universal relations describing bankfull hydraulic geometry of single-thread gravel bed rivers, *J. Geophys. Res.*, 112, F04005, doi:10.1029/2006JF000549.
- Schumm SA (1985). Patterns of alluvial rivers. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 13:1, 5-27
- Shields A (1936). Anwendung der Aehnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung. Doktorarbeit an der Technischen Hochschule Berlin.
- Stalna slovensko-avstrijska komisija za Muro (2001). Vodnogospodarska zasnova za mejno Muro – Faza 1, Dunaj.
- Tremel F (1946): Schiffahrt und Flößerei auf der Mur. Jahresbericht des Akademischen Gymnasiums in Graz, Schuljahr 1945/46, S. 3-52, Graz
- Tritthart, M. (2005). Three-dimensional numerical modelling of turbulent river flow using polyhedral finite volumes. *Wiener Mitteilungen Wasser-Abwasser-Gewässer*, Technische Universität Wien, Bd. 193.
- Tritthart, M., Schober, B., Liedermann, M., Habersack, H. (2009). Development of an Integrated Sediment Transport Model and its Application to the Danube River. *Proc. 33rd IAHR Congress*, Vancouver, Canada, 876-883.
- Tritthart M, Liedermann M, Schober B, Habersack H (2011). Non-uniformity and layering in sediment transport modelling 2: river application, *Journal of Hydraulic Research*, 49:3, 335-344, DOI: [10.1080/00221686.2011.583487](https://doi.org/10.1080/00221686.2011.583487)
- Van Rijn, L.C. (1984). Sediment transport 1: Bed load transport. *J. Hydraulic Eng.* 110(10), 1431–1456.
- Verbund (2015). Anpassung der Betriebsweise bei Hochwasser – Murkraftwerke Mellach bis Spielfeld. Technischer Bericht.
- Wagner B, Hauer C, Schoder A, Habersack H (2015). A review of hydropower in Austria: Past, present and future development. *RENEW SUST ENERG REV.* 2015; 50: 304-314
- Wong M, Parker G (2006). Re-analysis and correction of bed load relation of Meyer-Peter and Muller using their own database. *Journal of Hydraulic Engineering* 132(11): 1159– 1168

www.gomurra.eu



Interreg 
SLOVENIJA - AVSTRIJA
SLOWENIEN - ÖSTERREICH
Evropska unija | Evropski sklad za regionalni razvoj
Europäische Union | Europäischer Fonds für regionale Entwicklung

Projektne partnerji



REPUBLIKA SLOVENIJA
MINISTRSTVO ZA OKOLJE IN PROSTOR
DIREKCIJA REPUBLIKE SLOVENIJE ZA VODE



 **Bundesministerium**
Landwirtschaft, Regionen
und Tourismus



REPUBLIKA SLOVENIJA
MINISTRSTVO ZA OKOLJE IN PROSTOR
AGENCIJA REPUBLIKE SLOVENIJE ZA OKOLJE



Projekt goMURra (SIAT250) se v okviru Programa sodelovanja Interreg V-A Slovenja-Avstrija sofinancira s sredstvi Evropskega sklada za regionalni razvoj.