



**Katedra za splošno hidrotehniko**

*Hajdrihova 28  
1000 Ljubljana, Slovenija  
telefon + 386 (01) 4254 052  
faks + 386 (01) 2519 897*

**Razvoj metodologije za oceno razvitosti erozijskih procesov in  
kartiranje erozijske nevarnosti na območjih poplavljanja celinskih  
voda in morja**

**Ljubljana, maj 2025**

Ime projekta	Razvoj metodologije za oceno razvitosti erozijskih procesov in kartiranje erozijske nevarnosti na območjih poplavljanja celinskih voda in morja
Šifra projekta	V2-2371
Financiranje projekta	Ministrstvo za naravne vire in prostor (pogodba št. št. 2560-24-411007) Javna agencija za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije (ARIS)
Vodja projekta	izr. prof. dr. Simon Rusjan, univ. dipl. inž. vod. kom. inž.
Avtorji	izr. prof. dr. Simon Rusjan, univ. dipl. inž. vod. kom. inž. asist. dr. Klaudija Lebar, univ. dipl. inž. vod. kom. inž. izr. prof. dr. Nejc Bezak, univ. dipl. inž. grad. izr. prof. dr. Gašper Rak, univ. dipl. inž. vod. kom. inž. mag. Tadej Dolenc, mag. inž. ok. grad. prof. dr. Timotej Verbovšek, univ. dipl. inž. geol. doc. dr. Vesna Zupanc, univ. dipl. inž. kmet. asist. dr. Tamara Kuzmanič, mag. inž. rud. dr. Jošt Sodnik, univ. dipl. inž. grad. znanst. sod. dr. Andrej Vidmar, univ. dipl. inž. grad. prof. dr. Matjaž Mikoš, univ. dipl. inž. grad.

## Kazalo vsebine

DELOVNI SKLOP 1 .....	4
UVOD .....	4
1 EROZIJSKI PROCESI VZDOLŽ STRUG VODOTOKOV IN PREPOZNAVANJE PROCESOV REČNE (FLUVIALNE) EROZIJE .....	7
1.1 Erozijski procesi rečnih brežin .....	8
1.2 Pojavnost procesov rečne erozije v različnih tipih vodotokov .....	14
1.3 Koridorji s povečano nevarnostjo procesov rečne erozije .....	16
2 POVEZAVE MED PROCESI SPROŠČANJA, PREMEŠČANJA IN ODLAGANJA PLAVIN .....	20
2.1 Erozijsko-sedimentacijski krog .....	20
2.2 Ocena erozijskega potenciala zaledja .....	25
2.3 Ocena dotoka plavin v rečno mrežo .....	31
2.4 Metode za oceno premeščanja plavin v rečni mreži .....	33
3 VPLIV POPLAVNIH VODA NA EROZIJSKE PROCESSE NA KMETIJSKIH POVRŠINAH .....	36
4 PREPOZNAVANJE EROZIJSKIH PROCESOV OBALE MORJA .....	41
4.1 Geološki procesi .....	41
4.1.1 Preperevanje .....	41
4.1.2 Erozijski procesi in geološki pojavi, povezani z erozijo .....	41
4.2 Inženirskogeološke lastnosti ozemlja .....	46
5 PREGLED NEKATERIH PRETEKLIH POPLAVNIH DOGODKOV S PODATKI IN OCENAMI KOLIČIN ERODIRANEGA, TRANSPORTIRANEGA IN ODLOŽENEGA MATERIALA .....	49
5.1 Ekstremni padavinski dogodek avgusta 2014 v povirju reke Gradaščice .....	50
5.2 Poplavljanje reke Drave novembra 2012 .....	54
5.3 Rečna erozija vzdolž struge reke Save s povzetkom bilance erodiranega in odloženega materiala vzdolž struge reke Save .....	55
6 PREGLED NEKATERIH TEORETIČNIH KONCEPTOV IN TEHNIČNIH PRAKS ANALIZE NEVARNOSTI REČNE EROZIJE IN EROZIJE MORJA – delovna točka 1.6 .....	64
6.1 Ocena območij nevarnosti rečne erozije v zvezni državi Indiana, ZDA .....	65
6.2 Ocena območij rečne nevarnosti v zvezni državi Kolorado, ZDA .....	68
6.2.1 Osnovne in dodatne komponente območij rečne nevarnosti .....	70
6.3 Ocena nevarnosti erozije brežin strug vodotokov v Švici .....	72
6.3.1 Prepoznavanje scenarijev erozijskih procesov .....	73
6.3.2 Ocena erozijskih obremenitev dna in brežin struge .....	78
6.4 Ocena nevarnosti erozije morskih brežin .....	79
6.4.1 Meritve erozije z metodami daljinskega zaznavanja .....	79

6.4.2	Ocene erozijske ogroženosti z GIS pristopi .....	82
6.4.3	Inženirskogeološke meritve.....	87
7	POVZETEK POGlavIJ 1 DO 6.....	88
	DELOVNI SKLOP 2 .....	89
8	RAZVOJ METODOLOGIJE ZA OCENO INTENZIVNOSTI EROZIJSKIH PROCESOV IN KARTIRANJE OBMOČIJ EROZIJSKE NEVARNOSTI CELINSKIH VODA IN MORJA.....	89
8.1	Usmeritve za začetno opredelitev do potencialne razvitosti procesov rečne erozije (Nivo 1) 90	
8.1.1	Izdelava opozorilne karte erozije .....	92
8.1.2	Novejša metodologija za izdelavo opozorilnih kart erozije.....	95
8.1.3	Prepoznavanje topografskih, hidrogeoloških, in pedoloških razmer na obravnavanem odseku in širšem zalednem prispevnem območju .....	99
8.1.4	Usmeritve za izvedbo terenskih ogledov za prepoznavanje procesov rečne erozije..	100
8.1.5	Usmeritve za oceno potencialne razvitosti procesov rečne erozije na podlagi različnih podatkov o procesih rečne erozije v preteklosti .....	105
8.1.6	Usmeritve za oceno potencialne razvitosti procesov rečne erozije na podlagi analize terenskih razmer in podatkov o procesih erozije morja .....	113
8.2	Manj kompleksne metode za območja, kjer je pričakovan obseg erozijskega delovanja celinskih voda in morja omejen/majhen (Nivo 2) .....	113
8.2.1	Analiza hidroloških razmer .....	114
8.2.2	Analiza hidravličnih razmer .....	115
8.2.3	Manj kompleksne analize obale morja.....	127
8.3	Kompleksnejše metode za območja, kjer je pričakovan obseg in potencialna škoda zaradi poplavne in erozijske nevarnosti celinskih voda in morja velik (Nivo 2).....	127
8.3.1	Izdelava erozijsko-sedimentacijske študije .....	128
8.3.2	Zahtevnejše hidravlične analize v povezavi z analizo procesov premeščanja in odlaganja plavin	129
8.3.3	Zahtevnejše analize erozijsko izpostavljenih delov obale morja.....	135
	DELOVNI SKLOP 3 .....	138
9	TESTIRANJE IN USKLAJEVANJE METODOLOGIJE, ANALIZA IZBRANIH VZORČNIH PRIMEROV.....	138
9.1	Preizkušanje manj kompleksnih metod za oceno procesov rečne erozije in erozije morja.....	139
9.1.1	Analiza pretočnih hitrosti in strižnih napetosti na izbranih primerih.....	142
9.1.2	Manj kompleksna analiza izbranih odsekov obale morja .....	153
9.2	Testiranje kompleksnejših metod za oceno procesov rečne erozije in erozije morja .....	156
9.2.1	Analiza procesov rečne erozije na odseku Selške Sore .....	156
9.2.2	Analiza procesov rečne erozije na odseku Hrastnice .....	163
9.2.3	Testiranje kompleksnejših analiz odseka obale morja .....	205
	DELOVNI SKLOP 4 .....	210



10. SINTEZA PREDLAGANE METODOLOGIJE.....	210
10.1 Vpogled v dosege procesov rečne erozije v poplavnem dogodku 2023 .....	216
10.2 Primerjava rezultatov manj kompleksnih in kompleksnejših metod .....	220
11. ZAKLJUČKI .....	222
VIRI .....	224

## Kazalo slik

<b>Slika 1.1:</b> Shematski prikaz procesov rečne erozije vzdolž vijugajočega rečnega odseka. ....	8
<b>Slika 1.2:</b> Mehanizem zdrs ali porušitev zgornjega dela brežine (prirejeno po Duro in sod., 2018). ...	11
<b>Slika 1.3:</b> Shematski prikaz procesa spodjedanja brežine (prirejeno po ISJ, 2018). ....	12
<b>Slika 1.4:</b> Struga Želimeljščice v 90-tih letih (levo); struga Želimeljščice sedaj (desno).....	13
<b>Slika 1.5:</b> Primera sosledja letalskih posnetkov, uporabljenih za analizo rečnega erozijskega koridorja (Brierley in sod., 2022 (zgoraj); Hajdukiewicz and Wyżga, 2023 (spodaj)). ....	18
<b>Slika 2.1:</b> Shematski prikaz interakcije med vodnim in erozijsko-sedimentacijskim krogom (Bezak, 2016).....	21
<b>Slika 2.2:</b> Konceptualni prikaz povezav med procesi sproščanja, premeščanja in odlaganja na ravninskem in hribovitem območju. ....	22
<b>Slika 2.3:</b> Povezljivost premeščanja sedimentov v idealiziranem porečju (Fryirs, 2013).....	23
<b>Slika 2.4:</b> Bilanca procesov rečne erozije na nivoju odseka vodotoka (prirejeno po Blazewicz in sod., 2020). Procesni vnosa plavin v odsek in odplavljanja znotraj odseka so označeni z rdečo barvo, procesi odlaganja plavin znotraj odseka in odplavljanja dolvodno so označeni z modro barvo. ....	24
<b>Slika 2.5:</b> Spreminjanje prečnega profila glede na hidrometrične meritve za postajo Hrastnik na Savi (vir podatkov: Agencija RS za okolje). ....	24
<b>Slika 2.6:</b> Prevladujoči proces erozije tal (najvišja stopnja erozije tal) po celicah 100 x 100 m (leva slika) in po upravnih regijah EU (pokrajine) NUTS3 (desna slika) (Borrelli in sod., 2023b). Modra barva prikazuje vodno erozijo, rumena vetrno erozijo, rdeča erozijo zaradi obdelave tal in zelena erozijo zaradi pobiranja pridelka.....	26
<b>Slika 2.7:</b> Nekatero tipične oblike erozije tal (Bezak, 2016).....	28
<b>Slika 2.8:</b> Karta verjetnosti pojavljanja zemeljskih plazov glede na naravne danosti (Jemec Auflič in sod., 2016).....	29
<b>Slika 2.9:</b> Stabilnostna karta Slovenije - podori v merilu 1:400.000 iz leta 1995/1996 (Mikoš in sod., 2022).....	29
<b>Slika 2.10:</b> Karta dovzetnosti pojavljanja podorov v Sloveniji v merilu 1:250.000 (GeoZS, 2011).....	30
<b>Slika 2.11:</b> Razmerje med koeficientom odplavljanja (angl. <i>sediment delivery ratio</i> ) in prispevno površino območja (Lu in sod., 2006). ....	32
<b>Slika 2.12:</b> Grafični prikaz konceptov strukturne in funkcionalne povezljivosti transporta sedimentov (Najafi in sod., 2021). ....	32
<b>Slika 2.13:</b> Indeks povezljivosti porečja Suhorice glede na metodologijo, ki jo je predlagal Cavalli in sod. (2013). Rdeča barva označuje območja z boljšo povezljivostjo, modra pa območja s slabšo povezljivostjo.....	33
<b>Slika 3.1:</b> Primer vegetacije močvirskih in vlažnih travnikov (2014). ....	36
<b>Slika 3.2:</b> Posledice poplav leta 2008 ob potoku na ravnici pred krajem Obrne, v bližini Bohinjske Bele (zgoraj in v sredini – stanje neposredno po poplavih konec aprila; spodaj – stanje po dveh mesecih vegetacijske dobe).....	37

<b>Slika 3.3:</b> Primer skeletnih sedimentov na travniški površini vzdolž cestnega odvodnega jarka na območju Šalamencev (2014). .....	38
<b>Slika 3.4:</b> Nanos mulja na kmetijskih površinah ob poplavih avgusta 2023 (levo, vir: Kmečki Glas) in odložene plavine na območju Mežiške doline (desno, vir: Kmečki glas). .....	39
<b>Slika 3.5:</b> Sedimenti v sadovnjaku po umiku poplavnega vala na območju Vipavske doline (3. in 10. 12. 2005).....	40
<b>Slika 4.1:</b> Preperevanje peščenjaka; notranji nepreperel del je sive barve, zunanji preperel rob rumenorjave (levo). Preperevanje laporovca (desno). .....	41
<b>Slika 4.2:</b> Erozijski kanali na klifu in akumuliran material na vznožju (levo). Ploskovna erozija na klifu (desno).....	42
<b>Slika 4.3:</b> Spodkopavanje grmovja in dreves (levo). Nagibanje dreves zaradi spodkopavanja (desno). .....	42
<b>Slika 4.4:</b> Abrazijska polica (levo). Manjši spodmol v lapornatih plasteh (desno). .....	43
<b>Slika 4.5:</b> Spodmol v Mesečevem zalivu.....	43
<b>Slika 4.6:</b> Spodkopavanje blokov peščenjaka z manjšim že izpadlim blokom na desni strani (levo zgoraj), izrazito spodkopana in štrleča plast peščenjaka na Debelem rtiču (desno zgoraj), izpadli bloki peščenjaka na vznožju (levo spodaj), spodkopana terasa stanovanjskega objekta pri Gradisu zahodno od Ankarana (desno spodaj).....	44
<b>Slika 4.7:</b> Procesi padanja kamenja v odvisnosti od naklona pobočja. ....	45
<b>Slika 4.8:</b> Levo zgoraj: odlomni rob na Debelem rtiču leta 2022. Desno zgoraj: ista lokacija z večjim premikom oz. posedanjem, območje proti obali je že splazelo. Levo spodaj: manjši zemeljski plaz na isti lokaciji.....	46
<b>Slika 4.9:</b> Inženirskogeološke enote v slovenski Istri. ....	48
<b>Slika 5.1:</b> Merjene vrednosti pretokov (določene na podlagi pretočne krivulje) na iztoku iz hudourniškega območja Kuzlovca z označenimi obdobji izvedbe laserskih skeniranj terena in žledoloma. ....	51
<b>Slika 5.2:</b> Situacija v hudourniku Kuzlovec pred (levo) in po (desno) ekstremnem padavinskem dogodku, ki se je zgodil avgusta 2014. ....	52
<b>Slika 5.3:</b> Zaradi žledu poškodovana drevesa na območju hudournika Kuzlovec, ki so predstavljala potencialni dotok plavja za reko Gradaščico (levo). Porušen most na cesti proti Selu nad Polhovim Gradcem zaradi zagozdenega plavja ob mostno odprtino (desno). ....	52
<b>Slika 5.4:</b> Razlika med DMR v letu 2013 in 2014 (spodaj) in letu 2014-2015 (zgoraj) z označeno lokacijo poteka hudourniške struge pred (2013_reka) in po ekstremnem dogodku (2014_reka). Rdeče celice označujejo območja poglobitev, modre celice označujejo celice, kjer je prišlo do odlaganja drobirskega materiala. ....	53
<b>Slika 5.5:</b> Poškodbe brežin na odseku preboja reke Drave v odvodni kanal HE Formin (Vir: Mensuras, d. o. o., ARSO).....	55
<b>Slika 5.6:</b> Odložene plavine v odvodnem kanalu HE Formin (Vir: Mensuras).....	55
<b>Slika 5.7:</b> Primerjava tlorisnih potekov struge reke Save med Krškimi in sedanjo mejo z Republiko Hrvaško v obdobju 1784–2007 (Vir: ZVKDS, 2008). ....	56
<b>Slika 5.8:</b> Sosledje hidromorfološkega dogajanja na odseku struge Save dolvodno od AC mostu pri Šentjakobu.....	57
<b>Slika 5.9:</b> Odsek struge Save dolvodno od AC mostu pri Šentjakobu pred (zgoraj) in po (spodaj) poplavnem dogodku avgusta 2023. ....	57
<b>Slika 5.10:</b> Grafični prikaz prodne bilance Save Dolinke in njenih pritokov glede na grobe ocene iz preteklih študij. Kot ozadje je prikazana ocena povprečnega letnega sproščanja, izračunanega po RUSLE enačbi, dodatno so prikazane tudi lokacije podorov glede na bazo s katero upravlja Geološki zavod Slovenije (DRSV, 2022). ....	60

<b>Slika 5.11:</b> Grafični prikaz prodne bilance Save in njenih pritokov glede na grobe ocene iz preteklih študij. Kot ozadje je prikazana ocena povprečnega letnega sproščanja, izračunanega po RUSLE enačbi, dodatno so prikazane tudi lokacije podorov glede na bazo s katero upravlja Geološki Zavod Slovenije (DRSV, 2022).....	61
<b>Slika 5.12:</b> Grafični prikaz lebdečih plavin Save Dolinke in njenih pritokov glede na ocene iz preteklih študij. Kot ozadje je prikazana ocena povprečnega letne sproščanja izračunanega po RUSLE enačbi, dodatno so prikazane tudi lokacije podorov glede na bazo s katero upravlja Geološki Zavod Slovenije (DRSV, 2022).....	62
<b>Slika 5.13:</b> Grafični prikaz lebdečih plavin Save in njenih pritokov glede na ocene iz preteklih študij. Kot ozadje je prikazana ocena povprečnega letne sproščanja izračunanega po RUSLE enačbi, dodatno so prikazane tudi lokacije podorov glede na bazo s katero upravlja Geološki Zavod Slovenije (DRSV, 2022). .....	63
<b>Slika 6.1:</b> Prikaz ocenjenih območij rečne erozije (obarvano vijolično) (ISJ, 2018). .....	66
<b>Slika 6.2:</b> Regionalne krivulje dimenzij struge za ocenjevanje širine, srednje globine in površine prečnega prereza neurbanih vodotokov na delu območja zvezne države Indiana (ISJ, 2018). .....	67
<b>Slika 6.3:</b> Preliminarna ocena dolžine obravnavanega odseka struge, vzdolž katerega se analizira obseg procesov rečne erozije (ISJ, 2018). .....	67
<b>Slika 6.4:</b> Aktivni koridor vodotoka in varovalni pas rečne nevarnosti kot osnovni komponenti karte območja rečne nevarnosti (Blazewicz in sod., 2020). .....	70
<b>Slika 6.5:</b> Primer določitve aktivnega koridorja vodotoka (rumeno) in varovalnega pasu rečne nevarnosti (rdeče) z uporabo podatkov o preteklem erozijskem dogajanju (Blazewicz in sod., 2020).71	71
<b>Slika 6.6:</b> Primer določitve koridorja rečne nevarnosti z vidika osnovnih (aktivni koridor vodotoka in varovalni pas rečne nevarnosti) ter dodatnih komponent rečne nevarnosti (Blazewicz in sod., 2020). .....	72
<b>Slika 6.7:</b> Razlika med zdrsom brežine (levo) in premikom rečne struge (desno) (Loat in Petrascheck, 1997).....	73
<b>Slika 6.8:</b> Opredelitev obsega erozije, kjer je $L_{UE}$ dolžina erozije, $B_{UE}$ širina erozije in $h_{UE}$ globina erozije (FAN, 2015).....	74
<b>Slika 6.9:</b> Procesi bočne erozije (rdeča barva) med poplavo leta 2005 na reki Chirel v Diemtigtalu (Švica): v zunanjih krivinah med nastajanjem meandra (levo) in na obeh straneh med nastajanjem razvejane struge (desno). Modra območja predstavljajo odlaganje naplavin, temno modra črta strugo pred poplavo, svetlo modra črta strugo po poplavi. Smer toka je od spodaj levo proti zgoraj desno (FAN, 2015).....	75
<b>Slika 6.10:</b> Erozijska dna in območja pete brežine, odplavljanje materiala z območja pete brežine destabilizira pobočje (levo za nizka pobočja, desno za visoka pobočja) (povzeto po FAN, 2015).....	76
<b>Slika 6.11:</b> Bočna erozijska brežin po celotni višini brežine (levo) ali le na nekonsolidiranem zgornjem delu brežine (desno) (povzeto po FAN, 2015).....	76
<b>Slika 6.12:</b> Erozijska dna na območju vrha brežine (povzeto po FAN, 2015). .....	77
<b>Slika 6.13:</b> Primer razmejitve procesov bočne erozije brežin rečne struge in območja zemeljskega plazua (FAN, 2015).....	77
<b>Slika 6.14:</b> Snemanje obalnih klifov v okolici Strunjana z brezpilotnim letalnikom (na fotografiji M. Vrabec, BPL DJI Phantom 4 RTK in geodetske tarče; avtor fotografij: T. Verbovšek). .....	80
<b>Slika 6.15:</b> Primer 3D modela klifa v Piranu, narejenega z brezpilotnim letalnikom (avtor modela: K. Kozmus Trajkovski). Pod hišo župnišča (levo), ki je bila v fazi sanacije, so na vznožju vidne geodetske tarče.....	80
<b>Slika 6.16:</b> Rezultat skeniranja odseka klifa pri Strunjanu s TLS (avtor: K. Kregar). Modre točke predstavljajo oblak točk, rdeče črte so profili za namen simulacije padanja skal. ....	81
<b>Slika 8.1:</b> Erozijska in hudourniška območja, ki so označena z rjavo barvo (PUH, 1994).....	92

<b>Slika 8.2:</b> Erozijska območja - Opozorilna karta erozije za vodno območje Jadranskega morja (NUV, 2009).....	94
<b>Slika 8.3:</b> Erozijska območja - Opozorilna karta erozije za vodno območje Donave (NUV, 2009).....	94
<b>Slika 8.4:</b> Primer prikaza opozorilne karte ploskovne erozije prsti (EHO, 2024). ....	96
<b>Slika 8.5:</b> Primer prikaza opozorilne karte linijske erozije v strugah vodotokov (EHO, 2024). ....	98
<b>Slika 8.6:</b> Izsek iz geološke karte za območje odseka Kamniške Bistrice ob naselju Homec. ....	100
<b>Slika 8.7:</b> Primeri erozijskega dogajanja v zalednih prispevnih območjih, ki nakazujejo na intenzivno odplavljanje in dotok plavin v dolvodne odseke vodotokov.....	101
<b>Slika 8.8:</b> Primeri sprememb na območjih strug vodotokov, ki lahko ob naslednjih poplavnih dogodkih vodijo v obsežnejše procese rečne erozije. ....	102
<b>Slika 8.9:</b> Nanosi plavin na kmetijskih površinah (levo) in intenzivnejši procesi rečne erozije na kmetijskih površinah (desno) (vir: Ptuj.info). ....	103
<b>Slika 8.10:</b> Primeri erozijskih zajed pri prelivanju poplavnih voda preko posameznih sprememb v topografiji terena (npr. cestnih nasipov) na območjih poplavnih območij (viri zgornjih dveh slik: siol.net, rtvslo.si). ....	104
<b>Slika 8.11:</b> Primeri erozijskih zajed ob premostitvenih objektih.....	105
<b>Slika 8.12:</b> Primer prikaza sosledja hidromorfoloških procesov vzdolž odseka Kamniške Bistrice na posnetkih Google Earth (vir: Google Earth). ....	110
<b>Slika 8.13:</b> Primer rezultatov primerjave DMV pred in po poplavnem dogodku avgusta 2023. Rdeče obarvana območja prikazujejo območja poglobitev zaradi delovanja bočne erozije v rečnem zavoju. Rumena črta prikazuje lokacijo prečnega prereza, prikazanega na sliki 8.14. ....	111
<b>Slika 8.14:</b> Primerjava geometrije prečnega prereza struge Kamniške Bistrice pred (modra črtkana linija) in po poplavnem dogodku avgusta 2023 (polno zeleno območje). Rdeča črtkana črta prikazuje potek terena po poplavne dogodka. ....	112
<b>Slika 8.15:</b> Primer območja intenzivnih procesov rečne erozije na poplavnem območju (modro obarvano območje na sliki levo) na DMV in relativnem DMV (slika desno) (vir: <a href="https://dancoecarto.com/">https://dancoecarto.com/</a> ). ....	112
<b>Slika 8.16:</b> Prikaz teoretične razporeditve strižnih napetosti na ravnem odseku struge s simetričnim trapeznim prečnim prerezom (povzeto po različnih priročnikih). ....	116
<b>Slika 8.17:</b> Shieldsov diagram. Krivulja predstavlja mejo med stabilnimi razmerami, v katerih ne pride do premeščanja plavin (območje pod krivuljo) in območjem premeščanja zrn plavin (območje nad krivuljo).....	123
<b>Slika 8.18:</b> Einsteinova funkcija transporta sedimentov v primerjavi z nekaterimi ostalimi pristopi. ....	124
<b>Slika 8.19:</b> Primer rezultatov analize v programu WipFrag – barve na desni sliki ponazarjajo velikost zrn (prodišče; višina slike 0,5 m) (povzeto po Matič, 2019). ....	131
<b>Slika 8.20:</b> Primer rezultatov analize v programu Basegrain (prodišče; višina slike 0,5 m) (povzeto po Matič, 2019). ....	131
<b>Slika 8.21:</b> Shematski prikaz izpostavljenosti zrn delovanju vodnega toka (Prirejeno po Janssen, 2010). ....	134
<b>Slika 8.22:</b> Primer kinematske analize za pojavljanje klinastih zdrsov na območju Strunjana. Oznaka 1W bedding predstavlja plasti, R1 je prvi sistem razpok, R2 drugi sistem razpok. Verjetnost klinastih zdrsov je 8 % (razvidno na desni strani slike). ....	136
<b>Slika 9.1:</b> Nasad špargljev v poletnem času (levo) in žičnica hmeljišča v pozno jesenskem času (slikano prečno na smer žičnic) (desno). ....	141
<b>Slika 9.2:</b> Obravnavani odsek z računskimi prečnimi prerezi struge potoka Dobrunjščica (1D hidravlični model), premostitvami in prepusti ter 2D računskima območjema na obeh straneh struge.....	143
<b>Slika 9.3:</b> Preraščenost struge Dobrunjščice z grmovno in drevesno vegetacijo (levo) in lokalne erozijske zajedne in nanosi plavin v strugi (desno). ....	143

<b>Slika 9.4:</b> Maksimalne pretočne hitrosti pri poplavnih dogodkih s konicami pretoka $Q_{10}$ (levo zgoraj), $Q_{100}$ (desno zgoraj) in $Q_{500}$ (spodaj) vzdolž obravnavanega odseka struge Dobrunjščice. ....	144
<b>Slika 9.5:</b> Vrednosti maksimalnih strižnih napetosti vzdolž obravnavanega odseka struge Dobrunjščice pri poplavnih dogodkih s konicami pretoka $Q_{10}$ (levo zgoraj), $Q_{100}$ (desno zgoraj) in $Q_{500}$ (spodaj). ..	146
<b>Slika 9.6:</b> Primerjava erozijske nevarnosti pri poplavnem dogodku s konico pretoka $Q_{100}$ glede na kriterij debeline odplavljenega erodiranega materiala in ob upoštevanju mejne vrednosti pretočne hitrosti 1 m/s (levo) ter mejne vrednosti strižne napetosti 50 N/m <sup>2</sup> (desno). Skladno s Pravilnikom temno peščena barva prikazuje debelino odplavljenega erodiranega materiala od 0,5 do 2,0 m, svetlo peščena barva pa debelino odplavljenega erodiranega materiala < 0,5 m. ....	147
<b>Slika 9.7:</b> Primerjava razredov erozijske nevarnosti po prevladujočem kriteriju debeline odplavljenega erodiranega materiala ob upoštevanju mejne vrednosti pretočne hitrosti 1 m/s (levo) in mejne vrednosti strižne napetosti 50 N/m <sup>2</sup> (desno) pri poplavnem dogodku s konico pretoka $Q_{100}$ . Oranžna šrafura označuje območja srednje erozijske nevarnosti, rumena šrafura območja majhne erozijske nevarnosti. ....	147
<b>Slika 9.8:</b> Obravnavani odsek reke Vipave z 2D računskima območjema na obeh straneh struge. ....	148
<b>Slika 9.9:</b> Prostorska razporeditev različnih kategorij rabe tal iz baze MKGP. ....	148
<b>Slika 9.10:</b> Maksimalne pretočne hitrosti pri poplavnih dogodkih s konicami pretoka $Q_{10}$ (levo zgoraj), $Q_{100}$ (desno zgoraj) in $Q_{500}$ (spodaj) vzdolž obravnavanega odseka struge Vipave. ....	149
<b>Slika 9.11:</b> Območja vrednosti pretočnih hitrosti pri razmerah $Q_{10}$ (levo) in $Q_{100}$ . Z zeleno so obarvana območja hitrosti toka vode < 0,5 m/s, z rumeno območja hitrosti med 0,5 in 1 m/s ter z oranžno območja s hitrostmi > 1 m/s. ....	150
<b>Slika 9.12:</b> Vrednosti maksimalnih strižnih napetosti vzdolž obravnavanega odseka struge Vipave pri poplavnih dogodkih s konicami pretoka $Q_{10}$ (levo zgoraj), $Q_{100}$ (desno zgoraj) in $Q_{500}$ (spodaj). ....	151
<b>Slika 9.13:</b> (slika levo – razmere pri $Q_{10}$ ; slika desno – razmere pri $Q_{100}$ ). Območja vrednosti strižnih napetosti: območje $\tau < 10$ N/m <sup>2</sup> (obarvano zeleno); območje $10 < \tau < 50$ N/m <sup>2</sup> (obarvano rumeno); območje $\tau > 50$ N/m <sup>2</sup> (obarvano oranžno) Območja vrednosti strižnih napetosti pri razmerah $Q_{10}$ (levo) in $Q_{100}$ (desno). Z zeleno so obarvana območja strižnih napetosti < 10 N/m <sup>2</sup> , z rumeno območja strižnih napetosti med 10 in 50 N/m <sup>2</sup> ter z oranžno območja s strižnimi napetostmi > 50 N/m <sup>2</sup> . ....	151
<b>Slika 9.14:</b> Primerjava erozijske nevarnosti (kriterij debeline odplavljenega erodiranega materiala) ob upoštevanju mejne vrednosti pretočne hitrosti 0,5 m/s (levo) in mejne vrednosti strižne napetosti 10 N/m <sup>2</sup> (desno) pri poplavnem dogodku s konico pretoka $Q_{100}$ . ....	152
<b>Slika 9.15:</b> Primerjava razredov erozijske nevarnosti po kriteriju debeline odplavljenega erodiranega materiala ob upoštevanju mejne vrednosti pretočne hitrosti 0,5 m/s (levo) in mejne vrednosti strižne napetosti 10 N/m <sup>2</sup> (desno) pri poplavnem dogodku s konico pretoka $Q_{100}$ . Oranžna šrafura označuje območja srednje erozijske nevarnosti, rumena šrafura območja majhne erozijske nevarnosti. ....	152
<b>Slika 9.16:</b> Indeks nevarnosti (Hazard Index, HI) za 30 odsekov slovenske obale. ....	154
<b>Slika 9.17:</b> Indeks antropogenega vpliva ( <i>Impact Index</i> , II) za 30 odsekov slovenske obale. ....	155
<b>Slika 9.18:</b> Indeks ogroženosti ( <i>Risk Index</i> , RI) za 30 odsekov slovenske obale. ....	155
<b>Slika 9.19:</b> 2D računska mreža s tremi glavnimi tipi celic na odseku Selške Sore (Pivk, 2023). ....	158
<b>Slika 9.20:</b> Maksimalne hitrosti vode na obravnavanem območju za osnovni scenarij (Pivk, 2023)..	159
<b>Slika 9.21:</b> Območja odplavljanja in odlaganja plavin na obravnavanem odseku Selške Sore (Pivk, 2023). ....	160
<b>Slika 9.22:</b> Izsek obravnavanega območja iz karte globin pri pretoku $Q_{100}$ in karte razredov poplavne nevarnosti (Pivk, 2023). ....	161
<b>Slika 8.23:</b> Izsek iz karte erozijske nevarnosti – območja odplavljanja erodiranega materiala na poplavnih območjih (Pivk, 2023). ....	162
<b>Slika 9.24:</b> Izsek iz karte erozijske nevarnosti – območja odlaganja erodiranega materiala na poplavnih območjih (Pivk, 2023). ....	162

<b>Slika 9.25:</b> Izsek iz karte razredov erozijske nevarnosti (Pivk, 2023). .....	163
<b>Slika 9.26:</b> Prikaz zgostitve računskih celic na območju struge. ....	165
<b>Slika 9.27:</b> Optična analiza enega izmed prodišč vzdolž obravnavanega odseka Hrastnice.....	166
<b>Slika 9.28:</b> Reprezentativna zrnavostna krivulja krovnega sloja na izbranem odseku Hrastnice. ....	166
<b>Slika 9.29:</b> Lokacijska umestitev prečnih profilov P1 in P2 (Foto: T. Dolenc, marec 2024). ....	169
<b>Slika 9.30:</b> Geometrija prečnega profila P1 – stanje na začetku simulacije premeščanja sedimentov. ....	170
<b>Slika 9.31:</b> Prikaz gladin oziroma globin v prečnem profilu P1 ter tokovnic na predmetnem odseku vodotoka pri pretoku $Q = 10 \text{ m}^3/\text{s}$ .....	170
<b>Slika 9.32:</b> Prikaz porazdelitev pretočnih hitrosti v prečnem profilu P1 pri pretoku $Q = 10 \text{ m}^3/\text{s}$ .....	171
<b>Slika 9.33:</b> Prikaz porazdelitev strižnih napetosti na dnu struge v prečnem profilu P1 pri pretoku $Q = 10 \text{ m}^3/\text{s}$ . ....	171
<b>Slika 9.34:</b> Geometrija prečnega profila P1 zaradi procesov odlaganja plavin – stanje po 1 uri in 20 minutah simulacije. ....	172
<b>Slika 9.35:</b> Prikaz gladin oziroma globin v prečnem profilu P1 (levo) ter tokovnic (desno) na območju profila P1 pri pretoku $Q = 35 \text{ m}^3/\text{s}$ . ....	172
<b>Slika 9.36:</b> Prikaz porazdelitev pretočnih hitrosti v prečnem profilu P1 pri pretoku $Q = 35 \text{ m}^3/\text{s}$ .....	173
<b>Slika 9.37:</b> Prikaz porazdelitev strižnih napetosti na dnu struge v prečnem profilu P1 pri pretoku $Q = 35 \text{ m}^3/\text{s}$ . ....	173
<b>Slika 9.38:</b> Intenzivnejše erodiranje plavin na odseku gorvodno od cestnega mostu. ....	174
<b>Slika 9.39:</b> Sprememba geometrije prečnega profila P1 zaradi procesov odlaganja plavin – stanje po 1 uri in 50 minutah izvajanja simulacije. ....	174
<b>Slika 9.40:</b> Prikaz gladin oziroma globin v prečnem profilu P1 (levo) ter tokovnic na predmetnem odseku vodotoka pri maksimalnem pretoku $Q = 51 \text{ m}^3/\text{s}$ .....	175
<b>Slika 9.41:</b> Prikaz porazdelitev pretočnih hitrosti v prečnem profilu P1 pri maksimalnem pretoku $Q = 51 \text{ m}^3/\text{s}$ . ....	175
<b>Slika 9.42:</b> Prikaz porazdelitev strižnih napetosti na dnu struge v prečnem profilu P1 pri maksimalnem pretoku $Q = 51 \text{ m}^3/\text{s}$ . ....	176
<b>Slika 9.43:</b> Sprememba geometrije prečnega profila P1 zaradi procesov odlaganja plavin – stanje po 2 urah in 10 minutah izvajanja simulacije. ....	176
<b>Slika 9.44:</b> Primerjava geometrije prečnega profila P1 na začetku in koncu simulacije premeščanja plavin. ....	177
<b>Slika 9.45:</b> Bočno erodirane brežine in zasuta struga po poplavni ujmi avgusta 2023 v spodnjem toku obravnavanega odseka Hrastnice, približno 150 m dolvodno od prečnega profila P1 (Foto: T. Dolenc, avgust 2023). ....	178
<b>Slika 9.46:</b> Geometrija prečnega profila P2 – stanje na začetku simulacije premeščanja sedimentov. ....	178
<b>Slika 9.47:</b> Prikaz gladin oziroma globin v prečnem profilu P2 (levo) ter tokovnic (desno) na območju profila P2 pri pretoku $Q = 13,5 \text{ m}^3/\text{s}$ . ....	179
<b>Slika 9.48:</b> Prikaz porazdelitev pretočnih hitrosti v prečnem profilu P2 pri pretoku $Q = 13,5 \text{ m}^3/\text{s}$ ... ..	179
<b>Slika 9.49:</b> Prikaz porazdelitev strižnih napetosti na dnu struge v prečnem profilu P2 pri pretoku $Q = 13,5 \text{ m}^3/\text{s}$ . ....	180
<b>Slika 9.50:</b> Sprememba geometrije prečnega profila P2 zaradi procesov odlaganja plavin – stanje po 1 uri in 20 minutah simulacije. ....	180
<b>Slika 9.51:</b> Prikaz gladin oziroma globin v prečnem profilu P2 ter tokovnic na predmetnem odseku vodotoka pri pretoku $Q = 37,5 \text{ m}^3/\text{s}$ .....	181
<b>Slika 9.52:</b> Prikaz porazdelitev pretočnih hitrosti v prečnem profilu P2 pri pretoku $Q = 37,5 \text{ m}^3/\text{s}$ ... ..	181



<b>Slika 9.53:</b> Prikaz porazdelitev strižnih napetosti na dnu struge in na poplavnih površinah v prečnem profilu P2 pri pretoku $Q = 37,5 \text{ m}^3$ .	182
<b>Slika 9.54:</b> Sprememba geometrije prečnega profila P2 zaradi procesov rečne erozije – stanje po 1 uri in 50 minutah simulacije.	182
<b>Slika 9.55:</b> Prikaz gladin oziroma globin v prečnem profilu P2 ter tokovnic na predmetnem odseku vodotoka pri maksimalnem pretoku $Q = 51 \text{ m}^3/\text{s}$ .	183
<b>Slika 9.56:</b> Prikaz porazdelitev pretočnih hitrosti v prečnem profilu P2 pri maksimalnem pretoku $Q = 51 \text{ m}^3/\text{s}$ .	183
<b>Slika 9.57:</b> Prikaz porazdelitev strižnih napetosti na dnu struge in na poplavnih površinah v prečnem profilu P2 pri maksimalnem pretoku $Q = 51 \text{ m}^3/\text{s}$ .	184
<b>Slika 9.58:</b> Sprememba geometrije prečnega profila P2 zaradi procesov rečne erozije – stanje po 2 urah in 10 minutah simulacije.	184
<b>Slika 9.59:</b> Prikaz gladin oziroma globin v prečnem profilu P2 ter tokovnic na predmetnem odseku vodotoka pri pretoku $Q = 32,5 \text{ m}^3/\text{s}$ .	185
<b>Slika 9.60:</b> Prikaz porazdelitev pretočnih hitrosti v prečnem profilu P2 pri pretoku $Q = 32,5 \text{ m}^3/\text{s}$ .	185
<b>Slika 9.61:</b> Prikaz porazdelitev strižnih napetosti na dnu struge in na poplavnih površinah v prečnem profilu P2 pri pretoku $Q = 32,5 \text{ m}^3/\text{s}$ .	186
<b>Slika 9.62:</b> Sprememba geometrije prečnega profila P2 zaradi procesov rečne erozije – stanje po 3 urah in 20 minutah izvajanja simulacije.	186
<b>Slika 9.63:</b> Primerjava geometrije prečnega profila P2 na začetku in koncu simulacije premeščanja sedimentov.	187
<b>Slika 9.64:</b> Stanje po poplavni ujmi na odseku Hrastnice v bližini prečnega profila P2 – pogled gorvodno (Foto: T. Dolenc, avgust 2023).	188
<b>Slika 9.65:</b> Kumulativna količina (podana v metrih) odloženega oziroma erodiranega materiala v izbranem profilu po treh urah izvajanja simulacije premeščanja sedimentov.	189
<b>Slika 9.66:</b> Odloženi material s prikazom območja struge (levo) in brez prikaza odlaganja materiala na območju struge vodotoka (desno).	190
<b>Slika 9.67:</b> Intenzivni procesi rečne erozije na skrajnem gorvodnem delu modela.	191
<b>Slika 9.68:</b> Določitev gorvodne meje območja veljavnosti rezultatov.	191
<b>Slika 9.69:</b> Desnobrežne poplavne površine Hrastnice na odseku dolvodno od sotočja z Blekovim grabnom, na katerih na podlagi rezultatov simulacij ni bili intenzivnejših procesov rečne erozije (izsek iz karte erozijske nevarnosti za stanje pred poplavno ujmo).	192
<b>Slika 9.70:</b> Bočna erozija brežin na dolvodnem odseku modela v bližini stanovanjskega objekta Sv. Andrej 7 (izsek iz karte erozijske nevarnosti za obstoječe stanje – debelina odplavljenega materiala).	192
<b>Slika 9.71:</b> Bočna erozija na levi brežini Hrastnice v bližini stanovanjskega objekta Sv. Andrej 7.	193
<b>Slika 9.72:</b> Strm padec nivelete dna vodotoka na odseku gorvodno od cestnega mostu v bližini stanovanjskega objekta Sv. Barbara 22.	194
<b>Slika 9.73:</b> Globinska erozija rečne struge v bližini stanovanjskega objekta Sv. Barbara 22 (izsek iz karte erozijske nevarnosti za stanje pred poplavno ujmo – odplavljen material).	194
<b>Slika 9.74:</b> Globinska erozija vzdolž osi struge vodotoka na odseku gorvodno od cestnega mostu v bližini stanovanjskega objekta Sv. Barbara 22.	195
<b>Slika 9.75:</b> Intenzivno erodiranje na lokaciji visokovodnega nasipa (izsek iz karte erozijske nevarnosti za obstoječe stanje – odplavljen material).	195
<b>Slika 9.76:</b> Intenzivno erodiranje materiala na lokaciji visokovodnega nasipa – vzdolžni prerez skozi nasip.	196
<b>Slika 9.77:</b> Erodirani material na poplavnih površinah – izsek iz karte erozijske nevarnosti za stanje pred poplavno ujmo – odplavljen material.	196

<b>Slika 9.78:</b> Erodirani material na poplavnih površinah – izsek iz karte erozijske nevarnosti za obstoječe stanje – odplavljen material. ....	197
<b>Slika 9.79:</b> Erodirani material na poplavnih površinah ter na območju trase lokalne ceste. ....	197
<b>Slika 9.80:</b> Primerjava spremembe kot dna struge vzdolž osi vodotoka v času maksimalnih pretokov (vijolična krivulja) in na koncu simulacije premeščanja plavin (zelena krivulja) za stanje pred poplavnim dogodkom 2023.....	198
<b>Slika 9.81:</b> Odložene plavine v strugi Hrastnice, gorvodno od sotočja z Osojsko grapo – izsek iz karte erozijske nevarnosti za stanje pred poplavno ujmo (levo) ter obstoječe stanje (desno). ....	199
<b>Slika 9.82:</b> Odložene plavine na levobrežnih poplavnih površinah – izsek iz karte erozijske nevarnosti za stanje pred poplavno ujmo – odložen material. ....	199
<b>Slika 9.83:</b> Odložene plavine na levobrežnih poplavnih površinah.....	200
<b>Slika 9.84:</b> Prikaz lokacijske umestitve prečnih profilov za potrebe izvedbe analize občutljivosti modela na izbrani sedimentni robni pogoj. ....	201
<b>Slika 9.85:</b> Kumulativne spremembe kot terena vzdolž osi vodotoka na koncu simulacije premeščanja plavin. ....	202
<b>Slika 9.86:</b> Kumulativne spremembe kot terena v prečnem profilu P1 na koncu simulacije premeščanja plavin. ....	203
<b>Slika 9.87:</b> Kumulativne spremembe kot terena v prečnem profilu P2 na koncu simulacije premeščanja plavin. ....	204
<b>Slika 9.88:</b> Kumulativne spremembe kot terena v prečnem profilu P3 na koncu simulacije premeščanja sedimentov.....	204
<b>Slika 9.89:</b> Primer dveh sistemov razpok R1 in R2, ki tvorita kvadre peščenjaka, ki izpada iz stene zaradi erozijskega spodjedanja laporovca pod peščenjakovo plastjo. Tretji sistem razpok, označen na tlorisu z zeleno barvo, predstavlja nesistematične razpoke, ki zaradi svoje naključnosti in redkosti niso predmet meritev oz. analiz. ....	206
<b>Slika 9.90:</b> Primer meritev razdalj med razpokami sistema 1 in 2 ter globine spodjedanja na lokaciji odsekov 18 do 22. Vse vrednosti so v cm.....	207
<b>Slika 9.91:</b> Primer korelacije med globino spodjedanja in razdaljo med razpokami sistema R2 s korelacijskim koeficientom $r = 0,78$ oz. $R^2 = 0,61$ .....	207
<b>Slika 9.92:</b> Posnetek vzhodnega pobočja zaliva Sv. Križa (Mesečevega zaliva) v Strunjanu, pridobljen s snemanjem iz brezpilotnega letalnika (zgoraj) in laserskega skeniranja (TLS, spodaj). Barvna lestvica prikazuje razlike v površju in je v obeh primerih enaka in ima razpon od $-1$ do $+1$ m. ....	208
<b>Slika 9.93:</b> Primer karte erozijske nevarnosti za odsek obale morja na območju Strunjana. ....	209
<b>Slika 10.1:</b> Shematski prikaz predlagane metodologije za oceno razvitosti erozijskih procesov in kartiranje erozijske nevarnosti na območjih poplavljanja celinskih voda in morja. ....	213
<b>Slika 10.2:</b> Primer območij intenzivnih procesov rečne erozije. Rdeče obarvana območja so območja odplavljanja erodiranega materiala in poglobljanja, modro obarvana območja so območja odlaganja erodiranega materiala. ....	217
<b>Slika 10.3:</b> Ocenjene maksimalne širine erozijskih zajed (območja odplavljanja) vzdolž struge Kamniške Bistrice.....	218
<b>Slika 10.4:</b> Ocenjene maksimalne širine erozijskih zajed glede na lokalne hidromorfološke lastnosti (prvoten tlorisni potek struge vodotoka). ....	219
<b>Slika 10.5:</b> Ocenjene maksimalne širine erozijskih zajed glede na lokalno prisotnost vodne in ostale infrastrukture na lokacijah erozijskih zajed.....	219
<b>Slika 10.6:</b> Primer ocene razredov erozijske nevarnosti (upoštevanje kriterija odplavljanja materiala) ob upoštevanju maksimalnih hidravličnih obremenitev iz hidravlične simulacije.....	220
<b>Slika 10.7:</b> Primer ocene razredov erozijske nevarnosti ob upoštevanju rezultatov 2D modela premeščanja plavin. ....	221



## Kazalo preglednic:

<b>Preglednica 4.1:</b> Klasifikacija podornih pojavov (Đurović in sod. 2005).....	45
<b>Preglednica 4.2:</b> Povzetek lastnosti inženirskogeoloških (IG) enot v Sloveniji. ....	47
<b>Preglednica 6.1:</b> Stopnje intenzivnosti erozije brežin v skladu z zveznimi priporočili (povzeto po Loat in Petrascheck, 1997). ....	73
<b>Preglednica 6.2:</b> Postopek ocenjevanja obremenitev brežin strug erozijskim procesom.....	78
<b>Preglednica 6.3:</b> Primer tabele za izračun indeksa HI po metodi avtorjev del Rio in Gracia (2009).....	84
<b>Preglednica 6.4:</b> Tabela vplivnih faktorjev za izračun indeksa CVI (Gornitz,1991). ....	85
<b>Preglednica 6.5:</b> Karta vplivnih faktorjev za izračun dopolnjenega indeksa CVI (Gornitz in sod.,1994). .....	85
<b>Preglednica 6.6:</b> Primer izračuna indeksa CFI (Tursi in sod. (2023)). ....	86
<b>Preglednica 8.1:</b> Erodibilnost posameznih tipov litološke podlage s pripadajočimi koeficienti L (EHO, 2024).....	97
<b>Preglednica 8.2:</b> Mednarodna klasifikacija zemljin glede na zrnavostno sestavo. ....	117
<b>Preglednica 8.3:</b> Maksimalne dovoljene pretočne hitrosti, preden se začnejo procesi premeščanja zrn materiala (povzeto po Parker in Garcia, 2005). ....	118
<b>Preglednica 8.4:</b> Priporočljive maksimalne hitrosti vodnega toka in maksimalne strižne napetosti (Scobey, 1930). ....	119
<b>Preglednica 8.5:</b> Kritične pretočne hitrosti in strižne napetosti za različne zemljine, tipe pokrovnosti tal in nekatera obrežna zavarovanja (povzeto po Giordanengo in sod., 2016). ....	119
<b>Preglednica 8.6:</b> Strižni koti glede na zrnavostno sestavo materiala (Julien, 2002). ....	126
<b>Preglednica 9.1:</b> Raba tal po skupinah glede na kategorizacijo MKGP. ....	140
<b>Preglednica 9.2:</b> Izračuni indeksov HI (indeks nevarnosti), II (indeks antropogenega vpliva) in RI (združeni Indeks ogroženosti za prvih pet odsekov (S01 do S05) za slovensko obalo. V vrsticah so podani vplivni faktorji po prispevku Del Río in Gracia (2009), stolpci pa predstavljajo vrednosti za vsak odsek posebej. Odebeljene vrstice v spodnjem delu tabele so izračunani indeksi HI, II in RI za vsak odsek obale. ....	153
<b>Preglednica 9.3:</b> Vrednosti Manningovega koeficienta za različne kategorije rabe tal (Pivk, 2023)..	157
<b>Preglednica 9.4:</b> Izbrane vrednosti Manningovega koeficienta hrapavosti za posamezne rabe tal. .	165
<b>Preglednica 10.1:</b> Mejne kritične vrednosti pretočnih hitrosti ( $V_{krit}$ ) in strižnih napetosti ( $\tau_{krit}$ ) na podlagi priporočenih vrednosti iz literature. ....	215
<b>Preglednica 10.2:</b> Priporočeni razredi erozijske nevarnosti v povezavi s povratno dobo pretoka in hidravličnimi razmerami.....	215

### **Kratek slovar izrazov, ki so tesno povezani s procesi rečne erozije:**

*Abrazija:* Erozija ostenja struge zaradi abrazivnega delovanja prenesenih plavin.

*Agradacija:* Dviganje dna struge zaradi povečanega odlaganja plavin kot posledica povečanega vnosa plavin ali zmanjšanja premestitvene zmogljivosti. Nasprotje degradaciji.

*Bočna erozija:* Erozija rečnih brežin, najizrazitejša v spodnjem delu brežine (peta brežine) in na zunanjih straneh rečnih zavojev.

*Bočna migracija:* Proces, pri katerem struga spremeni svojo lokacijo zaradi erozije (izrazito na zunanjih bregovih) in odlaganja (na notranjih bregovih) ali množičnega propadanja bregov struge.

*Degradacija:* Znižanje dna struge zaradi erozije (izpiranja in prenosa plavin iz struge) zaradi zmanjšanja vnosa plavin ali povečanja pretočne zmogljivosti. Nasprotje agradaciji.

*Dinamično ravnovesje:* Stanje vzdolž odseka vodotoka, ko so hidromorfološke razmere (potek trase vodotoka, geometrijske oblike prečnih prereзов struge, nakloni dna, količina odplavljenih in odloženih plavin itd.) v navideznem ravnovesju, ki je časovno spremenljivo zaradi delovanja vodnega toka. Včasih poimenovano tudi *geomorfološko ali hidromorfološko ravnovesje*.

*Erozijsko-sedimentacijski cikel:* Cikel sedimentov, pogosto poimenovan s splošnim izrazom »erozija«, ki vključuje vremenske vplive in erozijo kamnin in klastičnih sedimentov, njihov transport in odlaganje, vključno z dvigovanjem zemeljskega površja.

*Erozija celinskih voda:* Skupno poimenovanje procesov rečne erozije skladno z Zakonom o vodah (ZVO-1). Erozija celinskih voda se najpogosteje deli na globinsko in bočno erozijo (območja strug vodotokov oz. vodna zemljišča) ter površinsko erozijo (proces erozije celinskih voda ob strugah vodotokov).

*Erozijsko območje:* skladno s 87. členom ZV-1 so to zemljišča, ki so stalno ali občasno pod vplivom površinske, globinske ali bočne erozije vode, in sicer zemljišča, ki so: 1. izvori plavin (erozijska žarišča), 2. pod vplivom hudournih voda (povirja), 3. sestavljena iz kamnin, podvrženih preperevanju, 4. pod vplivom valovanja morja (klifi).

*Fluvialna/rečna erozija:* Rahljanje in odstranjevanje materiala (plavin in plavja) z dna struge, brežin ter obdajajočih poplavnih območij zaradi delovanja vodnega toka. Skladno z izrazoslovjem, uporabljenim v ZV-1 in Uredbi o pogojih in omejitvah za izvajanje dejavnosti in posegov v prostor na območjih, ogroženih zaradi poplav in z njimi povezane erozije celinskih voda in morja lahko pod procese rečne erozije štejemo površinsko, globinsko in bočno erozijo celinskih voda.

*Globinska erozija:* Erozija dna strug vodotokov, ki vodi v poglobljanje.

*Koridor rečne erozije:* Območje vzdolž struge vodotoka, kjer je zelo povečana verjetnost pojava procesov rečne erozije.

*Lebdeče plavine:* Drobnozrnate plavine (zrnavostni razredi večinoma do drobnega peska), ki lebdijo daljše obdobje v vodnem toku in se ne dotaknejo dna oz. se ne usedejo na dno. Povzročajo kalnost.

*Odlaganje plavin:* Usedanje prenesenega materiala po eroziji in transportu (enako kot *sedimentacija*).

*Plavje:* Material, ki plava v vodnem toku.

*Plazljivo območje:* Skladno s terminologijo ZV-1 so to zemljišča, kjer je zaradi pojava vode in geološke sestave tal ogrožena stabilnost zemeljskih ali hribinskih sestojev.

*Plazovito območje:* Skladno s terminologijo ZV-1 so to zemljišča, kjer zaradi klimatskih in topografskih razlogov redno prihaja do pojava snežnih plazov ali pa obstaja velika verjetnost, da se pojavijo.

*Ploskovna erozija:* Erozijski procesi, ki so posledica površinskega odtekanja plitkega površinskega padavinskega odtoka predno se začne koncentrirati in pride do razvoja nadaljnjih intenzivnejših oblik vodne erozije. Intenzivnejše oblike ploskovne erozije so prisotne na razgaljenih površinah (npr. erozijska žarišča).

*Premeščanje plavin:* Gibanje (transport) erodiranega rečnega materiala.

*Razbremenjevanje, odplavljanje:* Odstranjevanje materiala z dna in bregov struge zaradi hidravličnega delovanja.

*Raztapljanje/korozija:* Erozija struge in bregov zaradi raztapljanja topnega materiala v tekoči vodi.

*Rinjene plavine:* Pesek, melj, prod in drug erozijski kamninski drobir, ki ga vodni tok premešča po dnu struge vodotoka oz. v neposredni bližini dna.

## DELOVNI SKLOP 1

### UVOD

Fluvialna ali rečna erozija je skupen izraz za številne naravne procese vzdolž rečnih strug, ki so posledica gibanja vodnega toka. Gre večinoma za t.i. linijsko erozijo, ki poteka vzdolž linije poteka strug vodotokov v sorazmerno omejenem pasu oz. koridorju. Rečna erozija je proces odstranjevanja in obrabe (obrusa, abrazije) materiala, ki sestavlja strugo in brežine ter je sestavni del erozijsko-sedimentacijskega cikla, ki močno oblikuje pokrajino (Charlton, 2008). Rečna erozija je način prilagajanja površja silam, ki jih povzročata vodni tok, in spremembam v porečju kot posledica spremenjenih hidroloških razmer. Spremembe v porečjih z vidika erozije so lahko kratkoročne ali dolgoročne. Kratkoročne so povezane predvsem s poplavami, vključujejo pa tudi spremembe odtočnih razmer zaradi spremenjene pokrovnosti površin po posameznih naravnih ali s strani človeka spodbujenih procesih, kot so požari v naravi, plazovi itd. Dolgoročne spremembe v porečjih so pogosto povezane s spremenjeno rabo tal, krčenjem gozdov in obsežnejšimi spremembami odtočnih razmer, povezanih s širšim hidrološkim in meteorološkim dogajanjem (Carey in sod., 2015). Spremembe hidroloških in meteoroloških vzorcev so nerazdružljivo povezane s podnebnimi spremembami, v hidrološkem smislu se podnebne spremembe odražajo predvsem v spremenjeni pogostosti in magnitudi poplavnih dogodkov (Behrens in sod., 2010; Gobiet in sod., 2014; Matte in sod., 2019), ki neposredno vplivajo na procese rečne erozije. Glede na spremenjene podnebne razmere bo zato treba v prihodnje predvideti tudi spremembe v obsegu erozijskih nevarnosti in spremembe vzorcev rečne erozije (ASFPM, 2016).

Stabilna rečna struga ostaja skozi čas podobna po obliki in dimenzijah prečnega prereza ter se le postopoma in občasno spreminja (v smislu geometrijske oblike ali tlorisnega poteka), kadar je v t.i. *dinamičnem ravnovesju* (ISJ, 2018). V stabilnem stanju je na odsekih strug prisotna kontinuiteta plavin, pri čemer količina in lastnosti erodiranega in odloženega materiala ostajajo bolj ali manj enake. Vodotok, ki je v dinamičnem ravnovesju, le postopoma in občasno doživlja nekatere spremembe in le postopoma ali občasno spreminja svoj tlorisni potek (ISJ, 2018). Če se spremenijo odtočne razmere na prispevnem območju (npr. kot posledica spremenjene rabe tal), se mora rečni sistem prilagoditi spremenjenim hidravličnim razmeram in spremembam v vnosu sedimentov, dokler se ne vzpostavi novo dinamično ravnovesje, kar pa je lahko zelo dolgotrajen proces. Medtem ko se rečni sistem ponovno uravnoveša, se neizbežno spremeni tudi poplavna in erozijska nevarnost v njegovi okolici (ASFPM, 2016). Spremembe, ki vplivajo na ravnovesje vzdolž posameznih odsekov strug vodotokov, so najpogosteje posledica sprememb količin padavin in odtoka ter njihove časovne porazdelitve, sprememb rabe tal in pokrovnosti ter raznih regulacijskih posegov v struge vodotokov (FEMA, 1999). Podobno kot večina rečnih procesov so tudi procesi rečne erozije (in celoten erozijsko-sedimentacijski cikel) zelo dinamični in kompleksni, zaradi česar z rečno erozijo povezane probleme težko analizira le ena skupina strokovnjakov in zahteva interdisciplinaren pristop (ASFPM, 2016).

Pri pretokih, ki popolnoma zapolnijo glavno strugo, so običajno procesi rečne erozije zelo intenzivni, zato takšnemu pretoku pravimo tudi strugotvorni pretok (*angl. bankfull discharge*), primeren je tudi izraz »prevodnost struge«. Strugotvorni pretok je pomemben tudi z vidika verjetnosti pojava erozijskih procesov, saj je povratna doba tovrstnih pretokov običajno kratka, kar pomeni, da je celotno ostenje strug pogosteje podvrženo velikim hidravličnim obremenitvam. Povratna doba strugotvornih pretokov na posameznih odsekih vodotokov je zelo spremenljiva v odvisnosti od hidroloških in hidromorfoloških lastnosti ter človekovih posegov v struge vodotokov. Na naravnih odsekih strug vodotokov se povratne dobe strugotvornih pretokov večinoma giblje med 1 in 5 let (Castro in Jackson, 2001; Petit in Pauquet,

1997). V tlorisne poteke in pretočne prereze strug vodotokov smo in še vedno intenzivno posegamo z raznimi ureditvami. Spremembe konfiguracije tlorisnih potekov strug najpogosteje vključujejo spremembe, kot so izravnavanje, usmerjanje, širjenje rečnih strug ali uravnavanje pretokov z odvzemi, jezovi ali akumulacijami. Tudi ostale, s človekovimi dejavnostmi pogojene spremembe značilnosti vodnega toka močno vplivajo na intenzivnost in obseg erozijskih in sedimentacijskih procesov vzdolž strug vodotokov. Rečna erozija lahko povzroči veliko škodo na infrastrukturi, vključno s premostitvami, cestni infrastrukturi, vodni infrastrukturi (razni hidrotehnični objekti, objekti za protipoplavno zaščito itd.), pa tudi na vseh drugih objektih in stavbah na vplivnih območjih poplavnih voda, ki so podvrženi procesom rečne erozije (ISJ, 2018; Shahriar in sod., 2021). Velik obseg sproščanja erodiranega materiala iz povirnih delov porečij lahko povzroči zaplavljanje prečnih prerezov strug, drenažnih sistemov in protipoplavnih ureditev s plavinami, kar povzroča visoke stroške vzdrževanja zaradi potrebnega večkratnega poglobljanja in čiščenja rečnih strug. Poleg tega odlaganje velikih količin materiala v rečnih strugah zmanjšuje njihovo pretočnost, kar povzroči zmanjšanje odpornosti na poplave (Li in sod., 2021).

Procesi rečne erozije so večinoma omejeni na območja strug vodotokov. V času poplavnih dogodkov, ko se poplavne vode razlijejo izven glavnih strug na poplavna območja, se predvsem ob lokalno povečanih pretočnih hitrostih in strižnih napetosti na poplavnih območjih lahko pojavijo intenzivnejši procesi rečne erozije. Lokalno se tovrstne erozijske zajede pojavljajo predvsem na lokacijah, kjer so pretočne hitrosti povečane. Zelo pogosto se erozijske zajede pojavijo na lokacijah prelivanj poplavnih voda preko posameznih ovir (npr. linijskih elementov, kot so protipoplavni ali cestni nasipi) ali pri obtokanju posameznih objektov na poplavnih območjih. Poleg tega so lahko vplivi na poplavno območje dolgotrajni, poplavna in erozijska ogroženost poplavnega območja pa je lahko povečana še precej časa po umiku poplavnih voda (Janicke, 2002). Voda, ki poplavlja poplavno območje, je v interakciji s tlemi in sedimenti ter vegetacijo, površine so lahko izpostavljene intenzivnim erozijskim procesom, lahko se celo oblikujejo nekatere nove struge in kanali, ki jih prej ni bilo, spremenijo se lahko tudi geotehnične karakteristike temeljnih tal (Janicke, 2002; Wohl, 2014).

Gledano z ekonomskega vidika so škoda in zavarovalni zahtevki zaradi procesov rečne erozije lahko bistveno višji kot zaradi samega razlivanja poplavnih voda, saj procesi rečne erozije ne prizadenejo le objektov znotraj poplavnega območja ali določenih inundacijskih območij, temveč tudi objekte zunaj njih. V nasprotju s poplavno škodo na objektih zunaj vodotokov, ki je običajno začasna in omejena predvsem na trajanje preplavitvev, lahko rečna erozija trajno poškoduje objekte in/ali poškoduje temeljna tla, tako da postanejo neprimerna za sanacijo objektov, rekonstrukcije ali kakršno koli drugo rabo. V nasprotju z razlivanjem poplavnih voda, ki povzročijo večji obseg škode le v večjih poplavnih dogodkih, lahko precejšnjo škodo z vidika erozijskih procesov povzročijo ponavljajoči se manjši poplavni dogodki, znotraj katerih prihaja do postopnega povečevanja obsega erozijskih zajed in poškodb (ASFP, 2016; ISJ, 2018). Agencija FEMA je v poročilu (FEMA, 1999) podrobno razčlenila problematiko rečnih erozijskih procesov. Na območju Združenih držav Amerike je približno 7 milijonov kilometrov vodotokov, od tega od tega jih je 8–10 % izpostavljenih povišani stopnji erozijske nevarnosti, na vsaj 2 % skupne dolžine vodotokov pa so prisotni obsežni in intenzivni procesi rečne erozije. Zaradi hitrega razvoja in širitve urbanih površin je zlasti vzdolž manjših vodotokov dejanski obseg procesov rečne erozije še bistveno večji. Povprečna letna škoda na vodotokih zaradi erozijskih procesov je bila ocenjena na 450 milijonov dolarjev, pri čemer so bili skupni letni stroški odpravljanja posledic ocenjeni na več kot milijardo dolarjev. Ti stroški med drugim vključujejo stroške čiščenja nanosov iz strug po poplavnih dogodkih, rekonstrukcije in obnove obrežnih zavarovanj, vodne infrastrukture ter škodo na premostitvenih objektih in ostali infrastrukturi (predvsem cestni in drugi komunalni infrastrukturi).

Seveda pa moramo na procese rečne erozije vedno gledati tudi z vidika naravnih hidromorfoloških razmer. Aktivno erodiranje bregov vodotoka prispeva k ohranjanju ekološke pestrosti, saj ustvarja raznolike sedimentne habitatne zaplate in strukture (Piégay in sod., 2005; Vietz in sod., 2018). Poleg tega rečna erozija spodbuja izmenjavo, sproščanje in prenos organskih snovi in mineralnih delcev zemljine ter razvoj različnih habitatov na poplavnih območjih (Addy in sod., 2016; Florsheim in sod., 2008). Prosto gibanje območja rečne struge in spremljajočih hidromorfoloških procesov med strugo vodotoka, obrežnim pasom, poplavnim območjem in prehodnim zunanjim robom (celotna širina tovrstnih območij je v literaturi pogosto definirano kot rečni koridor) spodbuja biotsko raznovrstnost in ponovno povezanost procesov z vidika različnih dimenzij (vzdolžne, prečne, vertikalne in časovne) vzdolž območij rečnih koridorjev. Podobno kot v primeru strugotvornega pretoka je prostorsko razsežnost rečnega koridorja težko povezati s povratno dobo pretoka. Podani so bili sicer predlogi, da se prostorsko razsežnost rečnega koridorja definira z obsegom poplavljanja pri pretoku določene povratne dobe (npr.  $Q_{100}$ , (FISRWG, 1998)), vendar tovrstni pristop kasneje ni bil širše sprejet. Ob tem je ponovna aktivacija poplavnih območij eden osnovnih sonaravnih oz. (skladno s sedanjo zaželeno terminologijo) NBS ukrepov (*angl. Nature Based Solutions*), ki omogoča začasno zadrževanje poplavnih voda, kar posledično zmanjšuje poplavno ogroženost dolvodno (Addy in sod., 2016). Velik obseg rečne erozije ima seveda lahko tudi negativen učinek na rečne ekosisteme, saj poslabša stanje obrežnih habitatov in zmanjša biotsko raznovrstnost obrežnih območij (Vietz in sod., 2018). Erozijska tal na kmetijskih zemljiščih, povezana s hitrim gibanjem poplavnih voda po kmetijskih površinah, lahko povzroči precejšnjo izgubo rodovitnih tal in hranil, kar vpliva na rodovitnost tal in posledično na pridelavo pridelkov. Poleg tega lebdeče plavine povečajo motnost vodnega toka in skupaj z onesnaževali, ki so adsorpcijsko vezani na zrna lebdečih plavin, povzročajo poslabšanje kakovosti vode in ekoloških razmer v rečnih ekosistemih (Li in sod., 2021) in seveda tudi na obdajajočih poplavnih površinah, kjer se lebdeče plavine ob umiku poplavnih voda intenzivno odlagajo.

V nadaljevanju v posameznih poglavjih 1. delovnega sklopa ciljnega raziskovalnega projekta (CRP projekt) podrobneje razčlenimo različne procesne vidike, ki so tesno povezani s pojavnostjo rečnih erozijskih procesov. V 1. poglavju podamo pregled različnih pojavnih oblik erozijskih procesov vzdolž strug vodotokov ter njihovega prepoznavanja. V 2. poglavju podajamo kratek pregled procesov sproščanja, premeščanja in odlaganja plavin s poudarkom na sprožilnih mehanizmih znotraj erozijsko-sedimentacijskega kroga, ki močno vplivajo na procese rečne erozije. V 3. poglavju predstavljamo problematiko rečnih erozijskih procesov na kmetijskih površinah, prevladujoči rabi površin tako v Sloveniji kot drugje po svetu znotraj območij, izpostavljenih procesom rečne erozije. Čeprav je velika večina erozijskega dogajanja na območju Slovenije povezana s celinskimi vodami, je v svetovnem merilu problem erozije obale morja zelo pereč. Temu je namenjeno 4. poglavje, ki podaja procesni vpogled v erozijo obale morja. Poglavje 5 je namenjeno predstavitvi preteklega erozijskega dogajanja vzdolž slovenske rečne mreže v nekaterih preteklih poplavnih dogodkih, da lahko pridobimo vsaj začetni vpogled v obseg in intenziteto rečnih erozijskih procesov ter merjenih ali ocenjenih količin erodiranega, transportiranega in odloženega materiala vzdolž posameznih odsekov vodotokov na območju Slovenije. Poglavje 6 zaokrožuje teoretični del s pregledom nekaterih pristopov k analizi nevarnosti rečne erozije in erozije morja, s poudarkom na oceni potencialnega prostorskega obsega in intenziteti procesov rečne erozije in erozije obale morja. Delovni sklop 1 je povzet v poglavju 7. V 2. delovnem sklopu (poglavje 8) predstavljamo razvoj metodologije za oceno intenzivnosti erozijskih procesov in kartiranje območij erozijske nevarnosti celinskih voda in morja. V 3. delovnem sklopu (poglavje 9) so predstavljeni rezultati praktičnih primerov uporabe manj kompleksnih in kompleksnejših metod za analizo procesov rečne erozije in erozije morja. V 4. delovnem sklopu (poglavje 10) sledi sinteza predlagane metodologije.

## 1 EROZIJSKI PROCESI VZDOLŽ STRUG VODOTOKOV IN PREPOZNAVANJE PROCESOV REČNE (FLUVIALNE) EROZIJE

Rečna oz. fluvialna erozija vključuje erozijske procese, ki se intenzivno odvijajo vzdolž vplivnih območij rečnih strug (Coldwell, 1957). Ko vodni tok erodira nanose plavin na območju ostenja struge, jih odnaša in kasneje odlaga naprej vzdolž vodotoka.

Erozija dna strug vodotokov je predvsem posledica kombinacije naslednjih procesov (Thompson in Turk, 1997):

- Hidravličnih lastnosti vodnega toka in z njimi povezanih procesov erozije dna in brežin strug vodotokov.
- Abrazije oz. drgnjenja plavin in plavja ob ostenje.
- Raztapljanja (korozije).

Hidravlične lastnosti vodnega toka se običajno najintenzivneje kažejo skozi procese globinske erozije vzdolž strug vodotokov, ki povzročajo neposredno odstranjevanje materiala iz območja dna strug in pete brežine zaradi hidravličnega delovanja vodnega toka (Carey in sod., 2015). S hidravličnega vidika je to predvsem posledica preseženih kritičnih vrednosti pretočnih hitrosti in strižnih napetosti za posamezne zrnastostne razrede plavin. Na intenzivnost procesov globinske erozije zaradi hidravličnega delovanja močno vpliva bilanca dotoka plavin iz gorvodnih območij. Prečni hidrotehnični objekti (predvsem pregradni objekti) močno vplivajo na dotok plavin iz gorvodnih območij in ga lahko v celoti prekinejo; na bilanco plavin lahko v odvisnosti od lokalnih razmer močno vplivajo tudi protipoplavne ureditve in razni odvzemi materiala iz strug vodotokov (Carey in sod., 2015). Z vidika dinamike procesov premeščanja plavin je opazno, da ko se iz struge odstrani več materiala, kot je dotok materiala iz gorvodnih odsekov, se struga začne intenzivneje poglobljati. Nasprotno, kadar se več sedimentnega materiala odloži, kot se ga spira in prenese, postane struga plitvejša zaradi odlaganja plavin (Janicke, 2002). Poglobljanje oz. degradacija dna struge lahko sproži obsežno erozijo vzdolž brežin strug vodotokov in obrežnih ureditev in privede do poškodb vodne in ostale infrastrukture v strugi vodotoka oz. neposredni bližini (ASFPM, 2016; Meadows in sod., 2014; Carey in sod., 2015; NRM, 2014).

Abrazijska erozija je posledica drgnjenja in trenja plavin ob ostenje strug vodotokov. Med premeščanjem plavin se obrusijo ob stiku s kamninsko podlago ali ob udarjanju posameznih zrn plavin med seboj (Thompson in Turk, 1997). Takšno abrazijsko delovanje močno vpliva tudi na razne hidromorfološke oblike v strugah vodotokov, npr. oblikovanje stopenj, kaskad (Craswell in Akib, 2020; Müller-Hagmann in sod., 2020; Zhou in sod., 2020).

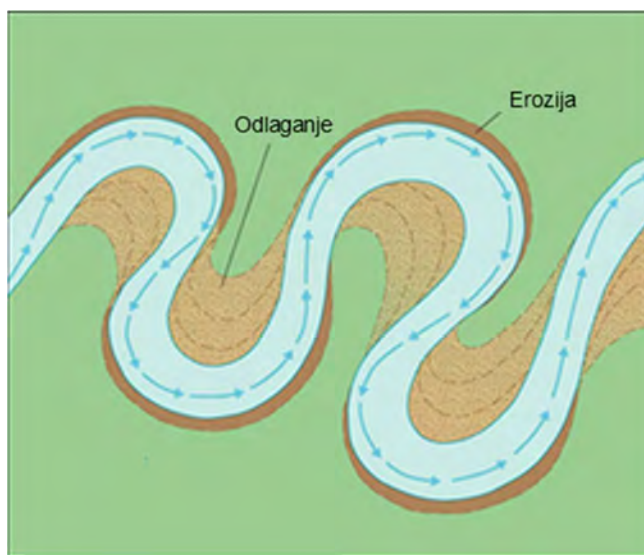
Raztapljanje kamninske osnove je izrazitejša predvsem vzdolž strug vodotokov na območjih topnih litologij, kot so karbonati. Ko voda teče v strugi, ki je sestavljena iz topnih litologij, ob stiku z vodo raztaplja topne minerale (Charlton, 2008). Z vidika samih procesov rečne erozije je seveda raztapljanje kamninske osnove izrazito počasnejši proces od prej omenjenih in običajno tudi bistveno manj problematičen.

Intenzivnost erozijskih procesov vzdolž strug vodotokov je tesno povezana z nakloni dna struge. Proces rečne erozije se namreč močno intenzivirajo zaradi povečanja naklona dna struge, posledično večjih hitrosti vodnega toka, večje nestabilnosti in lokalne spremenljivosti hitrostnega polja vodnega toka in posledično večjih in neenakomerno razporejenih strižnih napetosti, s katerimi vodni tok deluje na ostenje struge vodotoka. S hidravličnega vidika prihaja zaradi povečanih hitrosti vodnega toka do lokalnih prehodov iz mirnega v deroči tok, različnih oblik vodnih skokov, ki so z erozijskega vidika najbolj problematični. Povečan naklon dna struge je pogosto posledica izravnave poteka trase struge



vodotoka ali poškodovanja in odstranitve prečnih objektov, kot so pregrade, jezovi ali stopnje, pa tudi zaradi odstranjevanja plavin. Procesu rečne erozije se izrazito okrepijo tudi zaradi lokalno spremenjenega hitrostnega polja vodnega toka, ki je posledica obtekanja raznih ovir, npr. drevesnih debel ali zagozdenega plavja v strugah (Carey in sod., 2015).

Če skušamo povzeti zgoraj napisano, je sposobnost vodotoka, da povzroča erozijske procese, odvisna od kombinacije moči vodnega toka in lastnosti strug vodotokov (tlorisni potek, oblika, naklon in hrapavost, lastnosti materiala) ter hidroloških razmer, ki so odvisne od lastnosti prispevnih površin in padavin (Thompson in Turk, 1997). Procesu rečne erozije so sestavni del naravnega hidromorfološkega dogajanja tvorbe rečnih zavojev (Slika 1.1). Kljub temu pa povečanje odtoka po rečnih strugah, bodisi zaradi spremenjenih lastnosti padavin bo zaradi povečanja površinskega odtoka zaradi spremenjene rabe tal in povečane urbanizacije, močno vpliva na procese rečne erozije. Spremembe v obsegu erozijskih procesov vzdolž manjših erozijskih jarkov ali nastanek bočnih zajeđ na zunanji strani rečnih zavojev, odlaganje plavin in tvorba prodišč vzdolž notranji strani rečnih zavojev lahko nakazuje, da je prišlo do določenih sprememb v hidroloških razmerah na prispevnem območju (Carey in sod., 2015). S povečevanjem površinskega odtoka in koncentracijo površinskih vodnih tokov se povečuje strižna napetost, ki deluje na dno in brežine, kar spodbudi intenzivnejše procese rečne erozije, poveča pa se tudi premestitvena zmogljivost vodnih tokov za transport rinjenih in lebdečih plavin (Janicke, 2002).



**Slika 1.1:** Shematski prikaz procesov rečne erozije vzdolž vijugajočega rečnega odseka.

## 1.1 Erozijski procesi rečnih brežin

Z vidika ekoloških procesov so brežine strug vodotokov vmesnik med vodnim okoljem in poplavnimi območji (Vietz in sod., 2018), erozijski procesi pa spodbujajo sukcesijski razvoj obrežne vegetacije in vodnih ter obvodnih habitatov (Florsheim in sod., 2008). S tega vidika so erozijski procesi na območjih brežin strug vodotokov pomemben element dobrega stanja voda. V nasprotju s pozitivnimi učinki rečne erozije na vodne in obrežne habitate, so erozijski procesi in poškodbe obrežnih zavarovanj velika grožnja za različne elemente grajenega okolja, ki se nahajajo v bližini rečne mreže. Procesu erozije brežin nadzorujejo različni dejavniki in lastnosti, ki se lahko zelo spreminjajo tako v času kot tudi prostoru. Ob tem velja poudariti, da je porušitev brežin po navadi posledica kombinacije različnih dejavnikov. Na



dovzetnost brežin struge za erozijo vplivajo material, iz katerega so brežine sestavljene (litološka in mineraloška sestava, zrnavostna sestava, konsolidiranost oz. utrjenost in kohezivnost materiala itd.), geometrija brežin, značilnosti hidroloških in hidravličnih razmer ter prisotnost vegetacije na brežinah. Občutljivost zemljin v brežinah strug na erozijo je v veliki meri odvisna tudi od uležanosti - rašččnosti materiala. Meritve in izkušnje so pokazale, da so lahko razsute drobnozrnate zemljine tudi do 50-krat bolj erodibilne kot naravno utrjene (Blazewicz in sod., 2020). Zrnavostna sestava materiala v brežinah strug vodotokov in sposobnost vezanja posameznih zrn (npr. kohezivnost) določata odpornost brežin proti rečni eroziji (FEMA, 1999). Ker je material v brežinah običajno zelo heterogen, se dovzetnost brežin za erozijo prostorsko zelo spreminja glede na lastnosti materiala. Za najbolj erodibilne v splošnem veljajo nekohezivni materiali z velikim deležem delcev velikostnega razreda zrn peskov (FEMA, 1999). Na splošno pa velja, da erodibilnost materiala narašča od vezanih glinenomeljastih zemljin proti sipkim drobnozrnatim, zatem pa pojema sorazmerno z naraščanjem premera zrn in prepustnostjo materiala. V strugah vodotokov, vrezanih v nekohezivne, nevezljive, lahko tudi klastične materiale, je zrnavostna struktura materiala bolj grobozrnata, ki vključuje materiale z delci velikosti peska, gramoza, prodnikov, balvanov itd., včasih vgrajenimi v nekakšno matrico, ki jo medsebojno povežejo različni deleži drobnozrnatih (kohezivnih) materialov. Nevezljivi materiali se upirajo eroziji predvsem z lastno težo zrn. Glede na možnost nenadnih nepredvidenih porušitev, udorov in splazitev pobočij in brežin so najbolj nevarne tiste zemljine, katerih ogrodje tvorijo peski, mešani z glinenomeljastimi frakcijami (Janes in sod., 2017).

Vpliv vegetacije na odpornost brežin strug vodotokov je v literaturi pogosto podan precej dvoznačno. V splošnem velja domneva, da lesnate rastline z globokimi koreninami stabilizirajo tla in tako blažijo vpliv procesov rečne erozije (Beck, 2006; Requena, 2008; Schmautz, 2003). Tako drobne kot grobe korenine držijo skupaj sipek material brez izrazite sposobnosti kohezije. Koreninski sistem tudi zavira nastajanje vrtincev (Beck, 2006). Po drugi strani pa lahko vodni tok vegetacijo s plitvim koreninskim sistemom izpere in le-ta pade v strugo (Beck, 2006; Oplatka, 1998). Ta pojav lahko lokalno dodatno intenzivira bočno erozijo. Po Oplatki (1998) je stabilizacijski učinek vegetacije odvisen predvsem od zrnavostne sestave materiala v brežinah.

Na erozijo brežin vplivajo tudi številni antropogeni dejavniki, kot so spremembe v vegetacijskem pokrovu, spremembe rabe tal (npr. urbanizacija) in gradnja protipoplavnih ureditev, katerih vpliv na odtočne razmere na prispevnih območjih in pretočne razmere v strugah vodotokov je lahko zelo velik (Janes in sod., 2017). Z vidika fizikalnih (hidrodinamičnih) razmer so erozijski procesi posledica napredujoče nestabilnosti v razporeditvi pretočnih hitrosti v strugah vodotokov. Medsebojno delovanje naravnih erozijskih procesov vzdolž strug vodotokov in hidravličnih razmer neizbežno vpliva na spremembe geometrijskih oblik strug vodotokov. Ker se tlorisni potek struge spreminja in pogosto postane bolj ukrivljen, zmanjšanje radija rečnega zavoja intenzivneje usmerja vodni tok proti zunanji brežini struge in povečuje intenziteto erozijskih procesov ob zunanjih brežinah, hkrati pa se zaradi zmanjšanja hitrosti vodnega toka na notranjih straneh rečnih zavojev plavine odlagajo. Tlorisni poteki strug vodotokov vplivajo na preoblikovanje geometrije prečnih prereзов strug vodotokov in zmanjšanje padca dna strug vodotokov. Ob tem velja poudariti, da so procesi zvezni tako časovno kot prostorsko (Janes in sod., 2017). Dodatno lahko procese rečne erozije brežin pospešijo cikli zamrzovanja in odmrzovanja ter drugi vremenski procesi, ki vplivajo na lastnosti materiala v brežini (Wohl, 2014; FEMA, 1999; Janes in sod., 2017). S širitvijo obsega erozijskih zaved, ki lahko vodijo v porušitev brežin, procesi rečne erozije napredujejo, kar vodi v spremembe prečnih prereзов struge in končno v spremembo tlorisnih potekov strug. Ločimo različne mehanizme erodiranja brežine strug, nekateri od njih vplivajo na počasnejše in bolj zvezno napredovanje procesov rečne erozije in postopno spiranje materiala iz brežine, drugi pa povzročajo obsežne in nenadne porušitve brežin. V splošnem v

inženirski praksi erozijo rečnih brežin opišemo kot kombinacijo **globinske** in **bočne erozije**. Ogroženost z globinsko erozijo se pojavlja na površinah, kjer vertikalna komponenta erozijske sile vodnega toka preseže stopnjo odpornosti hribinskega materiala (tal, po katerih vode odtekajo). Vodni tok se začne vertikalno zajedati v posteljico struge, pojavi se poglobljanje strug. Spodkopavanje dna struge se začne, ko kinetična energija tekoče vode premaga odpor notranjega trenja in kohezijo materiala v strugi, tj. odpornost dna in bregov. Voda rahlja in trga pesek in grušč iz svojega omočenega oboda, vdira v to razrahljano gmoto in jo odplavlja s seboj. Tako se začne dno postopno poglobljati v vzdolžni smeri, brežina in pobočje nad dnom struge izgubita svoje oporišče v vznožju in se začneta udirati v strugo. Ta proces vdiranja traja vse dotlej, dokler se na pobočju ponovno ne izoblikuje naravni nasipni naklon materiala z izhodiščem v novi osnovni točki (bazni, fiksni točki) v strugi. Kadar pa je odpor dna struge močnejši od vlečne sile vode in so brežine manj odporne, pa nastopi prečno spodjedanje bregov, ki prav tako spremeni osnovno točko pete brežine, ki se začne udirati.

Na bočno delovanje vodotoka, ki se pojavlja na zunanjih straneh rečnih zavojev - konkavah (lahko tudi hkrati s spodkopavanjem, poglobljanjem dna), vpliva poleg erozije dna tudi nagib brežin. Globinska in bočna erozija spodjedata brežine in zmanjšujeta oporo pobočjem, ki se zato udirajo (usadi). Če spodjedena brežina ni visoka, se nastali udori kmalu umirijo, če jih voda ne erodira več. Na strmih in visokih pobočjih pa se praviloma ne umirijo, temveč se širijo po pobočju naprej. Nadaljnje udiranje spodjedenih pobočij poteka različno, v odvisnosti od lastnosti zemljišča in materiala, v katerem se je pojavilo: lahko se rušijo le površinsko, zaradi prevelikega naklona brežin, medtem ko pobočje samo miruje, ali pa zajame udiranje tudi bolj globoke plasti, ki se začno rušiti ali celo drseti navzdol.

Odločilno vlogo pri pojavih bočne erozije ima protierozijska odpornost oz. utrjenost brežin (Hunzinger in Durrer, 2008). Tako kot pri vseh strukturnih zaščitnih ukrepih je treba tudi pri ukrepih za stabilizacijo brežin oz. obrežnih zavarovanjih redno preverjati njihovo ustreznost in prepoznati morebitne poškodbe (Romang, 2008). Če so hidrotehnični ukrepi poškodovani in nezadostno vzdrževani, njihova funkcionalnost ni več zagotovljena. Problematične so zlasti poškodbe in morebitne porušitve prečnih objektov na vodotokih, ki lahko vodijo v intenzivne procese globinske in bočne erozije. Posledica tega so t.i. **šibke točke**, na katerih se ob poplavih lahko širijo poškodbe obrežnih zavarovanj, kar vodi v nadaljnji razvoj erozijskih žarišč (Loat in Petrascheck, 1997).

V literaturi najdemo podrobnejšo razčlenitev prevladujočih mehanizmov erozije brežin, najpogosteje se ločijo naslednji mehanizmi, povezani s procesi rečne erozije:

- Površinsko spiranje materiala z brežine (angl. *bank scour*).
- Zdrs ali porušitev zgornjega dela brežine (angl. *bank slumping (topping of a slab)*). Sosledje procesa prikazano na Sliki 1.2.
- Spodjedanje brežin (angl. *bank undercutting*).
- Bočna erozija brežin (angl. *lateral bank erosion*).
- Izcejanje vode iz brežin (angl. *seepage*).
- Erozija brežin zaradi valovanja (angl. *fretting*).
- Napredovanje brežin (angl. *bank advance, aggradation*).

Zelo pogosto so lokalne erozijske zajede v brežinah kombinacija zgoraj navedenih mehanizmov in je med njimi težko določiti prevladujočega oz. posamezen mehanizem prevladuje zgolj v določenem delu časovnega sosledja procesov rečne erozije.



Slika 1.2: Mehanizem zdrs ali porušitev zgornjega dela brežine (prirejeno po Duro in sod., 2018).

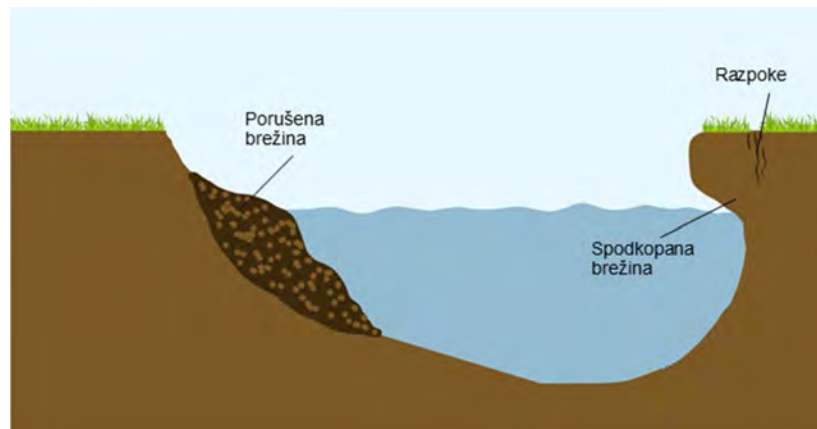
**Površinsko spiranje materiala z brežin** je neposredno odstranjevanje materiala na površini brežin zaradi strižnih napetosti oz. vlečne sile, s katero vodni tok deluje na ostenje struge. Tovrstno erozijo povzročajo velike pretočne hitrosti ali velika turbulenca vodnega toka ob brežini, ki jo lahko dodatno spodbudijo razne ovire gibanju vodnega toka, kot npr. zagozdeno plavje (Carey in sod., 2015; NRM, 2014).

**Zdrs ali porušitev zgornjega dela brežine** povzroči povečanje razpoložljivosti nekonsolidiranega materiala v brežini za nadaljnje premeščanje. Porušitev brežin je lahko posledica znižanja nivelete dna ali poglobljanja dna struge, ki vodi v povečanje višin in naklona brežin, prekomernega odlaganja izkopanega materiala vzdolž brežin ali v njihovi bližini ali umestitve struktur (objektov), ki dodatno statično obremenijo vrh brežin, odstranjevanja vegetacije z območja brežin ali hitrega upadanja nivojev poplavnih voda v strugah, ko je material v brežinah nasičen z vodo (Carey in sod., 2015; NRM, 2014; FEMA, 1999; Meadows in sod., 2014). Do zdrs bregov lahko pride na več načinov. Ti vključujejo porušitev po porušni drsini krožne oblike, prelomna porušitev (odlom in zrušitev) in rotacijsko sesedanje. Dejavniki, ki vplivajo na mehanizem porušitev brežin vključujejo lastnosti materiala v brežini, zlasti kohezivnost in vsebnost vode, višino in naklon brežine, prisotnost različnih vrst vegetacije ter raznih grajenih struktur na območjih brežin ali v neposredni bližini (Janicke, 2002).

**Spodjedanje brežin** je podoben proces kot spiranje materiala z brežine, vendar erozijsko odstranjevanje materiala iz brežin prevladuje na spodnjem delu brežin (na območju t.i. *pete brežine*). Takšna erozija lahko sčasoma privede do previsa brežine, ki je spodkopana. Z nadaljnjim napredovanjem spodkopavanja in povečevanjem previsnega dela brežine se previsni del na koncu sunkovito sesede. Oba zgoraj opisana procesa se običajno ne pojavita hkrati. Počasno odstranjevanje materiala iz spodnjega dela brežine in premikanje struge sta posledica erozijskega dogajanja v daljših obdobjih normalnih pretočnih razmer. Temu pa sledi nenadno zrušenje brežine, ki lahko sploh ni povezano z intenzivnejšimi procesi spodjedanja v času povišanih pretokov. Spodkopavanje brežin lahko spodbudi hiter vodni tok v neposredni bližini brežine, izpostavljenost mehkejših in erodibilnejših plasti zemljin in plavin v spodnjem delu brežin ali odstranitev oz. odplavljanje obrežne vegetacije (Carey in sod., 2015). Zelo pogosto je lokalno spodjedanje brežin povezano z lokalnimi hidravličnimi razmerami,

predvsem na prehodih iz deročega v mirni tok in pojavom vodnega skoka. Prav tako je spodjedanje brežin intenzivnejše na odsekih, kjer se v času povišanih pretočnih razmer pojavi deroči tok in valovit potek vodne gladine, s katerim so povezani pojavi makroturbulence (Matthes, 1947). Zelo pogosto je lokalno spodjedanje brežin povezano z različnimi ovirami toku vode npr. pri obtekanju večjih oblikovnih hrapavostnih elementov (npr. skal oz. bolj grobe sestave plavin na odsekih brzic, toge vegetacije, kot so drevesna debla) oz. plavja, zagozdenega v prečnih prerezih strug ali pri obtekanju posameznih konstrukcijskih elementov hidrotehničnih objektov.

**Bočna erozija brežin** je tesno povezana s spremembami v hitrostnem polju vodnega toka in je običajno skoncentrirana vzdolž zunanjih brežin na odsekih rečnih zavojev. V rečnem zavoju pride do premestitve matice vodnega toka (območja največjih pretočnih hitrosti) proti zunanji brežini rečne struge, ki je tako izpostavljena bistveno večjim hidravličnim obremenitvam (pretočnim hitrostim vodnega toka in strižnim napetostim). Na notranji strani rečnih zavojev pa zaradi manjših pretočnih hitrosti in manjših strižnih napetosti pride do odlaganja plavin. Poudariti velja, da gre s hidravličnega vidika za izrazito tridimenzionalno dogajanje, ki ga z običajnimi inženirskimi hidravličnimi izračuni in modelnimi poenostavitvami ne uspemo podrobno zajeti in opisati. Ogroženost zaradi bočne erozije je lahko posledica globinske erozije (udiranje brežin zaradi izgube opore v vznožju) ali posledica vijuganja vodnega toka, kjer pride do izraza horizontalna komponenta erozijske sile vode (posledično spodjedanje brežin ali vznožij pobočij in zatem njihovo udiranje). Lahko pa je tudi posledica ovir na brežini v dosegu srednjih in zlasti visokih vod (štrleče skale, tam rastoče drevice itd.). Take ovire lokalno povzročajo vrtinčasti vodni tok, hkrati pa njegovo matico neugodno preusmerjajo v ogroženo brežino, v katero se potem zajedajo in jo spodjedajo. Z vidika prostorske razporeditve je ta oblika erozije relativno dobro prepoznavna, se pa obseg bočne erozije lahko časovno precej spreminja, kar se nenazadnje odraža v spremembah tlorisnih potekov naravnih strug vodotokov.

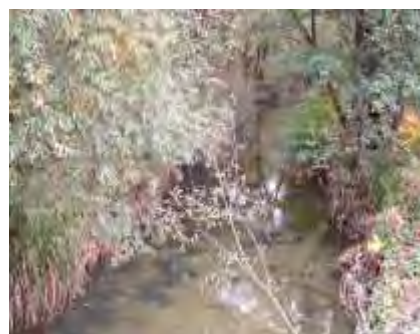


**Slika 1.3:** Shematski prikaz procesa spodjedanja brežine (prirejeno po ISJ, 2018).

Dolgotrajnejše **izcejanje vode iz brežin** lahko vodi v destabilizacijo materiala v brežini struge predvsem zaradi oslabiljene vezljivosti in kohezijskih lastnosti materiala v brežini. Negativen vpliv izcednih voda iz brežine je najbolj očiten v primerih, ko prihaja do hitrega znižanja gladin vode v strugi vodotoka, ob tem pa pride do pojava zastojnih (hidrostatskih) tlakov v brežini, iz katere se izcedne vode ne morejo hitro izcediti. Voda, ki se izceja skozi brežine v strugo, posledično destabilizira material v brežini (FEMA, 1999). Poškodbe brežin lahko povzroči tudi pronicanje in izcejanje podzemne vode (Wohl, 2014; Janicke, 2002). Pojav zastojnih tlakov in problemi, povezani z izcejanjem vode, so zelo pogosti na odsekih vodotokov, ki so pod vplivom obratovanja hidroenergetskih objektov, kjer so pogosta večja in hitra nihanja gladin.

Razrahljanje, spiranje in odplavljanje materiala z brežin lahko povzroči tudi **valovanje**. Ta oblika rečne erozije je pogosta vzdolž plovnih poti po strugah vodotokov, kjer valovanje povzroča promet plovil, vključuje pa tudi valovanje, ki ga povzročajo vetrovi (Carey in sod., 2015). Tovrstno valovanje je vzdolž ožjih rečnih strug zelo omejen pojav.

V nasprotju s procesi odmikanja brežin strug zaradi rečne erozije lahko pride tudi do **agradacije oz. napredovanja brežin** in posledičnega zmanjšanja prečnih prerezov strug vodotokov. Napredovanje brežin je običajno povezano z nestabilnostjo hidromorfoloških procesov, spremenjenimi hrapavostnimi lastnostmi brežin, lahko pa tudi s spremenjenimi hidrološkimi (odtočnimi) razmerami. Sukcesijsko razraščanje vegetacije na brežinah izboljša njihovo stabilnost in odpornost proti eroziji, zmanjšajo se pretočne hitrosti ob brežinah, intenzivneje se na območjih brežin odlagajo drobnozrnate (lebdeče) plavine, vse skupaj prispeva k nadaljnemu napredovanju brežin (FEMA, 1999). Napredovanje brežin v času visokovodnih razmer lahko lokalno vodi v obsežnejše poškodbe brežin in erozijske zajede predvsem zaradi intenzivnejšega razlivanja poplavnih voda iz strug vodotokov in lokalnega obtekanja posameznih ovir vodnemu toku kot so npr. drevesna debla in zagozdene plavje (FEMA, 1999). Kot primer procesov napredovanja brežin lahko navedemo zmanjšanje pretočnega prereza struge reke Dragonje na posameznih odsekih zaradi zaraščanja naravnih prodišč, ki je predvsem posledica spremenjenih hidroloških (odtočnih) razmer, povezanih s spremembami rabe površin (intenzivnega zaraščanja kmetijskih površin) in protierozijskimi ukrepi na prispevnem območju reke Dragonje (Globevnik, 2001). Kot zanimiv primer napredovanja brežin lahko navedemo tudi zmanjšanje pretočnega prereza potoka Želimeljščica, ki je bil v 70-tih in 80-tih letih 20. stoletja reguliran v okviru melioracijskih ureditev. Potek struge Želimeljščice je bil izravnán, urejen je bil trapezni prečni prerez struge. Z vidika hidromorfoloških procesov je bila regulirana struga Želimeljščice izrazito neustrezno načrtovana, zaradi sukcesijskega zaraščanja obrežne vegetacije in odlaganja plavin se je prečni prerez struge izrazito zmanjšal, in sicer za med 30 in 60 % (Slika 1.4). Posledično se je drastično zmanjšala tudi hidravlična prevodnost struge. Glede na rezultate terenskih meritev ter hidravličnega modeliranja se je lokalno v posameznih prečnih prerezih hidravlična prevodnost prečnih prerezov struge zmanjšala tudi za več kot 50 % (Piltaver, 2015).



**Slika 1.4:** Struga Želimeljščice v 90-tih letih (levo); struga Želimeljščice sedaj (desno).

Pri procesih rečne erozije ne moremo mimo vpliva plavja in ostalih lesnih ostankov v strugah. Lesni ostanki in plavje v strugah vodotokov so pogosto posledica erozije brežin, propadanja posameznih dreves, poškodb vegetacije v neposredni bližini rečne mreže zaradi raznih naravnih nesreč (npr. vetrolom, žledolom). Plavje v strugah vodotokov je pomemben element naravne dinamike hidromorfoloških procesov in spodbuja nastanek in spremembe oblik dna (stopnice, bazeni, pregrade itd.) in brežin strug vodotokov. V sorazmerno ozkih gorskih in hudourniških vodotokih lahko lesni ostanki povzročijo lokalno zmanjšanje hidravlične prevodnosti prečnih prerezov strug ali njihove zamašitve, ki posledično povzročijo večje zaježitve in preplavitve brežin. V primeru nenadnih



preplavitev in porušitev ovir, ki jih povzroči zagozdeno plavje, se lahko pojavijo rušilni poplavni valovi, ki povzročijo še dodatno povečanje obsega erozijskih poškodb. Zamašitve zaradi zagozdenega plavja prav tako zadržijo plavine in spodbujajo nastajanje prodnih žepov, ki prispevajo k pestrosti hidromorfoloških in ekoloških razmer v strugah. Za zagozdenim plavjem se zaradi odlaganja plavin dno struge dvigne, prelivanje vode preko zagozdenega plavja pa na dolvodni strani spodbudi procese globinske erozije in nastanek erozijskih tolmunov (Wohl, 2010). Razni lesni ostanki in drugi veliki elementi v strugah, kot so npr. veliki balvani v ozkih hudourniških strugah, ustvarjajo ovire gibanju vodnega toka, in lokalno močno vplivajo na hidravlične razmere (povečanje pretočnih hitrosti, sprememba smeri vodnega toka, prehodi med različnimi tipi toka vode), kar dodatno ustvarja močnejše in turbulentnejše tokove, usmerjene tako proti dnu struge kot tudi brežinam (Wohl, 2010; Janicke, 2002). Poleg tega lahko velike količine plavja, ki se zagozdijo ob razne hidrotehnične ali premostitvene objekte, povzročijo velike težave zaradi povečanja hidravličnih obremenitev in večjega obsega procesov rečne erozije ob posameznih konstrukcijskih elementih (npr. mostnih opornikih ali obrežnih zidovih) in tudi močno vplivajo na hidravlično prevodnost.

## 1.2 Pojavnost procesov rečne erozija v različnih tipih vodotokov

Za gorske in hudourniške potoke in reke so značilni veliki nakloni dna strug, velike količine plavin in lesnih ostankov, velika hrapavost ter izrazito deroči in turbulentni tokovi (Wohl, 2010). Hudourniški potoki se pojavljajo predvsem v povirnih delih porečij. Hudourniški potoki se običajno hitro zarezujejo v kamninsko podlago zaradi intenzivnih procesov globinske erozije in oblikujejo razmeroma ravno strugo s strmimi pobočji hudourniških grap in ozkih dolin. Vzdolž svojega toka premeščajo velike količine plavin, ki se sproščajo z gorvodnih prispevnih območij ali spirajo iz območij samih strug (Thompson in Turk, 1997). Ob poplavah se s strmih pobočij ali erozijskih žarišč sproščajo sedimenti zelo različne zrnastostne sestave, pri čemer lahko intenzivno sproščanje sedimentov v takšnih razmerah povzroči blatne in drobirske tokove (FEMA, 1999). Pojavi plazjenja, (plazovi, usadi idr.), ki so v vplivnem območju hudourniških strug, predstavljajo tako neposredno nevarnost zaradi destabilizacije območja na lokaciji njihovega pojava kot tudi nevarnost zaradi vnosa velikih količin plavin, ki ga lahko hudourniški vodotok transportira v nižje ležeče odseke. Protierozijski varovalni in varstveni ukrepi morajo v kar največji meri upoštevati možnost tovrstnih dogodkov. Značilnost hidroloških režimov hudourniških vodotokov so hitre spremembe s kratkotrajnimi obdobji poplavnih dogodkov. Razmerje med visokovodnimi in normalnimi (srednjimi) pretoki lahko preseže vrednosti 100:1 ali celo 1000:1. Med poplavami se prenašajo velike količine pogosto grobih plavin (zrnastosti razredi grušča in groblje), ki dodatno spodbujajo procese rečne erozije, predvsem izrazito je poglobljanje dna struge. Po drugi strani se po prehodu na območja z manjšimi vzdolžnimi padci, ko se vodni tok umiri in vodostaji znižajo, plavine odlagajo in povzročajo zvišanje nivojev dna struge ali celo popolno zasutje prečnih prevezov strug. Tovrstni procesi se intenzivirajo na dolvodnih, bolj ravninskih odsekih. V obdobjih umirjenih in ustaljenih pretočnih razmer se odlagajo tudi plavine manjših dimenzij, medtem ko pretočne hitrosti in strižne napetosti še vedno omogočajo premeščanje lebdečih plavin (Vázquez-Tarrío in sod., 2024).

Znotraj odsekov strug vodotokov, kjer se je dno struge poglobilo do matične kamninske osnove, je količina erodiranega materiala vzdolž brežin in dna strug majhna in omejena z vidika transportne sposobnosti vodnega toka, da odplavi posamezne dele matične osnove. Tovrstno dogajanje je običajno prisotno predvsem v povirnih delih porečij. Rečna erozija v takšnih strugah je pretežno posledica abrazije, korozije in blokovskega lomljenja. Lomljenje blokov je proces odtrgovanja in odstranjevanja kamnitih blokov iz struge s pomočjo vlečnih in dviznih (vzgonskih) sil (Charlton, 2008). Pred ločevanjem

so kamniti bloki podvrženi znatnemu fizikalnemu/mehanskemu in kemičnemu preperevanju, ki širi obstoječe razpoke in spoje v kombinaciji z delovanjem majhnih delcev plavin, ki se v te razpoke zaklinjajo (Hancock in sod., 1998). V omejenih razmerah potekov vodotokov v skalnih koritih je bočna migracija struge zelo omejena (Janes, 2017). Skalno strugo lahko erodira tudi abrazivno delovanje manjših delcev plavin v premeščanju. Kadar je kamninska podlaga sestavljena iz topnih litoloških kamnin, je kamninska struga dovzetna za erozijo z raztapljanjem (ali korozijo), saj tekoča voda raztaplja material, ki sestavlja kamninsko podlago (Charlton, 2008).

Na bolj ravninskih območjih, kjer vodotoki prehajajo iz ozkih, strmejših dolinskih območij v širša dolinska območja z manjšimi padci naklonov dna strug, začnejo prevladovati procesi odlaganja plavin. V povirnih, hudourniških območjih so tipičen primer takšnega dogajanja hudourniški vršaji. Zaradi zmanjšane premestitvene zmogljivosti kot posledice manjše hitrosti in vlečne sile vodnega toka se bolj grob material odloži v obliki hudourniškega vršaja (pahljače), na izrazito ravninskih območjih lahko tudi v obliki delte, za katero so značilni številni kanali, ki se premikajo in spreminjajo tlorsni potek vodotoka. Na takšnih območjih je značilno nepredvidljivo gibanje vodnih tokov in posledične nestabilnosti v potekih strug vodotokov, povezane s spremenljivostjo obsega globinske in bočne erozije ter odlaganjem plavin (FEMA, 1999).

Razvejani poteki strug vodotokov so sestavljeni iz več prepletenih potekov manjših strug, za katere je značilna prisotnost prodišč in prodnih otokov, okoli katerih se pri nizkih do srednjih pretočnih razmerah giblje vodni tok. Razvejani poteki rečnih strug so značilni za zgornji in srednji del porečij, kjer so nakloni dna strug nekoliko manjši, dotok plavin z gorvodnih povirnih območij pa je še vedno velik. Razvejani poteki rečnih strug se najpogosteje razvijejo v sorazmerno grobih aluvialnih nanosih, lahko pa tudi v nanosih s prevladujočo zrnastostno sestavo plavin velikosti peska. Razvejani poteki strug so v času visokovodnih razmer zelo podvrženi spremembam trase zaradi intenzivnega premeščanja in odlaganja plavin. Posledično lahko prihaja tudi do obsežnejših premikov glavne struge izven sorazmerno širokih koridorjev strug razvejanih vodotokov (FEMA, 1999).

Vijugajoči (meandrirajoči) vodotoki se pojavljajo na neomejenih, širokih poplavnih območjih. Takšni tlorsni poteki strug so značilni za srednji in spodnji del porečij. Vijugajoči vodotoki se selijo po poplavnih območjih zaradi prevladujočega vpliva procesov bočne erozije, erodiranja brežin na zunanjih straneh rečnih zavojev, medtem ko se plavine odlagajo na notranjih straneh rečnih zavojev.

V povezavi s pretočnimi razmerami velja omeniti še občasne (efemerne oz. presihajoče) vodotoke, v strugah katerih je voda prisotna samo določen čas, v daljših sušnih obdobjih pa je struga suha. V času povišanih pretokov so lahko erozijski procesi in transportna zmogljivost za premeščanje plavin precejšnji, geometrijska spremenljivost prečnih prerezov strug je lahko zelo velika, po visokovodnih razmerah pa se vzdolž takšnih strug lahko odložijo zelo velike količine plavin in ostalega erodiranega materiala. V sušnem obdobju je material dna struge podvržen preperevanju zaradi vremenskih in podnebnih vplivov. (FEMA, 1999)

Z vidika delovanja erozivnih sil vodnega toka v povezavi z različnimi tipi vodotokov ne moremo mimo erodibilnostnih lastnosti materialov na dnu in v brežinah strug in na poplavnih območjih, ki se prevladujoče pojavljajo vzdolž posameznih tipov vodotokov. V osnovi je treba ločiti odseke strug, ki potekajo v kohezivnih materialih (glina, melj in različni mulji) in nekohezivnih materialih (bolj grobe frakcije materiala), vzdolž vodotokov so to večinoma rečne naplavine. Večino ostenja strug vzdolž slovenske rečne mreže sestavljajo nevezni materiali prevladujoče zrnastostne sestave proda in peska. S postopnim naraščanjem hitrosti toka prek prosto ležečih zrn so dosežene kritične razmere, v katerih se sile, ki težijo zrno premakniti, uravnotežijo z odporom proti premiku. Tako stanje je definirano kot prag gibanja in je ključno pri oblikovanju posteljice dna struge. Začetno gibanje je bilo na splošno

označeno bodisi z izrazom kritične strižne napetosti bodisi kritične strižne hitrosti. V kohezivnih strugah je trdnost brežin odvisna od vsebnosti vode v brežini ali zasičenosti. Zaradi prenasičenosti lahko pride do porušitve brežin, ki jo povzroči zmanjšanje notranjega kota trenja med kohezivnimi delci. Visoka nasičenost je lahko posledica daljše prisotnosti visokovodnih razmer ali trajnejših preplavitvev. Po drugi strani pa lahko tudi sušenje materiala povzroči nastanek razpok, zlasti ob veliki prisotnosti glinenih mineralov, ki se med sušenjem krčijo. Do razpokanja pride tudi med ponavljajočim se izsuševanjem in vlaženjem materiala, ko voda, ki potopi material, zadrži in stisne zrak v porah materiala. Ustvarjeni tlak povzroči razrahljanje materiala zaradi premikanja delcev in lahko vodi v procese interne erozije materiala v brežinah (Charlton, 2008).

### 1.3 Koridorji s povečano nevarnostjo procesov rečne erozije

Prepletanje procesov rečne erozije (spiranja, premeščanja in odlaganja plavin) močno vpliva in sooblikuje tlorisni potek in prečni prerez strug vodotokov (Janicke, 2002). V zadnjem času je bilo predlaganih nekaj pristopov (npr. ASFPM, 2016; ISJ, 2018; Hajdukiewicz in Wyźga, 2023; Blazewicz in sod., 2020; Piégay in sod., 2005) za oceno prostorskega obsega območij, ki jih lahko vodotok s svojim erozijskim delovanjem zavzame zaradi naravnih ali antropogeno pogojenih vplivov na tlorisni potek strug vodotokov. Z upravljaljskega vidika je ključna predvsem ocena obsega območij, ki so dovzetni za procese rečne erozije. Na teh območjih obstaja večja verjetnost, da se bodo razvili procesi rečne erozije v večjem obsegu. Za tovrstna območja (pasove oz. koridorje) vzdolž strug vodotokov se je literaturi uveljavil izraz *koridor rečne erozije* (angl. *fluvial erosion corridor*). Pogosto so tovrstna območja v literaturi sicer opredeljena tudi kot območja nevarnosti rečne erozije, obrežni koridorji, erodibilni koridorji, aktivni rečni koridorji, prostor mobilnosti rečne struge itd. (ASFPM, 2016; ISJ, 2018; FEMA, 1999; Blazewicz in sod., 2020; Piégay in sod., 2005). Ta območja so običajno prepoznana kot območja, ki jih je v bližnji preteklosti zasedala struga vodotoka, kamor se lahko struga vodotoka med poplavnimi dogodki premakne in v nekaterih primerih vključujejo tudi obdajajoče poplavne površine, kjer je verjetnost pojava erozijskih procesov (odplavljanja ali odlaganja plavin) večja (ISJ, 2018; Blazewicz in sod., 2020). V nasprotju z območji poplavne nevarnosti območja erozijske nevarnosti (koridor rečne erozije oz. erozijski koridor) niso nujno sorazmerna s poplavnimi območji pri posameznih poplavnih dogodkih določenih povratnih dob, saj obsežnejših procesov rečne erozije ne povzročajo samo ekstremni poplavni dogodki, temveč so erozijski procesi posledica kumulativnega delovanja vodnega toka tudi v obdobjih manjših in bistveno pogostejših poplavnih dogodkov (ASFPM, 2016). Pomembna ugotovitev nekaterih teoretičnih pristopov in tehničnih praks, podrobneje predstavljenih v poglavju 6, je, da koridorji rečne erozije torej niso omejeni ali enakovredni območjem poplavne nevarnosti (ISJ, 2018, FAN, 2015; Blazewicz in sod., 2020).

V splošnem lahko koridorje rečne erozije opredelimo kot območja vzdolž obstoječega glavnega poteka struge vodotoka z večjo verjetnostjo pojava procesov rečne erozije in z njimi povezanih nevarnosti, vključno z migracijo struge, porušitvijo brežin, odlaganjem velikih količin plavin in erozijo na obdajajočih poplavnih območjih. Ta območja lahko v splošnem opredelimo kot območja z večjo dovzetnostjo za erozijske procese, ne glede na njihovo verjetnost (ISJ, 2018). Opredelitev rečnih erozijskih koridorjev je seveda zelo pomembna za razlikovanje erozijsko ogroženega območja in zagotavljanje prostora za neizogibne erozijske procese ter migracijo strug vodotokov. Določitev posebnih, tudi varovalnih območij za procese rečne erozije in morebitne migracije rečnih strug je pomemben element urejanja voda in posledično preprečuje škodo v grajenem okolju, saj v prvi vrsti spodbuja izogibanje umeščanju objektov na območjih, kjer je povečana nevarnost rečnih erozijskih procesov.



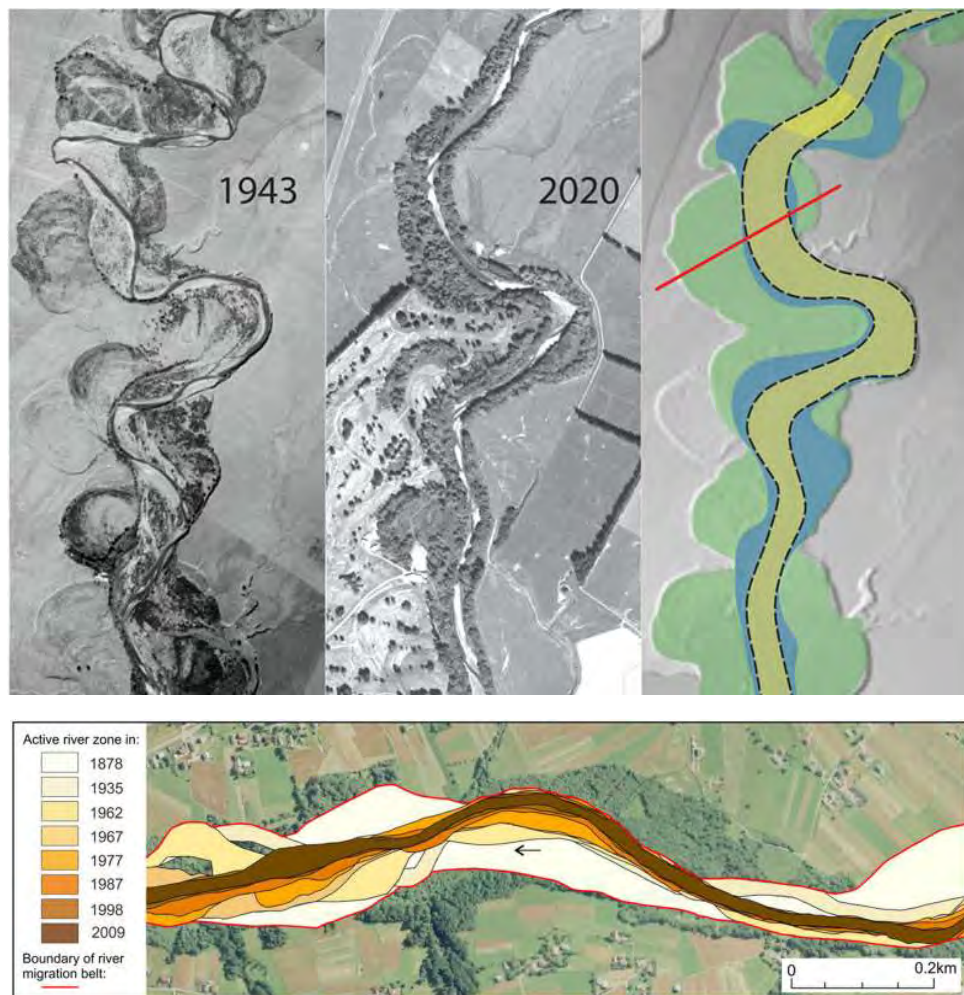
Ob predpostavki, da vodotok spreminja svojo lokacijo, dimenzije in obliko rečne struge, lahko koridorje rečne erozije določimo in kartiramo predvsem na podlagi geoloških, hidromorfoloških ali topografskih podatkov ter podatkov o erozijskem dogajanju v preteklih poplavnih dogodkih (ISJ, 2018). Te informacije vključujejo podatke o geološki osnovi in pedološke karte ter podatke, pridobljene na osnovi obsežnih terenski ogledov, opazovanj in meritev, inženirskih analiz in presoj, topografske podatke visoke ločljivosti, historične podatke o spremenljivosti potekov tras strug in rezultate analiz, pridobljene z matematičnim modeliranjem procesov (FEMA, 1999).

Najpogosteje uporabljena metoda za določanje erozijskih območij in erozijskih koridorjev je določanje na podlagi historičnih podatkov z uporabo posnetkov in topografskih analiz. Ta pristop je sestavljen iz prekrivanja zemljevidov položaja strug vodotokov v (bližnji) preteklosti iz letalskih/satelitskih posnetkov ali zgodovinskih zemljevidov, odvisno od razpoložljivosti podatkov. Primer tovrstne analize je prikazan na sliki 1.5. Ta pristop se običajno lahko uporablja le za primerjavo končnih stanj, na primer po nekem večjem dogodku (npr. hudih poplavalah, potresu itd.), ali za analizo sosledja erozijskega dogajanja vzdolž struge v daljših časovnih obdobjih. S prekrivanjem več zemljevidov v daljšem časovnem obdobju je mogoče natančneje določiti mobilnost struge in območje, ki ga je rečna struga zavzemala opazovanem obdobju. Na podlagi dobljenih prekrivanj je mogoče oceniti dolžino erodiranih brežin, širino struge, odmike brežin, površino erodiranega poplavnega območja itd. (ASFPM, 2016; Janes in sod., 2017; Piégay in sod., 2005). Opozoriti je treba, da je ta pristop primeren le, kadar je opazovani vodotok dovolj velik oz. struga dovolj široka, da je viden na letalskih posnetkih ali označen na zgodovinskih zemljevidih, in kadar so hidromorfološke spremembe sploh zaznavne. Poleg tega je pristop na podlagi zgodovinskih zemljevidov omejen z razpoložljivostjo dokumentov (zemljevidov in fotografij) ter njihovim datiranjem glede na erozijske in poplavne dogodke (Janes in sod., 2017). Na tlorisne poteke strug v največji meri vplivajo regulacijski posegi in ureditve strug, katerih učinke je treba proučiti in upoštevati pri nadaljnjih analizah procesov rečne erozije. V primeru relativno stabilnih ali aktivnih (in s tem težko predvidljivih) meandrirajočih in erodibilnih odsekov vodotokov se lahko rečni koridorji določijo glede na amplitude meandrov (Piégay in sod., 2005) ali širino struge pri strugotvornem pretoku (ISJ, 2018). Slednja je lahko npr. poenostavljeno opredeljena kot n-kratnik polne širine struge (polna širina aktivne struge pri normalnih pretočnih razmerah razširjena na vsako stran aktivne struge) za relativno stabilne vodotoke ali n-kratnik polnih širin struge za izjemno aktivno meandrirajoče vodotoke (ISJ, 2018), kot je podrobneje pojasnjeno v pregledu nekaterih pristopov h kartiranju koridorjev rečne erozije v poglavju 6.

Ker je podrobna analiza erozijskega potenciala vodotoka zelo zamudna in zahteva veliko vhodnih podatkov, lahko poenostavljene analize omogočajo prepoznavanje in določanje problematičnih območij rečne erozije. Na podlagi začetnih poenostavljenih analiz se lahko nadaljnje podrobnejše analize osredotočijo na rečne odseke, kjer se pričakuje intenzivnejši razvoj erozijskih procesov (ASFPM, 2016; ISJ, 2018).

Intenzivne erozijske procese in pojav erozijskih žarišč je mogoče prepoznati na terenu še kar nekaj časa po poplavnih dogodkih, ki so tovrstne procese spodbudili. Na primer razkrite korenine dreves na brežinah ali nepričakovane spremembe v obrežni vegetaciji kažejo na prisotnost erozije (Janicke, 2002; Carey in sod., 2015). Napredovanje erozije brežin je mogoče neposredno lokalno meriti npr. z uporabo erozijskih zatičev kot klasične metode spremljanja rečne erozije v prečnih prerezih strug. Erozijski zatič se zabije v površino, kjer se domneva erozija, in količina razkritega zatiča po določenem času pokaže napredovanje rečne erozije. Z zaporednimi odčitki je mogoče določiti hitrost erozije (Janicke, 2002). Slabost uporabe erozijskih zatičev za neposredne meritve je, da se erozija meri le lokalno v posameznih točkah, za oceno erozije večjih površinskih odsekov pa je potrebno veliko število takih zatičev. Napetostne razpoke na vrhu brežin kažejo na pojav spodkopavanja brežin. V primerih, da je ena brežina

bistveno višja, takrat se spodkopavanje brežin morda pojavlja na višjem bregu, s čimer je povezana večja verjetnost zdrsa in porušitve zgornjega dela brežine (Carey in sod., 2015). Erozijsko je mogoče ugotoviti z opazovanjem prisotnosti izpostavljenosti struktur v vodotokih, kot so prehodi med obrežnimi zavarovanji, mostni stebri, temelji prepustov ali odtoki meteorne vode (Carey in sod., 2015). Številne nove možnosti spremljanja napredovanja procesov rečne erozije pa nudijo podatki daljinskega zaznavanja, predvsem nizi podatkov pridobljeni z lidarskimi snemanji površja.



**Slika 1.5:** Primera sosledja letalskih posnetkov, uporabljenih za analizo rečnega erozijskega koridorja (Brierley in sod., 2022 (zgoraj); Hajdukiewicz and Wyżga, 2023 (spodaj)).

V okviru inženirskih analiz in testiranj je mogoče določiti zmogljivost in sposobnost premeščanja plavin, količino plavin in analizirati stabilnosti brežin vključno z določitvijo hrapavosti struge (FEMA, 1999). Za tovrstne analize so ključni podatki o zrnastosti sestavi materiala v brežinah in na dnu struge. S prostim očesom vidna sprememba v materialu brežin kanala lahko pomeni pomembno spremembo lastnosti tal (npr. vidna sprememba barve, velikosti ali zrnastostne sestave zrn) (Carey in sod., 2015).

Matematično modeliranje rečne erozije je zapleteno, obenem za tovrstne analize potrebujemo veliko vhodnih podatkov o zrnastosti lastnostih ter ostalih geotehničnih lastnostih plavin in materiala v brežinah in dnu strug, kar podrobneje predstavimo na praktičnih primerih v poglavju 8. Mobilnost plavin kot posledica premestitvene zmogljivosti posameznih odsekov strug vodotokov je povezana z izjemno dinamično spremenljivostjo lastnosti vodnega toka v prečnih prerezi strug, ki se lokacijsko in

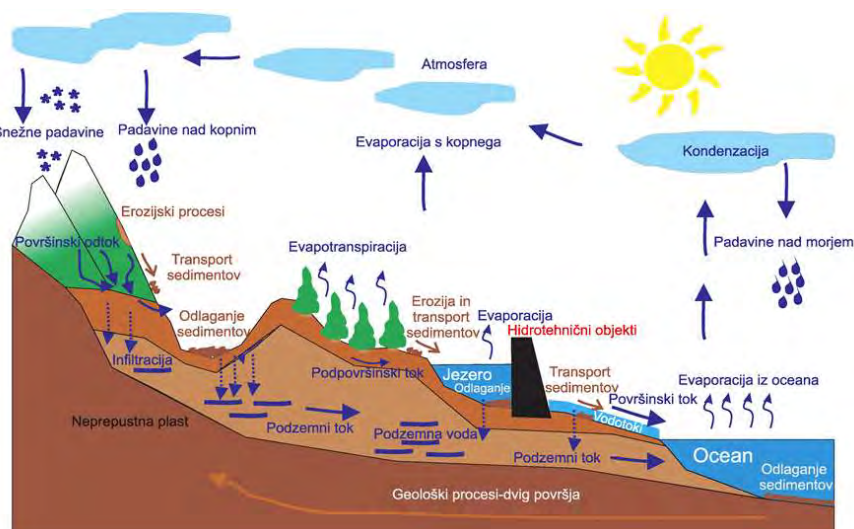
časovno zelo spreminjajo (praktično po vsakem poplavnem dogodku), matematični modeli pa so omejeni na običajno vnaprej predpostavljene robne pogoje in geometrijske oblike pretočnih prerezov (Piégay in sod., 2005). Močna erozija je lahko značilna za sorazmerno kratke odseke in je lokalizirana ter prostorsko dobro opredeljiva. Tipičen primer so odseki brežin na zunanjih straneh rečnih zavojev. Obsežnejši erozijski procesi pa se lahko nepričakovano pojavijo tudi vzdolž daljših odsekov rečnih strug. V takšnih primerih je ključno, da se na podlagi terenskih ogledov prepozna mehanizme, ki so privedli do erozijskih procesov. V splošnem velja, da je diskretizacija erozijskih procesov v majhne računske enote nagnjena k velikim napakam, rezultati pa so specifični za posamezno lokacijo in jih je zelo težko posploševati ali prostorsko ekstrapolirati (FEMA, 1999). V poglavjih 8 in 9 so podane podrobnejše usmeritve za oceno potencialne razvitosti erozijskih procesov na osnovi analize erozijskih procesov v poplavnem dogodku leta 2023 in rezultati analiz.

## 2 POVEZAVE MED PROCESI SPROŠČANJA, PREMEŠČANJA IN ODLAGANJA PLAVIN

### 2.1 Erozijsko-sedimentacijski krog

Globalno gledano je kroženje vode eden od glavnih sprožilnih in kontrolnih mehanizmov erozijskih procesov. Intenzivnost kroženja vode in poti stekanja padavinskega odtoka v veliki meri uravnava procese sproščanja, premeščanja in odlaganja sedimentov vzdolž hidrografske mreže. Slika 2.1 prikazuje prepletanje oziroma interakcijo med hidrološkim ter erozijsko-sedimentacijskim krogom. Pri tem je treba poudariti, da za vse procese, prikazane na sliki 2.1, ni značilna enaka dinamika, saj je npr. geološki dvig površja izrazito počasnejši proces kot površinski odtok ali izhlapevanje oziroma evaporacija. Na sliki 2.1 so prikazani naravni procesi, na katere lahko bistveno vplivajo človeške dejavnosti, ki lahko določene procese pospešijo ali upočasnijo. S človeškimi dejavnostmi povezane spremembe rabe površin bistveno vplivajo na intenziteto erozijskih procesov, povezanih z intenzivnostjo stekanja površinskega padavinskega odtoka (npr. razgaljenje površin zaradi intenzivne sečnje gozdov ali intenzivna raba kmetijskih površin pospešita erozijske procese). Vodarske ureditve in ukrepi vzdolž hidrografske mreže pa bistveno vplivajo na sposobnost premeščanja erodiranega materiala. Slika 2.2 prikazuje konceptualno povezanost procesov sproščanja, premeščanja in odlaganja sedimentov. Pri tem je poudarek na najizrazitejših procesih na območju Slovenije. Na sliki 2.2 je kompleksna topografija površja poenostavljeno razdeljena na ravninski ter hriboviti del. Za vsako območje so značilne unikatne lastnosti (npr. raba tal, dinamika procesov, prevladujoči tip odtoka vode). Na hribovitem območju, kjer je prevladujoča raba tal gozd, večinoma prevladujejo procesi sproščanja, kot so erozija in veliki masni premiki (npr. plazovi), ki lahko pogosto prispevajo velik delež erozijskega materiala (Mikoš in sod., 2006). Ta material se večinoma zaradi površinskega in sorazmerno hitrega odtekanja vode premešča dolvodno (izrazito npr. vzdolž hudourniške rečne mreže), del materiala se odloži v lokalnih depresijah, preostanek se v obliki lebdečih ter rinjenih plavin premešča v ravninska območja, kjer večinoma prevladujejo kmetijska zemljišča ter travniki. Na tem delu prevladujejo procesi odlaganja, saj gre za teren z manjšimi nakloni in posledično manjšo premestitveno zmogljivostjo vodnega toka (slika 2.2). Glavni vir plavin v ravninskem območju je pogosto erozija brežin vzdolž strug vodotokov, delno tudi dotok plavin iz povirnih delov, ki je še posebej izrazit ob ekstremnih hidro-meteoroloških dogodkih (Bezak in sod., 2023). Procese preoblikovanja zemeljskega površja (zniževanja in dvigovanja) lahko v grobem razdelimo na: *processe preperevanja, erozijske procese in velika masna gibanja*.

Procesi preperevanja vključujejo biološko, fizikalno in kemično preperevanje (Mikoš in sod., 2022; Pintar in sod., 1986), med masne premike lahko štejemo npr. globoke plazove, plitve plazove, podore (Cruden and Varnes, 1996; Hungr in sod., 2014; Varnes, 1978). Na procese preperevanja vpliva tudi kroženje vode. Erozija tal oziroma erozija prsti, kjer so tla vrhnja plast litosfere (pedosfera) debeline nekaj 10 centimetrov (Petan, 2010; Zorn, 2009), je prav tako eden izmed pomembnejših procesov, ki preoblikujejo zemeljsko površje. Na procese erozije tal med drugim vplivajo različne oblike padavin (npr. sneg, dež) in premiki zračnih mas (veter) (Bezak, 2016; Petan, 2010). Glede na opisane procese je očitno, da se erozijski procesi intenzivno prepletajo s procesi kroženja vode (slika 2.1), saj pri eroziji tal in velikih masnih gibanjih nastopa voda v različnih agregatnih stanjih.



**Slika 2.1:** Shematski prikaz interakcije med vodnim in erozijsko-sedimentacijskim krogom (Bezak, 2016).

Pomemben lokalni vir erodiranega materiala, ki se nadalje premešča po hidrogrfski mreži, so predvsem erozijska žarišča (npr. plazljiva območja). Na dinamiko premeščanja plavin pa pogosto vplivajo tudi potresi (Mikoš in sod., 2013; 2006).

Kot omenjeno je premeščanje sedimentov vzdolž rečne mreže sestavni del naravnega erozijsko-sedimentacijskega kroga (slika 2.2). Reke delujejo kot neke vrste "hitri tekoči trakovi", ki epizodično premeščajo sedimente, erodiran erozijski material v porečju, proti iztoku iz porečja (Turowski in sod., 2010). Zaradi procesov lokalnega odlaganja in skladiščenja vzdolž rečne mreže in poplavnih območij celotna količina razpoložljivih plavin ne doseže iztoku iz porečja (Grangeon in sod., 2023). Posledično je vrednotenje dotoka plavin v izbran rečni odsek zahteven računski proces, podvržen številnim negotovostim (Walling, 1983), ki jih lahko zmanjšamo s kakovostnimi terenskimi podatki o količinah materiala, ki se lokalno intenzivno odloži (npr. v prodnih zadrževalnikih).

Plavine se lahko premeščajo v vzdolžni, stranski in navpični smeri (slika 2.2). Povezave (vzdolžne, bočne, navpične) se razlikujejo glede na dele porečja, kjer lahko porečje razdelimo na gorvodni del, prehodno območje ter nižinski del porečja (slika 2.3). Plavine se lahko premeščajo dolvodno po toku z vmesnim skladiščenjem (npr. na prodiščih) ali pa se bočno odlagajo v trajnejša območja skladiščenja, kot so poplavne ravnice (Fryirs, 2013). Erozijska na poplavnih ravninah lahko skupaj z bočno erozijo rečnih brežin ponovno aktivira predhodno odložene naplavine. V navpični smeri lahko naplavine tvorijo posteljico dna, ki ščiti pred nadaljnjo erozijo dna, ali pa drobni delci zapolnijo vmesne prostore bolj grobih delcev (slika 2.3).

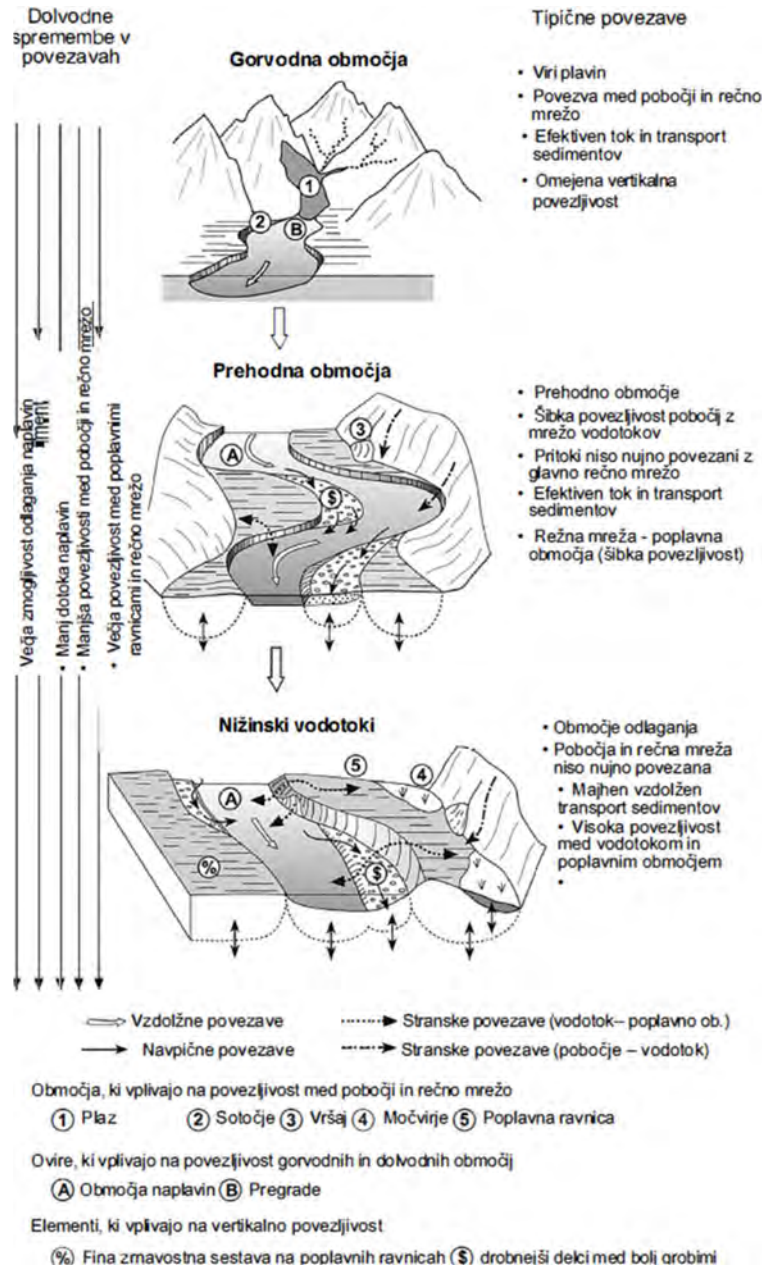
V porečjih v Sloveniji so te povezave večinoma močno antropogeno spremenjene. Človekovi posegi v območja strug vodotokov (npr. urejanje vodotokov, obrežna zavarovanja, gradnja hidrotehničnih objektov in protierozijskih ukrepov) ali spremembe rabe zemljišč lahko vplivajo na povezljivost premeščanja sedimentov vzdolž rečne mreže ali jih celo onemogočijo (Bracken in sod., 2015). S tega vidika se seveda postavlja zelo pomembno vprašanje prepoznavanja območij, kjer je obvladovanje sproščanja, premeščanja in kontroliranega odlaganja plavin nujno in kje lahko prepustimo sukcesijski razvoj erozijskih procesov. Pričakuje se, da bodo podnebne spremembe preko vplivov na hidrološke razmere močno vplivale na prostorsko in časovno dinamiko transporta plavin (Cendrero in sod., 2022).



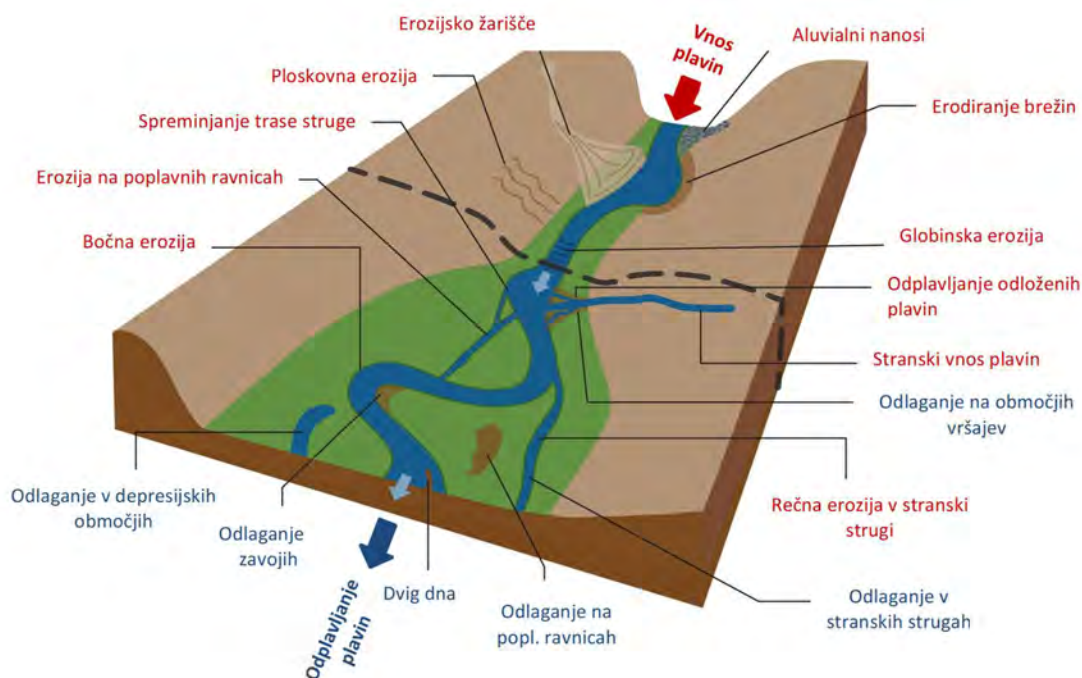
Komponente premeščanja plavin na določenem odseku reke je mogoče količinsko opredeliti na podlagi terenskih meritev in raziskav. Za izračun povprečnih količin transporta plavin so bile razvite različne, večinoma empirične enačbe, ki omogočajo oceno transportne zmogljivosti plavin (rinjenih in lebdečih) v povezavi s hidrološkimi in hidravličnimi karakteristikami (npr. pretok, hitrost vodnega toka ali vlečna sila) (Lenzi in sod., 2004; Turowski in sod., 2010). Poznavanje zrnavostne sestave plavin omogoča oceno deležev suspendiranih plavin in karakteristik posteljice dna struge (Lenzi and Marchi, 2000). Spremembe v strugi (odlaganje plavin ali poglobljanje dna) so rezultat razlike med vnosom (dotokom) plavin v določen odsek vodotoka (rdeče obarvano besedilo na sliki 2.4) in odlaganjem oz. odplavljanjem plavin dolvodno (modro obarvano besedilo na sliki 2.4).



**Slika 2.2:** Konceptualni prikaz povezav med procesi sproščanja, premeščanja in odlaganja na ravninskem in hribovitem območju.

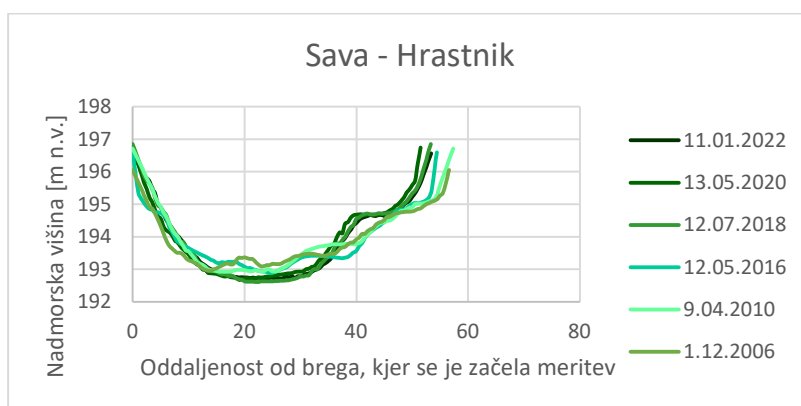


Slika 2.3: Povezljivost premeščanja sedimentov v idealiziranem porečju (Fryirs, 2013).



**Slika 2.4:** Bilanca procesov rečne erozije na nivoju odseka vodotoka (prirejeno po Blazewicz in sod., 2020). Procesi vnosa plavin v odsek in odplavljanja znotraj odseka so označeni z rdečo barvo, procesi odlaganja plavin znotraj odseka in odplavljanja dolvodno so označeni z modro barvo.

Če je dotok večji od premestitvene zmogljivosti, se lahko pričakuje odlaganje naplavin, v primeru obratne situacije pa poglobljanje dna struge (slika 2.4). Poudariti je treba, da te spremembe pogosto niso enoznačne, kar pomeni, da se v določenem obdobju struga pogloblja, v drugem obdobju pa prihaja do odlaganja naplavin. Vsekakor pa so procesi spremenljivosti dna struge močno pogojeni z lokalnimi hidravličnimi in geološkimi razmerami. Kot primer lahko prikažemo spreminjanje prečnega prereza struge reke Save na lokaciji vodomerne postaje Hrastnik, kjer je razvidno, da se dno struge bistveno ne spreminja (Slika 2.5).



**Slika 2.5:** Spreminjanje prečnega profila glede na hidrometrične meritve za postajo Hrastnik na Savi (vir podatkov: Agencija RS za okolje).

Nadalje bi lahko ugotovili, da so procesi erozije vzdolž vodotokov s prevladujočimi hudourniškimi značilnostmi eni izmed najkompleksnejših oblik vodne erozije. Tipična značilnost hudourniških

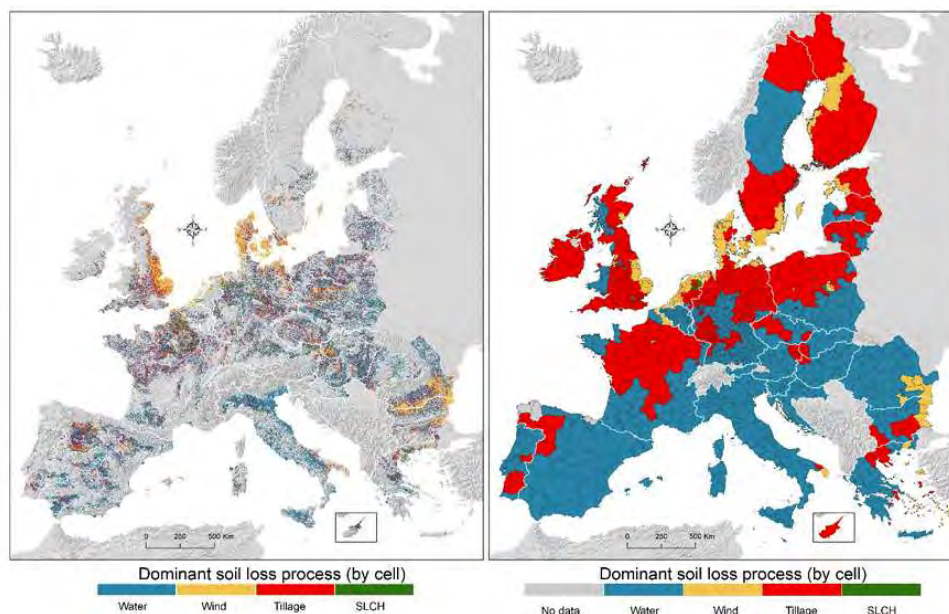


vodotokov je njihov specifični vodni režim, ki se kaže v velikih razlikah med pretočnimi količinami v sušnih, normalnih (povprečnih) in visokovodnih pretočnih razmerah, pri čemer razmerje med normalnimi in visokovodnimi pretoki lahko preseže razmerje 1:100 ali celo 1:1000. Tovrstna velika časovna spremenljivost (oboje je posledica velike odzivnosti na intenziteto padavin), velika erozivna moč vodnega toka ter obilnost plavin vseh vrst in zrnastostne sestave vplivajo na veliko prostorsko in časovno spremenljivost erozijskih procesov. Vzdolž strug hudourniških vodotokov potekajo intenzivni in prostorsko zelo spremenljivi procesi globinske in bočne erozije, kar ima za posledico nastanek zajed, spodkopavanje brežin ter sprožanje usadov in plazov različnih dimenzij. V zalednih območjih hudourniških povodij lahko na odsekih zelo močne ali ekstremne erozije nastanejo večja ali manjša erozijska žarišča. Iz erozijskih žarišč se v hudourniške struge lahko sprostijo velike količine materiala, ki se v obliki rinjenih in lebdečih plavin premešča dolvodno, ob tem pa tudi sami procesi premeščanja plavin spodbujajo in pospešujejo procese globinske in bočne erozije.

Z vidika količin erodiranega materiala, ki se v času visokovodnih razmer premešča vzdolž strmih hudourniških strug, je zelo pomemben tudi vidik nastanka drobirskih tokov. Drobirski tokovi lahko namreč nastanejo tako na pobočjih kakor tudi v samih strmih hudourniških strugah, če je razpoložljivost erodiranega materiala velika. Procesno definicijo drobirskega toka najdemo v Meunier (1998), in sicer je drobirski tok definiral kot gravitacijski (hiperkoncentriran) tok mešanice zemljin, hribin, skal, vode in/ali zraka, ki se ob izjemnih padavinah (redko tudi ob potresu, vulkanu), utekočini. V splošnem lahko za pojavnost drobirskih tokov ugotovimo, da gre za izjemno kompleksen pojav, ki sloni na značilnih in poznanih mehanizmi nastanka, proženja, potovanja in končnega razlitja mešanice vode in drobirja. Za nastanek drobirskega toka morajo biti na mestu žarišča izpolnjene specifične morfološke, geološke in hidrološke razmere, ki pogojujejo, da se ob ekstremnih padavinah večja količina nesprijetega ali slabo sprijetega kamninskega materiala saturira z vodo do te mere, da preide iz trdne v tekočo fazo. Da pride do proženja drobirskega toka, mora kamninska masa vsebovati tako grob kamninski material (drobir) kot tudi drobne frakcije, med katerimi pa ne sme prevladovati glinasta frakcija, saj bi v tem primeru lahko prišlo do počasnega blatnega pobočnega toka. Tekoča masa po običajno strmo nagnjenem pobočju zdrсне v hudourniško strugo, po kateri lahko kot drobirski tok potuje več kilometrov daleč, če konveksnost in nagib terena to omogočata. Gibanje drobirskega toka ohranjajo kinetična energija premikajoče se mase in trki med kosi drobirja v toku. Čelo toka ob napredovanju vključuje material iz struge, drevesa in ves material, ki je na poti toka. Na ta način se drobirski tok »hrani« in postaja po količini zajetega materiala vedno večji. Ko se nagib vodotoka zmanjša ali močno razširi, se lahko drobirski tok ustavi. Pogosto pa se drobirski tok konča ob vstopu hudournika v dolinsko območje, kjer se razlije kot vršaj. Pogosto je vzrok proženja drobirskega toka plazenje tal po pobočju, erodiranje odložene plazovine v strmem dolinskem dnu, erodiranje ali spiranje ogolelih tal. Najpogosteje pa kot vzrok nastopa kombinacija omenjenih pojavov. Drobirski tok lahko erodira dno in brežine ter premešča ogromne količine sedimentov. Pri drobirskih tokovih velikih dimenzij se dogaja, da erodirajo dno in naraščajo vzdolž poti.

## 2.2 Ocena erozijskega potenciala zaledja

Globalno gledano so procesi znotraj erozijsko-sedimentacijskega kroga tesno povezani z dinamiko kroženja vode. Na skupno erozijo tal vplivajo tudi drugi procesi, kot so npr. erozijski procesi, spodbujeni zaradi seizmičnih aktivnosti, vetrna erozija, erozija zaradi obdelave tal (Borrelli in sod., 2023b, 2023a). Za širše območje Slovenije je bilo ocenjeno, da je vodna erozija prevladujoči tip erozije tal (slika 2.6), zato je smiselno pri ocenjevanju erozijskega potenciala zaledja to vrsto erozije prednostno upoštevati.



**Slika 2.6:** Prevladujoči proces erozije tal (najvišja stopnja erozije tal) po celicah 100 x 100 m (leva slika) in po upravnih regijah EU (pokrajine) NUTS3 (desna slika) (Borrelli in sod., 2023b). Modra barva prikazuje vodno erozijo, rumena vetrno erozijo, rdeča erozijo zaradi obdelave tal in zelena erozijo zaradi pobiranja pridelka.

Za oceno erozijskega potenciala zaledja s prevladujočim vplivom vodne erozije lahko uporabimo različne metode modeliranja erozijskih procesov. Razširjena je uporaba empiričnih oziroma pol-empiričnih modelov, kot so USLE, MUSLE ali RUSLE (Alewell in sod., 2019); procesno utemeljenih modelov npr. WEPP, LISEM in PESERA (Kirkby in sod., 2008; Li in sod., 2017), ali konceptualnih modelov (Batista in sod., 2019; Parsons in sod., 2004). Borrelli in sod. (2021) so naredili sistematično analizo študij, ki so obravnavale erozijo z modeliranjem. Avtorji (Borrelli in sod., 2021) so pokazali, da so na globalnem nivoju najpogosteje uporabljeni modeli RUSLE, USLE, WEPP, SWAT, WaTEM/SEDEM, LISEM, MUSLE, MMF itd. Enačba RUSLE je izpeljanka osnovne enačbe USLE, ki je bila pripravljena na podlagi obsežnih terenskih meritev sproščanja tal od leta 1930 v ZDA (Renard in sod., 1997). Osnovna ideja je bila razviti relativno preprosto metodo za napovedovanje letnega sproščanja (tj. izgube) tal za potrebe gospodarjenja s kmetijskimi zemljišči (Renard in sod., 1997). Enačba RUSLE je linearni model, sestavljena je iz 6 enakovrednih parametrov:

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad (2.1)$$

kjer je  $A$  povprečna letna izguba tal [ $t \text{ ha}^{-1} \text{ leto}^{-1}$ ],  $R$  je dejavnik padavin in odtoka oziroma dejavnik erozivnosti padavin [ $\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ leto}^{-1}$ ],  $K$  je dejavnik erodibilnosti tal glede na standardne razmere [ $t \text{ MJ}^{-1} \text{ h mm}^{-1}$ ],  $L$  je dejavnik dolžine pobočja [ $/$ ],  $S$  je dejavnik naklona pobočja [ $-$ ],  $C$  je dejavnik pokrovnosti tal [ $-$ ] in  $P$  je dejavnik zaščitnih (kmetijskih ukrepov) [ $-$ ]. Podrobnejši opis metodologije je opisan v obstoječi literaturi (Petan, 2010; Renard in sod., 1997). Metodologija je že bila uporabljena na nekaterih hudourniških območjih in kmetijskih površinah v Sloveniji (KIS, 2020). Poudariti je potrebno, da je bila metoda razvita za kmetijska območja in je manj zanesljiva in uporabna za strme naklone in izrazita hudourniška območja (Nearing in sod., 2017), kjer se lahko ob posameznem ekstremnejšem padavinskem dogodku sprostijo izjemno velike količine erozijskega materiala, ki lahko za magnitudo ali več presegajo ocenjene povprečne letne količino na podlagi ene izmed zgoraj omenjenih metod.

V Sloveniji se za oceno potencialnega sproščanja pogosto uporabljajo tudi empirični pristopi, kot so Gavrilovičeva in prilagojena Gavrilovičeva oziroma Pintarjeva enačba (Bezak in sod., 2024; Gavrilović, 1970; Pintar in sod., 1986). Osnovna oblika Gavrilovičeve enačbe je (Gavrilović, 1970):

$$\overline{M\psi} = K_T \cdot \overline{H_w^\downarrow} \cdot \pi \cdot K_\psi^{1.5} \cdot FW, \quad (2.2)$$

kjer je:  $\overline{M\psi}$ ...povprečno letno sproščanje zemljin [m<sup>3</sup>/leto];

$K_T$ ...temperaturni koeficient, odvisen od srednje letne temperature T [-] ( $K_T = \sqrt{T/10 + 0.1}$ );

$\overline{H_w^\downarrow}$ ...srednje letne padavine [mm];

$K_\psi$ ...erozijski koeficient območja [-];

$FW$ ...prispevna površina območja [km<sup>2</sup>].

Erozijski koeficient območja  $K_\psi$  je določen kot:

$$K_\psi = K_{\psi E} \cdot K_{\psi Z} (K_{\psi 0} + J_F^{0.5}), \quad (2.3)$$

kjer je:  $K_{\psi E}$ ...koeficient erodibilnosti zemljin ( $K_{\psi E}$  je od 0,10 do 2,00);

$K_{\psi Z}$ ...koeficient vegetacijske zaščitenosti površin ( $K_{\psi Z}$  je od 0,05 do 1,00);

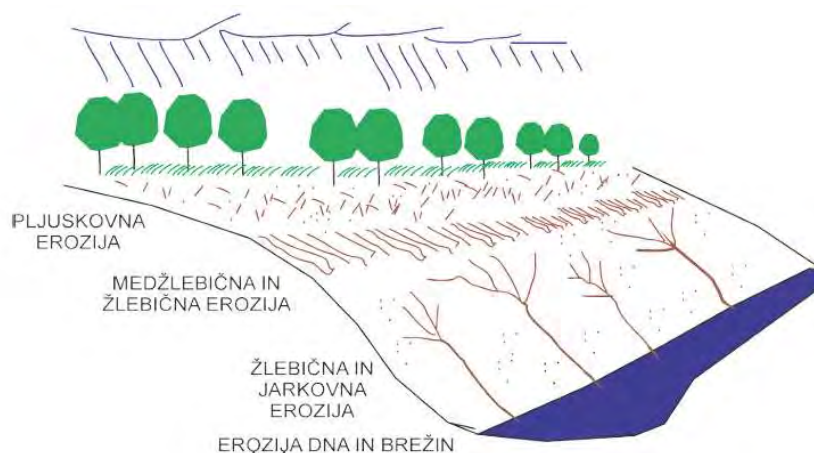
$K_{\psi 0}$ ...vizualno ocenjen koeficient razvitosti erozijskih pojavov ( $K_{\psi 0}$  je od 0,10 do 1,00);

$J_F$ ...srednji nagib površin območja [-];

Občutljivost zemljin na erodiranje prikazujemo s koeficientom erodibilnosti po zgoraj opisani metodologiji Gavriloviča, ki smo jo prilagodili razmeram v Sloveniji. Vrednosti koeficienta so v mejah od 0,10 (proti eroziji odporne hribine) do 1,00 (zelo erodibilne zemljine). Ob upoštevanju ugotovitev, kateri parametri so pomembni za slovenske razmere (Pintar in sod., 1986), se danes v Sloveniji za izračun povprečnega letnega sproščanja zemljine [m<sup>3</sup>/leto] večinoma uporablja prirejena oblika Gavrilovičeve enačbe, pogovorno imenovana tudi Pintarjeva enačba:

$$\overline{M\psi} = 20 \cdot H_{wd\Delta}^\downarrow \cdot K_\psi^{1.5} \cdot FW, \quad (2.4)$$

kjer so  $H_{wd\Delta}^\downarrow$  maksimalne dnevne padavine [mm]. Parametri enačb se pogosto določajo glede na tabelarične opise. Poudariti je potrebno, da omenjena modela (RUSLE in Gavrilovičeva enačba) ne upoštevata enakih procesov. Enačba RUSLE upošteva pojav ploskovne/pljuskovne in žlebične erozije, torej začetnih oblik pojavov vodne erozije (slika 2.7). Pljuskovna erozija nastopi, ko dežne kaplje pridejo v stik s tlemi. Posamezni delci tal se lahko zaradi erozijske moči dežnih kapelj premaknejo tudi do 0,6 metra v višino ter 1,5 metra horizontalno od mesta pljuska dežne kaplje. Pljuskovna erozija je v največji meri odvisna od intenzitete dežja, kinetične energije dežnih kapelj ter lastnosti tal (Petan, 2010). Dokler se zaradi površinskega odtekanja vode ne izoblikujejo majhni potočki v obliki žlebičev, prevladuje medžlebična erozija, pri kateri še ne pride do združevanja površinskega toka v žlebiče. Ko pa je prispevno območje dovolj veliko oziroma količina vode zadostna, se začnejo oblikovati žlebiči.

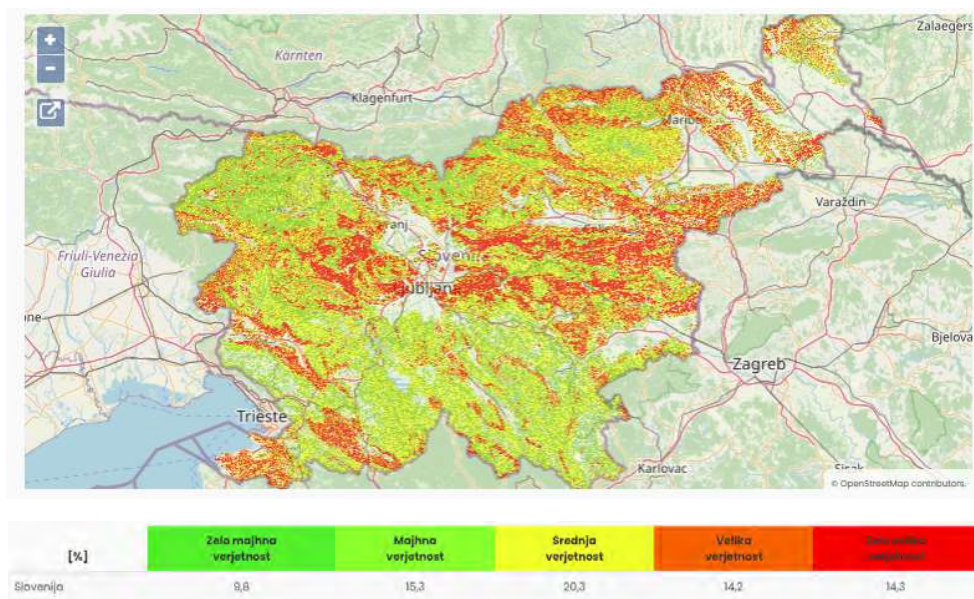


**Slika 2.7:** Nekaterne tipične oblike erozije tal (Bezak, 2016).

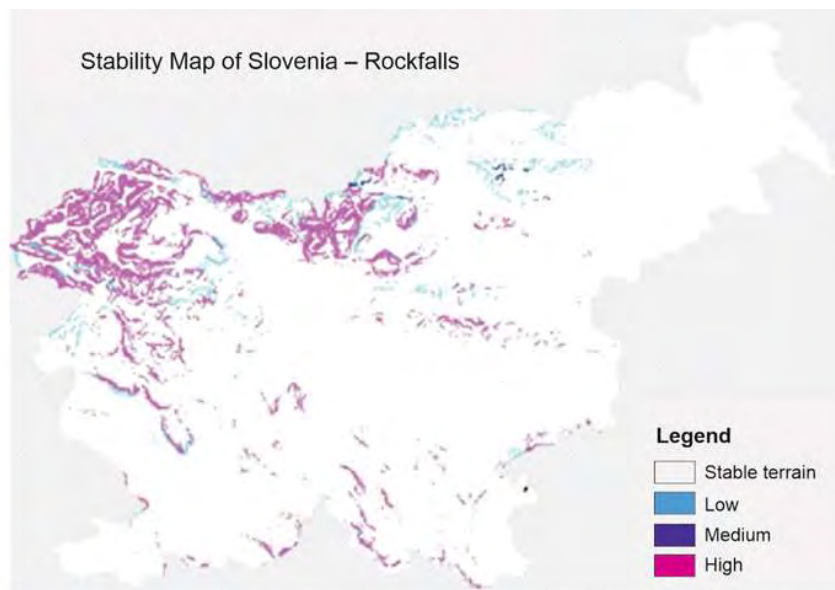
S stopnjevanjem koncentriranja površinskega padavinskega odtoka oz. površinskih vodnih tokov, kar je odvisno predvsem od dolžine pobočja, se začne postopoma pojavljati jarkovna erozija, kjer so tla razjedena tako globoko, da jih ne moremo izravnati z običajnimi načini za obdelavo kmetijskih površin. Nekateri avtorji omenjajo še brazdno erozijo, ki je vmesna stopnja med žlebično ter jarkovno erozijo. Proces **pljuskovne**, **medžlebične** ter **žlebične erozije** so **površinski**, medtem ko sta **brazdna** ter **jarkovna erozija** že procesa, ki povzročata **globinsko erozijo** (Petan, 2010). Gavrilovičeva in Pintarjeva enačba naj bi v osnovi upoštevali tudi druge oblike erozijskih procesov, kot so jarkovna erozija, erozija brežin, manjši podori in usadi (Bezak in sod., 2024). Obenem pa tudi Gavrilovičeva in Pintarjeva enačba ne upoštevat večjih masnih premikov, kot so drobirski tokovi, usadi in manjši ali večji plazovi (Bezak in sod., 2021; Peternel in sod., 2017; Sodnik and Mikoš, 2010). V primeru ekstremnih hidroloških razmer maksimalne močne padavine ne vplivajo več linearno na količino sproščenih in odplavljenih zemljin, kakor je to upoštevano z maksimalnimi dnevnimi padavinami v prirejeni Gavrilovičevi enačbi. Izkušnje kažejo, da se spiranje in odplavljanje zemljin lahko v ekstremnih razmerah poveča med pet in desetkrat glede na normalne hidrološke razmere. Nenadni udori plavin, ki so posledica izrednih padavin, so lahko tudi do desetkrat večji od povprečnih letnih količin dotekajočih plavin. Ob intenzivnejših (ekstremnih) padavinah ne pride le do površinskega spiranja zemljin, temveč tudi obsežnejšega sproščanja in odplavljanja zemljin iz v času neurja aktiviranih erozijskih žarišč globinske in bočne erozije. Takrat je treba količinam sproščenih in odplavljenih zemljin zaradi površinske erozije dodati še količine sproščenih in odplavljenih zemljin zaradi delovanja globinske in bočne erozije, svoje pa lahko v večjem obsegu kot sicer dodajo tudi pojavi plazenja tal, če splazene mase dosežejo vodne tokove, ki jih zaradi njihove običajno drobnozraste sestave zlahka odplavljajo. Tako je pri oceni potencialnega sproščanja sedimentov in dotoka naplavin do izbranega rečnega odseka smiselno upoštevati tudi dovzetnost za pojavljanje zemeljskih plazov (slika 2.8) oziroma podorov (sliki 2.9 in 2.10). Rdeča barva na karti verjetnosti pojavljanja zemeljskih plazov glede na naravne danosti (slika 2.8) kaže največjo verjetnost zdrsa preperinskih plazov, oranžna pa veliko verjetnost proženja plazov. Na območjih, označenih z rumeno in svetlozeleno barvo, je verjetnost pojavljanja plazenja nizka. Plazenje se navadno zgodi zaradi človeških posegov v preperinski pokrov nad flišno podlago, pri čemer podporni ukrep (škarpa, armiranobetonski zid) ni bil ustrezno izveden. Na gričevnatih območjih, označenih z zeleno barvo, možnosti nastanka plazov skorajda ni. Bela barva označuje ravninski svet, kjer plazov ni. Vendar pa napoved, ki je bila izdelana z računalniško simulacijo številnih vplivnih dejavnikov ne pomeni, da na bolj ogroženih terenih (rdeče in oranžne barve) ni mogoče graditi in posegati v teren,



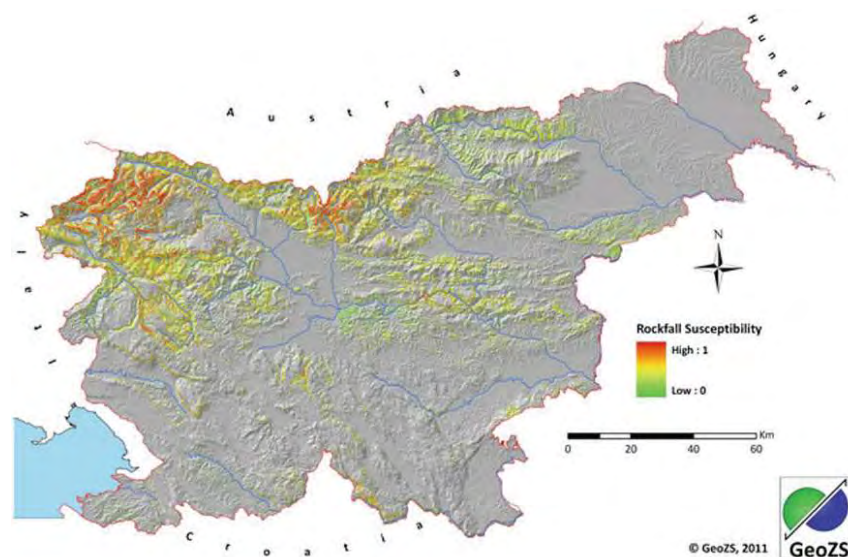
opozarja pa, da moramo za vsako lokacijo opredeliti nevarnost in izvesti dodatne ukrepe za stabilizacijo terena (Jemec Auflič in sod., 2016).



Slika 2.8: Karta verjetnosti pojavljanja zemeljskih plazov glede na naravne danosti (Jemec Auflič in sod., 2016).



Slika 2.9: Stabilnostna karta Slovenije - podori v merilu 1:400.000 iz leta 1995/1996 (Mikoš in sod., 2022).



**Slika 2.10:** Karta dovzetnosti pojavljanja podorov v Sloveniji v merilu 1:250.000 (GeoZS, 2011).

Omeniti velja še pojav drobirskih tokov, kjer lahko magnitude drobirskih tokov ocenimo z uporabo različnih empiričnih enačb (Sodnik and Mikoš, 2006). Po Takei (1984) lahko prostornino drobirskih tokov  $V_d$  [m<sup>3</sup>] določimo kot:

$$V_d = 13600 A^{0.61} \quad (2.5)$$

Marchi in D'Agostino (2002) pa za oceno magnitude drobirskega toka  $M$  [m<sup>3</sup>] predlagata enačbo 2.6.

$$M = 65000 A^{1.35} S^{1.7}, \quad (2.6)$$

pri čemer je razmerje med prostornino drobirskega toka  $M$  [m<sup>3</sup>] in volumnom odtoka vode  $V_r$  [m<sup>3</sup>] enako:

$$\frac{M}{V_r} = 2,9 S^2 \quad (2.7)$$

V enačbi 2.6 je  $A$  površina porečja [km<sup>2</sup>],  $S$  je naklon hudourniškega vršaja [-],  $V_d$  pa odtok vode [m<sup>3</sup>].

V Sloveniji se je sicer v preteklosti več pozornosti posvečalo erozijskim procesom, saj se je velik del prebivalstva ukvarjal s kmetijstvom in prav ta gospodarska panoga je zaradi izgube rodovitnih tal najbolj ranljiva. S pogozdovanjem in opuščanjem kmetijstva se je zmanjševalo tudi število erozijskih študij (Petan, 2010). Po nekaterih ocenah se v Sloveniji letno sprosti med 4 in 6 x 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> materiala, kar pomeni, da se površje v povprečju zniža za 0,25 mm na leto (Bezák, 2016). Pri tem se je potrebno zavedati, da gre za povprečno oceno, kjer se količine sproščenih zemljin močno razlikujejo za različne pokrovnosti oziroma rabe tal (KIS, 2020). Glede na skupine rabe kmetijskih zemljišč je erozija najbolj izrazita v trajnih nasadih (v povprečju 17,79 t/ha), na zemljiščih z intenzivno obdelavo tal (njive in vrtovi) (7,58 t/ha), medtem ko je skupna erozija na vseh vrstah travinja nekoliko manjša (6,82 t/ha) (KIS, 2020). Izračuni po posamezni vrsti kmetijske rabe po pričakovanjih kažejo, da je erozija najbolj prisotna v rabah z golimi in obdelanimi tlemi. Najvišja je v nezatravljenih oljčnikih (41,62 t/ha) in vinogradih (34,97 t/ha), na nagnjenih, neterasiranih terenih. Precej manjša je v intenzivnih sadovnjakih (11,91 t/ha), kjer je neobdelan pas tal (t.j. brez rastlinskega pokrova) omejen na ozko območje vzdolž same vrste dreves ter podpornih stebrov. Ocenjena stopnja erozije na njivah je 7,64 t/ha (KIS, 2020).



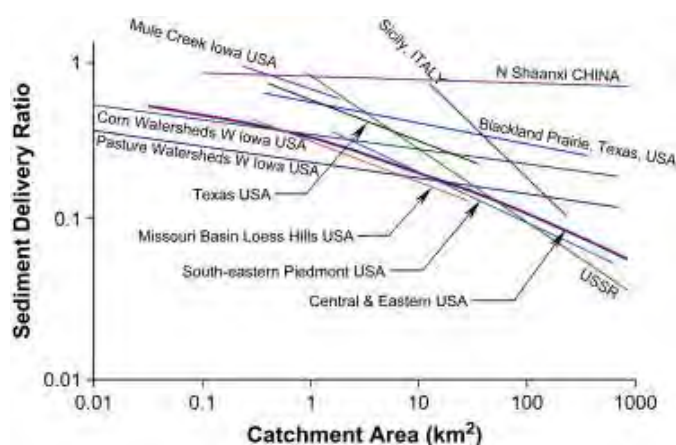
Po pričakovanju je ocena stopnje erozije v gozdovih daleč najmanjša. Erozijska je v gozdovih na območju celotne Slovenije ocenjena precej višje (0,37 t/ha) kot erozijska v gozdovih na pobočjih z nagibih < 50 % in ravninah (0,25 t/ha) (KIS, 2020). Rezultati študije, ki so jo izvedli na Kmetijskem inštitutu Slovenije (KIS, 2020) so pokazali, da je erozijska tal po metodi RUSLE 3,7 t/ha/leto, kar je približno  $3,8 \times 10^6 \text{ m}^3$ . V okviru evropske raziskave, izvedene z upoštevanjem sorazmerno grobe prostorske resolucije računske celice 100 m, so za območje Slovenije izračunali vrednost 7,4 t/ha/leto (Panagos in sod., 2015), kar je  $7,5 \times 10^6 \text{ m}^3$ .

## 2.3 Ocena dotoka plavin v rečno mrežo

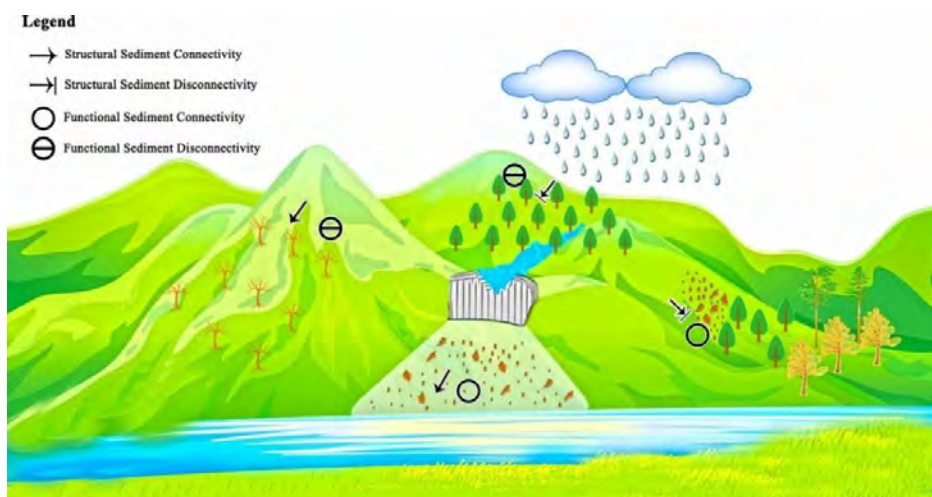
V povirnih porečjih je dotok sedimentov na območja v spodnjem toku pogosto zelo spremenljiv zaradi prostorsko omejenih in razdrobljenih območij izvorov plavin (erozijskih žarišč), kjer geomorfološki procesi potekajo zelo intenzivno. Ugotavljanje vrste, obsega in lokacije virov plavin v porečju je eden izmed začetnih korakov za oceno bilance plavin na nivoju porečja oziroma izračuna dotoka plavin do izbranega rečnega odseka. Kljub temu se lahko porečja obravnava kot relativno neučinkovite sisteme, saj je odplavljanje plavin iz porečij običajno bistveno manjše, kot je celotna količina erodiranega materiala v porečju (Wu in sod., 2018). Neskladje med skupkom vseh erozijskih procesov in odplavljanjem plavin je mogoče razložiti z odlaganjem sedimentov na porečjih in začasnim ali trajnim skladiščenjem na pobočjih z majhnim naklonom, poplavnih območjih ali vzdolž strug. Tako imajo območja skladiščenja/zastajanja ključno vlogo pri zmanjševanju odplavljanja plavin iz porečij. Dejansko odplavljanje erodiranega materiala v rečno mrežo in premeščanje plavin do mesta obravnavanega rečnega odseka je odvisno od medsebojnega učinkovanja številnih dejavnikov, kot so oblika prispevnega območja, razvejanost in povezanost hidrografske mreže itd. Teoretične vrednosti koeficienta odplavljanja se gibljejo med 0 in 1. Vrednosti koeficienta odplavljanja se načeloma zmanjšujejo z večanjem prispevnega območja, kot kažejo rezultati analiz predstavljenih na sliki 2.11. V literaturi je prav tako na voljo relativno veliko število različnih enačb in metod, ki omogočajo oceno koeficienta odplavljanja (Lu in sod., 2006; Walling, 1983; Wu in sod., 2018). Eno izmed takih enačb za izračun koeficienta odplavljanja  $K_o$  je predlagal tudi (Gavrilović, 1970):

$$K_o = \frac{\sqrt{O \cdot D}}{0,25 \cdot (L + 10)} \quad (2.8)$$

kjer je  $O$  obseg prispevnega območja [km],  $D$  povprečna višinska razlika območja [km] (definirana kot razlika med povprečno in minimalno nadmorsko višino porečja) in  $L$  dolžina porečja oziroma vodotoka [km]. Razlogi za boljšo oziroma slabšo povezljivost določenih delov porečja so lahko različni (slika 2.12) in jih je potrebno obravnavati ločeno v odvisnosti od lastnosti porečja (Najafi in sod., 2021), nedvomno pa je eden od pomembnejših dejavnikov bližina vira erozijskega žarišča rečni mreži. Različne vrste ovir, kot so aluvialni nanosi naplavin ali poplavne ravnice ter prečne ovire in objekti na vodotokih, lahko bistveno zmanjšajo ali povsem prekinejo prečno, vzdolžno in navpično povezljivost plavin v porečjih (slika 2.3). V skladu s konceptualnim modelom (slika 2.2) je zelo pomembno prostorsko opredeliti vire in poti transporta sedimentov na nivoju porečja, da bi lahko ocenili prostorsko (ne)povezanost transportnih poti sedimentov in posledično ocenili koeficient odplavljanja.

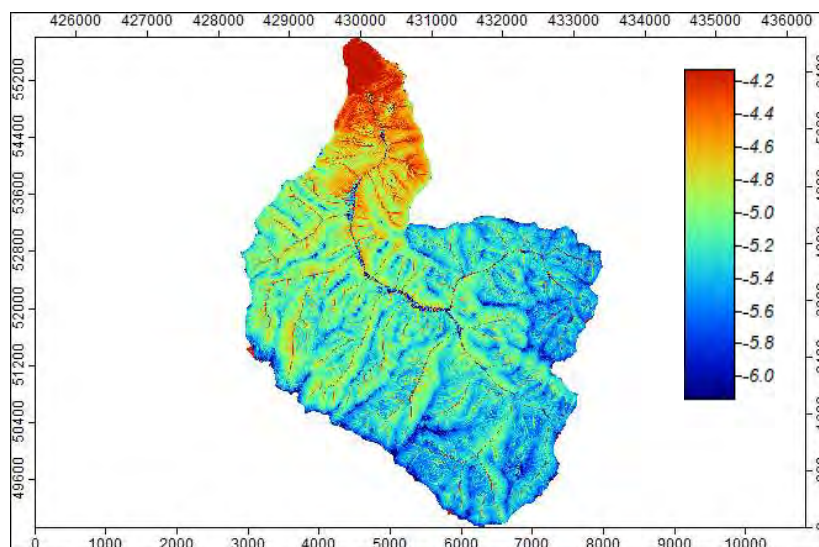


**Slika 2.11:** Razmerje med koeficientom odplavljanja (angl. *sediment delivery ratio*) in prispevno površino območja (Lu in sod., 2006).



**Slika 2.12:** Grafični prikaz konceptov strukturne in funkcionalne povezljivosti transporta sedimentov (Najafi in sod., 2021).

Dotok zemljin v strugo vodotoka oziroma do izbrane lokacije je odvisen od številnih topografskih dejavnikov. Posledično so bili v preteklih letih razviti številni indeksi, ki omogočajo oceno povezljivosti posameznih delov porečja (Cavalli in sod., 2013; Najafi in sod., 2021). Metode, ki se najpogosteje uporabljajo za analizo dotoka sedimentov v rečno mrežo, so geomorfološke in sedimentološke terenske raziskave (Blasone in sod., 2014; Ricci in sod., 2018; Wu in Chen, 2012). V zadnjem desetletju je bilo razvitih več pristopov za kakovostno obravnavo povezljivosti, ki temeljijo na geomorfometriji (Bracken in sod., 2015; Cavalli in sod., 2013). Indeks povezljivosti (Cavalli in sod., 2013) je namenjen ocenjevanju potencialnih povezav med pobočji in iztokom iz porečja ali rečno mrežo. Eden glavnih dejavnikov v zgoraj navedenih metodah za oceno povezljivosti je bližina rečne mreže. Kot primer izračuna takšnega indeksa lahko prikažemo izračun indeksa, ki ga je predlagal Cavalli in sod. (2013) za porečje potoka Suhorica, ki je locirano v JZ Sloveniji (Slika 2.13).



**Slika 2.13:** Indeks povezljivosti porečja Suhorice glede na metodologijo, ki jo je predlagal Cavalli in sod. (2013). Rdeča barva označuje območja z boljšo povezljivostjo, modra pa območja s slabšo povezljivostjo.

Omeniti velja tudi različne metode, ki omogočajo oceno sprememb dna rečne doline (Gilbert in sod., 2016). Te metode lahko uporabimo za oceno območja, kjer lahko pride do potencialnega delovanja erozijskih procesov vzdolž strug vodotokov.

## 2.4 Metode za oceno premeščanja plavin v rečni mreži

Na podlagi ocene erozijskega potenciala zaledja in dotoka erozijskega materiala lahko ocenimo količino plavin, ki prispe do obravnavanega rečnega odseka (slika 2.4). Če se omenjeni material premešča po rečni strugi, ga imenujemo plavine. Plavine lahko v grobem razdelimo na:

- kalne snovi;
- lebdeče plavine;
- rinjene plavine.

Poleg tega vodotok premešča še raztopljene snovi, ki pa imajo pri proučevanju premeščanja plavin zanemarljiv prispevek. Prodonosnost je izraz za dejanski transport rinjenih plavin [kg/s, t/leto, m<sup>3</sup>/leto], ki se premikajo po dnu ali poskakujejo v vodnem toku v neposredni bližini dna. Poskakovanje rinjenih plavin predstavlja prehod med premeščanjem rinjenih ter lebdečih plavin. Kalne snovi večinoma sestavljajo drobni sedimenti velikosti melja (premer zrn je med 0,002 in 0,063 mm) in gline (premer zrn je manjši od 0,002 mm), ki se v vodotokih večinoma premeščajo brez stika z rečnim dnom tudi ob običajnih hidroloških razmerah. Ob povišanih vodostajih imajo velik vpliv na kalnost tudi lebdeče plavine oziroma suspendirane snovi [mg/l, t/leto, m<sup>3</sup>/leto], kjer gre za nekoliko bolj grob material s prevladujočim deležem peska (premer zrn med 0,063 in 2 mm), ki zaradi turbulence lebdi v vodnem toku in ima pogosto enako hitrost kot vodni tok. Ti delci se ob običajnih oziroma podpovprečnih hidroloških razmerah lahko ponovno odložijo oziroma premikajo kot rinjene plavine. Pri premeščanju sedimentov vzdolž rečne mreže sta pomembna tudi procesa rečnega obrusa (abrazije), kjer gre za procese brušenja, glajenja, krušenja, ter rečno sortiranje kot posledica selektivnega premeščanja, ki lahko poteka v različnih smereh (npr. vzdolžno, prečno, vertikalno). Drobni delci se lahko premeščajo tudi skozi različne plasti zgornjih delov litosfere, vendar so procesi podpovršinskega spiranja (slika 2.3)

ter premeščanja v naravnih razmerah zanemarljivi. V povezavi z razmerami vzdolž slovenske hidrografske mreže je treba dodatno izpostaviti vlogo plavja (največkrat lesenega plavja), katerega potencialna razpoložljivost za nadaljnje premeščanje je zaradi velike pokritosti ozemlja Slovenije z gozdom zelo velika. Plavje ima lahko pomemben vpliv na transport plavin in erozijske procese. Leseno plavje ima velik vpliv na erozijske procese v strugi vodotoka, npr. oblikovanje lokalnih tolmunov in erozijskih zajed ter preusmerjanje toka vode zaradi zagozdenja plavja na posameznih rečnih odsekih, zelo pogosto ob raznih hidrotehničnih objektih.

Poleg koeficienta odplavljanja zemljin je pomemben dejavnik pri analizi sproščanja in odplavljanja zemljin tudi razmerje med rinjenimi in lebdečimi plavinami v rečni mreži. Delež rinjenih plavin v celotni količini premeščenega materiala je pri (pred)alpskih vodotokih lahko med 20 in 90 % (Lenzi and Marchi, 2000; Turowski in sod., 2010). Takšni primeri so v Sloveniji npr. pritoki Save Dolinke ali povirni deli reke Soče (Bezak in sod., 2015), kjer je veliko erozijskih žarišč, iz katerih se sprošča velika količina relativno grobozrnatega erozijskega drobirja, ki se potem premešča v obliki rinjenih plavin, kar pomeni, da je delež rinjenih plavin lahko približno enak (ali v nekaterih primerih celo večji) kot delež lebdečih plavin. Za bolj ravninske vodotoke, gozdnata območja in večja porečja, je to razmerje večinoma v prid lebdečih plavin (Bezak in sod., 2015), kjer je delež rinjenih plavin pogosto le še okrog 30 % ali manj celotne količine plavin v premeščanju (Bezak in sod., 2015).

Turowski in sod. (2010) so podali empirično enačbo za izračun spodnje meje deleža lebdečih plavin. Za določitev natančnega razmerja med deležem rinjenih in lebdečih plavin so potrebne večletne meritve tako lebdečih kot rinjenih plavin. V Sloveniji se monitoring rinjenih plavin ne izvaja sistematično in so na voljo samo posredne ocene (npr. preko zmanjševanja prostornin akumulacijskih bazenov hidroelektrarn) za razliko od monitoringa vsebnosti suspendiranih snovi oz. kalnosti, ki se je na porečju Save izvajal na vodomernih postajah Hrastnik na Savi, Veliko Širje I na Savinji in Suha I na Sori. Dodatno se meritve izvajajo tudi na nekaterih drugih lokacijah. Poleg tega so za oceno količine plavin na voljo tudi nekateri arhivski podatki (Bezak in sod., 2016). Dejanske zvezne meritve rinjenih plavin pa zahtevajo kompleksno mersko opremo ali posebne lovilne hidrotehnične naprave ali objekte (Lenzi in sod., 2004; Turowski in sod., 2010), vzpostavitev takšnega monitoringa pa je posledično relativno draga in zahtevna. Na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo (UL FGG) izvajamo meritve koncentracij suspendiranih plavin na posameznih povirnih delih porečja Gradaščice, reke Reke, spodnje Save in Ljubljance v okviru spremljanja hidroloških in erozijskih razmer na eksperimentalnih porečjih in raziskovalnih projektih.

Z upoštevanjem zrnavostne sestave plavin lahko okvirno ovrednotimo premestitveno zmogljivost za rinjene in lebdeče plavine za izbran odsek vodotoka. Na tem mestu je treba poudariti, da je premestitvena zmogljivost odvisna od prepleta lokalnih hidromorfoloških in hidravličnih razmer na odseku vodotoka (npr. pretoka, geometrijske oblike struge, naklona dna struge, zrnavostne sestave plavin, hrapavosti struge itd.). Za oceno premestitvene zmogljivosti vodnih tokov za rinjene plavine se lahko uporabijo različne empirične enačbe, ki so bile izpeljane na podlagi laboratorijskih raziskav in ob določenih predpostavkah. Nabor enačb za oceno premestitvene zmogljivosti vodotokov v posameznih prečnih prerezhih je obsežen, v tem poročilu bomo v nadaljevanju na kratko opisali zgolj pristope za oceno premestitvene zmogljivosti, ki so se na podlagi preteklih analiz izkazali za primerne glede na pričakovane hidravlične razmere v slovenskih vodotokih in v naših vodotokih prevladujoče zrnavostne lastnosti plavin. Ena izmed najpogosteje uporabljenih metod je enačba Meyer-Peter-Müller, ki je bila izpeljana na podlagi poizkusov na Eidgenössische Technische Hochschule (ETH) Zürich. Kasneje so bili na ETH Zürich eksperimenti izvedeni še pri nekaterih drugih pogojih, kot npr. večji nakloni laboratorijskega žleba. Enačba Meyer-Peter-Müller je poleg nekaterih drugih enačb, kot so enačbe Ackers in White (1973), Engelund-Hansen (1967), Laursen-Copeland (1968), Toffaleti (1968), Yang

(1973, 1984), vključena tudi v prosto dostopni program HEC-RAS (HEC RAS, 2021), ki se pogosto uporablja za hidravlično modeliranje. Tudi nekatera druga programska orodja, kot so npr. MIKE modeli, imajo vgrajene nekatere module (1D, 2D in 3D) za račun transporta sedimentov. Z uporabo enačbe Ackers in White (1973) določimo celotno premestitveno zmogljivost, torej tako prispevek lebdečih kot rinjenih plavin. Za modeliranje transporta rinjenih ter lebdečih plavin po rečni mreži so na razpolago tudi nekateri drugi modeli (npr. STAND, SRH-1D, SRH-2D). Ob vseh zgoraj omenjenih orodjih oz. hidravličnih modelih za oceno premestitvene zmogljivosti vodotokov je treba omeniti, da je verodostojnost ocen premestitvenih zmogljivosti močno omejena z razpoložljivostjo terenskih podatkov o hidravličnih razmerah za umerjanje hidravličnega modela in kakovostnih podatkov o zrnastosti sestavi plavin na posamezni lokaciji, za katero se analiza premestitvene zmogljivosti izvaja.

Ob izbiri primernih enačb za preračun premestitvene zmogljivosti vodotokov za rinjene plavine velja poudariti, da je bila večina enačb razvitih kot rezultat laboratorijskih preizkusov in večinoma na primerih sorazmerno drobnozrnatih plavin (pretežno zrnastostnega razreda peska). Posledično mnoge izmed predlaganih metod ne odražajo nujno dejanskega stanja v naravnih vodotokih (prisotnost spremenljive geometrije struge, neenovita zrnastostna sestava, neenakomerna porazdelitev pretočnih hitrosti itd.), lahko pa služijo kot informacija o pričakovani dinamiki transporta plavin in so lahko uporabne za grobo oceno premestitvene zmogljivosti, če ni na voljo dejanskih meritev premeščanja rinjenih plavin (prodnosnosti).

Za podajanje pregleda upoštevanih parametrov v nadaljevanju predstavljamo Meyer-Peter-Müllerjevo (MPM) enačbo za preračun premestitvene zmogljivosti vodnega toka za rinjene plavine. Enačba Meyer-Peter-Müller (MPM) je najbolj razširjena v vodotokih z bolj grobozrnato sestavo plavin (pretežno gramoza oz. proda), kakršna se pričakuje tudi vzdolž povirnih delov slovenske hidrografske mreže. Vsi laboratorijski poizkusi, na osnovi katerih je bila razvita enačba, so bili primeri premeščanja rinjenih plavin brez deleža lebdečih plavin. Območje upoštevanih padcev dna ( $l$ ) je bilo med 0,04 % in 2 %, pretočne hitrosti so bile v razponu med 0,4 in 2,9 m/s. V končni obliki (izražena v SI enotah) se enačba MPM glasi:

$$g \left( \frac{Q_r}{Q} \right) \left( \frac{k_s}{k_r} \right)^{1.5} R I = 0.047 \rho (s - 1) g d_m + 0.25 \rho (s - 1)^{0.67} g q_B^{0.67} \quad (2.9)$$

kjer je:

- $Q_r$ ...reducirani (na dno delujoči) pretok vode [ $m^3/s$ ];
- $Q$ ...celoten pretok vode [ $m^3/s$ ];
- $k_s$ ...dejanski koeficient odpora toku vode [ $m^{1/2}/s$ ];
- $k_r$ ...Stricklerjev koeficient trenja - prilagojen poizkusom Nikuradseja;
- $\rho$ ...gostota vode [ $1.000 \text{ kg}/m^3$ ];
- $g$ ...zemeljski pospešek [ $9,81 \text{ m}/s^2$ ];
- $d_m$ ...srednji premer zrna plavin [ $m$ ];
- $q_B$ ...na širinski  $m$  in na sekundo premeščena prostornina rinjenih plavin – sekundna specifična premestitvena zmogljivost [ $m^3/m \cdot s$ ];
- $s$ ...relativna gostota plavin glede na gostoto vode ( $\rho_s/\rho$ ) [ $\text{kg}/m^3$ ].

Podrobnejši pregled različnih metod za oceno premestitvene zmogljivosti vodotokov za rinjene plavine podaja Ancey (2020).



### 3 VPLIV POPLAVNIH VODA NA EROZIJSKE PROCESSE NA KMETIJSKIH POVRŠINAH

Najbolj rodovitne kmetijske površine so na območjih aluvialnih ravnin, ki so praviloma poplavne površine. Erozijski procesi na kmetijskih površinah so tesno povezani s procesi sproščanja, premeščanja in odlaganja plavin, opisanimi v 2. poglavju, saj so kmetijske površine zaradi odsotnosti vegetacijskega pokrova zelo dovzetne za vse oblike vodne erozije. S procesnega vidika in vidika poimenovanja procesov v zakonodaji (ZV-1) gre za prevladujoče procese površinske erozije. Ključni dejavniki, ki vplivajo na razvitost erozijskih procesov na kmetijskih površinah, so topografske razmere, pokrovnost (najbolj kritično je obdobje, ko vegetacijski pokrov kmetijskih poljščin ni razvit oz. je v zgodnjih fazah razvoja) in struktura tal. V kmetijstvu poplave povzročajo velike gospodarske škode, katerih obseg je povezan predvsem z dolžino trajanja poplave, višino poplavne vode ter erozijsko in rušilno močjo vodnega toka (npr. količina odloženih plavin in drobirja ter odplavljene zemljine). Seveda ne moremo mimo negativnih vplivov onesnaženja, ko se na kmetijske površine razlije voda in se odložijo plavine, onesnažene s potencialno toksičnimi snovmi, kot so ogljikovodiki (naftni derivati, olja ...) (Juarez Lucas in sod., 2018). Ekstremne poplave povzročajo hitre in znatne spremembe v funkciji tal, spremenijo se lahko pH, redoks potencial tal, mikrobiološki procesi v tleh, struktura tal in vodozadrževalne lastnosti tal, poveča se izpiranje hranil (Sánchez-Rodríguez in sod., 2019), kar se odraža v zmanjšanem pridelku. Pogosto spregledana in najtežje sanirana negativna posledica poplav z vidika kmetijstva in rastlinske pridelave je izguba rodovitne vrhnje plasti tal zaradi erozije.

Razlika v erozijskih procesih oziroma posledicah poplav je med območji, ki so redno poplavljana (primer urejeni suhi zadrževalniki ali poplavni travniki) ter območji, kjer se poplava zgodi nenadzorovano, zelo velika. Na območjih suhih zadrževalnikov, kjer je proces razlivanja poplavnih vod nadzorovan, prevladujejo predvsem degradacijski procesi zaradi odlaganja sedimentov ter kemičnega in biološkega onesnaženja površin, ki pride s poplavno vodo. Hkrati se na teh poplavnih in namensko urejenih površinah vzpostavi vegetacija, prilagojena na tak vodni režim, spremenita se struktura in delovanje tal (primer, prikazan na sliki 3.1).



**Slika 3.1:** Primer vegetacije močvirskih in vlažnih travnikov (2014).

Tok poplavne vode lahko na kmetijskih površinah delno ali povsem odstrani zgornjo plast tal. To vodi do izgube najbolj občutljivega dela kmetijskih površin, rodovitnega sloja. S hitrostjo toka vode se poveča odnašanje plasti in globine jarkov lahko dosežejo tudi 1 m ali več (primer poplave na območju k.o. Zrkovci na desnem bregu Drave leta 2012, ki je z vidika procesov rečne erozije podrobneje opisana v poglavju 5). Pri sanaciji erodiranih površin zaradi odnašanja rodovitnih plasti je največja težava, kje



pridobiti rodovitne zemljine, ki so po svojih fizikalnih, kemijskih in bioloških lastnostih ustrezne in s tem tudi uporabne za sanacijo poškodovanih površin. V primeru bočne erozije lahko poleg izgube rodovitne plasti pride do izgube površine same (primer ob Savi ob mostu AC Ljubljana – Maribor opisan v poglavju 5). Na aluvialnih ravninah v nižinah ima taka izguba površin manjše posledice za izgubo pridelovalnega potenciala. V primeru ozkih gorskih dolin, kjer rodovitnih površin v ravnini primanjkuje, pa je taka izguba pridelovalnega potenciala večja (npr. prikaz na sliki 3.2).



**Slika 3.2:** Posledice poplav leta 2008 ob potoku na ravnici pred krajem Obrne, v bližini Bohinjske Bele (zgoraj in v sredini – stanje neposredno po poplavih konec aprila; spodaj – stanje po dveh mesecih vegetacijske dobe).

Sanacija in obnova zaradi poplav prizadetih kmetijskih zemljišč sta dolgotrajna procesa. Ravnovesje proizvodnih funkcij tal se vzpostavi po letu ali dveh po izjemnem poplavnem dogodku (Sánchez-Rodríguez in sod., 2019), zato je za poplavne ravnice priporočeno gojenje tistih poljščin, ki bolje prenašajo vlažne razmere. Debeli, težki depoziti plavin zavirajo oziroma onemogočijo rast rastlin, zato jih je po poplavih potrebno odstraniti in ustrezno deponirati. Depoziti plavin in sedimentov imajo porušeno strukturo, na obdelovalni sloj tal so nanešeni v različnih debelinah. V poplavih v avgustu 2023 so bili nanosi mulja na območjih odlaganja plavin na rodovitnih kmetijskih površinah ponekod debeli tudi več metrov. Skeletni drobir (rinjene plavine), ki je nanesen na kmetijske površine v različno debelih plasteh, je težko dovolj dobro odstraniti (slika 3.3).



**Slika 3.3:** Primer skeletnih sedimentov na travniški površini vzdolž cestnega odvodnega jarka na območju Šalamencev (2014).

V plavinah so poleg finih mineralnih delcev, na katera so vezani hranila in organska snov, pomešani drobni odpadki. Na nekaterih območjih, tudi v Sloveniji, vrhnja plast tal skladišči tudi potencialno toksične elemente, kot so depoziti kovin, ki so posledica kovinarske industrije ter rudnikov svinca in cinka (na območjih Jesenic, Mežiške doline ter Celja).

Zaradi vsega tega ter tudi zaradi neznanosti je plavine potrebno odstraniti in ustrezno deponirati. Za uporabo plavin za sanacijo poškodovanih površin je predhodno potrebno narediti kemijsko analizo. V poplavih avgusta 2023 odložene plavine z območja Mežiške doline (slika 3.4) so vrhnji sloji tal vsebovali presežene kritične vrednosti svinca in cinka ter presežene opozorilne vrednosti kadmija. Priporočeni koraki, povzeti po Vrščaj in sod. (2023), so naslednji:

- 1) Ob poplavih pride do številnih negativnih sprememb tal, kot so zmanjšanje vsebnosti hranil, erozija, povečano tveganje za onesnaženje s težkimi kovinami, olji in mikroorganizmi. Mulj, ki se odloži na površino tal, lahko vsebuje težke kovine, organska onesnaževala, fitofarmacevtska sredstva (FFS) in mikrobiološke kontaminante. Pri ocenjevanju onesnaženosti je nujno ločevanje neonesnaženih naplavin, ki jih je mogoče varno zadelati v tla, od naplavin z znaki onesnaženja (na podlagi vonja, prisotnosti industrije gorvodno, najdene embalaže FFS itd.), ki zahtevajo posebne postopke.
- 2) Degradacija tal zaradi poplav ima lahko znatne gospodarske in okoljske posledice, kar je pomembno upoštevati pri načrtovanju prihodnje kmetijske pridelave. To pomeni: povečano kamnitost tal, nanos blata in mulja, erozijo tal (zmanjšanje globine, izguba rodovitnega sloja in hranil), odlaganje onesnaževal ter različnih odpadkov. Poleg tega se lahko pojavi t.i. poplavlalni sindrom – odmiranje koristnih gliv (slabša rast rastlin v naslednjih letih), spremembe redukcijskih in oksidacijskih pogojev spremenjena struktura ipd.
- 3) Vežano na sanacijo kmetijskih zemljiščih so priporočljivi minimalni posegi v tla, ki naj bodo izvedeni le, če so nujni, obenem pa se naj izogiba transportu tal in mešanju različnih tipov tal. Če nanašamo nova tla, to naredimo z istim talnim tipom iz bližnje okolice.
- 4) Usmeritve za terenske preglede: Ugotovimo prisotnost morebitnih onesnaževal, kot so naplavine, težke kovine, fitofarmacevtska sredstva (FFS), olja ali fekalije.
- 5) Osnovno čiščenje: Zberemo in odstranimo večje naplavine ter druge vidne tujke (kamenje, veje, embalaža ipd.).

6) Ravnanje z neonesnaženimi naplavinami: Pri neonesnaženih drobnozrnatih (grobe delce vedno odstranimo) naplavinah je priporočeno, da jih zadelamo v tla ali enakomerno razgrnemo po površini. V primerih močne erozije je priporočljivo navoziti sloj rodovitnih tal iz okoliških območij ter izravnati površino. Grob peščen material se uporabi za »polnjenje« erodiranih delov zemljišč, čez katere nato navozimo sloj tal.

7) Ukrepi za onesnažena tla:

a) Težke kovine: Ker se kontaminacija s težkimi kovinami ne razgradi niti skozi več tisoč let, so potrebni posebni ukrepi: fitoremediacija (zelo dolgotrajen proces, ki traja 10, 20 ali več let) ali zamenjava tal, ki pa je pogosto zelo draga.

b) Mineralna olja in naftni derivati: Naftni derivati se v aerobnih pogojih razgradijo hitro, saj njihovo količino zmanjšajo mikroorganizmi v letu ali nekaj letih. Ukrepi so odstranitev onesnaženega mulja in odlaganje na za to namenjena mesta, gnojenje z organskimi gnojili za pospešitev mikrobne razgradnje, rahljanje, zračenje in plitva obdelava tal za večjo zračnost in aktivnost mikroorganizmov.

c) Obstojna organska onesnaževala: Na terenu ni mogoče neposredno oceniti teh onesnažil, zato lahko oceno onesnaženja izvedemo na podlagi gorvodne rabe tal ter prisotnosti embalaže FFS. Ukrepi za zmanjšanje kontaminacije z obstojnimi organskimi onesnaževali so taki kot pri naftnih derivatih. Za nedvoumno ugotovitev bi sicer ta korak zahteval odvzem vzorcev tal ter laboratorijske analize, za katere je potrebno zagotoviti sredstva.

d) Splošni ukrepi na zelenjavnih vrtovih: Z vrta odstranimo grobe naplavine, mulj preventivno odstranimo in ga odložimo na zbirališču poplavnih odpadkov. Če mulj ni onesnažen, ga lahko enakomerno razgrnemo po površini. Umazano zelenjavo zavržemo, saj je lahko kontaminirana z mikroorganizmi ali drugimi onesnaževali. Pri sanaciji tal na vrtovih tla prerahljamo, prezračimo in jih običajno obdelamo za naslednjo sezono. Če obstaja možnost onesnaženja (npr. zaradi bližnje industrije), je potrebna analiza tal. Priporoča se čimprejšnja ozelenitev površin po poplavnem dogodku.



**Slika 3.4:** Nanos mulja na kmetijskih površinah ob poplavih avgusta 2023 (levo, vir: Kmečki Glas) in odložene plavine na območju Mežiške doline (desno, vir: Kmečki glas).



**Slika 3.5:** Sedimenti v sadovnjaku po umiku poplavnega vala na območju Vipavske doline (3. in 10. 12. 2005).



## 4 PREPOZNAVANJE EROZIJSKIH PROCESOV OBALE MORJA

Erozijski procesi na obali so vezani predvsem na tipe kamnin in relief, ki se pojavlja vzdolž obale. Zaradi dokaj enotne geološke zgradbe slovenske obale, ki jo sestavljajo skoraj izključno fliši, je v nadaljevanju opisana predvsem erozija tega tipa kamnin, v manjšem delu pa tudi erozija nižjeležčih in karbonatnih predelov. Sprva so predstavljeni preperevanje in (inženirsko)geološki procesi, ki vplivajo na erozijo, nato pa tudi geološka in inženirsko-geološka zgradba ozemlja.

### 4.1 Geološki procesi

#### 4.1.1 Preperevanje

Proces preperevanja je prvi, ki prizadene kamnine in sedimente, zajema pa kemično, fizikalno in biološko preperevanje. Prva dva procesa sta v flišu precej izrazita. **Kemično preperevanje** predstavlja oksidacijo, hidrolizo in raztapljanje mineralov. V laporovcih in peščenjakih, ki tvorijo fliš, se preperela kamnina kaže kot rjavkast rob na zunanji strani plasti in izpadlih blokkih. Nепреperel fliš je sive, včasih sivozelenkaste barve, preperel pa zaradi oksidacije mineralov rumenkasto rjave barve. Preperela je lahko tudi notranjost blokov peščenjaka, ker so ti razpokani in lahko voda in zrak ob razpokah prodirata v notranjost. **Fizikalno preperevanje** poteka zaradi vplivov razpokanja in vpliva temperaturnih razlik (tako letnih kot tudi dnevno-nočnih nihanj), manj pomemben pa je proces razpadanja zaradi zmrzali. **Biološko preperevanje** je manj pomembno, ni pa zanemarljivo, saj korenine do globine okoli 0,5 m ob rasti tudi širijo razpoke in raztapljajo kamnino. Pomemben je predvsem vegetacijski pokrov zaradi delovanja vetra, ker se ob njem majo korenine in razrahljajo zgornji preperel sloj. Ta proces je še posebej izrazit na robu klifa, kjer so korenine razgaljene. Vsi trije procesi preperevanja potekajo v peščenjakih in laporovcih, posledica pa je približno 0,5 m do 1 m debel preperinski sloj, ki je zelo dovzeten za procese erozije in na območjih s strmimi nakloni lahko tudi splazi.



**Slika 4.1:** Preperevanje peščenjaka; notranji nepreperel del je sive barve, zunanji preperel rob rumenorjave (levo). Preperevanje laporovca (desno).

#### 4.1.2 Erozijski pojavi, povezani z erozijo

Erozija je proces odnašanja površinskih plasti (predvsem preperinskega pokrova) na izpostavljenih predelih, vanjo spadajo procesi spiranja in odnašanja preperine in sedimentov. Glavni vzrok erozije v naših podnebni razmerah je voda oz. padavine, manj pomemben je veter, led in sneg pa na območju Slovenske obale nimata bistvenega vpliva. Geometrijsko lahko erozijo razdelimo na *linijsko* in *ploskovno*; prva je značilna za erozijske jarke in grape ter poteka vzdolž osi vodotoka ali vzdolž morske obale, druga pa je značilna za večja razgaljena območja, kjer ni preferenčnih smeri. Pogoj za erozijo so kamnine, ki morajo biti dovzetne za ta proces (predvsem mehkejše kamnine in sedimenti), drugi pogoj pa je dovolj velik naklon območja, če ozemlje erodira voda. Erozijski proces je v flišu intenziven proces,

predvsem so zanjo dovzetni laporovci (slika 4.1). Na klifih, ki sestavljajo slovensko obalo, lahko ločimo več vrst erozije, ki so podrobneje predstavljene v nadaljevanju.

#### 4.1.2.1 Erozijski zaradi padavin

Na klifih se zaradi delovanja padavin pojavljajo številne erozijske grabe in kanali oz. jarki (slika 4.2 levo), ki se s časom širijo navzgor in tudi bočno (stransko) ter povzročajo umikanje klifa v notranjost. Na dnu teh jarkov je odložen sediment v obliki manjših vršajev, ki pa ga morje hitro erodira in odstrani, zato velika aktivnost teh erozijskih procesov ni takoj razvidna. Na razgaljenih delih klifa poteka tudi ploskovna erozija, saj vegetacije na strmih delih ni (slika 4.2 desno). To je značilno za odseke v Mesečevem zalivu v Strunjanu, na območju Belih skal med Strunjanom in Izolo ter na določenih delih Debelega rtiča. Dodaten problem lahko povzroča površinski dotok vode, če voda ni ustrezno zajeta oz. kanalizirana in se pretaka površinsko na zgornji rob klifa. V tem primeru prihaja do dodatne namočenosti preperinskega pokrova. Pri eroziji prihaja do razgaljenja zgornjega dela klifa, kjer rastejo drevesa, posledično so razgaljene korenine in drevesa padejo na obalni del.



**Slika 4.2:** Erozijski kanali na klifu in akumuliran material na vznožju (levo). Ploskovna erozija na klifu (desno).

#### 4.1.2.2 Vetrna erozija

Zaradi delovanja vetra, predvsem zaradi sunkov burje, tudi drevesa sama vplivajo na erozijo, saj jih ob močnem vetru ziblje, korenine pa pri tem premikajo in rahljajo tla. Posledica je spodkopavanje in padanje dreves na obalo. Na spodnjih fotografijah (slika 4.3) je predstavljena problematika dreves – sicer gre za proces spodkopavanja, a ta drevesa na robu so težava tudi zaradi vetra.



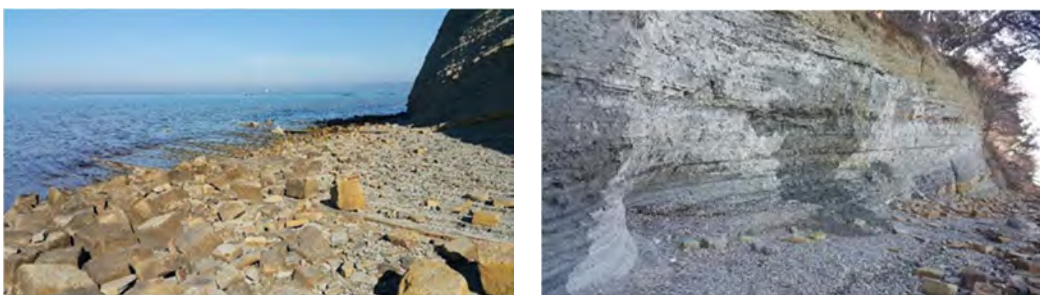
**Slika 4.3:** Spodkopavanje grmovja in dreves (levo). Nagibanje dreves zaradi spodkopavanja (desno).

#### 4.1.2.3 Erozijski morja (abrazija)

Tretji proces, značilen za morsko okolje, je abrazija. Gre za eroziji podoben proces, pri katerem morje z energijo valov spodkopava kamnine na obali. Pri tem se na stiku med kopnim in morjem tvori posebna



geomorfološka oblika, imenovana **abrazijska polica** (manj uveljavljen izraz je tudi abrazijska terasa), ki je del obale z zelo blagim naklonom do nekaj stopinj (slika 4.4). Poplavljenemu delu te police se pravi **podmorska terasa**, gre pa za isto ravnico, ki je zaradi delovanja plime izmenično potopljena in kopna. Polica nastane zaradi delovanja morja, ko morje klif spodjeda in se ta postopno umika v notranjost. Proces je hiter, ker so klifi zelo strmi in npr. na območju Debelega rtiča večinoma brez človeških posegov, ki bi ublažili ali preprečili delovanje abrazije. Po drugi strani pa daljša abrazijska polica tudi upočasnjuje moč morja, saj se energija vzdolž poti izgubi. Taka abrazijska polica deluje vzdolž celotne naravne obale, lokalno pa lahko morje spodjeda kamnino tudi tako, da nastanejo **abrazijski spodmoli** (sliki 4.4 in 4.5). Na območju občine Ankaran je viden spodmol na severni strani klifa Debelega rtiča, ki je tudi vnesen v register zavarovanih naravnih vrednot državnega pomena (šifra 3645 - Debeli rtič - abrazijski spodmol). Zavedati se je potrebno, da klifov brez abrazije in odnašanja akumuliranega materiala z vznožij ne bi bilo, saj bi delovali samo erozijski procesi. Ti bi preoblikovali klif v bolj položna pobočja, ob njihovih vznožjih pa bi se nakopičil sediment, tako da bi bilo umikanje klifov bistveno počasnejše. Erozijski in abrazijski sta precej hitra procesa; ocenjujejo, da se je klif na območju slovenske obale od časa Rimljanov umaknil v notranjost za nekaj deset metrov. Ocenjena povprečna hitrost umikanja je okoli 2 cm na leto.



**Slika 4.4:** Abrazijska polica (levo). Manjši spodmol v lapornatih plasteh (desno).



**Slika 4.5:** Spodmol v Mesečevem zalivu.

#### 4.1.2.4 Spodjedanje plasti peščenjakov in kalciturbiditov

Proces, ki je sicer posledica vseh prej naštetih procesov, a ga lahko obravnavamo tudi ločeno, je spodjedanje plasti. Gre za proces, značilen za kamnine, pri katerih se hitro menjavajo različni litološki različki, in fliš je zelo tipičen primer takega zaporedja. Gre namreč za menjavanje trših plasti peščenjaka z vmesnimi plastmi laporovca. Slednjega erozijski padavin in tudi morja lažje spodkoplje, pri tem pa zmanjšuje stabilnost zgoraj ležečih plasti peščenjaka. Ker so peščenjaki razpokani v približno dveh

pravokotnih smereh, razpoke pa so pravokotne na plastovitost, prihaja do nastanka bolj ali manj pravokotnih blokov oz. kvadrov, ki izpadajo pri spodkopavanju, njihove velikosti pa so vezane na debeline plasti – večja, kot je debelina, večja je razpokanost in večji so bloki. Spodjedanje je zapleten proces, pri katerem ima največjo vlogo debelina peščenjakove plasti, nato razdalje med razpokami, manjše vplive, ki še niso v celoti proučeni, pa imajo tudi tlačne in natezne trdnosti plasti ter inženirskogeološke lastnosti razpok (hrapavost, polnilo ipd.). Spodjedanje je načeloma počasen proces, ki pa rezultira v hipnem in zelo nevarnem procesu izpadanja in padanja kamenja, skal in blokov (slika 4.6), opisanih v nadaljevanju.

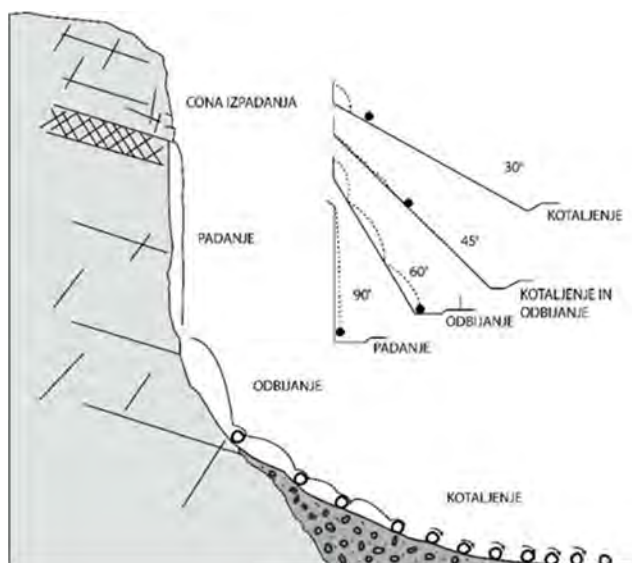


**Slika 4.6:** Spodkopavanje blokov peščenjaka z manjšim že izpadlim blokom na desni strani (levo zgoraj), izrazito spodkopana in štrleča plast peščenjaka na Debelem rtiču (desno zgoraj), izpadli bloki peščenjaka na vznožju (levo spodaj), spodkopana terasa stanovanjskega objekta pri Gradisu zahodno od Ankarana (desno spodaj).

#### 4.1.2.5 Padanje kamenja in skal

Procesi preperevanja, erozije in abrazije vodijo v nadaljnje procese, ki so lahko človeku nevarni in ogrožajo objekte. Med te spadajo različne vrste pobočnih premikanj, od katerih so v flišu predvsem pogosti padanje skal in kamenja. Proces **padanja kamenja in skal** je za ljudi izredno nevaren, ker gre za hipen dogodek, kamenje in skale pa padejo z velike višine. Na območju Debelega rtiča dosega klifi višine do nekaj deset metrov, njihov naklon pa je precej velik, tudi do pribl. 70°. Glede na naklon pobočja prihaja do različnih procesov, ki jih ločimo od največjega do najmanjšega naklona na (slika 4.7): cono izpadanja, padanje, odbijanje in kotaljenje. Po velikosti izpadlih blokov pa lahko govorimo o sproščanju preperine in zemljine, kamenju, nato večjih skalah oz. skalovju, ter največjih blokov (preglednica 4.1). Izpadajo predvsem bloki peščenjaka, ker mehkejša lapornata plasti hitreje preperevajo, posledično pa spodkopavajo vmesne debelejša plasti peščenjakov. Ker so te razpokane, prihaja do njihovih odlomov in izpadanja. Posebej nevarne so izrazito debele plasti kalkarenitov (apnenčastih turbiditov, *t.i. megaplasti*), ki se redkeje pojavljajo med plastmi laporovca in peščenjaka, saj dosega debeline do nekaj metrov. Na vznožju klifa se posledično kopičijo bloki izpadlih kamnin, večinoma so prisotni le peščenjaki, ker morje mehkejša laporovca bistveno prej erodira in odstrani.

Vegetacija lahko zadrži izpadle bloke, če so ti majhni, metrskih skal pa nikakor. Kjer je klif bolj položen in zaraščen, je gibanje in zadrževanje zato precej bolj varno.



Slika 4.7: Procesi padanja kamenja v odvisnosti od naklona pobočja.

Preglednica 4.1: Klasifikacija podornih pojavov (Đurović in sod. 2005).

Pojav	Prostornina	Premer, največja dimenzija
Sproščanje preperine in zemljine	< 100 cm <sup>3</sup>	< 6 cm
Odlom kamenja	100 cm <sup>3</sup> do 20 dm <sup>3</sup>	6 cm do 3 dm
Odlom skalovja	20 dm <sup>3</sup> do 2 m <sup>3</sup>	3 dm do 2 m
Odlom blokov	2 m <sup>3</sup> do 200 m <sup>3</sup>	2 m do 7 m
Skalni podor	200 m <sup>3</sup> do 1*10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	> 7 m
Gorski podor	> 1*10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	> 7 m

Za človeka je lahko usoden že padec manjšega kamenja, če ta pade z velike višine, zato je potrebno najbolj kritična območja zaščititi ali prepovedati dostop, kjer pa to ni možno, pa vsaj postaviti table z opozorili, da prihaja na območju do padanja kamenja in skal. Na nekaterih delih je postavljena zaščitna jeklena mreža, ki zadržuje izpadle skale, toda mreže marsikje niso vzdrževane, zato se za njimi kopiči material, ponekod pa so celo potrgane. Ti odseki so natančneje opisani v nadaljevanju. Opozoriti je potrebno tudi na neprimerne gradnje na klifu, saj so stanovanjski objekti oz. terase postavljeni zelo blizu zgornjega roba klifa, ponekod tako blizu, da prihaja že do erozije zgornjega dela klifa in posledično spodkopavanja kamnin pod teraso. Ti posegi so zelo nepremišljeni, ker so izvedeni brez zaščitnih gradbenih ukrepov in je jih potrebno sanirati.

#### 4.1.2.6 Zemeljski plazovi

Zemeljski plazovi so v slovenski Istri načeloma pogosti, saj večino ozemlja tvori fliš, ki intenzivno prepereva, poleg tega pa je večina terena nagnjena. Ozemlje je podvrženo plazanju, saj večina fliša sodi v kategorijo visoke do zelo visoke verjetnosti nastanka plazov.



Karta verjetnosti pojavljanja zemeljskih plazov (slika 2.8) prikazuje občutljivost terena za sprožitev zemeljskih plazov. Površino terena prekriva od 0,5 do 3 m debel preperinski pokrov, ki je nastal s preperevanjem flišnih kamnin. Sestavlja ga glinasto gruščnata zemljina, ki je na terenih, večinoma strmejših od 20°, podvržena plazenju, če so lokalne inženirskogeološke razmere neugodne in če so vremenske razmere kritične (dolgotrajne intenzivne padavine).

Na samem območju obale pa zemeljski plazovi niso tako pogosti. Razlog je predvsem v tem, da prihaja večinoma do drugih tipov porušitev, že opisanega spodjedanja plasti in padanja skal in kamenja. Tipični zemeljski plazovi so bili opaženi le na Debelem rtiču, kjer je predhodno prišlo do nastanka odlomnega roba in kasneje do precejšnjega posedanja, ki ga lahko obravnavamo že kot fazo plazenja. Podobni odlomni robovi so opazni tudi na vrhu klifa med Strunjanom in Izolo na območju Belih skal.



**Slika 4.8:** Levo zgoraj: odlomni rob na Debelem rtiču leta 2022. Desno zgoraj: ista lokacija z večjim premikom oz. posedanjem, območje proti obali je že splazelo. Levo spodaj: manjši zemeljski plaz na isti lokaciji.

## 4.2 Inženirskogeološke lastnosti ozemlja

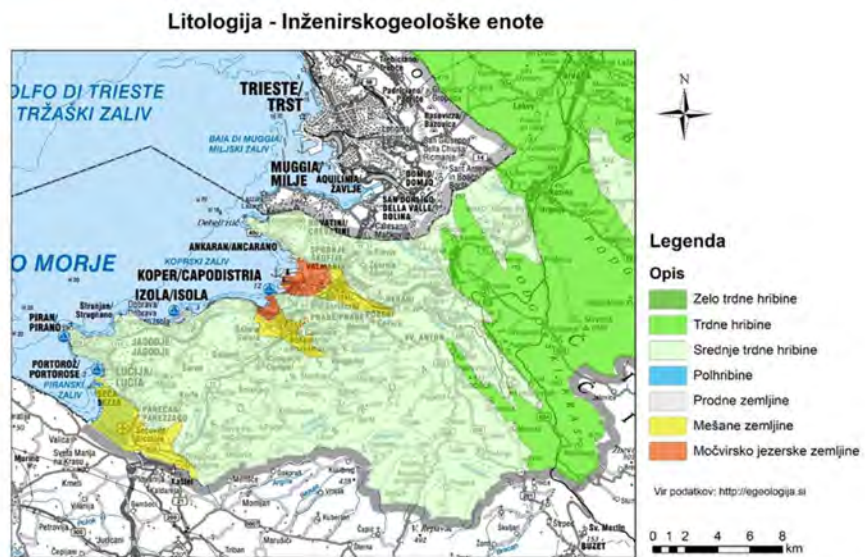
Kamnine in sedimente v Sloveniji delimo v sedem večjih skupin oz. inženirskogeoloških enot s skupnimi inženirskogeološkimi lastnostmi (preglednica 4.2). Od prve do zadnje njihova trdnost pada, različno pa so tudi dovzetne za erozijo, zemeljske plazove in podore. Fliš, ki tvori večino ozemlja slovenske Istre, spada v skupino *srednje trdnih hribin*, zato je precej dovzeten za procese erozije in zemeljske plazove, podori v njem pa so možni le ob strmih globokih umetnih vkopih in obalnih klifih. Drugače se na kraškem robu pojavljajo apnenci, ki sodijo v skupino *trdnih hribin*, za katero so značilni skalni podori, zemeljski plazovi pa ne. Med *mešane zemljine* uvrščamo ravninske nanose manjših rek, to so prodnati nanosi, ki vsebujejo večjo količino glin, v tej skupini pa so tudi priobalni morski sedimenti in sedimenti solin. V posebni skupini (*močvirsko jezerske zemljine*) so sedimenti jezer in močvirij, kjer je vpliv potresov na zgradbe in druge objekte velik, erozijskih procesov, plazov in podorov pa zaradi ravninskega sveta ni. Močvirni tereni se na območju slovenske Istre pojavljajo v zaledju Kopra na območju Škocjanskega zatoka in Luke Koper. Ostalih inženirskogeoloških enot, ki so navedene v preglednici 4.2 za celotno Slovenijo, na ozemlju slovenske Istre ni.

**Preglednica 4.2:** Povzetek lastnosti inženirskogeoloških (IG) enot v Sloveniji.

IG enota	Litologija	Dovzetnost za erozijo	Stabilnost terena in plazenje	Občutljivost na kamninske podore
<b>1. Zelo trdne hribine</b>	trde in kompaktne magmatske kamnine	erozijski procesi so zelo slabotni, erodira se samo tenak preperinski pokrov na območju hudourniških potokov	porušenja naravnega ravnotežja skorajda ni	kamninski podori so možni ob neugodnih razpokah pri zelo strmih do navpičnih stenah, navadno izvedenih s strani človeka
<b>2. Trdne hribine</b>	apnenci in dolomiti, ponekod z vložki klastičnih kamnin	erozijski procesi so zelo slabotni, ob močnih deževjih na strmih pobočjih lahko odnaša tenak preperinski pokrov	pojavi porušenega naravnega ravnotežja so zelo redki (le vršaji ali pobočni grušči)	kamninski podori so pogosti v alpskem svetu, kjer alpske doline obdajajo vertikalna pobočja, nevarnost obstaja tudi v kamnolomih in na umetnih brežinah, ki so strmo nagnjene
<b>3. Srednje trdne hribine</b>	različne klastične kamnine: peščenjaki, laporji, skrilavi laporovci (fliš) in njihove metamorfne različice, gnajsi in blestniki; andezitske, keratofirske in tufske kamnine	v kompaktnjših kamninah s tanjšim preperinskim pokrovom erozije skorajda ni, zelo močna pa je lahko na terenu iz lapornatih in skrilavih kamnin ali podobnih kamnin, ki globoko preperevajo	pogosti na kamninah, ki imajo debel preperinski pokrov	zelo redko so podori v metamorfnih kamninah, gnajsih in blestnikih ali v peščenjakih, večinoma so ob vertikalnih stenah, ki jih je izvedel človek
<b>4. Polhribine</b>	zbiti peski, slabo litificirani meljevci, glinavci in laporovci	erozija je zelo močna in sekundarno povzroča tudi plazenje višje ležečih mas	zelo pogosti zdrsi debelega preperinskega pokrova	podori niso možni
<b>5. Prodne zemljine</b>	prodi različne sestave (savski in dravski prodi) imajo pogosto velike samice, manjše reke pa odlagajo med prodnimi plastmi tudi plasti peska	erozija bregov nastopa ob vodotokih pri zelo visokih vodah	porušitev naravnega ravnotežja ni, razen neposredno ob strugah rek in potokov	podori niso možni
<b>6. Mešane zemljine</b>	glinasti, meljni in peščeni prodi, peski, melji in gline	erozija nastopa neposredno ob vodotokih, posebno v višje ležečih delih, kjer je teren strmo nagnjen ob močnejših padavinah	zelo redke porušitve naravnega ravnotežja	podori niso možni
<b>7. Močvirsko jezerske zemljine</b>	melji, gline z vložki plasti peska – rahlo do zelo rahlo odloženi	erozije ni	porušitev naravnega ravnotežja ni, nevarnost obstaja samo ob nepravilnih človeških posegih	podori niso možni

Na spodnji karti so inženirskogeološke (IG) enote, ki so prisotne na območju slovenske Istre, podrobneje prostorsko prikazane z dodanim opisom inženirskogeoloških lastnosti. Enoto »mešane zemljine« se v slovenski inženirsko-geološki klasifikaciji uvršča v razred *zemljine – prodi, peski, melji in gline*. Te kot rečni ali morski nanosi zapolnjujejo rečne doline, ki se stekajo v Koprski, Strunjanski in Piranski zaliv. V bližini morske obale so namreč reke in potoki zaradi zelo položnega naklona izgubili svojo transportno moč prenašanja sedimentov. Tam so se zato odlagali le drobnozrnati sedimenti, najpogosteje peski. Zaradi nihanja morske gladine v zadnjem kvartarnem geološkem obdobju so se med rečnimi sedimenti odlagale tudi rahlo odložene plasti morskih sedimentov, sestavljenih iz peskov

in meljev. Dlje od obale, kjer je teren gričevnat, nakloni strug pa so strmejši, pa so vodotoki lahko premeščali tudi bolj grob material, ki se je odložil v obliki glinasto-peščenih prodov.



Slika 4.9: Inženirskogeološke enote v slovenski Istri.



## 5 PREGLED NEKATERIH PRETEKLIH POPLAVNIH DOGODKOV S PODATKI IN OCENAMI KOLIČIN ERODIRANEGA, TRANSPORTIRANEGA IN ODLOŽENEGA MATERIALA

Podrobnih, sistematično zbranih podatkov o količinah erodiranega in odloženega materiala v posameznih obsežnejših poplavnih dogodkih oz. lokalnih hudourniških poplavah na območju Slovenije ni veliko na razpolago. Delno je to posledica samih naravnih danosti in značilnosti hudourniških poplavnih dogodkov. Obstoječe karte, namenjene opozarjanju pred procesi, povezanimi z vodno erozijo, ki se na nivoju države uporabljajo danes, so večinoma informativnega značaja. Tovrstne karte so npr. Opozorilna karta poplav (MNVP, DRSV), Opozorilna karta erozije (IzVRS in PUH, 2011), Karta verjetnosti pojavljanja plazov (GeoZS, 2005), Karta lavinske nevarnosti (GIAM ZRC SAZU). Zelo dober vpogled v preteklo erozijsko dogajanje, vezano na pobočne masne premike ter nekatere rezultate izvedenih analiz ploskovne in linijske analize ponuja aplikacija *Geohazard* (<https://www.e-plaz.si/>). Večina kart je izdelanih v sorazmerno majhnem merilu, večino jih najdemo v kartografskih prilogah Načrtov upravljanja voda za vodni območji Donave in Jadranskega morja (<https://www.gov.si/teme/nacrt-upravljanja-voda-na-vodnih-obmocjih/>; kartografska priloga 55: Erozijska območja – opozorilna karta erozije). Erozijska problematika je na več mestih obravnavana v zakonodaji s področja gospodarjenja z gozdovi - v Zakonu o gozdovih ter v različnih podzakonskih aktih in operativnih pravilnikih. Podrobnejše opozorilne karte nevarnosti erozije so bile izdelane za območja posameznih občin (npr. Durjava in sod., 2012). Nekateri izmed zgoraj omenjenih podatkovnih slojev so dosegljivi na Atlasu voda.

Podatki o erozijskem dogajanju vzdolž rečne mreže v posameznih padavinskih dogodkih se zbirajo s strani koncesionarjev na vodotokih, pri čemer se zdi, da je bila v preteklosti vloga koncesionarjev v tej smeri precej bolj jasna. Poleg tega smo v Sloveniji pogosto priča številnim poškodbam infrastrukture in raznih objektov v bližini rečnih strug, kar je neposredna posledica procesov rečne erozije vzdolž strug vodotokov.

V pregledu problematike urejanja hudourniških območij, ki predstavljajo glavni vir plavin za nadaljnje premeščanje vzdolž rečne mreže in kjer so procesi rečne erozije najintenzivnejši, je bila v 90. letih opravljena ocena, da so vidni erozijski pojavi v Sloveniji prisotni na skoraj 9.000 km<sup>2</sup> oz. 44 % površine. Za površino pribl. 4.000 km<sup>2</sup> (1/5 Slovenije) je bilo ocenjeno, da se na teh površinah razprostirajo izrazito hudourniška prispevna območja, na teh območjih je bilo ocenjenih pribl. 30.000 ha močnejše erodiranih površin, od katerih približno eno tretjino obsegajo odprta žarišča globinske ali bočne erozije ter udori in usadi. Hudourniška območja brazda okrog 1.700 km glavnih hudourniških strug in nad 4.000 km njihovih pritokov, pri čemer so upoštevane le nad 0,5 km dolge, jasno zaznavne struge. Gostota hidrografske mreže v hudourniških predelih znaša povprečno 1,6 km/km<sup>2</sup> (maksimalno celo 3,5 km/km<sup>2</sup>), to pa je več kot trikrat toliko kot v ravninskih predelih, kjer znaša gostota pribl. 0,5 km/km<sup>2</sup> (Horvat in Zemljič, 1991). Nadalje je bilo ocenjeno, da se znotraj hudourniških območij nahaja 300 km<sup>2</sup> močnejše erodiranih površin, od katerih približno eno tretjino ali skoraj 10.000 ha zavzemajo odprta žarišča globinske ali bočne erozije ter udori in usadi. Vsi omenjeni erozijski procesi sproščajo na celotnem območju Slovenije vsako leto glede na različne ocene okrog 5,2–5,3 milijona m<sup>3</sup> erozijskega detritusa, kar predstavlja specifično sproščanje nad 260 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>. Upoštevajoč njegovo povprečno zrnavost, po kateri je nad polovico teh količin drobnejših od 0,6 mm in jih torej lahko obravnavamo kot rodovitna tla, je ta vsako leto odplavljena količina enakovredna 1.300 ha izgubljenih rodovitnih zemljišč debeline 20 cm. Opozoriti velja, da so zgornje ocene zgolj povprečje za celotno površino, medtem ko znašajo ocenjene maksimalne količine sproščenega materiala na soški strani Julijcev približno 2.800 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>/leto, v zahodnih Karavankah pa skoraj 3.000 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>/leto (Horvat in Zemljič, 1991).

Kot je bilo podrobneje pojasnjeno v poglavju 2, sproščene količine niso v celoti odplavljene v hidrografske mreže. Ocenjuje se, da jih okoli 60 % zastaja in začasno obleži že v erozijskih in hudourniških grapah, na pobočjih, meliščih in sipinah ob vznožju gorskih ostenj, ter na hudourniških vršajih. Od tod jih srednje in nekoliko višje vode odplavljajo postopoma ali pa čakajo na nenadne hudourniške poplave. Taki nenadni sporadični hudourniški izbruhi lahko povzročijo škode, ki tudi tisočkratno presežejo povprečje letnih škod na posameznem območju, kar se je pokazalo ob zadnjem ekstremnem poplavnem dogodku avgusta 2023. Od preostalih približno 40 % erozijskega drobirja, tj. 2 milijona m<sup>3</sup>/leto, ki jih neurne vode odplavljajo po hudourniških strugah prvega reda v sprejemne reke Sočo, Savo in Dravo, se približno četrtnina odlaga in zaustavlja že na prehodih iz hudournikov v reke ter v zgornjih tokih rek, preostali poldrugi milijon m<sup>3</sup> pa vpliva predvsem na ekonomsko življenjsko dobo umetnih in naravnih vodnih zadrževalnikov (Mikoš, 2002).

Kot poseben problem so bila prepoznana območja, kjer prihaja do razmakanja in plazenja zemljin ter sprožanja usadov in zemeljskih plazov, ki so večinoma povezani s hidromorfološki procesi. Zaradi izrazitega povečanja pokrovnosti tal Slovenije z gozdom so zelo verjetno razsežnosti erozijskih procesov v povirnih delih manjše od ocen, narejenih v 90-tih letih prejšnjega stoletja. Hkrati pa je poplavni dogodek avgusta 2023 razkril zelo velik potencial za intenzivno sproščanje erodiranega materiala v hudourniških območjih, njegovo nadaljnje premeščanje vzdolž rečne mreže in velik vpliv teh procesov na hidromorfološko dogajanje in procese rečne erozije vzdolž strug vodotokov.

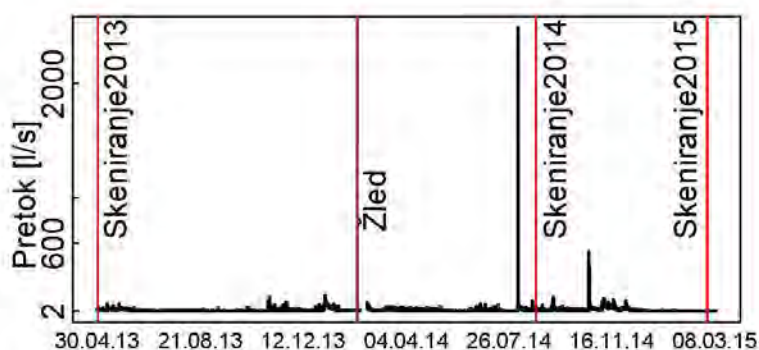
V nadaljevanju podajamo kratek pregled nad nekaterimi zabeleženimi poplavnimi dogodki, v katerih so bili zaznani zelo intenzivni procesi rečne erozije, za nekatere izmed primerov so bile opravljene analize količin sproščenega in transportiranega materiala. Podrobnejše rezultate analize procesov rečne erozije vzdolž nekaterih odsekov vodotoka v poplavnem dogodku avgusta 2023 predstavljamo v poglavjih 9 in 10.

## 5.1 Ekstremni padavinski dogodek avgusta 2014 v povirju reke Gradaščice

V preteklosti je bilo opravljenih nekaj analiz erozijskega dogajanja v povirnih delih reke Gradaščice, ki so zelo zanimivi tako z vidika velike odzivnosti povirnega, izrazito hudourniškega prispevnega območja na padavinske dogodke kot tudi intenzivnosti spremljajočih erozijskih procesov. Obstaja nekaj sicer dokaj skopih zapisov o preteklih poplavnih dogodkih na tem območju, ki so jih spremljali intenzivni erozijski procesi. Eden najboljšežnejših je bila hudourniška poplava leta 1926, ki naj bi vzdolž struge Mačkovega grabna pustila pravo razdejanje. Po nekaterih podatkih naj bi takrat v 24 urah padlo več kot 300 mm padavin, uničene je bilo veliko cestne infrastrukture, sprožilo se je veliko število zemeljskih plazov, poročali so tudi o nekaj smrtnih žrtvah (Kolbezen, 1992). Osnovni namen izvedbe detajlnih terenskih hidroloških meritev na manjših prispevnih območjih, kakršni sta porečji hudournikov Kuzlovec in Mačkov graben (dveh eksperimentalnih porečij, ki ju vzdržuje Katedra za splošno hidrotehniko, UL FGG), je pridobiti vpogled v časovno in prostorsko dinamiko tvorbe padavinskega odtoka in sproščanja ter premeščanja plavin, kar je z vidika izvajanja terenskih meritev obvladljivo zgolj na manjših območjih.

Ekstremni padavinski dogodek, ki se je zgodil v noči s 4. na 5. avgust 2014, je povzročil ekstremne hidrološke in erozijske razmere na širšem območju Male Božne. Disdrometer, postavljen na Črnem Vrhu nad Polhovim Gradcem, je v približno desetih urah izmeril 185 mm padavin, pri čemer je največja minutna intenziteta padavin presegala 288 mm/h. Glede na statistično analizo ekstremnih padavin (ARSO, 2009) lahko povratno dobo tega padavinskega dogodka ocenimo na 100–250 let. Izmerjene količine padavin na nekaterih drugih merilnih območjih, ki se nahajajo v okolici hudournika Kuzlovec,

so sicer bile nekoliko nižje (približno 140 mm) (Bezak in sod., 2017), kar kaže na izrazito lokalni ekstremni padavinski dogodek. Padavinski dogodek je imel tudi veliko erozivno moč, ki je znašala v mesecu avgustu leta 2014 skoraj  $3.000 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$  (Ciaccioni in sod., 2016), kar je primerljivo z vrednostmi dejavnika erozivnosti padavin (R), ki jih je za širše območje postaje Črni Vrh nad Polhovim Gradcem naračunal Petan (2010). Zaradi velike količine padavin v kratkem časovnem obdobju je hitro narasel pretok hudournika Kuzlovec (slika 5.1). Poleg tega je bil ta dogodek razvrščen kot nevaren glede na empirične krivulje intenziteta-trajanje padavin, ki se pogosto uporabljajo za napovedovanje ekstremnih dogodkov, kot so drobirski tokovi ali plitvi zemeljski plazovi (Bezak in sod., 2017). Vse to se je odrazilo v intenzivnosti erozijskih procesov na območju hudournika Kuzlovec. Na intenziteto erozijskih procesov na obravnavanem povirnem območju reke Božne ter velike količine premeščenega suspendiranega materiala, ki je zaradi kamninske osnove izrazito rdeče barve, je kazala tudi obarvanost reke Gradaščice, reke Ljubljanice ter tudi reke Save na odsekih dolvodno od sotočij. Sosledje dogajanja z vrednostmi pretokov manjšega hudournika Kuzlovec je prikazano na sliki 5.1.



**Slika 5.1:** Merjene vrednosti pretokov (določene na podlagi pretočne krivulje) na iztoku iz hudourniškega območja Kuzlovca z označenimi obdobji izvedbe laserskih skeniranj terena in žledoloma.

Ekstremni padavinski dogodek je v povirju Gradaščice povzročil proženje več kot 50 plitvih zemeljskih plazov. Na širšem območju Polhograjskih dolomitov je bilo poškodovanih približno 50 kilometrov cest, podrti so bili štirje mostovi, poškodovanih je bilo tudi deset stanovanjskih hiš in dva industrijska objekta. Kljub temu da je šlo v primeru omenjenega padavinskega dogodka za prostorsko izrazito omejen obseg, so bila območja poplavljanja skoncentrirana na sorazmerno ozke pasove vzdolž hudourniških vodotokov, škoda je preseгла pol milijona evrov. Terenski ogled razmer po ekstremnem avgustovskem dogodku je razkril številne erozijsko-sedimentacijske procese. Poleg že omenjenih plitvih zemeljskih plazov smo opazili manjše zdrse zemljine, manjše podore, nastanek žlebične erozije in intenzivno jarkovno erozijo. Slika 5.2 prikazuje situacijo v strugi hudournika Kuzlovec pred in po ekstremnem padavinskem dogodku, ki se je zgodil avgusta 2014. Že na podlagi slike lahko opazimo velike spremembe v strugi hudournika, kot so premik in poglobitev struge hudournika, spodjedene brežine, odložene večje skale in preostali drobirski material vzdolž struge, odplavljena zapadla drevesna debela itd. Pomembno vlogo pri rečnih erozijskih procesih (eroziji brežin in poškodbah številnih premostitev) je imelo tudi lesno plavje, ki se je zgodilo v odprtine premostitvenih objektov in povzročilo njihove poškodbe ter v nekaterih primerih tudi porušitev (slika 5.3 desno). Velika količina plavja, ki je bilo odplavljeno v struge vodotokov, je predvsem posledica žledoloma februarja 2014. Do odlaganja velike količine premeščenega materiala, ki ga je voda premeščala v obliki rinjenih plavin in suspendiranih snovi (Bezak in sod. 2017), je prišlo večinoma v lokalnih depresijah ter odsekih z manjšim naklonom dna struge. Na sliki 5.3 (levo) so vidni številni poškodovani (polomljeni) drevesni deli, ki so

predstavljali velik vir plavja, ki ga je hudournik odplavil dolvodno. Povprečni naklon dna struge hudournika Kuzlovec je približno 22 %, potek struge hudournika Kuzlovec ter naklon dna ni reguliran s prečnimi hudourniški objekti, edina hudourniška (zaplavna) pregrada se nahaja cca. 50 m gorvodno od ceste proti Selu nad Polhovim Gradcem. Na prispevnem območju Kuzlovca je prevladujoča raba tal gozd, ki pokriva preko 90 % površine porečja.



**Slika 5.2:** Situacija v hudourniku Kuzlovec pred (levo) in po (desno) ekstremnem padavinskem dogodku, ki se je zgodil avgusta 2014.

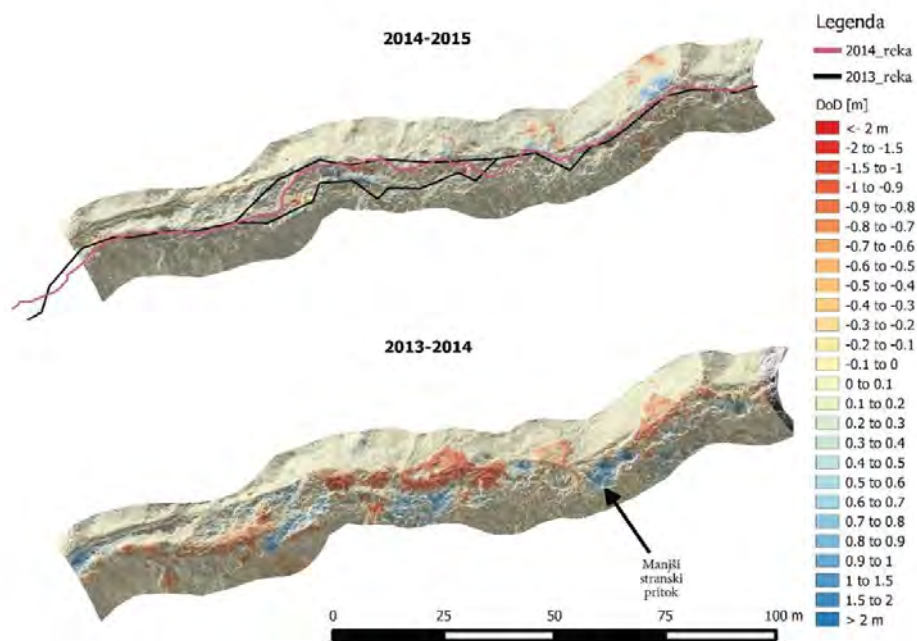


**Slika 5.3:** Zaradi žledu poškodovana drevesa na območju hudournika Kuzlovec, ki so predstavljala potencialni dotok plavja za reko Gradaščico (levo). Porušen most na cesti proti Selu nad Polhovim Gradcem zaradi zagozdenega plavja ob mostno odprtino (desno).

Na podlagi terestričnega laserskega skeniranja (TLS), ki je bilo izvedeno v letih 2013, 2014 in 2015, smo lahko z izdelanimi digitalnimi modeli reliefa (DMR) izračunali razlike med posameznimi leti ter tako ovrednotili in kvantificirali vpliv ekstremnega padavinskega dogodka na erozijske procese. Slika 5.4 prikazuje razlike med DMR, ki so bili določeni na podlagi omenjenih snemanj. Podrobnosti samega postopka izračuna so opisane v Bezak in sod. (2017). Ugotovili smo, da so razlike pred in po dogodku (DMR 2013-2014) veliko večje kot razlike med DMR 2014-2015. Tako se je v obdobju med 2013 in 2014 z manjšega skeniranega območja (približno 200 metrski odsek, prikazan na sliki 5.4) premestilo cca. 450 m<sup>3</sup> materiala, v obdobju po dogodku 2014 in v letu 2015 pa približno 10-krat manj, torej približno 40 m<sup>3</sup> materiala. Na sliki 5.4 so lepo razvidna območja vzdolž glavne struge, kjer je prišlo do intenzivnih procesov globinske erozije, lokalno se je struga hudournika Kuzlovec poglobila tudi za več kot 2 m. Na posameznih odsekih so bili z dna hudourniške struge sprani skoraj vsi aluvialni hudourniški nanosi,



najgloblji predeli dna struge (vzdolž globočnice) so na številnih odsekih dosegli matično skalnato podlago.



**Slika 5.4:** Razlika med DMR v letu 2013 in 2014 (spodaj) in letu 2014-2015 (zgoraj) z označeno lokacijo poteka hudourniške struge pred (2013\_reka) in po ekstremnem dogodku (2014\_reka). Rdeče celice označujejo območja poglobitev, modre celice označujejo celice, kjer je prišlo do odlaganja drobirskega materiala.

Vzdolž obravnavanega odseka so razvidni tudi predeli, kjer je prišlo do stranskih nanosov drobirskega materiala v glavno strugo hudournika Kuzlovec. Na obravnavanem odseku v strugo dotekajo številni stranski dotoki (erozijski jarki), ki so večino leta suhi. V obdobjih padavin se vzdolž teh stranskih dotokov padavinski odtok zelo hitro skoncentrira, pod vplivom jarkovne erozije se v glavni strugi odlaga premeščen material, ki se v odvisnosti od pretočnih razmer v glavni strugi premešča dolvodno. Debelina slojev materiala, naplavljenega iz stranskih pritokov, je lokalno na obravnavanem odseku presešla dva m. Poleg tega razlike v DMR razkrivajo, da premeščanje plavin vzdolž topografsko kompleksnih odsekov hudourniških strug, kakršen je obravnavani odsek hudournika Kuzlovec, ne poteka zvezno, ampak je močno odvisno od lokalnih razmer (npr. dotokov plavin s stranskih pritokov, globine matične skalnate podlage, spremenljivosti geometrije hudourniške struge).

Poplavni dogodek, kot se je zgodil avgusta 2014, je zgolj eden od številnih močno lokaliziranih hudourniških izbruhov, kakršni se pojavljajo v številnih predelih Slovenije. K veliki intenziteti erozijskih procesov je pripomogel splet okoliščin. Prisotne so bile ogromne količine zaplavnega lesa, obrežna drevesna vegetacija je bila poškodovana, zaradi poškodovanega vegetacijskega pokrova in velike intenzitete ter količine padavin so se posledično pojavila številna majhna erozijska žarišča.

Jasno se je pokazala problematika velikih količin zaplavnega lesa vzdolž strug vodotokov ter nevdzdrževanja hudourniških objektov, predvsem rednega praznjenja zaplavnih prostorov za hudourniški pregradami. V konkretnem primeru pregrada, umeščena v strugo Kuzlovca, ne more opravljati svoje funkcije, saj razen lokalno zmanjšanega padca struge gorvodno od pregrade bistveno



ne vpliva na zastajanje erodiranega materiala, ki se premešča vzdolž struge proti dolvodnim območjem in ogroža cestno infrastrukturo.

Zgoraj opisani rezultati kažejo, da sta v dinamiki procesov, ki sestavljajo erozijsko-sedimentacijski krog, prisotna velika časovna in tudi prostorska spremenljivost, kar pomeni, da lahko samo en kratkotrajen ekstremni padavinski dogodek povzroči premeščanje večjih količin drobnozrnatega ter grobozrnatega materiala, ki bi se sicer na istem območju lahko sprostil šele v veliko daljšem obdobju. Do podobnih ugotovitev so na podlagi meritev prišli tudi raziskovalci iz drugih delov sveta (npr. Lenzi in sod, 2004; Lenzi in Marchi, 2000). Zgolj kot zanimivost lahko navedemo, da smo na podlagi meritev koncentracij lebdečih plavin, ki jih na Katedri za splošno hidrotehniko UL FGG izvajamo v okviru eksperimentalnih hidroloških porečij, izračunali, da se je med poplavami oktobra 2014, ko so bila prizadeta tudi dolvodna urbana območja v Ljubljani, skozi prečni profil vodomerne postaje Dvor premestilo približno 12.000 ton materiala v obliki lebdečih plavin.

## 5.2 Poplavljanje reke Drave novembra 2012

Poplavna območja vzdolž struge reke Drave so z vidika poplavne in erozijske nevarnosti izjemno problematična. Po ocenah Uprave RS za zaščito in reševanje (URSZR) naj bi poplave vzdolž reke Drave v obdobju 2012–2018 povzročile okoli 100 milijonov EUR škode. Najbolj uničujoč poplavni dogodek se je zgodil novembra 2012, ko je Drava poplavljala na celotnem toku od Dravograda do državne meje s Hrvaško. Visokovodni val je povzročil poplavljanje stanovanjskih zaselkov, kmetijskih zemljišč ter cestne in vodne infrastrukture. Visoke vode so povzročile veliko škode na vodni in hidroenergetski infrastrukturi. Na brežinah so nastale obsežne zajede, v strugi in na retenzijskih površinah pa so se odložile ogromne količine naplavin (Klaneček, 2013). Na odseku od Maribora do Ptuja je bilo poplavljenih kar nekaj naselij na obeh bregovih. Najhujše so bile razmere na odseku od Maribora do Starš, kjer so bili poplavljeni večji deli naselij Malečnik, Zrkovci, Dogoš, Duplek in Dvorjane. Z vidika rečnih erozijskih procesov je zanimiva predvsem erodirana desna brežina Drave ob odvodnem kanalu HE Zlatoličje, zaradi česar je poplavna voda vdrla v odvodni kanal. Poplavni tok reke Drave je na območju HE Formin predril desnobrežni nasip odvodnega kanala na dveh lokacijah. Obsežnejši preboj desnega nasipa odvodnega kanala HE Formin je prikazan na sliki 5.5. Vodni tok se je skoncentriral v novonastali erodirani strugi v skupni dolžini približno 750 m, širina erodirane struge je bila približno 100 m, na lokaciji preboja v odvodni kanal HE Formin pa 140m. Pod vplivom globinske erozije se je na območju novonastale erodirane struge teren lokalno znižal tudi do 5 m. Poplavne vode, ki so vdrla v odvodni kanal HE Formin, so erodirale levo brežino odvodnega kanala in se v dolžini približno 270 m bočno zarezale v do 60 m široko erozijsko zajedo pod vtokom razbremenilnega kanala Pesnice, površina erozijske zajede je bila ocenjena na 1,5 ha. Ocenjena površina območja procesov rečne erozije je bila ocenjena na 7 ha, od tega je približno 4 ha zasedala novonastala erodirana struga. Ob preboju v odvodni kanal je vodni tok nanesele velike količine plavin, oblikoval se je obsežen nanos plavin (vršaj) (slika 5.6). Vzdolž obeh brežin odvodnega kanala je bila porušena diafragma in tesnilna zavesa, katere funkcija je preprečitev dreniranja podzemne vode v odvodni kanal (Korpar in sod., 2013). Zaradi velike hitrosti in posledične erozije je z vtokom poplavne vode v odvodni kanal vneslo pribl. 300.000 m<sup>3</sup> prodnega materiala skupaj z drevjem, štori in vejevjem. Posledica vdora in vnosa materiala je bila zajezitev v odvodnem kanalu gorvodno od razbremenilnika Pesnice in s tem dvig spodnje vode HE Formin, kar je povzročilo zalitje strojnice hidroelektrane. V manjšem obsegu se je porušila desna brežina odvodnega kanala na odseku dolvodno proti meji s Hrvaško s posledičnim vnosom gramoznega materiala v kanal. Poleg dveh večjih prebojev je bilo na območju odvodnega kanala evidentirano tudi devet večjih poškodb brežin na obeh straneh kanala. Skupna površina območja erozijske zajede in

nanosov plavin v odvodni kanal je bila ocenjena na 5 ha, skupna površina območij, na katerih so se pojavili intenzivni procesi rečne erozije, je bila ocenjena na okoli 12 ha (Brenčič in sod., 2013).



**Slika 5.5:** Poškodbe brežin na odseku preboja reke Drave v odvodni kanal HE Formin (Vir: Mensuras, d. o. o., ARSO).



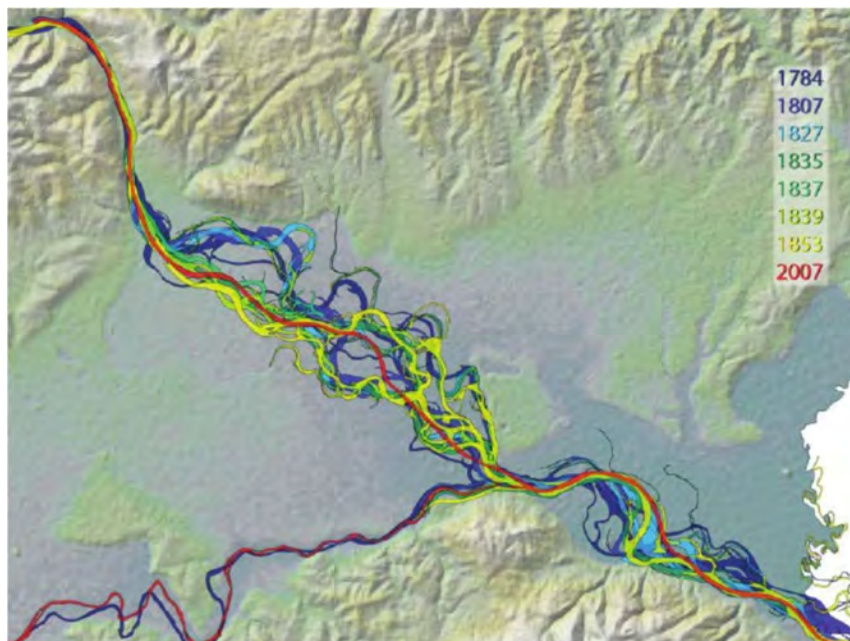
**Slika 5.6:** Odložene plavine v odvodnem kanalu HE Formin (Vir: Mensuras)

Na odseku, kjer so visoke vode Drave naredile veliko poškodbo na odvodnem kanalu Formin, je voda iskala svoj prostor, ki ga je v preteklosti (pred izgradnjo odvodnega kanala) že imela. Struga reke Drave je bila pred izgradnjo elektrarn Zlatoličje in Formin širša, saj je imela večje stalne pretoke in ni bila v sušnih obdobjih odvisna od ekološko sprejemljivih pretokov. Posledično se zdaj hitreje zarašča in pretočnost se intenzivno zmanjšuje. Avtorji zgoraj omenjenih člankov ugotavljajo, da poplavni dogodki v zadnjih letih stanje le še poslabšujejo.

### **5.3 Rečna erozije vzdolž struge reke Save s povzetkom bilance erodiranega in odloženega materiala vzdolž struge reke Save**

Reka Sava ima kljub velikosti prispevnega območja in dolžini poteka na območju Slovenije vzdolž večine svoje struge še vedno prevladujoč hudourniški značaj, ki se odraža v veliki in hitri spremenljivosti pretočnih razmer, velikih pretočnih hitrostih v glavni strugi ter posledično intenzivnih procesih rečne

erozije. To dokazuje primerjava potekov trase struge reke Save na odseku dolvodno od Krškega proti meji s Hrvaško (slika 5.7) med leti 1784 in 2007. Razvidna je velika spremenljivost tlorisnih potekov struge, ki je nedvomno posledica intenzivnega erozijskega dogajanja vzdolž struge Save.



**Slika 5.7:** Primerjava tlorisnih potekov struge reke Save med Krškim in sedanjo mejo z Republiko Hrvaško v obdobju 1784–2007 (Vir: ZVKDS, 2008).

Kot primer lokalno intenzivnih procesov rečne erozije v strugi Save, ki je sorazmerno dobro dokumentiran, bi lahko izpostavili erozijsko dogajanje dolvodno od avtocestnega mostu pri Šentjakobu. Na sliki 5.8 je prikazano sosledje hidromorfološkega dogajanja od leta 2002 do leta 2013 na seriji Google Earth posnetkov. Dolvodno od večstopenjske hrapave drče se ob pojavu nestabilnega vodnega skoka pojavljajo erozijske zajede v obe brežini, ki so bile v preteklosti bolj ali manj uspešno sanirane, kar je tudi vplivalo na kasnejši razvoj in obseg procesov rečne erozije. V poplavnem dogodku novembra leta 2012 je vzdolž desne brežine prišlo do zelo obsežne erozijske zajede v dolžini približno 500 m in površini približno 2 ha, ki bi v primeru napredovanja erozijske zajede gorvodno lahko ogrozila tudi most avtoceste in ostalo spremljajočo prometno infrastrukturo. Erozijska zajeda se je sanirala z novim obrežnim zavarovanjem, ki se je zaključilo približno 100 m dolvodno od spodnjega dela hrapave drče.





**Slika 5.8:** Sosledje hidromorfološkega dogajanja na odseku struge Save dolvodno od AC mostu pri Šentjakobu.

Naprej dolvodno je desna brežina neutrjena, v poplavnem dogodku avgusta 2023 se je Sava dodatno zajedla v desno brežino, struga se je razširila, širina erozijske zajede znaša do 20 m (slika 5.9), v sredini struge se je izoblikovalo sredinsko prodišče (otok), ki se je v zadnjem letu še dodatno razširilo. Velike količine erodiranega materiala so se odložile dolvodno vzdolž notranje desne brežine rečnega zavoja.



**Slika 5.9:** Odsek struge Save dolvodno od AC mostu pri Šentjakobu pred (zgoraj) in po (spodaj) poplavnem dogodku avgusta 2023.

Zgoraj opisani primer kaže na intenzivne procese erozije brežin predvsem na odsekih, kjer je brežina struge nezaščiten oz. so obrežna zavarovanja poškodovana v povezavi s kompleksnimi hidravličnimi razmerami (vodnim skokom) dolvodno od prečnih hidrotehničnih objektov.

V pregledu, predstavljenem v nadaljevanju, se bomo osredotočili predvsem na bilanco erodiranega in odloženega materiala s povirnih območij reke Save, ki so bila v preteklosti analizirana v posameznih študijah. Namen tovrstnega pregleda je podati vpogled v erozijsko-sedimentacijski krog z vidika procesov sproščanja, premeščanja in odlaganja plavin na obravnavanem porečju. Nazadnje je bila za to območje v letu 2022 izdelana analiza v okviru Strategije odvzema naplavin na porečju reke Save (DRSV, 2022). Predvsem povirni del porečja Save nedvomno sodi med območja, kjer se pričakujejo intenzivni erozijski procesi, katerih posledica so velike količine sproščenega materiala iz erozijskih žarišč, ki se tvorijo ali reaktivirajo ob obsežnejših padavinskih dogodkih. Poleg tega bi lahko za obravnavano območje (in v splošnem še za številna druga povirna območja v Sloveniji) ugotovili, da je zaradi gostote in razvitosti rečne mreže, povezanost med erozijskimi žarišči in rečno mrežo dobra, kar vpliva na velik dotok sproščenih sedimentov v rečno mrežo ter njihovo nadaljnje premeščanje vzdolž rečnih strug v času visokovodnih dogodkov. Intenzivno premeščanje plavin vzdolž rečne mreže pa nadalje igra pomembno vlogo tudi pri obsegu razvitosti procesov rečne erozije. To dokazujejo razni, sicer sorazmerno redki podatki iz hudourničarskih evidenc: hudournik Suhelj (levi pritok Save Dolinke v Podkorenu) je leta 1988 v nekaj dneh naplaval preko pol milijona m<sup>3</sup> glinastomeljastih in mešanih nanosov; hudournik Hladnik (levi pritok Save Dolinke v Martuljku) je leta 1967 v 34 urah naplaval 90.000 m<sup>3</sup> peska, kar je enako štirikratni letni transportni zmogljivosti Save v preseku pri Jesenicah, ki ima približno dvajsetkrat večji srednji pretok vode.

Da bi dobili vpogled v povprečno dogajanje na določenem prispevnem območju z vidika procesov sproščanja in premeščanja erodiranega materiala, si lahko pomagamo s podatki o letnih odvzemih naplavin na posameznih odsekih vodotokov. Čeprav tovrstni podatki ne omogočajo podrobnega vpogleda v erodiran, sproščen, premeščen in odložen material v posameznih poplavnih dogodkih, pa nudijo vsaj grob vpogled v povprečne količine materiala, ki se odlaga vzdolž rečne mreže in znotraj posameznih vodnogospodarskih objektov (npr. prodnih zadrževalnikov). Glavna odzemna mesta na območju zgornje Save, kjer se z vidika procesov rečne erozije pričakuje najintenzivnejše erozijsko dogajanje, predstavljajo prodni zadrževalnik Hrušica ter Velika Pišnica na Savi Dolinki, prodišče pri kampu Danica na Savi Bohinjki ter prodni zadrževalnik Majdičev log na Savi. Na Poljanski ter Selški Sori so odzemna mesta vezana predvsem na hudourniške zaplavne pregrade. Območje Save Dolinke je zaradi svojih alpskih značilnosti prepoznano kot največji vir rinjenih plavin na porečju reke Save. V DRSV, 2022) je bila podana ocena, da znaša povprečni letni odzem (analizirano obdobje 2014–2018) iz porečja reke Save 126.000 m<sup>3</sup>. Ta podatek zajema vse odvzeme naplavin za vzdrževanje pretočnosti strug, odvzeme za gospodarsko izkoriščanje naplavin kot čiščenje zaplavnih objektov (zadrževalniki, prodne pregrade) ter odvzeme na področju koncesij za energetska izkoriščanje vodotokov. Iz podatkov o rednih odvzemih plavin iz prodnega zadrževalnika Hrušica ter praznjenju akumulacije Javornik na Savi Dolinki je razvidno, da znaša skupna bilanca odvzemov plavin v obdobju 2014–2018 povprečno približno 20.000 m<sup>3</sup>/leto, podobno oceno je za to lokacijo (Sava-Jesenice) podal Mikoš (2000). Ocenjuje se, da gre za najbolj verodostojno oceno količine transporta rinjenih plavin na porečju Save Dolinke.

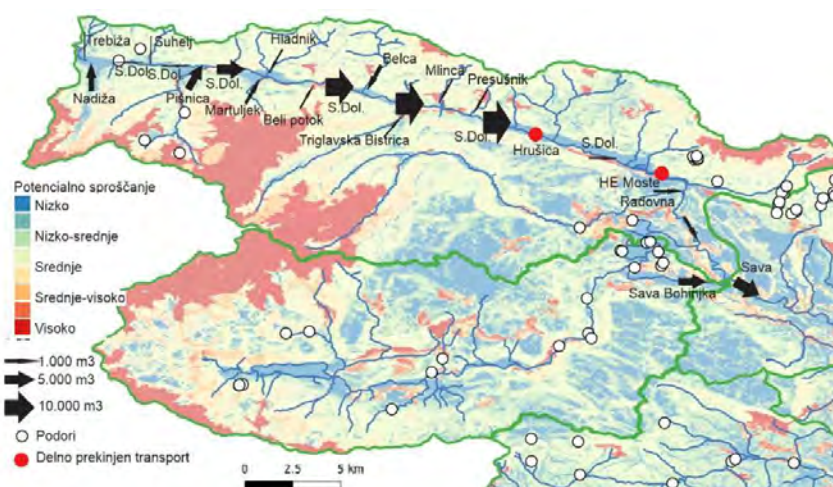
Nadalje je treba poudariti, da so običajno bilance transporta rinjenih in lebdečih plavin v veliki meri pripravljene na ocenah in preprostih bilančnih izračunih, razpoložljivih v strokovni literaturi, saj je dejanskih terenskih podatkov (rezultatov meritev prodonosnosti in kalnosti), na podlagi katerih bi lahko naredili bolj zanesljive ocene transporta plavin, običajno premalo. Kot je že bilo omenjeno v prejšnjih poglavjih, so meritve lebdečih plavin v Sloveniji omejene na le nekaj merilnih mest ARSO-a. Neposrednih meritev prodonosnosti (premeščanja rinjenih plavin) na območju Slovenije dandanes praktično ni, kar pomeni, da so vsakršne ocene potencialnega erodiranega, transportiranega in odloženega materiala ter ocene premestitvene zmogljivosti vodotokov podvržene veliki negotovosti. V nadaljevanju podajamo pregled nekaterih ocen sproščenega in erodiranega materiala za posamezna



območja porečja Save Dolinke. Za hudournik Hladnik sta Sodnik in Mikoš (2006) podala ocenjeno vrednost transporta plavin okrog 10.000 m<sup>3</sup>, medtem ko je za Martuljek ta številka približno dvakrat večja. Za prispevno območje Nadiže je bila narejena ocena (VGI, 1995), da je povprečno letno sproščanje erozijskega drobirja okrog 43.000 m<sup>3</sup> in da je samo odplavljanje minimalno. Za erozijsko dogajanje na prispevnem območju Nadiže je pomembno dejstvo, da odtok ni površinsko povezan z izvorom Save Dolinke pri Zelencih, kar kaže na pomembnost upoštevanja metod za oceno povezanosti in dejanskega dotoka plavin v rečno mrežo, opisanih v poglavju 2.3. Z vidika sproščanja, odplavljanja erodiranega materiala in dinamike erozijskih procesov v samih strugah vodotokov, je zanimivo prispevno območje hudournika Pišnica, ki je erozijsko zelo aktivno z zabeleženimi skalnimi podori. Na podlagi preteklih študij je bilo ocenjeno, da je letni dotok rinjenih plavin na območje Jasne cca. 15.000 m<sup>3</sup>, pretok mimo pa okrog 8.000 m<sup>3</sup> (VGI, 1997a). Prodonosna zmogljivost preko relativno ustaljenega odseka med pregrado Zgajajnica in pod Hotelom Lek je okrog 8.000 m<sup>3</sup> na leto, kar je nekako v rangi pričakovanega dotoka rinjenih plavin. Na dolvodnem odseku pri Porentovem domu pa je pri manjšem naklonu dna struge premestitvena zmogljivost samo še okrog 5.000 m<sup>3</sup> na leto (KSH, 1997; VGI, 1997a). Območje pod sotočjem Save Dolinke in Pišnice se je v preteklosti aktivno poglobljalo (VGI, 1997b), zaradi tega so bili predvideni številni ukrepi za stabilizacijo nivelete dna struge Save Dolinke. Kot obsežnejši erozijski dogodek v povirnem delu Save Dolinke velja omeniti večji podor na območju spodnjega toka Belce z ocenjenim volumnom med 5.000 in 10.000 m<sup>3</sup>, potencialni volumen drobirja naj bi bil še veliko večji (Lazar in sod., 2018). V zadnjih letih je bila sicer pod podorom zgrajena nova prebiralna pregrada, ki delno zaustavlja dotok drobirja, ki se sprošča iz omenjenega podora.

Bistveno vlogo pri količinah sproščenega, transportiranega in odloženega materiala igrajo hidrološke razmere. V vodotokih s prevladujočimi hudourniškiimi značilnostmi poteka premeščanje materiala in spremljajoči procesi rečne erozije predvsem v sorazmerno kratkih obdobjih ekstremnejših padavinskih oz. poplavnih dogodkov. V študiji KSH (1997) so bila podana relativno velika razmerja med mokrimi in suhimi hidrološkimi leti za določene prečne profile, kjer je bila računana premestitvena zmogljivost za rinjene plavine (vrednost za mokro hidrološko leto je lahko 10x večja kot je vrednost za suho hidrološko leto). Kot primer lahko navedemo še študijo VGI (1982), ki je bila izdelana za profil vodomerne postaje Laško na Savinji s ciljem določiti letno bilanco prodonosnosti na podlagi izračunov ter terenskih meritev. Za omenjeni profil je izračunana povprečna letna vrednost okrog 20.000 m<sup>3</sup>, v posameznih letih pa je lahko letni transport manjši od 1.000 m<sup>3</sup> oziroma lahko presega 130.000 m<sup>3</sup>/leto. Pri tem je treba poudariti, da lahko ekstremni dogodki za večkratnik presežejo omenjene količine transportiranega materiala v posameznih letih. Ekstremni dogodki lahko premestijo tudi več desetkrat večje vrednosti od povprečnih razmer v posameznem letu, kot nakazuje primer hudournika Hladnik v letu 1966. Tistega leta je namreč tudi Sava Dolinka v profil Hrušice v enem mesecu nanese okrog 60.000 m<sup>3</sup> proda in peska (Jesenovec, 1995).

V nadaljevanju povzemamo še povzetek ocene bilance transporta rinjenih in lebdečih plavin na porečju Save, grafično je prodna bilanca vzdolž Save Dolinke prikazana na sliki 5.10.

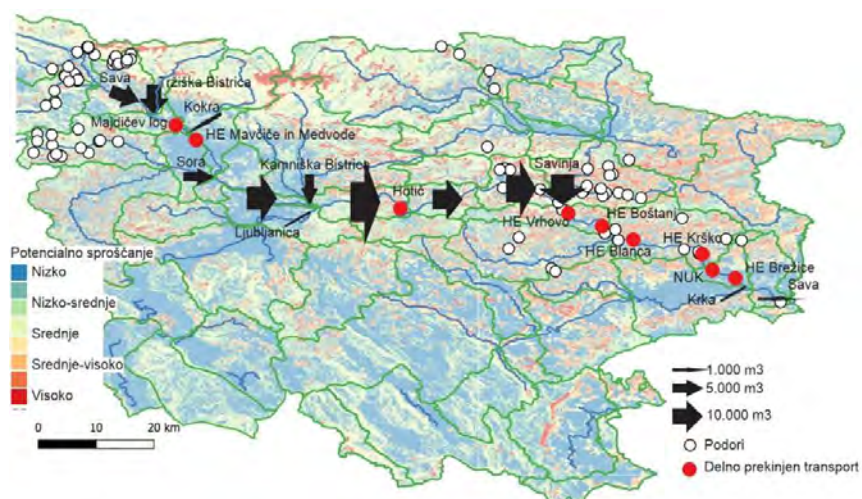


**Slika 5.10:** Grafični prikaz prodne bilance Save Dolinke in njenih pritokov glede na grobe ocene iz preteklih študij. Kot ozadje je prikazana ocena povprečnega letnega sproščanja, izračunanega po RUSLE enačbi, dodatno so prikazane tudi lokacije podorov glede na bazo s katero upravlja Geološki zavod Slovenije (DRSV, 2022).

Ocena bilance predvsem rinjenih plavin nakazuje tudi na intenzivnost procesov rečne erozije vzdolž odsekov reke Save. Dotok plavin iz Radovne v Savo Dolinko je relativno majhen navkljub izrazitim erozijskim procesom v zaledju na pritoku Kotarica, dotok rinjenih plavin je namreč v vmesnem delu reke Radovne skoraj prekinjen. Mikoš (2000) je za reko Radovno ocenil letno prodonosnost na 500 m<sup>3</sup>/leto. Za Savo Bohinjko je bila ocena prodonosnosti narejena ob upoštevanju dejstva, da se na lokaciji Sveti Janez odvzemajo relativno velike količine materiala (cca. 1.000–6.000 m<sup>3</sup>/leto). Ugotovljeno je bilo, da se prečni profil na lokaciji vodomerne postaje Bodešče rahlo pogloblja, kar lahko nakazuje na premajhen dotok plavin iz gorvodnih območij glede na premestitveno zmogljivost odseka, ki je ocenjena na približno 15.000 m<sup>3</sup> (Mikoš, 2000). Nadalje je bilo za odsek struge reke Save na delu med sotočjem obeh Sav in Majdičevim logom v Kranju ugotovljeno nekolikšno poglobljanje glede na terenske razmere. Prispevek Kokre je z vidika reke Save relativno majhen, saj se večina plavin zadrži na prodiščih (Potoče, Visoko, Oljarica Britof) pred vtokom v reko Savo. Transport rinjenih plavin se v akumulacijskih bazenih HE Mavčiče in HE Medvode praktično prekine, kar nakazuje tudi relativno stabilen volumen akumulacije HE Medvode. Za reko Soro znaša ocenjena letna prodonosnost približno 5.000 m<sup>3</sup>, ocena je osnovana na podatku o lebdečih plavinah, ker se na tej lokaciji izvajajo meritve motnosti. Ob tem je bilo predpostavljeno razmerje med rinjenimi in lebdečimi plavinami med 1:3 in 1:4, kar je pričakovano razmerje za tovrstne tipe vodotokov (npr. Lenzi in Marchi, 2000; Turowski in sod., 2010). Z naraščanjem oddaljenosti od erozijskih območij se to razmerje zmanjšuje, narašča torej delež lebdečih plavin, ki so bolj mobilne. Seveda pa razmerje med rinjenimi in lebdečimi plavinami ni konstantno, ampak se lahko spreminja v odvisnosti od številnih dejavnikov (npr. hidrometeoroloških razmer, vezanih na lastnosti padavin in dinamiko tvorbe padavinskega odtoka, predhodnih hidroloških razmer kot tudi ostalih lastnosti prispevnega območja vodotoka (geoloških, pedoloških, pokrovnosti tal)).

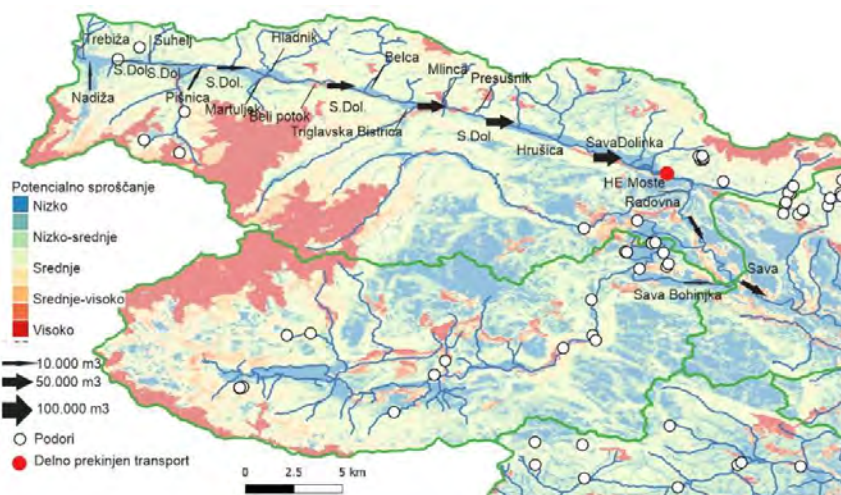
Podobno kot za ostale gorvodne odseke, je tudi za odsek na območju med sotočjem s Savo in Kamniško Bistrico ocenjeno določeno poglobljanje struge reke Save, kar lahko nakazuje tudi prečni profil postaje Šentjakob na reki Savi, ki se pogloblja. Za Kamniško Bistrico ocena letne prodonosnosti znaša okrog 5.000 m<sup>3</sup>, kar je manj, kot je glede na izračun premestitvene zmogljivosti predvidel Mikoš (2000), ki je zapisal, da je omenjena ocena previsoka. Prispevek Ljubljance je z vidika transporta rinjenih plavin

praktično zanemarljiv. Na območju Hotiča se letno odvzema približno 15.000 m<sup>3</sup> plavin letno, prodonosnost dolvodno od Hotiča je ocenjena na približno 12.500 m<sup>3</sup>/leto glede na pričakovan gorvodni dotok rinjenih plavin. Za reko Savinjo so na razpolago nekateri podatki iz naloge VGI (1982), ki je na podlagi kombinacije terenskih meritev ter izračunov podala oceno prodonosnosti za profil Laško. Mikoš (2000) za Savinjo podaja oceno, da je na podlagi premestitvene zmogljivosti določena vrednost 25.000 m<sup>3</sup>/leto previsoka, delno tudi na račun zaraščanja površin z gozdovi ter glede na določene negativne trende v transportu lebdečih plavin v Sloveniji. VGI (1982) v svoji študiji navaja, da je prodonosnost Save pri Zidanem mostu enaka 38.000 m<sup>3</sup>. Med Savinjo in HE Vrhovo so še nekateri malce večji vodotoki kot je Sopot, za katero je bilo v preteklosti ocenjeno (pred izgradnjo HE Vrhovo in pripadajoče infrastrukture), da letna prodonosnost znaša okrog 4.000 m<sup>3</sup>, večina tega materiala se odvzema na lokaciji zadrževalnika Jagnjenica na Sopotu (letno približno 10.000 m<sup>3</sup>). Dolvodno od Sopote je zaradi verige hidroelektrarn in vpliva akumulacijskih bazenov natančna ocena transporta rinjenih plavin težavna. Pred izgradnjo verige HE na spodnji Savi je bila v Krškem ocenjena prodonosnost na približno 60.000 m<sup>3</sup>/leto (VGI, 1982) oziroma na mejnem profilu okrog 63.000 m<sup>3</sup>/leto (Mikoš, 2000). Potrebno je poudariti, da je prodonosnost na območju spodnje Save odvisna od obratovanja HE in upravljanja z zapornicami na prelivnih objektih v času izrazitejših poplavnih valov. Analize sprememb akumulacij kažejo, da je velikost akumulacije HE Vrhovo relativno stabilna, se pa zmanjšujejo volumni dolvodnih akumulacij. Veriga HE na spodnji Savi in vzdrževanje nivoja dna struge reke Save gorvodno od jezovne zgradbe pri Nuklearni elektrarni Krško skoraj povsem prekine transport rinjenih plavin ob normalnih hidroloških razmerah. Ob ekstremnejših poplavnih dogodkih, ko se vzdolž verige vzpostavijo praktično naravne visokovodne pretočne razmere, ki povzročijo izrazito povečanje hidravličnih obremenitev na ostenje dna struge reke Save in brežine, se lahko na posameznih odsekih vzdolž verige hidroelektrarn pojavijo poškodbe obrežnih zavarovanj tudi v nekoliko večjem obsegu, sama prodonosnost vodnega toka pa se bistveno poveča. Še enkrat velja opozoriti, da se znotraj ekstremnih poplavnih dogodkov lahko premestijo tudi 10-krat ali 20-krat večje vrednosti od povprečnih razmer v posameznem letu. Na sliki 5.11 je grafični povzetek prodne bilance reke Save in nekaterih večjih pritokov.



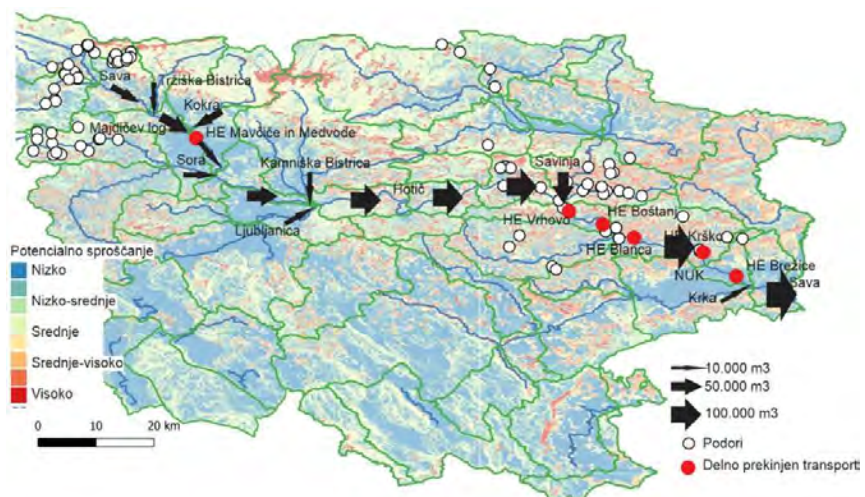
**Slika 5.11:** Grafični prikaz prodne bilance Save in njenih pritokov glede na grobe ocene iz preteklih študij. Kot ozadje je prikazana ocena povprečnega letnega sproščanja, izračunanega po RUSLE enačbi, dodatno so prikazane tudi lokacije podorov glede na bazo s katero upravlja Geološki Zavod Slovenije (DRSV, 2022).

V nadaljevanju podajamo še kratek povzetek ocenjenih količin premeščanja lebdečih plavin vzdolž posameznih odsekov reke Save in nekaterih pritokov. Analiza premeščenih lebdečih plavin je pomembna z vidika potencialnega odlaganja lebdečih plavin v času poplavnih dogodkov predvsem na poplavnih območjih, kjer se hitrosti vodnega toka in strižne napetosti zmanjšajo, posledično pride do odlaganja drobnozrnatih in lebdečih plavin, to je izrazito predvsem v obdobjih umikanja poplavnih voda nazaj v rečne struge. V preteklosti je bilo na porečju reke Save izvedenih nekaj več meritev transporta suspendiranih snovi v primerjavi s transportom rinjenih plavin. V DRSV (2022) je bila podana ocena, da je dotok lebdečih plavin do akumulacije HE Moste enak približno 60.000 m<sup>3</sup>/leto, kalnost v profilu vodomerne postaje Jesenice je bila ocenjena na približno 68.000 m<sup>3</sup>/leto. Za porečje Sore so v zadnjih letih na voljo meritve motnosti ARSO, ki kažejo da je dotok lebdečih plavin na Sori približno 20.000 m<sup>3</sup>. Za prispevek Sore, Save in vmesnih območij do lokacije Šentjakoba Mikoš (2000) navaja, da je enak približno 20.000 m<sup>3</sup>. HMZ SRS (1970) za postajo Šentjakob za leti 1965 in 1967 navaja, da je bilo skozi profil transportiranega okrog 200.000 t materiala (kot kombinacija meritev in izračunov). Za Kamniško Bistrico je bila ocena letnega transporta lebdečih plavin narejena na podlagi nekaterih občasnih meritev iz preteklosti in upoštevanja gostote materiala 1,8 t/m<sup>3</sup> 52.000 t, kar je približno 28.000 m<sup>3</sup>/leto. Ocena transporta lebdečih plavin pred sotočjem s Savinjo tako znaša približno 125.000 m<sup>3</sup>/leto, kar je približno 60 % vrednosti, ki jo za profil postaje Litija navaja Mikoš (2000). Potrebno je poudariti, da Mikoš (2000) tudi za postajo Veliko Širje na Savinji podaja vrednost 135.000 m<sup>3</sup>/leto, podatki ARSO iz zadnjih let pa kažejo na transport rinjenih plavin na Savinji v območju približno 65.000 m<sup>3</sup>/leto, kar je 48 % vrednosti, ki jo navaja Mikoš (2000), torej to dejstvo nakazuje na zmanjševanje transporta lebdečih plavin, seveda pa bi bilo za natančnejšo opredelitev nujno izvajati bolj obsežne meritve kalnosti. Grafično je bilanca lebdečih plavin vzdolž Save Dolinke in Save prikazana na slikah 5.12 in 5.13.



**Slika 5.12:** Grafični prikaz lebdečih plavin Save Dolinke in njenih pritokov glede na ocene iz preteklih študij. Kot ozadje je prikazana ocena povprečnega letne sproščanja izračunanega po RUSLE enačbi, dodatno so prikazane tudi lokacije podorov glede na bazo s katero upravlja Geološki Zavod Slovenije (DRSV, 2022).





**Slika 5.13:** Grafični prikaz lebdеčih plavin Save in njenih pritokov glede na ocene iz preteklih študij. Kot ozadje je prikazana ocena povprečnega letne sproščanja izračunanega po RUSLE enačbi, dodatno so prikazane tudi lokacije podorov glede na bazo s katero upravlja Geološki Zavod Slovenije (DRSV, 2022).



## **6 PREGLED NEKATERIH TEORETIČNIH KONCEPTOV IN TEHNIČNIH PRAKS ANALIZE NEVARNOSTI REČNE EROZIJE IN EROZIJE MORJA – delovna točka**

### **1.6**

Glede na prostorski obseg so procesi rečne erozije v splošnem bistveno manj obsežni v primerjavi z obsegi razlivanja poplavnih voda. To se prav gotovo odraža tudi v izraziti podcenjenosti potenciala nevarnosti, ki jo predstavljajo procesi rečne erozije. Intenzivnost in nepredvidljivost procesov rečne erozije se je na žalost pokazala ob zadnji uničujočih poplavah v Sloveniji avgusta 2023, ko je rečna erozija povzročila težko predstavljen obseg poškodb na vodni infrastrukturi, močno poškodovani in povsem uničeni so bili številni objekti in razna gospodarska javna infrastruktura in to tudi na območjih, kjer se tovrstne pojave ni pričakovalo glede na predhodno analizirane razmere poplavne nevarnosti. Nedvomno je pomembna podlaga za zaščito grajenega okolja pred rečno erozijo izboljšana kakovostno in količinsko razumljiva ocena nevarnosti, ki jo predstavljajo kompleksni procesi rečne erozije. Izdelava kart poplavne nevarnosti in opredelitev razredov poplavne nevarnosti je skladno z vpeljavo Poplavne direktive (Direktiva 2007/60/ES) v nacionalno zakonodajo držav EU postala ustaljeni del postopka opredelitve prisotnosti poplavne nevarnosti v prostoru. Ob tem pa je ocena intenzitete in prostorske razsežnosti spremljajočih erozijskih procesov, ki so posledica razlivanja poplavnih voda, še vedno dokaj obrobna tema tovrstnih analiz (Deal in sod., 2018). Problematika pomanjkljivega upoštevanja erozijskih procesov v sklopu ocenjevanja in kartiranja poplavne nevarnosti v prostoru je bila izpostavljena v različnih tehničnih dokumentih in smernicah različnih organizacij (npr. FEMA, USGS, ASFP, DWA, CIRIA), ki veljajo za vodilne v svetovnem merilu na področju obvladovanja naravnih tveganj. Ob tem pa je usmeritev za izdelavo ocen pričakovanih obsegov procesov rečne erozije oz. poskusov napovedovanja njihovega razvoja malo. Dodatno velja poudariti, da do zdaj še ni bilo razvitih splošno priznanih mednarodnih metod ali strokovnih smernic za oceno obsega ali celo morebiten natančnejši izračun intenzivnosti procesov rečne erozije. Nedvomno je eden od glavnih vzrokov v tem, da so procesi rečne erozije izjemno kompleksni. Prostorska spremenljivost erozijskih procesov je običajno zelo velika in pogosto predvsem posledica lokalnega dogajanja v poplavnem dogodku. Zato je sistematično zbiranje podatkov o poplavnih vodah in spremljajočih erozijskih procesih ključnega pomena za celostno razumevanje dogajanja in ustrezno interpretacijo rezultatov hidravličnih modelov v povezavi z dejanskimi razmerami ob pojavu poplavnih dogodkov. Iz nekaterih do zdaj razvitih pristopov k vrednotenju in opredelitvi prostorske razsežnosti procesov rečne erozije izhaja, da je za ustrezno vrednotenje procesov rečne erozije potrebno poglobljeno znanje hidravlike, rečne hidromorfologije, inženirske hidrotehnike, geotehnike in poznavanje erodibilnostnih lastnosti tal (ISJ, 2018; Williams in sod., 2019; Deal in sod., 2018; Blazewicz in sod., 2020).

Sodobni pristopi k prostorski opredelitvi razvitosti procesov rečne erozije se poleg klasičnih terenskih ogledov strug in prepoznave erozijskih procesov usmerjajo v uporabo metod daljinskega zaznavanja ter podrobnejšo interpretacijo rezultatov hidravličnega modeliranja pri prepoznavi območij, kjer je potencial za intenzivnejšo razvitost erozijskih procesov povečan. ISJ (2018) je tako na podlagi analize erozijskih procesov izdelal vzorčno karto območij velike nevarnosti rečne erozije vzdolž rečnih strug predvsem kot posledico prisotnosti procesov stranske (lateralne) erozije rečnih strug, podrobneje je postopek predstavljen v poglavju 6.1. Posledice stranske erozije se najpogosteje odražajo v izgubi kmetijskih zemljišč (Thorne in sod., 1997). DWA (2021) je pripravila smernice za analizo procesov erozije na kmetijskih površinah zaradi stekanja površinskega padavinskega odtoka in gibanja toka vode po površini. Smernice DWA niso usmerjene neposredno v procese rečne erozije, vendar pa lahko opisane metode prispevajo k boljšemu ovrednotenju potencialnih količin erodiranega materiala, ki doseže rečno mrežo in se po njej nadalje premešča. Piégay in sod. (2005) so na podlagi

hidromorfoloških sprememb rečnih strug in hidravličnih lastnosti vodnega toka predstavili predloge za prostorsko opredelitev t.i. »**erozijskega koridorja vodotoka**«, znotraj katerega se lahko pričakuje intenzivnejše procese rečne erozije.

V nadaljevanju je podan nekoliko podrobnejši opis nekaterih pristopov za oceno obsega procesov rečne erozije in erozije obale morja ter vrednotenje potencialne erozijske nevarnosti. Splošna ugotovitev pregleda literature je, da ni na voljo veliko poglobljenih teoretičnih konceptov in še manj ustaljenih tehničnih praks za analizo nevarnosti rečne erozije in erozije obale morja. Pristopi, predstavljeni v nadaljevanju, so usmerjeni v prepoznavanje območij, kjer se lahko pojavijo predvsem intenzivni procesi odplavljanja erodiranega materiala z brežin strug vodotokov. Prepoznavanje območij, kjer lahko pride do intenzivnega odlaganja erodiranega materiala, v predstavljenih pristopih večinoma ni podrobneje obravnavano. Splošna ugotovitev iz pregleda literature je, da je procesom odlaganja materiala vzdolž rečne mreže in na obdajajočih poplavnih območjih posvečene bistveno manj pozornosti v primerjavi s procesi odplavljanja. Večinoma je kot ključni korak tovrstnih analiz priporočena analiza območij (npr. na osnovi topografije terena), na katerih se je v preteklih poplavnih dogodkih material odplavljal in odlagal. Kot je razvidno iz povzetkov metodologij, predstavljenih v nadaljevanju, velja dodatno izpostaviti, da izrazoslovje, ki se uporablja na področju vrednotenja procesov rečne erozije, med posameznimi koncepti ni poenoteno.

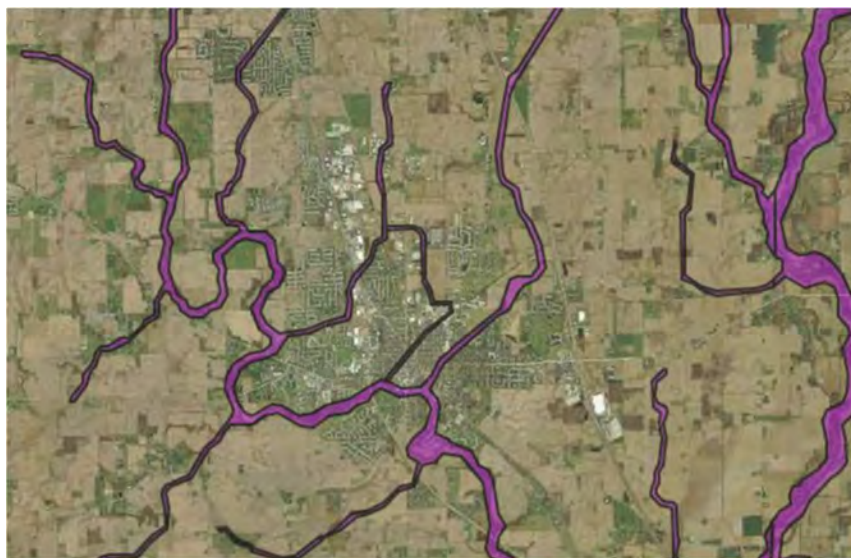
## 6.1 Ocena območij nevarnosti rečne erozije v zvezni državi Indiana, ZDA

Po uničujočih poplavah leta 2008 so v zvezni državi Indiana, ZDA pristopili k izdelavi t.i. **regionalnih kart območij nevarnosti rečne erozije** (angl. *Regional Fluvial Erosion Hazard (FEH) zone maps*) (ISJ, 2018). Zvezni Urad za upravljanje reke Vermont je za zvezno državo Indiana izvedel kartiranje regionalnih območij FEH. Pripravljene so bile karte za 82 okrožij, ki so po poplavah leta 2008 utrpelo največjo ekonomsko škodo.

Osnovni namen kart območij nevarnosti rečne erozije je priprava grobih strokovnih podlag, na podlagi katerih so se identificirala območja potencialnih procesov rečne erozije, ki se jim je treba z nadaljnjim prostorskim načrtovanjem v največji možni meri izogibati. Regionalne karte območij FEH so namenjene kot strokovna podlaga za lokalne skupnosti, ki bi želele sprejeti strategije izogibanja območjem nevarnosti rečne erozije. Erozijske karte omogočajo posameznikom in skupnostim, da bolje prepoznajo območja, kjer obstaja povečana nevarnost pojava procesov rečne erozije ter sprejmejo strategije za izogibanje tveganjem, povezanim s procesi rečne erozije. Na regionalnih kartah območij FEH so prikazani približni odmiki od brežin strug vodotokov in so podlaga za boljše upravljanje rečnih koridorjev z upoštevanjem spremljajočih procesov rečne erozije. V splošnem odmiki upoštevajo poznane spremembe v potekih tras strug vodotokov, ločijo odseke aktivnega emigriranja ali relativnega mirovanja strug vodotokov, v splošnem torej odseke aktivnih procesov rečne erozije in odseke, kjer so ti procesi omejeni. Za aktivno migrirajoče in relativno mirujoče struge vodotokov je bil razvit postopek v orodju GIS, ki kot osnovno spremenljivko definira širino struge vodotoka pri strugotvornem pretoku na osnovi regionalnih krivulj, ki temeljijo na velikosti prispevnih območij znotraj vsakega hidrografskega območja zvezne države Indiana. Za relativno mirujoče vodotoke je analiza upoštevala širino varovalnega pasu koridorja rečne erozije na naslednji način: najmanj ena širina struge pri strugotvornem pretoku na vsako stran struge vodotoka (skupna širina koridorja je torej trikratnik širine struge pri strugotvornem pretoku) ali širino 100 čevljev (približno 90 m) na vsako stran struge, merjeno od sredinske črte struge vodotoka. Izmed obeh kriterijev se upošteva strožji pogoj oz. večji odmik. Za aktivno migrirajoče vodotoke je skupna širina koridorja do 8-kratna širina struge

vodotoka pri strugotvornem pretoku. Dejanska širina koridorja rečne erozije je nato dodatno ročno prilagojena z upoštevanjem lokalne topografije terena in geoloških lastnosti ter morebitnih podatkih o predhodnih migracijah struge vodotoka.

Natančnejše karte območij rečne erozije z upoštevanjem ročnih popravkov so bili izdelane v merilu približno 1:10.000 do 1:15.000. Območja rečne erozije, prikazana na sliki 6.1, so mišljena kot približna območja povečane nevarnosti procesov rečne erozije za informativne namene in niso namenjena za določanje natančnih meja v raznih administrativnih postopkih (npr. načrtovanju projektov ali območij urejanja) ter za detaljne analize lokacij.

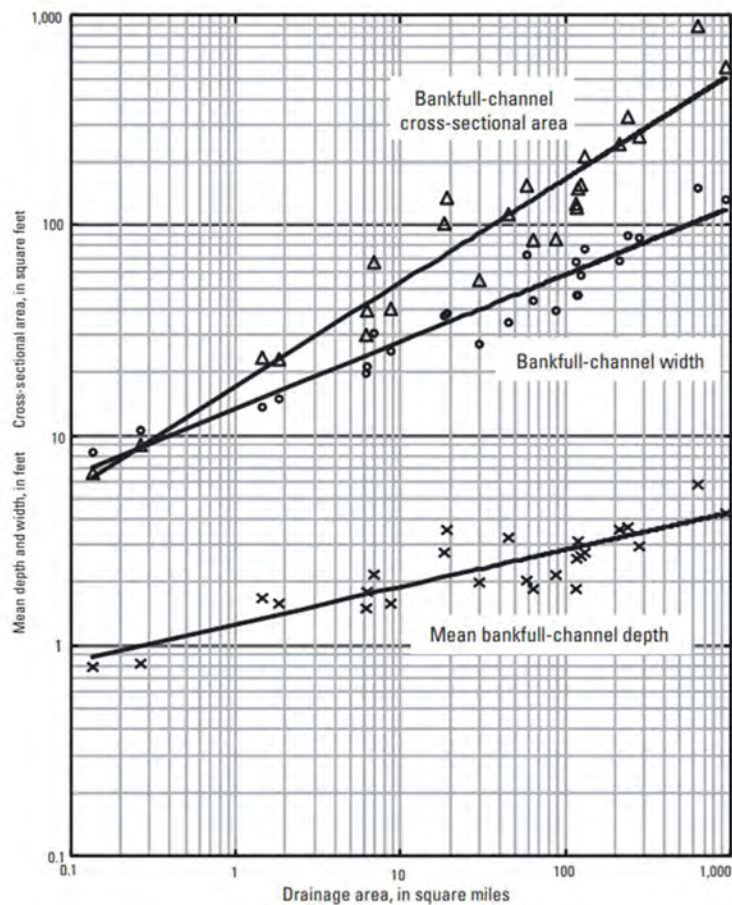


**Slika 6.1:** Prikaz ocenjenih območij rečne erozije (obarvano vijolično) (ISJ, 2018).

Ocenjena območja rečne erozije za zvezno državo Indiana so dostopna tudi na spletu: <https://indnr.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=43e7b307a0184c7c851b5068941e2e23>.

Izdelovalci metodologije poudarjajo, da je treba za vrednotenje območij rečne erozije na določeni lokaciji izvesti natančnejše analize, ki naj vključujejo podrobnejšo analizo lokalnih hidrogeoloških razmer in rečne hidravlike. V smernicah za oceno območij rečne erozije so podane tudi usmeritve za določitev dolžine odseka, za katerega se izdeluje ocena območja rečne erozije. Obravnavano območje mora namreč vključevati bistveno daljši odsek od tistega, na katerem so identificirani aktivni procesi rečne erozije. Obravnavano območje se mora raztezati dovolj gorvodno in dolvodno, da vključuje poznane erozijske procese v strugi, ki vplivajo na erozijske razmere znotraj ciljnega območja oz. odseka vodotoka. Poleg tega mora obravnavani odsek vključevati vse ogrožene hidrotehnične objekte, vodarske ureditve in erodirane brežine, ki mejijo na prizadeto območje in so povezane z njim. Prepoznana morajo biti sosednja (najpogosteje strme brežine oz. pobočja) območja, ki prispevajo k odtoku in/ali izcejanju podzemnih voda, sedimentov ali lahko predstavljajo vir lesnega plavja. Običajno naj bi se začetni študijski odsek raztezal gorvodno in dolvodno od lokacije prepoznanih procesov rečne erozije za 10- do 12-kratnik približne širine struge pri strugotvornem pretoku (Rosgen, 2001), glede na smernice Rosgena (1996) naj bi se znašala najmanjša dolžina študijskega odseka 20- do 25-kratnik širine struge pri strugotvornem pretoku. Približno širino strugotvornega pretoka se je za zvezno državo Indiana ocenilo z uporabo regionalnih krivulj (Robinson, 2013). Primer regionalne krivulje, ki povezuje velikost prispevnega območja z dimenzijami rečne struge pri strugotvornem pretoku, je prikazan na

sliki 6.2. Slika 6.3 prikazuje shematsko določitev dolžine obravnavanega odseka v gorvodni in dolvodni smeri od lokacije, kjer so prisotni procesi rečne erozije.



**Slika 6.2:** Regionalne krivulje dimenzij struge za ocenjevanje širine, srednje globine in površine prečnega prereza neurbanih vodotokov na delu območja zvezne države Indiana (ISJ, 2018).



**Slika 6.3:** Preliminarna ocena dolžine obravnavanega odseka struge, vzdolž katerega se analizira obseg procesov rečne erozije (ISJ, 2018).

Upoštevanje strugotvornega pretoka skladno z zgoraj opisanimi usmeritvami samo po sebi sicer že pomeni posredno upoštevanje hidromorfoloških procesov vzdolž strug vodotokov. V tem smislu nam



hidromorfološki procesi pomagajo razumeti, kako lastnosti rečnega prostora vplivajo na oblikovanje strug in kako se prečni in vzdolžni prerez struge sčasoma spreminjata. Tovrstne procese se lahko najbolje okarakterizira s pomočjo ocene premestitvene sposobnosti posameznih odsekov rečnih strug, pri tem pa je treba za verodostojno oceno premestitvene zmogljivosti razpolagati s podatki o prečnih prerezih strug vodotokov in zrnavostni sestavi plavin. Premeščanje plavin vključuje dve povezani komponenti, in sicer odplavljanje z enega mesta, ki povzroči odlaganje (sedimentacijo) na drugi lokaciji. Prekomernemu odplavljanju dolvodno sledijo procesi prekomernega odlaganja. Skladno z usmeritvami ISJ (2018) na aktivne procese premeščanja plavin nakazujejo predvsem prisotnosti naslednjih procesov na obravnavanih odsekih:

1) *Erozijski procesi ob peti brežine*: velike pretočne hitrosti/strižne napetosti preprečujejo razrast vegetacije in odstranjujejo površinski material na dnu brežine struge.

2) *Konzolne oblike brežin strug vodotokov*: tovrstne strukture na brežinah strug vodotokov so redko stabilne in jih običajno opazimo le, kadar gosta vegetacija nad območjem spodjedanja preprečuje takojšnje porušitve brežin.

3) *Masni premiki na območjih brežin*: nestabilnost brežin ni posledica samo erozije na območju pete brežine. Nekateri masni premiki se zgodijo zaradi geotehnične nestabilnosti pobočja brežin, ki je posledica oblike brežin in sestave materiala. Največji obseg masnih premikov je običajno opažen vzdolž vodotokov, katerih struge stransko (lateralno) migrirajo.

4) *Obsežnejša območja brežin (glede na velikost vodotoka) brez vegetacijskega pokrova*: brežine brez vegetacije so običajno posledica intenzivnejših erozijskih procesov, ki preprečujejo rast enoletne vegetacije.

V smernicah ISJ (2018) je poseben poudarek dan prepoznavanju izpostavljenosti razne infrastrukture (predvsem linijske) in objektov procesom rečne erozije znotraj območij FEH. Zato je ena od dodatnih usmeritev pri oceni nevarnosti zaradi procesov rečne erozije, da se vzdolž obravnavanega odseka struge vodotoka identificira vsa infrastruktura in objekti ne glede na dejstvo, ali je bila tovrstna infrastruktura v preteklosti že izpostavljena erozijski nevarnosti oz. poškodovana v preteklih poplavnih dogodkih zaradi procesov rečne erozije. Infrastrukturo, ki je neposredno ogrožena zaradi nestabilnosti vodnega toka, je običajno lažje opredeliti. Ob tem se je treba zavedati, da zaradi nepredvidljivosti erozijskega dogajanja lahko infrastruktura postane ogrožena, čeprav je glede na obstoječe stanje poteka trase struge vodotoka varno odmaknjena. Pri tem so pomembni in zelo uporabni predvsem podatki o preteklem erozijskem dogajanju na obravnavanem območju, iz katerih je razvidno, v kolikšnem obsegu se procesi rečne erozije vzdolž obravnavanih strug vodotokov lahko pojavijo oz. za koliko se lahko prestavijo tlorisni poteki strug vodotokov v posameznih poplavnih dogodkih.

## 6.2 Ocena območij rečne nevarnosti v zvezni državi Kolorado, ZDA

Nekoliko drugačen pristop, ki je z vidika hidromorfoloških procesov podrobneje razdelan, kot je pristop opisan v prejšnjem poglavju za zvezno državo Indiano, so privzeli na območju zvezne države Kolorado, ZDA po uničujočih poplavah leta 2013. V okviru CHAMP programa (*Colorado Hazard Mapping Program*) so se lotili sistematičnega kartiranja območij poplavne in erozijske nevarnosti, ki so jih s skupnim izrazom poimenovali **FHZ** (angl. **Fluvial Hazard Zones**) (Blazewicz in sod., 2020) oz. v prevodu **območja fluvialne (rečne) nevarnosti**. V uporabljenem pristopu so se izogibali uporabi izraza



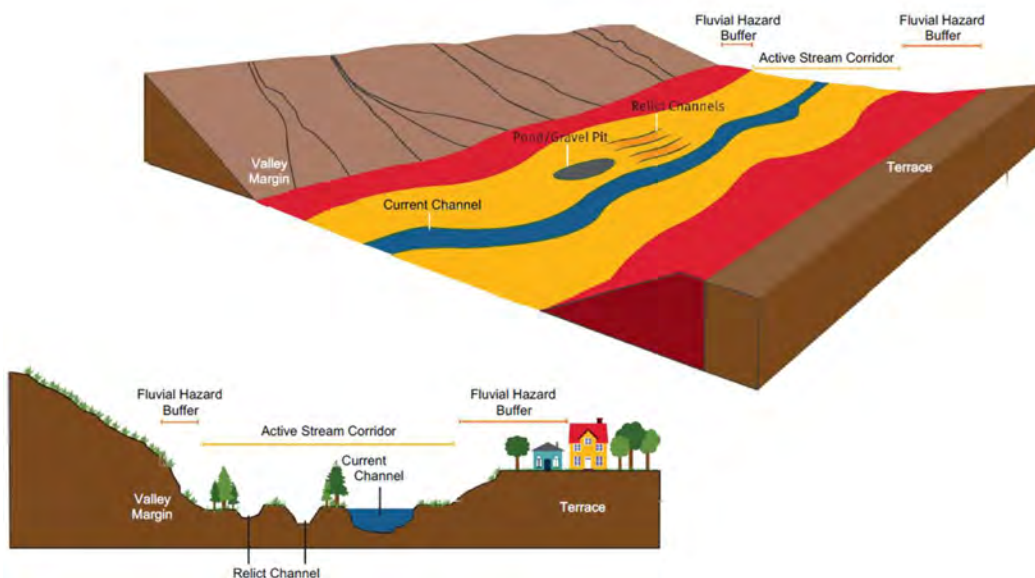
»kartiranje erozijske nevarnosti«, saj predstavljajo erozijski procesi zgolj enega od geomorfoloških dejavnikov, povezanih s procesi v strugah vodotokov. Avtorji metodologije ugotavljajo, da zgolj merjenje, modeliranje ali računanje erozije ali umikanja brežin strug vodotokov ne zadostuje z vidik celostne obravnave t.i. **rečnih geomorfoloških nevarnosti** (angl. *fluvial geomorphic hazard*) znotraj območja rečnega koridorja. Med rečne geomorfološke nevarnosti spadajo odlaganje sedimentov in velikega lesnega plavja, porušitve brežin strug in pobočij, ko se vodotoki zarežejo v erodibilne robove dolin ter spremembe tlorisnega poteka struge. Veliko lesno plavje je bilo prepoznano kot pomemben dejavnik, saj se lesno plavje nabira na bregovih in pobočjih ter se prenaša navzdol po toku in tvori začasne zamašitve v strugah v odprtinah premostitev. Rečne geomorfološke nevarnosti upoštevane v CHAMP programu torej zajemajo različne procese, pri katerih prihaja do interakcij med pretokom vode, plavinami in plavjem, povzroči odplavljanje materiala in njegovo odlaganje na določeni razdalji dolvodno v daljših časovnih obdobjih v sorazmerno normalnih pretočnih razmer ali intenzivneje med poplavnimi dogodki. Kartiranje območij FHZ naj bi torej opredelilo, kje se struge vodotokov v rečnem koridorju lahko razširijo ali premaknejo (t.i. **aktivni rečni koridor**), kjer se lahko tvorijo nove struge na poplavnih območjih (nevarnost t.i. avulzije oz. tvorbe nove in opustitve stare struge) in kje se lahko pojavijo erozijski procesi (npr. masni premiki pobočij), ki mejijo na poplavna območja (**varovalni pas rečne nevarnosti**). Z oceno območij FHZ se ne poskuša opredeliti verjetnost škode zaradi rečnih procesov ali stopnje spremembe geomorfoloških oblik znotraj rečnega koridorja. Kartirana meja opredeljuje območje, znotraj katerega so se rečni procesi odvijali v preteklosti in se lahko pojavijo v prihodnosti, pa tudi območja, na katera lahko posredno vplivajo erozija ali masni premiki na strmejših pobočjih v neposredni bližini rečnih strug. Ocena območij rečne nevarnosti temelji predvsem na podatkih daljinskega zaznavanja, ki pa morajo biti za detajlnejše kartiranje podprti s terenskimi raziskavami in ostalimi razpoložljivimi podatki.

V okviru določanja območij FHZ je bila sprejeta tudi zanimiva definicija, in sicer: »*Območje rečne nevarnosti (FHZ) je v zvezni državi Kolorado opredeljeno kot območje, ki ga je vodotok zasedal v bližnji preteklosti, ga lahko zaseda ali nanj fizično vpliva, saj vodotok shranjuje in prenaša vodo, plavine in plavje.*« Podrobnejše informacije o kartiranju FHZ območij za zvezno državo Kolorado so dosegljive na: <https://www.coloradofhz.com/>.

V okviru omenjenega programa je bilo izpostavljeno, da mora analiza poplavne nevarnosti upoštevati dejstvo, da so vodotoki naravno dinamični sistemi, nagnjeni k premikanju znotraj svojega koridorja in k spreminjanju svojih meja, ko prevajajo vodo, prenašajo plavine in plavje iz svojih prispevnih območij in jih odlagajo. Podatki o zahtevkih za zavarovanje pred poplavami in premoženjski škodi so namreč pokazali, da v Koloradu zanašanje samo na tradicionalne karte poplavne nevarnosti ne zagotavlja celovite obravnave nevarnosti, ki jih povzročajo procesi, povezani z vodotoki. Postopek kartiranja FHZ, ki ga izvaja CWCB (Colorado Water Conservation Board) upošteva te dinamične procese in naj bi predstavljal pomemben korak naprej pri določanju prostorskega obsega z vodotoki povezanimi nevarnostmi ter komunikaciji ugotovljenih nevarnosti z drugimi deležniki v prostoru. Kartiranje FHZ je izvedeno z interpretacijo in sintezo geomorfoloških, geoloških, hidroloških in biotskih informacij (tj. podatkov, ki opisujejo fizično lokacijo, obliko, intenzivnost aktivnih procesov rečne erozije in premeščanja/odlaganja plavin in plavja ter informacij o ekoloških razmerah v rečnem sistemu). Velik poudarek je na zbiranju terenskih podatkov o preteklem dogajanju, na katerega so vezane številne usmeritve, kako podatke o preteklem erozijskem dogajanju vzdolž rečnih strug in poplavnih območij vključiti v oceno prostorske razsežnosti območij rečne nevarnosti.

### 6.2.1 Osnovne in dodatne komponente območij rečne nevarnosti

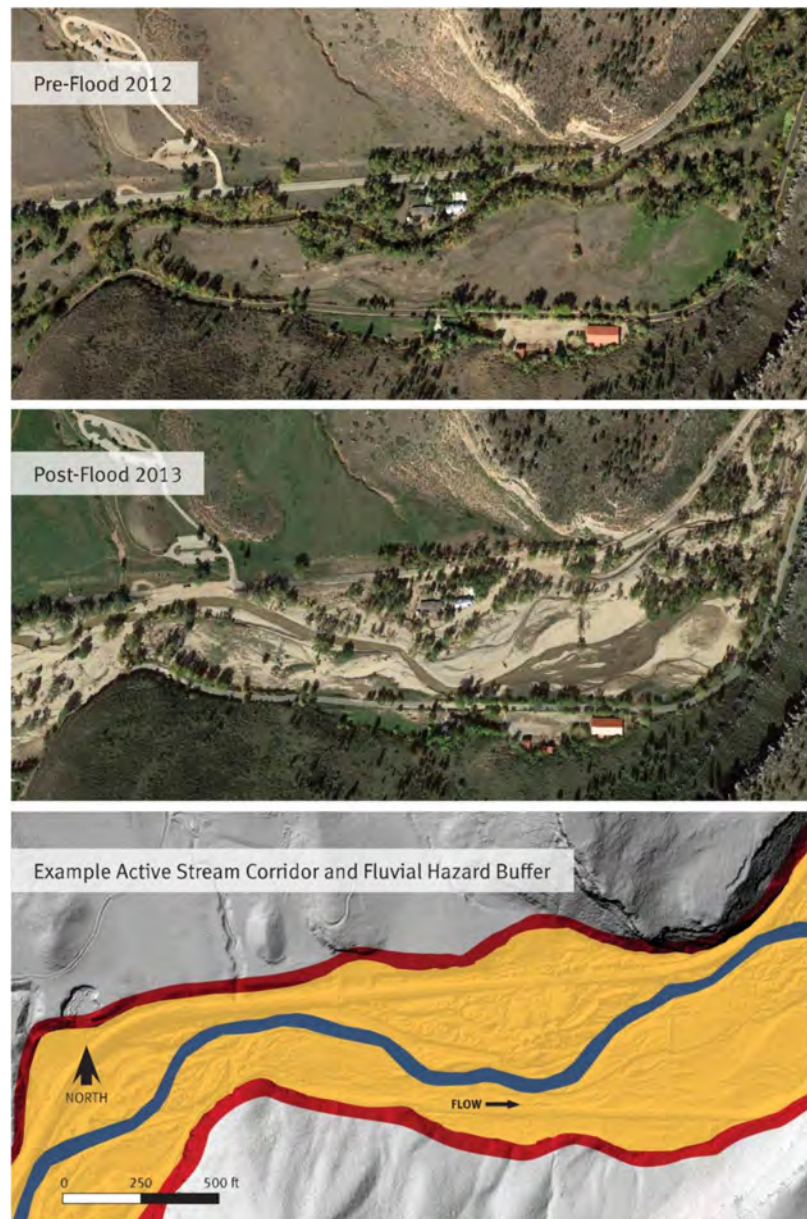
Območja rečne nevarnosti so avtorji predlaganega pristopa v osnovi razdelili na dva sestavna dela: **aktivni koridor vodotoka** (angl. *Active Stream Corridor, ASC*) in **mejni oz. varovalni pas rečne nevarnosti** (angl. *Fluvial Hazard Buffer, FHB*). Aktivni koridor vodotoka obsega zemljišča, ki sta jih oblikovala rečna erozija in odlaganje pod prevladujočimi tokovnimi in sedimentacijskimi režimi (tj. sedanje geomorfološko poplavno območje, slika 6.4). Prevladujoči procesi znotraj te meje območja so bočno in dolvodno premikanje struge, odplavljanje zemljin s poplavnih ravnin in odlaganje naplavin.



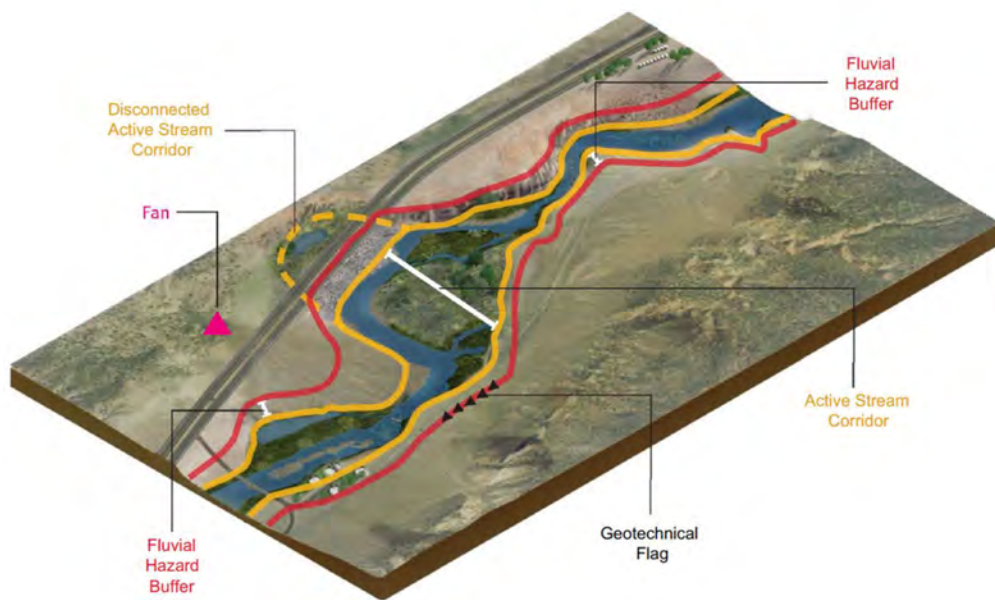
**Slika 6.4:** Aktivni koridor vodotoka in varovalni pas rečne nevarnosti kot osnovni komponenti karte območja rečne nevarnosti (Blazewicz in sod., 2020).

Varovalni pas rečne nevarnosti upošteva erozijsko ogrožena zemljišča zunaj aktivnega koridorja vodotoka, kot so pobočja in terase. Ta območja so lahko dovzetna za porušitev pobočja zaradi erozije zemljine, ki jo povzroči vodni tok. To je hkrati varovalni pas, ki se uporablja na zunanji meji območja ASC. Na sliki 6.5 je prikazan primer določitve območja aktivnega koridorja vodotoka in varovalnega pasu rečne nevarnosti na primeru podatkov o erozijskem dogajanju v preteklosti.

Dodatne komponente območij rečne nevarnosti razmejujejo lokacije, na katerih se nahajajo ali se lahko pojavijo druge vrste rečne nevarnosti, ki niso zajete v aktivnem koridorju vodotoka ali mejnem pasu rečne nevarnosti. Pri tem se upoštevajo tudi območja, kjer so prisotni varovalni ukrepi (npr. obrežna zavarovanja), s katerimi se vpliva na razsežnost aktivnega koridorja vodotoka. Dodatne komponente FHZ so: območja nevarnosti spremembe tlorisnega poteka struge (angl. *Avulsion Hazard Zone, AHZ*), območja odlaganja erodiranega materiala (angl. *Fans, F*), geotehnično nestabilna območja (angl. *Geotechnical Flags, GF*) in nepovezani aktivni koridorji potokov (angl. *Disconnected Active Stream Corridors, D-ASC*) (slika 6.6). Poudarjeno je dejstvo, da vzdolž številnih odsekov vodotokov vse tovrstne pomožne komponente ne bodo prisotne, vendar je treba pri kartiranju oceniti, ali so te komponente lahko prisotne in jih ustrezno ovrednotiti.



**Slika 6.5:** Primer določitve aktivnega koridorja vodotoka (rumeno) in varovalnega pasu rečne nevarnosti (rdeče) z uporabo podatkov o preteklem erozijskem dogajanju (Blazewicz in sod., 2020).



**Slika 6.6:** Primer določitve koridorja rečne nevarnosti z vidika osnovnih (aktivni koridor vodotoka in varovalni pas rečne nevarnosti) ter dodatnih komponent rečne nevarnosti (Blazewicz in sod., 2020).

### 6.3 Ocena nevarnosti erozije brežin strug vodotokov v Švici

Ob poplavah v Švici v letih 2005, 2007 in 2011 so procesi rečne erozije poškodovani ali povsem uničili številne stavbe in infrastrukturne objekte. Glavno spoznanje po tem poplavnem dogodku je bilo, da je pomembna podlaga za zaščito naselij in prometnih poti pred rečno erozijo kakovostno in količinsko razumljiva ocena erozijske nevarnosti. Ob tem je bilo jasno izraženo tudi spoznanje, da ni na razpolago splošno priznanih metod ali ostalih strokovnih podlag za ocenjevanje potencialnega obsega ali celo količinsko ovrednotenje procesov erozije brežin strug vodotokov.

Da bi zapolnili to vrzel, so švicarski strokovnjaki za naravna tveganja (FAN) in Komisija za varstvo pred poplavami, hidrotehniko in vzdrževanje rek (KOHS) pripravili priporočila za vrednotenje obsega procesov rečne erozije (FAN, 2015). Uporaba priporočil je mišljena kot usmeritve, ki služijo kot vodilo za pripravo podrobnejših strokovnih podlag za vrednotenje erozijske nevarnosti in nadalje prispevati k poenotenju postopkov ocen nevarnosti procesov erozije brežin vodotokov, da bi jih bilo mogoče bolje razumeti in narediti med seboj primerljive. Priporočila so namenjena predvsem strokovnjakom s področja hidrotehniko in obvladovanja naravnih nevarnosti. V končni fazi pa je izbira ustreznega kvantitativnega pristopa za ugotavljanje obsega erozije brežin prepuščena uporabniku. Poročilo je v elektronski obliki v nemškem jeziku na voljo na spletnih straneh FAN ([www.fan-info.ch](http://www.fan-info.ch)) in Švicarskega združenja za upravljanje voda ([www.swv.ch](http://www.swv.ch)).

Priporočila, ki jih je pripravil FAN (2015), temelji na predhodnih zveznih priporočilih (Loat in Petrascheck, 1997). V osnovi sta bili prepoznani dve prevladujoči vrsti procesov rečne erozije, ki povzročata odplavljanje materiala: zdrs brežine, ki ga sproži erozija ob vznožju brežine (glede na običajno razumevanje bi tovrstno obliko rečne erozije lahko razumeli kot globinsko erozijo), in premik poteka rečne struge (slika 6.6), kjer gre glede na prevladujoče razumevanje rečne erozije za prevladovanje procesa bočne erozije brežin. Do zdrsa brežin (izrazitejših procesov globinske erozije) prihaja predvsem vzdolž vodotokov s hudourniški značilnostmi in gorskih rek. Na bolj ravninskih



območjih so za erozijo brežin odgovorna predvsem izpostavljena območja, kot so območja bolj izpostavljena vodnemu toku (zunanje strani rečnih zavojev), ožji odseki strug ali ovire toku vode, ob katerih se zaradi specifičnih hidravličnih razmer intenzivirajo procesi rečne erozije. Kot merilo za kvantifikacijo intenzivnosti procesov rečne erozije je bila predlagana globina erozijskih zajed, merjena pravokotno na površino pobočja » $d$ « (slika 6.7). Intenzivnost procesov rečne erozije je razdeljena na tri stopnje, katerih meje so navedene v preglednici 6.1. Na mestih, kjer obstaja nevarnost premikanja struge, je treba oceniti tudi intenzivnost poplavljanja (torej poplavno nevarnost) na erodiranih odsekih brežin.



Slika 6.7: Razlika med zdrsom brežine (levo) in premikom rečne struge (desno) (Loat in Petrascheck, 1997)

**Preglednica 6.1:** Stopnje intenzivnosti erozije brežin v skladu z zveznimi priporočili (povzeto po Loat in Petrascheck, 1997).

Intenzivnost erozijskega procesa	Globina erozije ( $d$ )
majhna	$d < 0,5$ m
srednja	$0,5$ m $< d < 2$ m
velika	$d > 2$ m

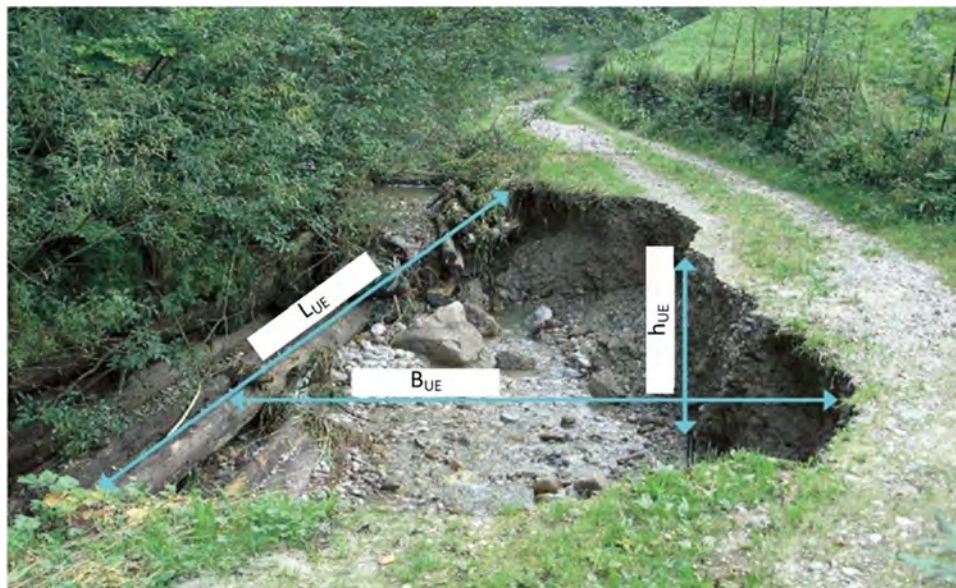
Glede na to, ali se nevarnost erozije brežin ocenjuje na ravni obvestila o nevarnosti, karte nevarnosti ali posameznega strokovnega mnenja, so za posamezne delovne korake predlagane metode z različno natančnostjo obdelave.

### 6.3.1 Prepoznavanje scenarijev erozijskih procesov

V priporočilih (FAN, 2015) je opisan postopek z obdelavo osnovnih scenarijev erozijskih procesov, analizo potencialnih erozijskih žarišč rečne erozije (t.i. šibkih točk) in analizo potencialnih vplivov erozijskih procesov. V splošnem gre za oceno prevladujočih procesov rečne erozije, potencialnega vpliva rečne erozije na dno struge vodotoka in brežine ter erozijske odpornosti brežin. Če je za odsek vodotoka ugotovljena možnost erozije brežin, se v okviru nadaljnje analize vpliva določita obseg možne erozije in verjetnost njenega pojava v povezavi s povratnimi dobami pretokov. Bezzola (2014) navaja, da se ravnovesna širina struge vodotoka ne pojavi po zelo velikih poplavah, temveč so pri oblikovanju dimenzij strug vodotokov ključni predvsem ponavljajoči se dogodki s povratno dobo v razponu med 1 in 5 let. To naj bi veljalo predvsem za vodotoke, ki oblikujejo struge v nekohezivnih materialih. Za analizirano območje erozijske nevarnosti se kvalitativno ali kvantitativno ocenijo erozijske obremenitve brežin in erozijska odpornost brežin. Če se glede na ugotovitve analize ranljivosti erozija brežin na odseku vodotoka povečuje, se v analizi vpliva določi verjeten prostorski obseg erozijskih procesov.



V nadaljevanju po posameznih korakih povzemamo usmeritve za prepoznavanje prevladujočih procesov rečne erozije. Shematski prikaz na sliki 6.8 podaja usmeritve za oceno obsega rečne erozije na podlagi katerih se nadalje lažje opredelimo do stopnje nevarnosti.



**Slika 6.8:** Opredelitev obsega erozije, kjer je  $L_{UE}$  dolžina erozije,  $B_{UE}$  širina erozije in  $h_{UE}$  globina erozije (FAN, 2015).

Osnovni scenarij za ocenjevanje nevarnosti erozije brežin sledi postopku ocene prostorskega obsega poplavne nevarnosti ali drugih načinov ocenjevanja tveganj zaradi vodnih ujm, na kratko ga povzemamo v nadaljevanju.

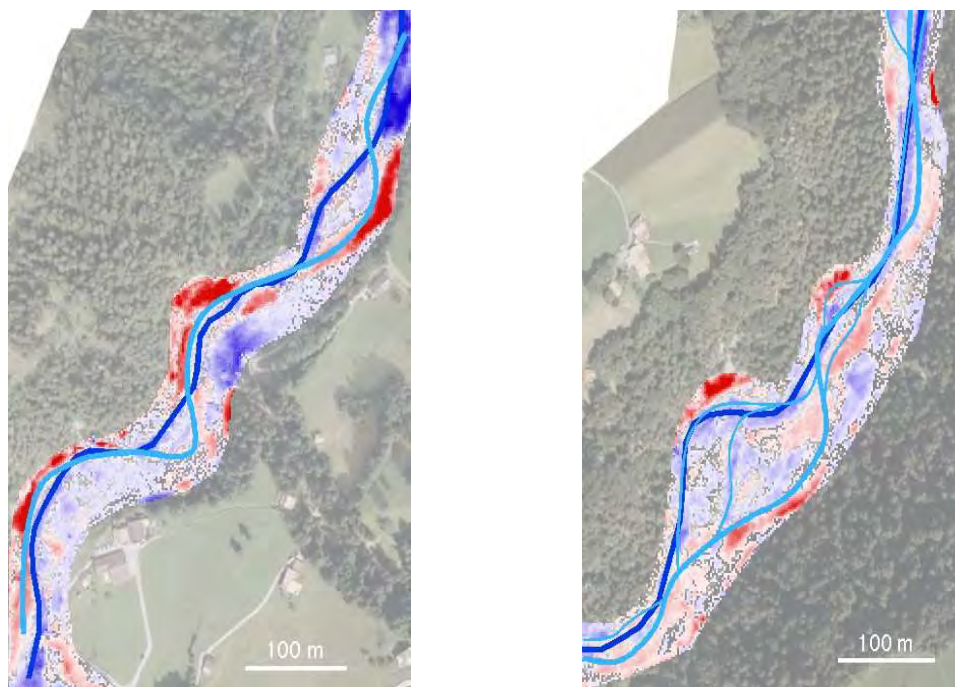
- 1) Kot osnovne vhodne podatke naj bi se upoštevalo projektni pretok določene povratne dobe, podatke o potencialnem dotoku plavin in potencial vnosa lesnega plavja.
- 2) Prepoznavanje lokacij erozijskih žarišč (t.i. šibkih točk) oz. območij s povečano nevarnostjo rečne erozije. Predvidena je analiza podatkov o dogajanju v preteklih poplavnih dogodkih iz različnih razpoložljivih podatkovnih virov (terenski ogledi in kartiranje, podatki, zbrani z metodami daljinskega zaznavanja itd.). Na ta način se pridobijo informacije o tem, kje je erozija brežin prisotna/možna in tudi v kakšnem obsegu se lahko pojavi, ob tem pa velja opozorilo, da tovrstni podatki ne morejo podati dokončne slike potencialnih erozijskih območij.
- 3) Analiza morfologije struge vodotoka. Poudarjeno je, da so morfološke spremembe v strugah vodotokov posledica prepletanja procesov, povezanih s pretočnimi razmerami, premeščanjem ter odlaganjem plavin in plavja. Pri oceni tveganj za erozije brežin strug vodotokov je treba upoštevati sedanjo obliko struge (razvejana, vijugajoča ali ravna) in njene morebitne spremembe med poplavami. Spremembe na območjih dna strug vodotokov pomembno vplivajo na erozijske procese. V primeru erozije dna (globinske erozije) se lahko spodkoplje in podre zaščita brežin, v primeru prekomernega odlaganja plavin pa lahko voda prelije brežine ali obrežne nasipe. Pri ocenjevanju nevarnosti erozije brežin so posebej pomembne morfološke lastnosti struge (razvejana, vijugajoča, ravna) in nivelete dna (ravna, ukrivljena) ter spremembe položaja dna struge (poglabljanje ali dvigovanje dna). Poleg tega je

treba upoštevati nepravilnosti v strugi kot možne sprožilce lokalne erozije. Nenadne spremembe v prečnih prerezih strug povzročijo spremembo pretočnih razmer in vodijo v večjo verjetnost pojavljanja globinske in bočne erozije. Poglobljena morfološka analiza struge vodotoka naj bi vključevala naslednje:

a) Trenutno obliko struge. V razvejanih strugah se bočna erozija lahko pojavlja na obeh straneh in ni nujno, da je največja ob največjih pretokih. Širina vplivnega območja rečne erozije je lahko večkratnik prvotne širine kanala. Pri vijugajočih strugah je širina vplivnega območja rečne erozije lahko tudi večkratnik prvotne širine struge med oblikovanjem rečnega zavoja.

b) Spremembe struge med poplavnimi dogodki. Med poplavami se lahko struga premakne. V istem vodotoku lahko nastanejo tako meandri kot razvejana struga (primer prikazan na sliki 6.9). V tem koraku se oceni, katera oblika struge bi se lahko pojavila na obravnavanem odseku vodotoka v stanju brez obrežnih zavarovanj.

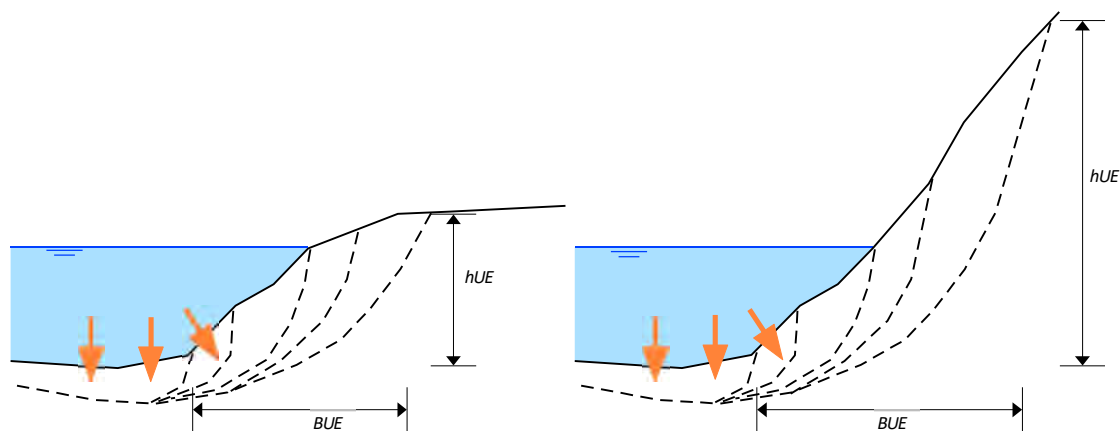
c) Usmerjenost struge in njen tlorisni potek. Na ravnih odsekih je bočna erozija možna na obeh straneh struge vodotoka. Če ne pride do bistvenih morfoloških sprememb, lahko na splošno pričakujemo manjšo širino erozije kot v strugah z razvejanimi rokavi ali meandri. V rečnih ovinkih se odplavljanje materiala pričakuje na zunanjih straneh zavojev, v redkih primerih, npr. če se spremeni valovna dolžina zavojev, lahko tudi notranja brežina rečnega zavoja postane udarno območje.



**Slika 6.9:** Procesi bočne erozije (rdeča barva) med poplavo leta 2005 na reki Chirel v Diemtigtalu (Švica): v zunanjih krivinah med nastajanjem meandra (levo) in na obeh straneh med nastajanjem razvejane struge (desno). Modra območja predstavljajo odlaganje naplavin, temno modra črta strugo pred poplavo, svetlo modra črta strugo po poplavi. Smer toka je od spodaj levo proti zgoraj desno (FAN, 2015).

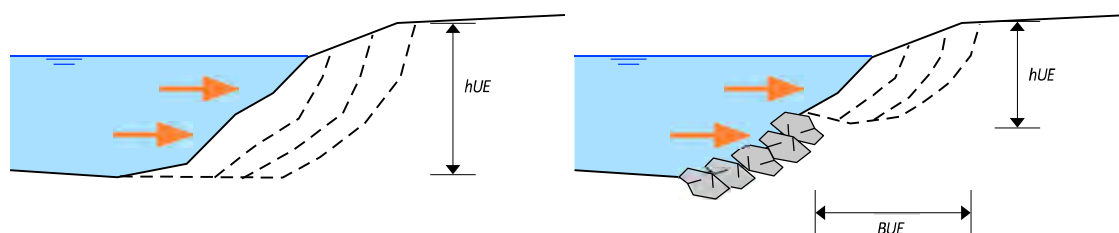
4) Prepoznavanje procesov rečne erozije. Trije spodaj naštetih procesi (a–c) oz. t.i. »vzorci nevarnosti rečne erozije« so prepoznani kot glavni sprožilni mehanizmi erozije brežin. Pojavljajo se lahko posamično ali v kombinaciji, ob tem jih najpogosteje ni mogoče jasno ločiti.

a) Erozijska dna in območja ob vznožju brežine oz. pete brežine. Erozijska dna in odplavljanje materiala iz območja pete brežine destabilizirajo brežino in povzročijo njeno drsenje (slika 6.10). Odplavljanje posteljice dna se lahko pojavi na večjem območju ali le lokalno. Lahko se pokaže v daljšem časovnem obdobju ali le med posamezno poplavo. Procese odplavljanja materiala iz območja pete brežine običajno spodbudijo nepravilnosti v prečnih prerezih strug in spremljajoči (sekundarni) procesi, ki bistveno spremenijo lokalne hidravlične razmere (npr. ko del porušene brežine ali podrt in zagozdno plavje zoži pretočni prerez oz. vpliva na prerazporeditev pretočnih hitrosti). Avtorji švicarskih smernic poudarjajo, da je v strmih vodotokih erozijska dna najpogostejši vzrok za erozijo brežin.



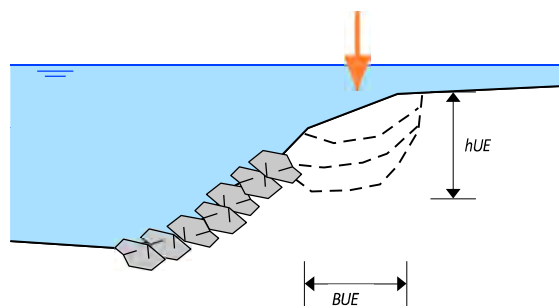
**Slika 6.10:** Erozijska dna in območja pete brežine, odplavljanje materiala z območja pete brežine destabilizira pobočje (levo za nizka pobočja, desno za visoka pobočja) (povzeto po FAN, 2015).

b) Bočna erozija. Povzroči odplavljanje materiala iz brežine in se lahko pojavi po celotni višini brežine (slika 6.11 levo) ali le na nekonsolidiranem zgornjem delu brežine (slika 6.11 desno). Bočna erozija se najpogosteje pojavlja na zunanji strani rečnih zavojev. Avtorji opozarjajo, da na intenzivnost procesov bočne erozije močno vplivajo tudi razne ovire toku vode, ki jih le-ta obteka. Spremembe položaja dna struge oz. poteka brežine med poplavnim dogodkom povzročijo, da se območje delovanja najintenzivnejših erozijskih obremenitev pomika navzgor ali navzdol po območju brežine.



**Slika 6.11:** Bočna erozija brežin po celotni višini brežine (levo) ali le na nekonsolidiranem zgornjem delu brežine (desno) (povzeto po FAN, 2015).

c) Erozijska območja vrha brežine. Zgornji rob brežine se najintenzivneje erodira zaradi preplavljanja zgornjega roba povratnega spiranja, ko se tok vode vrača nazaj v strugo (slika 6.12). Ta proces erozije je povezan z izpustom vode iz struge in je med drugim odvisen od položaja dna med poplavo. Povratni tok vode lahko povzroči tudi erozijo zgornjega roba pobočja.



**Slika 6.12:** Erozijska na območju vrha brežine (povzeto po FAN, 2015).

5) Razmejitev območij rečne erozije na plazljivih območjih. V času obsežnejših padavinskih dogodkov pride do aktiviranja številnih plazljivih območij v neposredni bližini strug vodotokov. Proces so najizrazitejši v ozkih, v topografijo terena vrezanih hudourniških strugah, kjer lahko erozija ob vznožju brežin strug povzroči zdrs pobočja nad strugo. Pri ocenjevanju nevarnosti je treba razlikovati med procesom proženja zemeljskega plaz in bočno erozijo, ki ju je treba obravnavati ločeno. Bočna erozija je proces v strugi, ki ga povzroči neposredna erozija dna struge ali brežine zaradi gibanja vodnega toka. Zemeljski plaz je masni premik, ki ga povzroči geotehnična nestabilnost ali porušitev pobočja. Vendar pa oba procesa vplivata drug na drugega. Po eni strani rečna erozija pri dnu pobočja povzroči izrazito povečanje naklona pobočja, tako da pobočje nad njim postane nestabilno. Po drugi strani pa zemeljski plaz v strugi odloži razmeroma veliko količino materiala, ki lahko začasno zaščiti podlago pobočja pred erozijo (slika 6.13), lahko pa tudi nevarno zajezi vodni tok.



**Slika 6.13:** Primer razmejitev procesov bočne erozije brežin rečne struge in območja zemeljskega plaz (FAN, 2015).

Priporočilo za oceno nevarnosti zaradi rečne erozije se nanaša le na bočno erozijo, ki je posledica hidravličnih razmer v strugi vodotoka. Za ocenjevanje nevarnosti zemeljskih plazov je treba upoštevati ostale primerne metode. Če oba procesa analizirajo različni strokovnjaki, je treba zagotoviti, da si strokovnjaki izmenjajo svoje ocene in jih po potrebi uskladijo.



### 6.3.2 Ocena erozijskih obremenitev dna in brežin struge

Za zgoraj opisane procese, ki predstavljajo nevarnost razvoja procesov rečne erozije, se ocenijo vrednosti erozijskih obremenitev (preglednica 6.2). V številnih primerih je potrebna strokovna in kvalitativna ocena, ki pogosto zadostuje za izdelavo karte nevarnosti rečne erozije. V kompleksnejših primerih pa je treba s pomočjo hidravličnih izračunov določiti vrednosti hidravličnih obremenitev, da se lahko izpolnijo dodatne zahteve za izdelavo podrobnejše karte nevarnosti rečne erozije. Erozijsko dna v velikem obsegu lahko določimo na osnovi hidravlične obremenitve dna in premestitvene zmogljivosti vodotoka. Odločilna spremenljivka obremenitve je vrednost strižne napetosti na območju dna struge in brežin. V primeru nepravilnosti v prečnem prerezu struge je lahko hidravlična obremenitev lokalno precej večja kot v primeru enakomernih odtočnih razmer. Dodatno je izpostavljeno, da imajo nepravilnosti v strugah večjo vlogo pri majhnih vodotokih kot pri velikih.

**Preglednica 6.2:** Postopek ocenjevanja obremenitev brežin strug erozijskim procesom.

<p><b>Erozija dna oz. pete brežine</b></p>	<p><i>Osnovna analiza:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ocenite globine erozije dna in intenzivnost odplavljanja materiala z območja pete brežine.</li> <li>- Posebno pozornost namenite odplavljanju zaradi nepravilnosti v strugi.</li> </ul> <p><i>Razširjena analiza:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Določite erozijsko dna z izračunom strižnih napetosti na območju dna struge oz. pete brežin.</li> <li>- Izračun globine odplavljanja.</li> </ul>
<p><b>Bočna erozija</b></p>	<p><i>Osnovna analiza:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Strokovna ocena intenzivnosti procesov bočne erozije.</li> <li>- Posebno pozornost namenite odplavljanju zaradi nepravilnosti v strugi.</li> </ul> <p><i>Razširjena analiza:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Izračun strižnih napetosti na območju bočne erozije.</li> <li>- Ocena maksimalnih obremenitev v primeru nepravilnosti v strugi.</li> </ul>
<p><b>Erozija območja vrha brežine</b></p>	<p><i>Osnovna analiza:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Strokovna presoja glede na poplave.</li> </ul> <p><i>Razširjena analiza:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Izračun strižnih napetosti na območju vrha brežine.</li> </ul>

Predlagani pristopi za količinsko opredelitev parametrov obremenitve brežin z erozijskimi procesi so bili razviti za vodotoke z zmernim naklonom in prevladujočimi procesi rečne hidravlike, zato jih ni mogoče vedno uporabiti za strme hudournike, v katerih se premeščajo velike količine plavin. Kljub temu je mogoče tveganje erozije brežin v strmih vodotokih oceniti s pomočjo tega priporočila. Ob tem je treba upoštevati, da so glede na vrsto procesa (npr. drobni tok ali velike količine plavja) pomembni drugi vzroki za poplavno in erozijsko nevarnost.



## 6.4 Ocena nevarnosti erozije morskih brežin

Erozija morskih brežin se razlikuje od »klasične« vodne erozije v tem, da na kamnine oz. sedimente deluje poleg padavin in vetra tudi erozija morja, predvsem preko delovanja plimovanja in valovanja. Pristope lahko ločimo na naslednje vrste: na meritve erozije z metodami daljinskega zaznavanja ter geodetske meritve, na ocene erozije z določanjem erozijske ogroženosti ali dovzetnosti za erozijo s pristopi v GIS okolju z združevanjem informacijskih slojev ter na terenske inženirskogeološke metode merjenja parametrov diskontinuitet ali kamnin. Omeniti velja, da se večina teh pristopov lahko uporabi tudi za merjenje ostalih erozijskih procesov vezanih na, v prejšnjih poglavjih opisane, procese rečne erozije. Glavno omejitev pri nekaterih pristopih predstavlja predvsem prostorski obseg zajema podatkov. V nadaljevanju so na kratko predstavljene metode po teh sklopih.

Pristopi k oceni nevarnosti erozije morskih brežin so precej različni, ker se tematike raziskovanja dokaj razlikujejo, tukaj je naštetih le nekaj glavnih del, v katerih so avtorji obravnavali tematiko erozije ali z njo povezanih procesov na slovenski obali: osnovne geološke raziskave so povzete in objavljene v vodiču ekskurzije za 4. slovenski geološki kongres (Vrabec in Rožič, 2014), analize diskontinuitet v prispevku Vrabca in Jordanove (2017), erozijski procesi na izbranih odsekih obale v članku Šegine in sod. (2012), z modeliranjem padanja skal se je v diplomskem delu ukvarjala Prašnikar (2016), z morfološkimi analizami klifa Kolega in Poklar (2012), s spremembami na klifu pa Kolega in Prelec (2016) ter v zadnjem času Furlani in sod. (2023). Z erozijskimi procesi v zaledju Slovenske Istre se je v več delih ukvarjal Zorn (2009). Z metodami inženirsko-geoloških meritev in GIS pristopi ogroženosti po posameznih odsekih se še aktivno ukvarjajo Verbovšek in sodelavci (2021, 2023) v raziskovalnem projektu ARIS J1-2477.

Karta nevarnosti za kopalce in obiskovalce Krajinskega parka Strunjan s poudarkom na procesih padanja skal in kamenja je preko GIS analize predstavljena na spletni strani projekta Cliffall (<https://sites.google.com/view/cliffall>). Podoben pristop je bil uporabljen za karto Krajinskega parka Debeli rtič, dostopno na informacijskih tablah KP Debeli rtič in na spletnih stran občine Ankaran.

### 6.4.1 Meritve erozije z metodami daljinskega zaznavanja

Med neposrednimi meritvami so najbolj uporabne metode daljinskega zaznavanja, saj imajo pred klasičnimi ročnimi meritvami precejšnje prednosti:

- gre za masovni zajem večjega števila podatkov,
- zajem je hiter,
- ni težav z meritvami na nevarnih ali problematičnih delih obale (strmi klifi, padanje kamnov itd.),
- možen zajem tudi v primeru slabega vremena,
- manjša subjektivnost pri meritvah, sploh pri izbiri lokacij.

#### 6.4.1.1 Zajem podatkov s fotogrametrijo

Pri zajemu podatkov z metodami fotogrametrije gre za fotografiranje zemeljskega površja in izdelovanje kart na osnovi tako dobljenih posnetkov, ki jih nato uporabimo za izdelavo 3D modela površin, predvsem pa lahko iz razlik med posameznimi kartami zemeljskega površja izračunamo spremembo v časovnem intervalu, ki je nastala zaradi erozije kamnin oz. sedimentov. Gre za pasivno meritev, kjer merimo RGB vrednosti oz. optično zajemamo površje preko fotografij iz različnih stojišč,

te fotografije pa nato s posebnimi programi združimo v 3D model površja, iz katerega računamo spremembe površja.

Fotografiranje lahko izvajamo na več načinov; ročno ali iz letalnikov, danes večinoma to izvajamo z brezpilotnimi letalniki (BPL, angl. *Unmanned Aerial Vehicles - UAV* oz. *Unmanned Aerial Systems - UAS*) oz. droni (sliki 6.14 in 6.15). Prostorska ločljivost tovrstnih posnetkov je večinoma v rangu centimetrov, kar zadošča za izračun erozije.



**Slika 6.14:** Snemanje obalnih klifov v okolici Strunjana z brezpilotnim letalnikom (na fotografiji M. Vrabec, BPL DJI Phantom 4 RTK in geodetske tarče; avtor fotografij: T. Verbovšek).



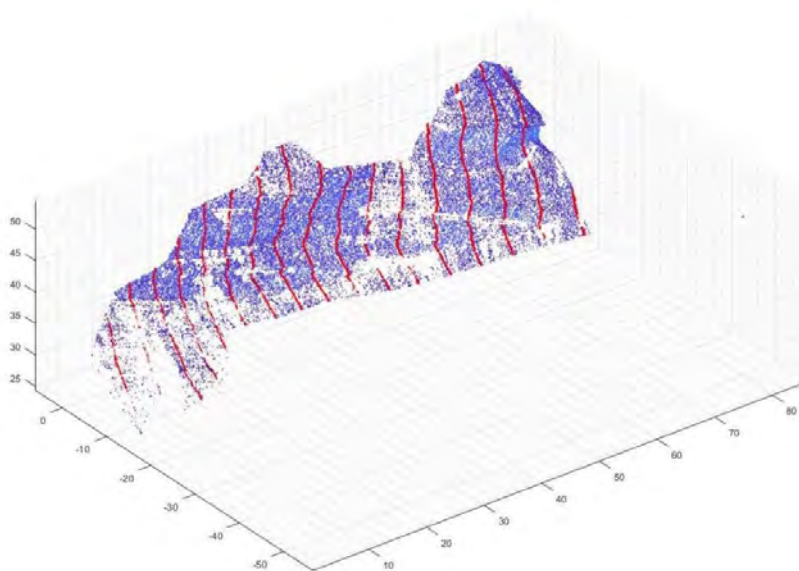
**Slika 6.15:** Primer 3D modela klifa v Piranu, narejenega z brezpilotnim letalnikom (avtor modela: K. Kozmus Trajkovski). Pod hišo župnišča (levo), ki je bila v fazi sanacije, so na vznožju vidne geodetske tarče.

#### 6.4.1.2 Zajem podatkov s terestričnim laserskim skenerjem (TLS)

Masovni zajem merskih točk lahko opravimo tudi s terestričnim laserskim skenerjem (angl. *Terrestrial Laser Scanning, TLS*), ki spada med laserske oz. lidarske meritve. Gre za aktivno metodo, kjer oddajamo laserski svetlobni signal in merimo njegovo odbojnost (tako intenziteto kot predvsem čas potovanja, ki ga preračunamo v razdaljo). Laserski skener moramo postaviti na fiksno stojišče in v tem primeru snemamo površino terena večinoma pravokotno. Skener je sicer možno fiksirati tudi na letalnik oz.

dron, toda v tem primeru snemamo površino vertikalno, kar za potrebe erozije morskih obal večinoma ni primerno.

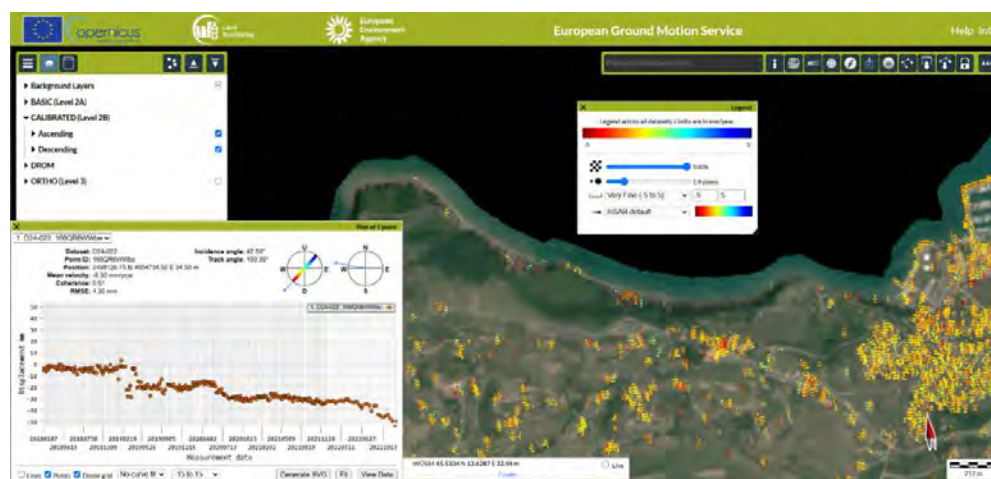
Kot rezultat te metode dobimo 3D t.i. oblak točk (angl. *Point Cloud*, slika 6.16), iz katerega nato podobno kot pri fotogrametriji izračunamo razlike med površjem, posnetim v različnih časovnih obdobjih. Natančnost laserskih snemanj je večja kot pri fotogrametriji, bistvena prednost je tudi v tem, da lahko snemamo v temi oz. skoraj neodvisno od vremenskih pogojev, kar za optično fotogrametrijo ne velja. Slabost je pa predvsem v tem, da potrebujemo fiksno stojišče za skener, kar je za snemanje obalnih klifov precej težavno, saj to pomeni stojišče v morju za snemanje pravokotno na steno klifa. Tej težavi se da izogniti z montiranjem TLS na brezpilotni letalnik, ki snema površino klifa vodoravno oz. pravokotno na ploskev pobočja.



**Slika 6.16:** Rezultat skeniranja odseka klifa pri Strunjanu s TLS (avtor: K. Kregar). Modre točke predstavljajo oblak točk, rdeče črte so profili za namen simulacije padanja skal.

#### 6.4.1.3 Zajem podatkov s satelitsko metodo interferometrije (InSAR)

Metoda satelitske interferometrije je le pogojno uporabna za spremljanje morske erozije, saj pri njej zajemamo podatke v navpični smeri, iz satelitov, ki krožijo okoli Zemlje. Pri tej metodi uporabljamo podatke satelitov, ki aktivno oddajajo radarski signal in ga nato po odboju s površin beležijo ter na ta način preko časovnega zamika rezultat preračunajo v razdaljo oz. spremembo merjenih točk. Gre tudi za aktivno meritev, kjer dobimo zelo natančne meritve z milimetrsko natančnostjo sprememb površja. Bistvena prednost metode je tudi v tem, da so podatki satelitov od leta 2014 dalje brezplačni za območje EU (slika 6.17), čeprav gre pri tem omeniti, da gre za že procesirane podatke, za lastno obdelavo pa je potrebno precej znanja in specializirana programska oprema. Težava uporabnosti te metode za meritve morske erozije pa je predvsem v tem, da je zelo težko zaznati oz. meriti premike na vertikalnih stenah, tako zaradi naklona sten, kot tudi zaradi orientacije (azimuta) pobočij, saj niso vsa primerna za satelitsko interferometrijske obdelave (prihaja do t.i. senčenj in manjkajočih podatkov, poleg tega pa sateliti snemajo v dveh geometrijsko različnih orbitah in so podatki za določen del obale uporabni le pri eni od teh dveh).



**Slika 6.17:** Primer javno dostopnih rezultatov meritev izbrane točke na obali med rtom Ronek in Izolo (posnetek portala European Ground Motion Service – EGMS, <https://egms.land.copernicus.eu/>). Levo spodaj je prikazan časovni potek lokacije merske točke na klifu, kjer so vidni trije premiki točke oz. klifa (predvsem v začetku leta 2019, nato pa tudi v sredini 2020 in 2022).

#### 6.4.1.4 GNSS meritve

Za določevanje premikov površja se lahko uporabi tudi klasično geodetsko izmero s tahimetri ali GNSS meritvami izbranih točk, toda v teh primerih dobimo kot rezultat le malo podatkov. Podatki so sicer zelo natančni, s prostorsko ločljivostjo milimetra ali manj, toda za meritve erozije tovrstne metode niso najbolj primerne, saj take natančnosti niti ne potrebujemo. Teh metod zato v nadaljevanju ne opisujemo.

### 6.4.2 Ocene erozijske ogroženosti z GIS pristopi

Za razliko od neposrednih merjenj, opisanih v zgornjih poglavjih, lahko predvidimo oz. ocenimo erozijske procese tudi z upoštevanjem številnih dejavnikov oz. faktorjev, ki vplivajo na erozijo. Gre za klasičen pristop v GIS okolju, kjer sprva izberemo vse dejavnike, za katere sklepamo, da imajo vpliv na erozijo. Nato te dejavnike kvantitativno ovrednotimo, ter jih nato preko uteženega povprečja združimo v končni faktor npr. erozijske ogroženosti. Pristopov je zelo veliko med seboj se razlikujejo tako glede na različne pogoje izvedbe (gre za lokacije z različnim podnebjem in geološko zgradbo, kar vpliva na izbor faktorjev), kot predvsem na izbiro vplivnih faktorjev (nekateri avtorji metodo poenostavljajo s čim manj faktorji, drugi pa skušajo zajeti čim večje število faktorjev). Primerjava metod je opisana v monografiji avtorjev Rangel-Buitrago in Anfuso (2013).

V nadaljevanju so predstavljene tri metode, ki so po pregledu literature najbolj primerne za oceno erozijske ogroženosti slovenske obale in smo jih tudi že testno uporabili.

#### 6.4.2.1 Metoda indeksa erozijske ogroženosti (del Rio in Gracia, 2009)

Metoda španskih avtorjev Del Rio in Gracia (2009) temelji na izračunu dveh delnih indeksov - indeksa nevarnosti (angl. *Hazard Index, HI*) ter indeksa vplivov (angl. *Impact Index, II*), ki ju nato združimo v skupni indeks ogroženosti (angl. *Risk Index, RI*). Obalo, ki jo želimo proučiti, v GIS okolju razdelimo na ločene odseke, nato pa vsakemu odseku pripišemo numerično vrednost posameznih faktorjev, ki lahko vplivajo na erozijo.

Za izračun HI, ki predstavlja »naravni faktor«, potrebujemo 11 fizikalnih spremenljivk oz. faktorjev, ki zajemajo litologijo klifa, strukturo klifa (razpokanost), naklon klifa, prisotnost in vrsto zaščitne obale, prisotnost obalne platforme oz. abrazijske police, gradbenih konstrukcij ob vznožju klifa, razpon plimovanja, izpostavljenost nevihtnim valovom, razliko višin valov, dvigovanje morja ter padavine (preglednica 6.3).

Med šest družbenoekonomskih vplivnih faktorjev, iz katerih izračunamo II, pa spadajo: raba tal, odstotek razvitih območij, prisotnost zaščitenih območij, prisotnost infrastrukture, gostota prebivalstva ter rast prebivalstva.

Oba indeksa (HI in II) sprva izračunamo kot absolutna, nato pa ju normiramo kot relativna pred nadaljnjimi izračuni, da poenotimo različne enote in razpone vrednosti, npr. za HI:

$$HI_{abs} = \sum a_n f_n \quad (6.1)$$

$$HI_{rel} = \frac{HI_{abs} - \min HI_{abs}}{\max HI_{abs} - \min HI_{abs}} \cdot 100 \quad (6.2)$$

kjer je:  $f_n$ ...utežni faktor (vrednosti 0,5; 0,8 ali 1,0),  
 $a_n$ ...vrednost spremenljivke oz. faktorja,  
 $\min HI_{abs}$ ...najmanjša vrednost absolutnega HI med vsemi odseki,  
 $\max HI_{abs}$ ...največja vrednost absolutnega HI med vsemi odseki.

Pri izračunu končnega indeksa ogroženosti RI se dobljene vrednosti normalizirajo in izrazijo kot odstotek največje vrednosti teoretičnega tveganja:

$$RI = \frac{nHI}{n} \cdot HI_{rel} + \frac{nII}{n} \cdot II_{rel} \quad (6.3)$$

kjer je:  $nHI$ ...število spremenljivk, ki sestavljajo indeks HI oz. II,  
 $n$ ...število vseh spremenljivk.

Vplivni faktorji so originalno ovrednoteni z oceno od 1 do 4, končni indeks RI pa ima razpon od 0 do 1, kjer je vrednost 1 najvišja stopnja erozijske ogroženosti.

Metoda avtorjev del Rio in Gracia (2009) je bila originalno preizkušena in potrjena z uporabo podatkov o stopnjah erozije klifov in masovnih premikih na obali province Cádiz v JZ Španiji, uporabili pa smo jo tudi za določanje erozijske ogroženosti klifov za slovensko obalo. Celotno slovensko obalo smo razdelili na 30 odsekov, kjer so bili prisotni klifi; tako naravni klifi, ki segajo direktno v morje, kot tudi tisti, ki imajo ob vznožju cesto ali manjši del obale, ki bi bil ob dvigu obale ali ekstremnih vremenskih dogodkih izpostavljen delovanju morja (npr. klif na obalno cesto Koper–Izola). Predlagani pristop omogoča razvrščanje obalnih klifov v cone glede na stopnjo tveganja, vključno s prepoznavanjem kritičnih območij, kjer bi bilo treba izvesti določene zaščitne ukrepe. Ta metoda je relativno enostavna in znanstveno utemeljena, ne da bi zahtevala obsežne in podrobne raziskave območja, na katerem naj bi se uporabljala.



**Preglednica 6.3:** Primer tabele za izračun indeksa HI po metodi avtorjev del Rio in Gracia (2009).

Classification and ranking of the variables included in the Hazard Index (1—minimum hazard, 4—maximum hazard).

Variable	Hazard ranking
A—Cliff lithology	1—Plutonic, volcanic, resistant metamorphics 2—Limestones, sandstones, conglomerates 3—Non-resistant metamorphics, fine consolidated sediments, coarse unconsolidated sediments 4—Fine unconsolidated materials
B—Cliff structure	1—No significant discontinuities 2—Alternate sequences of soft and hard materials 3—Isolated gullies and/or evident groundwater flow and/or moderate cracks/joints/faults 4—Coastal badlands and/or dense cracks/joints/faults
C—Cliff slope	1—Slope <25° 2—Slope 26°–50° 3—Slope 51°–75° 4—Slope >75°
D—Protective beach	1—Wide/high beach (waves reach the cliff at spring tides coinciding with storm surges) 2—Intermediate beach (waves reach the cliff at spring tides or during storm surges) 3—Narrow/low beach (waves reach the cliff during daily high tide) 4—No beach
E—Rocky shore platform	1—Wide, continuous intertidal rocky shore platform 2—Narrow, discontinuous intertidal rocky shore platform 3—Submerged rocky shore platform 4—No rocky shore platform
F—Engineering structures at cliff foot	1—Seawall or revetment at the cliff foot (whole) 2—Not considered 3—Seawall or revetment at the cliff foot (partial) 4—No structure at cliff foot
G—Tidal range	1—Hypertidal (MSTR >6 m) 2—Macrotidal (MSTR 4–6 m) 3—Mesotidal (MSTR 2–4 m) 4—Microtidal (MSTR <2 m)
H—Exposure to storm wave fronts	1—Roughly shore-normal storm wave fronts (angle 81°–90°) 2—Angle 46°–80° 3—Angle 11°–45° 4—Shoreline subparallel to main storm wave fronts (angle <10°)
I—Difference between storm and modal wave height	1—Difference <0.5 m 2—Difference 0.5 m–2 m 3—Difference 2 m–3.5 m 4—Difference >3.5 m
J—Relative sea-level trend	1—Change <–1 mm/yr (RSL fall) 2—Change –1 mm/yr to +1 mm/yr (RSL stable) 3—Change +1 mm/yr to +2.5 mm/yr (RSL moderately rising) 4—Change >+2.5 mm/yr (RSL strongly rising)
K—Rainfall	1—Mean annual precipitation <500 mm 2—Mean annual precipitation 500–1000 mm 3—Mean annual precipitation 1000–1500 mm 4—Mean annual precipitation >1500 mm

#### 6.4.2.2 Metoda indeksa obalne ranljivosti – CVI

Metodo indeksa obalne ranljivosti (angl. *Costal Vulnerability Index*, CVI) je predstavila v članku Vivien Gornitz (Gornitz, 1991), kjer je upoštevala sedem vplivnih faktorjev: relief oz. višino klifa, tip kamnine oz. litologijo, morfologijo oz. tip površja, vertikalni dvig površja, umikanje oz. stanje obale, razpon valovanja in višino valov (preglednica 6.4).

**Preglednica 6.4:** Tabela vplivnih faktorjev za izračun indeksa CVI (Gornitz,1991).

Coastal risk classes					
Variable	Rank				
	Very low 1	Low 2	Moderate 3	High 4	Very high risk 5
Relief (m)	≥ 30.1	20.1–30.0	10.1–20.0	5.1–10.0	0–5.0
Rock type (relative resistance to erosion)	Plutonic Volcanic (lava) High-medium grade metamorphics	Low-grade metamor. Sandstone and conglomerate (well-cemented)	Most sedimentary rocks	Coarse and/or poorly-sorted unconsolidated sediments	Fine unconsolidated sediment Volcanic ash
Landform	Rocky, cliffed Coasts Fiords Fiards	Medium cliffs Indented coasts	Low cliffs Glacial drift Salt marsh Coral Reefs Mangrove	Beaches (pebbles) Estuary Lagoon Alluvial plains	Barrier beaches Beaches (sand) Mudflats Deltas
Vertical movement (RSL change) (mm/yr)	≤ -1.1 Land rising ←	-1.0-0.99	1.0-2.0 within range of eustatic rise	2.1-4.0 Land sinking →	≥ 4.1
Shoreline displacement (m/yr)	≥ 2.1 Accretion ←	1.0-2.0	-1.0- +1.0 Stable	-1.1- -2.0	≤ -2.0 Erosion →
Tidal range m (mean)	≤ 0.99 Microtidal ←	1.0-1.9	2.0-4.0 Mesotidal	4.1-6.0	≥ 6.1 Macrotidal →
Wave height, m (max.)	0-2.9	3.0-4.9	5.0-5.9	6.0-6.9	≥ 7.0

**Preglednica 6.5:** Karta vplivnih faktorjev za izračun dopolnjenega indeksa CVI (Gornitz in sod.,1994).

Table 1. Coastal risk classification scheme.

Rank	Very low	Low	Moderate	High	Very high risk
Variable	1	2	3	4	5
Elevation (m)	≥30.0	20.1-30.0	10.1-20.0	5.1-10.0	0-5.0
Geology (relative resistance to erosion)	Plutonic Volcanic (lava) High-medium grade metamorphics	Low-grade metamorphics Sandstone and conglomerate (well-cemented)	Most sedimentary rocks	Coarse and/or poorly sorted unconsolidated sediments	Fine unconsolidated sediment Volcanic ash
Landform (geomorphology)	Rocky, cliffed Coasts Fiords Fiards	Medium cliffs Indented coasts	Low cliffs Glacial drift Salt marsh Coral reefs Mangrove	Beaches (pebbles) Estuary Lagoon Alluvial plains	Barrier beaches Beaches (sand) Mud flats Deltas
RSL change (mm/year)	<-1.0 Land rising ←	-1.0-0.99	1.0-2.0 Within range of eustatic rise	2.1-4.0 Land sinking →	>4.0
Shoreline erosion/accretion (m/year)	>2.0 Accretion ←	1.0-2.0	-1.0-+1.0 Stable	-1.1--2.0	<-2.0 Erosion →
Mean tide range (m)	<1.0 Microtidal ←	1.0-1.9	2.0-4.0 Mesotidal	4.1-6.0	>6.0 Macrotidal →
Maximum wave height (m)	0-2.9	3.0-4.9	5.0-5.9	6.0-6.9	>6.9
Annual tropical storm prob. (%)	0-8.0	8.1-12.0	12.1-16.0	16.1-20.0	>20.1
Annual hurricane prob. (%)	0-4.0	4.1-8.0	8.1-12.0	12.1-16.0	16.0-20.0
Hurricane frequency-intensity index	0-20	21-40	41-80	81-120	>120
Mean forward velocity (m/sec)	>15	15.0-12.0	12.1-9.0	9.1-6.0	<6.0
Annual mean no. extra-tropical cyclones	0-10.0	10.1-20.0	20.1-30.0	30.1-40.0	>40.1
Mean hurricane surge (m)	0-2.0	2.1-4.0	4.1-6.0	6.1-7.0	>7.0

Izračun indeksa CVI je enostaven, faktorje zmnožimo, delimo s številom vplivnih faktorjev in jih korenimo (primer za 7 faktorjev):

$$CVI = \sqrt{\frac{a \cdot b \cdot c \cdot d \cdot e \cdot f \cdot g}{7}} \quad (6.4)$$

Faktorji so ovrednoteni z razredi tveganja od 1 do 5 (od zelo nizke do zelo visoke stopnje), CVI pa ni omejen na vrednosti med 0 in 1.

Avtorica je originalnemu pristopu kasneje s soavtorji dodala še šest dodatnih vplivnih faktorjev (Gornitz in sod., 1994), ki pa so bolj tematsko vezani na obale oceanov, saj gre za faktorje, vezane na tropske nevihte in orkane (preglednica 6.5).

### 6.4.2.3 Metoda indeksa erozijske dovzetnosti – CSI

Tretja metoda, ki jo omenjamo kot pristop k oceni erozijske nevarnosti obale morja, je metoda italijanskih avtorjev Tursi in sod. (2023), ki jo tukaj na kratko imenujemo *metoda CSI*. Podobno kot pri metodi avtorjev del Rio in Gracia (2009) je tukaj končni indeks CSI sestavljen iz dveh delnih indeksov; indeksa fizičnih elementov (angl. *Physical Elements Index*, PEI) in gonilnega indeksa (angl. *Coastal Forcing Index*, CFI). Prvi indeks zajema spremenljivke, ki opisujejo morfološke in geomehanske značilnosti obal, drugi pa sile, ki vplivajo na obalo, na primer valove, plimovanje in dvigovanje morske gladine.

Končni indeks sestavlja 20 faktorjev, 4 za CFI (preglednica 6.6) in 16 za PEI. Faktorji za CFI so razdeljeni v tri razrede (vrednost 1 predstavlja najnižjo ranljivost, vrednost 3 pa najvišjo), faktorji za PEI pa v pet razredov. Tako kot pri metodi del Rio in Gracia (2009) so tudi tukaj spremenljivke utežene, in sicer s faktorjem 0,5 tiste, ki imajo minimalen vpliv, s faktorjem 0,8 tiste z vmesnim vplivom in z 1 tiste, ki imajo največji vpliv.

$$PEI_x = \sum_{i=1}^n \frac{PE \cdot WFi}{n_{PEI}} \quad (6.5)$$

$$CFI_x = \sum_{i=1}^n \frac{CI \cdot WFi}{n_{CFI}} \quad (6.6)$$

V obeh enačbah je WFi utežni faktor, nPEI pa število vseh spremenljivk fizičnih elementov.

**Preglednica 6.6:** Primer izračuna indeksa CFI (Tursi in sod. (2023)).

Parameter	RATING			Weight
	Low/Null (1)	Medium (2)	High (3)	
Significant wave height at a specific coastal sector (% of initial $H_s$ )	$H_s \leq 20\%$	$20\% < H_s \leq 60\%$	$60\% < H_s \leq 100\%$	1
Tidal range	Macrotidal ( $T_d \geq 4$ m)	Mesotidal ( $4 < T_d \leq 2$ m)	Microtidal ( $T_d < 2$ m)	0,5
Degree of littoral exposition to wave fronts	$45^\circ \leq \alpha < 10^\circ$ Oblique	$10^\circ \leq \alpha < 5^\circ$ Subparallel	$5^\circ \leq \alpha < 0^\circ$ Parallel	0,8
Relative Sea level trend <sup>1</sup>	Fall/Stable (Rising lower than the average value at regional scale <sup>2</sup> )	Rising (Rising equal to average local trend at regional scale)	Highly rising (Rising higher than the average local trend at the regional scale)	0,5

Notes: <sup>1</sup> Estimation expected by the end of the century (2100). <sup>2</sup> Regional values are from the IPCC SSP2-4.5 scenario and are corrected by taking local land movement data into account.

Končni izračun predstavlja indeks obalne dovzetnosti za erozijo (*Coastal Susceptibility Index – CSI*), pri čemer sta nPEI in nCFI sta števili spremenljivk, ki jih ta indeksa zajemata:

$$CSI_x = \frac{(PEI \cdot nPEI) + (CFI \cdot nCFI)}{(nPEI + nCFI)} \quad (6.7)$$

### 6.4.3 Inženirskogeološke meritve

Za določevanje parametrov, potrebnih za razumevanje in spremljanje erozije, uporabljamo številne terenske metode, ki gredo tematsko v sklop geoloških oz. inženirsko-geoloških raziskav. Z njimi kvantificiramo lastnosti kamnin ali sedimentov, ki so dovzetni za erozijo, in nato te parametre primerjamo z ostalimi metodami, opisanimi v tem poglavju. Med osnovne inženirskogeološke metode merjenja spadajo:

- meritve lastnosti diskontinuitet (orientacija, odprtost, raztezanje itd.),
- meritve enoosne tlačne trdnosti kamnin (v laboratoriju ali s Schmidtovim kladivom),
- meritve strižnih lastnosti kamnin,
- meritve tenzijskih lastnosti kamnin
- meritve hrapavosti razpok z Bartonovim glavnikom ali s skenerjem,
- meritve obstojnosti kamnin oz. sedimentov (angl. *slake durability test*),
- meritve mineraloške in kemične sestave kamnin oz. sedimentov.

Na podlagi teh rezultatov lahko ocenimo dovzetnost posameznih kamnin oz. sedimentov za erozijo, saj npr. mehkejši laporovci preperevajo drugače kot trši peščenjaki, orientacija razpok v kombinaciji z debelino plasti nam določa velikosti blokov, ki izpadajo pri spodjedanju plasti peščenjaka.

## 7 POVZETEK POGLAVIJ 1 DO 6

V okviru delovnega sklopa 1 smo podali pregled teoretičnih izhodišč (poglavja 1 do 4), ki omogočajo bolj poglobljeno razumevanje kompleksne dinamike procesov rečne erozije in erozije morja. Teoretična izhodišča sicer predstavljajo osnovo za razumevanje mehanizmov pojavljanja različnih oblik rečne erozije, vendar je dejansko erozijsko dogajanje pogosto posledica lokalnih hidravličnih razmer in spremljajočih procesov premeščanja in odlaganja plavin in plavja. Zato je zelo pomemben del ocenjevanja prostorskega dosega območij erozije celinskih voda in morja analiza dogajanja ob preteklih poplavnih dogodkih, v času katerih so se pojavile različne oblike rečne erozije oz. erozije morja (Poglavje 5). Ravno prepoznavanje procesov rečne erozije in njihove intenzitete v preteklih dogodkih oz. glede na značilnosti območja na podlagi različnih razpoložljivih podatkov (predstavlja ključni del nadaljnjih ocen potencialnega prostorskega dosega tovrstnih območij (v smislu erozijskega rečnega koridorja) oz. opredelitve območij erozije celinskih voda in erozije morja. V 6. poglavju so predstavljeni nekateri pristopi h kartiranju območij rečni eroziji predvsem z namenom določitve območij erozijskega koridorja vodotoka (pristopi, ki se uporabljajo na različnih prostorskih merilih in nivojih zahtevnosti analiz). Pristop, ki ga uporabljajo v Švici za analizo dejanskih erozijskih razmer po poplavnih dogodkih, je osnovan na podrobni analizi terenskih razmer, delno tudi v kombinaciji s hidravličnimi izračuni. Poudarek je predvsem na prepoznavanju intenzitete procesov rečne erozije na območjih samih rečnih strug, manj pa na kartiranju erozijskih procesov na obdajajočih poplavnih območjih. Poglavje 6 zaokrožuje predstavitev nekaterih pristopov k ocenjevanju nevarnosti erozije obale morja. V splošnem lahko na osnovi obravnavanih pristopov h kartiranju procesov rečne erozije ugotovimo, da za vodotoke s primerljivimi hidrografskimi in hidromorfološkimi lastnostmi, kot jih imajo vodotoki v Sloveniji, ne obstajajo enoznačne usmeritve za uporabo zgolj določenih podatkov oz. metod analiz (npr. samo rezultatov hidravličnega modeliranja, ki se običajno izvaja v okviru hidrološko-hidravličnih študij, v sklopu katerih se izdelujejo karte erozijske nevarnosti celinskih voda in morja), ampak gre za poskuse širše interpretacije procesov rečne erozije z uporabo različnih metod v odvisnosti od razpoložljivosti podatkov. Ravno zaradi zelo intenzivnega in pogosto nepričakovanega erozijskega dogajanja na območju Slovenije v okviru poglavja 8 podajamo usmeritve, kako morebitne razpoložljive podatke iz različnih virov uporabiti za prepoznavanje procesov rečne erozije in predvidevanje oz. oceno njihovega potencialnega prostorskega dosega.



## DELOVNI SKLOP 2

### 8 RAZVOJ METODOLOGIJE ZA OCENO INTENZIVNOSTI EROZIJSKIH PROCESOV IN KARTIRANJE OBMOČIJ EROZIJSKE NEVARNOSTI CELINSKIH VODA IN MORJA

V poglavjih 1–6 smo predstavili teoretično ozadje procesov rečne erozije. V okviru pregleda teoretičnih konceptov in tehničnih praks analize nevarnosti rečne erozije so bili prepoznani nekateri pristopi, ki smo jih v naslednjih poglavjih navezali na predlog metodologije za oceno intenzivnosti erozijskih procesov ter kartiranje območij erozijske nevarnosti celinskih voda in morja. V splošnem lahko iz pregleda nekaterih novejših pristopov, predstavljenih v poglavju 6 ugotovimo, da je v primerjavi z metodologijami za izdelavo kart poplavne nevarnosti, področje kartiranja erozijske nevarnosti zaradi delovanja celinskih voda in morja še vedno precej slabo opredeljeno in razdelano. Posledično se tudi pristopi k obravnavi tematike precej razlikujejo (tako metodološko kot tudi z vidika prostorske natančnosti opredelitve erozijskih procesov). Kot glavno skupno točko prikazanih teoretičnih konceptov in tehničnih praks v poglavju 6 bi lahko izpostavili predvsem prepoznavanje sedanjih in preteklih aktivnih območij rečne erozije na podlagi preteklega erozijskega dogajanja v zaledju obravnavanega odseka vodotoka ter predvsem sledenja časovne spremenljivosti tlorskih potekov rečnih strug. Mnogi praktični primeri in dogajanje v preteklih poplavnih dogodkih nakazujejo, da so potencialno erozijsko aktivne lahko praktično vse struge vodotokov hudourniškega značaja. Če upoštevamo ustalitveni in zaplavni vpliv izvedenih hidrotehničnih ureditev, lahko določene odseke izznamemo kot umirjene (a še vedno potencialno erozijsko aktivne). Ob tem pa seveda ne moremo mimo ključnega pomena ustreznega vzdrževanja hidrotehničnih ureditev in ostale vodne infrastrukture.

Kot izhodišče za nadaljnjo uporabo predlaganih usmeritev na podlagi teoretičnih osnov, predstavljenih v prejšnjih poglavjih, predlagamo in v nadaljevanju povzemamo nekatere pristope h kartiranju območij erozijske nevarnosti na nivoju opozorilnih kart erozije, ki so bile v preteklosti predlagane za območje Slovenije ter priporočila za analizo terenskih razmer in nabora virov podatkov z namenom prepoznavanja sprožitvenih mehanizmov, ki lahko vodijo v obsežnejše in intenzivnejše procese erozije celinskih voda in erozije morja. Pri tem želimo slediti principu, da se stopnja zahtevnosti analiz erozijske nevarnosti povečuje s poznanim (npr. na podlagi preteklih poplavnih dogodkov oz. drugih podatkov) oz. pričakovanim (na osnovi dodatnih analiz v zalednem prispevnem območju vodotoka ali lokalnih razmer vzdolž obravnavanega odseka vodotoka) obsegom erozijskih procesov v strugi vodotoka in obdajajočih poplavnih površinah. Izhodišče za začetno opredelitev stopnje zahtevnosti analize procesov rečne erozije in erozije morja v zakonodajnem okviru prepoznavanja erozijske nevarnosti celinskih voda in morja so usmeritve, opisane v nadaljevanju (Nivo 1). Kot pomembno izhodišče za opredelitev do pričakovanega obsega erozijskih procesov na Nivoju 1 lahko izpostavimo nove opozorilne karte verjetnosti pojavljanja zemeljskih in hribinskih plazov, ki se izdelujejo v sklopu projekta Zeleni slovenski lokacijski okvir (SLO4D) ter Opozorilne karte verjetnosti pojavljanja drobirskih tokov na območjih, kjer so bile tovrstne opozorilne karte v merilu 1:25.000 že pripravljene. Na podlagi začetnih usmeritev, do katerih bi se izdelovalci tovrstnih strokovnih podlag lahko strokovno utemeljeno opredelili (Nivo 1), so v poglavjih 8.2 in 8.3 podane podrobnejše usmeritve za manj kompleksne in kompleksnejše analize procesov rečne erozije (Nivo 2), na osnovi katerih se bi pristopilo k izdelavi kart erozijske nevarnosti celinskih voda in morja. Nivo 1 skladno s podrobnejšimi usmeritvami, predstavljenimi v nadaljevanju, predstavlja opozorilno (začetno) raven, na osnovi katere se odloča o relevantnosti pojava rečne erozije oz. erozije morja, zato bo moral biti usklajen z bodočimi

smernicami DRSV za interpretacijo erozijskih opozorilnih kart 1:25.000 (npr. po zgledu na izdelane smernice za opozorilne karte plazov 1:25.000). Shematsko je predlagana metodologija predstavljena v Prilogi 1.

Kot osnovo za določitev območij, kjer je pričakovan obseg erozijskega delovanja celinskih voda in morja omejen/majhen (manj kompleksne analize, opisane v poglavju 8.2) oz. območja, kjer je pričakovan obseg in potencialna škoda zaradi poplavne in nevarnosti celinskih voda in morja velik (kompleksnejše analize, opisane v poglavju 8.3), predlagamo, da se prvenstveno obravnavajo:

- 1) Odseki vodotokov na območjih pomembnega vpliva poplav, pri čemer se je treba opredeliti do potencialnega sproščanja erozijskega materiala v povirnih delih (npr. prisotnost aktivnih erozijskih žarišč) in razvitosti procesov rečne erozije oz. erozije morja.
- 2) Odseki, na katerih so bili v preteklosti (preteklih poplavnih dogodkih) ugotovljeni zelo intenzivni procesi rečne erozije oz. erozijski procesi morja predvsem z vidika poškodb grajenega okolja (kritične infrastrukture, večjega števila objektov idr.) in/ali se za odseke vodotokov domneva, da je dotok plavin iz gorvodnih aktivnih erozijskih žarišč zelo velik (npr. poznana plazljiva območja).
- 3) Strmi odsekih strug vodotokov, kjer je na podlagi manj kompleksnih analiz in razpoložljivih podatkov (npr. opozorilna karta verjetnosti pojavljanja linijske erozije) ocenjen velik potencial intenzivnih procesov linijske erozije.
- 4) Kompleksnejše analize erozije morja se predlaga predvsem na manjših erozijsko zelo aktivnih območjih, kjer opravimo analizo erozijske nevarnosti na nivoju številnih meritev diskontinuitet (predvsem razpok, prelomov in lezik med plasti), preučimo lastnosti plasti in predvsem izvajamo natančne meritve spreminjanja reliefa.

## **8.1 Usmeritve za začetno opredelitev do potencialne razvitosti procesov rečne erozije (Nivo 1)**

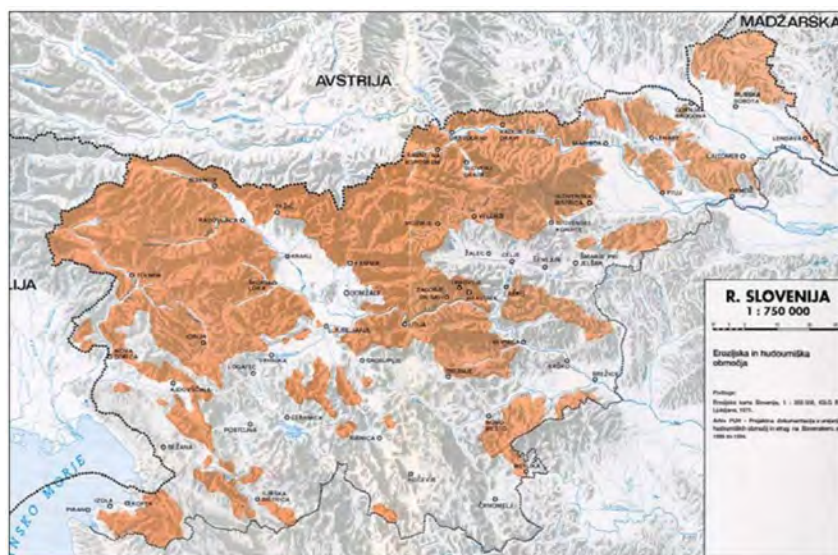
Osnovni namen izvedbe začetne opredelitve potencialne razvitosti procesov rečne erozije je v prvi vrsti sistematičen pregled morebitnih razpoložljivih podatkov o erozijskem potencialu prispevnega območja ter morebitnih podatkov o preteklih procesih rečne erozije oz. erozijskem dogajanju v času preteklih poplavnih dogodkov na obravnavanih odsekih vodotokov. Pri tem želimo izhajati iz splošne opredelitve erozijskih območij, in sicer da so to območja, kjer so prisotni vidni erozijski procesi in hkrati vključujejo površine, na kateri (glede na trenutne razmere) ni vidnih erozijskih procesov, vendar se ti lahko pojavijo predvsem v času ekstremnih hidroloških razmer, neugodnih hidrogeoloških razmer oz. zaradi antropogeno pogojenih dejavnikov (npr. spremenjene rabe zemljišč). Na Nivoju 1 je predvideno, da se izdelovalci tovrstnih analiz sistematično opredelijo do hidroloških, topografskih, hidrogeoloških, geoloških in pedoloških razmer na zalednem prispevnem območju in na obravnavanem odseku vodotoka. Tovrstne analize so v veliki meri zasnovane na analizah in prekrivanju GIS podatkovnih slojev, ki kot izhodišče uporabljajo predvsem digitalne modele višin (DMV), pridobljene z lidarskimi snemanji terena, relativne modele višin (relativni DMV) in ostale rastrske modele površja in naklonov površin, pridobljenih iz DMV ter ostalih podpornih prostorskih informacij. Dobro osnovo predstavljajo vse predhodno izdelane študije in razpoložljivi podatki, povezani s hidrološkimi (poplavnimi) razmerami, geološkimi in hidromorfološkimi analizami, podatki o vegetaciji in pretekli/sedanji rabi tal, podatki o preteklih škodah, povezanih s procesi rečne erozije in erozije morja ter morebitnimi ostalimi naravnimi nesrečami (npr. žled, požari itd.). Vsi zgoraj omenjeni podatki predstavljajo osnovo za vse nadaljnje

analize v smeri prostorske opredelitve obstoječih razsežnosti procesov rečne erozije (v smeri opredelitve *koridorja rečne erozije*), hkrati pa omogočajo tudi vpogled v preteklo dogajanje in strokovno oceno napredovanja in razvoja procesov rečne erozije v prihodnosti.

Menimo, da so zadovoljiv vir tovrstnih podatkov na območju Slovenije, za večino praktičnih primerov, v preteklosti izdelane opozorilne karte erozije, na podlagi katerih bi se lahko identificiralo prispevna območja, na katerih obstaja večji erozijski potencial in s tem tudi večji potencialni dotok erodiranega materiala do obravnavanih odsekov vodotokov oz. odplavljanje in nadaljnji transport materiala naprej po rečni mreži. Tovrstni erozijski procesi v zaledju so eden od osnovnih sprožilnih mehanizmov za različne procese rečne erozije, ki smo jih podrobneje predstavili v poglavjih 1 in 2. Tovrstno razumevanje procesov sproščanja, transporta in odlaganja erodiranega materiala gre v smeri obravnave erozijskih procesov v Uredbi o pogojih in omejitvah za izvajanje dejavnosti in posegov v prostor na območjih, ogroženih zaradi poplav in z njimi povezane erozije celinskih voda in morja (v nadaljevanju Uredba) in Pravilniku o metodologiji za določanje območij, ogroženih zaradi poplav in z njimi povezane erozije celinskih voda in morja, ter o načinu razvrščanja zemljišč v razrede ogroženosti (v nadaljevanju Pravilnik), kjer so procesi rečne erozije obravnavani kot naravni pojav odplavljanja, premeščanja in odlaganja preperelega kamninskega materiala na območjih vodnih in priobalnih zemljišč celinskih voda in morja ter na obdajajočih območjih, kjer se pričakuje razlivanje poplavnih voda. Večja intenzivnost tovrstnih procesov se pričakuje ravno na območjih, kjer je erozijski potencial zalednega prispevnega območja večji in na odsekih vodotokov, kjer so prisotne kritične hidravlične razmere z vidika erozijske odpornosti območja struge vodotoka in obdajajočega poplavnega območja.

Slovenija je svojo prvo karto erozije dobila z Vodnogospodarskimi (VG) osnovami leta 1973 in posodobljeno leta 1999 oz. 2001, ko so bile uvedene tri stopnje opozoril. Gledano z vidika celovite obravnave državnega ozemlja imata posebni pomen karti "Karta erozijskih žarišč in erodiranosti območij" ter karta "Erozija – plazovi in merska mesta" (VGO, 1973). Z vidika obravnave erozijske problematike po Zakonu o vodah (ZV-1) območje celotne Slovenije v sicer sorazmerno majhnem merilu pokrivajo predvsem podatki s kart, pripravljenih v okviru starejših analiz (Zemljič, 1970) in podatkovnih slojev, izdelanih leta 1994 in 1999 (PUH, 1994; PUH, 1999) (slika 8.1).

Podatkovni sloji, pripravljeni v prej omenjenih poročilih, prikazujejo ocenjen prostorski obseg površinske in deloma hudourniške erozije (območja erodiranosti in erozijska žarišča), stabilnosti pobočij in plazove (pogojno stabilna in nestabilna zemljišča), potencialna območja snežne erozije (plaznice snežnih plazov), porušitveno erozijo (skalni podori) ter opozorilna območja varovanja in izvajanja zaščitnih protierozijskih ukrepov (Zemljič, 1970; PUH, 1999). Glede na navedbe iz poročila PUH (2011) so bile tovrstne kartografske osnove leta 2001 predlagane kot del vodnogospodarskih vsebin za prostorski plan Slovenije. Podatki iz predhodno omenjenih kart so bili kot podlaga za nadaljnje delo uporabljeni v več virih, naknadno so bili v nadaljnjih strokovnih nalogah na temo obravnave erozije večinoma spremenjeni in dopolnjeni (PUH, 2011). Od takrat se prej omenjeni kartografski podatki na različne načine uporabljajo v vodarski praksi.



Slika 8.1: Erozijska in hudourniška območja, ki so označena z rjavo barvo (PUH, 1994).

### 8.1.1 Izdelava opozorilne karte erozije

Pomembno nadgradnjo predhodno omenjenih starejših podatkovnih slojev obsega različnih oblik erozije so predstavljali rezultati projekta Opozorilna karta erozije (OPKe), ki se je izvajal v treh fazah (PUH, 2008; 2010; 2011). Naloga "Opozorilna karta erozije – I. faza" je podala prerez stanja na področju obravnavanja erozijske nevarnosti v Sloveniji in z zbranimi podatkovnimi viri predstavila osnutek opozorilne karte erozije. Na ta način naj bi bile pripravljene ustrezne podlage za nadaljevanje del pri pripravi uradne opozorilne karte erozije Slovenije.

V okviru naloge "Opozorilna karta erozije – II. faza" je bil oblikovan predlog vsebine Opozorilne karte erozije Slovenije. Predlog Opozorilne karte erozije Slovenije je v osnovi enak karti, ki je bila leta 2001 za potrebe ARSO izdelana v projektu "Vodnogospodarske vsebine v prostorskem planu Slovenije", z naslovom: "EROZIJA: varstvena območja – ukrepi in omejitve", in ki povzema karto iz osnovnih strokovnih podlag iz leta 1999. Kartografski prikaz erozijskih območij in transporta plavin iz leta 1999 je bil izdelan v manjšem merilu (1:200.000), zato karta omogoča grob vpogled v prostorski obseg območij pojavljanja erozijskih procesov. Za omenjeno karto omejitev v prostoru (opozorilno karto erozije) sta bili določeni dve kategoriji omejitev v prostoru, pri čemer je bila druga kategorija razdeljena v dve podkategoriji. Kratak povzetek opisa kategorij je podan v nadaljevanju.

#### 1) Opozorilna območja strogega varovanja:

Na teh območjih načeloma ni dovoljena gradnja ali razširitev nobenih objektov ali naprav, v katerih bi se zadrževali ljudje ali živali; za posege pri možnih manjših varnih lokacijah znotraj območij strogega varovanja je potrebno vodnogospodarsko soglasje, potrebne so dodatne preverbe. V opozorilna območja strogega varovanja so bile uvrščene vse površine, kjer je ob izbruhih hudournih voda in različnih vrst erozije potrebno računati z možnostjo spodkopavanja temeljev objektov, njihovim poškodovanjem in celo uničenjem. Smrtne žrtve v teh objektih so možne. V teh območjih zato načeloma ni dovoljeno graditi ali razširiti nobenih objektov in naprav, v katerih bi se zadrževali ljudje ali živali. Za posege pri možnih manjših varnih lokacijah znotraj območij strogega varovanja je potrebno pridobiti soglasje, po potrebi opraviti dodatne preveritve. V opozorilna območja strogega varovanja naj bi bila vključena območja vodne erozije (vsa erozijska žarišča, območja III., IV. in V. kategorije

erodiranosti), plazovita območja (območja aktivnih zemeljskih plazov), območja porušitvene erozije (območja skalnih podorov in podorov hriba) ter območja snežne erozije (območja evidentiranih plaznic snežnih plazov).

## 2) *Opozorilna območja izvajanja zaščitnih ukrepov:*

V območja izvajanja zaščitnih ukrepov so bile uvrščene površine, kjer lahko pride zaradi različnih vrst erozije in hudourniških izbruhov do poškodb objektov, njihova porušitev pa je izključena. Smrtne žrtve v teh objektih so tudi ob naravnih ujmah praviloma izključene. Gradnja je ob upoštevanju primernih protierozijskih ukrepov možna, kar pa ne velja za posebno občutljive objekte. Pri rabi prostora je potrebno biti previden in preprečiti nastanek morebitnih škod. Za posege je potrebno soglasje ter opraviti dodatne preveritve. Dodatno sta bili opredeljeni dve podkategoriji in sicer:

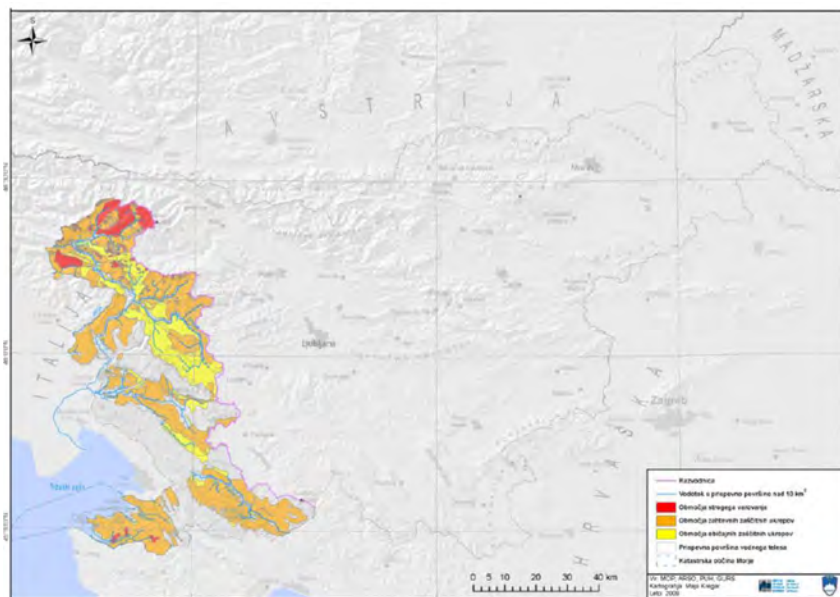
a) *opozorilna območja izvajanja zaščitnih ukrepov – zahtevnejši zaščitni ukrepi.* Na teh območjih mora biti poseganje v prostor skrbno preiščeno. Gradnja je načeloma možna ob upoštevanju zahtevnejših protierozijskih ukrepov, kar pa ne velja za posebno občutljive objekte. Za posege je potrebno vodnogospodarsko soglasje, potrebne so dodatne preverbe. Območja zahtevnejših zaščitnih ukrepov naj bi zajemala predvsem območja vodne erozije (območja II. kategorije erodiranosti) in plazne erozije (nestabilna zemljišča).

b) *opozorilna območja izvajanja zaščitnih ukrepov – običajni zaščitni ukrepi.* Na teh območjih je gradnja ob upoštevanju primernih protierozijskih ukrepov načeloma možna s temeljitejšo preverbo za posebno občutljive objekte, za posege je potrebno vodnogospodarsko soglasje, po potrebi se izvede dodatne preverbe. Območja običajnih zaščitnih ukrepov naj bi zajemala predvsem območja vodne erozije (območja I. kategorije erodiranosti) in plazne erozije (pogojno stabilna zemljišča).

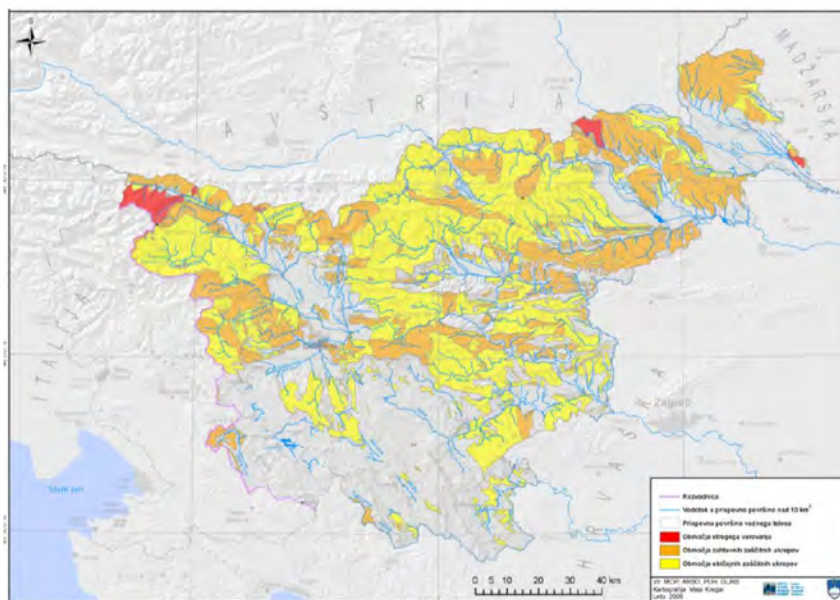
Karta erozijskih območij v sorazmerno majhnem merilu je na razpolago na kartah iz Načrta upravljanja voda (NUV, 2016), prikazanih na slikah 8.2 in 8.3. B Območja so na karti predstavljena z naslednjimi barvami: območja strogega varovanja – rdeča; območja zahtevnih zaščitnih ukrepov – oranžna; območja običajnih zaščitnih ukrepov – rumena. H kartografskemu podatkovnemu sloju je bila dodana opomba, da je treba protierozijsko ukrepanje načeloma upoštevati pri vseh posegih v prostor, še zlasti pa na negozdnatih površinah z nagibi  $> 5^\circ$ .

Splošno strokovno mnenje o zgoraj opisanih kartografskih slojih je, da so podatki zgolj pogojno prenosljivi na bolj podrobne prostorske nivoje, potrebna je njihova vsakokratna kritična presoja za posamezno lokacijo. Prav tako je razširjeno mnenje, da je karta na določenih območjih nepopolna, posplošena in ne zajema celotne in kompleksne problematike erozije v Sloveniji. Kljub temu karta velja za osnovo, kaj naj bi se nadgrajevala s podrobnejšimi kartiranjem erozijskih območij v večjih merilih. Menimo, da karta na predlaganem Nivoju 1 v kombinaciji s podrobnejšim poznavanjem in analizo lokalnih topografskih, hidromorfoloških, hidrogeoloških, pedoloških razmer na obravnavanem odseku vodotoka in širšem zalednem prispevnem območju in podrobnejšimi terenskimi ogledi lahko pripomore k odločanju o nadaljnjih analizah procesov erozije celinskih voda in morja.





**Slika 8.2:** Erozijska območja - Opozorilna karta erozije za vodno območje Jadranskega morja (NUV, 2009).



**Slika 8.3:** Erozijska območja - Opozorilna karta erozije za vodno območje Donave (NUV, 2009).

V okviru naloge OPKe-II je bil pripravljen predlog prikaza erozijske problematike v povezavi s Pravilnikom, katerega uporaba v praksi se je usmerila predvsem v s poplavami povezane procese rečne erozije in v manjši meri v analize ostalih erozijskih procesov. V nalogi OPKe-II je bil podan predlog označevanja linij vodotokov s tremi tipi erozije vzdolž strug vodotokov (poimenovane linijska erozija): odnašanje (bočna in globinska erozija), odlaganje in odseki brez opaznejših erozijskih procesov bodisi v smeri prikazovanja vodotokov kot enovitih odsekov ne glede na lokalno bolj izražene dejanske erozijske pojave, bodisi s prikazom različne lokalne pojavnosti procesov rečne erozije. Podrobnejša analiza in opredelitev do procesov erozije pa je bila prepuščena obdelavi na lokalnem nivoju. Tretji vsebinski sklop (Opozorilna karta erozije – III. faza) je vključeval primerjavo domačih in tujih

metodoloških pristopov k izdelavi opozorilne karte erozije na državni ravni, predvideval je pripravo osnutka opozorilne karte erozije v skladu s podzakonskimi akti, ki se nanašajo na poplavno ogroženost. Izdelovalci OPKe so poleg ploskovnega prikaza poskusno izdelali tudi linijski prikaz nevarnosti erozije (indeks odsekov vodotokov). Za korektno določevanje stopenj erozijske problematike vzdolž strug vodotokov se je kot glavni omejitveni dejavnik pokazalo pomanjkanje podatkov za območje cele Slovenije, ki bi bili potrebni za natančnejšo oceno potencialne razvitosti erozijskih procesov vzdolž strug vodotokov.

### 8.1.2 Novejša metodologija za izdelavo opozorilnih kart erozije

V okviru izdelave opozorilnih kart erozije v merilu 1:25.000 v okviru projekta Zeleni slovenski lokacijski okvir (SLO4D) (EHO, 2024) se v zadnjih letih pripravljajo opozorilne karte ploskovne in linijske erozije za posamezne občine. Karte se izdelujejo z različnimi metodami modeliranja, kratek povzetek uporabljenih metod je podan v nadaljevanju. Za izdelavo opozorilne karte ploskovne erozije tal in preperine je v prvi fazi uporabljena prilagojena metoda RUSLE, v drugi fazi pa metoda prenosa erozije po površinah pobočij in strug. Za izdelavo opozorilne karte linijske erozije v strugah vodotokov je uporabljena metoda, ki je bila razvita v sklopu projekta SLO4D in upošteva naklone vodotokov, njihovo širino, litološko podlago in velikost zaledja.

Za oceno procesov ploskovne erozije (torej potencialnega ploskovnega sproščanja erodiranega materiala) je bila uporabljena metoda RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation). Za površine, kjer so prisotni procesi ploskovne erozije, so v predlagani metodologiji posebej obravnavane vrste površin z obstoječo ploskovno erozijo, kot so npr. melišča, hudourniški vršaji, erozijska žarišča, prodišča in sipine ter antropogeno povzročena ploskovna erozija.

Za upoštevanje nadaljnega premeščanja erodiranega materiala z zalednih območij ter nadaljnega odlaganja na niže ležečih lokacijah ali v hudourniških grapah oz. strugah vodotokov je bil prilagojeni metodi RUSLE dodan izračun potencialnega premeščanja. V tem izračunu so upoštevani trije dejavniki (EHO, 2024): kapaciteta erozijskih potencialov, možnost prenosa glede na naklon pobočja in hrapavost podlage. Dejavniki potencialnega premeščanja erodiranega materiala z zalednih območij upošteva dva prevladujoča dejavnika in sicer naklon pobočja in hrapavost podlage, ki sta združena v enotni koeficient transporta (T). Hrapavost podlage je upoštevana preko Manningovega koeficienta hrapavosti za posamezne vrste rabe tal, po katerih se vrši premeščanje, pri čemer je predpostavljen plitek tok erozijskega materiala, vrednosti Manningovega koeficienta hrapavosti pa so normalizirane s faktorjem 14 (EHO, 2024).

Na izdelanih opozorilnih kartah ploskovne erozije v merilu 1 : 25.000 je celoten teritorij posamezne občine razdeljen na štiri stopnje nevarnosti pojavljanja ploskovne erozije. V nadaljevanju povzemamo kratek opis razmer na območjih analize po posameznih stopnjah erozijske nevarnosti:

- I. Stopnja: *Neznatna stopnja erozijske nevarnosti* (bela) – Na območju ni prisotnih erozijskih procesov oz. so le ti zanemarljivi.
- II. Stopnja: *Majhna stopnja erozijske nevarnosti* (rumena) – na območjih je zgolj lokalno, morda neizrazito opaziti znake erozije, kar se na manjših delih izkazuje v slabši zaraščenosti, spiranje zemljine ali preperine je prisotno le izjemoma.
- III. Stopnja: *Srednja stopnja erozijske nevarnosti* (oranžna) – na območjih je opaziti znake erozije, kar se na posameznih delih izkazuje v slabši zaraščenosti oz. zmanjševanju zarasti, zmernem spiranju zemljine, spiranje zemljine ali preperine je prisotno le lokalno.

IV. Stopnja: *Visoka stopnja erozijske nevarnosti (rdeča)* – na območjih je evidentno opaziti znake erozije, kar se izkazuje v slabi zaraščenosti območja oz. zmanjševanju vpliva zarasti, spiranju zemljine, prisotnosti erozijskih jarkov, transportu zemljin in preperine.

V I. stopnjo erozijske nevarnosti so poleg površin, ki so z modelom ovrednotene kot površine z neznatno erozijsko nevarnostjo, uvrščene tudi vse urbane površine (na katerih se predpostavlja, da ploskovne erozije ni) ter vse gole skalne površine (na katerih se zaradi nadmorske višine tla ne morejo razviti ali pa zaradi strmine tla ali preperina ne obstanejo). V II. In III. stopnjo erozijske nevarnosti so uvrščene površine, ki so z modelom ovrednotene kot površine z majhno oz. srednjo erozijsko nevarnostjo. V IV. stopnjo erozijske nevarnosti so poleg površin, ki so z modelom ovrednotene kot površine z veliko erozijsko nevarnostjo, uvrščene tudi vse površine kjer je ugotovljena obstoječa ploskovna erozija. Primer opozorilne karte ploskovne erozije prsti je prikazan na sliki 8.4.



**Slika 8.4:** Primer prikaza opozorilne karte ploskovne erozije prsti (EHO, 2024).

Opozorilna karta linijske erozije prikazuje delitev odsekov vodotokov glede na potencial (nevarnost) nastanka erozijskih poškodb (zajed, poglobitev dna) vzdolž območij strug vodotokov. Opozorila karta linijske erozije naj bi torej zajemala večino procesov rečne erozije. Ocena linijske erozije je v predlagani metodologiji zasnovana na osnovi modelne napovedi s poenostavljeno metodo, ki določa predvsem zmožnost vodotokov, da sproži poškodbe vzdolž dna in brežin struge, torej procese globinske in bočne erozije. V upoštevanji enačbi metode so koeficienti, ki vrednotijo glavne naravne dejavnike, za katere se predvideva, da prevladujoče vplivajo na procese linijske erozije oz. erozijske procese v strugah vodotokov. Posamezni koeficienti glavne enačbe so določeni s pomožnimi enačbami in so brezdimenzijski. Opisi posameznih koeficientov so na kratko povzeti v nadaljevanju. Koeficient »V« vrednoti hitrost vodnega toka v strugah vodotokov in je ocenjen s poenostavljeno enačbo za izračun hitrosti vodnega toka, ki upošteva le naklon in širino struge. Podatki so pridobljeni iz vektorskega sloja podatkov površinskih voda ter so bili v aplikaciji metodologije rasterizirani na celice velikosti 5x5 m.

Posebej velja izpostaviti koeficient »L« s katerim se vrednoti erozivnost različnih litoloških podlag, na kateri se nahaja struga. Vrednosti koeficienta »L« so bile določene na podlagi ekspertne ocene. V preglednici 8.1 so podane vrednosti koeficienta L za posamezne litološke enote.

**Preglednica 8.1:** Erodibilnost posameznih tipov litološke podlage s pripadajočimi koeficienti L (EHO, 2024).

Razred Koeficient L	Stopnja občutljivosti za erozijo	Opis litološke sestave kamnin in sedimentov
<b>1</b> L=1,0	ZELO VISOKA	Zelo rahlo odloženi drobnozrnati meljnoglinasti sedimenti ali sedimenti.
<b>2</b> L=0,9		Glinaste zemljine in skrilavi glinavec ter pobočni grušči.
<b>3</b> L=0,8		Zemljine, kjer prevladujeta prod ali pesek.
<b>4</b> L=0,7	VISOKA	Kamnine, v katerih prevladuje lapornata komponenta; prodno-peščene zemljine s konglomerati ter vršaji.
<b>5</b> L=0,6		Vulkanske in klastične kamnine, v katerih prevladujejo visoko erozivni sedimenti.
<b>6</b> L=0,5		Medsebojno menjavanje različno erozivnih klastičnih in vulkanskih kamnin, ki vsebujejo vsaj eno eroziji zelo podvrženo kamnino.
<b>7</b> L=0,4	SREDNJA	Medsebojno menjavanje različno erozivnih kamnin. Ne prevladujejo ne nizke ne visoko erozivne kamnine ene nad drugimi. Nastopajo v približno enakem razmerju.
<b>8</b> L=0,3		Menjavanje kamnin različnega nastanka (sedimentne, metamorfne, magmatske) nizke stopnje občutljivosti, ki vsebujejo tudi posamezne kamnine višje občutljivosti na erozijo.
<b>9</b> L=0,2	NIZKA	Pretežno dolomiti ali peščenjaki z nizko stopnjo podvrženosti eroziji
<b>10</b> L=0,1		Apnenci z vključki apnenih breč in masivnih dolomitov z zelo nizko stopnjo podvrženosti eroziji ter magmatske kamnine

Na opozorilni karti linijske erozije v merilu 1:25.000 je hidrografska mreža obravnavanih območij občin razdeljena na štiri stopnje nevarnosti pojavljanja linijske erozije, ki so prikazane z naslednjo barvno lestvico: I. stopnja - *zelo majhna erozijska nevarnost* (modra); II. stopnja - *majhna erozijska nevarnost* (rumena); III. stopnja - *srednja erozijska nevarnost* (oranžna); IV. stopnja - *velika erozijska nevarnost* (rdeča).

Na območjih strug se je zelo majhno erozijsko nevarnost (I. stopnja) pripisalo vsem vodotokom, ki po modelnem izračunu niso izkazovali višjih stopenj erozije. V to stopnjo erozijske nevarnosti so uvrščeni tudi vsi odseki strug, ki so v celoti regulirani. Regulirana struga je v celoti urejena struga na daljšem odseku. Ima obojestransko utrjene (zavarovane) brežine (obrežna zavarovanja, zidovi) ter zavarovano in/ali stabilizirano dno (pragovi). Za tovrstne struge velja predpostavka, da so odporne pred erodiranjem, če so redno vzdrževane. Ker se predpostavlja, da je vsaj minimalna linijska erozija prisotna v vseh vodotokih (razen na popolnoma reguliranih odsekih), so v I. stopnjo (modra) uvrščeni vsi odseki, ki niso uvrščeni v enega od ostalih treh.

V razred majhne erozijske nevarnosti (II. stopnja) so opredeljeni odseki strug vodotokov, kjer se usadi nahajajo redko, bočne zajede so prisotne v manjšem obsegu, dno vodotokov ima razmeroma stabilno niveleto z redkimi tolmoni in stopnjami, prodonosnost se pojavlja v manjšem obsegu.

V razred srednja erozijske nevarnosti (III. stopnja) so opredeljeni odseki strug vodotokov, kjer so prisotni bodisi manjši usadi, bočne zajede ali pa je dno vodotokov lokalno nestabilno s tolmoni in je zmerno prodonosno.

V razred velike erozijske nevarnosti (IV. stopnja) so opredeljeni odseki vodotokov, kjer se prisotni usadi, večje bočne zajede ali pa je dno vodotokov nestabilno, s tolmoni in je izrazito prodonosno. V IV. stopnjo nevarnosti linijske erozije so, poleg vseh odsekov, ki so z modelom ovrednoteni kot odseki z veliko nevarnostjo linijske erozije, uvrščeni tudi vsi odseki vodotokov, ki potekajo po območjih, kjer je ugotovljena obstoječa ploskovna erozija. Na sliki 8.5 je prikazan primer opozorilne karte linijske erozije vzdolž vodotokov.



**Slika 8.5:** Primer prikaza opozorilne karte linijske erozije v strugah vodotokov (EHO, 2024).

Zgoraj opisana metodologija projekta SLO4D v povezavi z v prejšnjih poglavjih omenjenimi kartami erozije, vsekakor predstavlja uporabne rezultate na nivoju opozorilnih kart erozije. Rezultati, dopolnjeni s podrobnejšo analizo terenskih razmer, predstavljajo dobro osnovo za opredelitev do potencialne razvitosti procesov rečne erozije in pomagajo pri nadaljnjem odločanju in utemeljevanju, ali naj se na obravnavanem odseku vodotoka izdelujejo manj kompleksne analize procesov rečne erozije (opisane v poglavju 8.2) ali kompleksnejše analize (opisane v poglavju 8.3). Hkrati lahko ugotovimo, da poskusi kartiranja vodne erozije v Sloveniji na nivojih opozorilnih kart erozije v različnih merilih upoštevajo večino razpoložljivih topografskih, hidrogeoloških, geoloških ter pedoloških podatkov, ki se tudi v tujini najpogosteje uporabljajo za oceno potenciala vodne erozije in, sicer mnogo redkeje, tudi oceno potenciala razvitosti procesov rečne erozije. Ob tem velja še enkrat poudariti, da so uporabljene metode (npr. RUSLE) uporabne predvsem z vidika vpogleda v prostorsko razporeditev ploskovnih (začetnih) oblik vodne erozije ob stekanju padavinskega odtoka, veliko manjša pa je uporabna vrednost teh metod z vidika ocen potencialnih količin erodiranega materiala, ki se v sorazmerno kratkih časovnih obdobjih padavinskih/poplavnih dogodkov sprostijo in premestijo iz obravnavanih zalednih prispevnih območij proti obravnavanim odsekom vodotokov. Prav zato so pri odločanju na Nivoju 1 zelo uporabni vsakršni morebitni razpoložljivi podatki o erozijskem dogajanju v zaledju obravnavanih odsekov vodotokov ter procesih rečne erozije v preteklosti.

V nadaljevanju se osredotočamo predvsem na usmeritve izdelovalcem analiz erozijske nevarnosti celinskih voda in morja skladno z nacionalno zakonodajo, da bi se na osnovi usmeritev lažje opredelili do potencialne razvitosti erozijskih procesov. Poudarek je na uporabi splošno dostopnih podatkov in oceni terenskih razmer ter podatkov o procesih rečne erozije v peteklosti.

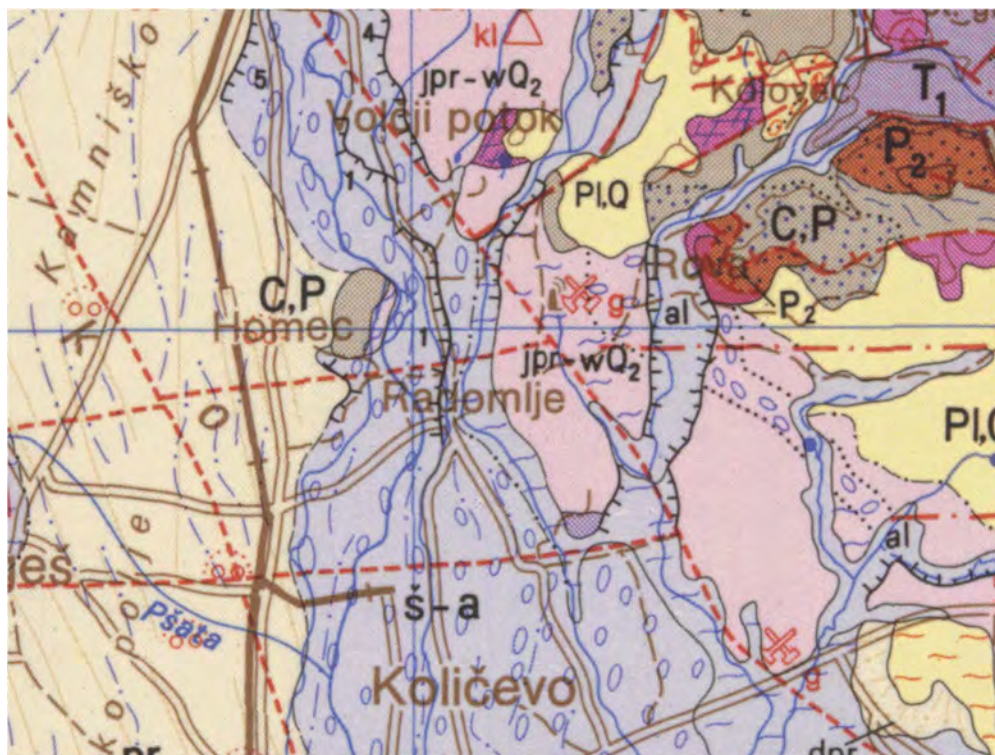


### 8.1.3 Prepoznavanje topografskih, hidrogeoloških, in pedoloških razmer na obravnavanem odseku in širšem zalednem prispevnem območju

V zgoraj opisanih pristopih, ki so se oz. se uporabljajo za oceno potenciala erozijskih procesov na nivoju opozorilnih kart erozije, je eden glavnih vhodnih podatkov, ki vpliva na pričakovano prostorsko razporeditev erozijskih procesov, naklon terena. Naklon terena je nedvomno eden glavnih topografskih dejavnikov oz. sprožilnih mehanizmov erozijskih procesov, ki v kombinaciji z lokalnimi hidrogeološkimi razmerami ter rabe tal lahko vodi v erozijske procese različne intenzitete. Običajno je ravno kombinacija lokalnih topografskih, hidrogeoloških, pedoloških razmer in rabe tal tista, ki določa obseg in intenziteto procesov rečne erozije (Davy in Lague, 2009).

Geološke razmere vplivajo na vrsto spremenljivk, ki so pomembne za hidromorfološki odziv, predvsem na sproščanje in dotok plavin, razmejitev rečne doline, erodibilnost dna struge in brežin struge vodotoka, prisotnost in odpornost vegetacije in hidrološki odziv (Brierley in Fryirs, 2005). Geološke podatke je najprej treba sintetizirati, da se z njihovo pomočjo lahko opredelijo ločnice med procesi rečne erozije in ostalimi erozijskimi procesi na prispevnih območjih ter ugotovi, kako geološke razmere spodbujajo ali zavirajo hidromorfološke procese vzdolž obravnavanih odsekov vodotokov. Geološke značilnosti, kot so npr. prisotnost geoloških prelomov, usadov in zemeljskih plazov, lahko močno vplivajo na lokalno topografijo in morfologijo dolin vodotokov. Za opredelitev geološkega konteksta procesov rečne erozije vzdolž obravnavanih odsekov vodotokov se priporoča uporaba različnih geoloških kart za prepoznavanje geoloških značilnosti. Najbolj uporabne so seveda natančnejše geološke oz. geotehnične raziskave s podatki o lokalnih geoloških lastnostih. Geološke karte so uporabne za prepoznavanje izrazitih erodibilnih enot, kot so holocenske ali pleistocenske aluvialne, koluvialne ali eolske usedline (Belletti in sod., 2015; Robert, 2014). Poleg tega geološke karte pogosto vsebujejo informacije o starosti in obsegu naplavin na dolinskem dnu, pa tudi o geomorfni značilnostih, ki niso neposredno povezane s procesi rečne erozije in strukturah, ki pa lahko vplivajo na aktivne geološke procese v rečnih koridorjih, kot so zemeljski plazovi, koluvialni nanosi, morene, sinklinale in antiklinale ter prelomi. Tovrstni podatki so uporabni tudi za oceno interakcij in mej med pobočnimi in rečnimi procesi, relativne starosti rečnih teras in zaporedja njihovega nastanka.

Za območje Slovenije je javno dostopna Osnovna geološka karta (OGK) v merilu 1:100.000, ki jo je izdelalo veliko število avtorjev večinoma v drugi polovici 20. stoletja, zadnje karte pa so bile dokončane v Republiki Sloveniji. Karte so dostopne preko portala e-geologija na spletnih straneh Geološkega zavoda Slovenije (<https://egeologija.si/>) oz. karte OGK direktno na <https://ogk100.geo-zs.si/>). Karte so bile izdelane sistematično, tako da so tvorile mozaik listov in pokrile celotno takratno državo SFRJ. Po letu 1991 se je v Sloveniji izdelovalo bolj ali manj nesistematične karte izbranih območij, npr. Krasa, Kozjanskega in Cerkljansko-Idrijskega ozemlja v merilu 1:50.000. S klikom na karto na spletnem pregledovalniku e-geologija pridobimo podatke o geoloških enotah. Kot primer območja, prikazanega na Osnovni geološki karti Slovenije na sliki 8.6 prikazujemo odsek Kamniške Bistrice vzdolž naselja Homec, kjer je lepo viden velik obseg aluvialnih nanosov (proda).



**Slika 8.6:** Izsek iz geološke karte za območje odseka Kamniške Bistrice ob naselju Homec.

Kot dodaten zelo pomemben vir podatkov o geoloških razmerah lahko navedemo še portal Geohazard (<https://geohazard.geo-zs.si/>) ter spletno aplikacijo za popis in pregledovanje plazov in erozije (<https://www.e-plaz.si/>). Aplikacija e-Plaz je namenjena centralnemu zbiranju podatkov o pojavih plazenj in pridobitvi enotne evidence podatkov o plazenju tal. Vključuje minimalni nabor kazalcev, s katerimi lahko opišemo določen pojav in sicer se zbirajo podatki o sprožitvi, lokaciji plazov, vrsti in opisu pojava, posledicah (ocena škode in ogroženosti) ter izvedenih ukrepih.

Kar se tiče podatkov o lastnostih zemljin je za območje Slovenije javno dostopna Pedološka karta Slovenije v merilu 1:25.000. Celotno ozemlje Slovenije je bilo z operativno digitalno pedološko karto pokrito leta 1999. Sorazmerno majhno merilo karte sicer omejuje njeno uporabnost z vidika lokalnih pedoloških razmer na posameznih lokacijah. Seveda pa tovrstni pedološki podatki omogočajo začetno opredelitev do potencialne erodibilnosti tal predvsem na razgaljenih območjih oz. območjih s sorazmerno redkim vegetacijskim pokrovom, kar bistveno vpliva na pojavnost procesov rečne erozije predvsem na kmetijskih površinah.

#### **8.1.4 Usmeritve za izvedbo terenskih ogledov za prepoznavanje procesov rečne erozije**

Uvodoma velja poudariti, da terenski ogled obravnavanega območja predstavlja osnovo za analizo obstoječih razmer procesov rečne erozije in nadaljnje analize v smeri ocenjevanja potenciala erozijskih procesov za ocenjevanje razredov erozijske nevarnosti celinskih voda in morja. Georeferencirane slike s terenskih ogledov in zapiski, ki so nastali med terenskimi ogledi, so uporabni za poznejše sklicevanje. Terenski obisk je hkrati priložnost za srečanje z lokalnimi prebivalci, ki pripomorejo k boljšemu razumevanju dogajanja ob preteklih poplavnih dogodkih. V povezavi s terenskimi ogledi se je priporočljivo začetno usmeriti v območja, ki so sena osnovi raznih, v prejšnjem poglavju omenjenih podatkovnih slojih na nivoju opozorilnih kart rečne erozije, prepoznala kot območja povečane erozijske

nevarnosti (npr. na opozorilnih kartah območja velike in srednje erozijske nevarnosti). Predpogoj je seveda, da so tovrstni podatki v primernih prostorskih merilih za obravnavan odsek vodotoka oz. njegovo prispevno območje na nivoju opozorilnih kart erozije sploh na razpolago. Kot začetno oceno območja, kjer se lahko pričakuje intenzivnejše procese rečne erozije (kot začetna ocena obsega erozijskega koridorja vodotoka) in znotraj katerega se izvede terenski ogled, se lahko uporabijo morebitni razpoložljivi podatki o preteklih poplavnih dogodkih, podatki opozorilne karte poplav oz. morebitni razpoložljivi podatki o pričakovanih obsegih razlivanja poplavnih voda na integralni karti poplavne nevarnosti oz. ostali tovrstni podatki preostalih hidrološko-hidravličnih analiz. Idealno je terenski ogled opravljati med oz. neposredno po poplavnih dogodkih oz. zbrati čim več slikovnega materiala o dogajanju v preteklih poplavnih dogodkih. Običajno so tovrstne informacije o dogajanju v preteklih poplavnih dogodkih na žalost le redko na razpolago.

V nadaljevanju podajamo nekaj usmeritev za prepoznavanje terenskih razmer, povezanih z erozijskim dogajanjem v zaledju obravnavanega odseka vodotoka, poplavnih razmer na območjih strug vodotokov ter obdajajočih poplavnih območjih, ki nakazujejo povečan potencial za razvoj intenzivnejših procesov rečne erozije ob prihodnjih poplavnih dogodkih.

#### **a) Erozijsko dogajanje v (gorvodnem, zalednem) prispevnem območju**

Na osnovi terenskega ogleda in morebitnih razpoložljivih podatkov na nivoju opozorilnih kart erozije naj bodo izdelovalci kart erozijske nevarnosti celinskih voda pozorni na morebitna erozijska žarišča v zalednem prispevnem območju, ki so v bližini strug vodotokov ali v neposrednem stiku z brežinami strug vodotokov oz. so z vidika smeri stekanja padavinskega odtoka dobro povezana z strugami vodotokov. Za tovrstna območja lahko sklepamo, da je delež (koeficient) odplavljanja erodiranega materiala velik. Velik dotok plavin iz prispevnih območij na obravnavani odsek je eden od pomembnih sprožilnih mehanizmov rečne erozije. Na sliki 8.7 prikazujemo nekaj primerov erozijskega dogajanja ob poplavih avgusta 2023, ki kažejo na neposredni dotok velikih količin plavin v struge vodotokov in njihovo nadaljnje premeščanje naprej po strugah vodotokov.

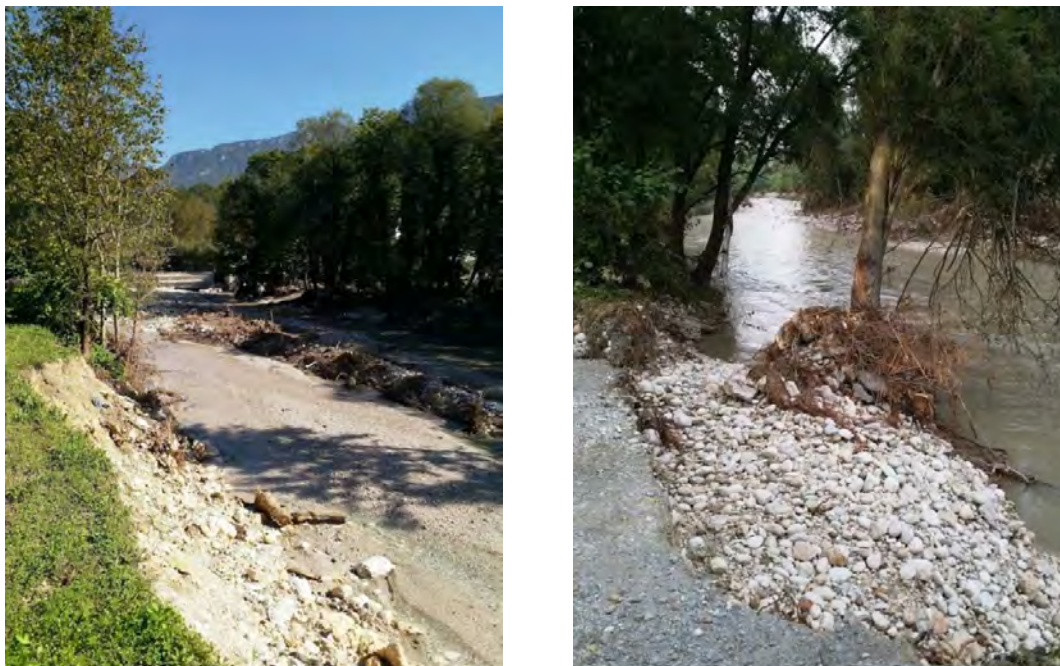


**Slika 8.7:** Primeri erozijskega dogajanja v zalednih prispevnih območjih, ki nakazujejo na intenzivno odplavljanje in dotok plavin v dolvodne odseke vodotokov.



## b) Prepoznavanje sprememb na območjih strug vodotokov

Na obravnavanem odseku naj bo velika pozornost posvečena prepoznavanju erozijskih zajed v brežine in morebitne spremembe potekov dna struge (nivelete dna oz. globočnice). Fotografirajo in georeferencirajo naj se morebitne erozijske zajede in poškodbe obrežnih zavarovanj ter morebitni odseki brežin, kjer je v preteklih poplavnih dogodkih prišlo do intenzivnejših prelitij brežin ter morebitnih erozijskih poškodb. Na sliki 8.8 prikazujemo nekaj primerov lokalnih poškodb brežin, ki so bile posledica intenzivnih procesov bočne erozije, prelivanja in vračanja poplavnih voda nazaj v strugo.



**Slika 8.8:** Primeri sprememb na območjih strug vodotokov, ki lahko ob naslednjih poplavnih dogodkih vodijo v obsežnejše procese rečne erozije.

Tovrstne poškodbe lahko, če brežine niso ustrezno sanirane, vodijo v izrazito povečan in nenadzorovan obseg procesov rečne erozije že pri naslednjih poplavnih dogodkih bistveno krajših povratnih dob in ki z vidika poplavne nevarnosti morda sploh niso problematični. Vsekakor velja dodatno izpostaviti, da so procesi rečne erozije vzdolž strug vodotokov sestavni del naravnega hidromorfološkega dogajanja. Zato se je treba do tovrstnih procesov opredeliti tudi z vidika morebitnih elementov ogroženosti (npr. infrastrukture, objektov) v neposredni bližini rečne struge (vodnem zemljišču oz. priobalnem zemljišču celinskih voda).

## c) Prepoznavanje erozijskih procesov na poplavnih območjih

Uvodoma je treba poudariti, da so v primerjavi z območji rečnih strug procesi rečne erozije na obdajajočih poplavnih območjih običajno bistveno manj intenzivni. Gre torej za prevladujoče procese površinske erozije. V povezavi s prepoznavanjem procesov rečne erozije na poplavnih območjih se je treba opredeliti do znakov, ki nakazujejo na prisotnost morebitnih intenzivnejših oblik rečne erozije, kot so npr. območja poplavnih površin (npr. na kmetijskih površinah), kjer je v preteklih poplavnih dogodkih prišlo do intenzivnejših nanosov plavin (npr. bolj grobe zrnavostne sestave), kar lahko nakazujejo spremembe v zrnavostni sestavi tal na kmetijskih površinah (npr. slika 3.3). Primer obsežnejših nanosov plavin na kmetijskih zemljiščih je prikazan na sliki 3.4 in 8.9.



**Slika 8.9:** Nanosi plavin na kmetijskih površinah (levo) in intenzivnejši procesi rečne erozije na kmetijskih površinah (desno) (vir: Ptuj.info).

Intenzivnejše oblike rečne erozije (s procesnega vidika gre za procese globinske in bočne erozije) na poplavnih območjih so najpogosteje povezane z lokalnimi hidravličnimi razmerami. Zelo pogosto se tovrstni intenzivnejši procesi rečne erozije pojavijo ob prelivanju poplavnih voda preko sprememb v topografiji terena (npr. različni linijski elementi, nasipi). Prelitje sorazmerno nizkega nasipa lahko ob določenih gladinskih stanjih na poplavnem območju privede do lokalnih pojavov vodnih skokov, ki lahko vodijo v obsežnejše procese rečne erozije. Tovrstne erozijske poškodbe so zelo pogoste ob prelitju dostopnih poljskih poti na kmetijskih površinah, so pa tudi eden glavnih vzrokov za erozijske zajede na številnih odsekih prometnic, ki se nahajajo na poplavnih območjih in jih v času visokovodnih razmer poplavne vode prelijejo. Nekaj primerov tovrstnega erozijskega dogajanja je prikazanega na sliki 8.10.





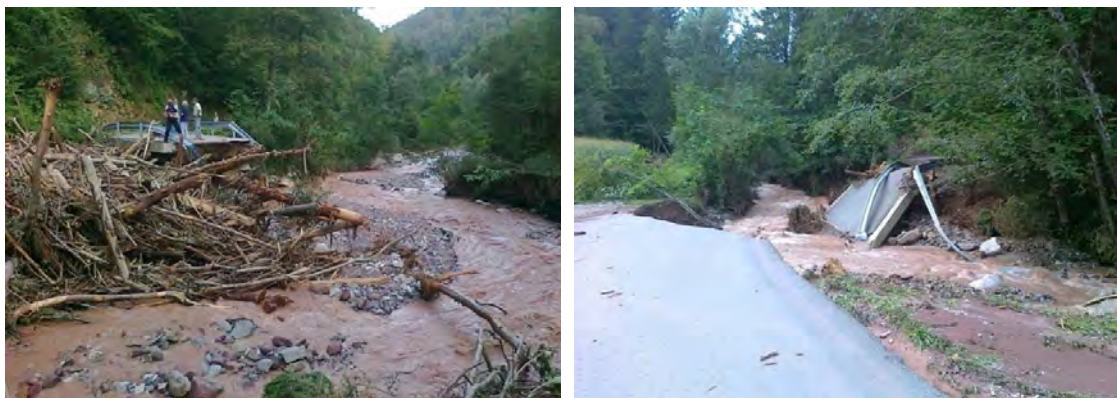


**Slika 8.10:** Primeri erozijskih zajed pri prelivanju poplavnih voda preko posameznih sprememb v topografiji terena (npr. cestnih nasipov) na območjih poplavnih območij (viri zgornjih dveh slik: siol.net, rtvslo.si).

#### **d) Procesu rečne erozije ob premostitvenih objektih in drugi vodni infrastrukturi**

Zelo pogosti so intenzivni procesi rečne erozije na območjih premostitev (prepustov in mostov), saj ob tovrstnih objektih pride do izrazite spremembe hidravličnih razmer (zožitev pretočnega prereza struge vodotoka in posledično povečane pretočne hitrosti, prehodi med različnimi tipi toka vode, prelitje objektov itd.), ki lahko v povezavi s spremljajočimi procesi premeščanja plavin in plavja povzročijo obsežne poškodbe ali celo porušitve premostitvenih objektov. Zelo pogosti so intenzivni procesi rečne erozije tudi na odsekih ob raznih prečnih hidrotehničnih objektih (pragovih, drčah, stopnjah in jezovih), ki so ravno tako posledica spremenjenih hidravličnih razmer, predvsem pojava različnih oblik vodnih skokov na dolvodni strani hidrotehničnih objektov.





**Slika 8.11:** Primeri erozijskih zajed ob premostitvenih objektih.

V povezavi s teoretičnimi osnovami in različnimi pristopi h kartiranju območij nevarnosti rečne erozije, predstavljenimi v poglavju 6 velja izpostaviti, da lahko erozijski koridor vodotoka sega tudi izven obsega območja, kjer so se v preteklosti razlivala poplavne vode oz. izven območij, ki so prepoznana kot območja, izpostavljena poplavni nevarnosti. Zato je treba informacije na podlagi terenskih ogledov interpretirati skupaj z rezultati hidravličnih modelov predvsem z vidika lastnosti vodnega toka in njegovih lokalnih sprememb (globin, pretočnih hitrosti, smeri vodnega toka, sprememb v nivojih poplavnih voda) na posameznih delih obravnavanih odsekov vodotokov in obdajajočih prispevnih območjih.

### **8.1.5 Usmeritve za oceno potencialne razvitosti procesov rečne erozije na podlagi različnih podatkov o procesih rečne erozije v preteklosti**

Najbolj verodostojne podatke, na podlagi katerih se lahko nadalje opredeljujemo do stopnje zahtevnosti analiz procesov rečne erozije, predstavljajo predvsem podatki o erozivnem delovanju vodotokov v preteklosti. Na podlagi teh podatkov lahko namreč utemeljeno sklepamo, da obstaja velika verjetnost, da se bodo podobni erozijski procesi pojavili tudi v prihodnosti. Glavne omejitve z vidika uporabnosti tovrstnih podatkov predstavlja predvsem njihova razpoložljivost. V poglavju 6 so predstavljene nekatere tuje metode za oceno potencialne razvitosti procesov rečne erozije in erozije morja. Večina omenjenih metod temelji ravno na analizi procesov rečne erozije v preteklosti oz. poskusih kombiniranja podatkov o preteklem erozijskem dogajanju z nadaljnjimi analizami, bodisi erozijskega potenciala zaledja bodisi podrobnejšimi analizami hidravličnih razmer vzdolž odsekov vodotokov.

V okviru začetne ocene potencialne razvitosti procesov rečne erozije je treba opraviti predhoden terenski ogled obravnavanega območja oz. odseka vodotoka (poglavje 8.1.4), da se izdelovalci analize seznanijo z lokalnimi hidromorfološkimi razmerami. Na ta način se zagotovi dober vpogled v lokalne posebnosti erozijskega dogajanja na obravnavanem odseku vodotoka in pridobi osnove informacije za nadaljnjo uporabo in interpretacijo ostalih podatkov (npr. Podatkov, pridobljenih z različnimi metodami daljinskega zaznavanja). Povzamemo lahko, da so analize različnih GIS podatkovnih slojev v kombinaciji s terenski ogledi ključnega pomena za kartiranje območij rečne erozije ter odločanje o zahtevnosti in kompleksnosti nadaljnjih analiz. V nadaljevanju po posameznih točkah podajamo usmeritev za analize različnih podatkov daljinskega zaznavanja, ki se običajno uporabljajo za analizo poplavne in erozijske nevarnosti celinskih voda in morja.

### **8.1.5.1 Uporaba razpoložljivih podatkov daljinskega zaznavanja**

#### **8.1.5.1.1 Uporaba serij ortofoto (aerofoto) posnetkov iz različnih časovnih obdobj**

Kot primarni vir za analizo procesov rečne erozije na podlagi podatkov daljinskega zaznavanja bi najprej izpostavili možnosti uporabe starih ortofoto posnetkov (aerofotografija). Zgodovinske letalske fotografije so lahko koristne za ugotavljanje preteklih tlorisnih potekov strug vodotokov in morebitnih sprememb na obdajajočih poplavnih območjih. Takšne informacije so lahko podlaga za analizo hidromorfološkega dogajanja in pomagajo pri prepoznavanju hidromorfoloških značilnostih vodotokov, obenem pa nudijo tudi zelo dober vpogled v človekove posege v vodni in obvodni prostor. Poudariti velja, da na podlagi preteklih ortofoto posnetkov zelo težko natančno napovedujemo prihodnje erozijsko dogajanje. Dodano velja izpostaviti, da so lahko starejši ortofoto posnetki podvrženi raznim sistematičnim napakam, morebitne analize intenzitete procesov rečne erozije (npr. tlorisni premiki strug vodotokov) se lahko časovno močno razlikujejo. Časovno sorazmerno zvezne spremembe v tlorisnih potekih strug vodotokov so redke, erozijsko dogajanje vzdolž strug vodotokov je posledica erozijskih procesov v sorazmerno kratkih časovnih obdobjih povišanih pretokov, kot ugotavljajo Shook in sod. (2017). Dodatno sta Donovan in Belmont (2019) ugotovila, da se izračunane migracijske stopnje vodnih tokov spreminjajo s časovnim presledkom med meritvami in na splošno podcenjujejo spremembe v tlorisnih potekih strug vodotokov. Za ortofoto posnetke lahko na splošno ugotovimo, da so z njimi zajete diskretne časovne točke in na podlagi njih ne moremo sklepati o celotnem potencialnem razponu sprememb tras strug vodotokov na določenem odseku. To je problematično zlasti v primerih, ko prihaja do nenadnih sprememb hidromorfoloških razmer v kratkih obdobjih povišanih pretokov. Tipičen primer so ravno hudourniški vodotoki, ki so na območju Slovenije z vidika procesov rečne erozije najbolj aktivni. Prav tako je uporabnost starih ortofoto posnetkov omejena z njihovo ločljivostjo. V primerih slabše ločljivosti posnetkov, je njihova uporabnost zelo omejena za manjše vodotoke, kjer se lahko sicer pojavljajo intenzivni procesi rečne erozije, ki pa so z vidika prostorskega dosega zelo omejeni. Ravno zato so v nekaterih pristopih h kartiranju potencialne erozijske nevarnosti (npr. Blazewicz in sod., 2020) omejili možnosti napovedovanja magnitude ali ocene razredov erozijske nevarnosti zgolj na osnovi preteklih aerofoto posnetkov. Izpostavljene so predvsem naslednji omejitveni dejavniki:

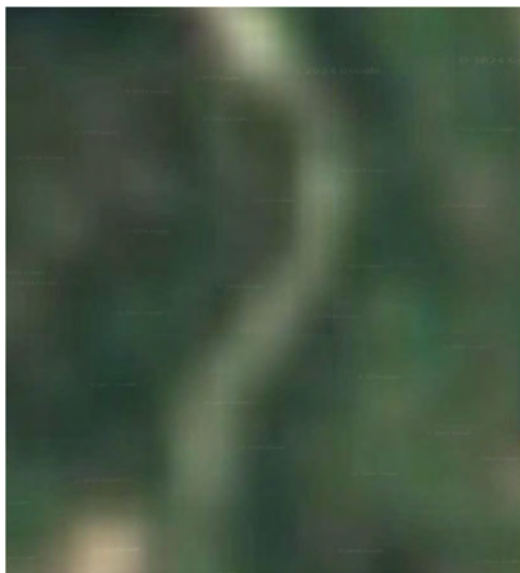
- 1) Nedavna zgodovina hidromorfoloških sprememb vodotokov morda ne predstavlja prihodnjega dogajanja. Dejavniki, vezani na hidrološke, hidravlične razmere in premeščanje plavin, se lahko spremenijo na ravni prispevnih površin, odseka vodotoka ali kot kombinacija naštetega.
- 2) Razvoj in sosledje hidromorfoloških procesov na območjih rečnih strug in navideznih stanj stabilnosti razmer na posameznih odsekih strug so v nasprotju s konceptom upoštevanja časovno zveznih in postopnih sprememb, ki se ponekod uporabljajo za kvantificiranje dolgoročnih sprememb v daljših časovnih obdobjih.
- 3) Ortofoto posnetki večinoma pokrivajo obdobje zadnjih nekaj desetletij. V teh obdobjih je lahko določen odsek vodotoka izkazal malo sprememb v poteku struge vodotoka, v prihodnjih poplavnih dogodkih pa se lahko kljub temu pojavijo intenzivni procesi rečne erozije, kakršnih na podlagi preteklega dogajanja ne pričakujemo.
- 4) Pri georeferenciranju serij starih ortofoto posnetkov lahko prihaja do horizontalnih zamikov in napak, ki so lahko večje od dejanske spremembe v potekih strug vodotokov ali posameznih odsekov brežin.



5) Pogosto lahko pride do sprememb v geometrijskih lastnostih prečnih prerezov struge zaradi naravnih procesov ali človekovih posegov v časovnih presledkih med posameznimi serijami ortofoto posnetkov.

6) Vzdolž številnih vodotokov se pojavljajo obsežnejše hidromorfološke spremembe, predvsem v času sorazmerno kratkih obdobjih večjih poplavnih dogodkov. Te spremembe so lahko veliko večje od tistih, ki jih zaznavamo kot posamezne (postopne) spremembe na posameznih ortofoto posnetkih.

Za območje Slovenije je za splošno uporabo dostopnih sorazmerno malo starih ortofoto (DOF) posnetkov oz. zajemajo sorazmerno kratka časovna obdobja. V sistemu PISO naj bi bili za naročnike sicer na voljo arhivski DOF posnetki od leta 1961 naprej. V nadaljevanju predstavljamo možnosti uporabe prosto dostopnih Google Earth posnetkov površja. Zaradi sorazmerno slabe resolucije prvih tovrstnih posnetkov je uporaba podatkov, nastalih pred več kot približno 20 leti sorazmerno omejena. Kakovostnejši aerofoto posnetki z boljšo prostorsko ločljivostjo so za območje Slovenije na razpolago od leta 2008. Za posamezne odseke vodotokov se lahko razloči erozijsko dogajanje vzdolž posameznih odsekov strug vodotokov, kot je prikazano na sliki 5.8 za primer odseka reke Save dolvodno od avtocestnega mostu v Šentjakobu. Kot dodaten primer na sliki 8.12 prikazujemo sosledje sprememb na hidromorfološko zelo aktivnem odseku Kamniške Bistrice za nekaj izbranih časovnih nizov, za katere so na razpolago prosto dostopni posnetki na Google Earth. Seveda je uporaba tovrstnih posnetkov omejena z njihovo ločljivostjo (npr. posnetek odseka iz leta 2002). Zaradi majhnih dimenzij rečnih strug vzdolž večine hidrografske mreže v Sloveniji se je treba zavedati, da majhne spremembe v potekih strug vodotokov, ki so posledica lokalnih procesov rečne erozije, iz tovrstnih posnetkov zelo verjetno ne bodo razvidne. Lahko pa se prepoznajo posamezne spremembe, ki v kombinaciji s terenskimi ogledi pomagajo pri prepoznavanju in razumevanju potenciala procesov rečne erozije.



2002



2008



2009



2011



2013



2014





2016



2017



2020



2021



**Slika 8.12:** Primer prikaza sosledja hidromorfoloških procesov vzdolž odseka Kamniške Bistrice na posnetkih Google Earth (vir: Google Earth).

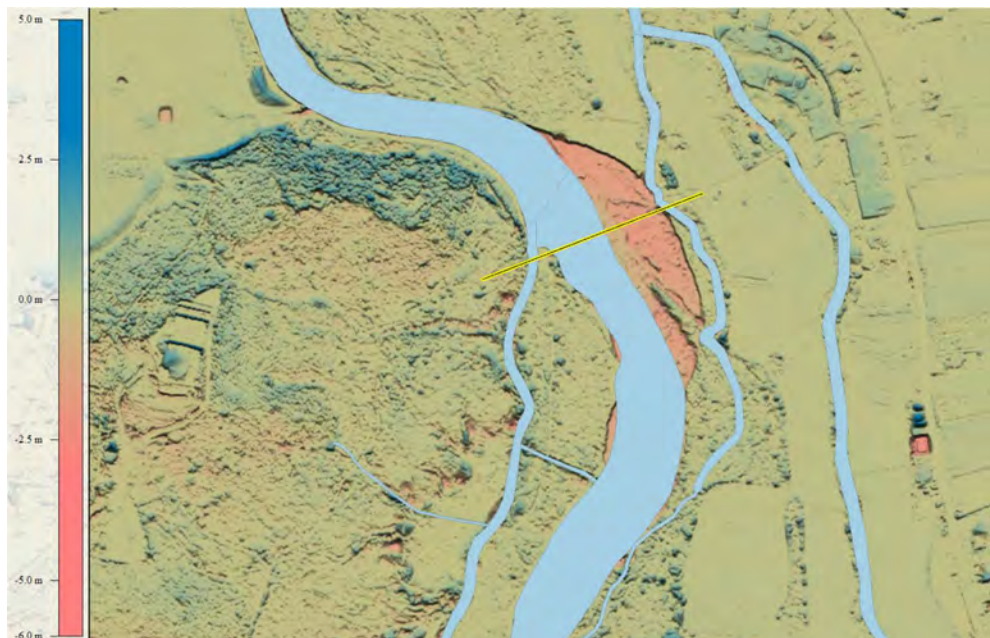
Na posnetkih, prikazanih na sliki 8.12, so najbolj očitne spremembe v obsegu prodišč vzdolž prikazanega odseka. Nekatere spremembe so posledica različnih hidroloških razmer v času snemanj. V opazovanem obdobju je bilo sicer izvedenih nekaj odvzemov plavin. Spremembe v obsegih prodišč kažejo na veliko premestitveno zmogljivost gorvodnih odsekov vodotoka in velik dotok plavin na obravnavani odsek. Tovrstni podatki v povezavi s terenskimi ogledi nudijo vpogled v dinamiko premeščanja plavin na obravnavanem odseku, kar velja za pomemben dejavnik z vidika potenciala procesov rečne erozije.

Za večino območij, prizadetih v poplavnem dogodku avgusta 2023, so na razpolago kakovostni ortofoto posnetki visoke ločljivosti, ki so bili pridobljeni nekaj dni po poplavnem dogodku. Za ta območja priporočamo uporabo tovrstnih posnetkov visoke ločljivosti, na katerih so območja, podvržena različnim procesom rečne erozije, večinoma zelo dobro vidna. Ob primerjavi prostodostopnih visokoločljivih ortofoto posnetkov pred/po poplavnem dogodku 2023 se lahko prepozna območja intenzivnejših procesov rečne erozije.

#### **8.1.5.1.2 Uporaba podatkov, pridobljenih z lidarskimi snemanji površja**

Oprelitev do potencialne razvitosti procesov rečne erozije je v veliki meri odvisna od natančnosti prepoznavanja reliefnih (hidromorfoloških) oblik, ki so posledica delovanja procesov rečne erozije. Za prepoznavanje hidromorfoloških oblik morajo biti topografski podatki čim boljše kakovosti in pridobljeni v času normalnih/sušnih hidroloških razmer. DMV visoke ločljivosti, pridobljeni z lidarskimi snemanji imajo običajno visoko horizontalno natančnost, običajno je nekoliko slabša vertikalna natančnost, ki je tesno povezana s sposobnostjo pridobitve točnih podatkov o nivojih terena. Ločljivost in natančnost DMV, izdelanih za območja rečnih strug na osnovi lidarskih snemanj, se zmanjšata predvsem zaradi gostote vegetacijskega pokrova. To lahko precej omeji uporabo DMV na osnovi lidarskih snemanj za kartiranje in prepoznavanje procesov rečne erozije v ozkih gozdnatih dolinah. Dodatno težavo lahko predstavlja izvedba lidarskega snemanja v času visokovodnih razmer (npr. neposredno po poplavnih dogodkih), saj lidarski žarek v rdečem spektru ne more prodreti pod gladino vode.

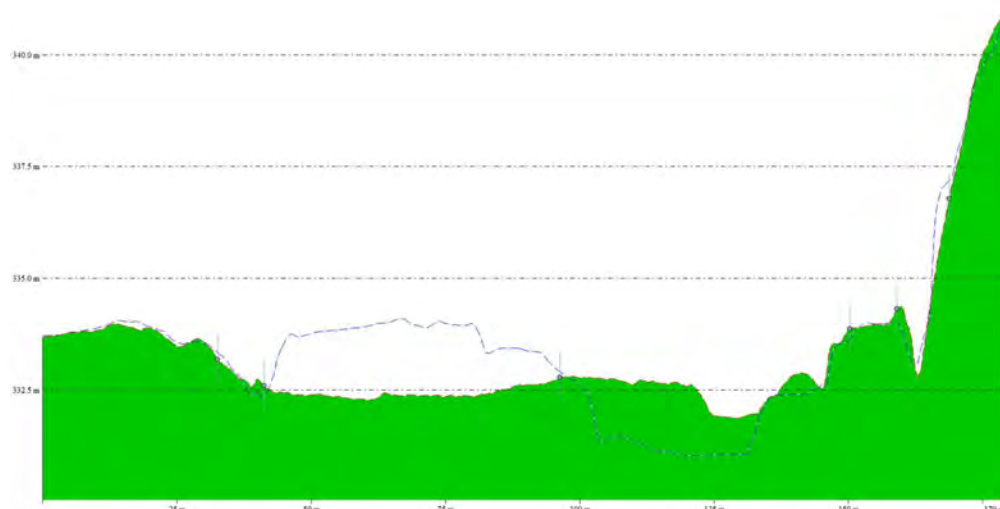
Če so na voljo podatki lidarskih snemanj iz različnih časovnih obdobj, se lahko na podlagi primerjave izdelanih DMV dobi dober vpogled v hidromorfološke spremembe vzdolž strug vodotokov in na poplavnih ravninah. Kot primer lahko pokažemo spremembe višin terena ob primerjavi lidarskih podatkov uradnega snemanja Slovenije iz leta 2014 in lidarskih podatkov snemanja, ki je bilo izvedeno nekaj dni po poplavnem dogodku avgusta 2023. V obeh primerih sta bila kot osnova za izdelavo primerjave izdelana DMV z velikostjo rasterske celice 0,5 m. Na sliki 8.13 je prikazan odsek Kamniške Bistrice ob naselju Homec, na katerem so vidne posledice bočne erozije vzdolž zunanje leve brežine struge v času poplavnega dogodka avgusta 2023. Posledično se je trasa struge vodotoka na tem odseku prestavila za več kot 60 m, kar je vidno iz podatkovnega sloja vodnih zemljišč (svetlo modro obarvani poligoni), ki prikazuje potek struge Kamniške Bistrice pred poplavnim dogodkom avgusta 2023.



**Slika 8.13:** Primer rezultatov primerjave DMV pred in po poplavnem dogodku avgusta 2023. Rdeče obarvana območja prikazujejo območja poglobitev zaradi delovanja bočne erozije v rečnem zavoju. Rumena črta prikazuje lokacijo prečnega prereza, prikazanega na sliki 8.14.

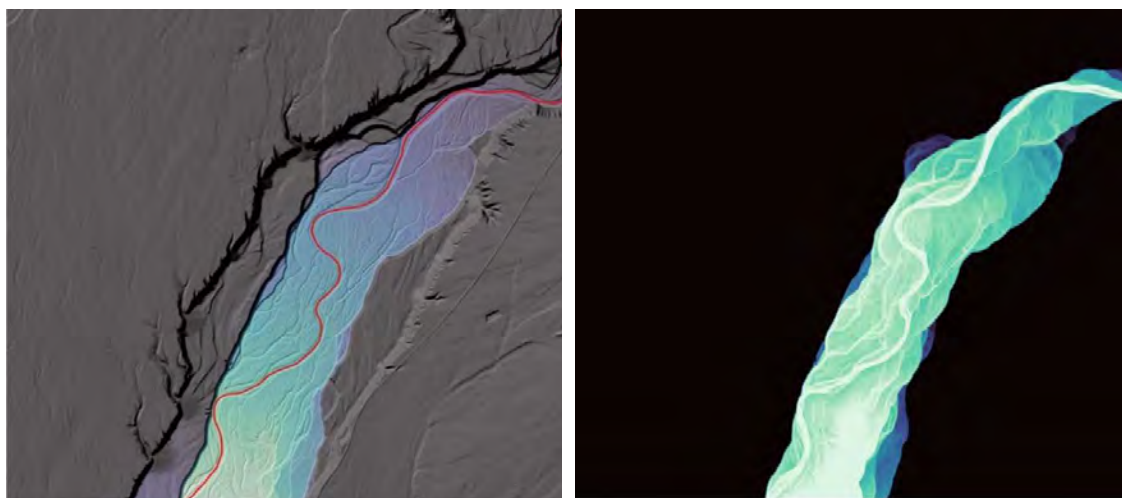
Na sliki 8.14 je prikazana primerjava geometrije prečnega prereza struge Kamniške Bistrice na lokaciji prečnega prereza, prikazanega na zgornji sliki 8.13.





**Slika 8.14:** Primerjava geometrije prečnega prereza struge Kamniške Bistrice pred (modra črtkana linija) in po poplavnem dogodku avgusta 2023 (polno zeleno območje). Rdeča črtkana črta prikazuje potek terena po poplavne dogodku.

Za analizo procesov rečne erozije je v nekaterih raziskavah (npr. Masse in sod., 2020) priporočena uporaba relativnega digitalnega modela višin (relativni DMV). Medtem ko DMV predstavlja absolutno nadmorsko višino, relativni DMV predstavlja relativno nadmorsko višino glede na najnižjo točko vzdolž osi struge (običajno vodna gladina v času izvajanja meritev LiDAR snemanja). Relativni DMV omogoča boljšo vizualizacijo hidromorfoloških sprememb, kot so npr. pretekli tlorisni poteki strug vodotokov, površine poplavne ravnice in rečne terase). Ob izdelavi relativnega DMV je treba rezultate analize preveriti z vidika natančnosti in točnosti osnovnega DMV. Primer relativnega DMV je prikazan na sliki 8.15.



**Slika 8.15:** Primer območja intenzivnih procesov rečne erozije na poplavnem območju (modro obarvano območje na sliki levo) na DMV in relativnem DMV (slika desno) (vir: <https://dancoecarto.com/>).

Vrednosti relativnega DMV so podane v odvisnosti od višinskih razlik terena med poteki terena na območju aktivne struge (rdeče obarvana linija na sliki 8.15 levo) in poteki terena na območju



obdajajočih poplavnih ravnin, kjer so prisotni aktivni procesi rečne erozije. Surian (2015) priporoča uporabo relativnega DMV predvsem vzdolž razvejanih strug vodotokov (angl. *braided river channels*), kjer že v obdobjih sorazmerno normalnih poplavnih razmer prihaja do obsežnejših sprememb v topografiji območij strug vodotokov.

### **8.1.6 Usmeritve za oceno potencialne razvitosti procesov rečne erozije na podlagi analize terenskih razmer in podatkov o procesih erozije morja**

Glede erozije morja je razlika med manj kompleksnimi in kompleksnejšimi metodami predvsem v tem, da pri manj kompleksni analizi dobimo osnovni vpogled v erozijsko dovzetnost območja, v bolj splošnem merilu, poleg tega lahko primerjamo erozijske stopnje in med seboj z istim GIS pristopom. Kompleksnejši pristop pa je zastavljen tako, da ga lahko uporabimo za kvantifikacijo oz. izračune prostornin, meritve premikov ipd. in za projektiranje sanacijskih ukrepov pred erozijo.

Kot zaključek usmeritev podanih na Nivoju 1 izpostavljamo, da je treba rezultate nadaljnjih analiz na Nivoju 2, ki so podrobneje predstavljeni v nadaljevanju, vedno osvetliti ter se do njih opredeliti z vidika opaženih razmer na terenu. To velja še posebej za rezultate, ki so pridobljeni s hidravličnim modeliranjem. Predvsem na območjih, kjer so bili ob terenskih ogledih zaznani intenzivnejši procesi rečne erozije, se je treba upredeliti do rezultatov hidravličnih izračunov, torej ali le-ti nakazujejo na pojav hidravličnih razmer, ki bi lahko vodile v obsežnejše procese rečne erozije.

## **8.2 Manj kompleksne metode za območja, kjer je pričakovan obseg erozijskega delovanja celinskih voda in morja omejen/majhen (Nivo 2)**

Za primere, kjer je na osnovi analiz hidromorfoloških razmer (Nivo 1) podana argumentirana ocena, da je pričakovani potencial erozijskih procesov celinskih voda in morja na obravnavanem območju oz. odseku zmeren oz. majhen ter je z vidika rabe prostora majhen tudi vpliv potencialnih erozijskih procesov, podajamo v nadaljevanju usmeritve za manj kompleksne pristope h kartiranju obsega erozijskih procesov celinskih voda in morja ter določanje razredov erozijske nevarnosti, pri čemer je analiza osredotočena na procese rečne erozije oz. erozije zaradi delovanja morja. V usmeritvah kot osnovno izhodišče upoštevamo Pravilnik o metodologiji za določanje območij, ogroženih zaradi poplav in z njimi povezane erozije celinskih voda in morja, ter o načinu razvrščanja zemljišč v razrede ogroženosti (v nadaljevanju Pravilnik), v katerem je predvidena opredelitev izdelovalcev strokovnih nalog do erozijskih razmer z vidika debeline odplavljanja in odlaganja erodiranega materiala. Dodatno predlagamo določene analize, ki po našem mnenju lahko prispevajo k boljšemu ovrednotenju potenciala procesov rečne erozije in bi predstavljale nadgradnjo običajnih analiz skladno s Pravilnikom. Kot izhodišče za tovrstne analize velja osnovna predpostavka, da imajo izdelovalci tovrstnih analiz predznanja s področja hidrologije, hidravlike, hidromorfologije in urejanja vodotokov ter da so seznanjeni z erozijskimi razmerami na obravnavanem zalednem prispevnem območju ter obravnavanem odseku vodotoka oz. obale morja.

Pri manj kompleksnih analizah procesov rečne erozije je poudarek na uporabi in nadgradnji vhodnih podatkov, ki so običajno razpoložljivi in uporabljeni za izdelavo hidrološko-hidravličnih študij, v okviru katerih se analizira prostorski obseg poplavne nevarnosti. Kjer so na razpolago podatki hidrometričnih meritev pretokov in hidravličnih razmer (hitrosti vodnega toka in smeri gibanja vodnega toka) na posameznih lokacijah, je treba tovrstne podatke vključiti v interpretacijo in analizo rezultatov hidravličnega modeliranja. V nadaljevanju so po posameznih točkah predstavljene usmeritve za

interpretacijo vhodnih podatkov in razmer, ki lahko v povezavi s specifičnimi lokalnimi razmerami pripomorejo pri uporabi običajnih, manj kompleksnih metod za izdelavo kart erozijske nevarnosti celinskih voda in morja.

### 8.2.1 Analiza hidroloških razmer

Hidrološke razmere na obravnavanem odseku vodotoka v povezavi s časovno porazdelitvijo in količino odtoka se lahko opredelijo na osnovi številnih, medsebojno soodvisnih dejavnikov, vključno z naklonom in velikostjo prispevnega območja (Dunne in Leopold, 1978), gostoto rečne mreže (Gregory in Walling, 1968), infiltracijsko zmogljivostjo in predhodnimi vlažnostnimi razmerami (Holman-Dodds in sod., 2003) ter količino in intenziteto padavin ali taljenja snega (Berghuijs in sod., 2016). Vključitev teh in drugih dejavnikov v kontekst hidroloških razmer, ki so povezani s procesi rečne erozije, je pomemben začetni korak pri ocenjevanju potencialnih procesov rečne erozije.

Poleg naravnih razmer lahko tudi številne človekove dejavnosti vplivajo na hidrološki odziv prispevnega območja. Povečan površinski padavinski odtok zaradi spremenjene rabe površin lahko vodi v intenzivnejše procese rečne erozije in spremenjeno geometrijo prečnih prereзов strug vodotokov, kar je najbolj izrazito zlasti na manjših prispevnih območjih (Vietz in sod., 2016). Podobno lahko požari v naravi znatno spremenijo odtočne razmere in količino sproščenih in odplavljenih sedimentov (Pierson in sod., 2001). Zmanjšanje pretoka zaradi preusmeritev ali zajezitev lahko povzroči, da se prečni prerez struge sčasoma zoži, saj se vegetacija lahko razširi v območje pretočnega prereza struge vodotoka in spodbudi odlaganje plavin (Church, 1995; Grams in Schmidt, 2002).

Poleg osnovnih hidroloških analiz, ki se v okviru hidrološko-hidravličnih študij opravijo za določitev konic visokovodnih pretokov s povratno dobo 10, 100 in 500 let ter projektnih hidrogramov skladno z Uredbo in Pravilnikom, je za analizo potenciala erozijskih procesov na določenem odseku vodotoka zelo pomembno ovrednotenje verjetnosti pojava pretokov z vidika hidravlične prevodnosti struge. V tuji literaturi se je najbolj razširjeno uveljavil predvsem t.i. *strugotvorni pretok* (angl. *bankfull discharge*), ki velja za pretok, ki bistveno vpliva na hidromorfološke procese v strugah vodotokov. Z drugimi besedami gre za pretok, ki popolnoma zapolni prečni prerez osnovne struge vodotoka oz. pretok, ki ga osnovna struga glede na ugotovljene hidravlične lastnosti strug vodotokov še lahko prevaja in torej predstavlja informacijo o hidravlični prevodnosti struge. Kot pove že sam slovenski izraz, strugotvorni pretok igra zelo pomembno vlogo pri oblikovanju prečnih prereзов strug predvsem na naravnih odsekih vodotokov, ki niso togo urejeni oz. regulirani. Glede na nekatere podatke iz literature se povratna doba strugotvornega pretoka vzdolž naravnih strug vodotokov giblje med 1 in 5 let (npr. Petit in Paquet, 1997). Ne gre pa zanemariti dejstva, da je glede na lokalne topografske, hidrogeološke in hidromorfološke razmere ocena povratne dobe strugotvornega pretoka lahko zahtevna in tudi prostorsko zelo spremenljiva. Z vidika običajnih pristopov k izdelavi hidrološko-hidravličnih študij izdelovalcem priporočamo, da se opredelijo do povratne dobe ugotovljenega strugotvornega pretoka oz. prevodnosti struge vodotoka (če so na razpolago podatki verjetnostne analize pretokov). Če tovrstnih podatkov ni na razpolago, pa se izdelovalci opredelijo vsaj do tega, ali je strugotvorni pretok bistveno manjši od npr. pretoka  $Q_{10}$ . V tem primeru se lahko sklepa, da je pojavnost strugotvornega pretoka na obravnavanem odseku vodotoka pogosta, s tega vidika pa je pogostejši pojav pretočnih razmer, v katerih lahko pride do intenzivnejših procesov rečne erozije, saj so v primerih pogoste pojavnosti pretokov v rangu strugotvornega pretoka hidravlične obremenitve na ostenje dna struge (dno in brežine) večje, posledično lahko pogosteje pride do razvoja obsežnejših procesov rečne erozije ter pogostejšega razlivanja poplavnih voda na obdajajoče poplavne površine. V primerih strugotvornega pretoka, ki bistveno presega pretok z 10-letno povratno dobo, se lahko

domneva, da je s hidrološkega vidika pojavnost visokovodnih razmer, ki vodijo v obsežnejše procese rečne erozije, manj verjetna. Seveda se je treba v povezavi z zgoraj omenjenimi relacijami med strugotvornim pretokom in povratnimi dobami pretokov opredeliti tudi do drugih vidikov pojavnosti procesov rečne erozije, ki jih prepoznamo na osnovi terenskih ogledov. Kot dodaten kazalnik oz. skupino kazalnikov potenciala procesov rečne erozije, ki povezujejo hidrološki odziv prispevnega območja obravnavanega odseka vodotoka z lokalnimi topografskimi lastnostmi, se lahko uporabi enega od t.i. indeksov moči vodotoka (angl. *stream power index - SPI*) oz. enotne moči vodotoka (angl. *unit stream power - USP*). Najpogostejša enačba za izračun indeksa moči vodotoka povezuje hidrološke lastnosti (preko vrednosti pretoka  $Q$ ) s hidromorfološkimi lastnostmi (naklon dna struge, širina gladine pri strugotvornem pretoku). Primer ene izmed enačb za izračun USP je podan spodaj:

$$USP = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot S}{W} \quad (8.1)$$

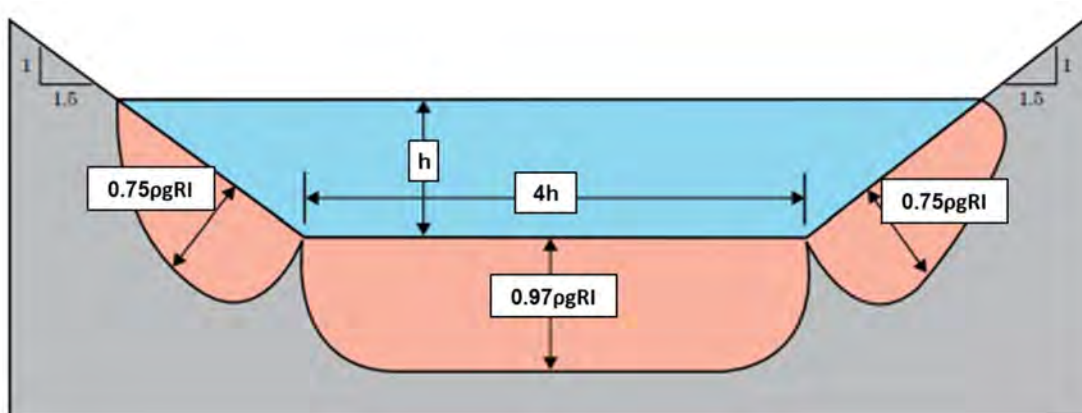
kjer je:  $USP$ ...enotna moč vodotoka [Watt/m<sup>2</sup>]  
 $\rho$ ...gostota vode [kg/m<sup>3</sup>]  
 $g$ ...gravitacijski pospešek [m/s<sup>2</sup>]  
 $Q$ ...pretok [m<sup>3</sup>/s]  
 $S$ ...povprečni naklon gladine (pogosto privzet kot povprečni naklon dna struge) [m/m]  
 $W$ ...širina gladine [m]

Mejne vrednosti oz. razponi absolutnih vrednosti moči enotnega toka so bili v številnih raziskavah povezani z hidromorfološkimi spremembami strug vodotokov kot posledica intenzivnih procesov rečne erozije (Magilligan, 1992; Yochum in sod., 2017). Magilligan (1992) je predlagal prag 300 W/m<sup>2</sup> kot mejo, nad katero je mogoče pričakovati zelo intenzivne procese rečne erozije. Yochum in sod. (2017) so predstavili razpon vrednosti enotne moči vodotokov, povezanih z nizkimi do visokimi kategorijami hidromorfološkega odziva. Medtem ko se lahko absolutne vrednosti enotne moči toka povezujejo z verjetnostjo hidromorfoloških sprememb, je treba za celostno razumevanje potencialnih sprememb hidromorfoloških razmer v povezavi z določanjem erozijskega koridorja vodotoka proučiti tudi prostorsko razporeditev indeksov, predvsem v povezavi s procesi premeščanja plavin. Ob tem velja opozorilo, da mnoge raziskave kažejo, da je treba biti pri interpretaciji procesov rečne erozije z različnimi indeksi moči vodotokov previden in da pogosto tovrstni indeksi precej slabo odražajo dejanske procese rečne erozije, zaznane na terenu (Parker in Davey, 2023).

## 8.2.2 Analiza hidravličnih razmer

V večini hidrološko-hidravličnih študij, v okviru katerih se pripravljajo karte erozijske nevarnosti celinskih voda in morja, je analiza hidravličnih razmer opravljena s pomočjo kombiniranih 1D/2D hidrodinamičnih modelov. V zadnjem času se z razvojem hidrodinamičnih modelov in bolj zmogljivimi računalniki vse pogosteje uporabljajo tudi polni 2D hidrodinamični modeli. S pomočjo tovrstnih hidrodinamičnih modelov lahko na podlagi hidravličnih izračunov za območja strug vodotokov in obdajajoča poplavna območja pridobimo številne dodatne informacije o lastnostih vodnega toka oz. pričakovanih hidravličnih razmerah na območjih razlivanja poplavnih voda. To omogoča boljši vpogled v obseg in prostorsko spremenljivost procesov rečne erozije. Gre predvsem za podatke o pretočnih hitrostih, globinah vodnega toka in strižnih napetostih, ki veljajo za osnovne hidravlične spremenljivke, s katerimi so povezani procesi rečne erozije tako v smislu procesov spiranja (erodiranja) plavin, njihovega premeščanja dolvodno kot tudi procesov odlaganja plavin.

Raziskav o strižnih obremenitvah na območjih rečnih strug s prevladujočo enodimenzijsko komponento vodnega toka lahko v literaturi najdemo precej. V večini primerov so podane teoretične razporeditve strižnih napetosti (zelo pogosto ločeno za dno struge in območja brežin), ki lahko v odvisnosti od zrnavostne sestave materiala na dnu struge in brežinah vodijo v procese rečne erozije. Primer teoretične razporeditve strižnih napetosti na ravnem odseku simetrične trapezne struge je prikazan na sliki 8.16. V odvisnosti od geometrijskih nepravilnosti v prečnih prerezih rečnih strug, tlorisnih potekov rečnih strug in spremenljivosti hidravličnih razmer je porazdelitev pretočnih hitrosti in strižnih napetosti v prečnih prerezih strug vodotokov lahko bistveno drugačna.



**Slika 8.16:** Prikaz teoretične razporeditve strižnih napetosti na ravnem odseku struge s simetričnim trapeznim prečnim prerezom (povzeto po različnih priročnikih).

Poudariti velja, da je delovanje vodnega toka na zrna plavin (tako v strugi vodotoka kot na poplavnih območjih) zelo zapleteno in močno odvisno od lokalnih hidravličnih razmer, ki so posledica specifičnega dogajanja v času posameznih poplavnih dogodkov. V enodimenzionalnem toku, ki je zelo dobra poenostavitev hidravličnih razmer v strugah vodotokov, se lahko z raznimi matematičnimi in empiričnimi pristopi procese delovanja vodnega toka na zrna plavin dokaj dobro opiše preko hitrosti vodnega toka in strižnih napetosti. Na poplavnih območjih je gibanje vodnega toka v enodimenzionalni smeri manj izrazito in ga lahko bistveno bolje opišemo z upoštevanjem 2D hidrodinamičnih izračunov, kar pa seveda dodatno zaplete upoštevanje delovanja vodnega toka v smislu potencialnih erozijskih procesov. Med najpomembnejše lastnosti površin, ki vplivajo na gibanje vodnega toka, štejemo lokalni naklon terena in hrapavostne razmere, ki so vezane na rabo zemljišč. V nadaljevanju podajamo nekaj usmeritev za upoštevanje rabe tal (zemljišč) in lastnosti zemljin, ki jih je smiselno upoštevati v nadaljnjih analizah razmer rečne erozije.

### 8.2.2.1 Dejanska raba zemljišč

Zakon o urejanju prostora med drugim definira klasifikacijo prostora oziroma razvrščanje zemljišč. V grobem lahko razdelimo prostor po namenski in dejanski rabi prostora. Za potrebe hidravličnih analiz in nadaljnjih analiz rečne erozije je smiselno upoštevati dejansko rabo prostora, ki izkazuje dejansko stanje v prostoru. Po Zakonu o katastru nepremičnin (ZKN 54/2021) se v katastru nepremičnin vodijo podatki o petih vrstah dejanske rabe zemljišč, in sicer kmetijska zemljišča, gozdna zemljišča, vodna zemljišča, pozidana zemljišča in neplodna zemljišča.

Osnovne kategorije dejanske rabe kmetijskih zemljišč se naprej delijo v skupine. Ločimo kmetijska zemljišča brez trajnih nasadov (njive, travniki, pašniki), posebej so kategorizirani trajni nasadi v osmih



dejanskih rabah (hmeljišče, trajne rastline na njivskih površinah, vinogradi, matičnjak, intenzivni sadovnjak, oljčnik, ostali trajni nasadi ter plantaže gozdnega drevja). Za procese rečne erozije so najbolj dovzetna kmetijska zemljišča brez vegetacijskega pokrova (npr. v obdobjih začetne rasti kmetijskih poljščin) in kmetijska zemljišča, kjer je vegetacijski pokrov nesklenjen, način obdelave kmetijskih površin pa spodbuja koncentracijo vodnih tokov in hitreje gibanje poplavnih voda v povezavi z večjo erodibilnostjo zemljin, ki se odrazi v maksimalnih dovoljenih pretočnih hitrostih in maksimalnih dovoljenih strižnih napetostih, kot je podrobneje predstavljeno v naslednjih poglavjih. Erozijskim procesom zaradi gibanja poplavnih voda so sicer lahko podvržene tudi določene dejanske rabe pozidanih zemljišč, če se nahajajo v bližini vodotokov oziroma na njihovih poplavnih območjih (poseljena zemljišča s podkategorijami: območje za turizem in rekreacijo tj. območje za kampiranje, območje za šport in rekreacijo, območje zelenih površin v javni rabi).

Podrobna raba zemljišč, podana v GIS podatkovnih slojih, je na razpolago na javno dostopnem spletnem pregledovalniku Ministrstva za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano (<https://rkg.gov.si/vstop/>), od koder se podatke o rabi zemljišč lahko prenese v .shp vektorskem podatkovnem sloju.

### 8.2.2.2 Klasifikacija zemljin

Za hidravlično analizo in analizo procesov rečne erozije so uporabni predvsem podatki o zrnavostni sestavi tal in morebitni podatki o stopnji konsolidiranosti tal. S pomočjo pedološke karte se lahko določi tip tal, s pomočjo klasifikacije tal in geološke karte pa se pridobi dodatne informacije o geološki osnovi ter nanosih, na katerih se zemljina nahaja, kakšna je debelina plasti zemljine itd. Klasifikacija tal, ki je upoštevana na pedološki karti Slovenije, je osnovana na klasifikaciji svetovne referenčne baze za mednarodno klasifikacijo tal (angl. *World Reference Base - WRB*). Razdelitev na pedokartografske enote (osnovno kartografsko enoto pedološke karte) je osnovana na analizi lastnosti zemljin. Za vsakdanjo inženirsko uporabo je ena ključnih lastnosti zemljin zrnavostna sestava zemljin. V splošni inženirski uporabi je razširjena mednarodna identifikacija in klasifikacija zemljin (ISO 14688-1:2017), ki je povzeta v preglednici 8.2.

**Preglednica 8.2:** Mednarodna klasifikacija zemljin glede na zrnavostno sestavo.

Velikost zrn	Ime frakcije		Simbol	Velikost [mm]
	slo.	angl.		
Zelo velika zrnavost zemljin	Velike skale	Large boulder	LBo	>630
	Skale	Boulder	Bo	200-630
	Kamenje	Cobble	Co	63-200
Velika zrnavost	Debel gramoz	Coarse gravel	CGr	20-63
	Srednji gramoz	Medium gravel	MGr	6.3-20
	Droben gramoz	Fine gravel	FGr	2.0-6.3
	Debel pesek	Coarse sand	CSa	0.63-2.0
	Srednji pesek	Medium sand	MSa	0.2-0.63
	Droben pesek	Fine sand	FSa	0.063-0.2
Drobna zrnavost	Debel melj	Coarse silt	CSi	0.02-0.063
	Srednji melj	Medium silt	MSi	0.0063-0.02
	Droben melj	Fine silt	FSi	0.002-0.0063
	Glina	Clay	Cl	<0.002

### 8.2.2.3 Odpornost tal na procese rečne erozije

V splošnem lahko ugotovimo, da imajo poleg upoštevanih lastnosti vodnega toka (preko izračunanih pretočnih hitrosti in strižnih napetosti) največji vpliv na potencialno razvitost procesov rečne erozije lastnosti tal v kombinaciji z lastnostmi vegetacijskega pokrova. V preglednici 8.3 so podane vrednosti maksimalnih dovoljenih pretočnih hitrosti, ki predstavljajo mejne vrednosti za začetek premeščanja materiala oz. tal različne zrnavostne sestave.

**Preglednica 8.3:** Maksimalne dovoljene pretočne hitrosti, preden se začnejo procesi premeščanja zrn materiala (povzeto po Parker in Garcia, 2005).

Zrnavostna sestava tal oz. material	Maksimalno dovoljena pretočna hitrost [m/s]		
	Gola tla	Srednja travnata zaraščenost	zatravljena površina
Meljast pesek	0,305	0,762	1,372
Droben pesek	0,457	0,914	1,524
Debel pesek	0,762	1,219	1,676
Srednji pesek	0,762	1,372	1,981
Zbita glina	1,067	1,676	2,286
Glinenast pesek	1,372	1,829	2,438
Debel gramoz	1,524	1,829	0
Skrilavec	1,829	2,134	0
Konglomerat	2,438	0	0

V literaturi najdemo tudi kar nekaj raziskav, v katerih so poskušali definirati povezavo med hitrostjo vodnega toka in strižno napetostjo. Povezavo med strižno napetostjo in hitrostjo vodnega toka je predlagal Scobey (1930) in določil odvisnost strižne napetosti od hitrosti vodnega toka za kohezivna in nekohezivna tla. Osnovna študija je bila s številnimi kasnejšimi raziskavami večkrat dopolnjena, da bi se lahko ocenilo nevarnost pojava erozije vodnega toka glede na sestavo tal, hitrost, globino, hrapavost tal in naklone terena. Študija je bila primarno namenjena za obvladovanje erozije na kmetijskih površinah. V spodnji preglednici 8.4 so navedene maksimalne strižne napetosti, ki se pojavijo na dnu struge vodotokov. Strižna napetost na brežini struge predstavlja 76–78 % spodaj navedenih vrednosti. Pri uporabi podatkov iz preglednice 8.4 moramo biti pozorni na lastnosti vodotoka, saj veljajo za ravne vodotoke z dolgimi prehodnicami, v primerih vijugastega poteka pa se priporoča zmanjšanje maksimalne dopustne hitrosti za četrtno. Do sprememb vrednosti pride tudi ob upoštevanju globine nad 0,91 m ter ob prisotnosti abrazivnih materialov in finih zemljin v vodnem toku.

**Preglednica 8.4:** Priporočljive maksimalne hitrosti vodnega toka in maksimalne strižne napetosti (Scobey, 1930).

Material	ČISTA VODA		VODA S KOLOIDNIMI DELCI	
	Hitrost vodnega toka [m/s]	Strižna napetost [N/m <sup>2</sup> ]	Hitrost vodnega toka [m/s]	Strižna napetost [N/m <sup>2</sup> ]
Droben, nekoloiden pesek	0,460	1,29	0,762	3,59
Peščen prod, nekoloiden	0,533	1,77	0,762	3,59
Aluvialne naplavine, nekoloidne	0,610	2,30	0,914	5,27
Navaden prod	0,762	3,59	1,070	7,18
Vulkanski pepel	0,762	3,59	1,070	7,18
Glina, zelo koloidna	1,140	12,40	1,520	22,00
Aluvialne naplavine, zelo koloidne	1,140	12,40	1,520	22,00
Skrilavci in skalnata podlaga	1,830	32,10	1,830	32,10
Droben gramoz	0,762	3,59	1,520	15,30
Posamezna zrna proda in konglomerati	1,140	18,20	1,520	31,60
Zrnate naplavine	1,220	20,60	1,680	38,30
Grob gramoz, nekoloiden	1,220	14,40	1,830	32,10
Kamen in prod	1,520	43,60	1,680	52,70

Večina raziskav erozivnega delovanja vodnega toka je bila opravljenih na neskonsolidiranih materialih, torej na nasutih materialih dokaj enovite zrnastostne sestave, skladno s splošno opredeljenimi razredi zrnastostne sestave. V naravnih razmerah je erozijska odpornost naravnih materialov zaradi naravne skonsolidiranosti tal in raznolike zrnastostne sestave običajno višja od vrednosti kritičnih pretočnih hitrosti in kritičnih strižnih napetosti, ugotovljenih v laboratorijskih razmerah. Naravna tla so običajno mešanice kohezivnih in nekohezivnih delcev ter organske snovi, ki lahko deluje tudi kot dodatno vezivo med mineralnimi delci ter dodatno prispeva k povečani protierozijski odpornosti tal pred delovanjem vodnega toka.

Pri obravnavi procesov rečne erozije moramo poleg podatkov o zrnastosti sestavi tal upoštevati še podatke o vegetacijskem pokrovu oz. podatke o rabi tal, saj ravno sklenjen in razvit vegetacijski pokrov velja za glavni kontrolni mehanizem obvladovanja predvsem površinskih procesov rečne erozije na brežinah strug vodotokov in poplavnih območjih. Na poplavljenih območjih je količina premeščenega materiala odvisna od mehanskih lastnosti podlage ter predvsem od pokrovnosti in rabe tal na poplavnih območjih. Preglednica 8.5 podaja nekatere priporočene vrednosti kritičnih pretočnih hitrosti in strižnih napetosti za različne materiale, tipe pokrovnosti tal in nekatera obrežna zavarovanja.

**Preglednica 8.5:** Kritične pretočne hitrosti in strižne napetosti za različne zemljine, tipe pokrovnosti tal in nekatera obrežna zavarovanja (povzeto po Giordanengo in sod., 2016).

KATEGORIJA	Vrsta materiala /ureditve	Kritična strižna napetost [N/m <sup>2</sup> ]	Kritična pretočna hitrost [m/s]	VIR
Zemljina	Droben koloidni pesek	1-1,4	0,5	A
	Peščena ilovica (nekoloidna)	1,4-1,9	0,5	A

	Aluvialni mulj (nekoloidni)	2,2-2,4	0,6	A
	Meljasta ilovica (nekoloidna)	2,2-2,4	0,5-0,7	A
	Trdna ilovica	3,6	0,8	A
	Fini prod	3,6	0,8	A
	Trda glina	12,4	0,9-4,5	A, F
	Aluvialni mulj (koloidni)	12,4	1,1	A
	Razvrščena ilovica do tlakovcev	18,2	1,1	A
	Razvrščeni mulji do tlakovcev	20,6	1,2	A
	Skrilavci	32,1	1,8	A
<b>Gramoz</b>	2,5 cm	15,8	0,8-1,5	A
	5 cm	32,1	0,9-1,8	A
	15 cm	95,8	1,2-2,3	A
	30 cm	191,5	1,7-3,7	A
<b>Vegetacija</b>	Travna ruša razreda A	177,2	1,8-2,4	E, N
	Travna ruša razreda B	100,6	1,2-2,1	E, N
	Travna ruša razreda C	47,9	1,1	E, N
	Visoka trava	57,5-81,4	1,2-1,8	E, N
	Nizka trava	33,5-45,5	0,9-1,2	G, H, L, N
	Trsne zasaditve	4,8-28,7	Ni definirano	G, H, L, N
	Nasadi trdega lesa	19,6-119,7	Ni definirani	E, N
<b>Razgradljiva vlakna</b>	Juta	21,5	0,3-0,8	E, H, N
	Slamnata mreža	71,8-79	0,3-0,9	E, H, N
	Kokosovo pletivo	107,7	0,9-1,2	E, M
	Mreža iz umetnih vlaken	95,8	0,8-2,1	E, H, M
<b>Nerazgradljiva vlakna</b>	Nezaraščeno	143,6	1,5-2,1	E, G, M
	Delno zaraščeno	191,5	2,3-4,6	E, G, M
	Popolnoma zaraščeno	383,1	2,4-6,4	E, G, M

<b>Kamen v suho</b>	D <sub>50</sub> =15cm	119,7	1,5-3,0	F, L, M
	D <sub>50</sub> = 23cm	181,9	2,1-3,4	H
	D <sub>50</sub> =30cm	244,2	3,0-4,0	H
	D <sub>50</sub> =46cm	363,9	3,7-4,9	H
	D <sub>50</sub> =61cm	483,6	4,3-5,5	E



<b>Inženirsko-biološke metode</b>	Zvitki iz geotekstila	9,6-47,9	0,9	C, I, J, N															
	Fašine	28,7-59,9	1,5	E															
	Kokosovo pletivo	143,6-239,4	2,4	E, M, N															
	Zaraščeno kokosovo pletivo	191,5-381,1	2,9	E, M, N															
	Zasaditev grmovne zarasti - začetno stanje	19,2-196,3	1,2	B, E, I															
	Zasaditev grmovne zarasti - končno stanje	186,7-392,6	3,7	B, C, E, I, N															
	Grmovna zarast v plasteh	19,2-299,3	3,7	E, I, N															
	Vrbov poplet	59,9-148,4	1,8-2,4	C, E, I, N															
	Vrbov poplet v slojih	100,6-148,4	0,9	E, N, O															
<b>Utrjene površine</b>	Gabioni	478,8	4,3-5,8	D															
	Beton	598,5	5,5	H															
<b>VIRI</b>																			
<table> <tbody> <tr> <td>A. Chang (1988)</td> <td>F. Julien, (2002)</td> <td>K. Sprague (1999)</td> </tr> <tr> <td>B. Florineth (1982)</td> <td>G. Kouen in sod. (1980)</td> <td>L. Temple (1980)</td> </tr> <tr> <td>C. Gerstgraser (1988)</td> <td>H. Norman (1975)</td> <td>M. TXDOT (1999)</td> </tr> <tr> <td>D. Goff (1999)</td> <td>I. Schiechl in Stern (1996)</td> <td>N. Fisichenich (2001)</td> </tr> <tr> <td>E. Gray in Sotir (1996)</td> <td>J. Schoklitsch, (1937)</td> <td>O. USACE (1997)</td> </tr> </tbody> </table>					A. Chang (1988)	F. Julien, (2002)	K. Sprague (1999)	B. Florineth (1982)	G. Kouen in sod. (1980)	L. Temple (1980)	C. Gerstgraser (1988)	H. Norman (1975)	M. TXDOT (1999)	D. Goff (1999)	I. Schiechl in Stern (1996)	N. Fisichenich (2001)	E. Gray in Sotir (1996)	J. Schoklitsch, (1937)	O. USACE (1997)
A. Chang (1988)	F. Julien, (2002)	K. Sprague (1999)																	
B. Florineth (1982)	G. Kouen in sod. (1980)	L. Temple (1980)																	
C. Gerstgraser (1988)	H. Norman (1975)	M. TXDOT (1999)																	
D. Goff (1999)	I. Schiechl in Stern (1996)	N. Fisichenich (2001)																	
E. Gray in Sotir (1996)	J. Schoklitsch, (1937)	O. USACE (1997)																	

Iz velikih razlik med posameznimi vrednostmi maksimalne hitrosti vodnega toka oz. maksimalnih vrednosti strižnih napetosti je torej očitno, da različna pokrovnost in posledično vrsta rabe tal močno vplivata na strižno odpornost podlage in zato na potencialno intenziteto procesov rečne erozije. Pri travni ruši je mejna strižna napetost za približno polovico manjša kot pri sklenjeni gozdni vegetaciji ali grmičevju, pri razgaljeni zemljini pa je lahko njena vrednost celo desetkrat manjša.

V nadaljevanju povzemamo nekatere najpogosteje uporabljene metode za oceno strižnih napetosti, s katerimi vodni tok deluje na ostenje, po katerem se giblje.

#### 8.2.2.4 Metode za oceno strižnih napetosti vodnega toka

Različne procesne vidike mehanizmov, ki vplivajo na intenziteto procesov rečne erozije, smo podrobneje predstavili v poglavju 2. Osnovna enačba za oceno strižnih napetosti ima naslednjo obliko:

$$\tau = \rho \cdot g \cdot R \cdot I \quad (8.2)$$

kjer je:

- $\tau$ ...strižna napetost vodnega toka [N/m<sup>2</sup>]
- $\rho$ ...specifična gostota vode [kg/m<sup>3</sup>]
- $g$ ...težni pospešek = 9,81 [m/s<sup>2</sup>],
- $R$ ...hidravlični radij struge [m]
- $I$ ...naklon energijske črte (najpogosteje aproksimiran z naklonom dna struge) [-]

V nadaljevanju predstavljamo nekaj metod za izračun strižnih napetosti. Poudarek je predvsem na metodah, ki omogočajo oceno pričakovanih kritičnih strižnih napetosti tudi na poplavnih površinah, torej območjih, ki so v hidravličnih modelih najpogosteje zajeta z 2D hidravličnimi izračuni. Metode temeljijo predvsem na povezavah med lastnostmi vodnega toka (globina, hitrosti vodnega toka) in lastnostmi površine (erodibilnostnimi lastnostmi zemljin), po kateri se vodni tok giblje.

Pri tem je zrnavostna sestava materiala lahko upoštevana preko hidravlične hrapavosti, ki je na splošno zelo pomemben dejavnik hidravličnih razmer v strugah vodotokov. S tovrstnimi metodami je mogoče oceniti strižne napetosti na območjih rečnih strug in, kar je z vidika izdelave kart poplavne nevarnosti glede na obstoječo zakonodajo še bolj relevantno, razporeditev strižnih napetosti na poplavnih območjih.

#### 8.2.2.4.1 Izračun strižnih napetosti po Shieldsu

Pri Shieldsovem izračunu strižnih napetosti je upoštevana zveza med strižnim Reynoldsovim številom in kritično strižno napetostjo. Kritična strižna napetost je napetost, ki predstavlja mejno vrednost za začetek premeščanja plavin. Reynoldsovo število ne sledi klasičnemu izračunu z gostoto in viskoznostjo, ampak strižni hitrosti in velikosti zrn. Enačba za strižno Reynoldsovo število je naslednja:

$$Re^* = \frac{u_* d_s}{\nu} \quad (8.3)$$

kjer je:  $Re^*$ ...strižno Reynoldsovo število [-],  
 $u_*$ ...strižna hitrost ( $\sqrt{g \cdot I \cdot R}$ ) [m/s],  
 $\nu$ ...kinematična viskoznost [m<sup>2</sup>/s],  
 $d_s$ ...premer zrn [m].

Za določitev kritične strižne napetosti je Shields (1936) vpeljal t.i. brezdimenzijsko napetost oziroma Shieldsov parameter:

$$\theta = \frac{\tau}{(\rho_s - \rho_v) g d_s} \quad (8.4)$$

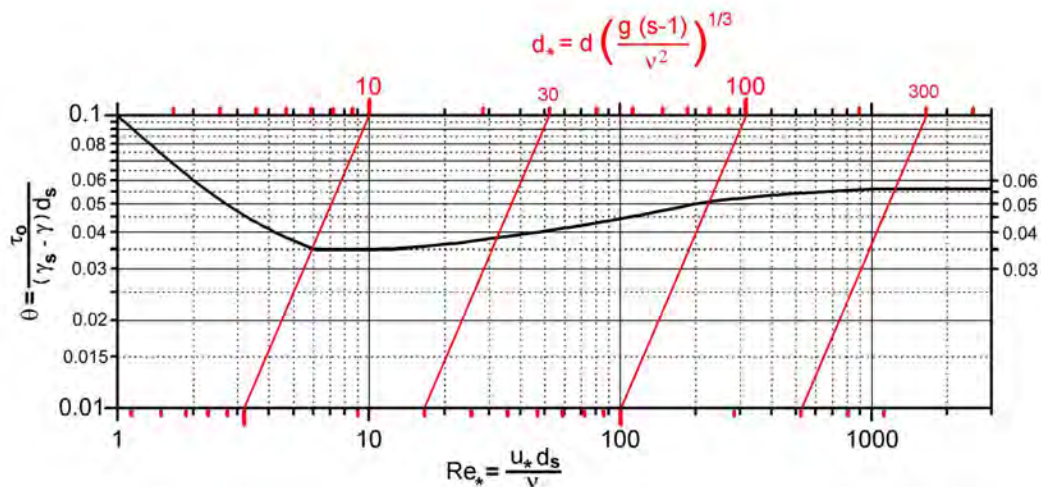
kjer je:  $\theta$ ...brezdimenzijska napetost [-],  
 $\tau$ ...strižna napetost na dnu oziroma vlečna sila vodnega toka [N/m<sup>2</sup>],  
 $\rho_s$ ...gostota materiala [kg/m<sup>3</sup>],  
 $\rho_v$ ...gostota vode = 1.000 [kg/m<sup>3</sup>],  
 $g$ ... težni pospešek = 9,81 [m/s<sup>2</sup>],  
 $d_s$ ...premer zrn [m].

V enačbi za brezdimenzionalno napetost je upoštevan dejanski premer zrn, sam Shieldsov diagram pa sestavlja povezavo med količinami z brezdimenzijskim premerom zrn, ki se ga izračunamo po formuli:

$$d_* = d_s \left( \frac{g (s-1)}{\nu^2} \right) \quad (8.5)$$

kjer je:  $d_*$ ...brezdimenzijski premer zrn [-],  
 $d_s$ ...dejanski premer zrn [m],  
 $s$ ...relativna gostota [-],  
 $\nu$ ...kinematična viskoznost vode [m<sup>2</sup>/s].

Za izračun kritične strižne napetosti na podlagi podatkov o zrnastosti sestavi materiala najprej izračunamo brezdimenzijsko velikost zrn, sledi odčitek iz diagrama, prikazanega na sliki 8.17 za brezdimenzijsko napetost  $\theta$ . Za odčitek se privzame mejno vrednost, ki jo nakazuje vzdolžna odebeljena krivulja na diagramu. Krivulja predstavlja mejno stanje. Za vrednosti strižne napetosti pod krivuljo gibanja se pričakuje, da za določen zrnastosti razred ni premeščanja, območje nad krivuljo predstavlja vrednosti, ko se material določene zrnastostne sestave premešča. Iz enačbe za brezdimenzijsko napetost se izrazi in izračuna kritična strižna obremenitev.



**Slika 8.17:** Shieldsov diagram. Krivulja predstavlja mejo med stabilnimi razmerami, v katerih ne pride do premeščanja plavin (območje pod krivuljo) in območjem premeščanja zrn plavin (območje nad krivuljo).

Ugotovimo lahko, da je izračun strižnih napetosti po Shieldsu najširše uporabljen in obenem vključen v hidrodinamične modele, ki se v praksi najpogosteje uporabljajo (npr. HEC-RAS, MIKE-Flood).

#### 8.2.2.4.2 Izračun strižnih napetosti po Einsteinu

Veliko število metod za izračun strižnih obremenitev temelji na Shieldsovem pristopu, ki je vključen tudi v nekatere hidrodinamične modele, ki se uporabljajo za analizo poplavne nevarnosti. Hans Albert Einstein je z modeli v laboratoriju oziroma z empiričnimi metodami na podlagi teorije verjetnosti prišel do drugačnega brezdimenzijskega parametra. Pri tem je bila upoštevana predpostavka, da je premeščanje plavin odvisno zgolj od lastnosti zrn plavin in neodvisno od gibanja drugih soležnih zrn plavin. Einsteinov parameter je definiran kot:

$$\theta = \frac{u}{g h d_{50} \sqrt{d_{50}}} \quad (8.6)$$

kjer je :

- $\theta$ ...brezdimenzijski Einsteinov parameter [-],
- $g$ ...težni pospešek = 9,81 [m/s<sup>2</sup>],
- $d_{50}$ ...srednja vrednost premera zrn [m],
- $u$ ...kinematična viskoznost vode [m<sup>2</sup>/s],
- $h$ ...višina vode [m]

Povezava med parametrom toka ( $\Psi$ ) in brezdimenzijsko Einsteinovo strižno napetostjo ( $\theta$ ) se glasi:

$$\theta = f(\psi). \quad (8.7)$$

Ker je Einsteinov parameter določen empirično, funkcijo upoštevamo v povezavi s konstantami A in B, ki sta odvisni od oblike in velikosti zrn ter hitrosti toka.

$$A\theta = f(B\psi) \quad (8.8)$$

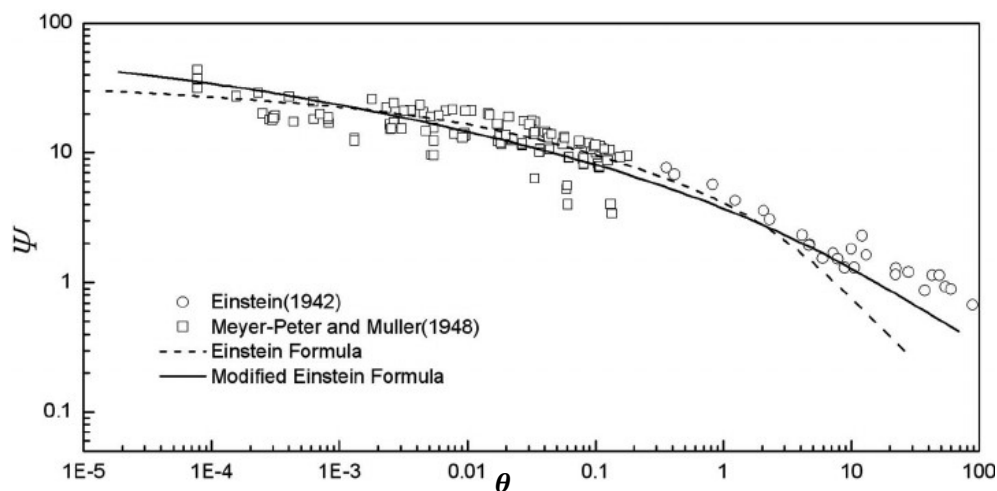
Pri tem je parameter toka ravno tako brezdimenzijski in ima obliko:

$$\Psi = \frac{(\gamma-1) d_{50}}{R S} \quad (8.9)$$

kjer je:  $R$ ...hidravlični radij [m],  
 $\gamma$ ...specifična teža sedimenta [ $N/m^3$ ],  
 $S$ ...naklon energijske črte,  
 $d_{50}$ ...srednja vrednost premera zrn [m].

Enačbe za transport plavin s strižnimi obremenitvami kot so jih definirali Einstein, Meyer-Peter-Müller, Hansen ipd. so uporabljene za opredelitev zveze med brezdimenzijskim strižnim parametrom ( $\theta$ ) in parametrom toka vode ( $\Psi$ ).

Na sliki 8.18 je prikazana povezava med brezdimenzijskim parametrom toka vode in strižno napetostjo po nekaterih metodah.



**Slika 8.18:** Einsteinova funkcija transporta sedimentov v primerjavi z nekaterimi ostalimi pristopi.

Za nadaljnji izračun strižnih napetosti se uporabi osnovno formulo, ki jo je uvedel že Shields. Strižno obremenitev izračunamo po formuli:

$$\tau = \Phi (\rho_s - \rho_v) d_{50} g \quad (8.10)$$

kjer je:  $\Phi$  ...brezdimenzijska strižna napetost [-],  
 $\tau$  ...strižna napetost [ $N/m^2$ ],  
 $\rho_s$ ... gostota materiala [ $kg/m^3$ ],  
 $\rho_v$ ... gostota vode = 1.000 [ $kg/m^3$ ],  
 $g$ ... gravitacijski pospešek = 9,81 [ $m/s^2$ ],  
 $d_{50}$ ...srednji premer zrn [m].

#### 8.2.2.4.3 Izračun strižnih napetosti po Meyer-Peteru in Mülleru

Leta 1948 sta Meyer-Peter in Müller objavila rezultate laboratorijskih analiz premeščanja plavin. Pri enodimenzionalnem pristopu hidravlične analize strižnih napetosti se uporablja osnovna enačba, v osnovni obliki zapisana kot:

$$\tau = \gamma R S \quad (8.11)$$

kjer je:  $\gamma$ ...specifična teža vode [ $\text{N}/\text{m}^3$ ],  
 $R$ ...hidravlični radij [m]  
 $S$ ...naklon energijske črte [- oz.  $\text{m}/\text{m}$ ].

Meyer-Peter in Müller sta znana po metodi za določitev premestitvene zmogljivosti in brezdimenzijske strižne napetosti. S preoblikovanjem enačb za premestitveno zmogljivost in brezdimenzijsko napetost sta kasneje v povezavi s kritično strižno obremenitvijo predlagala dodatno enačbo. Veljavnost te enačbe je v osnovi neodvisna od zrnovostnega razreda plavin in poda strižno napetost, s katero lahko identificiramo območja odnašanja in nanašanja. Pri tem velja upoštevati, da se v enačbi ne zajema vpliva hitrosti vodnega toka in padca terena. Zahtevan vhodni podatek je premer zrn. Enačba se glasi:

$$\tau = 0,047 (\rho_f - \rho_w) g d_m \quad (8.12)$$

kjer je:  $\rho_f$ ...gostota sedimenta [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ],  
 $\rho_w$ ...gostota vode [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ],  
 $g$ ...gravitacijski pospešek [ $\text{m}/\text{s}^2$ ],  
 $d_m$ ...srednja vrednost premera zrn na območju [m].

Za različne primere oz. zrnovostne razrede plavin se vrednost kritične brezdimenzijske strižne napetosti spreminja. Privzeta vrednost brezdimenzijske strižne napetosti je primerna predvsem za srednje grobe sedimente ( $d_m < 3 \text{ mm}$ ) in temelji na velikem številu laboratorijskih poskusov.

#### 8.2.2.4.4 Izračun strižnih napetosti po metodi BOKU

Metoda, poimenovana po Univerzi za naravoslovne vede na Dunaju (BOKU), je metoda za oceno strižnih napetosti ciljno na poplavnih območjih. Za analizo strižnih napetosti je bila razvita metoda, ki velja za dvodimenzionalni tok in je ustrezna za oceno strižnih napetosti na poplavnih območjih. Analiza premeščanja zrn plavin temelji na numerični metodi Runge Kutta. Za oceno strižnih napetosti je treba najprej izračunati naklon vodne gladine s pomočjo enačbe za izračun hitrosti vodnega toka (Hauer in Habersack, 2002):

$$S_f = \frac{v^2}{k_{str}^2 h^{\frac{4}{3}}} \quad (8.13)$$

kjer je:  $S_f$ ...naklon vodne gladine [-],  
 $v$ ...hitrost vodnega toka [ $\text{m}/\text{s}$ ],  
 $k_{str}$ ...Stricklerjev koeficient (1/Manningov koeficient) [ $\text{m}^{1/3}/\text{s}$ ],  
 $h$ ...globina vode [m].

Naklon vodne gladine se nadalje uporabi v klasični enačbi za izračun strižnih napetosti:

$$\tau = \rho g h S_f \quad (8.14)$$

kjer je:  $\rho$ ...gostota vode [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ],  
 $g$ ...gravitacijski pospešek [ $\text{m}/\text{s}^2$ ],



$S_f$ ...naklon vodne gladine [-],  
 $h$ ...globina vode [m].

#### 8.2.2.4.5 Izračun strižnih napetosti po Fischenichu

Fischenich je leta 2001 nadgradil Shieldsov model premeščanja plavin z opredelitvijo treh enačb, pri čemer se ustrezno enačbo izbere glede na prevladujočo velikost zrn. Kljub temu da je pri Shieldsu predpostavljena homogena struktura in velikost zrn plavin, Shieldsova metoda še vedno služi kot osnova. Enačbe za kritično strižno obremenitev so (Fischenich, 2001):

$$\begin{aligned} \tau &= 0,5 g (\rho_s - \rho_w) d \tan \phi \text{ za glino,} \\ \tau &= 0,25 d_*^{-0,6} g (\rho_s - \rho_w) d \tan \phi \text{ za mulj in pesek,} \\ \tau &= 0,06 g (\rho_s - \rho_w) d \tan \phi \text{ za gramoz,} \end{aligned} \quad (8.15)$$

kjer je:  $d_* = d \left[ \frac{(G-1)g}{\nu^2} \right]$ ...brezdimenzijski premer zrn,

$\phi$ ...kot premika zrn (Strižni kot, podan v tabeli preglednici 8.6),

$G$ ...specifična gostota materiala [ $\text{N/m}^3$ ],

$g$ ...gravitacijski pospešek [ $\text{m/s}^2$ ],

$\rho_s$ ...gostota zrn [ $\text{kg/m}^3$ ],

$\rho_w$ ...gostota vode [ $\text{kg/m}^3$ ],

$\nu$ ...kinematična viskoznost vode [ $\text{m}^2/\text{s}$ ],

$d$ ...velikost zrn [m].

Pri računanju je treba upoštevati podatke iz preglednice 8.6 (Julien, 2002), v kateri so prikazani strižni koti za začetek prodnega premika. Pri heterogenih sedimentnih mešanica privzamemo srednjo vrednost premera zrn. Navedene vrednosti so bile ocenjene ob idealiziranih pogojih z enakomerno zrnastostno sestavo, kar pomeni, da bo v realnosti prihajalo do odstopanj.

**Preglednica 8.6:** Strižni koti glede na zrnastostno sestavo materiala (Julien, 2002).

Ime frakcije	Premer [mm]	Strižni kot [°]
<b>Balvani</b>		
Zelo veliki	2032	42
Veliki	1016	42
Srednji	508	42
Majhni	254	42
<b>Prod</b>		
Veliki	127	42
Majhen	63,5	41
<b>Gramoz</b>		
Debel gramoz	33,02	40
Gramoz	15,24	38
Srednji gramoz	7,62	36
Droben gramoz	4,06	35
Zelo droben gramoz	2,03	33

<b>Pesek</b>		
Debel pesek	1,02	32
Pesek	0,51	31
Srednji pesek	0,25	30
Droben pesek	0,13	30
Zelo droben pesek	0,08	30

Z navezavo vrednosti pretočnih hitrosti in strižnih napetosti na maksimalne vrednosti pretočnih hitrosti in maksimalne vrednosti strižnih napetosti za posamezne zrnavostne razrede materiala oz. posamezne vrste pokrovnosti tal se je nadalje mogoče opredeliti do potenciala razvitosti procesov rečne erozije ter z vidika intenzitete tovrstnih procesov do erozijske nevarnosti celinskih voda.

### **8.2.3 Manj kompleksne analize obale morja**

Za območja, kjer se pričakuje erozija morja v manjšem obsegu oz. manj intenzivne oblike erozije, se lahko izvedejo analize, ki ne zahtevajo kvantifikacije erodiranega materiala, temveč le splošne podatke o območju, ki jih lahko pridobimo z enostavnim terenskim kartiranjem in GIS analizo. S terenskim geološkim kartiranjem pridobimo podatke o kamninah, njihovi razpokanosti, naklonih pobočij, vegetaciji, morebitnih zaščitnih ukrepih obale, meteoroloških vplivnih dejavnikih (smerni in moči vetra, padavinah ipd.), plimovanju, globini morja itd.

Manj kompleksna analiza je namenjena splošnemu pregledu območja z namenom ugotavljanja potencialne erozijske ogroženosti, metode pa večinoma slonijo na uporabi t.i. indeksov, kjer osnovne parametre kamnin, podnebja, erozijskih dejavnikov ipd. sestavimo v indekse ogroženosti, ranljivosti in tveganja, te pa nato prikažemo na kartah v GIS okolju z barvno lestvico (ki gre večinoma od zelene za varna območja preko rumene in oranžne do rdeče, ki predstavlja nevarnost oz. bolj ogrožene predele).

Za uporabo te manj kompleksne metode moramo pridobiti podatke, ki so večinoma javno dostopni in večinoma na spletu, ali pa jih lahko pridobimo sami s pomočjo GIS analize (npr. izdelamo karto naklona pobočij iz digitalnega modela višin). Katere parametre uporabljamo za tovrstno oceno, je bilo predstavljeno v poglavju 6.6.

Na ta način izvedemo osnovno oceno potencialne erodibilnosti obalnega območja, za natančnejšo analizo pa potrebujemo pristop kompleksnejših metod, ki je predstavljen v naslednjih poglavjih. Predvsem je razlika v tem, da pri predstavljeni manj kompleksni analizi dobimo osnovni pregled, ki je mišljen za splošno merilo, medtem ko je kompleksnejši pristop omogoča uporabo za kvantifikacijo (izračuna prostornin, meritve premikov ipd.) in za projektiranje sanacijskih ukrepov za obvladovanje erozije morske obale.

## **8.3 Kompleksnejše metode za območja, kjer je pričakovan obseg in potencialna škoda zaradi poplavlne in erozijske nevarnosti celinskih voda in morja velik (Nivo 2)**

Za primere, kjer je na osnovi analiz hidromorfoloških razmer (poglavje 8.1) podana ocena, da sta pričakovana intenziteta in obseg erozijskih procesov celinskih voda na obravnavanem odseku velika ter je z vidika rabe prostora velik tudi vpliv in škodni potencial pričakovanih erozijskih procesov, podajamo metodološke usmeritve za kompleksnejše ocene razvitosti in prostorskega obsega procesov

erozije celinskih voda in morja. Predvidevamo, da bodo predlagane kompleksnejše analize primerne za analizo erozijskih razmer predvsem na območjih pomembnega vpliva poplav ter območjih, kjer so/bodo načrtovane ureditve državnega pomena predvsem v povezavi z umeščanjem kritične infrastrukture, ki je na poškodbe zaradi erozije celinskih voda in morja še posebej dovzetna. Dodaten cilj predlaganih pristopov k oceni prostorskega obsega intenzivnejših procesov rečne erozije je prisoditi možnosti opredelitve območij pomembnega vpliva rečne erozije, ki bi, ob upoštevanju potencialnih ranljivostnih elementov, prispevala k ohranjanju in spodbujanju naravnih hidromorfoloških procesov ter urejanju prostora na teh območjih.

V nadaljevanju so predlagane metode za kompleksnejše analize procesov rečne erozije in erozije morja razdeljene v 3 dele. 1. del je namenjen pregledu nekaterih pristopov za oceno erozijsko-sedimentacijskega potenciala v zalednih območjih obravnavanih odsekov vodotokov. 2. del je usmerjen v zahtevnejše hidravlične izračune v povezavi z analizo procesov premeščanja in odlaganja plavin. 3. del je namenjen podrobnejšim analizam erozijsko izpostavljenih delov obale morja.

### 8.3.1 Izdelava erozijsko-sedimentacijske študije

V okviru pregleda literature v poglavju 2 smo predstavili teoretično ozadje procesov znotraj erozijsko-sedimentacijskega kroga. V podpoglavju 2.2 so predstavljene osnovne usmeritve za analizo erozijskega dogajanja v zalednih delih prispevnih območij vodotokov.

Na podlagi pogosto uporabljenih metod za oceno erozijskega potenciala za hudourniška območja (npr. Pintarjeva oziroma Gavrilovičeva enačba, druge podobne metode razvite v tujini) in kmetijska območja (npr. USLE, MUSLE, RUSLE, D-RUSLE) ter dovzetnosti za pojavljanje zemeljskih plazov (npr. karta dovzetnosti pojavljanja zemeljskih plazov, ki jo je pripravil Geološki zavod Slovenije), se lahko ob upoštevanju omejitev uporabe omenjenih metod, vezanih predvsem na kvantifikacijo erozijskih procesov, oceni erozijski potencial zalednega območja obravnavanega odseka vodotoka. Na podlagi enačb za oceno premestitvene zmogljivosti za rinjene in lebdeče plavine (npr. Meyer-Peter Muller enačba za rinjene plavine ali Yangova enačba za seštevek rinjenih in lebdečih plavin) lahko ocenimo, ali je dotok plavin v prečni prerez večji ali manjši od premestitvene zmogljivosti za rinjene in lebdeče plavine.

Večina omenjenih metod za oceno erozijskega potenciala je bila razvitih za kmetijska območja, kjer so erozijski procesi drugačni, predvsem pa bistveno manj intenzivni kot v primeru hudourniških območij. Posledično predlagamo uporabo naslednjih metod za izvedbo erozijsko-sedimentacijske študije:

1) V primeru hudourniških porečij (kjer je vzdolžni naklon dna struge vodotoka v zaledju večji kot 2% ali kjer je v zaledju mogoče opaziti plitve plazove, podore, obsežne erozijske zajede brežin itd.) predlagamo izračun potencialnega sproščanja z uporabo Gavrilovičeve in Pintarjeve enačbe. Opis metodologije in uporabljenih enačb je prikazan v poglavju 2.2 (enačbe 2.2, 2.3 in 2.4). Preglednice za oceno parametrov Gavrilovičeve oziroma Pintarjeve enačbe pa so podane v Hrvatin in sod. (2019) in Bezak in sod. (2024).

2) V primeru ravninskih porečij (kjer je naklon vodotoka manjši od 2% in kjer v zaledju ni izrazitejših hudourniških procesov) predlagamo uporabo RUSLE enačbe in izračuna po Pintarjevi enačbi. Opis RUSLE metodologije je podan v sklopu poglavja 2 (enačba 1.1). Opis parametrov je podan v študiji KIS (2020).

3) Na podlagi erozijske študije se tako glede na karakteristike porečja izračuna erozijski potencial oziroma potencialno sproščanje materiala. Dodatno je potreben tudi izračun koeficienta odplavljanja,

kjer predlagamo ali izračun koeficienta odplavljanja glede na eno izmed empiričnih enačb (npr. enačba 2.8 ali ena izmed enačb, ki jo podajajo Lu in sod., 2006)) ali indeksa povezljivosti, katerega opis je podan v poglavju 2.3.

4) V primeru razpoložljivih lidarskih podatkov za obravnavano območje iz različnih časovnih obdobij se lahko analizirajo razlike med DMV iz različnih časovnih obdobij in na podlagi izdelanih DoD (angl. *difference of DEMs*) oceni dejanske količine odplavljenega materiala. Vsekakor serije lidarskih podatkov in izdelani DMV iz različnih časovnih obdobij omogočajo najboljši vpogled v dejansko erozijsko dogajanje tako na prostorskem nivoju prispevnih območij vodotokov kot tudi na nivoju posameznih odsekov vodotokov.

Na podlagi ocene erozijskega potenciala in ob upoštevanju koeficienta odplavljanja se lahko oceni potencialni dotok plavin do obravnavanega odseka vodotoka. Izračunana količina materiala predstavlja dotok plavin v najbolj gorvodnem prečnem prerezu obravnavanega rečnega odseka in predstavlja vhodni podatek za analize odplavljanja in odlaganja plavin, ki so predstavljene v naslednjem poglavju. V odvisnosti od prepoznanih erozijskih razmer na osnovi erozijsko-sedimentacijske študije se v hidrodinamičnem modelu izbere ustrezní robni pogoj za modeliranje premeščanja in odlaganja plavin vzdolž obravnavanega odseka vodotoka. Glede na intenziteto procesov rečne erozije v nekaterih preteklih poplavnih dogodkih v povirnih, izrazito hudourniških odsekih vodotokov, lahko ugotovimo, da je v času poplavnih dogodkov dotok erodiranega materiala izjemno velik (praktično neomejen), kar je treba ustrezno upoštevati pri izbiri robnih pogojev za namene modeliranja premeščanja in odlaganja plavin.

### **8.3.2 Zahtevnejše hidravlične analize v povezavi z analizo procesov premeščanja in odlaganja plavin**

V zadnjih letih se je razširila uporaba kar nekaj hidrodinamičnih modelov, ki so bili nadgrajeni z možnostmi analize procesov rečne erozije preko modeliranja premeščanja in odlaganja plavin v času poplavnih dogodkov. Uvodoma je treba poudariti, da v povezavi z naraščanjem zahtevnosti hidravličnih izračunov (npr. polni 2D hidrodinamični modeli) in kombiniranja le-teh z modeliranjem premeščanja plavin (npr. polni 2D modeli premeščanja plavin) izrazito naraščajo zahteve po vhodnih podatkih, ki so ključni za verodostojno analizo hidravličnih razmer in njihovo nadgradnjo v smeri analize pričakovanih procesov rečne erozije. V osnovi lahko dodatne zahtevane vhodne podatke razvrstimo v nekaj sklopov:

1) Vhodni geometrijski in geodetski podatki, vezani na hidromorfološke značilnosti rečnih strug ter topografske lastnosti obdajajočih poplavnih območij. Tovrstni podatki so ključnega pomena za vsakršno hidravlično analizo poplavne in erozijske nevarnosti. Pri tem gre predvsem za kakovostne podatke, pridobljene z lidarskimi snemanji odsekov vodotokov ob upoštevanju omejitev glede možnosti zajema podatkov o potekih dna strug, saj običajna lidarska snemanja v rdečem barvnem spektru ne omogočajo zajema batimetrije dna struge pod nivoji gladin voda. Dodatno velja izpostaviti tudi detaljne geodetske posnetke hidrotehničnih objektov (npr. prečnih objektov na vodotokih, vseh vrst premostitvenih objektov), ki so z vidika rečnih erozijskih procesov izjemno izpostavljeni. Zelo pogosto so hidravlične razmere ob tovrstnih hidrotehničnih objektih (npr. ob pojavu deročega vodnega toka na daljših odsekih strug in lokalnih pojavih vodnih skokov) ključni sprožilni mehanizmi procesov rečne erozije, ki nadalje vodijo v obsežnejše poškodbe brežin strug vodotokov, obrežnih zavarovanj in različne infrastrukture na območjih razlivanja poplavnih voda.

2) Podatki o rabi tal. Kot je bilo predstavljeno v poglavju 8.2, je dovezetnost tal na procese rečne erozije na poplavnih območjih močno odvisna od pokrovnosti tal oz. rabe tal. V Sloveniji imamo na razpolago

kakovostne podatke o rabi tal s strani Ministrstva za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano (dosegljivi na portalu <https://rkg.gov.si/vstop/>), katerih uporaba se priporoča pri hidravličnih analizah. Kot smo predstavili v poglavju 7.2, se na določeno rabo tal lahko veže kritične vrednosti pretočnih hitrosti oz. kritične strižne napetosti, ki so na voljo v literaturi (npr. podatki iz Preglednic 8.4 in 8.5).

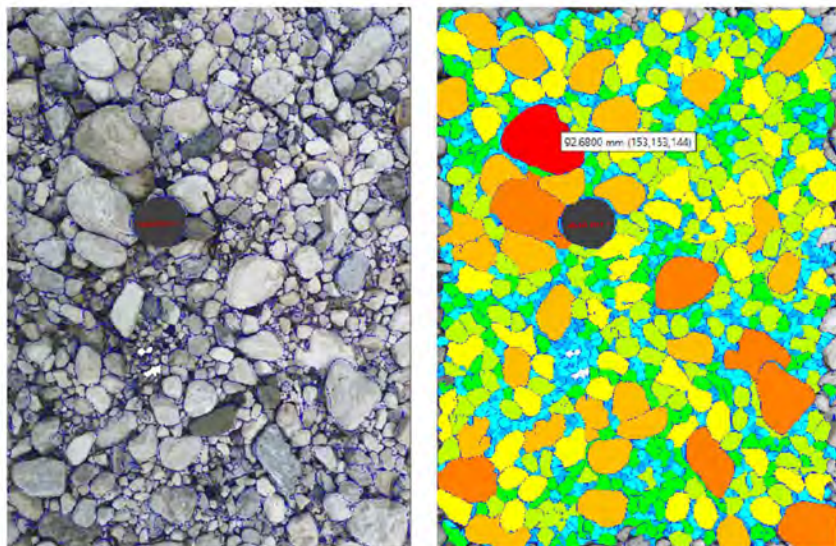
3) Tretji sklop podatkov, potrebnih za napredne hidravlične analize premeščanja in odlaganja plavin, je vezan na zrnastostne in erodibilnostne lastnosti zemljin oz. plavin, po katerih se vodni tok giblje. Tovrstni podatki so le redko na razpolago, zato v nadaljevanju podajamo nekaj razširjenih informacij o načinih, s katerimi je mogoče priti do uporabnih podatkov o zrnastostnih lastnostih plavin. Poudariti je treba, da so kakovostni podatki o zrnastostnih lastnostih plavin, pridobljeni na osnovi sejalnih analiz vzorcev materiala, odvzetega na območjih strug vodotokov, ključni za verodostojno oceno procesov premeščanja in odlaganja plavin. Informacija o količini in zrnastostni sestavi aktivnih rečnih sedimentov ali odloženih naplavin (aluvija) je pomembna pri načrtovanju in izvajanju ukrepov urejanja voda kot tudi zato, ker so sedimenti kot gradbeni material (mineralni agregati) pomembna surovina v gradbeništvu. Poznavanje zrnastostne sestave rečnih sedimentov je pomembno za določanje premestitvene zmogljivosti vodotokov, dimenzioniranje zaplavnih hidrotehničnih objektov (npr. Piton in Recking, 2015), proučevanje in modeliranje gibanja drobirskih tokov (npr. Sodnik, 2009). Izvedba sejalne analize (običajno v laboratoriju) zahteva fizični odvzem vzorca na terenu, prevoz vzorca v laboratorij ter izvedbo sejalne analize z ustrezno laboratorijsko opremo za analizo mineralnih agregatov (npr. Gilson Company, 2019) – pogosto se zahteva atestirana in standardizirana laboratorijska oprema (SIST EN 932-5:2012; ASTM C-136:2014). Razvitih je bilo precej alternativnih (poenostavljenih) metod za določanje zrnastosti sedimentov, predvsem za grobe plavine v hudournikih in strmih vodotokih. Najbolj razširjena je Wolmanova metoda oziroma metoda štetja zrn plavin (Wolman, 1954). Na podlagi te metode se je razvilo veliko postopkov; Bunte in sod. (2009) navaja preko 30 različnih postopkov, ki temeljijo na vzorcu vsaj 100 zrn plavin, odvzetih pod linijo v smeri vodnega toka.

Tovrstni poenostavljeni terenski postopki za analizo zrnastosti so sicer dokaj nezamudni, a imajo določene pomanjkljivosti, saj vključujejo predvsem krovni sloj plavin. V primeru vertikalnega razslojevanja in oblikovanja krovnege sloja, ki je bolj grob od svoje podlage (tvorba posteljice dna struge), moramo to dejstvo upoštevati in za določitev celotne zrnastostne sestave plavin uporabiti še druge metode preračunavanja in kombiniranja zrnastosti podlage krovnege sloja, kot je to predlagal Fehr (1987). Zato se je v zadnjih letih povečala uporaba različnih alternativnih metod (npr. Cislaghi in sod., 2016); ena izmed teh je določanje zrnastosti plavin na podlagi analize slik (angl. *photo sieving*). Obstajajo različna programska orodja, ki omogočajo določanje zrnastosti na podlagi posnete fotografije. V vseh primerih gre za analizo zrnastosti krovnege sloja, saj ne vidimo v podlago. Trije primeri takšnega programskega orodja so programi Basegrain (Basegrain, 2019), WipFrag (Wipware, 2019) in Split-Desktop (SplitDesktop, 2019). Ti programi se precej razlikujejo, saj so bili eni recimo razviti za uporabo v kamnolomih kot orodje za načrtovanje in kontrolo uspešnosti miniranja za pridobivanje kamenega agregata (Elahi in Hosseini, 2017), drugi pa za določanje zrnastosti rečnih sedimentov (proda) (Langhammer in sod., 2017).

Poudarili bi predvsem možnosti uporabe dveh programskih orodij. Program WipWare je eden najpogosteje uporabljenih programov za določanje zrnastosti fragmentiranih materialov s pomočjo analize slik. WipFrag je dostopen kot plačljiv program ter je predvsem namenjen za uporabo v rudarski, gozdarski in gradbeni (določanje zrnastosti agregatov) industriji (Wipware, 2019). Program je še posebej uporaben za primere, kot je določanje zrnastosti v kamnolomih. Sam postopek uporabe programa, ki ga je opisala Matič (2019), je precej preprost, saj celotna analiza poteka v štirih preprostih korakih. Pri samem zajemu slike je na primer treba paziti na ustrezno osvetlitev, prisotnost delcev, ki

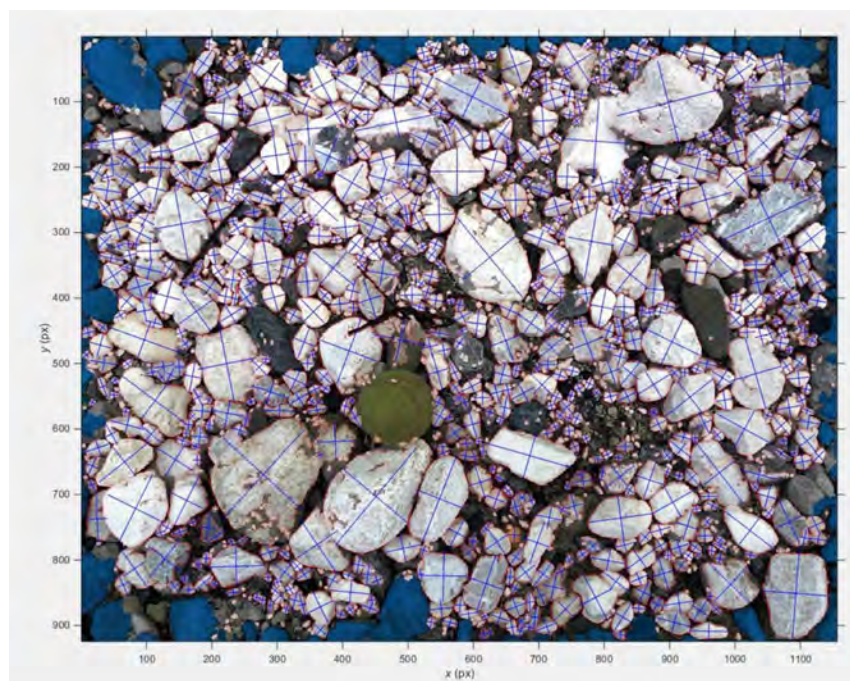


niso del materiala, ki ga analiziramo, itd. Glavni rezultat analize slik je zrnavostna sestava materiala, ki je podana v obliki zrnavostne krivulje. Rezultat prepoznavanja zrn plavin s programom WipWare je prikazan na sliki 8.19.



**Slika 8.19:** Primer rezultatov analize v programu WipFrag – barve na desni sliki ponazarjajo velikost zrn (prodišče; višina slike 0,5 m) (povzeto po Matič, 2019).

Program Basegrain za optično prepoznavanje oblik je namenjen predvsem določanju zrnavostne sestave rečnih sedimentov (npr. proda) (Basegrain, 2019). Primer tovrstne optične analize prepoznavanja zrn plavin je prikazan na sliki 8.20.



**Slika 8.20:** Primer rezultatov analize v programu Basegrain (prodišče; višina slike 0,5 m) (povzeto po Matič, 2019).

Basegrain predpostavi eliptično obliko zrn in kot enega izmed rezultatov poda tudi zrnavost po Fehrovem modelu (Detert in Weitbrecht, 2013). Basegrain omogoča izbiro oz. določitev številnih parametrov, ki vplivajo na rezultate optičnih analiz velikosti zrn, med njimi npr. parametrov, ki nastopajo tudi v Fehrovem modelu za preračunavanje in sestavljanje krivulj zrnivosti grobozrnatih sedimentov v gorskih vodotokih (Fehr, 1987). S programom je mogoče ročno združevati in razdruževati posamezna zrna na podlagi rezultata programa. Glede na naše izkušnje z uporabo zgoraj omenjenih programov, sta oba programa v večini primerov nekoliko podcenila velikosti zrn v primerjavi z rezultati sejalne analize. Po drugi strani pa izbrani statistični test ni pokazal na statistično značilno razliko med rezultati sejalne analize in rezultati analize slik v obeh programih. Optimalni rezultati analiz slik so bili pridobljeni na podlagi fotografij s stojne višine okrog 1,5–2 m. Predlagamo, da se fotografije kamenih agregatov, erozijskega drobirja in rečnih sedimentov za namene določanja njihove zrnavostne sestave zajemajo z višine okoli desetkratnika maksimalnega premera analiziranega materiala.

### 8.3.2.1 Hidravlično modeliranje premeščanja plavin

Osnova za hidravlično modeliranje premeščanja sedimentov so dobro umerjeni in verificirani ter z numeričnega vidika stabilni hidrodinamični modeli. Istočasno z modeliranjem 2D vodnega toka običajno preko reševanja enačbe SWE (angl. *Shallow Water Equation*) je mogoče v hidrodinamičnih modelih izvesti reševanje enačb premeščanja rinjenih in lebdečih plavin z implicitno metodo končnih volumnov. Kot rezultat dobimo informacije o premeščanju plavin, spremembah dna, torej spiranju in odlaganju, dodatno so v nekaterih programskih orodjih na voljo podatki o razvrščanju posameznih zrnavostnih razredov in plastenju plavin. Reševanje transportnih enačb poteka načeloma ločeno za rinjene ter lebdeče plavine, odvisno od uporabnikove izbire enačb za premeščanje plavin. V nasprotju s »klasično« hidrodinamično simulacijo, v kateri niso zajete spremembe morfologije rečne struge in topografije poplavnih površin zaradi procesov rečne erozije in odlaganja plavin ob nastopu visokovodnih pretokov, se hidravlične razmere vzdolž modeliranega odseka vodotoka – v primeru hidrodinamične simulacije z upoštevanjem transporta sedimentov – spreminjajo ne samo glede na povečevanje intenzitet vtočnih hidrogramov, temveč tudi z ozirom na časovne in prostorske spremembe zaradi procesov premeščanja in odlaganja plavin, kar vodi v spremenjeno geometrijo prečnih prerezov struge (npr. povečanje maksimalnih globin zaradi intenzivnih procesov poglobljanja struge vodotoka).

Kot je bilo obsežno razloženo že v predhodnem poglavju, so zelo pomembni vhodni podatki o lastnostih plavin, predvsem zrnavostna sestava in specifična teža. Lastnosti plavin vplivajo tudi na hrapavost ostenja. S spreminjanjem hrapavosti dna vodotoka in poplavnih površin se spreminjajo hidravlične razmere, to pa vpliva na dinamiko premeščanja plavin in premestitveno zmogljivost vodnega toka.

Enačbe za izračun transporta plavin so večinoma empirične. Od uporabljenega hidrodinamičnega modela je odvisno, katere enačbe so na voljo za izračun. O izboru enačbe se odločimo glede na lastnosti plavin, predvsem glede na zrnavostno sestavo in njihov način premeščanja (rinjene oz. lebdeče). V nadaljevanju predstavljamo nekaj enačb, ki se v zadnjem času uveljavljajo pri analizah premeščanja plavin v različnih hidrodinamičnih modelih. Nabor potencialnih enačb, ki se lahko uporabljajo za analizo premeščanja in odlaganja plavin, je kar obsežen. Pri izbiri enačbe je treba biti pozoren predvsem na priporočeno rabo enačb z vidika zrnavostnih lastnosti plavin.

Transportna enačba van Rijn (1984, 2007a) je empirična enačba za izračun premestitvene zmogljivosti rinjenih in lebdečih plavin, oblikovana na podlagi laboratorijskih preizkusov. Enačba je bila sprva namenjena predvsem modeliranju transporta zrnavostno dokaj enovitih sestav plavin, kasneje pa so

bili posamezni parametri v enačbi preurejeni na način, da je z enačbami van Rijn možno tudi modeliranje procesov premeščanja plavin z dokaj neenovito zrnastostno sestavo (USACE, 2024b).

Za izračun premestitvene zmogljivosti rinjenih plavin uporabimo spodnjo enačbo:

$$q_{bk}^* = 0,015Uh \left( \frac{U - U_{crk}}{\sqrt{R_k g d_k}} \right)^{1,5} \left( \frac{d_k}{h} \right)^{1,2} \quad (8.16)$$

Za izračun premestitvene zmogljivosti lebdečih plavin uporabimo sledečo enačbo:

$$q_{sk}^* = 0,012Uh \left( \frac{U - U_{crk}}{\sqrt{R_k g d_k}} \right)^{2,4} \left( \frac{d_k}{h} \right) d_{*k}^{-0,6} \quad (8.17)$$

kjer je:

- $q_{bk}^*$ ...premistitvena zmogljivost za rinjene plavine,
- $q_{sk}^*$ ...premistitvena zmogljivost za lebdeče plavine,
- $U$ ...globinsko povprečena efektivna trenutna hitrost,
- $U_{crk}$ ...kritična globinsko povprečena hitrost, ki povzroči začetek prodnega premika,
- $h$ ...globina vode,
- $R_k$ ...specifična teža potopljenega zrna,  $R_k = \frac{\rho_{sk}}{\rho_w} - 1$ ,
- $\rho_{sk}$ ...gostota zrna,
- $\rho_w$ ...gostota vode,
- $d_k$ ...premer razreda zrn.

Za izračun kritične globinsko povprečene efektivne hitrosti  $U_{crk}$ , ki povzroči začetek prodnega premika nekohezivnih sedimentov je predvidena uporaba naslednje enačbe:

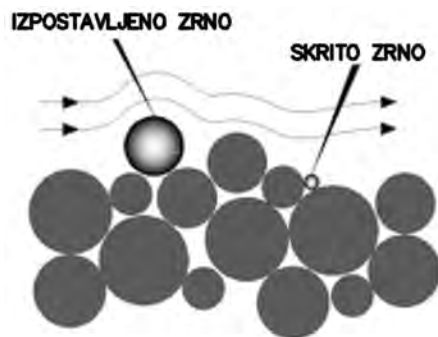
$$U_{crk} = \begin{cases} 0,19 d_{50}^{0,1} \log_{10} \left( \frac{4h}{d_{90}} \right), & \text{za } 0,1 \leq d_{50} \leq 0,5 \text{ mm} \\ 8,5 d_{50}^{0,6} \log_{10} \left( \frac{4h}{d_{90}} \right), & \text{za } 0,5 \leq d_{50} \leq 2,0 \text{ mm} \end{cases} \quad (8.18)$$

kjer je:

- $d_{50}$ ...srednji premer zrna, tj. premer zrna plavin, od katerega je manjših 50 % zrn,
- $d_{90}$ ...premer zrna plavin, od katerega je manjših 90 % zrn.

V primeru modeliranja procesov premeščanja sedimentov z neenovito zrnastostno sestavo, se člena  $d_{50}$  in  $d_{90}$ , zamenjata s parametrom  $d_k$ .

V primeru, ko je krovni sloj rečnega dna sestavljen iz zrn različnih velikosti (kar je običajen primer glede na zrnastostno sestavo plavin v vodotokih s prevladujočimi hudourniškimi lastnostmi), imajo zrna večjih velikostnih razredov večjo verjetnost, da bodo izpostavljena delovanju vodnega toka, medtem ko je za zrna manjših velikostnih razredov bolj verjetno, da bodo le-ta skrita oziroma manj izpostavljena delovanju vlečne sile vodnega toka (Slika 8.21). V procesu modeliranja premeščanja plavin, se popravki pri izračunih mejnih strižnih napetosti za posamezne frakcije sedimentov, ki povzročijo začetek prodnega premika, upoštevajo z uporabo funkcije izpostavljenosti zrn oziroma korekcijskega faktorja skrivanja in izpostavljenosti zrn (USACE, 2024b).



**Slika 8.21:** Shematski prikaz izpostavljenosti zrn delovanju vodnega toka (Prirejeno po Janssen, 2010).

Posamezne funkcije izpostavljenosti zrn so bile razvite v povezavi z določenimi transportnimi enačbami, zato se tudi sam zapis le-teh razlikuje glede na uporabljen parameter, s katerim v posameznih transportnih enačbah izračunamo premostitveno zmogljivost vodotoka. V večini primerov lahko korekcijski faktor skrivanja in izpostavljenosti zrn zapišemo s spodnjo osnovno enačbo, ki glede na uporabljen parameter transportne enačbe, podaja razmerje med korigiranimi in nekorigiranimi kritičnimi silami vodnega toka, ki povzročijo pričetek premeščanja plavin, tj. prodnega premika.

$$\xi_K = \frac{\theta_{crk}}{\theta_{cr}} = \frac{\tau_{crk}}{\tau_{cr}} = \frac{U_{crk}^2}{U_{cr}^2} \quad (8.19)$$

kjer je:

- $\tau_{cr}$ ...nekorigirana kritična strižna napetost,
- $\tau_{crk}$ ...korigirana kritična strižna napetost,
- $U_{cr}$ ...nekorigirana kritična globinsko povprečena hitrost,
- $U_{crk}$ ...korigirana kritična globinsko povprečena hitrost,
- $\theta_{cr}$ ...nekorigirana kritična vrednost Shieldsovega parametra,  $\theta_{cr} = \frac{\tau_{cr}}{(\rho_{sk}-\rho)gd_k}$
- $\theta_{crk}$ ...korigirana kritična vrednost Shieldsovega parametra,  $\theta_{crk} = \frac{\tau_{crk}}{(\rho_{sk}-\rho)gd_k}$

V funkciji izpostavljenosti zrn Wu in sod. (USACE, 2024b), se korekcijski faktor skrivanja in izpostavljenosti zrn, izračuna s pomočjo spodnje enačbe in sicer za vsak velikostni razred sedimentov posebej:

$$\xi_K = \left( \frac{P_{ek}}{P_{hk}} \right)^{-m} \quad (8.20)$$

kjer je:

- $m$ ...empirični koeficient, katerega vrednost zavisi od izbire transportne enačbe - običajno [0,6 – 1,0],
- $P_{hk}$ ...verjetnost skritosti zrn,
- $P_{ek}$ ...verjetnost izpostavljenosti zrn.

Skupna verjetnost skritosti oziroma izpostavljenosti zrn se izračuna s pomočjo spodnjih enačb:

$$P_{hk} = \sum_{j=1} \widehat{f}_{1j} \frac{d_j}{d_k + d_j} \quad (8.21)$$

$$P_{ek} = \sum_{j=1} \widehat{f}_{1j} \frac{d_j}{d_k + d_j} \quad (8.22)$$

kjer je:  $\widehat{f}_{1j}$ ...volumenski delež aktivne plasti.

Na ta način je v funkciji izpostavljenosti zrn Wu in sod. (USACE, 2024b) upoštevana zrnavostna sestava krovnega sloja z apliciranjem verjetnosti, da je posamezni velikostni razred sedimentov ali izpostavljen ali pa skrit pred delovanjem sil vodnega toka zaradi prostorskih interakcij med posameznimi velikostnimi razredi sedimentov krovnega sloja.

### 8.3.3 Zahtevnejše analize erozijsko izpostavljenih delov obale morja

Natančnejše razumevanje erozijskih procesov temelji na kombinaciji več pristopov, ki jih lahko razdelimo na inženirsko-geološko kartiranje in na metode meritev sprememb kamnin oz. obale. V primerjavi z manj kompleksnimi pristopi lahko pri tem načinu kvantificiramo spremembe, medtem ko z enostavno (GIS) analizo bolj ali manj predvidimo, kje so kritična območja. Razlika je tudi v merilu, saj lahko z natančnim kartiranjem in meritvami za izbrane odseke obale tudi bolj natančno predvidimo gradbene ukrepe.

#### 8.3.3.1 Geološko in inženirsko-geološko kartiranje ter meritve kamnin in diskontinuitet

Pri geološkem kartiranju popišemo in določimo osnovne lastnosti kamnin – vrsto oz. tip kamnin, njihovo zrnavostno sestavo (velikosti zrn), barvo, mineraloško sestavo, strukturo ipd. Pri inženirskogeološkem kartiranju te podatke nadgradimo z detajlnimi popisi diskontinuitet, ki so v obalnih kamninah prisotne predvsem kot razpoke in v manjši meri kot plasti. Pri diskontinuitetah popisujemo njihovo orientacijo (azimut in naklon), odprtost, hrapavost, dolžino oz. razširjanje, polnitev, gostoto, preperelost in vlažnost. Ključnega pomena sta orientacija in medsebojne razdalje med sistemi razpok.

Pri popisu se držimo standardov oz. priporočil za popise, ki so objavljeni kot priporočila zveze ISRM (ISRM, 1978). Za popise uporabljamo tudi standard SIST EN ISO 14689-1:2018; »Geotehnično preiskovanje in preizkušanje – Prepoznavanje in razvrščanje kamnin 1. del: Prepoznavanje in opisovanje«. Referenčni deli za to področje sta publikaciji ISRM (1974) in ISRM (2007).

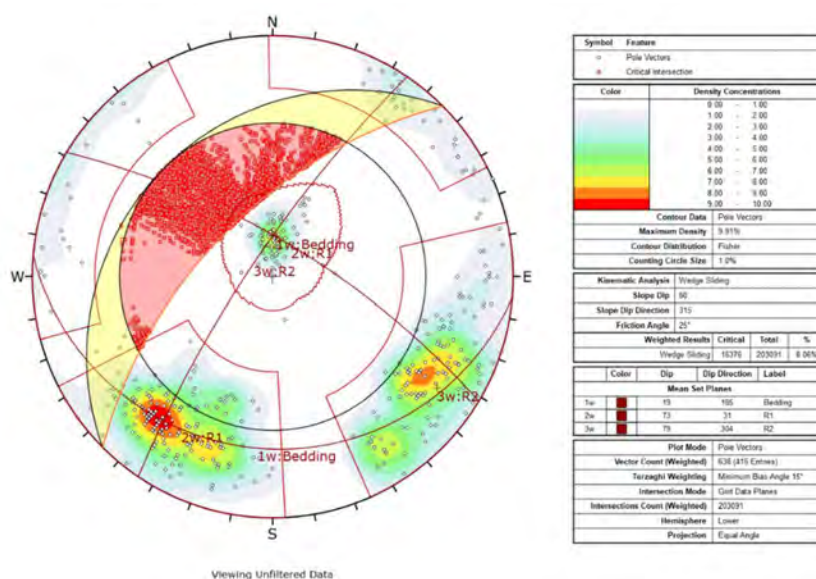
Za kamninske masive popisujemo tudi indekse kamnin, med katerimi sta najbolj uveljavljena RMR (angl. *Rock Mass Rating*) in GSI (angl. *Geological Strength Index*). Popisujemo seveda tudi pojave plazenja, nestabilnih oz. labilnih območij in erozijskih pojavov, ki vsi lahko destabilizirajo preučevano območje.



### 8.3.3.2 Meritve za ugotavljanje stabilnosti območja

Za ugotavljanje stabilnosti območja merimo geomehanske lastnosti kamnin – njihovo trdnost oz. natančneje enoosno tlačno trdnost, ki jo lahko določimo v laboratoriju z različnimi testi (enoosni in triosni testi ter točkovni trdnostni indeks za določevanje tlačne trdnosti, strižne preiskave in preiskave tenzijskih lastnosti) ali na terenu s Schmidtovim kladivom.

Te parametre nato uporabimo za modeliranje stabilnosti območja, sprva s kinematsko analizo oz. Marklandovim testom za ugotavljanje potencialnih pojavov ravninskih in klinastih zdrsov ali prevračanja blokov, nato pa s natančnejšimi programi za dejansko ugotavljanje oz. modeliranje procesov premikanja, kjer upoštevamo realne velikosti blokov, hrapavosti razpok ipd. Rezultate večinoma prikažemo na stereografskih projekcijah v posebnih programih, ki nam podajo tudi statistične verjetnosti stabilnosti območja za vsak tip porušitve. Primer rezultatov za verjetnost pojavljanja klinastih zdrsov na območju Strunjana je podan na spodnji sliki 8.22.



**Slika 8.22:** Primer kinematske analize za pojavljanje klinastih zdrsov na območju Strunjana. Oznaka 1W bedding predstavlja plasti, R1 je prvi sistem razpok, R2 drugi sistem razpok. Verjetnost klinastih zdrsov je 8 % (razvidno na desni strani slike).

Za namen proučevanja padanja skal na terenu popisujemo tudi velikosti padlih skal (oz. natančneje kamenja, skal in blokov, odvisno od njihove velikosti) - tako njihove dimenzije (višina, širina, dolžina), kot tudi njihovo oddaljenost od vznožja kamnin. Podatke potrebujemo za kalibracijo programov za modeliranje padanja skal oz. kamenja. S temi programi (npr. RocFall2 ali RocFall3 paketa RocScience ali RAMMS RockFall) lahko simuliramo padanje skal, ugotovljamo lokacije izpadlih skal in njihove energije, ter na osnovi teh rezultatov določimo zaščitne ukrepe, ki bi varovali obalo. Tovrstni ukrepi so bili že izvedeni za zaščito kritičnih delov slovenske obale na poseljenih območjih in na območjih z infrastrukturo, na območjih krajinskih parkov pa taki ukrepi niso predvideni zaradi ohranjanja narave.

Poseben erozijski proces je spodjedanje plasti peščenjakov in apnenčastih turbiditnih plasti, ki zahteva dodatne meritve globin spodjedanja omenjenih plasti in meritve debelin lapornatih plasti pod peščenjaki in apnenčastimi turbiditi. Spodjedanje je namreč odvisno tako od debeline mehkejših plasti pod tršimi, ki jih erozija bolj spodjeda, kot tudi od globine spodjedanja. Slednja je statistično dobro povezana z razdaljami med sistemi razpok.

### 8.3.3.3 Meritve spremembe obale oz. klifov

Za kvantifikacijo erozijskih sprememb uporabljamo natančne metode merjenja, med katere uvrščamo predvsem lasersko terestrično snemanje (TLS) in fotogrametrijo, ki jo izvajamo s stojišča ali z brezpilotnimi letalniki (BPL). Oba načina pridobivanja podatkov sta primerljiva s stališča števila zajetih podatkov, saj zajamemo masovno večje število podatkov. Pri TLS gre število točk v desetine milijonov in natančnost metode je lahko tudi v rangu milimetrov, kar je povsem zadosti za kvantifikacijo erozijskih procesov na obali. Če meritve izvajamo v rednih časovnih intervalih, dobimo serijo posnetkov, iz katerih lahko naredimo razlike v reliefu, ki nam kažejo pozitivne in negativne spremembe (torej nakopičen in izpadel material). Z ustreznimi programi nato določimo ne le lokacije erozijskih pojavov, temveč tudi njihove prostornine in čas premikov. Podobne rezultate dobimo z fotogrametričnim zajemom podatkov, pri čemer pa je ta metoda manj ustrezna kot TLS, saj vegetacija ovira pridobivanje talnih točk. Nobena izmed metod ni idealna, saj ima fotogrametrija omejitve zaradi vegetacije, TLS meritve pa so omejene na fiksna stojišča, ki jih je na ozkih obalnih delih (ki so tudi ob visoki plimi celo v celoti poplavljeni) težko zagotoviti.

## DELOVNI SKLOP 3

### 9 TESTIRANJE IN USKLAJEVANJE METODOLOGIJE, ANALIZA IZBRANIH VZORČNIH PRIMEROV

V okviru delovnega sklopa 3 predstavljamo rezultate testiranj in povzetke nekaterih opravljenih analiz procesov rečne erozije in erozije morja z uporabo manj kompleksnih metod za območja, kjer je pričakovan obseg erozijskega delovanja celinskih voda in morja omejen/majhen, ter kompleksnejših metod za območja, kjer sta pričakovan obseg in potencialna škoda zaradi poplavne in erozijske nevarnosti celinskih voda in morja, velika. Osnovni predhodni korak za tovrstne analize je opredelitev izdelovalcev tovrstnih analiz do pričakovanega obsega erozijskih procesov na osnovi usmeritev za začetno opredelitev do potencialne razvitosti procesov rečne erozije (Nivo 1 – Poglavje 8.1).

Osnovno vodilo pri izbiri pristopov/metod za analizo procesov rečne erozije in erozije morja je, da so uporabljeni pristopi razviti za obravnavo erozijskih procesov v razmerah, ki so primerljive z razmerami, kakršne se pojavljajo vzdolž hidrografske mreže v Sloveniji oz. vzdolž obale slovenskega morja. Ob tem velja opozorilo, da je bila večina metod, predstavljenih v poglavju 8 razvitih ob upoštevanju manj kompleksnih hidravličnih razmer, kakršne se pojavljajo oz. se jih lahko vzpostavi v »kontroliranih« laboratorijskih razmerah (npr. večina metod za oceno kritičnih pretočnih hitrosti in kritičnih strižnih napetosti z vidika odpornosti posameznih rab tal). Podobno velja za hidrodinamične modele, ki so uporabljeni za modeliranje hidravličnih razmer in so bili večinoma razviti za hidravlično analizo vodotokov s sorazmerno majhnimi vzdolžnimi nakloni dna struge oz. nakloni energijske linije. S tega naslova velja opozoriti na kritično vrednotenje in ustrezno strokovno opredelitev do rezultatov tovrstnih analiz z ustrezno interpretacijo hidravličnih in erozijskih razmer, kakršne se pričakuje glede na lokalno situacijo vzdolž obravnavanih odsekov vodotokov. Kritična in verodostojna opredelitev do pričakovanega obsega in intenzitete erozijskih razmer je možna na osnovi ustreznih predznanj s področja hidrologije, hidravlike, urejanja vodotokov, hidromorfologije in načrtovanja hidrotehničnih objektov. Tovrstna znanja, v povezavi z analizo terenskih razmer na obravnavanih odsekih vodotokov oz. obale morja po našem mnenju omogočajo strokovno opredelitev do pričakovanih procesov rečne erozije in erozije morja.

Dodatno izhodišče za izbiro testnih primerov in preizkušanje predvsem zahtevnih, kompleksnejših metod, predstavljenih v poglavju 8, je bila analiza procesov rečne erozije in erozije obale morja na območjih, kjer so se v preteklosti zgodili poplavni dogodki v kombinaciji z intenzivnimi erozijskimi procesi in kjer so na razpolago nekateri podatki o obsegu erozijskih procesov zaradi poplavljanja voda v povezavi z erozijskim delovanjem vodnega toka (tako odplavljanja kot tudi odlaganja erodiranega materiala).

Rezultate nekaterih testnih primerov, prikazanih v nadaljevanju, smo prikazali na posameznih izsekih iz kart erozijske nevarnosti glede na razrede erozijske nevarnosti, opredeljene v Pravilniku. Prostorsko smo na testnih primerih opredelili vrednosti rezultatov hidravličnih izračunov pri povrtanih dobah poplavnih dogodkov, ki se upoštevajo glede na slovensko zakonodajo. Skladno s Pravilnikom je stopnja erozijske nevarnosti opredeljena z debelino odplavljenega sloja ali debelino odloženega sloja preperelega materiala. Pri opredelitvi nevarnosti procesov rečne erozije smo upoštevali mejne vrednosti -0,5 m in -2 m pri erodiranem oz. odnesenem materialu, pri akumuliranem oz. odloženem materialu pa 0,3 m in 1 m. Na podlagi meril v Pravilniku so opredeljeni naslednji razredi erozijske nevarnosti:

- 1) **razred velike nevarnosti**, kjer je pri pretoku  $Q_{100}$  ali gladini  $G_{100}$  debelina odplavljenega sloja večja od 2,0 m oziroma debelina odloženega sloja večja od 1,0 m,
- 2) **razred srednje nevarnosti**, kjer je pri pretoku  $Q_{100}$  ali gladini  $G_{100}$  debelina odplavljenega sloja od 0,5 m do 2,0 m oziroma debelina odloženega sloja od 0,3 m do 1,0 m in
- 3) **razred majhne nevarnosti**, kjer je pri pretoku  $Q_{100}$  ali gladini  $G_{100}$  debelina odplavljenega sloja manjša od 0,5 m oziroma debelina odloženega sloja manjša od 0,3 m.

Skladno s pravilnikom je torej predvidena analiza erozijskih razmer samo pri poplavnem dogodku  $Q_{100}$ . V mnogih praktičnih primerih izdelave kart erozijske nevarnosti izdelovalci območje dosega  $Q_{100}$  označijo kot enovit razred erozijske nevarnosti. Kot je bilo večkrat poudarjeno v teoretičnem pregledu procesov rečne erozije, so le-ti tesno povezani s pojavnostjo različnih poplavnih dogodkov, ne samo poplavnega dogodka v rangu  $Q_{100}$ . V večini predstavljenih primerov smo se opredelili do hidravličnih razmer in pričakovanih procesov rečne erozije še pri poplavnem dogodku s konico pretoka  $Q_{10}$  in  $Q_{500}$ . Prav tako smo se opredelili do hidravlične prevodnosti strug vodotokov (t.i. strugotvornega pretoka) z vidika upoštevanih povratnih dob skladno z zakonodajo.

## 9.1 Preizkušanje manj kompleksnih metod za oceno procesov rečne erozije in erozije morja

Pri preizkušanju manj kompleksnih metod za oceno procesov rečne erozije in erozije morja je bilo glavno izhodišče, da v tovrstne analize vključimo podatke, s katerimi običajno razpolagajo izdelovalci hidrološko-hidravličnih analiz. Gre za rezultate hidravličnih izračunov in simulacij, vezanih na ugotovljene hidravlične razmere vzdolž obravnavanih odsekov strug vodotokov in na obdajajočih poplavnih območjih, predvsem podatke o globinah vodnega toka, pretočnih hitrostih in strižnih napetostih. Pri interpretaciji tovrstnih prostorsko razporejenih podatkov o hidravličnih razmerah je treba izpostaviti, da največje globine vodnega toka in maksimalne vrednosti pretočnih hitrosti in strižnih napetosti večinoma časovno ne sovpadajo, kar pomeni, da najintenzivnejši procesi rečne erozije (npr. odplavljanje materiala) pogosto časovno ne sovpada z največjimi dosegi poplavljanja. Hidravlične in erozijske razmere pa so izrazito pogojene z lokalnimi razmerami. Skupni elementi analiz, predstavljenih v nadaljevanju, so naslednji:

1) Pri upoštevanju hidroloških razmer smo se osredotočili na oceno hidravlične prevodnosti osnovne struge vodotoka (t.i. strugotvornega pretoka) z vidika povratne dobe. Pri tem je bilo vodilo, da smo upoštevali povratne dobe konic pretokov, ki se upoštevajo skladno s Pravilnikom, torej  $Q_{10}$ ,  $Q_{100}$  in  $Q_{500}$ . Kot primer, če je prevodnost struge vodotoka manjša od  $Q_{10}$ , potem lahko glede na lokalne hidravlične razmere domnevamo, da je pojavnost procesov rečne erozije na določenem odseku povečana.

2) V analizah potencialne razvitosti erozijskih procesov je bila upoštevana razdelitev rabe tal, kakršna je podana v vektorskem podatkovnem sloju, dosegljivem na portalu MKGP (Preglednica 9.1). Pri klasifikaciji rabe tal MKGP je seveda poudarek na podrobnejši razčlenitvi rabe kmetijskih površin. Z vidika hidravličnih razmer (hrapavosti površin) in erozijskih razmer (dovzetnosti za procese rečne erozije) lahko nekatere razrede rabe tal (predvsem različne rabe tal za intenzivno kmetijsko rabo) združimo. Na ta način lahko skupini razredov rabe tal, ki so si z vidika hidravličnih hrapavostnih razmer podobni, pripišemo podobne (po strokovni presoji lahko tudi enake) vrednosti koeficientov hrapavosti. Erodibilnost kmetijskih površin je odvisna od faze rasti kmetijskih poljščin, ki vplivajo na hrapavostne razmere in protierozijsko vlogo vegetacijskega pokrova. Največja dovzetnost za erozijo na kmetijskih

površinah kot posledica delovanja gibanja vodnega toka je v zgodnjih fazah razvoja rastlin, ko so tla večinoma neporaščena. Ob tem večina poljščin tudi v obdobjih najintenzivnejše razrasti še vedno nudi relativno slabo protierozijsko zaščito tal pred poplavnimi vodami. Protierozijska odpornost tal na kmetijskih površinah je odvisna še od medvrstne razdalje in fenofaze rastline. Pri rastlinskem pokrovu, kjer so majhne medvrstne razdalje (npr. razna žita), na zmožnost rastlinskega pokrova za zaščito ne vpliva le poraščenost, velik je tudi vpliv vkoreninjenosti (razrast korenin), ki je odvisen od starosti rastline. Npr. mlado žito, kjer imajo rastline majhen koreninski splet, težko nudi enako oporo kot koreninski splet, ki je proti koncu vegetacijske dobe dobro razraščan in nudi boljše protierozijsko zaščito. Nadalje je pri plitkem razlivanju poplavnih voda pomembna tudi smer obdelave. Npr. kuzuza, kjer so medvrstne razdalje širše, lahko od določene faze razvoja rasti nudi oporo, če je smer toka vode pravokotna na vrste. Podobno velja pri vinogradih ter sadovnjakih oziroma drugih trajnih nasadih, kjer poteka rast rastlin v vrstah z oporo.

**Preglednica 9.1:** Raba tal po skupinah glede na kategorizacijo MKGP.

Skupina dejanske rabe / vrsta dejanske rabe	Šifra
<b>Njive in vrtovi</b> njiva, hmeljišče, trajne rastline na njivskih površinah	1100-1190
<b>Trajni nasadi</b> vinograd, matičnjak, intenzivni sadovnjak, oljčnik, travniški sadovnjak, ostalo	1211-1240
<b>Travniške površine</b> trajni travnik, barjanski travnik, kmetijsko zemljišče poraslo z gozdnim drevjem	1300-1800
<b>Druge kmetijske površine</b> zemljišča v zaraščanju, drevesa in grmičevje	1410-1600
<b>Gozd</b> gozd	2000
<b>Pozidano</b> zgradbe, ceste,...	3000
<b>Voda</b>	7000

Glede na kategorizacijo rabe tal MKGP velja opozoriti, da ima generalizacija rabe (združevanje več različnih rab v eno skupino) z vidika erozijske odpornosti določene omejitve. Kot primer na sliki 9.1 za skupino njiva, hmeljišče in trajne rastline na njivskih površinah prikazujemo nasad špargljev (poletni čas, območje Domžal) ter hmeljišče pozno jeseni (novembra) v bližini spodnjih Braslovč. Medtem ko so trajne rastline na njivskih površinah podobne njivski rabi, so lahko hmeljišča z vidika vpliva na hrapavostne razmere in podvrženosti eroziji precej drugačna. Slednje je treba smiselno upoštevati pri hidravličnem modeliranju na območjih s hmeljskimi žičnicami in podobnimi podpornimi elementi (npr. v sadovnjakih, vinogradih).





**Slika 9.1:** Nasad špargljev v poletnem času (levo) in žičnica hmeljišča v pozno jesenskem času (slikano prečno na smer žičnic) (desno).

3) Podatki o sestavi tal na poplavnih območjih večinoma niso na razpolago. Kot podatkovni sloji, na podlagi katerih se lahko v grobem opredelimo do erodibilnosti lastnosti tal, so upoštevani podatki javno dostopnih geoloških in pedoloških kart. Na podlagi teh podatkov se izdelovalci tovrstnih analiz lahko v grobem opredelijo do erodibilnosti lastnosti tal z vidika ugotovljenih hidravličnih in erozijskih razmer na obravnavanih območjih. Če so na voljo dodatni podatki o erodibilnostnih lastnostih tal na obravnavanih območjih (npr. zrnavostna sestava tal), naj se le-ti ustrezno upoštevajo z vidika opredelitve kritičnih pretočnih hitrosti in kritičnih strižnih napetosti.

4) Glede na podatke o kritičnih pretočnih hitrostih in kritičnih strižnih napetostih, ki so na voljo v različni literaturi, predstavljeni v poglavju 8, smo pri interpretaciji rezultatov hidravličnih izračunov z vidika potencialne razvitosti erozijskih procesov (prevladujočih procesov odplavljanja erodiranega materiala) upoštevali nekatere mejne/kritične vrednosti, ki se najpogosteje pojavljajo v literaturi. Dejanske posledice razvitosti erozijskih procesov so močno odvisne od lokalnih razmer, zato se mora o njih ustrezno strokovno opredeliti izdelovalec tovrstnih analiz. Pri tem si lahko pomaga z usmeritvami za opredelitev do potencialne razvitosti procesov rečne erozije (Nivo 1), na podlagi katerih tudi strokovno utemelji ustreznost uporabe manj kompleksnih metod za oceno potencialne razvitosti procesov rečne erozije. Kot mejne kritične vrednosti pretočnih hitrosti ( $V_{krit}$ ) in strižnih napetosti ( $\tau_{krit}$ ) za nekatere primere na podlagi priporočenih vrednosti iz literature bi izpostavil naslednje:

a) Zelo erodibilne zemljine brez vegetacijskega pokrova (npr. prevladujoča peščen tla):

$$V_{krit} = 0,5-1 \text{ m/s}$$

$$\tau_{krit} = 1-5 \text{ N/m}^2$$

b) Manj erodibilne zemljine brez vegetacijskega pokrova (meljasta/glinena tla)

$$V_{krit} = 1 \text{ m/s}$$

$$\tau_{krit} = 5-10 \text{ N/m}^2$$

c) Zatravljena površina (slabše razvita travnata ruša):

$$V_{krit} = 1 - 1,5 \text{ m/s}$$

$$\tau_{krit} = 10-50 \text{ N/m}^2$$

d) Zatravljena površina (dobro razvita travnata ruša):

$$V_{krit} = 1,5-2 \text{ m/s}$$

$$\tau_{krit} = 50-100 \text{ N/m}^2$$

e) Pričakovani obsežnejši erozijski procesi (odplavljanje) na poplavnih površinah ne glede na rabo tal:

$$V_{krit} > 2 \text{ m/s}$$

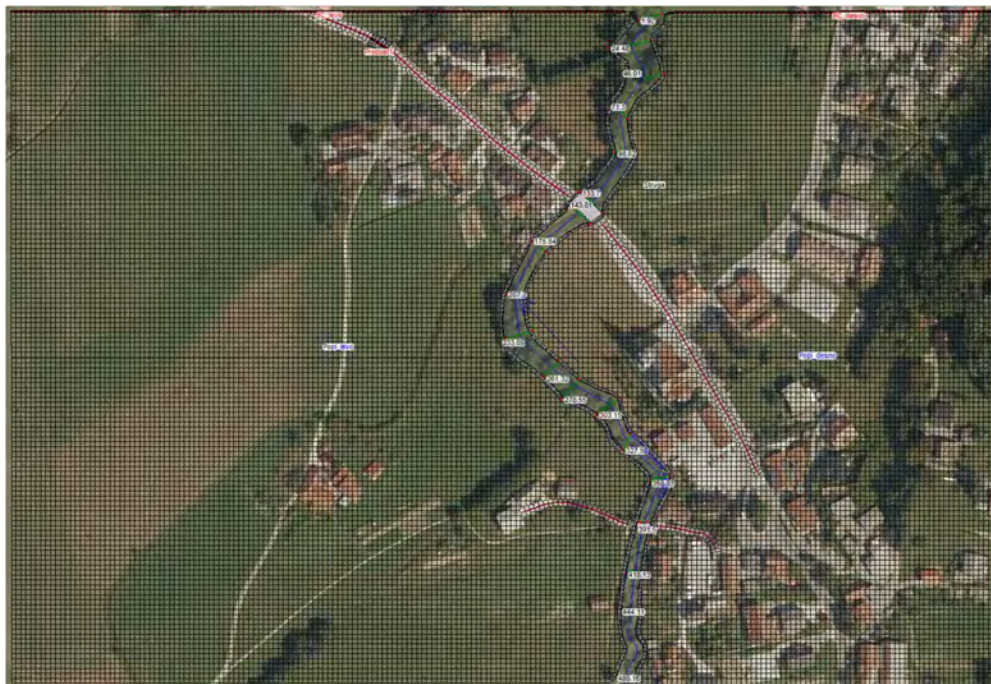
$$\tau_{krit} > 100 \text{ N/m}^2$$

5) Pri hidravličnih analizah, predstavljenih v nadaljevanju, je bil uporabljen hidrodinamični program HEC-RAS, ki omogoča izdelavo 1D, kombiniranih 1D/2D ali polnih 2D hidravličnih modelov. Nabor rezultatov hidravličnih izračunov in njihova interpretacija so vezani na možnosti pridobitve podatkov o hidravličnih razmerah na obravnavanih območjih glede na možnost, ki jih omogoča program HEC-RAS. Tudi drugi hidrodinamični modeli, ki se pogosto uporabljajo v praksi, nudijo podobne možnosti pridobitve rezultatov in interpretacijo hidravličnih razmer. Pri interpretaciji rezultatov hidravličnih izračunov skupno obravnavamo območje struge vodotoka (vodno zemljišče) in obdajajoča poplavna območja.

### 9.1.1 Analiza pretočnih hitrosti in strižnih napetosti na izbranih primerih

#### 9.1.1.1 Analiza hidravličnih in erozijskih razmer vzdolž odseka vodotoka Dobrunjščice

Za potrebe analize hidravličnih in erozijskih razmer odseka potoka Dobrunjščica v dolžini približno 500 m je bil narejen 1D/2D hidravlični model. Obravnavan odsek struge Dobrunjščice z upoštevanim 2D računskim območjem je prikazan na Sliki 9.2. Glavna struga potoka Dobrunjščica poteka od Podlipoglava proti Sostremu po sorazmerno ravninskem območju. Zaradi velikih naklonov terena v povirnem hribovitem delu porečja s številnimi grapami ima Dobrunjščica precej izrazit hudourniški značaj.



**Slika 9.2:** Obravnavani odsek z računskimi prečnimi prerezi struge potoka Dobrunjščica (1D hidravlični model), premostitvami in prepusti ter 2D računskima območjema na obeh straneh struge.

Struga Dobrunjščice je bila v preteklosti na ravninskem delu, kamor spada tudi računsko območje, delno regulirana, kar je razvidno iz ravne trase posameznih krajših pododsekov. Na vmesnih daljših odsekih je potek struge sorazmerno naraven. Glede na razpoložljive podatke o izvedbi melioracijskih del ter ogled stanja na terenu lahko sklepamo, da v zadnjih desetletjih v strugi ni bilo izvedenih obsežnejših čiščenj obrežne vegetacije. Struga je praktično vzdolž celotnega odseka preraščena z visoko obrežno zarastjo (intenzivna razrast grmovja in dreves), katere koreninski sistem generalno zagotavlja solidno protierozijsko zaščito brežin. Odsekoma so sicer na izpostavljenih delih v strugi vidne lokalne erozijske zajede in nanosi plavin (Slika 9.3).



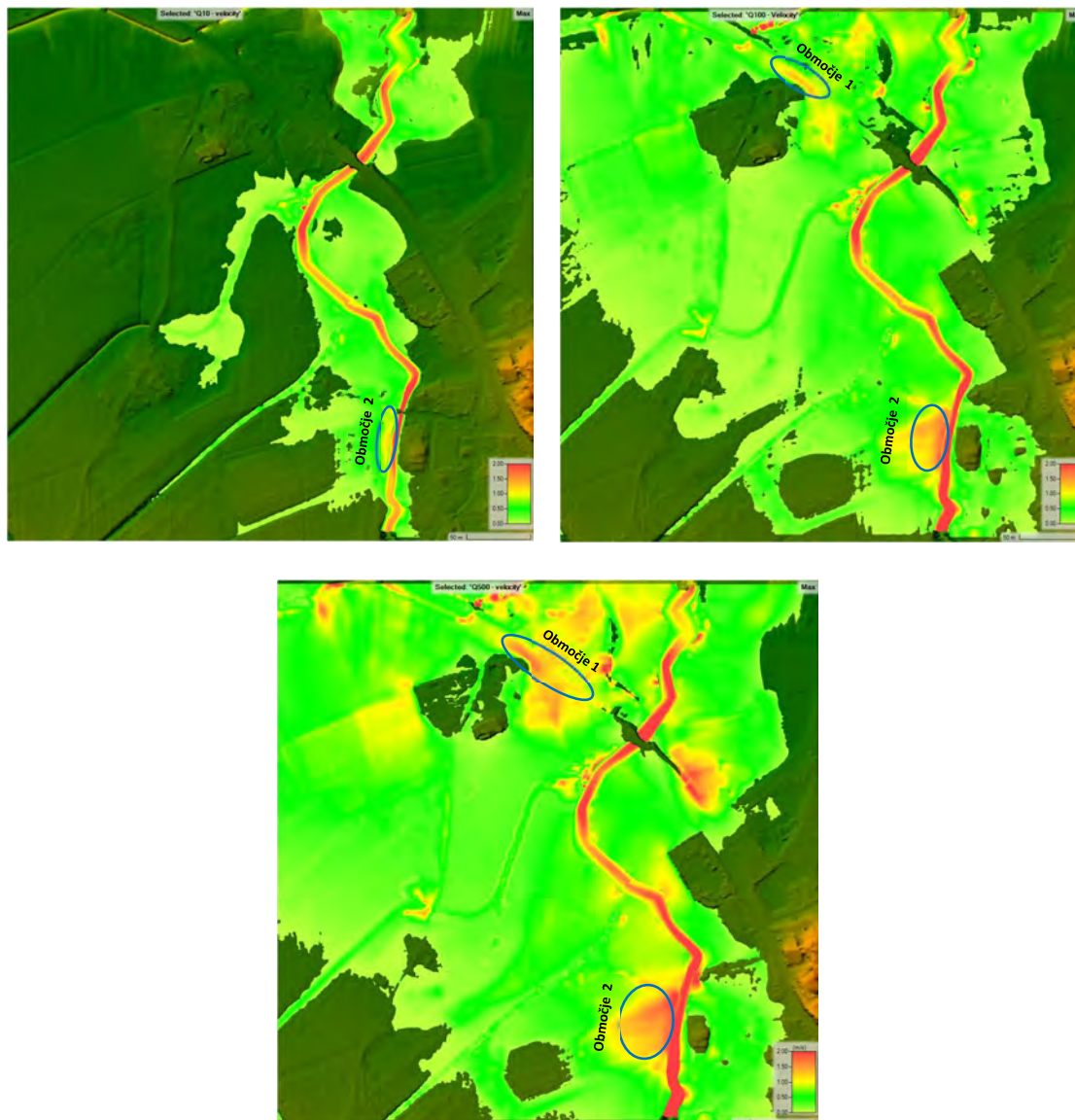
**Slika 9.3:** Preraščenost struge Dobrunjščice z grmovno in drevesno vegetacijo (levo) in lokalne erozijske zajede in nanosi plavin v strugi (desno).

Za oceno hidravlične prevodnosti glavne struge Dobrunjščice in izrednotenje merodajnih Manningovih koeficientov hrapavosti smo izvedli terenske meritve pretoka pri nekoliko povišanem pretoku. Hkrati z meritvami pretokov se je izvajalo tudi klasično geodetsko snemanje geometrije struge Dobrunjščice in nivojev gladine vode. Na podlagi podatkov o geometriji struge Dobrunjščice, vodostajev in pripadajočih hidravličnih spremenljivk (prečnega prereza struge, omočenega oboda in hidravličnega radija) smo nadalje lahko umerili hidravlični model glavne struge. Izrednoteni koeficienti hrapavosti glavne struge so se gibali med 0,04 in 0,06. Zaradi intenzivne zaraščenosti prečnega prereza struge z grmovno in drevesno vegetacijo, ki s svojo togostjo predstavlja velik oblikovni hidravlični upor gibanju toka vode, ocenjujemo, da se s povečanjem pretoka vode v glavni strugi koeficient hrapavosti pri višjih vodostajih še nekoliko poveča v primerjavi z vrednostmi, ki smo jih določili na podlagi terenskih meritev pretoka. Na obdajajočih poplavnih površinah so glede na klasifikacijo rabe tal MKGP večinoma prisotna kmetijska zemljišča. V odvisnosti od rabe površin smo ocenili, da se koeficienti hrapavosti na poplavnih območjih gibljejo med 0,05 (travnate površine) in 0,07 (zaraščena kmetijska zemljišča, delno gozdna zarast).

Obstoječa struga Dobrunjščice je brez razlivanja poplavnih voda na obdajajočo poplavno ravnico sposobna prevajati pretoke do  $14 \text{ m}^3/\text{s}$ , kar je bistveno manj od pretoka s konico v rangu  $Q_{10}$  (ocenjena na  $27 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Pri pretokih v rangu konice  $Q_{10}$  tako pride do razlivanja poplavnih voda predvsem na levo poplavno ravnico, lokalno se poplavne vode na desno poplavno ravnico razlijejo na posameznih nižjih območjih in na skrajnem dolvodnem delu obravnavanega odseka. Pri pretoku  $Q_{100}$  pride do obsežnih razlivanj poplavnih voda na levo in desno poplavno območje. Večinoma so preplavljene kmetijske površine, vzdolž odseka so poplavno ogroženi tudi stanovanjski in gospodarski objekti.



V nadaljevanju predstavljamo rezultate hidravličnih izračunov z upoštevanjem vtočnih hidrogramov s konicami pretokov  $Q_{10}$  (25 m<sup>3</sup>/s),  $Q_{100}$  (62 m<sup>3</sup>/s) in  $Q_{500}$  (108 m<sup>3</sup>/s). Na sliki 9.4 so prikazane ocenjene maksimalne vrednosti pretočnih hitrosti na podlagi hidravličnih simulacij poplavnih dogodkov.

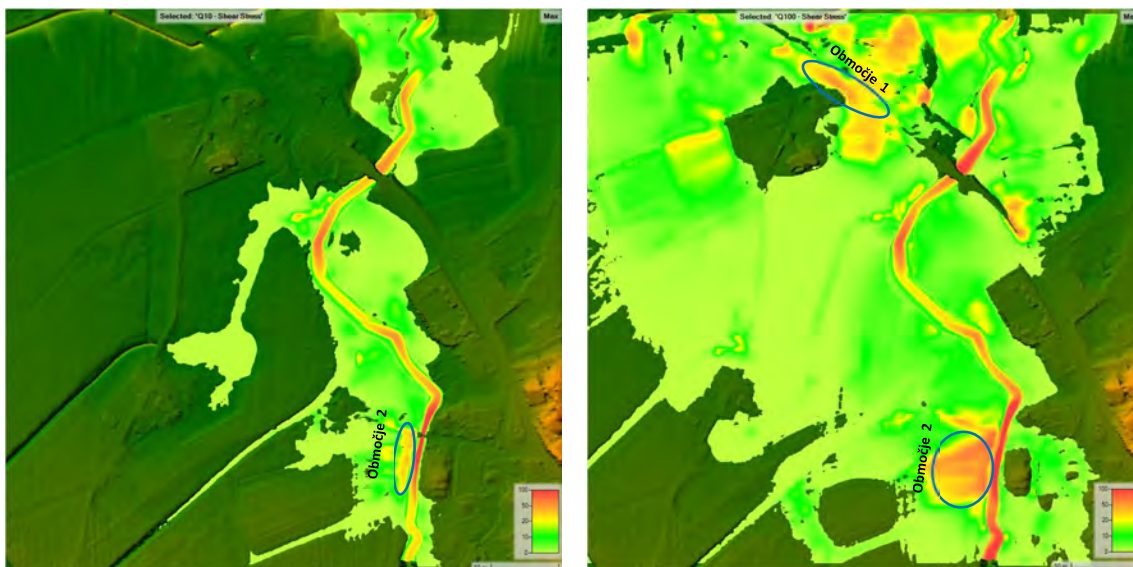


**Slika 9.4:** Maksimalne pretočne hitrosti pri poplavnih dogodkih s konicami pretoka  $Q_{10}$  (levo zgoraj),  $Q_{100}$  (desno zgoraj) in  $Q_{500}$  (spodaj) vzdolž obravnavanega odseka struge Dobrunjščice.

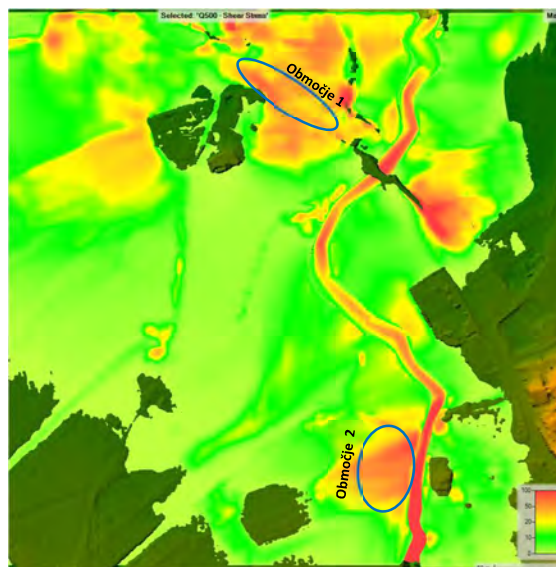
Iz rezultatov simulacij je razvidno, da maksimalne pretočne hitrosti presežejo 2 m/s na območju struge Dobrunjščice, na poplavnih območjih se gibljejo večinoma pod 0,5 m/s. Lokalno na poplavnih območjih hitrost vodnega toka doseže ali celo nekoliko preseže hitrost 1 m/s, predvsem na odsekih, kjer prihaja do prelivanja cestnih nasipov, ki prečkajo poplavno območje (npr. Območje 1, označeno na sliki 9.4 pri poplavnih razmerah v primeru poplavnega dogodka  $Q_{100}$  oz.  $Q_{500}$ ). Na tovrstnih odsekih lahko že v primerih sorazmerno plitkega začetnega prelivanja poplavnih nasipov na dolvodni strani pride do intenzivnejših oblik rečne erozije, ki so posledica lokalnih pojavov vodnih skokov. Opredelitev odsekov, kakršno je npr. Območje 1 na sliki 9.4, lahko služi kot dodatna informacija, na katerih odsekih cestnih nasipov bi bilo treba razmisliti o morebitnih dodatnih protierozijskih ukrepih.

Izrazitejša območja povečanih pretočnih hitrosti so bila ugotovljena na posameznih krajših odsekih vzdolž struge Dobrunjščice, kjer pride do intenzivnejšega preusmerjanja/prelivanja poplavnih voda na obdajajočo poplavno ravnico oz. vračanja poplavnih voda v strugo pri nenadnih zožitvah poplavnega območja. Takšen primer je npr. Območje 2 na sliki 9.4, kjer pride do preusmeritve poplavnih voda že v primeru poplavnega dogodka  $Q_{10}$  zaradi hidravlične poddimenzioniranosti premostitvenega objekta nekoliko dolvodno. V primerih simulacij poplavnih dogodkov z višjimi povratnimi dobami konic pretokov je obseg povečanih pretočnih hitrosti na Območju 2 še bistveno večji. Na zgoraj omenjenih območjih bi z vidika erozijske nevarnosti (kriterij odplavljanja erodiranega materiala skladno s Pravilnikom) predlagali opredelitev območja srednje erozijske nevarnosti. Prevladujoče upoštevanje kriterija odplavljanja je z vidika pričakovanih procesov rečne erozije na obravnavanem odseku smiselno predvsem zaradi omejenega dotoka erodiranega materiala iz gorvodnih odsekov, ki bi se v obdobjih poplavnih dogodkov transportiral dolvodno in odlagal vzdolž obravnavanega odseka. Glede na prevladujoče travnate površine bi lahko kot mejo za opredelitev območja srednjega razreda erozijske nevarnosti upoštevali kritične pretočne hitrosti 1 m/s v primeru nerazvite oz. slabo razvite travnate ruše oz. 1,5 m/s pri dobro razviti travnati ruši. Vsekakor se pri vrednostih pretočnih hitrosti, ki presegajo 2 m/s, na poplavnih območjih lahko pričakuje intenzivnejše procese rečne erozije z vidika nevarnosti odplavljanja materiala.

Na sliki 9.5 so prikazane ocenjene maksimalne vrednosti strižnih napetosti na podlagi hidravličnih simulacij poplavnih dogodkov. V splošnem lahko ugotovimo, da se območja največjih strižnih napetosti pričakovano večinoma prostorsko ujemajo z območji največjih pretočnih hitrosti. Vrednosti strižnih napetosti nad  $100 \text{ N/m}^2$  se pojavljajo zgolj na območju glavne struge. Na obdajajočih poplavnih površinah strižne napetosti na Območju 1 in Območju 2 lokalno presežejo  $50 \text{ N/m}^2$ , kar je v nekaterih raziskavah iz literature že spodnja meja vrednosti strižnih napetosti, ki lahko poškodujejo in odplavijo tudi dobro razvito travnato rušo. Na primer, na Območju 2 strižne napetosti pri poplavnem dogodku s konico pretoka  $Q_{100}$  lokalno presežejo  $70 \text{ N/m}^2$ .







**Slika 9.5:** Vrednosti maksimalnih strižnih napetosti vzdolž obravnavanega odseka struge Dobrunjščice pri poplavnih dogodkih s konicami pretoka  $Q_{10}$  (levo zgoraj),  $Q_{100}$  (desno zgoraj) in  $Q_{500}$  (spodaj).

Na zgoraj omenjenih območjih bi z vidika erozijske nevarnosti (kriterij odplavljanja erodiranega materiala skladno s Pravilnikom) predlagali opredelitev območja srednje erozijske nevarnosti. Glede na prevladujoče travnate površine bi lahko kot mejo za opredelitev območja srednjega razreda erozijske nevarnosti upoštevali kritično strižno napetost  $10\text{--}20\text{ N/m}^2$  (v primeru nerazvite oz. slabo razvite travnate ruše) oz.  $50\text{ N/m}^2$  (dobro razvita travnata ruša). Vsekakor se pri vrednostih, ki presegajo  $100\text{ N/m}^2$ , na poplavnih območjih lahko pričakuje intenzivnejše procese rečne erozije z vidika nevarnosti odplavljanja materiala.

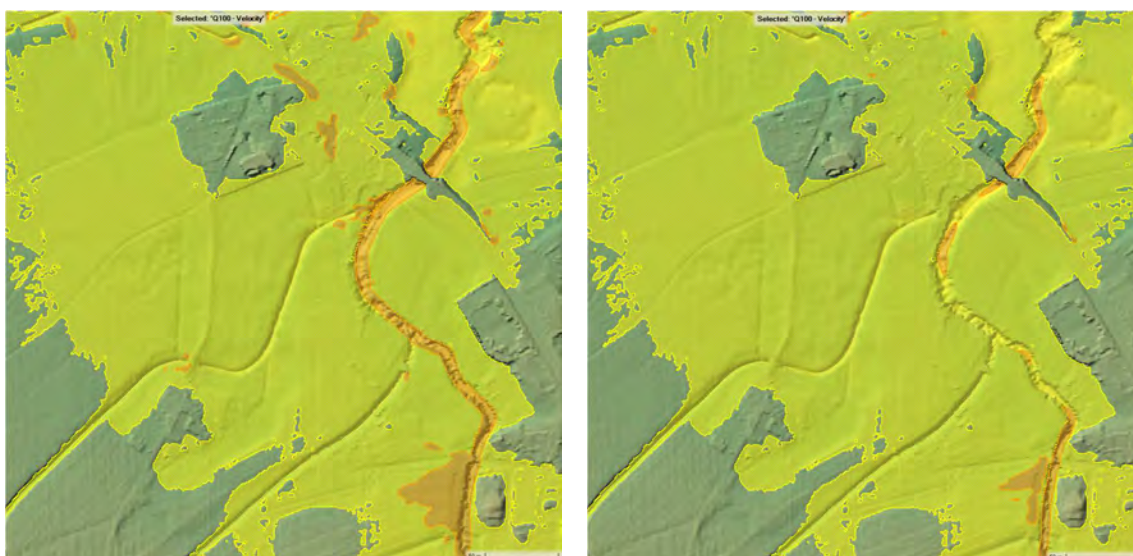
Na območjih, kjer so pretočne hitrosti in strižne napetosti majhne (različni odtenki zelene barve na slikah 9.4 in 9.5), so procesi rečne erozije v smislu procesov odplavljanja materiala manj verjetni, večja je verjetnost odlaganja materiala (lebdečih plavin), ki jih premešča vodni tok. Z vidika erozijskih razmer v zaledju se ne pričakuje, da bi bil dotok erodiranega materiala na obravnavani odsek velik, posledično bi bile tudi debeline odloženega materiala na poplavnih površinah majhne. Glede na mejne vrednosti, opredeljene v Pravilniku, bi na teh območjih predlagali opredelitev razreda majhne erozijske nevarnosti z vidika kriterija debeline sloja odloženega materiala.

Slika 9.6 prikazuje primerjavo erozijske nevarnosti (kriterij debeline odplavljenega erodiranega materiala) ob upoštevanju mejne vrednosti pretočne hitrosti  $1\text{ m/s}$  in mejne vrednosti strižne napetosti  $50\text{ N/m}^2$  pri poplavnem dogodku s konicami pretoka  $Q_{100}$ .



**Slika 9.6:** Primerjava erozijske nevarnosti pri poplavnem dogodku s konico pretoka  $Q_{100}$  glede na kriterij debeline odplavljenega erodiranega materiala in ob upoštevanju mejne vrednosti pretočne hitrosti 1 m/s (levo) ter mejne vrednosti strižne napetosti 50 N/m<sup>2</sup> (desno). Skladno s Pravilnikom temno peščena barva prikazuje debelino odplavljenega erodiranega materiala od 0,5 do 2,0 m, svetlo peščena barva pa debelino odplavljenega erodiranega materiala < 0,5 m.

Na sliki 9.7 je prikazana primerjava razredov erozijske nevarnosti z upoštevanjem vrednosti pretočnih hitrosti in strižnih napetosti kot mejnih vrednosti med razredom majhne erozijske nevarnosti in razredom srednje erozijske nevarnosti.

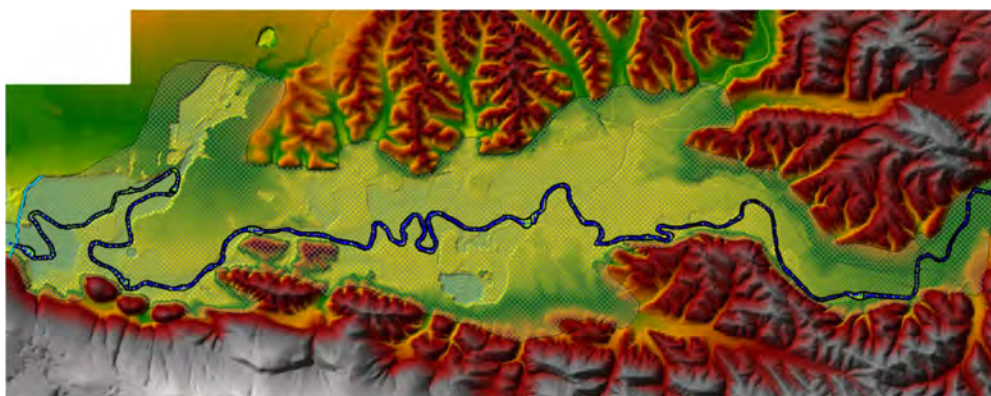


**Slika 9.7:** Primerjava razredov erozijske nevarnosti po prevladujočem kriteriju debeline odplavljenega erodiranega materiala ob upoštevanju mejne vrednosti pretočne hitrosti 1 m/s (levo) in mejne vrednosti strižne napetosti 50 N/m<sup>2</sup> (desno) pri poplavnem dogodku s konico pretoka  $Q_{100}$ . Oranžna šrafura označuje območja srednje erozijske nevarnosti, rumena šrafura območja majhne erozijske nevarnosti.

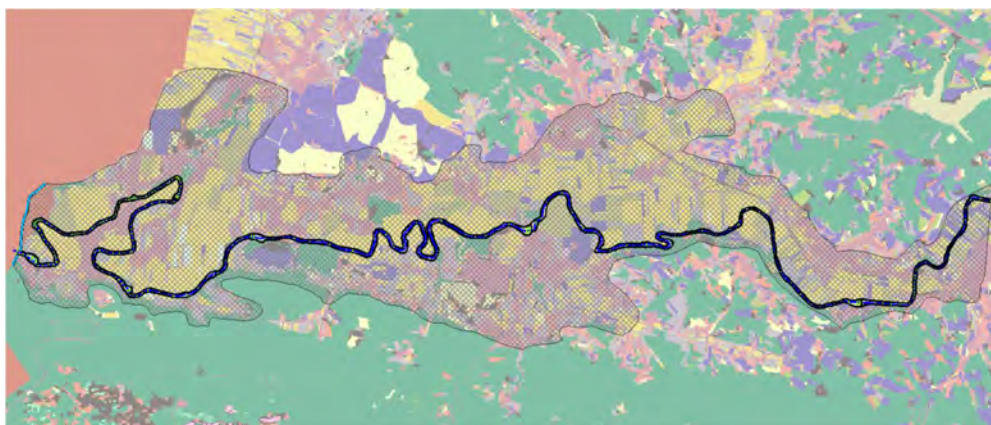
Območja, določena po obeh kriterijih, se v pretežni meri prekrivajo, obseg razreda srednje erozijske nevarnosti je ob upoštevanju kriterija kritične pretočne hitrosti večji kot ob upoštevanju kriterija mejne strižne napetosti. Iluzorno je pričakovati, da bo prekrivanje območij, določenih na osnovi različnih hidravličnih kriterijev, povsem sovpadalo. V teh primerih predlagamo upoštevanje kriterija, na podlagi katerega so območja višjih razredov poplavne nevarnosti prostorsko obsežnejše oz. upoštevanje prostorske razsežnosti združenih območij, opredeljenih po različnih kriterijih. Pri tem se je treba zavedati negotovosti pri določitvi tovrstnih območij, vsekakor pa tovrstne analize pripomorejo k identifikaciji območij, kjer je razvoj intenzivnejših oblik rečne erozije bolj verjeten (npr. Območje 1 in Območje 2 na slikah 9.3 in 9.4).

#### 9.1.1.2 Analiza hidravličnih in erozijskih razmer vzdolž odseka reke Vipave v spodnji Vipavski dolini

V nadaljevanju predstavljamo nekatere rezultate hidravličnih izračunov za odsek reke Vipave v spodnji Vipavski dolini med Dornberkom in mejo z Italijo. Izdelan je bil kombiniran 1D/2D hidravlični model obravnavanega odseka. Vrednosti Manningovega koeficienta hrapavosti so bile pripisane različnim rabam tal na poplavnih območjih vzdolž struge Vipave glede na kategorizacijo rabe tal MKGP. Slika 9.8 prikazuje modelno območje, na sliki 9.9 pa je prikazana prostorska razporeditev različnih rab tal.



Slika 9.8: Obravnavani odsek reke Vipave z 2D računskima območjema na obeh straneh struge.



Slika 9.9: Prostorska razporeditev različnih kategorij rabe tal iz baze MKGP.

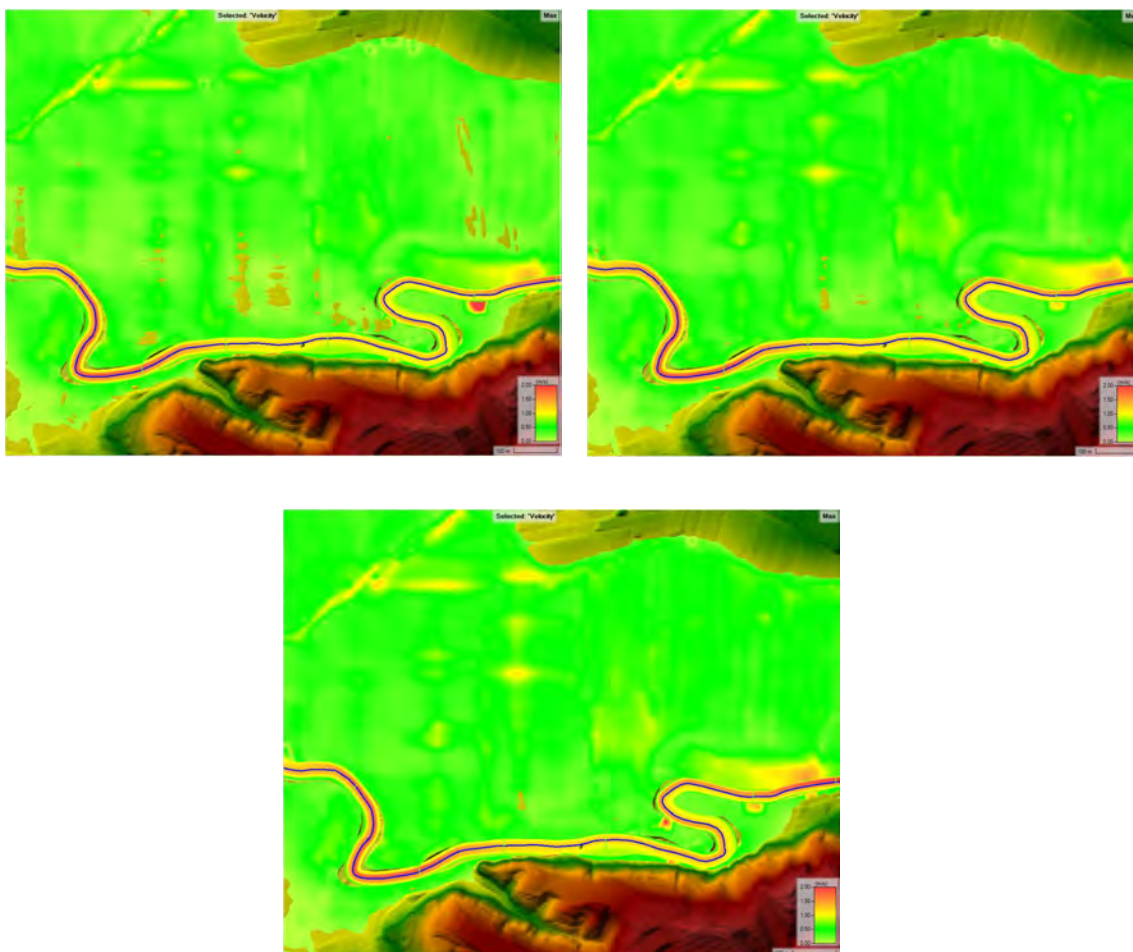
Na poplavnih območjih vzdolž struge Vipave prevladuje kmetijska raba tal različnih kategorij (njive in vrtovi, trajni nasadi, travniške površine in druge kmetijske površine). Večina kmetijskih tal je z vidika hidravlične hrapavosti dokaj podobnih. Z vidika deležev rabe tal na obravnavanem območju največji del površine pokrivajo gozdovi (44 %), večinoma na pobočjih okoli doline in južnem delu dolvodnega



območja, ter kmetijska zemljišča (43 %), večinoma v dolinskih predelih vzdolž mreže vodotokov. Manj dominantna in prostorsko zelo razpršena so pozidana zemljišča, ki zasedajo okoli 10 % površin.

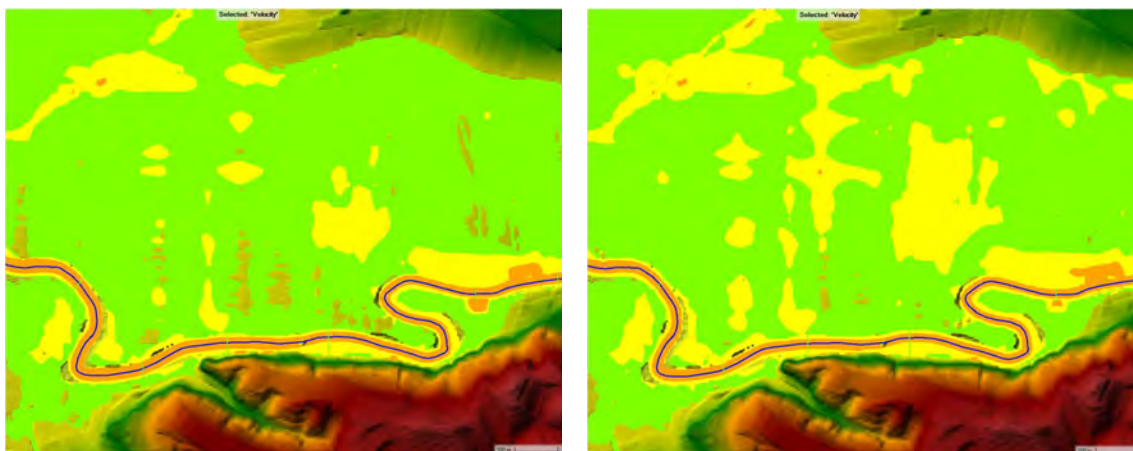
Obstoječa struga reke Vipave je vzdolž obravnavanega odseka precej zaraščena, na brežinah se nahaja dobro razvita obrežna vegetacija, ki predstavlja velik hrapavostni upor toku vode. Prevodnost struge Vipave je vzdolž obravnavanega odseka večinoma bistveno manjša od ocenjene konice  $Q_{10}$ , kar povečuje nevarnost pojavljanja procesov rečne erozije na obdajajočih poplavnih območjih. Doseg poplavnih voda je že pri pretoku  $Q_{10}$  znaten. Pri pretoku  $Q_{100}$  pride do obsežnih razlivanj poplavnih voda na levo in desno poplavno območje. Večinoma so preplavljene kmetijske površine, vzdolž odseka so poplavno ogroženi tudi stanovanjski in gospodarski objekti. Kot zanimivost velja izpostaviti veliko spremenljivost širine poplavnih območij, ki je posledica razgibane topografije terena vzdolž obravnavanega odseka.

V nadaljevanju predstavljamo rezultate hidravličnih izračunov z upoštevanjem vtočnih hidrogramov s konicami pretokov  $Q_{10}$ ,  $Q_{100}$  in  $Q_{500}$ . Na obravnavanem odseku reke Vipave se že pri pretoku s konic  $Q_{10}$  poplavne vode intenzivneje preusmerijo na poplavna območja, na katerih prevladuje kmetijska raba tal (predvsem njive, trajni nasadi, travniške površine). Na sliki 9.10 so prikazane razmere maksimalnih pretočnih hitrosti na obravnavanem odseku v primerih upoštevanja konic poplavnih valov  $Q_{10}$ ,  $Q_{100}$  in  $Q_{500}$ .



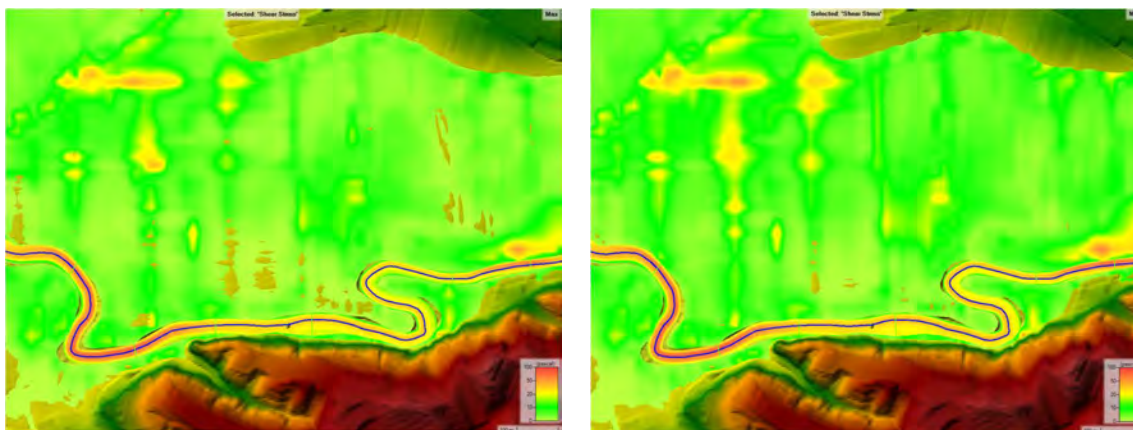
**Slika 9.10:** Maksimalne pretočne hitrosti pri poplavnih dogodkih s konicami pretoka  $Q_{10}$  (levo zgoraj),  $Q_{100}$  (desno zgoraj) in  $Q_{500}$  (spodaj) vzdolž obravnavanega odseka struge Vipave.

Pri prelivanju voda preko brežin glavne struge in nasipov se lokalno glede na rezultate hidravličnih izračunov pojavljajo območja, kjer maksimalne pretočne hitrosti presežejo 1 m/s, prav tako se pojavljajo območja povečanih pretočnih hitrosti ob prelivanju topografskih ovir gibanju poplavnih voda na poplavnih območjih (npr. manjših nasipov poljskih poti), kjer lokalno pretočne hitrosti dosežejo 1 m/s. Na poplavnih območjih se lokalno pojavljajo pretočne hitrosti okoli 0,5 m/s, ki lahko v primeru odsotnosti vegetacijskega pokrova (npr. zgodnje faze rasti poljščin na kmetijskih zemljiščih) in bolj erodibilnih tal že predstavljajo tveganje za pojav nekoliko intenzivnejših procesov rečne erozije z vidika kriterija odplavljanja materiala. Na večini poplavnih območij vzdolž obravnavanega odseka so pretočne hitrosti bistveno manjše od 0,5 m/s. Na sliki 9.11 prikazujemo prostorsko razporeditev območij pretočnih hitrosti z upoštevanjem mejnih vrednosti pretočnih hitrosti 0,5 m/s in 1 m/s pri poplavnem dogodku s konicama pretoka  $Q_{10}$  in  $Q_{100}$ , ki bi se lahko upoštevale kot kriterij za opredelitev razredov erozijske nevarnosti.

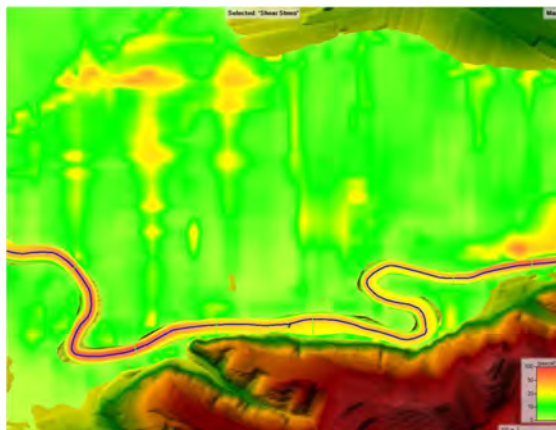


**Slika 9.11:** Območja vrednosti pretočnih hitrosti pri razmerah  $Q_{10}$  (levo) in  $Q_{100}$ . Z zeleno so obarvana območja hitrosti toka vode  $< 0,5$  m/s, z rumeno območja hitrosti med 0,5 in 1 m/s ter z oranžno območja s hitrostmi  $> 1$  m/s.

Slika 9.12 prikazuje prostorsko razporeditev maksimalnih strižnih napetosti za razmere poplavnih dogodkov s konicami pretokov  $Q_{10}$ ,  $Q_{100}$  in  $Q_{500}$ .

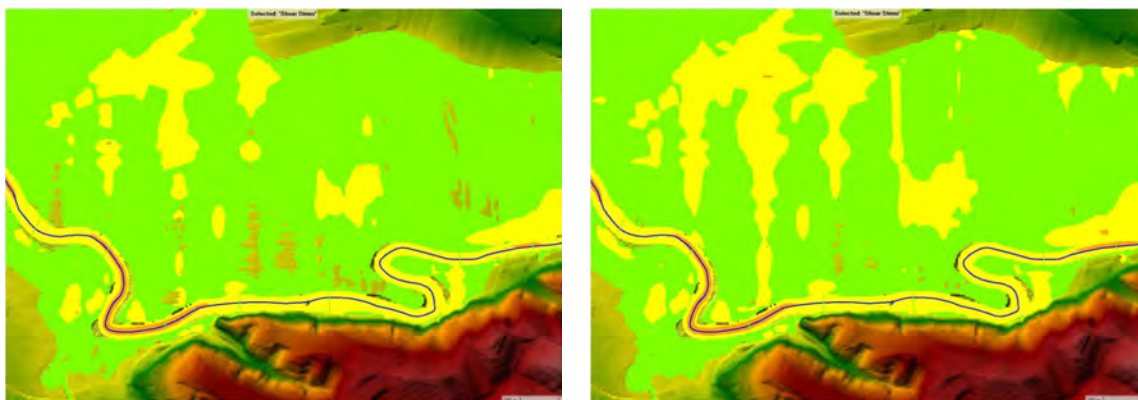






**Slika 9.12:** Vrednosti maksimalnih strižnih napetosti vzdolž obravnavanega odseka struge Vipave pri poplavnih dogodkih s konicami pretoka  $Q_{10}$  (levo zgoraj),  $Q_{100}$  (desno zgoraj) in  $Q_{500}$  (spodaj).

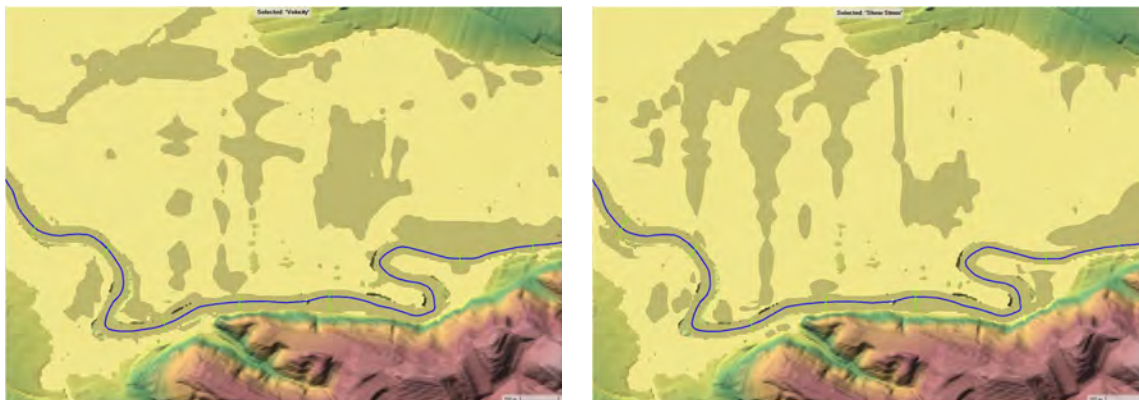
Glede na prevladujoče kmetijske površine, na katerih je del leta vegetacijski pokrov v različnih fazah rasti kmetijskih poljščin večinoma slabo razvit, bi lahko kot mejne vrednosti strižnih napetosti, pri katerih se lahko že pričakuje razvoj procesov rečne erozije, upoštevali vrednosti strižnih napetosti  $10 \text{ N/m}^2$ . Kot primer na sliki 9.13 prikazujemo primerjavo prostorskega obsega območij strižnih napetosti do  $10 \text{ N/m}^2$ , med  $10$  in  $50 \text{ N/m}^2$  in nad  $50 \text{ N/m}^2$  pri hidravličnih razmerah, ki se glede na rezultate hidravličnih simulacij pričakuje pri poplavnih dogodkih s konico pretoka  $Q_{10}$  in  $Q_{100}$ .



**Slika 9.13:** (slika levo – razmere pri  $Q_{10}$ ; slika desno – razmere pri  $Q_{100}$ ). Območja vrednosti strižnih napetosti: območje  $\tau < 10 \text{ N/m}^2$  (obarvano zeleno); območje  $10 < \tau < 50 \text{ N/m}^2$  (obarvano rumeno); območje  $\tau > 50 \text{ N/m}^2$  (obarvano oranžno). Območja vrednosti strižnih napetosti pri razmerah  $Q_{10}$  (levo) in  $Q_{100}$  (desno). Z zeleno so obarvana območja strižnih napetosti  $< 10 \text{ N/m}^2$ , z rumeno območja strižnih napetosti med  $10$  in  $50 \text{ N/m}^2$  ter z oranžno območja s strižnimi napetostmi  $> 50 \text{ N/m}^2$ .

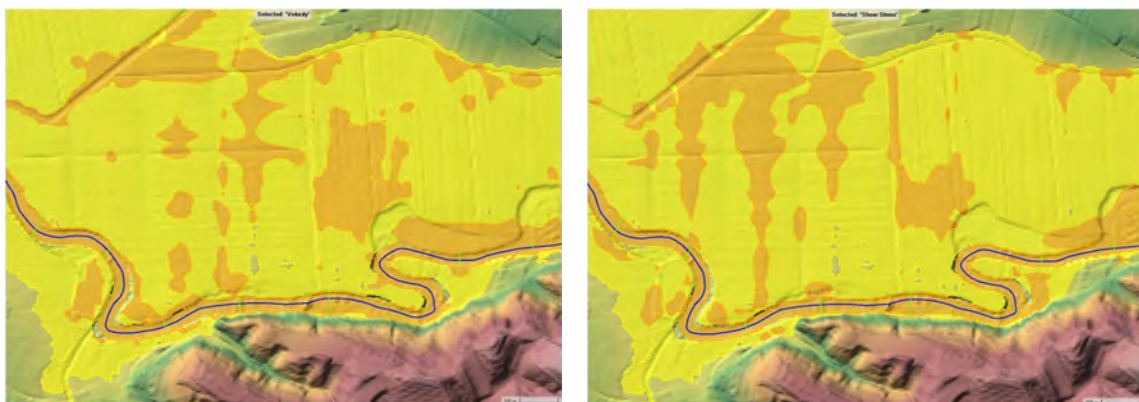
Na območjih, kjer so pretočne hitrosti in strižne napetosti majhne (npr. zeleno obarvana območja na slikah 9.11 in 9.13), so procesi rečne erozije v smislu procesov odplavljanja materiala manj verjetni, večja je verjetnost odlaganja materiala (lebedečih plavin), ki ga vodni tok nosi s sabo. Z vidika erozijskih razmer v zaledju ter procesov rečne erozije vzdolž gorvodnih odsekov se ne pričakuje, da bi bil dotok erodiranega materiala na obravnavani odsek velik, posledično bi bile tudi debeline odloženega materiala na poplavnih površinah omejene/majhne. Glede na mejne vrednosti, opredeljene v Pravilniku, bi na teh območjih predlagali opredelitev razreda majhne erozijske nevarnosti tako z vidika kriterija debeline sloja odloženega kot odplavljenega materiala.

Slika 9.14 prikazuje primerjavo erozijske nevarnosti (kriterij debeline odplavljenega erodiranega materiala) ob upoštevanju mejne vrednosti pretočne hitrosti 0,5 m/s in mejne vrednosti strižne napetosti 10 N/m<sup>2</sup> pri poplavnem dogodku s konico pretoka Q<sub>100</sub>. Omenjeni mejni vrednosti bi predlagali kot meji za opredelitev razreda srednje erozijske nevarnosti zgolj v primerih erodibilnih tal, ki niso zaščiteni s sklenjenim vegetacijskim pokrovom, kamor bi lahko šteli tudi kmetijska zemljišča s poljščinami, ki ne nudijo dobre protierozijske zaščite tal.



**Slika 9.14:** Primerjava erozijske nevarnosti (kriterij debeline odplavljenega erodiranega materiala) ob upoštevanju mejne vrednosti pretočne hitrosti 0,5 m/s (levo) in mejne vrednosti strižne napetosti 10 N/m<sup>2</sup> (desno) pri poplavnem dogodku s konico pretoka Q<sub>100</sub>.

Na sliki 9.15 je prikazana primerjava razredov erozijske nevarnosti z upoštevanjem zgornjih vrednosti pretočnih hitrosti in strižnih napetosti kot mejnih vrednosti med majhnim razredom erozijske nevarnosti in srednjim razredom erozijske nevarnosti.



**Slika 9.15:** Primerjava razredov erozijske nevarnosti po kriteriju debeline odplavljenega erodiranega materiala ob upoštevanju mejne vrednosti pretočne hitrosti 0,5 m/s (levo) in mejne vrednosti strižne napetosti 10 N/m<sup>2</sup> (desno) pri poplavnem dogodku s konico pretoka Q<sub>100</sub>. Oranžna šrafura označuje območja srednje erozijske nevarnosti, rumena šrafura območja majhne erozijske nevarnosti.

Pri izdelavi karte razredov erozijske nevarnosti je treba poudariti, da je dejanska opredelitev do mejnih vrednosti, na podlagi katerih opredeljujemo meje razredov erozijske nevarnosti skladno s Pravilnikom, v domeni izdelovalca tovrstnih analiz, ki se mora do upoštevanih vrednosti ustrezno opredeliti z vidika poznavanja lokalnih razmer na terenu. Pri tem si lahko pomagamo s priporočili v poglavju 8.1. Vsekakor pa ustrezno upoštevanje informacij, ki jih pridobimo na podlagi hidravličnih modelnih izračunov, nudi

dodaten vpogled v prostorsko razporeditev hidravličnih razmer, ki so glavni sprožitveni dejavnik procesov rečne erozije.

### 9.1.2 Manj kompleksna analiza izbranih odsekov obale morja

V nadaljevanju predstavljamo primer analize erozijske nevarnosti in ogroženosti za posamezne odseke slovenske obale, kjer smo celotno obalo razdelili v 30 odsekov glede na njene geološke in hidrološke lastnosti. Odseke smo razdelili po principu, da ima posamezni odsek čim bolj enake oz. homogene litološke in klimatske lastnosti, obenem pa se odseki čim bolj razlikujejo med seboj. Podoben princip razdelitve lahko naredimo tudi za krajše odseke, ki imajo več manjših (pod)odsekov, ki združujejo še bolj natančne lastnosti (npr. natančneje ločene odseke obale z več peščenjaka, natančneje določena območja poselitve ali infrastrukture).

Predstavljena je metoda ogroženosti, opisana v že predstavljenem prispevku Del Río in Gracia (2009), ki ogroženost razdeli na tri indekse: indeks nevarnosti (*Hazard Index*, HI), indeks antropogenega vpliva (*Impact Index*, II) ter združeni Indeks ogroženosti (*Risk Index*, RI). Za lažji pregled so spodaj podani podatki za prvih pet odsekov obale od 30 (S01 do S05), grafični prikaz pa je podan za celotno slovensko obalo.

**Preglednica 9.2:** Izračuni indeksov HI (indeks nevarnosti), II (indeks antropogenega vpliva) in RI (združeni Indeks ogroženosti za prvih pet odsekov (S01 do S05) za slovensko obalo. V vrsticah so podani vplivni faktorji po prispevku Del Río in Gracia (2009), stolpci pa predstavljajo vrednosti za vsak odsek posebej. Odebeljene vrstice v spodnjem delu tabele so izračunani indeksi HI, II in RI za vsak odsek obale.

Tip	Skupina	Faktor	Ime faktorja	Utež	S01	S02	S03	S04	S05	...
HI	A	HI_A	Litologija klifa	1	3	3	3	3	3	...
HI	B	HI_B	Strukturinogeološke lastnosti klifa	0.8	2	2	2	2	2	...
HI	C	HI_C	Naklon klifa	1	2	2	2	2	2	...
HI	D	HI_D	Zaščitni obalni pas	1	1	1	1	1	1	...
HI	E	HI_E	Kamnita podmorska platforma	0.8	4	4	4	4	4	...
HI	F	HI_F	Podporni ukrepi na vzhodju	0.8	3	1	1	1	1	...
HI	G	HI_G	Območje plimovanja	0.5	4	4	4	4	4	...
HI	H	HI_H	Izpostavljenost nevihtnim valovom	0.8	1	1	1	1	1	...
HI	I	HI_I	Razlika med višino nevihtnih in značilno višino modalnih valov	0.8	2	2	2	2	2	...
HI	J	HI_J	Relativni trend dvigovanja/spuščanja morske gladine	0.5	4	4	4	4	4	...
HI	K	HI_K	Padavine	0.5	3	3	3	3	3	...
II	A	II_A	Prevladujoča raba tal	1	2	2	4	4	4	...
II	B	II_B	Odstotek poseljenih območij	0.8	4	4	4	4	4	...
II	C	II_C	Prisotnost zaščitenih območij	0.6	3	2	2	2	2	...
II	D	II_D	Prisotnost in tip prometnega omrežja	0.8	2	2	3	3	3	...
II	E	II_E	Gostota prebivalstva	1	4	2	3	4	4	...
II	F	II_F	Hitrost rasti prebivalstva	0.6	1	1	1	1	1	...
		<b>HI_abs</b>	<b>Absolutni indeks nevarnosti (HI<sub>abs</sub>)</b>		21.1	19.5	19.5	19.5	19.5	...
		<b>II_abs</b>	<b>Absolutni deks antropogenega vpliva (II<sub>abs</sub>)</b>		13.2	10.6	14.4	15.4	15.4	...
		<b>RI</b>	<b>Relativni indeks nevarnosti (RI<sub>rel</sub>)</b>		0.24	0.00	0.00	0.00	0.00	...

II	Relativni indeks antropogenega vpliva (II <sub>rel</sub> )		0.75	0.45	0.89	1.00	1.00	...
RI	Indeks tveganja (HI <sub>rel</sub> )		0.42	0.16	0.31	0.35	0.35	...

Zgoraj predstavljeni indeksi so v nadaljevanju predstavljeni na grafičnih kartah slovenske obale, za vsakega izmed omenjenih indeksov posebej (slike 9.16 do 9.18). Glede na to, da se normirane vrednosti indeksov gibljejo od 0 do 1, so vrednosti razdeljene na 5 kategorij, pri katerih smo za prikaz uporabili uveljavljeno barvno lestvico petih "semaforskih" barv, od zelo nizke ogroženosti (temno zelena) do zelo visoke ogroženosti (rdeča barva). Podajamo samo karte končnih treh indeksov, seveda pa je možno grafično prikazati tudi rezultate za vsak vplivni faktor posebej (za naklone, rabo tal ipd.). Predlagamo, da se v okviru manj kompleksnih metod za oceno erozijske nevarnosti morja vrednosti HI indeksa prikazane na sliki 9.16 navežejo na razrede erozijske nevarnosti morja. Tako bi za osnovno opredelitev do erozijske nevarnosti npr. za odseke kot so npr. št. S14-S21 predlagali opredelitev razreda velike erozijske nevarnosti morja, ki bi jo lahko nadalje natančneje lokacijsko opredelili z uporabo kompleksnejših metod. Za odseke npr. S7, S22, S28 in S30 predlagamo opredelitev razreda srednje erozijske nevarnosti, tudi za te odseke bi bilo dobro posamezne erozijske bolj izpostavljene dele obale natančneje analizirati s kompleksnejšimi metodami. Za preostala območja poplavljanja morja pa predlagamo razred majhne erozijske nevarnosti.



Slika 9.16: Indeks nevarnosti (Hazard Index, HI) za 30 odsekov slovenske obale.





Slika 9.17: Indeks antropogenega vpliva (*Impact Index, II*) za 30 odsekov slovenske obale.



Slika 9.18: Indeks ogroženosti (*Risk Index, RI*) za 30 odsekov slovenske obale.



## 9.2 Testiranje kompleksnejših metod za oceno procesov rečne erozije in erozije morja

V uvodu v poglavje testiranja kompleksnejših metod za oceno procesov rečne erozije in erozije morja je treba poudariti, da z zahtevnostjo tovrstnih analiz izrazito naraščajo tudi zahteve po ustreznih vhodnih podatkih za izvedbo tovrstnih izračunov. Prav tako je zelo pomembno, da se z vidika poznavanja specifičnih terenskih razmer v okviru priprave tovrstnih izračunov ustrezno opredelimo do upoštevanja ustreznih robnih pogojev, vezanih na transport plavin, saj so od pravilne izbire »erozijskih« robnih pogojev močno odvisni rezultati tovrstnih izračunov in negotovosti, povezane z modeliranjem procesov premeščanja plavin. V nadaljevanju predstavljamo rezultate kompleksnejših analiz procesov rečne erozije z uporabo programa HEC-RAS, in sicer modula za 2D modeliranje procesov rečne erozije.

### 9.2.1 Analiza procesov rečne erozije na odseku Selške Sore

Procese rečne erozije na odseku Selške Sore je v svoji magistrski nalogi obravnavala Pivk (2023), v okviru CRP projekta je bil uporabljen predhodno izdelan hidravlični model s katerim smo opravili dodatne hidravlične simulacije. Obravnavani odsek se začne na robu Železnikov dolvodno od Alplesovega jezua in sotočja s Češnjico, ki priteče z območja Dražgoš in Rudnega. Selška Sora nato teče čez uravnano aluvialno dno doline ter vijuga bližje južnim pobočjem med travniki in obdelovalnimi površinami. Struga poteka mimo naselij Studeno in Selca ter skozi Dolenjo vas, kjer se obravnavani odsek dolžine približno 4,5 km konča. Za izdelavo topografskih podatkovnih slojev so bili uporabljeni podatki LiDAR snemanja Slovenije. DMV je bil na območju struge Selške Sore dopolnjen s prečnimi prerezi struge, izdelanimi na osnovi klasične geodetske izmere. Analiza procesov erozije je bila izvedena zgolj za obdajajoča poplavna območja struge Selške Sore na obravnavanem odseku, torej v tem primeru nismo obravnavali procesov rečne erozije na območju same struge vodotoka. Pri izdelavi hidravličnega modela so se namreč pojavile težave z numerično stabilnostjo hidravličnega modela v primeru, da je bilo tudi območje struge vodotoka podvrženo procesom poglobljanja oz. odplavljanja plavin. Tovrsten pristop je podoben pogostim primerom analiz poplavne nevarnosti, pri katerih je območje struge vodotoka izvzeto iz območij izdelave kart poplavne in erozijske nevarnosti.

#### 9.2.1.1 Hidravlični model

Hidravlični model za modeliranje 2D toka vode je bil izdelan v programu HEC-RAS. V model smo uvozili podatke o terenu v obliki združenega rastrskega sloja, izdelanega iz LiDAR digitalnega modela reliefa in geometrije struge, pridobljene iz geodetskih profilov. Dodatno smo vključili tudi sloj objektov, dostopen na spletnih straneh GURS.

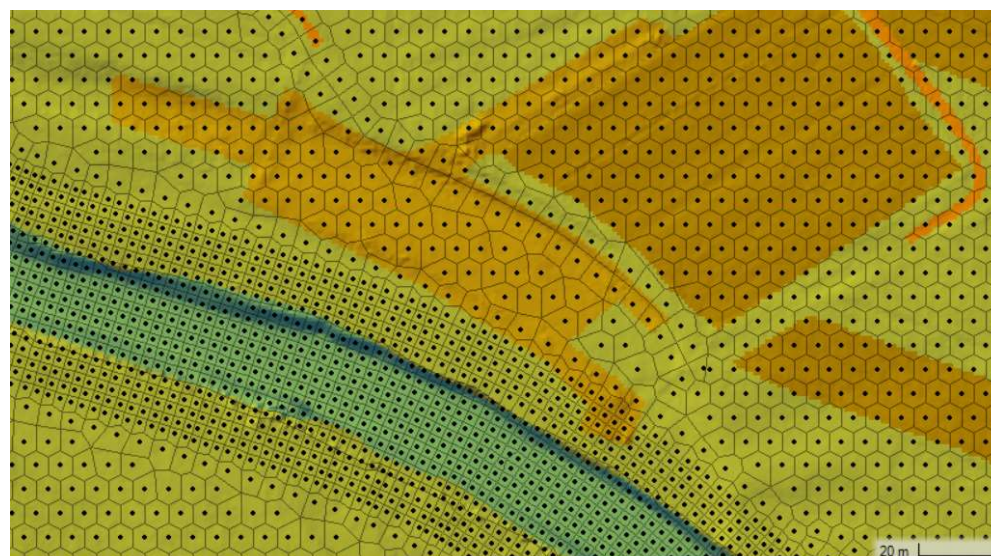
Znotraj 2D računske mreže so bile definirane računske celice treh tipov. Območje struge in brežin smo prekrili s pravokotnimi celicami srednje dimenzije 3 x 3 m, potek celic pa je vzporeden z osjo vodotoka, torej tudi z glavnimi tokovnicami v strugi. Na poplavnih površinah smo definirali heksagonalne celice, širine 6 m (Slika 9.19). Možnost generiranja šeststranih celic je bila v program dodana za upoštevanje čim bolj zveznega prehoda vodnega toka med celicami. Rezultati hidravličnega modela so namreč bolj numerično stabilni, če vodni tok poteka pravokotno na stranice celic, v primeru uporabe samo pravokotnih oz. kvadratnih celic pa to ni vedno mogoče. Na račun dodatnih robov celic, kjer se preračunavajo vrednosti hidravličnih parametrov, se računski čas nekoliko podaljša. Ta vpliv smo poskusili izničiti z izborom večje dimenzije celic, ki še daje zadovoljlive rezultate. Za opis cest in nasipov ter realen prikaz prehajanja poplavne vode čez njih je potrebno zagotoviti, da rob celic poteka po

njihovem vrhu. Pomembne linijske objekte smo zato vnesli v mrežo kot prekinitvene črte (angl. *breaklines*), ob katerih so se celice zgostile na razdaljo 5 m in poravnale robove vzporedno s potekom objektov. Ker je dobro pripravljena geometrija osnovni pogoj za dobro delujoč in stabilen model, so bili določeni popravki celic opravljeni tudi ročno (Pivk, 2023).

Podatke o rabi tal smo pridobili na spletnem portalu Ministrstva za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano (MKGP). Iz sloja poligonov različnih kategorij rabe tal smo z uvozom dobili rastrsko podlago rabe, ki smo jo povezali s terenom in geometrijo modela. Celice rabe tal so enake velikosti kot celice terena, to je 1 x 1 m. V preglednici smo kategorijam določili pripadajoče Manningove koeficiente hrapavosti na podlagi priporočenih vrednosti iz literature. Običajno vrednosti prilagajamo v postopku umerjanja modela, ko se želimo z rezultati čim bolj približati npr. znanim gladinam ob poplavnem dogodku ali pa že izdelanim poplavnim kartam. Z vrednostmi, ki smo jih izbrali kot osnovne za modeliranje nadaljnjih scenarijev, smo se z zadovoljivo natančnostjo približali obstoječim poplavnim kartam na območju. Manningovi koeficienti, ki so bili pripisani posameznim rabam tal na obravnavanem območju, so predstavljeni v preglednici 9.3.

**Preglednica 9.3:** Vrednosti Manningovega koeficienta za različne kategorije rabe tal (Pivk, 2023).

Vrsta rabe tal	Manningov koeficient hrapavosti
Neobdelano kmetijsko zemljišče	0,055
Kmetijsko zemljišče, poraslo z gozdnim drevjem	0,080
Odprto zemljišče brez ali z nepomembnim rastlinskim pokrovom	0,050
Kmetijsko zemljišče v zaraščanju	0,065
Ekstenzivni oz. travniški sadovnjak	0,070
Intenzivni sadovnjak	0,080
Njiva	0,045
Pozidano in sorodno zemljišče	0,025
Gozd	0,100
Plantaža gozdnega drevja	0,085
Suho, odprto zemljišče s posebnim rastlinskim pokrovom	0,055
Trajni travnik	0,045
Voda	0,040



**Slika 9.19:** 2D računsko mreža s tremi glavnimi tipi celic na odseku Selške Sore (Pivk, 2023).

Zaradi obsežnosti modela in posledično daljšega računskega časa, smo uporabili del hidrograma s trajanjem 6 ur, v tem času je bil dosežen tudi maksimalni pretok oz. konica  $Q_{100} = 253 \text{ m}^3/\text{s}$ . Dodatni pritoki Selške Sore na obravnavanem odseku zaradi kompleksnosti in obsega modela niso bili upoštevani kot dodatni robni pogoji (Pivk, 2023).

### 9.2.1.2 Model premeščanja plavin

Stabilen 2D hidravlični model je bil z dodatnimi vhodnimi podatki o lastnostih plavin nadgrajen v model za simulacijo 2D premeščanja plavin. Za območje struge Selške Sore je bila privzeta neerodibilna podlaga, pri modeliranju je bil poudarek na oceni procesov spiranja in odlaganja na poplavnih površinah. Obstoječemu terenu, geometriji in rabi tal je bil glede na razpoložljive geološke podatke pripisan enovit, prostorsko nespremenljiv sloj zrnastostne sestave plavin. Uporabljena je bila enačba za transport plavin Wu in sod. (2000). Za metodo razvrščanja plavin smo pustili privzeto in priporočeno nastavitvev aktivne plasti, enako za metodo hitrosti usedanja, kjer so izbrane enačbe po Soulsby-ju (1997). Za upoštevanje zrnastostne sestave smo vnesli razpoložljive geološke podatke o zrnastosti sestavi sedimentov na poplavnih površinah. Za vse frakcije smo upoštevali enako specifično težo plavin  $2,65 \text{ kg/m}^3$ .

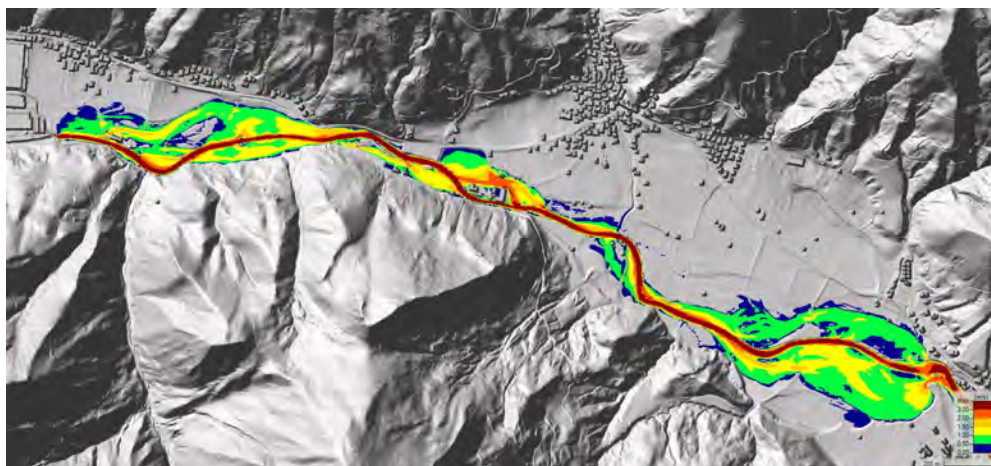
Glede na podatke geoloških raziskav naj bi bila maksimalna globina zgornjega sloja zemljine na poplavnih območjih do 2,5 m, za ta sloj je bila upoštevana predpostavljena zrnastostna sestava (Pivk, 2023), pod tem slojem je bila upoštevana neerodibilna podlaga. V naslednjem koraku smo povezali sloj površinske razporeditve sedimentov z vertikalnimi sloji sedimentov. V sklopu izračunov premeščanja plavin je bil upoštevan gornji robni pogoj »čiste vode« (angl. *clear water*), torej je v obravnavani odsek v modelu premeščanja plavin dotekala voda brez vsebnosti plavin. Izbrani robni pogoj torej pomeni, da se na modeliranem območju premeščajo in odlagajo le plavine, ki izvirajo iz erozijskega dogajanja na obravnavanem odseku. Možnost 2D modeliranja sedimentov v programu HEC-RAS je bila razvita nedavno, posledično so tovrstni izračuni še vedno podvrženi raznim računskim nestabilnostim in negotovostim, kar zahteva veliko poskušanja in prilagajanja modelnih parametrov. V končnem modelu, katerega rezultati so predstavljeni v nadaljevanju, so bile upoštewane naslednje nastavitve: korekcijski faktor za rinjene plavine (metoda Van Rijn-Wu), korekcijski faktor za lebdeče plavine (metoda eksponentne koncentracije v profilu), adaptacijska dolžina za rinjene plavine (10 m), upoštevanje plazenja, minimalna debelina aktivne plasti (15 cm) (Pivk, 2023).

### 9.2.1.3 Rezultati

S pomočjo hidravličnega modela so bili pridobljeni rezultati o lastnostih vodnega toka oz. hidravličnih razmerah (globina, hitrost vodnega toka). Selška Sora začne poplavljeni že na vstopnem delu modela pod sotočjem s Češnjico. Južno od naselja Studeno se razliva predvsem čez leve brežine na travniške in njivske površine, globine vode tam večinoma ne presegajo 0,5 m. Površine na desnem bregu so poplavljen na mestih, kjer se struga z vznožij vzpetin na jugu usmeri proti sredini doline. Pred zožitvijo doline so globine vode na obeh straneh reke večje od 0,5 m. Dolvodno od ožine se poplavne površine zmanjšajo, so pa tam ogroženi tudi objekti (stanovanjski in poslovni) ter športno-rekreacijske površine. Globine poplavnih voda so na izpostavljenih mestih pred nasipi cest do 1 m. Na bolj uravnanem odseku, ki usmeri strugo proti Dolenji vasi, pa se voda razlije čez oba bregova in poplavi kmetijske površine (travnike in njive). Poplavljanje zamejijo robovi rečnih teras, ki so nastale ob preteklih poplavnih

dogodkih. Oblikovanost terena usmerja tok vode na poplavnih ravninah in vodo ob jezu v Dolenji vasi usmeri nazaj v glavno strugo (Pivk, 2023).

Pretočne hitrosti se glede na rezultate hidravličnega modela na poplavnih površinah gibajo tudi do 2 m/s, vendar le na manjših območjih (npr. pri objektih Lotrič Meroslovje d.o.o. in pred jezom v Dolenji vasi). Večinoma so hitrosti voda med 0,5 in 1 m/s, kjer se oblikuje koncentriran tok po inundacijah pa tudi več kot 1 m/s (Slika 9.20). Višje hitrosti na nekaterih poplavnih površinah so predvsem posledica relativno nizkega Manningovega koeficienta hrapavosti, ki je bil upoštevan za območja pozidanih površin.



**Slika 9.20:** Maksimalne hitrosti vode na obravnavanem območju za osnovni scenarij (Pivk, 2023).

V programskem orodju HEC-RAS je za prikaz rezultatov premeščanja plavin mogoče prikazati številne spremenljivke. Podrobnejše možnosti prikazov z analizami rezultatov podajamo v predstavitvi rezultatov modeliranja premeščanja plavin vzdolž odseka struge vodotoka Hrastnica. V povezavi s samim premeščanjem plavin so na voljo rezultati strižnih obremenitev in njihovih izračunanih mejnih vrednosti, koncentracija in premeščena količina plavin. V okviru analize odseka Selške Sore je bil poudarek na rezultatih erodiranja in odlaganja sedimentov (podatkovni sloj »*bed change*«). Sloj izkazuje kumulativno spremembo površja do izbranega časovnega koraka, rezultati so podani v metrih. Na sliki 9.21 so prikazani rezultati analize območij odnašanja in odlaganja plavin. Barvna lestvica je prilagojena tako, da so negativne vrednosti (proces odplavljanja in poglobljanja), prikazane z rdečimi odtenki, pozitivne vrednosti (območja odlaganja plavin) pa z modrimi odtenki. Za meje med razvrstitvijo smo uporabili enake vrednosti, kot se pojavljajo v kartah erozijske nevarnosti skladno s Pravilnikom, torej do -0,5 m, med -0,5 m in -2 m in pod -2 m za odplavljen material (negativne vrednosti) ter do 0,3 m, med 0,3 m in 1 m in nad 1 m za odložen material (pozitivne vrednosti).





**Slika 9.21:** Območja odplavljanja in odlaganja plavin na obravnavanem odseku Selške Sore (Pivk, 2023).

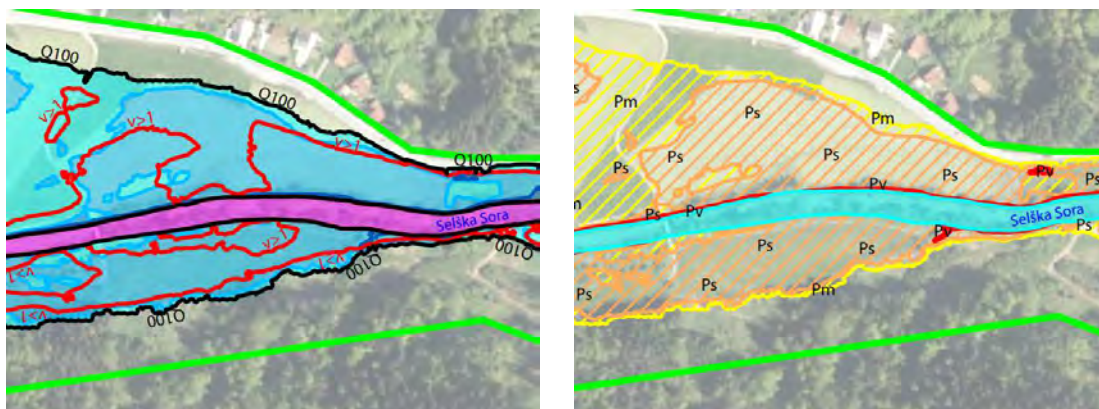
Prikazani sloj sprememb površja omogoča vpogled v prostorsko razporeditev območij, na katerih se glede na rezultate modeliranja pričakuje odlaganje oz. odplavljanje plavin. Za boljše razumevanje lokalnega dogajanja in lažjo interpretacijo rezultatov smo si pomagali z izračuni globlin, hitrosti in strižnih obremenitev ter z animacijo potovanja vodnih delcev.

Z izjemo lokacij zelo plitkega vodnega toka ob mejah dosegov poplavljanja, kjer so hitrosti poplavnih voda nizke (pod 0,5 m/s), se spremembe površja pojavijo skoraj na vseh poplavljenih površinah. Količine odplavljenega oz. odloženega materiala so večinoma znašale med -0,5 in 0,3 m. Prehodi med območji erodiranja in odlaganja so nastali predvsem na podlagi usmeritev in hitrosti tokovnic poplavnih voda. Odplavljenega materiala je več na območjih tik ob strugi, kjer so hitrosti vode najvišje, vrednosti se tam gibljejo lokalno do 1,5 oz. 2 m. Intenzivna erozija se pojavlja tudi na odsekih, kjer se voda s poplavnih ravnici zaradi reliefnih ovir vrača nazaj v strugo, npr. gorvodno od jezua v Dolenji vasi. Nekoliko bolj intenzivni procesi odplavljanja so bili zaznani tudi na površinah, kjer zaradi oblikovanja površja pride do bolj koncentriranega toka po poplavnih površinah in se hitrosti vode povečujejo. Obratno velja za območja odloženih plavin. Kjer se hitrosti na poplavnih površinah najbolj zmanjšajo, je odlaganje plavin intenzivnejše. Večinoma so nanosi manjši (do 0,5 m), na nekaterih lokacijah pa presežejo 1 m debeline. Glede na klasifikacijo rabe tal so prizadete predvsem travniške in njivske površine. Tudi na območjih pozidanih in sorodnih zemljišč rezultati izkazujejo povišano erozijsko nevarnost, odnesenega materiala naj bi bilo mestoma tudi več kot 1 m. Domnevamo, da so dosežene vrednosti najverjetneje posledica uporabljene kombinacije parametrov pri računu transporta plavin in predpostavljene enovite zrnastostne sestave tal. Pozidanim zemljiščem so namreč pripisane nizke vrednosti koeficientov hrapavosti, kar vodi v višje izračunane hitrosti vodnega toka in posledično večjo erozijsko moč vodnega toka.

#### 9.2.1.4 Predstavitev rezultatov izračunov na kartah poplavne in erozijske nevarnosti

Izsek iz karte produkta globine in hitrosti ( $G \times H$ ) je prikazan na sliki 9.22. Iz rezultatov hidravličnih analiz je razvidno, da kljub temu da hitrosti na več območjih presežejo vrednost 1 m/s, te niso merilo za razvrščanje območij v razrede poplavne nevarnosti glede na kriterije za določanje razredov poplavne nevarnosti skladno s Pravilnikom.

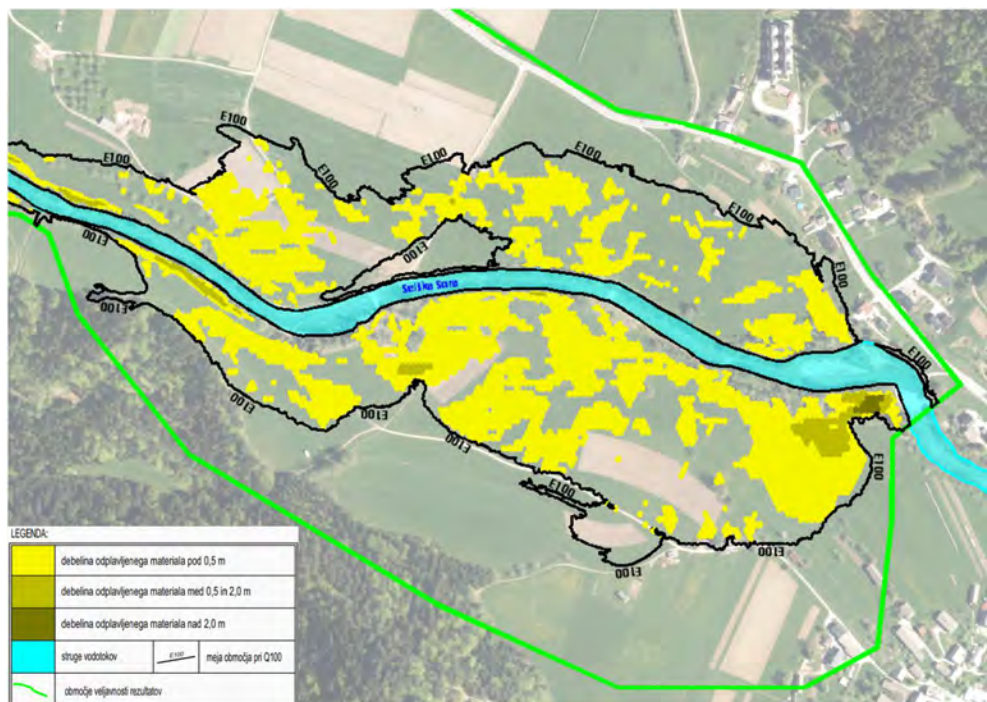




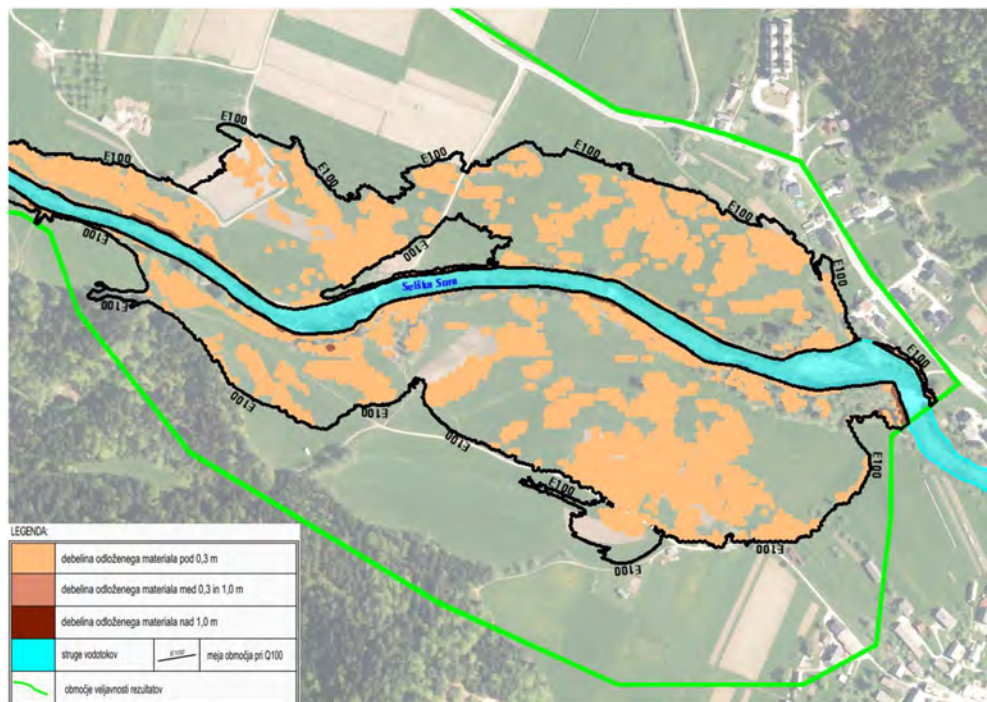
**Slika 9.22:** Izsek obravnavanega območja iz karte globlin pri pretoku  $Q_{100}$  in karte razredov poplavne nevarnosti (Pivk, 2023).

Iz rezultatov hidravličnega modela, nadgrajenega z modelom premeščanja plavin, so bile na osnovi rezultatov odnašanja in odlaganja erodiranega materiala izdelane karte erozijske nevarnosti in razredov erozijske nevarnosti. Skladno s Pravilnikom sta bili izdelani dve karti erozijske nevarnosti, in sicer posebej za odplavljeni in posebej za odloženi material. Na podlagi rezultatov lahko ugotovimo, da je glede na rezultate modeliranja premeščanja plavin največ površin podvrženih manj intenzivnim procesom rečne erozije (odplavljanja erodiranega materiala) na poplavnih površinah, kjer pri poplavnih razmerah pri konici pretoka  $Q_{100}$  potencialno pride do poglobitev v rangu do 0,5 m. Predvsem na območjih koncentriranega vodnega toka na poplavnih površinah z nizko hidravlično hrapavostjo se lahko glede premeščanja plavin potencialno erodira med 0,5 in 2 m materiala. Na treh lokacijah je bilo ugotovljeno, da se obseg odplavljanja erodiranega materiala na poplavnih površinah v projektne poplavne dogodke presega 2 m. Gre za območja tik ob brežinah struge, kjer voda začne prestopati bregove oz. se s poplavnih površin vrača v glavno strugo Selške Sore. Ob tem še enkrat izpostavljamo, da območje struge vodotoka ni bilo zajeto v modelu premeščanja plavin. Slika 9.23 prikazuje karto erozijske nevarnosti za izsek obravnavanega območja.

Na vmesnih površinah, kjer glede na rezultate modeliranja premeščanja plavin na poplavnih območjih ni bilo ugotovljenega odplavljanja erodiranega materiala, rezultati hidravličnega modela kažejo odlaganje erodiranega materiala (slika 9.24). Lokacije odlaganja so pogojene z zastajanjem poplavnih voda oz. lokalnim zmanjšanjem pretočnih hitrosti in s tem premestitvene zmožljivosti vodnega toka za premeščanje plavin. Večinoma so plasti odloženega materiala debeline do 0,3 m, le izjemoma več (med 0,3 m in 1 m). Območja, kjer bi se odložilo več kot 1 m premeščenih plavin, so prostorsko izjemno omejena. Glede na nastavitve hidravličnega modela in ugotovljene hidravlične razmere lahko ugotovimo, da večji del sedimentov, ki so erodirani na modeliranih poplavnih površinah, vodni tok odplavlja dolvodno.



**Slika 8.23:** Izsek iz karte erozijske nevarnosti – območja odplavljanja erodiranega materiala na poplavnih območjih (Pivk, 2023).

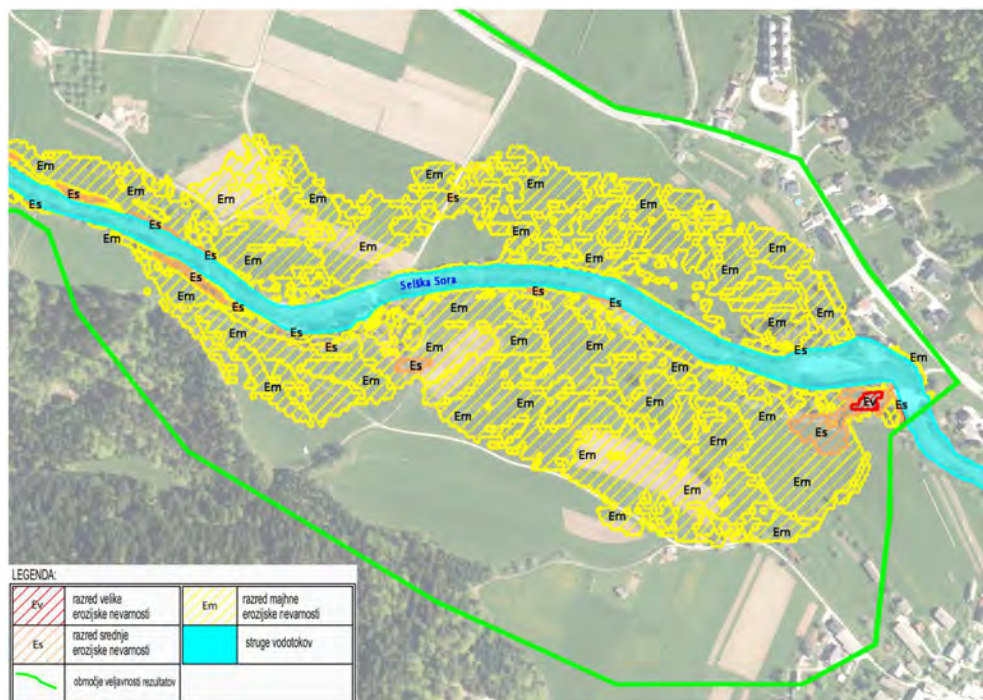


**Slika 9.24:** Izsek iz karte erozijske nevarnosti – območja odlaganja erodiranega materiala na poplavnih območjih (Pivk, 2023).

Karta razredov erozijske nevarnosti (slika 9.25) je bila izdelane na podlagi združevanja slojev odplavljanja in odlaganja materiala. Večina poplavljenih površin se uvršča v razred majhne erozijske nevarnosti ( $E_m$ ). Skladno z opredeljenimi kriteriji razredov je na teh območjih globina odplavljenega



materiala pod 0,5 m oz. debelina nanosov odloženega materiala manjša od 0,3 m. Na območjih, kjer se erodira med 0,5 in 2 m oz. akumulira med 0,3 in 1 m sedimentov, je določen razred srednje erozijske nevarnosti (Es). Posamezna prostorsko zelo omejena območja z odplavljenimi več kot 2 m oz. odloženim več kot 1 m debeline materiala so uvrščena v razred velike erozijske nevarnosti (Ev).



Slika 9.25: Izsek iz karte razredov erozijske nevarnosti (Pivk, 2023).

V predstavljenem primeru analize procesov rečne erozije na poplavnih območjih sta se s številnimi prilagoditvami računskih parametrov in vhodnih podatkov zagotovila stabilen hidravlični model in model premeščanja plavin. Računski časi modela premeščanja plavin so se v primerjavi z običajnim hidravličnim modelom izrazito podaljšali, izračuni so pri začetnih zagonih modela trajali tudi več dni. Z optimizacijo časovnih korakov in algoritmov za izračun transporta plavin se je doseglo, da se je računski čas skrajšal na sprejemljivo dolžino glede na velikost obravnavanega območja. S prilagoditvami se ni vplivalo na numerično stabilnost modela in na končne rezultate hidravličnih izračunov in izračunov premeščanja plavin (Pivk, 2023). Končni rezultati pričujoče analize v obliki erozijskih kart predstavljajo podrobnejši vpogled v pričakovane procese rečne erozije vzdolž obravnavanega odseka.

### 9.2.2 Analiza procesov rečne erozije na odseku Hrastnice

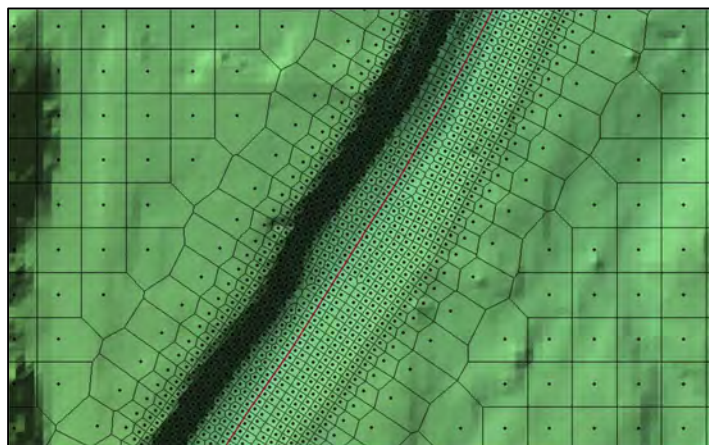
Obravnavani odsek vodotoka Hrastnica se nahaja v srednjem toku in je dolg približno 1,8 km. Na obravnavanem odseku poteka struga vodotoka Hrastnice po aluvialnem dolinskem dnu. Leva brežina vodotoka, ki v večji meri poteka neposredno vzdolž glavne prometnice, je mestoma zavarovana z zložbami iz kamna v betonu oziroma kamnitobetonskimi zidovi, ki so navkljub izjemnemu poplavnemu dogodku v avgustu 2023 v večji meri ostali funkcionalni. Desna brežina vodotoka, ki meji na gozdnata pobočja Škofjeloškega hribovja ter priobrežna travniška zemljišča, je pretežno naravna oziroma neutrnjena. Na območjih erodiranih brežin, ki se pojavljajo praktično vzdolž celotnega obravnavanega odseka Hrastnice, je formiran začasen zemeljski profil struge, ki zaradi visokovodnih dogodkov, ki so sledili poplavnemu dogodku avgusta 2023, mestoma že nakazuje sledi nadaljnjih procesov bočne

erozije. Povprečni vzdolžni padec na obravnavanem odseku znaša 2,1 %, niveleta dna vodotoka pa je mestoma stabilizirana z lesenimi in kamnitobetonskimi talnimi oziroma stopenjskimi pragovi. Širina trapeznega profila struge na gorvodnem delu obravnavanega odseka znaša približno 5 m, nakar se v srednjem, predvsem pa v spodnjem toku, pretočni profil vodotoka razširi. Podatki z integralne karte poplavne nevarnosti, ki je dostopna na spletnem portalu Atlas voda, kažejo, da je pretočni profil Hrastnice na obravnavanem odseku izrazito poddimenzioniran, kar je potrdila tudi visokovodna ujma v avgustu 2023. Ob nastopu visokovodnega pretoka s povratno dobo 10 let ( $Q_{10}$ ) že pride do preplavljanja dela cestišča na gorvodnem delu odseka, medtem ko visoke vode s povratno dobo 100 let ( $Q_{100}$ ), poleg večjega dela glavne prometnice, ki poteka vzdolž leve brežine vodotoka, preplavijo tudi pretežni del spremljajočih travniških površin in nekatere izmed stanovanjskih objektov.

### 9.2.2.1 Hidravlični model

V okviru zasnove hidravličnega modela smo na začetku v programsko orodje HEC-RAS uvozili topografski podlagi hidravličnega modela. Za stanje pred poplavno ujmo je bila upoštevana topografska podlaga, ki je bila izdelana z uporabo digitalnega modela reliefa Slovenije (DMR1) in interpoliranega terena v rečni strugi. Za stanje po poplavni ujmi 2023 je bila upoštevana topografska podlaga, ki so jo na območju poplavnih površin opisovali podatki DMR1, batimetrija struge pa je bila izdelana na osnovi podatkov klasične terestrične geodetske izmere. Na obravnavanem odseku Hrastnice je bil določen zunanji rob dvodimenzionalne računske mreže, ki so jo na vzhodnem in zahodnem robu omejevala strma pobočja Škofjeloškega hribovja, na severnem in južnem delu pa je bila mreža, zaradi poenotenja obsega hidravličnega modela za predhodno in obstoječe stanje, omejena z obsegom razpoložljivih podatkov geodetske izmere območja struge Hrastnice. Na območjih poplavnih površin smo definirali pravokotne računske celice osnovnih dimenzij 5 x 5 m, medtem ko smo območje struge, kjer se skladno s povečevanjem intenzitet vtočnih hidrogramov pojavljajo hipne spremembe v dinamiki rečnega toka, prekrili z manjšimi računskimi celicami osnovnih dimenzij 1 x 1 m. Ob tem smo poskrbeli, da so bile stranice računskih celic poravnane z zunanjimi robovi brežin (slika 9.26). Na ta način smo zagotovili, da se pri naraščanju pretokov voda iz osnovne struge ne preliva na poplavne površine vse dokler vodostaj ne preseže višine zunanje stranice računske celice, ki poteka po vrhu brežine. Vzdolž struge vodotoka smo dodali tudi prekinitvene črte (angl. *breakline*) in tako zagotovili, da je bila postavitev računskih celic v strugi čim bolj poravnana z osjo vodotoka, torej z glavnimi tokovnicami v strugi, robovi računskih celic pa so bili poravnani prečno na prevladujočo smer gibanja vodnega toka. Na ta način smo dosegli numerično stabilnejše hidravlične izračune. Dodatne informacije o uporabljenih vhodnih hidroloških podatkih in nastavitvah hidravličnega modela podaja Dolenc (2025).





**Slika 9.26:** Prikaz zgostitve računskih celic na območju struge.

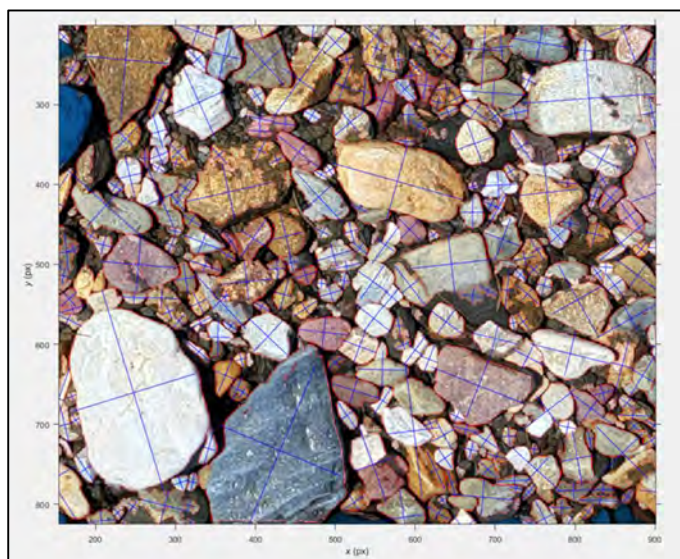
Obdelane prostorske podatke o rabi tal, ki smo jih pridobili s spletnega portala Ministrstva za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano, smo v vektorski obliki uvozili v programsko orodje HEC-RAS. Na podlagi poligonov, ki so razmejevali posamezne površine z različnimi rabami, smo nato oblikovali rastrski sloj rabe tal z velikostjo celice 1 x 1 m in ga povezali s topografskima podlagama in geometrijama hidravličnega modela. Pri določitvi vrednosti Manningovega koeficienta hrapavosti za posamezne rabe tal, ki so prikazane v spodnji preglednici, smo izhajali iz tuje strokovne literature (npr. Chow, 1959; USACE, 2024c), Preglednica 9.4.

**Preglednica 9.4:** Izbrane vrednosti Manningovega koeficienta hrapavosti za posamezne rabe tal.

Raba tal	Manningov koeficient hrapavosti
Kmetijsko zemljišče v zaraščanju	0,065
Neobdelano kmetijsko zemljišče	0,055
Njiva	0,045
Trajni travnik	0,045
Ekstenzivni oziroma travniški sadovnjak	0,065
Gozd	0,2
Drevesa in grmičevje	0,07
Pozidano in sorodno zemljišče	0,025
Struga vodotoka	0,06

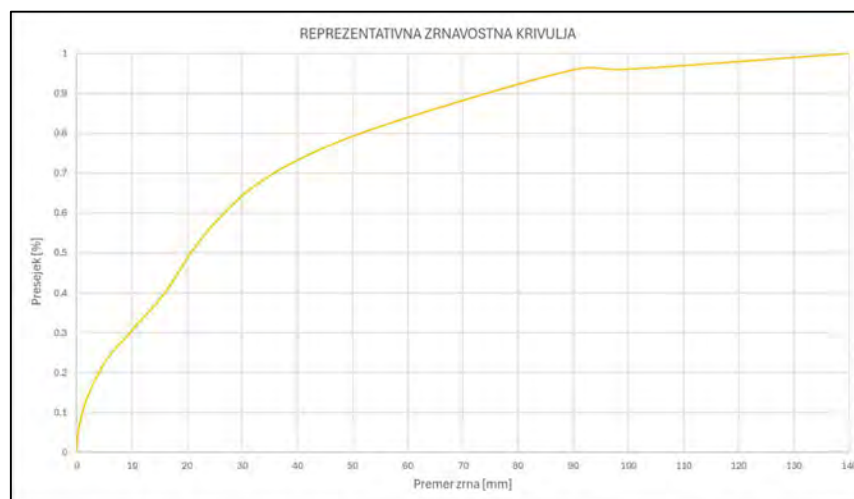
### 9.2.2.2 Model premeščanja plavin

Za potrebe nadgradnje hidravličnega modela z modelom premeščanja sedimentov, smo potrebovali podatke o zrnovostni sestavi tal na obravnavanem odseku Hrastnice. Tako je bila na desetih prodiščih vzdolž 1,8 km dolgega odseka Hrastnice opravljena optična analiza zrnivosti krovnega sloja z uporabo programskega orodja BaseGrain (primer prikazan na sliki 9.27). Pri izdelavi fotografij prodišč, na podlagi katerih je bila izvedena optična analiza, smo morali biti pozorni, da so bile fotografije posnete s čim bolj »ptičje perspektive« in v času, ko je bilo sonce v zenitu, s čemer smo pri optični analizi izničili napake, ki bi se lahko pojavile zaradi ustvarjanja senčnih leg. Na fotografijah prodišč je moral biti zajet merilni trak, s pomočjo katerega, smo lahko pri obdelavi slik določili dejanske razdalje.



**Slika 9.27:** Optična analiza enega izmed prodišč vzdolž obravnavanega odseka Hrastnice.

Na podlagi zrnastostnih krivulj, ki so bile s pomočjo optične analize idoločene za vsako izmed desetih prodišč vzdolž obravnavanega odseka Hrastnice, smo z metodo povprečenja določili reprezentativno zrnastostno krivuljo (slika 9.28), s katero smo v modelu premeščanja sedimentov opisali enotno zrnastostno sestavo plavin na računskem območju modela. Ocenjena debelina sedimentne plasti z zrnastostno krivuljo je znašala 1,5 m, pod njo pa smo definirali sloj neerodibilne podlage, s čimer smo omejili maksimalno možno globino erodiranja. Maksimalno globino erodiranja smo določili na podlagi terenskih ogledov Hrastnice v dneh po poplavi ujmi ter na podlagi fotografij popisa škode na vodnih in priobalnih zemljiščih vodotoka, ki so bile posnete konec avgusta 2023 (Dolenc, 2025).



**Slika 9.28:** Reprezentativna zrnastostna krivulja krovnega sloja na izbranem odseku Hrastnice.

V programskem orodju HEC-RAS lahko pri modeliranju premeščanja sedimentov izbiramo med številnimi transportnimi enačbami, ki omogočajo simuliranje izrazito nelinearnih procesov premeščanja plavin. Izbira ustrezne enačbe predstavlja eno izmed najpomembnejših odločitev pri izdelavi modela premeščanja sedimentov, saj se dobljeni rezultati modela lahko bistveno razlikujejo

glede na izbrano transportno funkcijo (USACE, 2024b). Večina transportnih enačb, ki jih ponuja programsko orodje HEC-RAS, je bila namreč razvita na podlagi laboratorijskih preizkusov z različnimi zrnastimi sestavami rinjenih in lebdečih plavin, različnimi padci dna in na podlagi raznovrstnih hidravličnih pogojev. Po analizi transportnih enačb, ki jih ponuja programsko orodje HEC-RAS, ter z izvedbo številnih testnih simulacij premeščanja sedimentov, smo se odločili za uporabo transportne enačbe van Rijn (1984a; 1984b; 1984c; 1993; 2007a; 2007b), ki je v sklopu testnih zagonov modela z vidika poznane dogajanja med poplavno ujmo na izbranem odseku Hrastnice izkazovala najbolj smiselne rezultate. Za metodo razvrščanja frakcij sedimentov krovnega sloja oziroma posteljice dna smo uporabili priporočeno nastavitev aktivne plasti, ki tekom simulacije – na podlagi spreminjanja zrnivosti krovnega sloja – vzporedno preračunava transportno kapaciteto za vsako frakcijo zrn. Priporočeno nastavitev smo uporabili tudi pri določitvi metode hitrosti usedanja kohezivnih in nekohezivnih delcev, kjer smo uporabili enačbo Soulsbya (1997).

Zaradi pomanjkanja terenskih podatkov o premestitveni zmogljivosti vodotoka, kar je najpogostejša omejitev z vidika vhodnih podatkov, smo bili pri izboru primerne sedimentnega (gorvodnega) robnega pogoja precej omejeni. Tako smo se odločili za uporabo robnega pogoja »*Equilibrium Load*«, ki v vsakem časovnem koraku simulacije v računsko domeno dovaja frakcije in količine sedimentov enake tistim, ki so erodirane iz mejnih računskih celic, ki se nahajajo vzdolž gorvodne meje računske mreže. V predmetnih računskih celicah se kota dna terena (kljub premeščanju plavin) ne spreminja, konstantna pa je tudi zrnavost plavin. Predmetni robni pogoj tako v računsko domeno dovaja plavine ne glede na njihovo količinsko razpoložljivost. Uporaba sedimentnega robnega pogoja »*Equilibrium Load*« je na obravnavanem odseku Hrastnice smiselna z vidika ogromne količine plavin, ki se je v času poplavne ujme sprostila iz gorvodnih oziroma zalednih delov porečja. Za analizo občutljivosti modela premeščanja plavin na uporabljeni robni pogoj smo v sklopu nadaljnjih analiz namesto robnega pogoja »*Equilibrium Load*«, uporabili tudi robni pogoj »*Clear Water*«, tj. dotok čiste vode brez plavin. Z izbiro predmetnega pogoja, so se tekom simulacije na modeliranem odseku Hrastnice, premeščale oziroma odlagale samo tiste količine in frakcije plavin, ki so bile na obravnavanem odseku tudi erodirane.

Pomembno vlogo pri določanju začetka prodnega premika, tj. trenutek, v katerem posamezno zrno zaradi delovanja vodnih sil oziroma pojava strižnih napetosti preide v gibanje, predstavlja faktor izpostavljenosti zrn (Mikoš, 2007). Pri neenoviti zrnastosti sestavi krovnega sloja, kakršna je tudi zrnavostna sestava tal na modeliranem odseku Hrastnice, so namreč manjša zrna fizično ujeta pod zrna večjih frakcij in so posledično manj izpostavljena delovanju vodnih sil kot večja zrna. Z uporabo funkcije izpostavljenosti zrn (Wu in sod., 2000) smo v modelu premeščanja sedimentov upoštevali popravke pri izračunih mejnih strižnih napetosti za posamezne frakcije sedimentov, ki povzročijo začetek prodnega premika. Z uporabo funkcije izpostavljenosti zrn se je v simulaciji premeščanja plavin zmanjšal transport finih delcev, medtem ko se je transport grobih zrn povečal. Vrednosti parametrov v enačbi izpostavljenosti zrn smo določili na podlagi priporočenih vrednosti iz literature (USACE, 2024b).

Poleg ključnih izbranih nastavitev, predstavljenih v predhodnih odstavkih, smo model premeščanja sedimentov dopolnili še z manjšimi, a kljub temu pomembnimi modifikacijami oziroma parametri, s katerimi smo zagotovili ustrezno numerično stabilnost modela. Končno obliko modela smo tako na podlagi priporočil iz literature dopolnili še z izbiro naslednjih parametrov oziroma nastavitev (Dolenc, 2025):

1) za korekcijski faktor rinjenih plavin, s katerim opišemo relativne hitrosti gibanja delcev oziroma plavin glede na hitrosti vodnega toka, smo uporabili metodo van Rijn – Wu,

- 2) za korekcijski faktor lebdečih plavin, s katerim opišemo hitrosti gibanja lebdečih delcev v vodnem stolpcu, smo uporabili metodo eksponentne porazdelitve koncentracije v profilu,
- 3) za vrednost adaptacijske dolžine za rinjene plavine smo privzeli vrednost 5 m,
- 4) za minimalno debelino računske plasti sedimentov smo privzeli vrednost 0,1 m,
- 5) glede na relativno strm povprečni padec vzdolžnega naklona dna struge, ki za obravnavani odsek Hrastnice znaša 2,1 %, smo z določitvijo vrednosti koeficienta »*Base Bed – Slope Coefficient*«, v simulacijo vključili tudi procese transporta sedimentov zaradi gravitacijskih sil.

Možnost dvodimenzionalnega modeliranja premeščanja sedimentov je v programskem orodju HEC-RAS prisotna relativno kratek čas in še ni popolnoma dodelana. Dvodimenzionalni model premeščanja sedimentov (trenutno) ne dovoljuje neposredne umestitve notranjih robnih pogojev, tj. vtočnih hidrogramov, v računsko mrežo modela. Posledično je bila simulacija premeščanja sedimentov izvedena z uporabo zgolj enega vtočnega hidrograma. Glede na dejstvo, da je proces modeliranja premeščanja sedimentov časovno izjemno potraten, smo se odločili, da bomo v simulaciji – z namenom optimizacije računskega časa – uporabili le del hidrograma s trajanjem 6 ur, znotraj katerih je zajeta visokovodna konica  $Q_{100} = 51,7 \text{ m}^3/\text{s}$ , v času katere se pojavljajo najintenzivnejši procesi premeščanja sedimentov.

Eno izmed omejitev dvodimenzionalnega modela premeščanja sedimentov predstavljajo tudi računske nestabilnosti, ki se (lahko) tekom simulacije pojavljajo na vplivnem območju modeliranih premostitev oziroma mostov. Preračun tokovnih razmer na odsekih mostov namreč v osnovi poteka na podlagi štirih prečnih profilov, ki se nahajajo na relativno kratki medsebojni razdalji. Ob nastopu visokovodnih pretokov, se na območju predmetnih prečnih profilov, pojavljalo hipne spremembe v dinamiki vodnega toka, ki lahko vodijo v računsko nestabilnost in divergenco sedimentnih izračunov (USACE, 2024a). Na podlagi opisanega smo zaradi izboljšanja numerične stabilnosti iz modela premeščanja sedimentov odstranili oba cestna mostova (Dolenc, 2025).

### 9.2.2.3 Rezultati modela premeščanja plavin

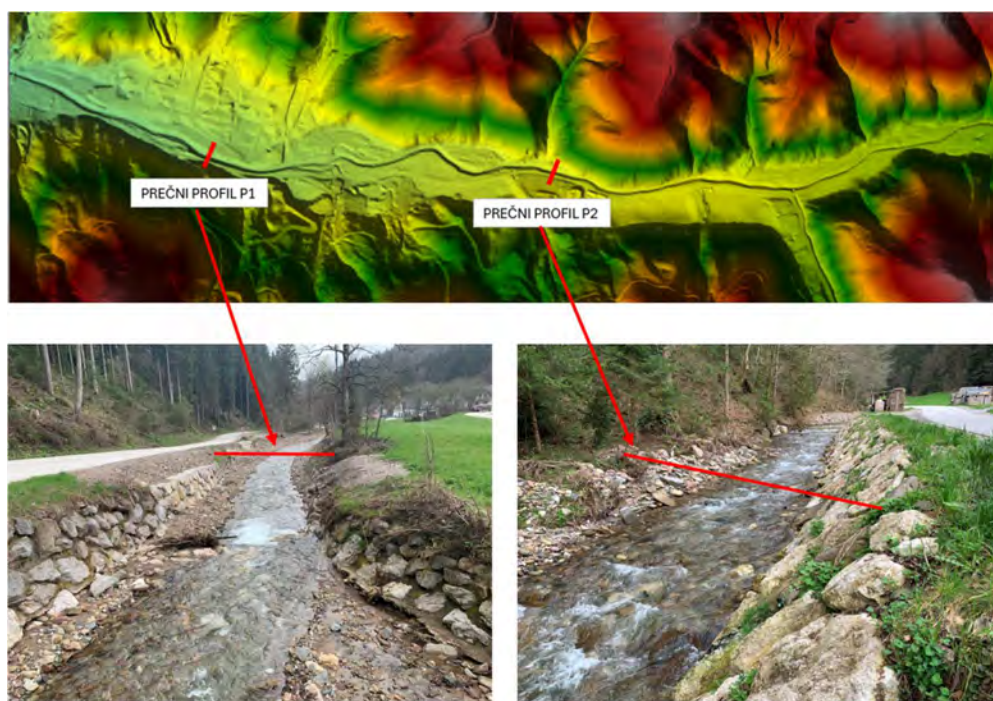
#### 9.2.2.3.1 Analiza lokalnih hidravličnih razmer in procesov rečne erozije v izbranih prečnih prerezih struge

V sklopu modeliranja premeščanja sedimentov oziroma plavin v programskem orodju HEC-RAS lahko na podlagi rezultatov podatkovnega sloja »*Bed Elevation*« sledimo časovnim spremembam višinskih kot terena (topografske podlage) na območju računske mreže hidravličnega modela, ki nastanejo kot posledica procesov rečne erozije, tj. odlaganja in erodiranja plavin. Pri modeliranju premeščanja plavin se tako hidravlične razmere ne spreminjajo zgolj v odvisnosti od pretočnih razmer, temveč tudi od časovnih in prostorskih sprememb v topografiji terena (npr. spremembe v geometriji prečnih prerezov struge, ki so posledica poglobljanja struge zaradi intenzivnih erozijskih procesov, vodijo v večjo hidravlično prevodnost predmetnih pretočnih profilov in obratno – intenzivno odlaganje plavin zmanjšuje pretočni prerez struge, namenjen prevajanju poplavnih voda). Kakor bomo prikazali v nadaljevanju, lahko spremembe v morfologiji rečne struge vplivajo tudi na porazdelitev pretočnih hitrosti in strižnih napetosti v posameznih prečnih profilih, ki predstavljajo glavne dejavnike oziroma gonilne sile vodnega toka procesov premeščanja/odlaganja plavin.

Poleg erozijskega dogajanja na poplavnih območjih smo se v izračunih osredotočili tudi na procese rečne erozije znotraj območja same struge vodotoka, kjer je erozijsko dogajanje zaradi velikih



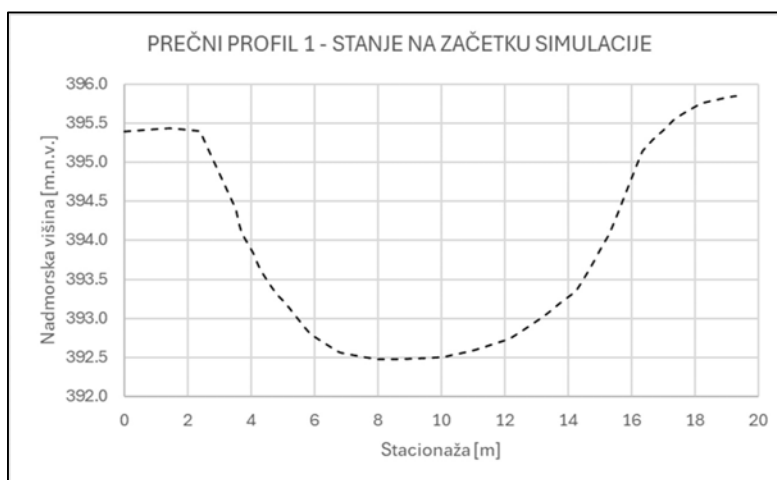
hidravličnih obremenitev ostenja struge najintenzivnejše. Vzdlž obravnavanega odseka Hrastnice smo določili dva vzorčna prečna prereza struge, v katerih so se v času avgustovske poplavne ujme izkazovali izraziti procesi odlaganja plavin (prečni profil P1) in prevladujoči procesi globinske oziroma bočne erozije (prečni profil P2), (Slika 9.29). Z dobljenimi rezultati modela premeščanja plavin smo se v predmetnih pretočnih prerezih z modeliranjem hidravličnih razmer poskušali čim bolj približati dejanskim razmeram v času poplavnega dogodka 2023 (z vidika premeščanja in odlaganja plavin). V nadaljevanju prikazujemo in pojasnjujemo ugotovljene lokalne hidravlične razmere in procese rečne erozije v izbranih pretočnih prerezih za stanje pred poplavno ujmo 2023.



**Slika 9.29:** Lokacijska umestitev prečnih profilov P1 in P2 (Foto: T. Dolenc, marec 2024).

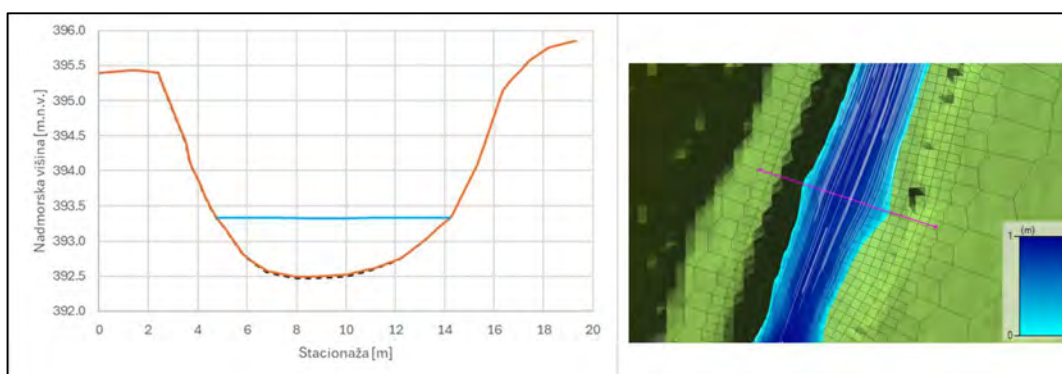
#### **PREČNI PREREZ P1:**

Prečni prerez P1 se nahaja v spodnjem toku obravnavanega odseka Hrastnice, približno 50 m dolvodno od cestnega mostu, ki se nahaja v bližini stanovanjskega objekta Sv. Barbara 22. Pretočni prerez vodotoka Hrastnica je na območju spodnjega toka širši, niveleta dna vodotoka oziroma padec dna pa se nekoliko ustali, kar je v času avgustovske poplavne ujme botrovalo, poleg intenzivne bočne erozije brežin, predvsem k intenzivnim procesom odlaganja plavin na predmetnem odseku. Slika 9.30 prikazuje prečni prerez P1 na začetku simulacije premeščanja plavin. V nadaljevanju so v izbranih časovnih korakih simulacije (tj. pri različnih pretočnih razmerah) prikazane in analizirane lokalne hidravlične razmere (gladinska stanja in globine vodnega toka, porazdelitev pretočnih hitrosti in porazdelitev strižnih napetosti v prečnem prerezu P1) in spreminjanje geometrije izbranega prečnega prereza zaradi procesov premeščanja plavin.



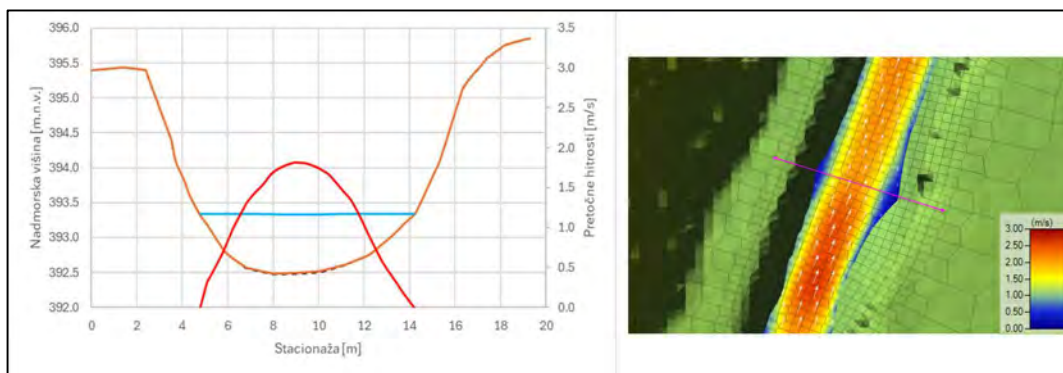
Slika 9.30: Geometrija prečnega profila P1 – stanje na začetku simulacije premeščanja sedimentov.

V prvem izbranem časovnem koraku simulacije (pri pretoku  $Q = 10 \text{ m}^3/\text{s}$ ) znaša globina vodnega toka  $H = 0,85 \text{ m}$ . Zaradi relativno simetričnega pretočnega prereza, so tokovnice vodnega toka, ki ponazarjajo potovanje vodnih delcev, na predmetnem odseku vodotoka v večji meri poravnane z osjo struge vodotoka (Slika 9.31).



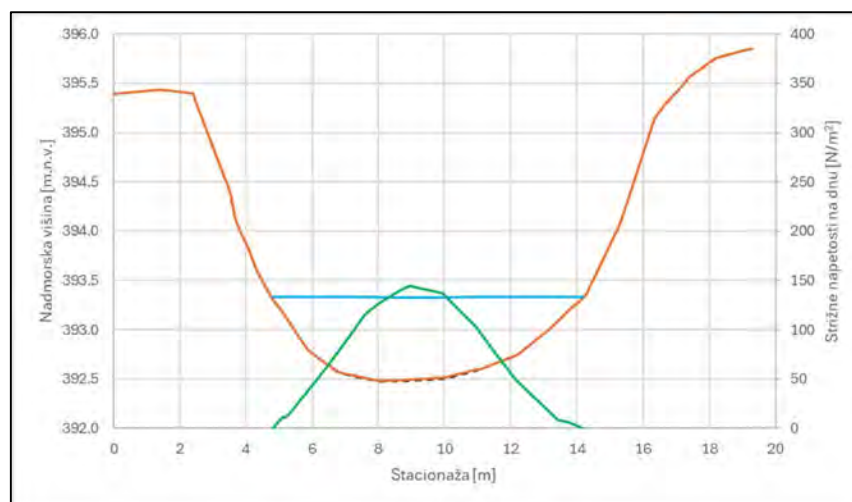
Slika 9.31: Prikaz gladin oziroma globin v prečnem profilu P1 ter tokovnic na predmetnem odseku vodotoka pri pretoku  $Q = 10 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Porazdelitev pretočnih hitrosti v prečnem profilu oz. prerezu vodotoka je odvisna predvsem od geometrijskih lastnosti prereza, vzdolžnega poteka struge, tj. pojava krivin oziroma ravnih odsekov struge, hrapavosti ostenja in morebitnih ovir v vodotoku (Mikoš, 2007). Iz slike 9.32 je razvidno, da se najvišje hitrosti vodnega toka v prečnem profilu P1 pojavijo na območju matice vodnega toka, kjer je globina vode največja, vpliv hrapavosti ostenja pa najmanjši. Pri pretoku  $Q = 10 \text{ m}^3/\text{s}$  tako znašajo maksimalne pretočne hitrosti na območju matice vodnega toka približno  $1,8 \text{ m/s}$ . Skladno z oddaljevanjem od matice vodnega toka oziroma z zmanjševanjem globine vodnega toka, se povečuje vpliv upora toku vode zaradi hrapavosti ostenja, kar posledično vpliva na manjše pretočne hitrosti ob brežinah struge.



**Slika 9.32:** Prikaz porazdelitev pretočnih hitrosti v prečnem profilu P1 pri pretoku  $Q = 10 \text{ m}^3/\text{s}$ .

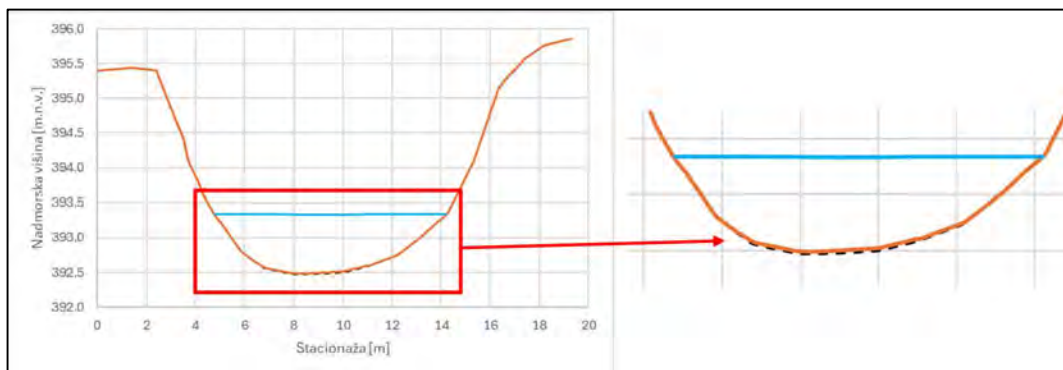
Iz slike 9.33 je razvidno, da je razporeditev strižnih napetosti ob dnu struge podobna porazdelitvi pretočnih hitrosti. Največje strižne napetosti se tako pojavljajo na območju matice vodnega toka, kjer dosežejo vrednosti do  $145 \text{ N/m}^2$ . Če pogledamo ocenjene kritične vrednosti strižnih napetosti (npr. v preglednicah 8.4 in 8.5), lahko ugotovimo, da so na ožjem območju sredine dna struge (tj. ob osi struge) ob pretoku  $Q = 10 \text{ m}^3/\text{s}$  že presežene mejne kritične strižne napetosti za skoraj vse velikostne rede zrn, ki smo jih uporabili v simulaciji premeščanja plavin. Presežena ni zgolj kritična strižna napetost za največji velikostni razred zrn, to so večji prodniki s srednjim premerom zrn  $181 \text{ mm}$ , za katere znaša vrednost kritične strižne napetosti izračunane po Shieldsu pribl.  $160 \text{ N/m}^2$ .



**Slika 9.33:** Prikaz porazdelitev strižnih napetosti na dnu struge v prečnem profilu P1 pri pretoku  $Q = 10 \text{ m}^3/\text{s}$ .

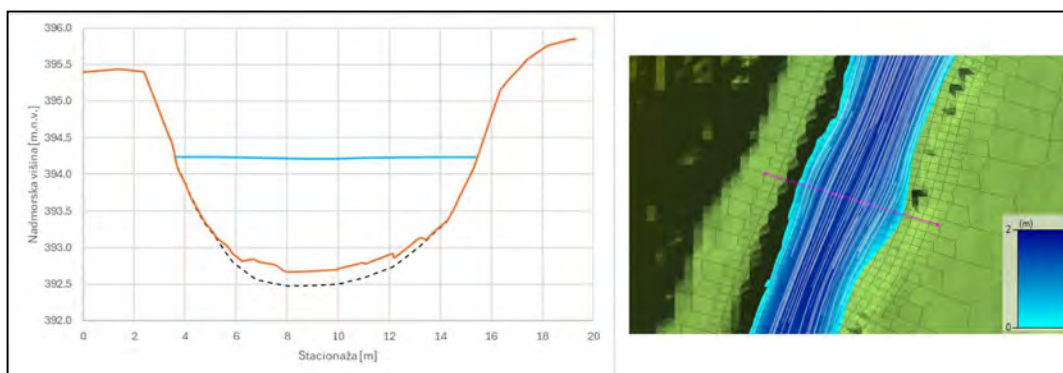
V prvem izbranem časovnem koraku simulacije pri pretoku  $Q = 10 \text{ m}^3/\text{s}$ , ki se v prečnem profilu P1 pojavi po 1 uri in 20 minutah izvajanja simulacije, so se na dnu struge odložile zgolj manjše oziroma zanemarljive količine plavin, ki praktično ne vplivajo na spremembo geometrijskih karakteristik predmetnega prečnega prereza (Slika 9.34). Kljub preseženim mejnim vrednostim kritičnih strižnih napetosti za večino zrn, ki smo jih uporabili v simulaciji premeščanja sedimentov, v predmetnem profilu (gledano kumulativno do izbranega časovnega koraka) ni prihajalo do odnašanja materiala, temveč so se na dnu struge odlagale predvsem plavine, ki so bile zaradi strmejšega padca nivelete dna vodotoka

in posledično višjih pretočnih hitrosti in strižnih obremenitev erodirane nekoliko gorvodno od prečnega prereza P1, tj. na krajšem odseku nekoliko gorvodno od cestnega mostu.



**Slika 9.34:** Geometrija prečnega profila P1 zaradi procesov odlaganja plavin – stanje po 1 uri in 20 minutah simulacije.

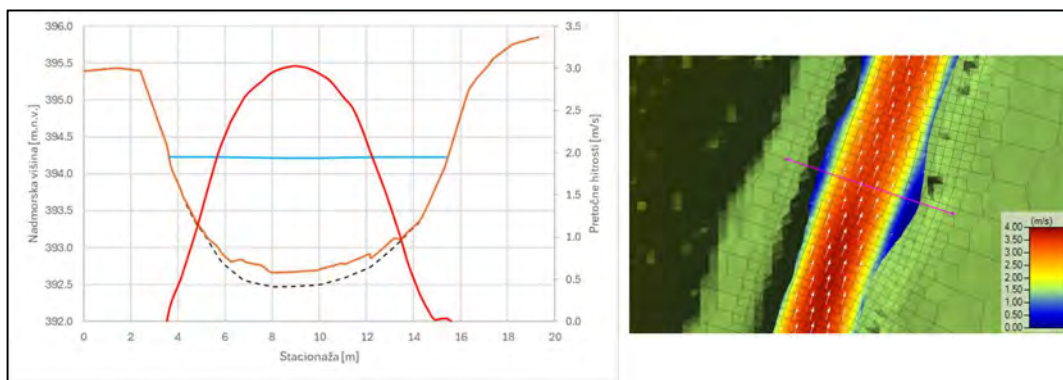
V drugem izbranem časovnem koraku simulacije pri pretoku  $Q = 35 \text{ m}^3/\text{s}$  se je skladno s povečanjem pretoka skozi prečni prerez povečala tudi globina vodnega toka, ki je znašala približno 1,5 m. Zaradi nekoliko intenzivnejšega odlaganja plavin v prečnem profilu P1 se mu je nekoliko spremenila geometrija, kar se odraža tudi na izračunanih vrednostih višinskih kot gladin, ki so bile prilagojene spremembam geometrijskih karakteristik prečnega profila (slika 9.35). Velja opozoriti, da je dotok plavin v model pogojen s premestitveno zmogljivostjo najbolj gorvodnega pretočnega prereza (gorvodni sedimentni robni pogoj), ki je bil določen kot »ravnovesni dotok plavin« (angl. *equilibrium load*).



**Slika 9.35:** Prikaz gladin oziroma globlin v prečnem profilu P1 (levo) ter tokovnic (desno) na območju profila P1 pri pretoku  $Q = 35 \text{ m}^3/\text{s}$ .

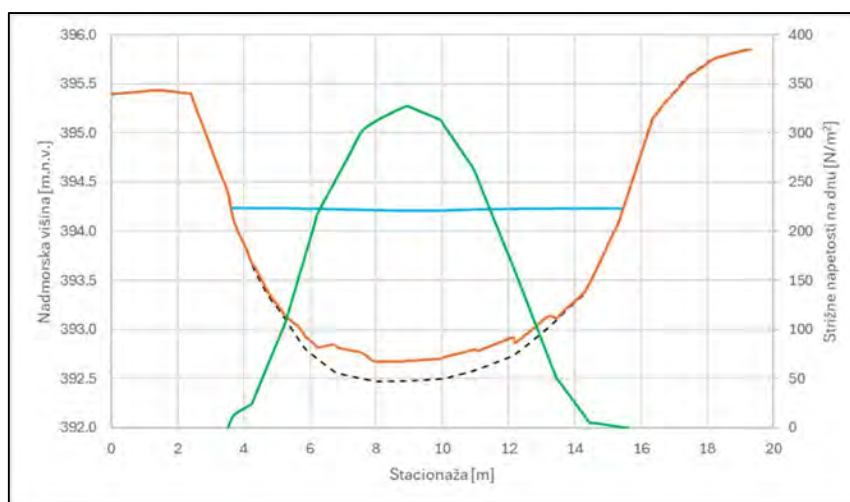
Podobno kot pri prvem izbranem časovnem koraku se tudi pri pretoku  $Q = 35 \text{ m}^3/\text{s}$  najvišje pretočne hitrosti pojavljajo na območju matice vodnega toka, kjer dosežejo maksimalne vrednosti približno 3,0 m/s. S slike 9.36 lahko razberemo, da geometrijske spremembe prečnega profila, ki so posledica odlaganja plavin, ne vplivajo bistveno na razporeditev pretočnih hitrosti po prerezu. Vpliv sprememb v geometriji prečnega prereza na porazdelitev pretočnih hitrosti (in strižnih napetosti) je bolj razviden pri lokalni analizi hidravličnih razmer v prečnem profilu P2, v katerem so bili poleg procesov odlaganja plavin prisotni tudi intenzivni procesi odplavljanja plavin (bočna in globinska erozija).



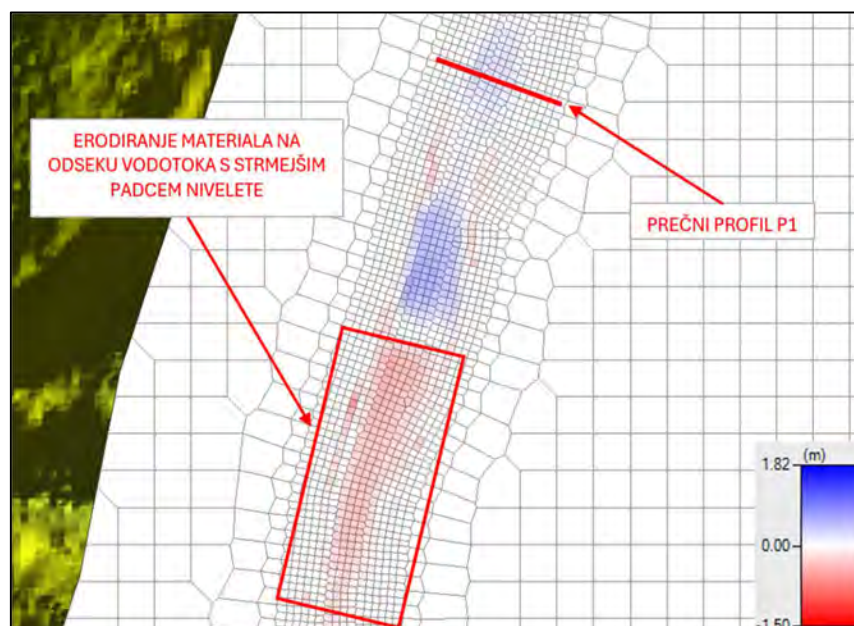


Slika 9.36: Prikaz porazdelitev pretočnih hitrosti v prečnem profilu P1 pri pretoku  $Q = 35 \text{ m}^3/\text{s}$ .

S slike 9.37 je razvidno, da se na območju matice vodnega toka pojavljajo maksimalne strižne napetosti z vrednostmi do približno  $330 \text{ N/m}^2$ , s čimer so krepko presežene kritične strižne napetosti vseh frakcij zrn, ki smo jih uporabili v simulaciji premeščanja sedimentov. V prečnem profilu P1 so se odlagale predvsem plavine, ki so bile erodirane na odseku od cestnega mostu gorvodno, kar nakazujejo rezultati simulacije spremembe topografije struge na sliki 9.38.

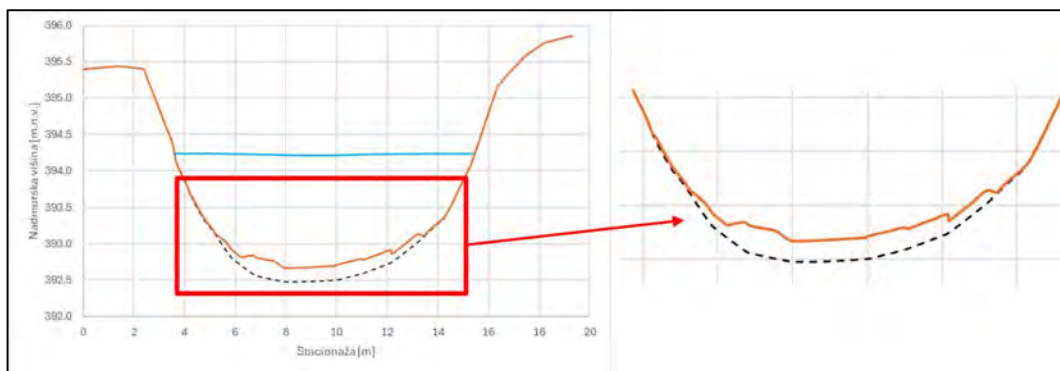


Slika 9.37: Prikaz porazdelitev strižnih napetosti na dnu struge v prečnem profilu P1 pri pretoku  $Q = 35 \text{ m}^3/\text{s}$ .



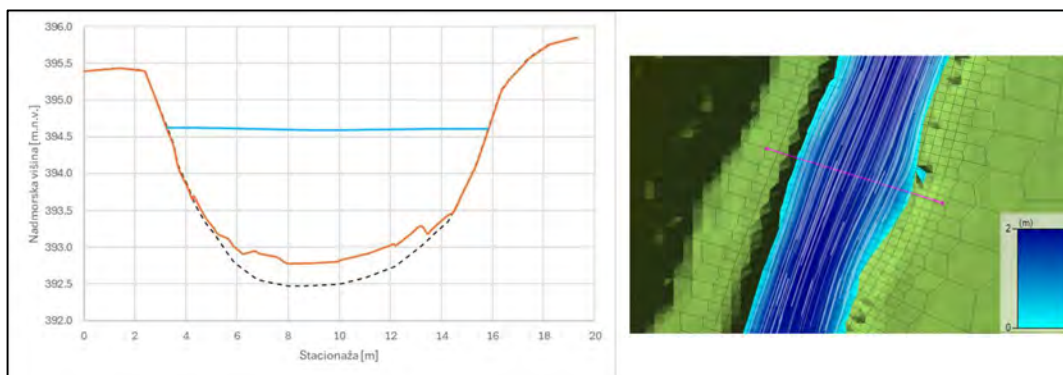
Slika 9.38: Intenzivnejše erodiranje plavin na odseku gorvodno od cestnega mostu.

V drugem izbranem časovnem koraku simulacije, tj. pri pretoku  $Q = 35 \text{ m}^3/\text{s}$ , ki se v prečnem profilu P1 pojavi po 1 uri in 50 minutah izvajanja simulacije, se je kljub krepko preseženim mejnim vrednostim kritičnih strižnih napetosti za vse zrnastostne razrede na dno struge tako odložila približno 0,2 m debela plast materiala (slika 9.39).



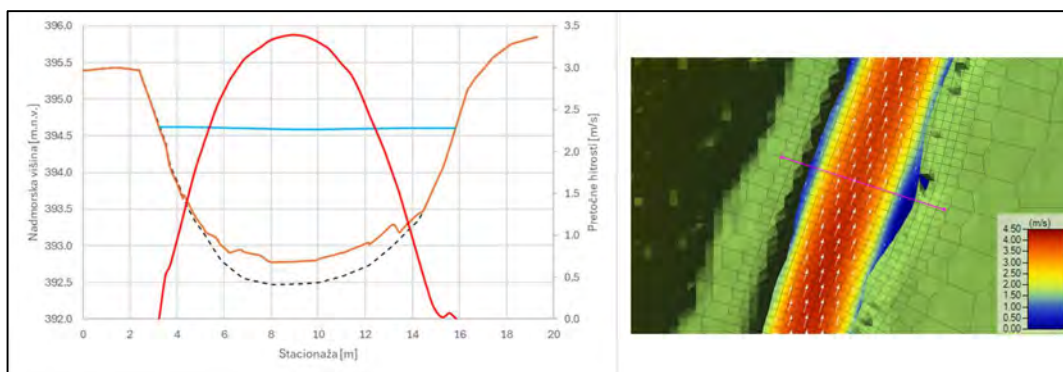
Slika 9.39: Sprememba geometrije prečnega profila P1 zaradi procesov odlaganja plavin – stanje po 1 uri in 50 minutah izvajanja simulacije.

Glede na dejstvo, da se najintenzivnejše spremembe v dinamiki vodnega toka, kakor tudi najintenzivnejši procesi premeščanja plavin, pričakujejo v času visokovodnih konic, smo podrobneje analizirali hidravlične razmere v prečnem prerezu P1 pri konici hidrograma odtoka  $51 \text{ m}^3/\text{s}$ , ki se v predmetnem profilu pojavi po 2 urah in 10 minutah izvajanja simulacije. Globina vodnega toka pri maksimalnem pretoku v prečnem profilu P1 znaša približno 1,80 m. Iz spodnje slike (slika 9.40) lahko razberemo, da prečni profil P1 kljub nekoliko zmanjšani pretočni sposobnosti, ki je posledica odlaganja plavin, prevaja maksimalni visokovodni pretok.



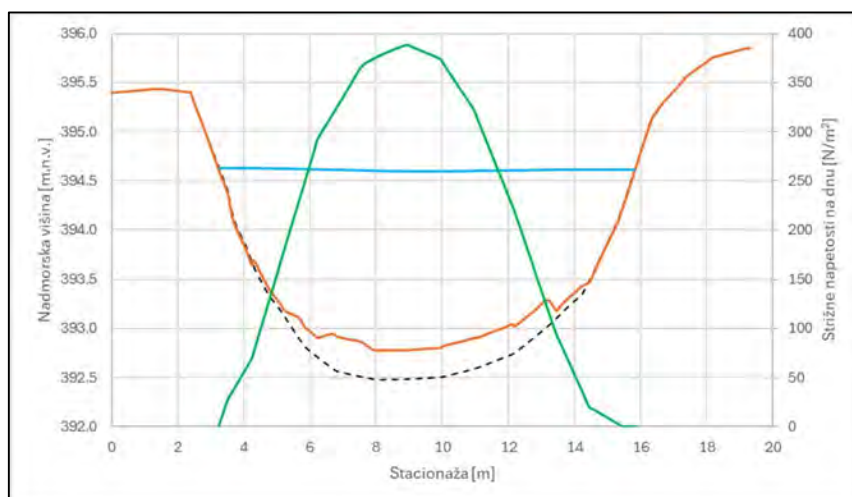
**Slika 9.40:** Prikaz gladin oziroma globin v prečnem profilu P1 (levo) ter tokovnic na predmetnem odseku vodotoka pri maksimalnem pretoku  $Q = 51 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Skladno s pojavom maksimalnih pretokov se v izbranem časovnem koraku simulacije pojavijo tudi maksimalne hitrosti vodnega toka, ki na območju matice vodnega toka znašajo do 3,4 m/s (slika 9.41).



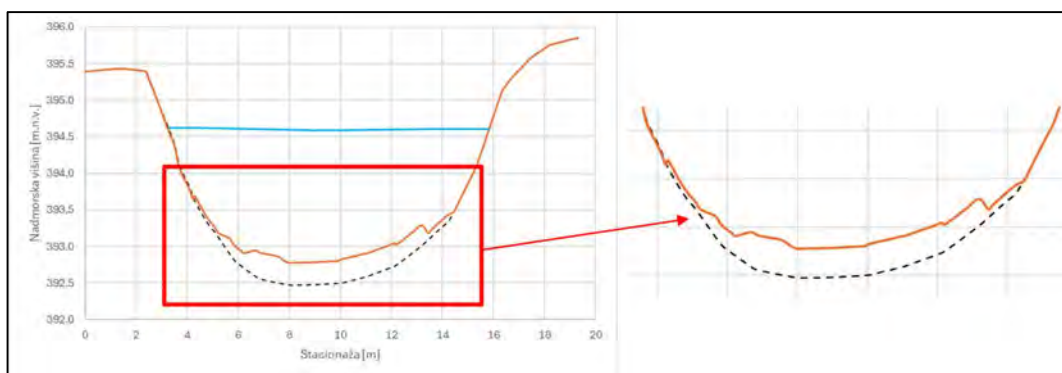
**Slika 9.41:** Prikaz porazdelitev pretočnih hitrosti v prečnem profilu P1 pri maksimalnem pretoku  $Q = 51 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Ob pojavu maksimalnih pretokov in pretočnih hitrosti se v prečnem prerezu P1 pojavijo tudi maksimalne strižne obremenitve oziroma napetosti na dnu struge. Glede na rezultate simulacije znašajo maksimalne strižne napetosti na dnu struge približno  $390 \text{ N/m}^2$  (slika 9.42).



**Slika 9.42:** Prikaz porazdelitev strižnih napetosti na dnu struge v prečnem profilu P1 pri maksimalnem pretoku  $Q = 51 \text{ m}^3/\text{s}$ .

V 20 minutah simulacije, ki so minile med izbranimi časovnim korakoma 2 in 3, tj. pri naraščanju pretoka od  $35 \text{ m}^3/\text{s}$  do  $51 \text{ m}^3/\text{s}$ , se je v prečnem profilu P1 dodatno odložila približno 0,1 m debela plast plavin. Tako se je od začetka simulacije do pojava maksimalnega pretoka, tj. v 2 urah in 10 minutah izvajanja simulacije, v predmetnem prečnem profilu P1 skupno odložila približno 0,3 m debela plast plavin (slika 9.43).



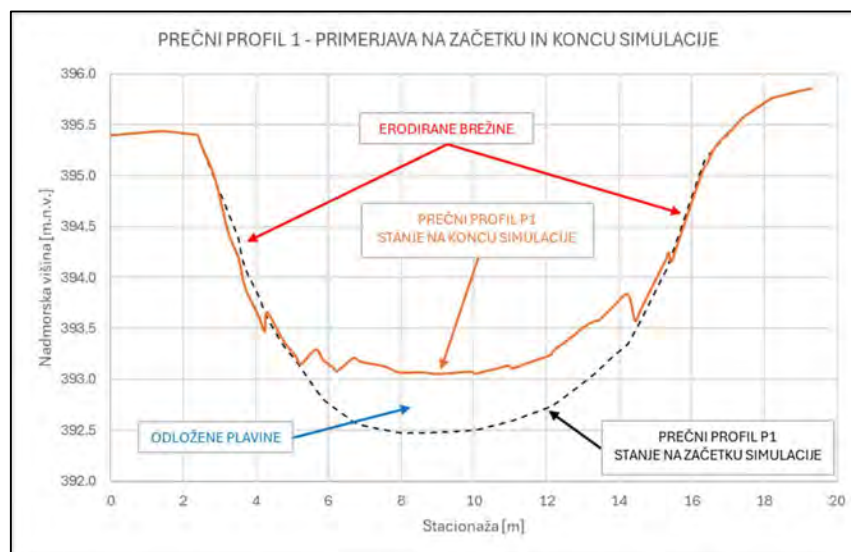
**Slika 9.43:** Sprememba geometrije prečnega profila P1 zaradi procesov odlaganja plavin – stanje po 2 urah in 10 minutah izvajanja simulacije.

V nadaljnjih izbranih časovnih korakih simulacije so se skladno z upadanjem pretoka zmanjševale tudi pretočne hitrosti in strižne napetosti na območju struge. Njihova porazdelitev po prečnem profilu P1 je sledila analogiji, opisani v predhodnih izbranih časovnih korakih. V nadaljevanju se osredotočamo zgolj na primerjavo prečnega prereza profila P1 na začetku in koncu simulacije premeščanja sedimentov.

Skladno z upadanjem oziroma zmanjševanjem pretoka skozi prečni presek P1 se je tekom simulacije premeščanja sedimentov zmanjševala tudi premestitvena zmogljivost vodnega toka ob še vedno relativno velikem dotoku plavin iz gorvodnih odsekov zaradi uporabe sedimentnega robnega pogoja »*Equilibrium Load*«, kar je vodilo v dokaj intenzivno odlaganje plavin v tem prečnem profilu. Ob koncu



simulacije (pri pretoku  $12,5 \text{ m}^3/\text{s}$ ), ki je trajala 6 ur, se je na dnu struge v prečnem profilu P1 celokupno odložila približno 0,6 m debela plast plavin. Iz spodnje slike (slika 9.44) lahko opazimo, da so se tako na levi kakor tudi desni brežini v času upadanja pretoka vršili blagi erozijski procesi (lahko bi jih označili kot procese bočne erozije, ki so malenkostno vplivali na razširitev pretočnega prereza struge).



**Slika 9.44:** Primerjava geometrije prečnega profila P1 na začetku in koncu simulacije premeščanja plavin.

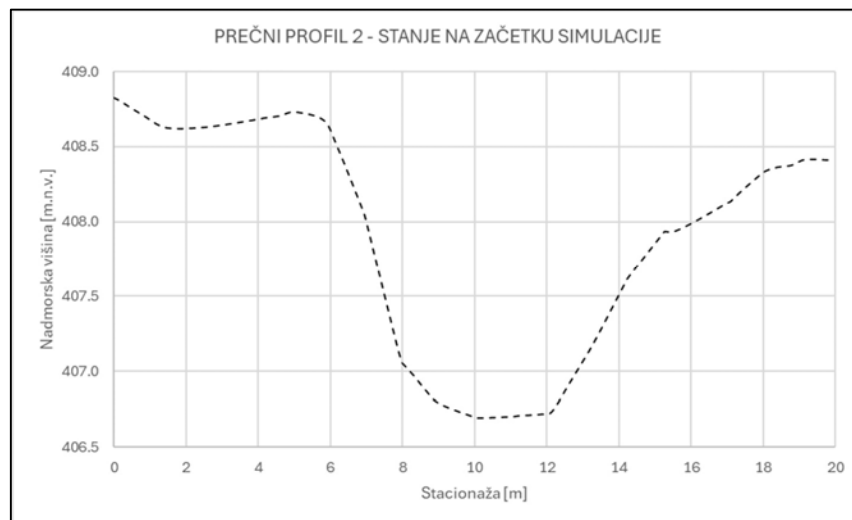
Glede na dogajanje med poplavno ujmo avgusta 2023 (slika 9.45), kjer so se v spodnjem toku obravnavanega odseka Hrastnice poleg bočnih erozijskih procesov vršili tudi intenzivni procesi odlaganja plavin, smo se z dobljenimi rezultati modela premeščanja plavin na lokaciji prečnega prereza P1 zadovoljivo približali razmeram, ki so se pojavljale v času poplavnega dogodka. Na predmetnem odseku so se v strugi Hrastnice v času poplavne ujme sicer odložile večje količine naplavin, kot so pokazali rezultati modela, vendar smo pri izvedbi simulacije, zaradi omejitev pri neposredni umestitvi notranjih robnih pogojev oziroma vtočnih hidrogramov Pasjevaške in Osojske grape v računsko mrežo modela, simulirali visokovodni dogodek z zgolj enim vtočnim hidrogramom z maksimalno konico  $Q_{100} = 51,7 \text{ m}^3/\text{s}$ . Glede na podatke hidrološke merilne postaje Zminec na Poljanski Sori, ki je v času avgustovske poplavne ujme zabeležila rekordne vrednosti izmerjenih visokovodnih konic z ocenjeno več kot 100-letno povratno dobo (ARSO Vode, 2023), lahko z veliko gotovostjo trdimo, da so se tudi na porečju Hrastnice v času te poplavne ujme pojavljali pretoki, ki so zelo verjetno preseglji predhodno ocenjene konice s 100-letno povratno dobo, kar je po našem mnenju vodilo v bolj intenzivne procese rečne erozije in premeščanja plavin, kot so jih izkazovali naši rezultati modela premeščanja plavin.



**Slika 9.45:** Bočno erodirane brežine in zasuta struga po poplavni ujmi avgusta 2023 v spodnjem toku obravnavanega odseka Hrastnice, približno 150 m dolvodno od prečnega profila P1 (Foto: T. Dolenc, avgust 2023).

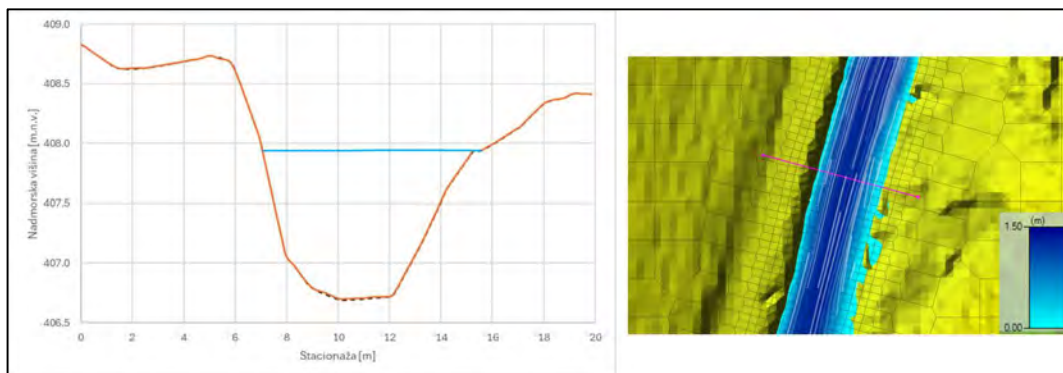
#### **PREČNI PREREZ P2:**

Prečni profil P2 se nahaja v srednjem toku obravnavanega odseka Hrastnice, gorvodno od sotočja s Kamnarjevim grabnom. Pretočni prerez vodotoka Hrastnica je na predmetnem odseku z vidika pričakovanih visokovodnih pretokov izrazito poddimenzioniran. Slika 9.46 prikazuje geometrijo prečnega profila P2 na začetku simulacije premeščanja sedimentov.



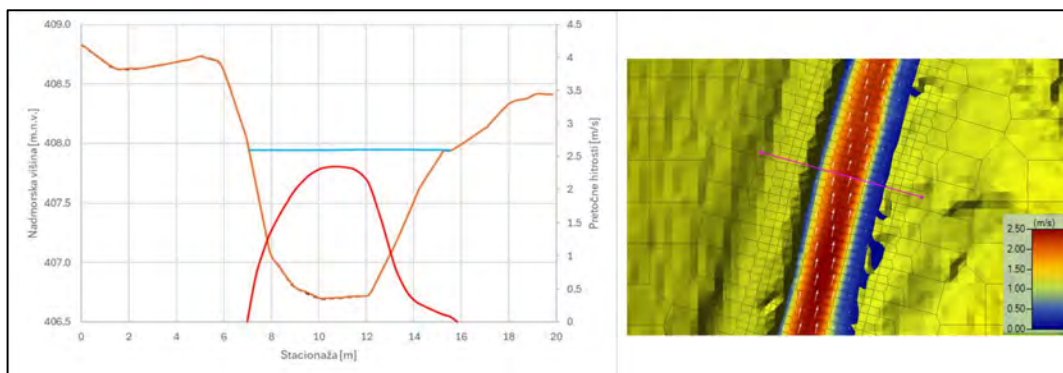
**Slika 9.46:** Geometrija prečnega profila P2 – stanje na začetku simulacije premeščanja sedimentov.

V prvem izbranem časovnem koraku simulacije, tj. pri pretoku  $Q = 13,5 \text{ m}^3/\text{s}$ , znaša globina vodnega toka v prečnem profilu približno 1,3 m. Pretočna sposobnost profila P2 še ni izkoriščena, tokovnice vodnega toka potekajo večinoma vzporedno z osjo struge vodotoka (slika 9.47).



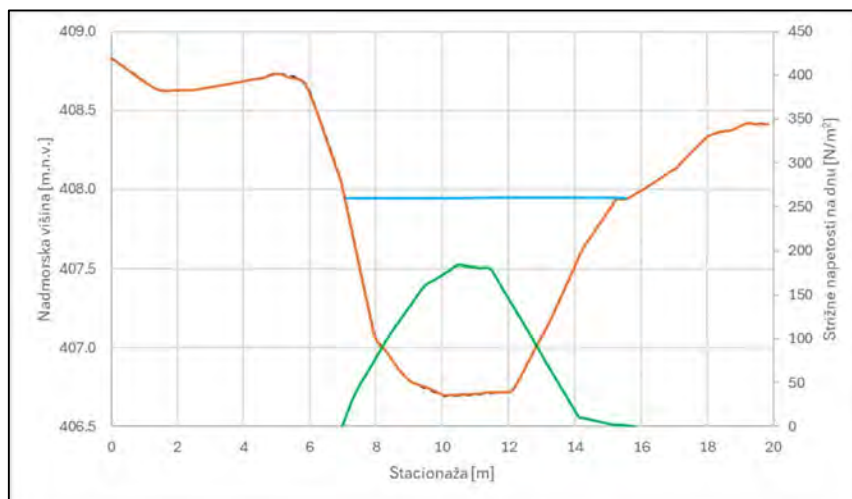
**Slika 9.47:** Prikaz gladin oziroma globlin v prečnem profilu P2 (levo) ter tokovnic (desno) na območju profila P2 pri pretoku  $Q = 13,5 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Največje pretočne hitrosti se pojavljajo na območju matice vodnega toka, kjer dosežejo maksimalne vrednosti do  $2,4 \text{ m/s}$ . Zaradi nekoliko položnejšega naklona desne brežine v primerjavi z izjemno strmo levo brežino in posledično nekoliko manjših globlin vodnega toka (ter večjega vpliva ostenja) je ob desni brežini razvidno območje nekoliko nižjih pretočnih hitrosti (slika 9.48).



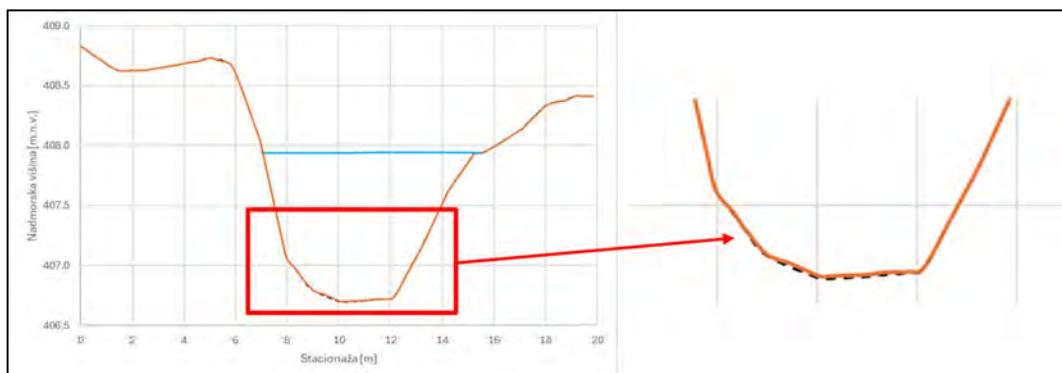
**Slika 9.48:** Prikaz porazdelitev pretočnih hitrosti v prečnem profilu P2 pri pretoku  $Q = 13,5 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Kot smo že ugotovili pri analizi razporeditev strižnih napetosti po prečnem profilu P1, njihova razporeditev sledi porazdelitvi pretočnih hitrosti. Največje strižne napetosti na dnu struge v prečnem profilu P2 se pojavljajo na območju matice vodnega toka, kjer dosežejo vrednosti do  $185 \text{ N/m}^2$  (slika 9.49). Tako so v predmetnem prečnem profilu pri pretoku  $Q = 13,5 \text{ m}^3/\text{s}$  na ožjem območju ob osi struge že presežene mejne kritične strižne napetosti za vse velikostne razrede zrn, ki smo jih uporabili v simulaciji premeščanja sedimentov. Skladno z zmanjševanjem pretočnih hitrosti od osi struge proti obema brežinama se zmanjšujejo tudi strižne napetosti ob dnu struge.



**Slika 9.49:** Prikaz porazdelitev strižnih napetosti na dnu struge v prečnem profilu P2 pri pretoku  $Q = 13,5 \text{ m}^3/\text{s}$ .

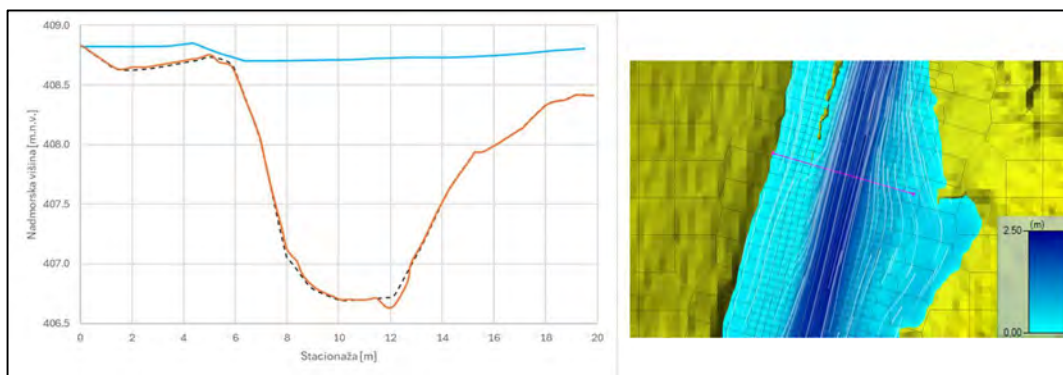
V prvem izbranem časovnem koraku simulacije, tj. pri pretoku  $Q = 13,5 \text{ m}^3/\text{s}$ , ki se v prečnem profilu P2 pojavi po 1 uri in 20 minutah izvajanja simulacije, so se na dnu struge odložile zgolj manjše oziroma zanemarljive količine plavin, ki so se premestile iz gorvodnega območja modela. Spremembe v geometrijskem poteku prečnega profila P2 so bile do prvega izbranega časovnega koraka simulacije komaj zaznavne (slika 9.50).



**Slika 9.50:** Sprememba geometrije prečnega profila P2 zaradi procesov odlaganja plavin – stanje po 1 uri in 20 minutah simulacije.

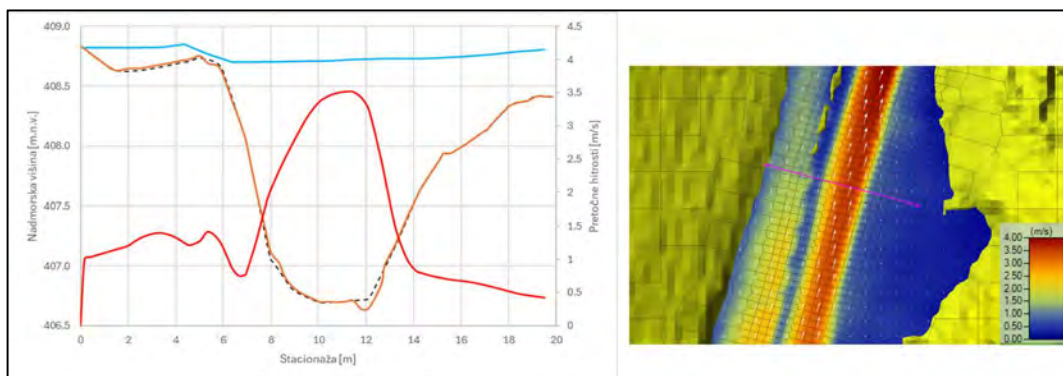
Za drugi časovni korak simulacije smo analizirali razmere ob pretoku  $Q = 37,5 \text{ m}^3/\text{s}$ , ki se v prečnem profilu P2 vzpostavijo po 1 uri in 50 minutah. Pri tem pretoku je hidravlična prevodnost pretočnega profila P2 presežena, ob tem pa je preplavljena tudi bližnja lokalna cesta, ki poteka neposredno ob levi brežini Hrastnice. Nekoliko širše razlivanje voda je razvidno na poplavnih površinah ob desni brežini vodotoka. Globine vodnega toka na območju struge se gibljejo okoli 2,0 m, medtem ko je lokalna cesta preplavljena v višini približno 20 cm. Slika 9.51 prikazuje tokovnice vodnega toka. Zaradi vpliva topografije terena je razvidno dokaj intenzivno vračanje poplavnih voda iz desnih poplavnih površin nazaj v strugo vodotoka. Tokovnice na območju preplavljene ceste pa nakazujejo, da voda pot v večji meri nadaljuje dolvodno po cestišču, del voda pa se vrača tudi nazaj v strugo.





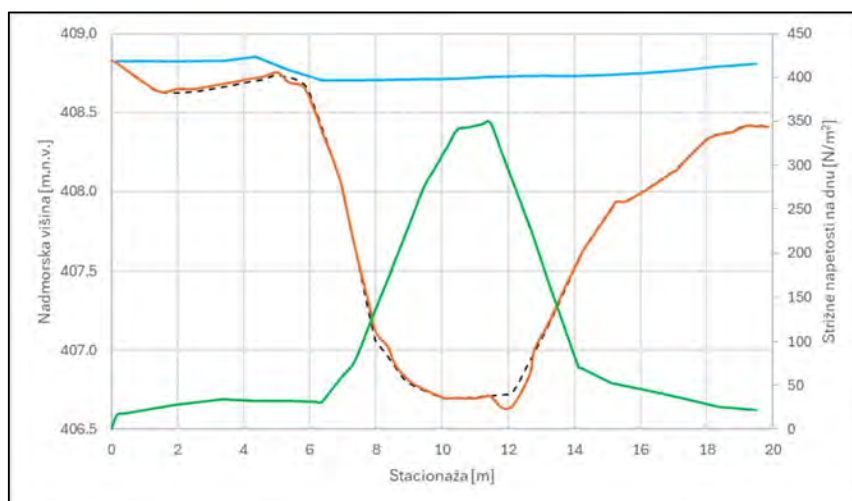
**Slika 9.51:** Prikaz gladin oziroma globin v prečnem profilu P2 ter tokovnic na predmetnem odseku vodotoka pri pretoku  $Q = 37,5 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Najvišje pretočne hitrosti se podobno kot pri prvem analiziranem časovnem koraku izkazujejo na območju matice vodnega toka oziroma na območju največjih globin, kjer dosežejo vrednosti do  $3,5 \text{ m/s}$  (Slika 9.52). Hitrosti vodnega toka na preplavljenem cestišču se gibljejo med  $1,0$  in  $1,5 \text{ m/s}$ , medtem ko se na desnih poplavnih površinah izkazujejo hitrosti pod  $0,5 \text{ m/s}$ . Pri porazdelitvi pretočnih hitrosti po prečnem profilu P2 je opazen rahel vpliv poglobitve struge ob peti desne brežine kot posledica procesov rečne erozije. Na mestu poglobitve znaša globina vodnega toka pribl.  $2,1 \text{ m}$ , območje najvišjih pretočnih hitrosti pa je od osi struge nekoliko zamaknjeno proti desni brežini.



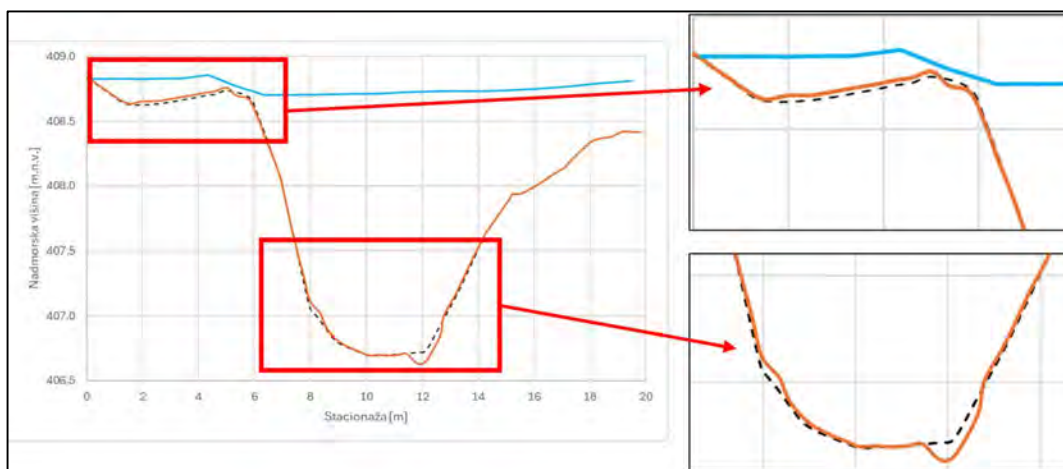
**Slika 9.52:** Prikaz porazdelitev pretočnih hitrosti v prečnem profilu P2 pri pretoku  $Q = 37,5 \text{ m}^3/\text{s}$ .

S slike 9.53, ki prikazuje razporeditev strižnih napetosti ob dnu je razvidno, da se na območju matice vodnega toka pri pretoku  $Q = 37,5 \text{ m}^3/\text{s}$  pojavljajo strižne napetosti z vrednostmi do  $350 \text{ N/m}^2$ . Nad levo brežino, tj. na poplavljenem cestišču, se vrednosti strižnih napetosti gibajo do približno  $35 \text{ N/m}^2$ , s čimer so na območju ceste presežene kritične strižne napetosti večine velikostnih redov zrn, ki smo jih upoštevali v simulaciji premeščanja sedimentov.



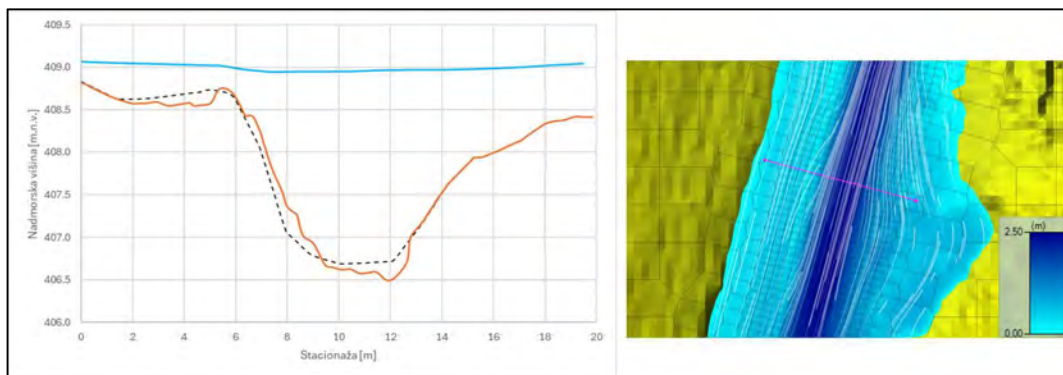
**Slika 9.53:** Prikaz porazdelitev strižnih napetosti na dnu struge in na poplavnih površinah v prečnem profilu P2 pri pretoku  $Q = 37,5 \text{ m}^3$ .

V obdobju 30 minut simulacije med prvim in drugim analiziranim časovnim korakom so se skladno s povečevanjem pretokov stopnjevali tudi procesi rečne erozije. Ob peti desne brežine je odplavilo približno 10 cm materiala, medtem ko je nad levo brežino, tj. na območju lokalne ceste, razvidno rahlo odlaganje materiala, ki so ga poplavne vode zaradi poddimenzioniranega pretočnega profila Hrastnice premeščale iz gorvodnih območij modela po poplavnih površinah (slika 9.54). Na mestu vračanja poplavnih voda v strugo vodotoka na vrhu leve brežine je opazno rahlo odnašanje oziroma erodiranje



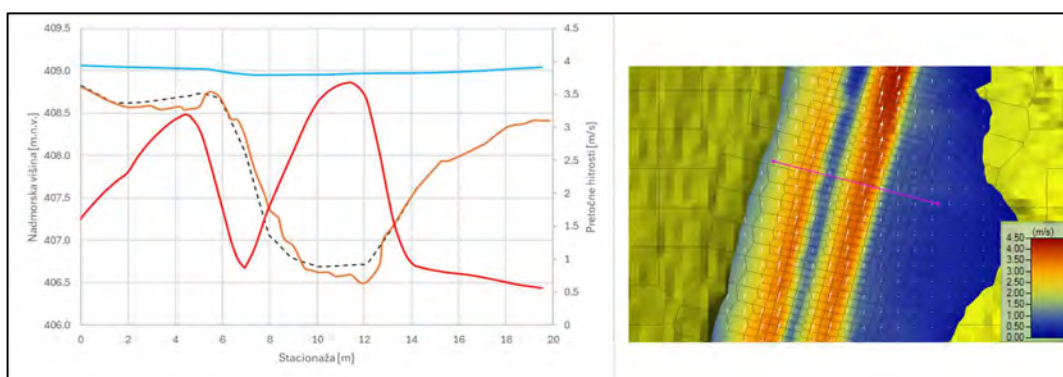
**Slika 9.54:** Sprememba geometrije prečnega profila P2 zaradi procesov rečne erozije – stanje po 1 uri in 50 minutah simulacije.

Tretji obravnavani časovni korak simulacije je v obdobju konice hidrograma odtoka  $51 \text{ m}^3/\text{s}$ , ki se v prečnem profilu P2 pojavi po 2 urah in 10 minutah. Pri maksimalnem pretoku znašajo globine vodnega toka na območju struge 2,5 m. Lokalna cesta, ki poteka vzdolž leve brežine Hrastnice, je preplavljena v višini do 0,5 m. Z vidika tokovnic vodnega toka je na odseku nekoliko dolvodno od prečnega profila P2 razvidno intenzivnejše vračanje poplavnih voda iz desnobrežnih poplavnih površin nazaj v strugo vodotoka (slika 9.55).



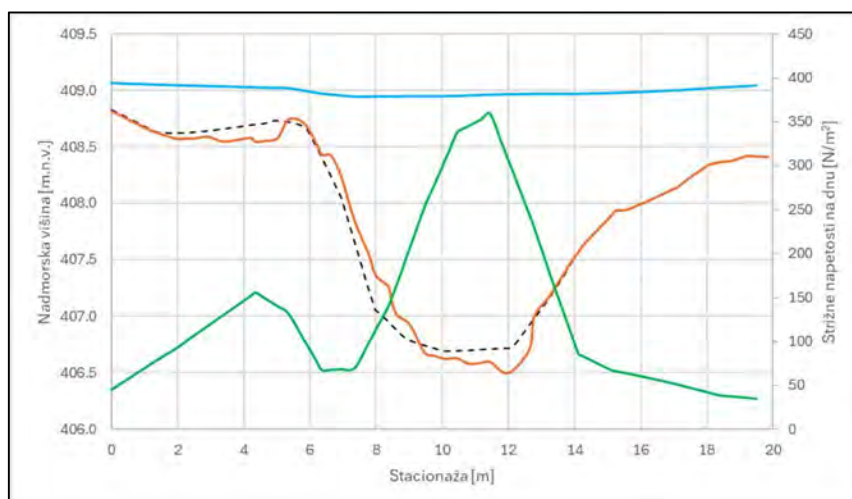
**Slika 9.55:** Prikaz gladin oziroma globin v prečnem profilu P2 ter tokovnic na predmetnem odseku vodotoka pri maksimalnem pretoku  $Q = 51 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Maksimalne pretočne hitrosti na območju matice vodnega toka znašajo do 3,7 m/s. V primerjavi s prejšnjim analiziranim časovnim korakom simulacije, je opazen predvsem velik porast pretočnih hitrosti (in globin vodnega toka) nad levo brežino, tj. na območju lokalne ceste (slika 9.56). V časovnem koraku 2 (pretok  $37,5 \text{ m}^3/\text{s}$ ) so se maksimalne pretočne hitrosti na predmetni lokaciji gibale med 1,0 do 1,5 m/s, medtem ko znašajo maksimalne hitrosti v časovnem koraku 3 (konica pretoka  $51 \text{ m}^3/\text{s}$ ), med 1,6 do 3,2 m/s. Razlog za relativno velik porast v hitrostih je posledica (intenzivnejšega) dotoka poplavnih voda iz gorvodnih delov hidravličnega modela, kjer so se vode zaradi poddimenzioniranega pretočnega profila Hrastnice obširno razlivala izven osnovne struge vodotoka in oblikovale sekundarne tokove, ki so vzdolž ceste potovali dolvodno. Na dokaj visoke pretočne hitrosti na območju cestišča je verjetno pripomogla tudi relativno nizka izbrana vrednost Manningovega koeficienta hrupavosti.



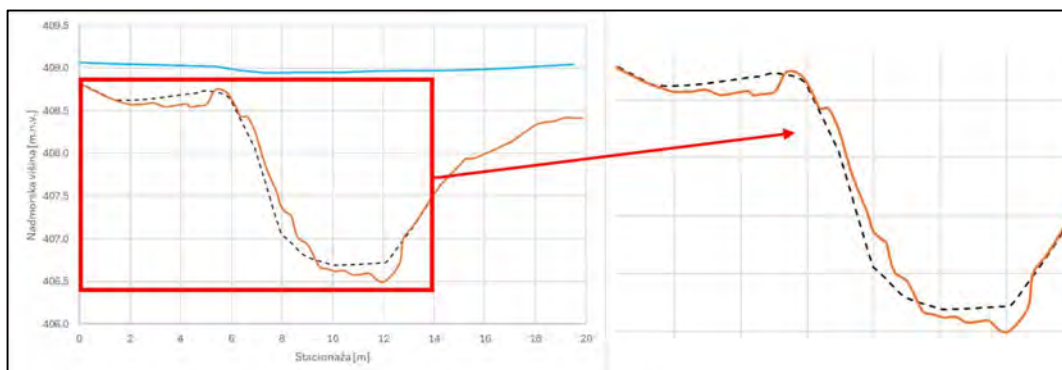
**Slika 9.56:** Prikaz porazdelitev pretočnih hitrosti v prečnem profilu P2 pri maksimalnem pretoku  $Q = 51 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Skladno s pojavom maksimalnih pretokov in povečanjem pretočnih hitrosti so se v prečnem profilu P2 zvišale tudi strižne napetosti ob dnu, kar je vodilo v intenzivnejše procese rečne erozije. Na območju matice vodnega toka so se tako ob dnu struge pojavljale strižne napetosti z vrednostmi do  $360 \text{ N/m}^2$ , medtem ko so vrednosti strižnih napetosti nad levo brežino dosegale vrednosti do  $155 \text{ N/m}^2$  (slika 9.57).



**Slika 9.57:** Prikaz porazdelitev strižnih napetosti na dnu struge in na poplavnih površinah v prečnem profilu P2 pri maksimalnem pretoku  $Q = 51 \text{ m}^3/\text{s}$ .

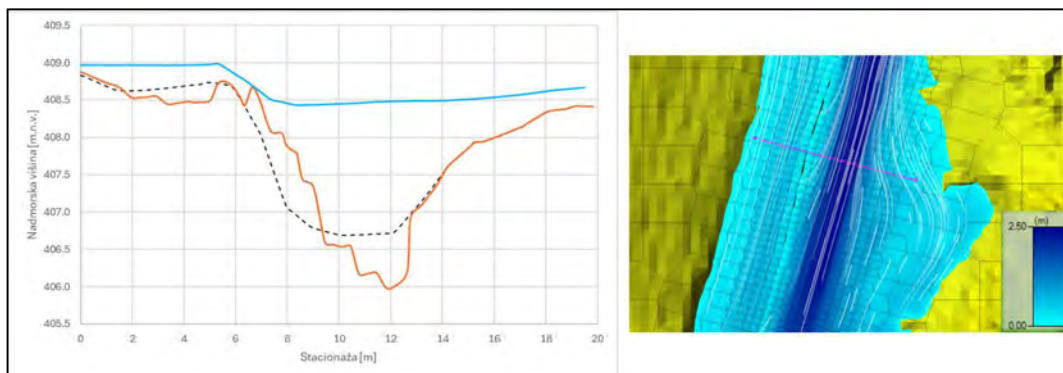
Kot je razvidno iz spodnje slike, so se skladno s povečevanjem strižnih obremenitev intenzivirali predvsem procesi rečne erozije. Če se je do časovnega koraka 2 na območju ceste vršilo predvsem blago odlaganje plavin, se je v času naraščanja intenzitete pretoka od  $37,5 \text{ m}^3/\text{s}$  (časovni korak 2) do maksimalnega pretoka  $51 \text{ m}^3/\text{s}$  (časovni korak 3), tj. v času 20-ih minut, na območju nad levo brežino, zaradi povečanih hitrosti vodnega toka in strižnih obremenitev, erodirala približno 15 cm debela plast materiala. Iz spremenjenega geometrijskega poteka prečnega profila je razvidno, da se je dno struge vodotoka dodatno poglobilo praktično po celotni širini, in sicer v rangu med 5 do 15 cm (slika 9.58). Ob strmi levi brežini je zaradi manjših pretočnih hitrosti in strižnih obremenitev razvidno območje odlaganja plavin.



**Slika 9.58:** Sprememba geometrije prečnega profila P2 zaradi procesov rečne erozije – stanje po 2 urah in 10 minutah simulacije.

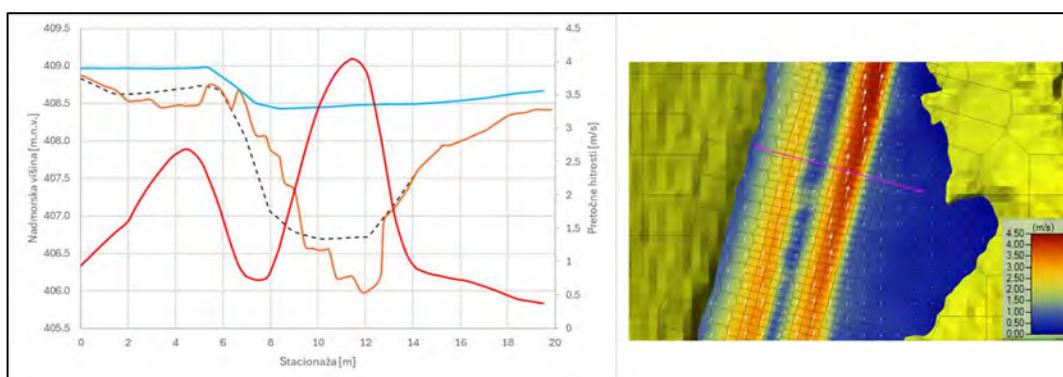
V četrtem izbranem časovnem koraku simulacije smo analizirali hidravlično in erozijsko dogajanje v prečnem profilu P2 pri upadanju pretoka. Med izbranimi časovnim korakoma 3 in 4, med katerima je minila 1 ura in 10 minut, se je pretok v prečnem profilu P2 iz maksimalnega pretoka  $51 \text{ m}^3/\text{s}$  postopoma zmanjševal do  $32,5 \text{ m}^3/\text{s}$ . Ob vračanju poplavnih voda v strugo vodotoka se je med predmetnima časovnim korakoma po celotni višini strme leve brežine odložila debelejša plast plavin, kar je botrovalo k zožitvi pretočnega profila (slika 9.59).





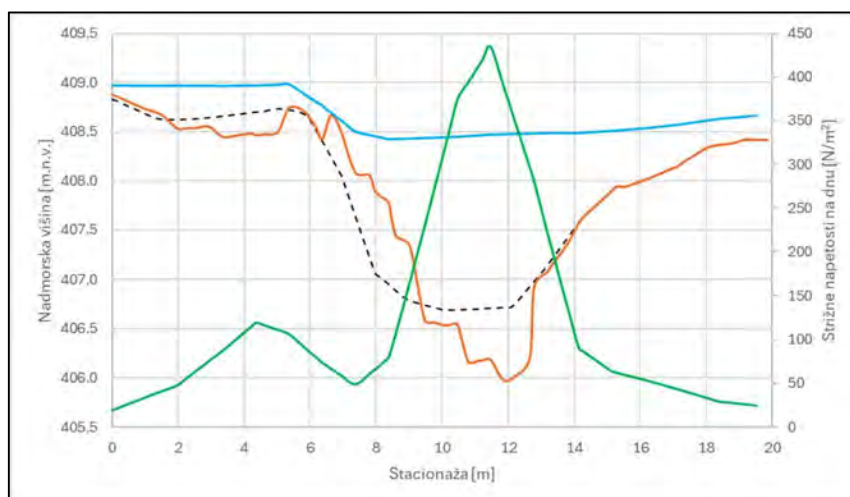
**Slika 9.59:** Prikaz gladin oziroma globlin v prečnem profilu P2 ter tokovnic na predmetnem odseku vodotoka pri pretoku  $Q = 32,5 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Odlaganje plavin na strmi levi brežini je po našem mnenju posledica relativno nizkih pretočnih hitrosti (in strižnih napetosti) pri vračanju poplavnih voda preko brežine nazaj v glavno strugo vodotoka v obliki delno potopljenega prelivanja. Zaradi zožanega in poglobljenega pretočnega profila so pretočne hitrosti na območju matice vodnega toka dosegle vrednosti do 4 m/s (slika 9.60). Za primerjavo omenimo, da so pretočne hitrosti na območju matice vodnega toka pri maksimalnem pretoku  $Q = 51 \text{ m}^3/\text{s}$  (časovni korak 3), dosegale vrednosti do 3,7 m/s.



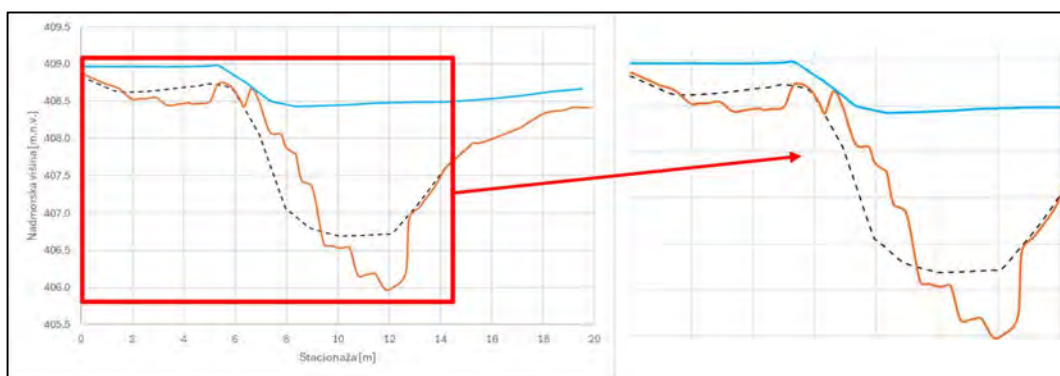
**Slika 9.60:** Prikaz porazdelitev pretočnih hitrosti v prečnem profilu P2 pri pretoku  $Q = 32,5 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Skladno s pojavom najvišjih pretočnih hitrosti so se v izbranem časovnem koraku simulacije pojavile tudi največje strižne napetosti. Na območju matice vodnega toka so se na dnu struge pojavljale strižne napetosti z vrednostmi do  $435 \text{ N/m}^2$  (slika 9.61). Za primerjavo omenimo, da so pri maksimalnem pretoku  $51 \text{ m}^3/\text{s}$  (časovni korak 3) največje strižne napetosti na območju matice vodnega toka dosegale vrednosti do  $360 \text{ N/m}^2$ .



**Slika 9.61:** Prikaz porazdelitev strižnih napetosti na dnu struge in na poplavnih površinah v prečnem profilu P2 pri pretoku  $Q = 32,5 \text{ m}^3/\text{s}$ .

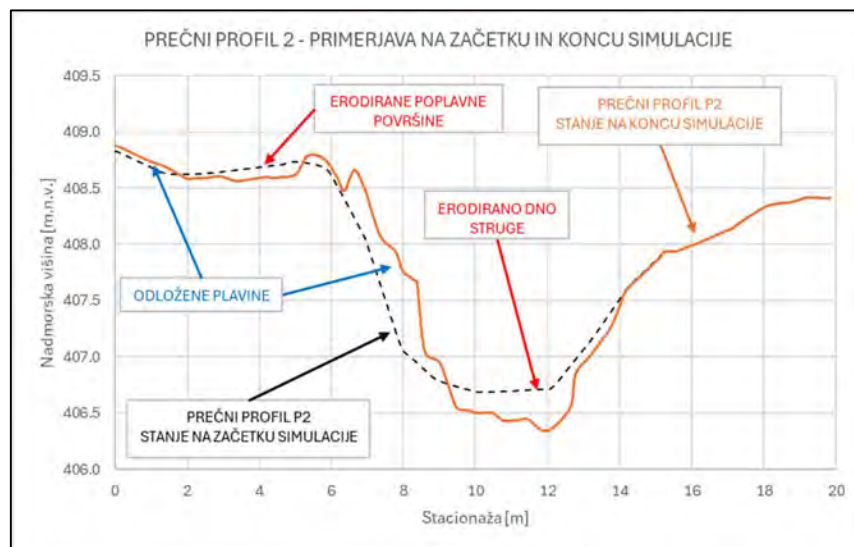
Glede na ugotovljene pretočne hitrosti in strižne napetosti so se na območju dna struge vršili intenzivni procesi rečne (globinske) erozije. Med časovnima korakoma 3 in 4 se je ob peti desne brežine dno struge dodatno poglobilo za približno 0,5 m (slika 9.62). Domnevamo, da so se ob vračanju poplavnih voda v strugo vodotoka kot posledica delno potopljenega prelivanja odložile plasti plavin debeline med 0,25 do 0,75 m. Procesni erozije so se nadaljevali tudi na območju lokalne ceste, tj. nad levo brežino, kjer se je dodatno erodirala slabih 10 cm debela plast materiala.



**Slika 9.62:** Sprememba geometrije prečnega profila P2 zaradi procesov rečne erozije – stanje po 3 urah in 20 minutah izvajanja simulacije.

Tekom nadaljevanja simulacije so se skladno z nekoliko intenzivnejšim upadanjem pretokov postopoma zmanjševale tudi pretočne hitrosti in strižne obremenitve, zaradi česar je upadala tudi premestitvena zmogljivost vodnega toka. Zaradi še vedno relativno velikega dotoka plavin v računsko domeno hidravličnega modela, se je v prečnem profilu P2 do konca izvajanja simulacije v večji meri vršilo odlaganje plavin. Ob koncu simulacije se je dno struge, ki je bilo ob pojavu največjih pretočnih hitrosti in strižnih obremenitev v časovnem koraku 4 erodirano v maksimalni globini približno 0,75 m, zaradi odlaganja plavin nekoliko zvišalo. Ob koncu simulacije je bilo dno rečne struge v primerjavi s stanjem na začetku simulacije po celotni širini poglobljeno za 15 do 40 cm. Interpretacija rezultatov simulacije po posameznih časovnih korakih in primerjava začetnega ter končnega stanja premeščanja

plavin, prikazana na sliki 9.63, nudi vpogled v kompleksno časovno in prostorsko dinamiko procesov rečne erozije, ki jih je treba ustrezno interpretirati glede na poznavanje lokalnih hidravličnih razmer in morebitne razpoložljive podatke iz obdobj poplavnih dogodkov.



**Slika 9.63:** Primerjava geometrije prečnega profila P2 na začetku in koncu simulacije premeščanja sedimentov.

Glede na razpoložljive podatke o stanju po poplavnem dogodku avgusta 2023 na odseku Hrastnice, kjer se nahaja prečni profil P2, smo z dobljenimi rezultati modela premeščanja sedimentov, predvsem z vidika odnašanja materiala in poglobitve rečne struge, zadovoljivo simulirali procese rečne erozije. Rezultati simulacij so sicer vprašljivi z vidika odlaganja plavin na strmi levi brežini vodotoka, ki vsaj na podlagi pregleda fotografij popisa škode na vodni infrastrukturi Hrastnice, ki so bile posnete v tednih po ujmi, in po pogovorih z domačini, ni bilo tako intenzivno. Ne glede na to pa je spodbudno dejstvo, da se tekom simulacije premeščanja sedimentov v prečnem profilu P2 niso pojavljali procesi erodiranja strme leve brežine, ki je na predmetnem odseku zavarovana z zložbo iz kamna v suho (kar seveda v sami simulaciji premeščanja plavin ni upoštevano) in je kljub izjemnim poplavnim razmeram v času visokovodne ujme v pretežni meri ostala funkcionalna in dokaj nepoškodovana (slika 9.64).

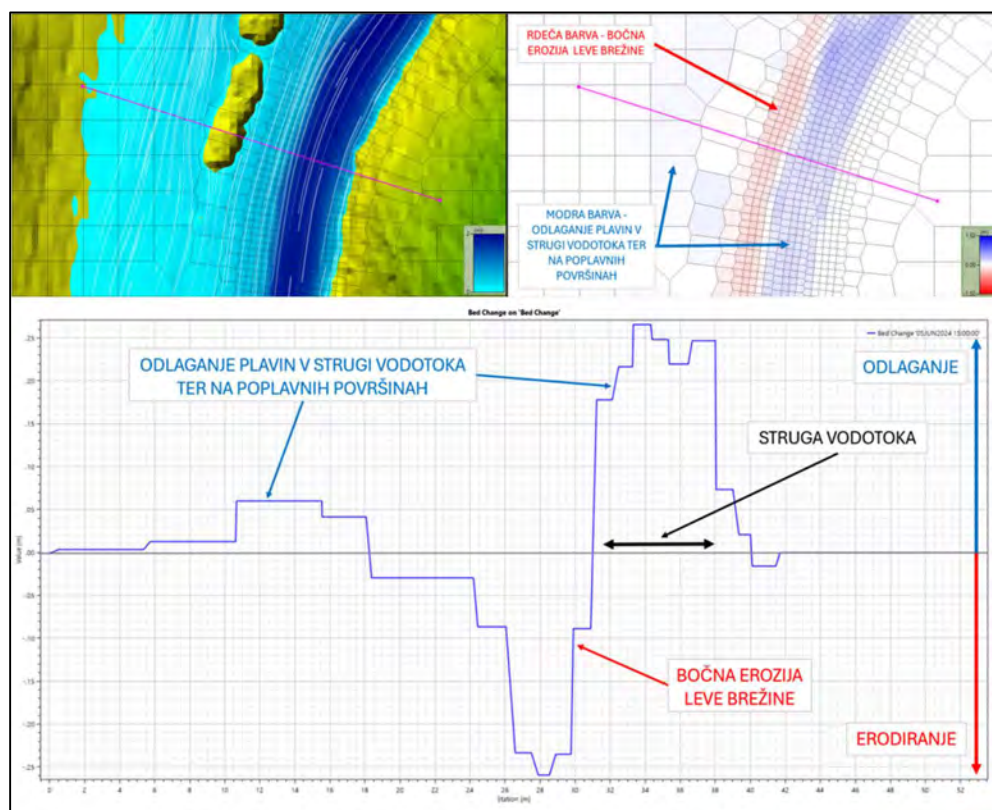


**Slika 9.64:** Stanje po poplavni ujmi na odseku Hrastnice v bližini prečnega profila P2 – pogled gorvodno (Foto: T. Dolenc, avgust 2023).

#### 9.2.2.3.2 Rezultati modeliranja premeščanja plavin na kartah erozijske nevarnosti

Pri interpretaciji rezultatov simulacij premeščanja plavin za potrebe izdelave kart erozijske nevarnosti skladno s Pravilnikom smo se osredotočili na podatkovni sloj »*Bed Change*«, ki prikazuje spremembe v nivojih terena kot posledice kumulativne količine odplavljenega (erodiranega) oz. odloženega materiala. Spremembe so podane v metrih za posamezne celice računske domene modela do izbranega časovnega koraka simulacije. Računske celice, v katerih so se plavine odlagale, so obarvane modro (pozitivne vrednosti), medtem ko so celice, v katerih je bilo prisotno odplavljanje materiala oziroma erodiranje, obarvane rdeče (negativne vrednosti). Računske celice, v katerih tekom simulacije procesi odlaganja oziroma erodiranja niso bili prisotni, tj. ni prišlo do sprememb v topografski podlagi hidravličnega modela, so obarvane belo. Primer enega od možnih prikazov rezultatov podatkovnega sloja »*Bed Change*« je razviden iz slike 9.65, kjer so prikazane kumulativne količine odloženega in erodiranega materiala vzdolž prečnega profila po treh urah izvajanja simulacije premeščanja plavin.

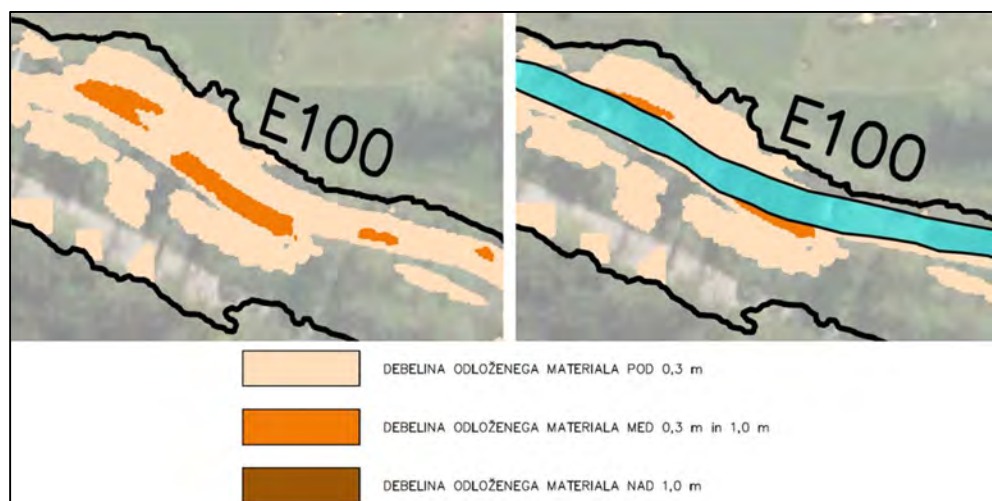




Slika 9.65: Kumulativna količina (podana v metrih) odloženega oziroma erodiranega materiala v izbranem profilu po treh urah izvajanja simulacije premeščanja sedimentov.

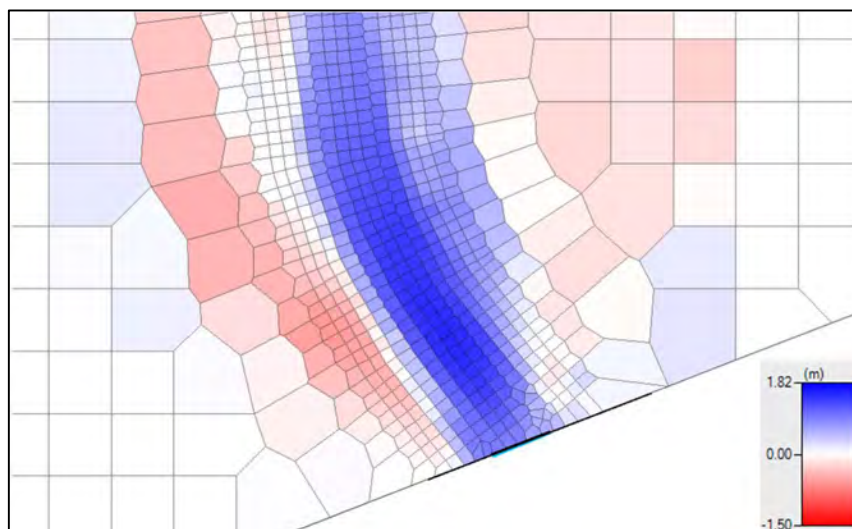
Za stanje pred in po poplavni ujmi smo določili območja dosegov poplavnih voda pri pretoku  $Q_{100}$  oziroma  $E_{100}$  ter območja z mejnimi vrednostmi kumulativnih količin odloženega in odplavljenega materiala na koncu simulacij premeščanja plavin. Ob izvozu rezultatov izračunov smo ugotovili, da so se vzdolž obravnavanega odseka Hrastnice tako procesi odlaganja kakor tudi erodiranja mestoma vršili na območjih izven dosega poplavnih voda  $Q_{100}$  oziroma  $E_{100}$ . Razlog za to se skriva v dejstvu, da so vsi izhodni rezultati modela premeščanja plavin vezani na celotno območje posameznih računskih celic. Za izdelavo kart erozijske nevarnosti skladno s Pravilnikom smo rezultate sprememb topografije terena obrezali skladno z dosegi poplavnih voda pri pretoku  $Q_{100}$ . Iz obdelanih rezultatov kumulativne količine odloženega in odplavljenega materiala ob koncu simulacije premeščanja sedimentov smo izdelali karte erozijske nevarnosti za stanje pred in po poplavni ujmi. Posebej smo prikazali območja, na katerih je tekom simulacije visokovodnega dogodka s 100-letno povratno dobo prihajalo do odplavljanja erodiranega materiala. Ta območja so na karti označena s tremi različnimi odtenki rumene barve, pri čemer vsak odtenek predstavlja kumulativni količinski razpon (podan v metrih) erodiranega oziroma odplavljenega materiala na koncu simulacije premeščanja plavin – tj. območja odplavljenega materiala do 0,5 m, med 0,5 m in 2,0 m ter nad 2,0 m. Na drugi karti pa so vzdolž modeliranega odseka Hrastnice prikazana območja, na katerih so se tekom simulacije vršili procesi odlaganja plavin. Ta območja so označena s tremi različnimi odtenki oranžne barve, pri čemer vsak izmed odtenkov predstavlja kumulativni količinski razpon odloženega materiala na koncu simulacije premeščanja plavin – tj. območja odloženega materiala do 0,3 m, med 0,3 m in 1,0 m ter nad 1,0 m.

Trenutno veljavni Pravilnik se do procesov rečne erozije, tj. do odlaganja in odnašanja materiala, opredeljuje zgolj na območjih poplavnih površin oziroma dosegov poplavnih voda  $Q_{100}$ , v katerih pa v številnih praktičnih primerih izdelave kart poplavne in erozijske nevarnosti ne upošteva območja struge vodotoka (vodno zemljišče). Glede na dejstvo, da se najintenzivnejši procesi rečne erozije pojavljajo na območjih strug vodotokov (vodnih zemljišč) oz. v njihovi neposredni bližini, smo za stanje pred in po poplavnem dogodku avgusta 2023 prikazali tudi območja odplavljenega oziroma odloženega materiala na območju struge vodotoka. Primer izseka iz karte erozijske nevarnosti z oz. brez prikaza območja struge je prikazan na sliki 9.66.



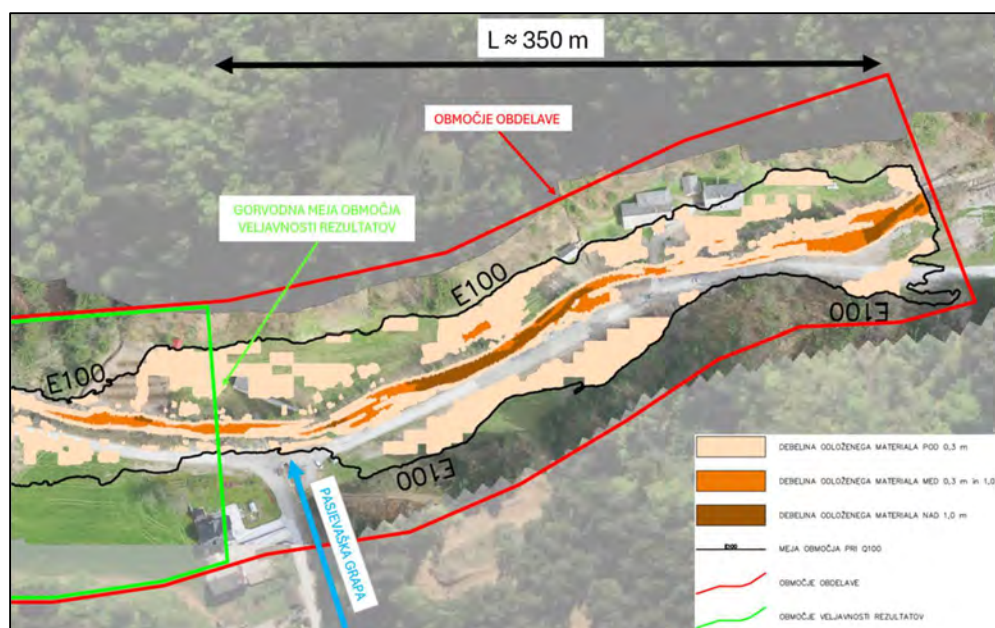
**Slika 9.66:** Odloženi material s prikazom območja struge (levo) in brez prikaza odlaganja materiala na območju struge vodotoka (desno).

Ker smo v sklopu simulacije premeščanja plavin za sedimentni robni pogoj uporabili »*Equilibrium Load*«, ki je tekom simulacije v računsko domeno modela dovajal količine plavin ne glede na njihovo dejansko razpoložljivost, so se na odseku nekoliko dolvodno od zgornjega robnega pogoja hidravličnega modela izkazovali (vsaj glede na razpoložljive podatke o razmerah po poplavnem dogodku avgusta 2023) pretirano intenzivni procesi odlaganja plavin (slika 9.67).



Slika 9.67: Intenzivni procesi rečne erozije na skrajnem gorvodnem delu modela.

Da bi se izognili vplivu sedimentnega gorvodnega robnega pogoja, smo območje veljavnosti rezultatov (OVR) na kartah erozijske nevarnosti nekoliko omejili, kot je prikazano na sliki 9.68.

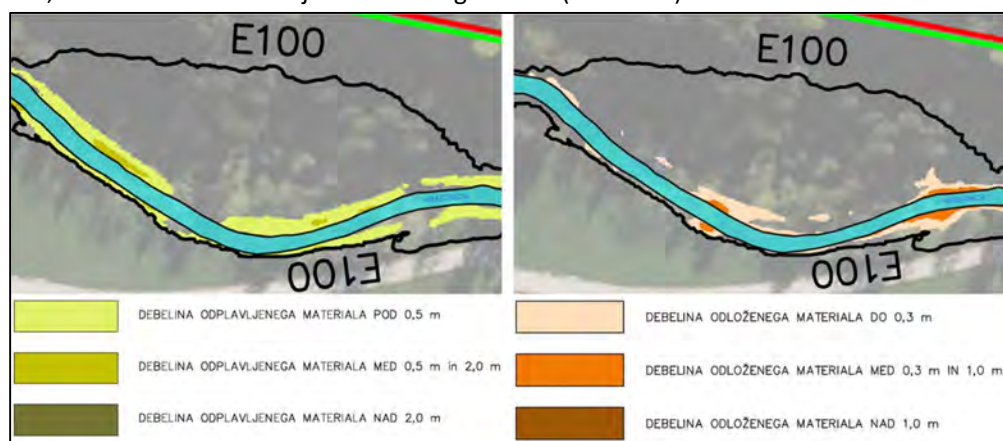


Slika 9.68: Določitev gorvodne meje območja veljavnosti rezultatov.

V nadaljevanju podajamo interpretacijo rezultatov kart erozijske nevarnosti za nekatere pododseke modeliranega odseka Hrastnice z opisom hidravličnih razmer in procesov rečne erozije. Za interpretacijo rezultatov simulacij premeščanja plavin smo uporabili podatkovne sloje globlin in hitrosti vodnega toka, strižnih obremenitev na območju struge vodotoka v posameznih časovnih korakih, animacije smeri gibanja vodnih delcev in razpoložljive podatke o erozijskem dogajanju v času poplavnega dogodka avgusta 2023.

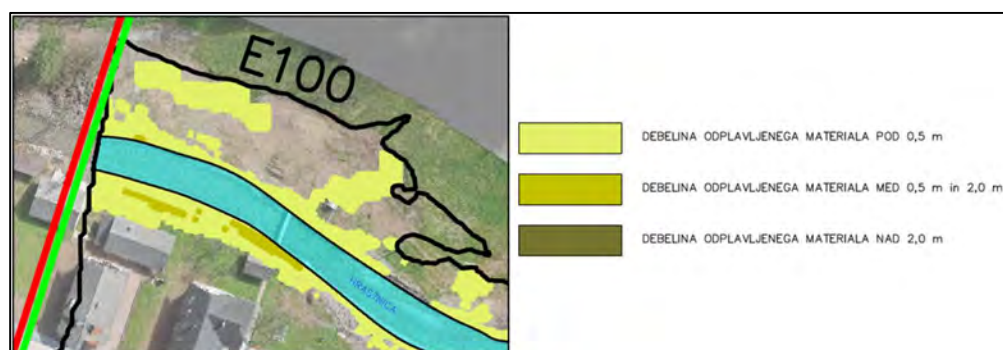


Iz prikazov na kartah erozijske nevarnosti je razvidno, da se spremembe v topografiji terena oziroma območja erodiranega in odloženega materiala pojavljajo na odsekih obsežnejših površinah znotraj območja poplavljanja konice pretoka  $Q_{100}$ . Območja največjih količin odloženega oziroma odplavljenega materiala so pričakovano razvidna vzdolž (širšega) območja vodnega in priobalnega zemljišča vodotoka, na katerem so se tekom simulacije bili procesi rečne erozije najintenzivnejši. Območja, na katerih se plavine niso odlagale oziroma niso bile erodirane, se nahajajo pretežno na obrobni mestih dosegov poplavnih voda  $Q_{100}$  ( $E_{100}$ ), kjer se izkazujejo nizke globine in hitrosti vodnega toka. Eno takih območij (stanje pred poplavno ujmo) se nahaja na desnobrežnih poplavnih površinah Hrastnice, tik dolvodno od sotočja z Blekovim grabnom (slika 9.69).



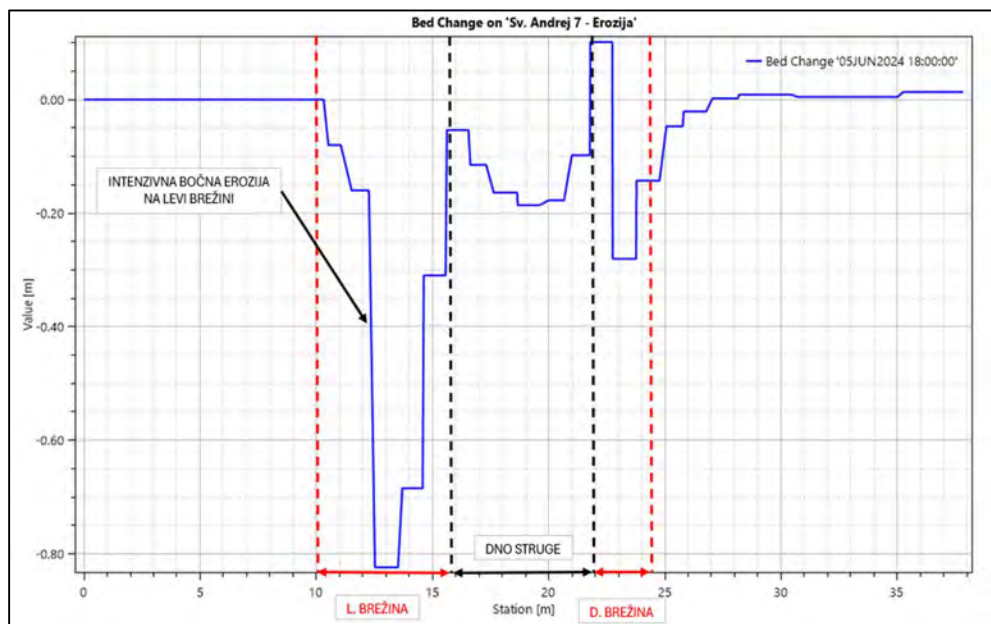
**Slika 9.69:** Desnobrežne poplavne površine Hrastnice na odseku dolvodno od sotočja z Blekovim grabnom, na katerih na podlagi rezultatov simulacij ni bilo intenzivnejših procesov rečne erozije (izsek iz karte erozijske nevarnosti za stanje pred poplavno ujmo).

Območja večjih količin erodiranega oz. odplavljenega materiala se nahajajo vzdolž struge vodotoka, in sicer predvsem na širšem območju brežin, kjer so hitrosti vodnega toka (ter posledično tudi strižne napetosti) visoke. Na območju brežin se v večji meri izkazujejo vrednosti odnesenega materiala do 0,5 m, mestoma pa se na posameznih lokacijah vzdolž modeliranega odseka Hrastnice izkazujejo tudi nekoliko intenzivnejši procesi bočne erozije brežin, kjer znaša količina odplavljenega materiala med 0,5 in 1,0 m (primer, prikazan na sliki 9.70 in v prečnem prerezu na sliki 9.71).



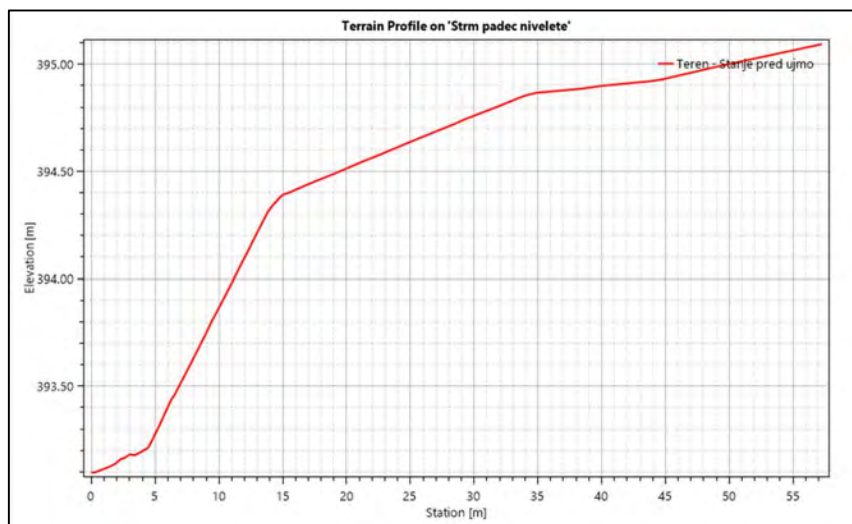
**Slika 9.70:** Bočna erozija brežin na dolvodnem odseku modela v bližini stanovanjskega objekta Sv. Andrej 7 (izsek iz karte erozijske nevarnosti za obstoječe stanje – debelina odplavljenega materiala).





Slika 9.71 : Bočna erozija na levi brežini Hrastnice v bližini stanovanjskega objekta Sv. Andrej 7.

Z vidika poglobljanja rečne struge so bili procesi globinske erozije za stanje pred poplavno ujmo najintenzivnejši na odseku vodotoka nekoliko dolvodno od sotočja z Osojsko grapo do cestnega mostu v bližini stanovanjskega objekta Sv. Barbara 22. Na tem odseku so se v sklopu simulacije izkazovali koncentrirani vodni tokovi z globinami nad 2,0 m, medtem ko so maksimalne pretočne hitrosti dosegale vrednosti do 4,3 m/s, kar je rezultiralo tudi v visokih strižnih napetostih na dnu struge (približno 500 N/m<sup>2</sup>). Visoke pretočne hitrosti so tudi posledica dejstva, da smo pri izdelavi topografske podlage hidravličnega modela za stanje pred poplavno ujmo, tako na območju poplavnih površin kakor tudi v strugi vodotoka, uporabili podatke DMR1 uradnega lidarskega snemanja Slovenije. V sklopu podatkov DMR1 je bila dolvodno od cestnega mostu v rečni strugi Hrastnice zajeta tudi dokaj nenatančna topografija lesene stopnje. Ker smo z namenom bolj zveznega geometrijskega poteka batimetrije rečne struge na območju struge vodotoka izvedli interpolacijo terena, se je vpliv nenatančno zajete topografije terena na širšem območju ob leseni stopnji prenesel tudi gorvodno. Posledično se na omenjenem odseku izkazuje relativno strm padec nivelete dna vodotoka (kot se kaže v vzdolžnem prerezu na sliki 9.72), kar je pripomoglo k višjim pretočnim hitrostim in posledično intenzivnejšim procesom rečne erozije.

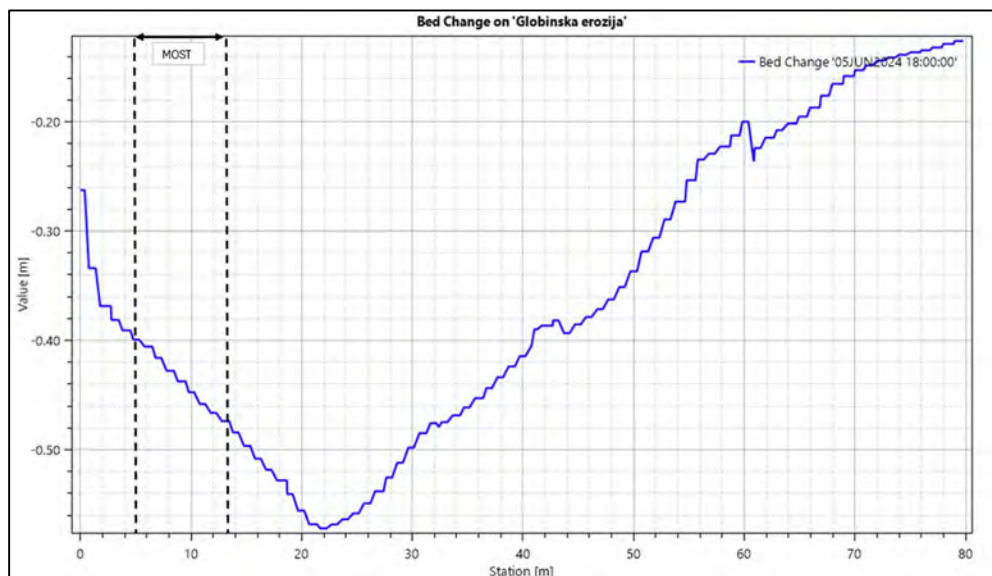


Slika 9.72: Strm padec nivelete dna vodotoka na odseku gorvodno od cestnega mostu v bližini stanovanjskega objekta Sv. Barbara 22.

Glede na opisane topografske dejavnike se je dno struge na tem odseku Hrastnice v večji meri poglabilo za od 0,2 do 0,5 m. V posameznih računskih celicah se mestoma izkazuje vrednosti odnesenega materiala tudi do 0,6 m (slika 9.73 in sprememba poteka dna struge na sliki 9.74).

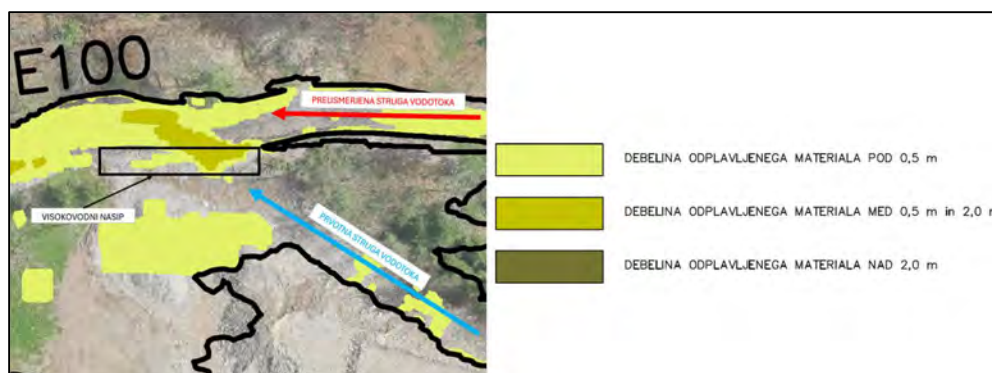


Slika 9.73: Globinska erozija rečne struge v bližini stanovanjskega objekta Sv. Barbara 22 (izsek iz karte erozijske nevarnosti za stanje pred poplavno ujmo – odplavljen material).

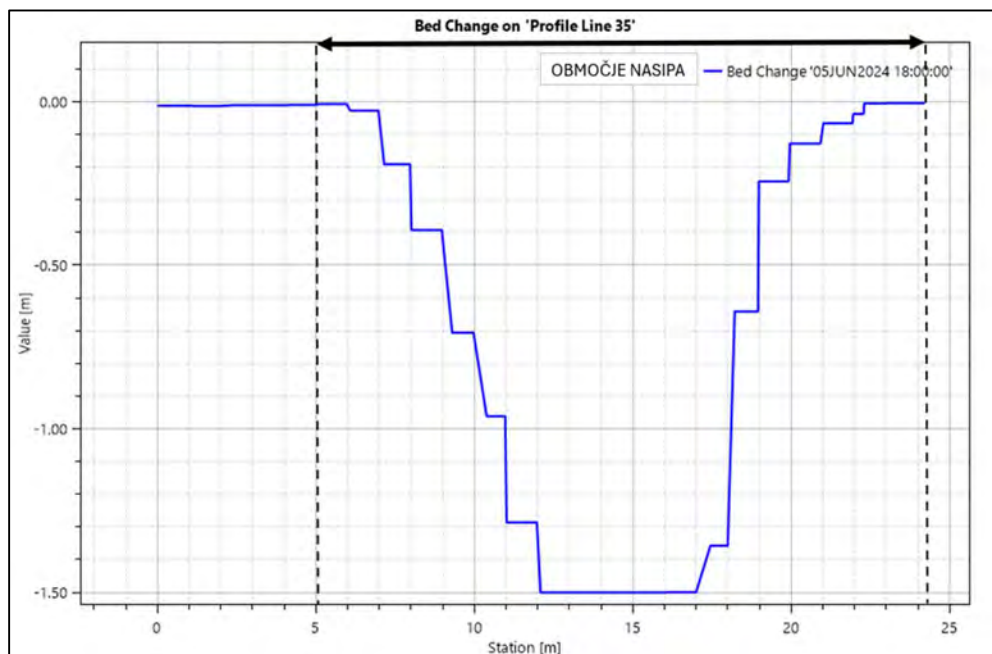


**Slika 9.74:** Globinska erozija vzdolž osi struge vodotoka na odseku gorvodno od cestnega mostu v bližini stanovanjskega objekta Sv. Barbara 22.

V primeru razmer po poplavnem dogodku avgusta 2023 rezultati simulacij premeščanja plavin kažejo na intenzivnejše erodiranje materiala na območju interventno preusmerjene rečne struge vodotoka, in sicer natančneje na lokacijah provizorično izvedenih visokovodnih nasipov (ki so bili zajeti v topografski podlagi modela obstoječega stanja). Z začasnimi nasipi se je tlorisni potek struge Hrastnice zaradi erozivne moči poplavnih voda preventivno preusmeril stran od trase bližnje lokalne ceste, in sicer za približno 40 m vzhodno, ob vznožje pobočja. Ob naraščanju pretokov tekom simulacije so poplavne vode prešle prvi gorvodni nasip in se nato po prvotni strugi vodotoka vračale v preusmerjeno strugo, kjer so dosegle zračno stran drugega visokovodnega nasipa (topografska ovira vodnemu toku). Zaradi dokaj visokih pretočnih globin in hitrosti vodnega toka (do 3,5 m/s), je bil predmetni nasip na mestu vračanja poplavnih voda iz prvotne v preusmerjeno strugo vodotoka mestoma erodiran tudi do 1,5 m, kolikor je tudi znašala maksimalna predpostavljena globina erodiranja v modelu premeščanja plavin. Izsek erozijske karte za območje novo urejene trase struge je prikazan na sliki 9.75, spremembe v nivojih dna struge pa na sliki 9.76.

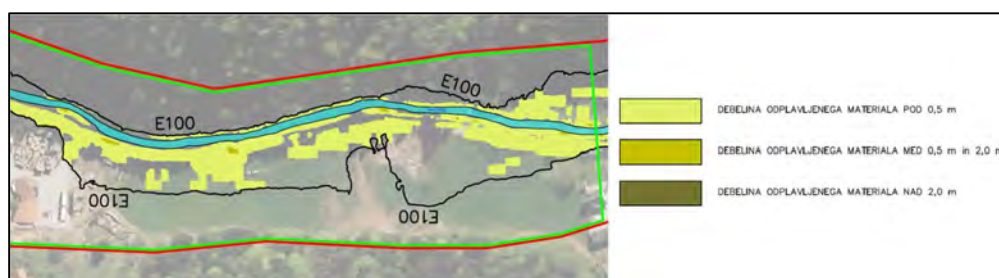


**Slika 9.75:** Intenzivno erodiranje na lokaciji visokovodnega nasipa (izsek iz karte erozijske nevarnosti za obstoječe stanje – odplavljen material).



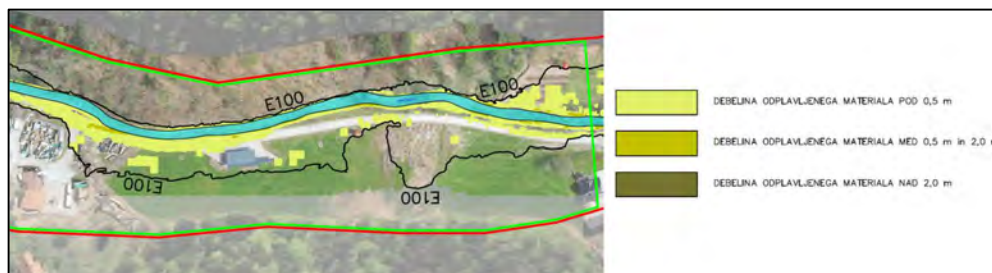
**Slika 9.76:** Intenzivno erodiranje materiala na lokaciji visokovodnega nasipa – vzdolžni prerez skozi nasip.

Na območju poplavnih površin je bilo odnašanje materiala najintenzivnejše na gorvodnem delu območja veljavnosti rezultatov, tj. na odseku dolvodno od sotočja s Pasjevaško grapjo. Kot smo že omenili, je struga vodotoka na tem odseku, z ozirom na ocenjen visokovodni pretok  $Q_{100}$ , izrazito poddimenzionirana, kar je povzročilo obširnejše razlivanje voda izven osnovne struge vodotoka ter posledično relativno visoke globine in hitrosti vodnega toka na obdajajočih poplavnih površinah. Na tem odseku se je na poplavnih površinah v večji meri erodiralo do okoli 5 cm materiala, ponekod pa je debelina odplavljenega materiala znašala tudi do 20 cm. Iz slike 9.77 je lepo razviden pas erodiranega materiala vzdolž trase lokalne ceste, kjer so se ob preplavitvi oblikovali koncentrirani sekundarni vodni tokovi, ki so zaradi privzete nizke vrednosti Manningovega koeficienta hrapavosti cestišča mestoma dosegali hitrosti tudi do 3,5 m/s, kar je vodilo v intenzivno odplavljanje materiala na območju trase predmetne lokalne ceste. Zaradi nekoliko razširjenega pretočnega profila ter posledično večje hidravlične prevodnosti obstoječe struge Hrastnice, je obseg območij erodiranega materiala na poplavnih površinah oz. kartah erozijske nevarnosti za stanje po poplavnem dogodku nekoliko manjši kot pri stanju pred poplavnim dogodkom (razvidno iz primerjave slik 9.77 in 9.78). Spremembe v topografiji terena v prečnem prerezu so razvidne iz slike 9.79.

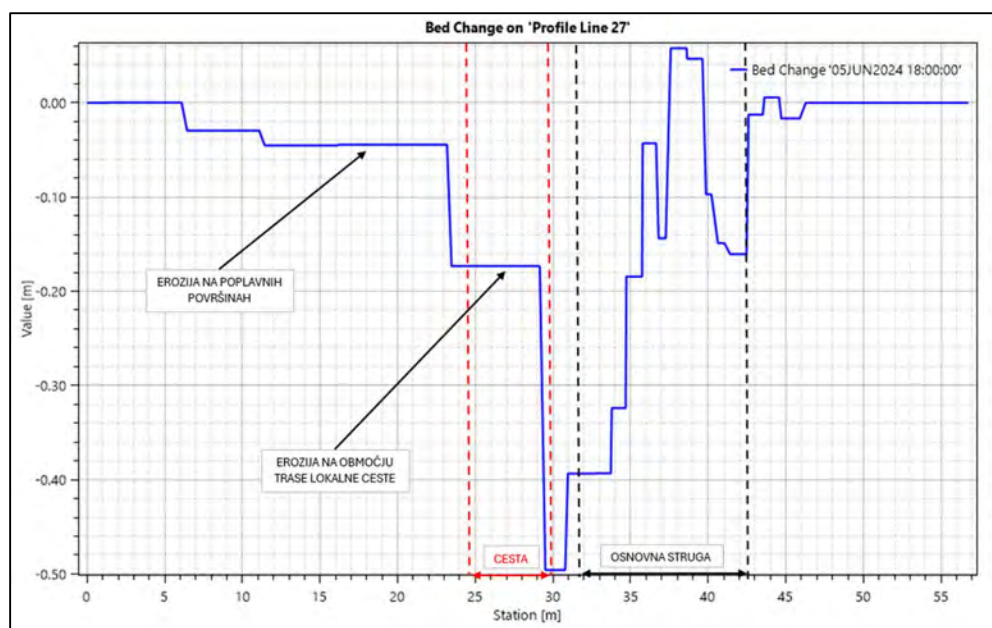


**Slika 9.77:** Erodirani material na poplavnih površinah – izsek iz karte erozijske nevarnosti za stanje pred poplavno ujmo – odplavljen material.





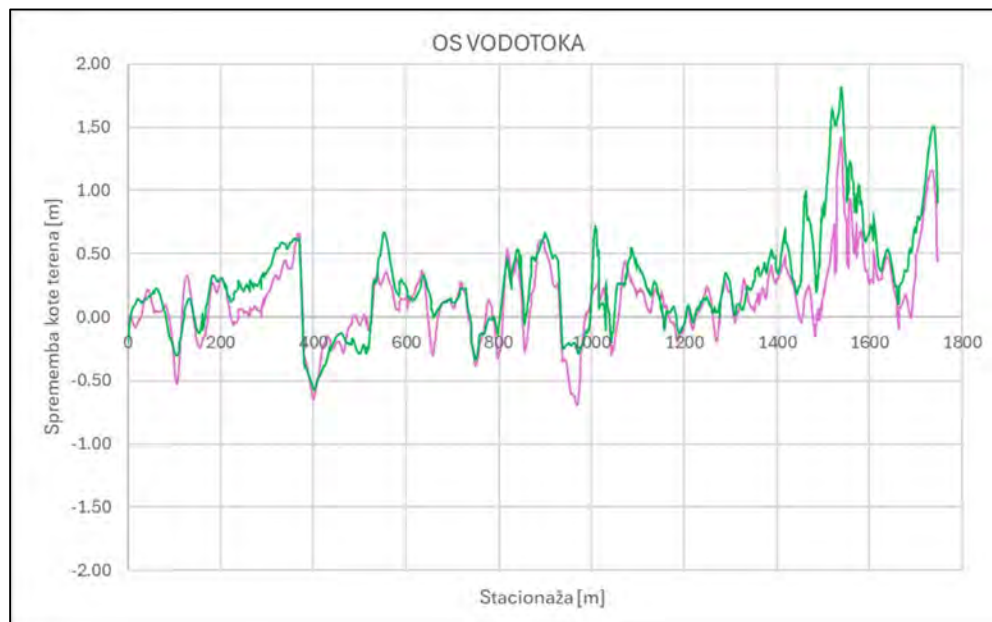
**Slika 9.78:** Erodirani material na poplavnih površinah – izsek iz karte erozijske nevarnosti za obstoječe stanje – odplavljen material.



**Slika 9.79:** Erodirani material na poplavnih površinah ter na območju trase lokalne ceste.

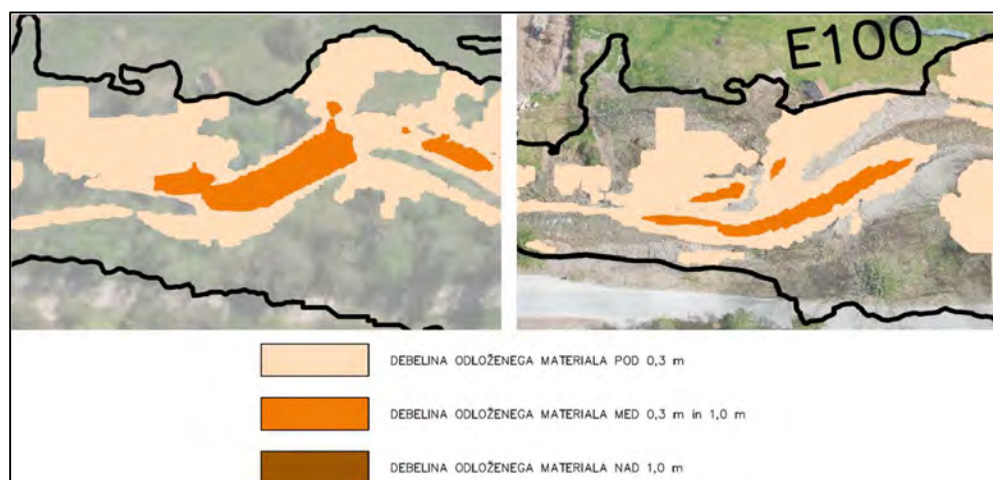
Z vidika odloženega materiala je z izdelanih kart erozijske nevarnosti tako za stanje pred poplavno ujmo kakor tudi za obstoječe stanje razvidno, da se območja z največjimi količinami odloženih plavin nahajajo neposredno v strugi vodotoka. Razlog za to se skriva v dejstvu, da so bile karte erozijske nevarnosti izdelane na podlagi kumulativnih količin odplavljenega oziroma odloženega materiala na koncu simulacij premeščanja plavin. Konica pretoka  $51,7 \text{ m}^3/\text{s}$ , pri kateri so se na splošno vršili najintenzivnejši procesi erodiranja, se je pojavila na začetku druge ure izvajanja simulacije, čemur so nato sledile še štiri ure dokaj intenzivnega upadanja pretoka do vrednosti  $10,5 \text{ m}^3/\text{s}$ . Skladno z upadanjem pretoka se je tekom simulacije zmanjševala premestitvena zmogljivost vodnega toka, kar je botrovalo k vedno intenzivnejšim procesom odlaganja plavin. Poleg tega so se na gorvodnem delu v računsko domeno modela, zaradi uporabe sedimentnega robnega pogoja »*Equilibrium Load*«, neprestano dovajale dodatne količine plavin, ki so se ob nižjih pretokih odlagale pretežno v strugi vodotoka. Opisano je lepo razvidno s slike 9.80, ki prikazuje kumulativne spremembe kot dna struge v času maksimalnih pretokov (vijolična krivulja) ter na koncu simulacije (zelena krivulja) za stanje pred poplavnim dogodkom. Opazimo lahko, da so se vrednosti kumulativnih količin odloženih plavin vzdolž

osi vodotoka tekom upadanja pretokov (v večji meri) povečevale, medtem ko se je kumulativna količina erodiranih plavin zmanjševala.



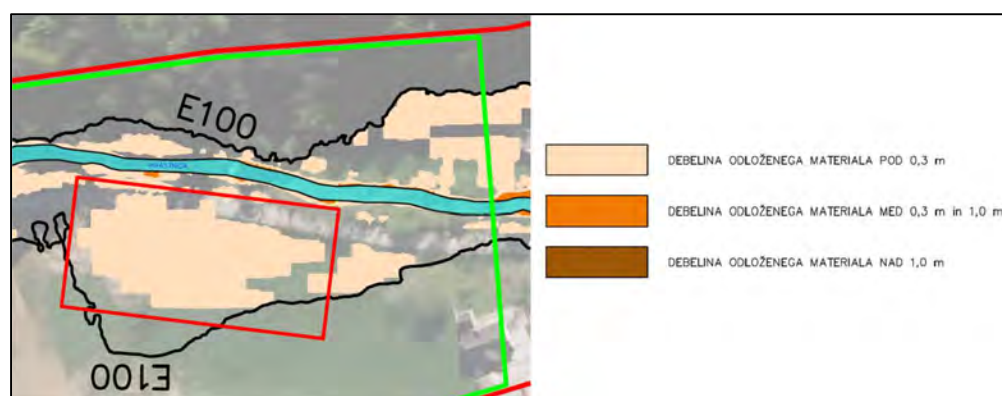
**Slika 9.80:** Primerjava spremembe kot dna struge vzdolž osi vodotoka v času maksimalnih pretokov (vijolična krivulja) in na koncu simulacije premeščanja plavin (zelena krivulja) za stanje pred poplavnim dogodkom 2023.

Poudariti je treba, da so območja odloženih plavin v strugi vodotoka močno pogojena z lokalnimi hidravličnimi razmerami v rečni strugi. Tako se (najobsežnejša) območja z večjimi količinami odloženih plavin nahajajo predvsem na mestih, kjer prihaja do lokalnih razširitev pretočnega profila vodotoka in položnejšega vzdolžnega padca nivelete dna struge. Na takšnih mestih so globine in hitrosti vodnega toka nižje, zmanjšajo se strižne napetosti, posledično je zmanjšana tudi premestitvena zmogljivost vodnega toka. Eno takih območij se tako za stanje pred poplavno ujmo kot tudi za obstoječe stanje, nahaja približno 50 m gorvodno od sotočja z Osojsko grapo, kjer se je v strugi vodotoka mestoma odložilo do 0,75 m materiala (slika 9.81).

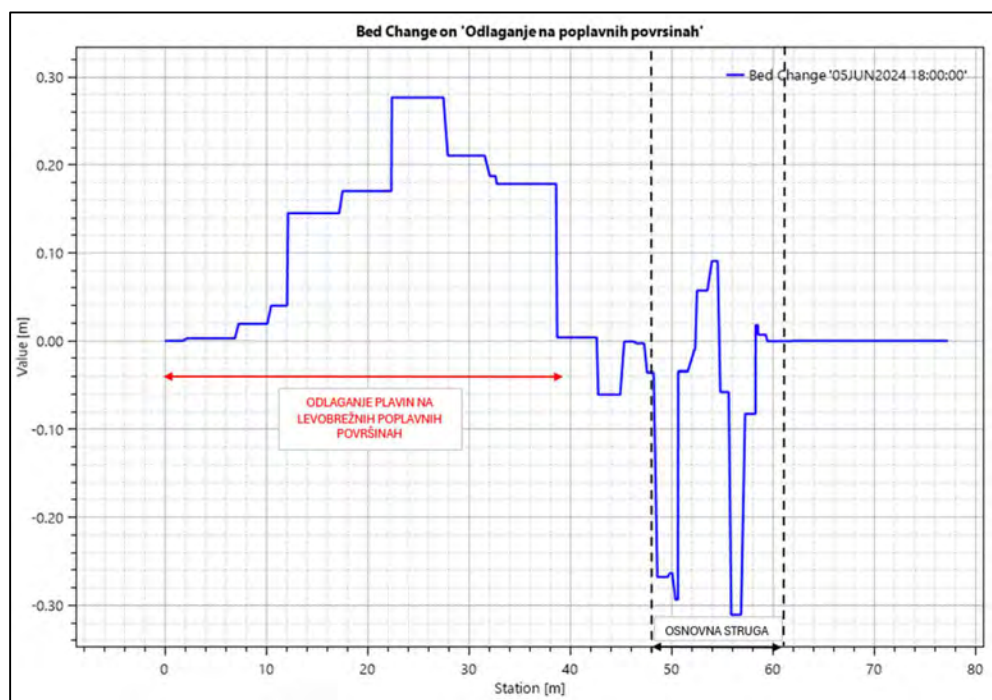


**Slika 9.81:** Odložene plavine v strugi Hrastnice, gorvodno od sotočja z Osojsko grapo – izsek iz karte erozijske nevarnosti za stanje pred poplavno ujmo (levo) ter obstoječe stanje (desno).

Na obdajajočih poplavnih površinah se največje količine odloženih plavin izkazujejo predvsem na mestih, kjer prihaja do zastajanja vodnih tokov in posledično nižjih pretočnih hitrosti in strižnih napetosti ter s tem zmanjšanje premestitvene zmogljivosti vodnih tokov. Ena takih lokacij se nahaja približno 150 m dolvodno od sotočja s Pasjevaško grapo, kjer se na levobrežnih travniških poplavnih površinah nahaja območje nekoliko nadvišanega terena (platoja), gorvodno od vznožja katerega je tekom simulacije prihajalo do zastajanja poplavnih voda in intenzivnejših procesov odlaganja materiala (količina odloženega materiala se giblje do 0,3 m), kot je razvidno iz slik 9.82 in 9.83. Na predmetni lokaciji, kjer so se odlagale plavine, premeščene iz gorvodnega konca modela, so maksimalne globine mestoma dosegale vrednosti tudi do 1 m, medtem ko so se maksimalne hitrosti gibale med 0,6 in 0,7 m/s.



**Slika 9.82:** Odložene plavine na levobrežnih poplavnih površinah – izsek iz karte erozijske nevarnosti za stanje pred poplavno ujmo – odložen material.



Slika 9.83: Odložene plavine na levobrežnih poplavnih površinah.

Opisan primer analize procesov rečne erozije vzdolž odseka vodotoka Hrastnica s pomočjo 2D modela premeščanja plavin kaže na zapleteno erozijsko dogajanje, ki je močno odvisno od lokalnih hidravličnih razmer. Pri interpretaciji rezultatov tovrstnih analiz je treba biti zelo pozoren na hidravlične razmere v posameznih računskih korakih simulacije, ki v določenem obdobju lahko povzročijo intenzivnejše odplavljanje plavin, kateremu zelo pogosto ob upadu pretokov in še vedno sorazmerno velikemu dotoku plavin iz zalednih območij sledijo intenzivnejši procesi odlaganja plavin. S tega vidika je ključno, da se izdelovalci tovrstnih analiz opredelijo do kritičnih hidravličnih in spremljajočih procesov rečne erozije v posameznih časovnih korakih simulacije.

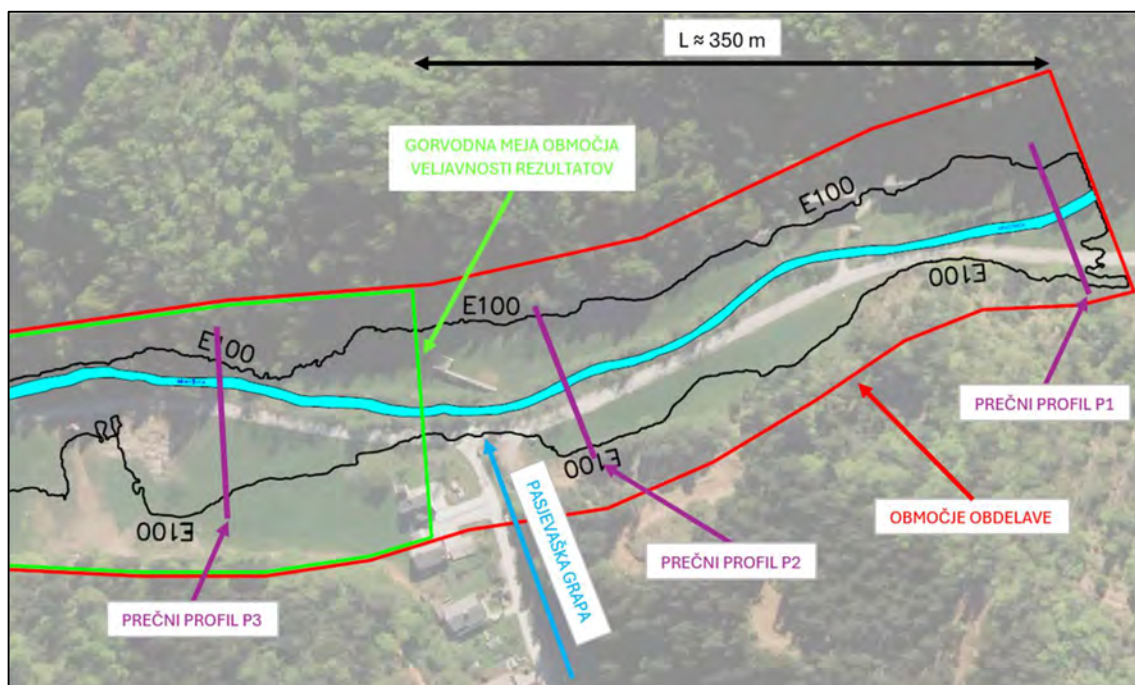
#### 9.2.2.3.4 Analiza občutljivosti modela na izbrani sedimentni robni pogoj

V zadnjem podpoglavju, ki spada v sklop analize rezultatov kompleksnejših metod z interpretacijo rezultatov modela premeščanja plavin, se osredotočamo na analizo občutljivosti modela z vidika izbire sedimentnega robnega pogoja. Vsi rezultati in analize, ki smo jih prikazali v prejšnjih poglavjih, so bili dobljeni z modelom premeščanja sedimentov, v katerem je bil za sedimentni robni pogoj uporabljen »*Equilibrium Load*«, kateri je najprimernejši sedimentni robni pogoj z vidika opaženih erozijskih razmer v poplavnem dogodku 2023. Z namenom analize občutljivosti modela glede na izbrani sedimentni robni pogoj, smo robni pogoj »*Equilibrium Load*« zamenjali s pogojem »*Clear Water*«. Pri tem robnem pogoju se v računsko domeno modela tekom simulacije ne dovajajo neomejene količine plavin, temveč so se vzdolž modeliranega odseka Hrastnice premeščale zgolj tiste količine in frakcije plavin, ki so bile na obravnavanem odseku tudi odplavljene.

Na gorvodnem koncu modela (kjer se je izkazoval največji vpliv izbire sedimentnega robnega pogoja na rezultate modela premeščanja plavin) smo vzdolž struge vodotoka in na poplavnih površinah tako



zasnovali tri prečne profile – prečna profila P1 in P2 smo lokacijsko umestili izven območja veljavnosti rezultatov, medtem ko smo prečni profil P3 umestili približno 80 m dolvodno od gorvodne meje območja veljavnosti rezultatov, tj. znotraj območja veljavnosti rezultatov. Lokacijska umestitev predmetnih prečnih profilov je razvidna s slike 9.84.

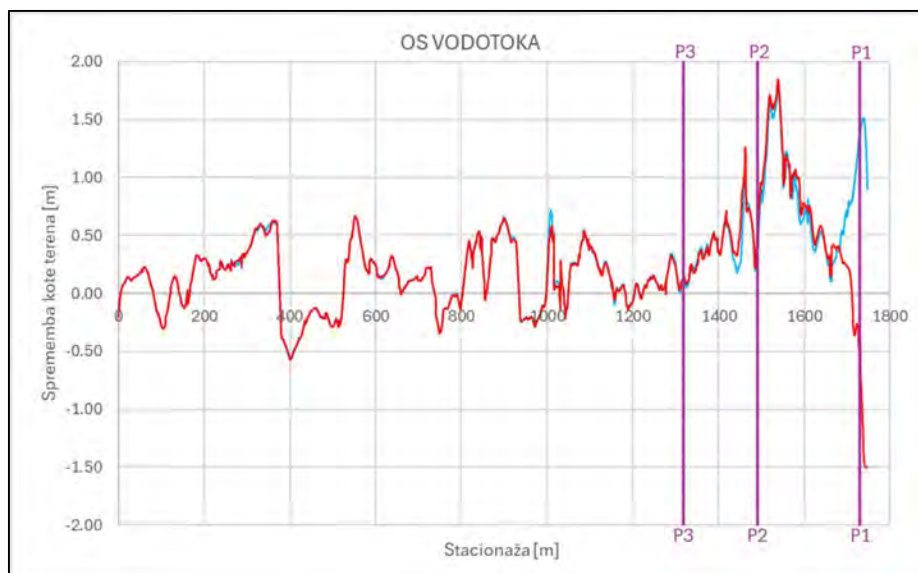


**Slika 9.84:** Prikaz lokacijske umestitve prečnih profilov za potrebe izvedbe analize občutljivosti modela na izbrani sedimentni robni pogoj.

Do občutljivosti modela glede na izbrani sedimentni robni pogoj (*»Equilibrium Load vs. Clear Water«*) smo se opredelili na podlagi podatkovnega sloja *»Bed Change«*, tj. na podlagi sprememb v kotah terena v prečnih profilih P1, P2 in P3 ter na podlagi sprememb v kotah terena vzdolž osi vodotoka, ki nastanejo kot posledica procesov premeščanja plavin (odlaganje in erodiranje plavin). Na posameznih slikah, predstavljenih v nadaljevanju, so z modrimi linijami prikazane spremembe v kotah terena pri uporabi sedimentnega robnega pogoja *»Equilibrium Load«*, medtem ko so spremembe v kotah terena pri uporabi sedimentnega robnega pogoja *»Clear Water«*, označene z rdečimi linijami.

Na sliki 9.85 so prikazane kumulativne spremembe v kotah terena vzdolž osi vodotoka na koncu simulacije premeščanja plavin. Vzdolž obravnavanega odseka so se tekom simulacije pojavljali tako procesi odlaganja kakor tudi erodiranja plavin. Količine odloženih oziroma odplavljenih plavin (podane v metrih), se tako pri uporabi sedimentnega robnega pogoja *»Equilibrium Load«* kakor tudi pogoja *»Clear Water«* na območju srednjega in spodnjega toka v večji meri gibljejo med vrednostma -0,5 m in 0,5 m. Opazimo lahko, da je potek linij (modra linija – *»Equilibrium Load«*, rdeča linija – *»Clear Water«*) od približne stacionaže 1400 m dolvodno, praktično identičen, kar pomeni, da so se kljub različnim uporabljenima sedimentnima robnima pogojema, vzdolž osi vodotoka na območju struge v srednjem in spodnjem toku vršili podobni procesi rečne erozije. Precej drugačno dogajanje pa je razvidno na skrajnem gorvodnem koncu modeliranega odseka, kjer se izkazuje velik vpliv izbranega sedimentnega robnega pogoja na modelirane procese rečne erozije. Pri modelu, v katerem je bil uporabljen sedimentni robni pogoj *»Equilibrium Load«*, je razvidno, da se je zaradi dotoka zasičenih vodnih tokov

do konca simulacije na dno struge na skrajnem gorvodnem koncu modela, tj. v bližini prečnega profila P1, kumulativno odložila do 1,5 m debela plast plavin. Iz poteka sprememb višinskih kot terena, kjer je bil uporabljen pogoj »Clear Water«, pa so na skrajnem gorvodnem koncu razvidni intenzivni procesi globinske rečne erozije, ki so strugo vodotoka mestoma poglobili do globine -1,5 m, kolikor je znašala tudi maksimalna možna globina erodiranja, ki smo jo v modelu premeščanja sedimentov definirali s slojem neerodibilne podlage. Pri uporabi sedimentnega robnega pogoja »Clear Water«, pri katerem so se tekom simulacije premeščale zgolj plavine, ki so bile na modeliranem odseku Hrastnice tudi erodirane, je tako prihajalo do intenzivnih erozijskih procesov zaradi dotoka nezasičenih vodnih tokov v računsko domeno modela.

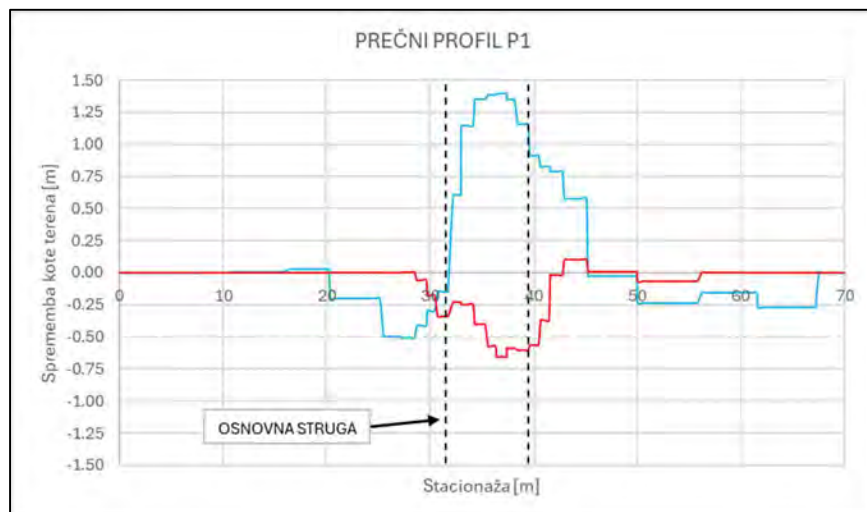


**Slika 9.85:** Kumulativne spremembe kot terena vzdolž osi vodotoka na koncu simulacije premeščanja plavin.

Na podlagi prikazanega lahko tako ugotovimo, da se z oddaljevanjem od sedimentnega robnega pogoja, zmanjšuje njegov vpliv na potek modeliranih procesov rečne erozije. S tega vidika se je torej pomembno ustrezno opredeliti do območja veljavnosti rezultatov premeščanja plavin ter ga ustrezno označiti na kartah erozijske nevarnosti.

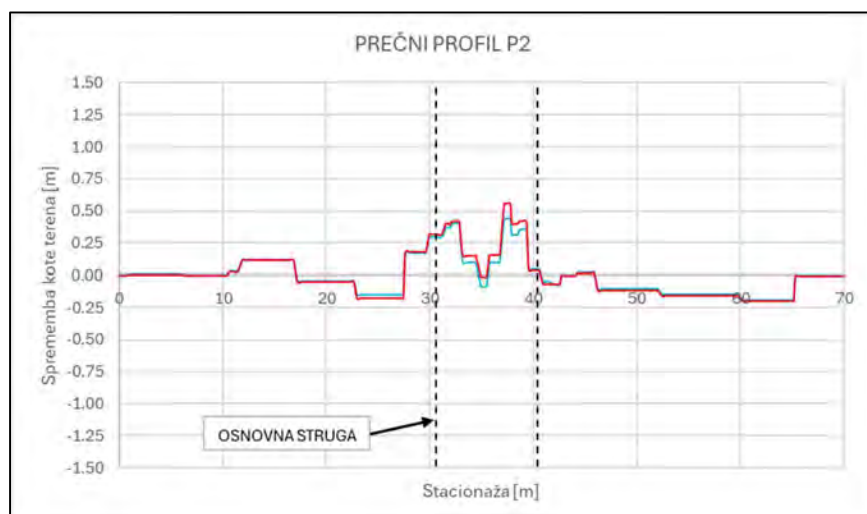
V nadaljevanju prikazujemo topografske spremembe v profilih P1–P3, kot kumulativne spremembe kot terena na koncu simulacije premeščanja plavin. Z modrimi linijami so prikazane spremembe v kotah terena pri uporabi sedimentnega robnega pogoja »Equilibrium Load«, medtem ko rdeče linije nakazujejo spremembe v kotah terena pri uporabi pogoja »Clear Water«. Iz prečnega profila P1, ki je lociran neposredno dolvodno od gorvodnega roba modela, je tako na območju osnovne struge vodotoka kakor tudi na poplavnih površinah, razviden znaten vpliv izbranega sedimentnega robnega pogoja na količine odloženih oziroma erodiranih plavin, torej na spremembe kot terena (Slika 9.86). Ob koncu simulacije se je v modelu, v katerem je bil uporabljen sedimentni robni pogoj »Equilibrium Load«, na (širšem) območju osnovne struge odložila do 1,4 m debela plast plavin. Posledično se je voda ob vstopu v model zaradi bistveno zmanjšane pretočnosti profila struge precej obsežneje razlivala izven osnovne struge vodotoka, kar je vodilo v odnašanje materiala na poplavnih površinah. Iz spodnje slike je razvidno, da se je na območju poplavnih površin, teren mestoma poglobil tudi do -0,5 m. Precej drugačno dogajanje pa je razvidno iz poteka kumulativnih sprememb kot terena pri uporabi sedimentnega robnega pogoja »Clear Water«. Ob koncu simulacije se je v prečnem profilu P1 dno

osnovne struge kumulativno poglobilo tudi do -0,65 m. Zaradi nekoliko razširjenega in poglobljenega pretočnega profila se vode niso tako obširno razlivalje izven struge kot pri modelu z uporabljenim sedimentnim pogojem »*Equilibrium Load*«, posledično so spremembe topografije terena izven območja struge praktično zanemarljive.



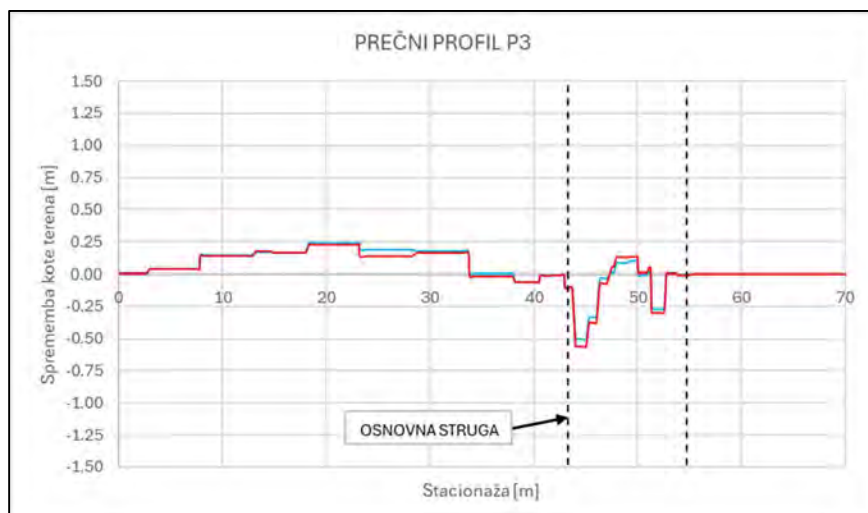
**Slika 9.86:** Kumulativne spremembe kot terena v prečnem profilu P1 na koncu simulacije premeščanja plavin.

Z oddaljevanjem od gorvodnega konca modela se je postopoma zmanjševal vpliv izbranega sedimentnega robnega pogoja na količine odloženih oziroma erodiranih plavin, in sicer tako na območju osnovne struge vodotoka kakor tudi na poplavnih površinah. S slike 9.87 so razvidne kumulativne spremembe kot terena v prečnem profilu P2, ki se nahaja dobrih 250 m dolvodno od gorvodnega konca modela, vendar še vedno zunaj območja veljavnosti rezultatov. Razvidno je, da se tako območja erodiranega kakor tudi odloženega materiala pri obeh modelih z različnima uporabljenima sedimentnima robnima pogojema, lokacijsko nahajajo na istih stacionažah vzdolž prečnega profila. Količinsko gledano so največje razlike na območju osnovne struge vodotoka in sicer na desni brežini, kjer se je v modelu, v katerem je bil uporabljen sedimentni robni pogoj »*Clear Water*«, do konca simulacije kumulativno odložila do 0,55 m debela plast plavin. Pri uporabi robnega pogoja »*Equilibrium Load*« se je odložila približno 0,40 m debela plast plavin.



**Slika 9.87:** Kumulativne spremembe kot terena v prečnem profilu P2 na koncu simulacije premeščanja plavin.

Nadaljnje zmanjševanje vpliva izbranega sedimentnega robnega pogoja na kumulativne količine odloženih oziroma erodiranih plavin je razvidno tudi v prečnem profilu P3 (slika 9.88), ki se nahaja približno 430 m dolvodno od zgornjega roba modela znotraj območja veljavnosti rezultatov. Zopet lahko opazimo, da se kljub različnim uporabljenima sedimentnima robnima pogojema tako območja odloženih kakor tudi erodiranih plavin nahajajo na istih stacionažah vzdolž prečnega profila.



**Slika 9.88:** Kumulativne spremembe kot terena v prečnem profilu P3 na koncu simulacije premeščanja sedimentov.

Za zaključek analize občutljivosti podajamo še vrednosti celokupnih količin odloženih oziroma erodiranih plavin na koncu vsake izmed izvedenih simulacij. V simulacijah premeščanja plavin, v katerih je bil uporabljen robni sedimentni pogoj »*Equilibrium Load*«, se je na obravnavanem odseku odložilo pribl. 570 m<sup>3</sup> erodiranega materiala. V simulacijah premeščanja sedimentov, v katerih je bil uporabljen robni sedimentni pogoj »*Clear Water*«, pa se je z obravnavanega odseka odplavilo pribl. 240 m<sup>3</sup>. Glede na opravljeno analizo občutljivosti lahko trdimo, da k prikazanim razlikam v celokupnih vrednostih med



odloženimi in erodiranimi plavinami v večji meri pripomorejo procesi rečne erozije na relativno skrajnem gorvodnem delu modeliranega odseka Hrastnice, ki so pod občutnim vplivom sedimentnega robnega pogoja. Velja opozoriti, da so ugotovljene razlike v dinamiki odplavljanja/odlaganja plavin vezane na sedimentni robni pogoj močno pogojene z lokalnimi hidravličnimi razmerami na obravnavanem odseku in lastnostmi plavin.

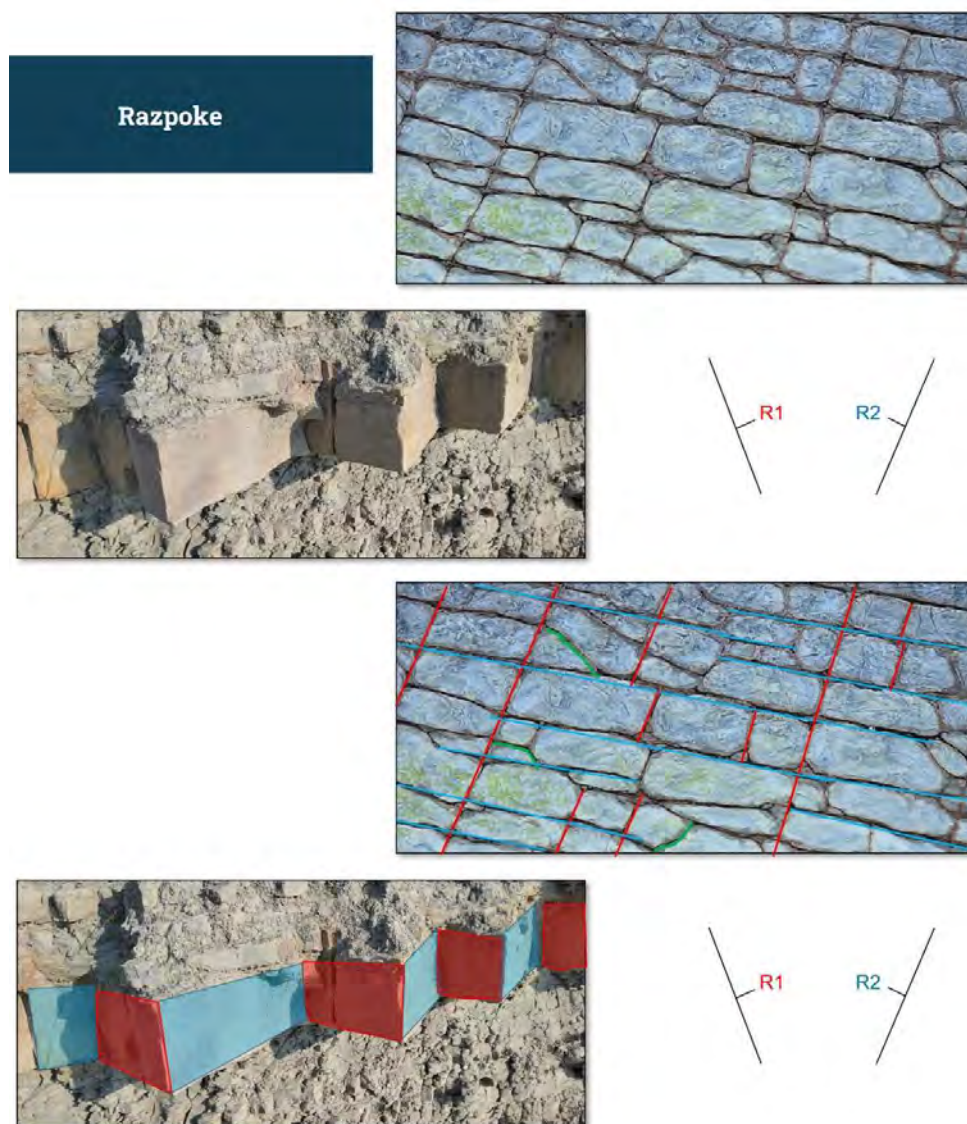
### 9.2.3 Testiranje kompleksnejših analiz odseka obale morja

Kompleksnejše analize erozijske nevarnosti na odsekih morske obale, kjer je pričakovan obseg erozijskih procesov ter intenziteta erozivnega delovanja morja velika, je potrebno narediti za vsak odsek posebej meritve diskontinuitet, preučiti lastnosti plasti in predvsem izvajati periodične meritve spreminjanja reliefa na odseku obale. Diskontinuitete namreč vplivajo na stopnjo poškodovanosti kamnine, ki posledično vpliva na stopnjo erodibilnosti. Ko valovi udarjajo ob obalo, povzročajo mehanske obremenitve, ki se koncentrirajo prav na mestih diskontinuitet oz. mehansko šibkejših kamnin, kot je podrobneje opisano v poglavju 6.4. Obenem morje lažje erodira bolj preperele plasti, ki so obenem tudi bolj tektonsko pretrte (npr. pretrt in preperel laporovec). To ima lahko več posledic:

- 1) Pospešena erozija na mestih, kjer so prisotne razpoke ali prelomne ploskve, valovanje lažje prodira v notranjost sklada, kar vodi do hitrejše razgradnje materiala.
- 2) Zmanjšana stabilnost pobočij. Voda, ki prodira skozi diskontinuitete, lahko povzroči povečanje pornega tlaka in zmanjša trenje med plastmi, kar vodi do zdrsov.
- 3) Kavitacijski učinki v votlinah in razpokah, ki jih ustvarijo diskontinuitete. Valovanje povzroči lokalne tlačne spremembe, kar še dodatno pospeši razpad materiala.
- 4) V diskontinuitete pride voda oz. lahko tudi zračna vlaga, iz katere se lahko ob izhlapevanju izločajo razne soli oz. minerali, ki še dodatno pospešijo preperevanje in hitrejšo erozijo.

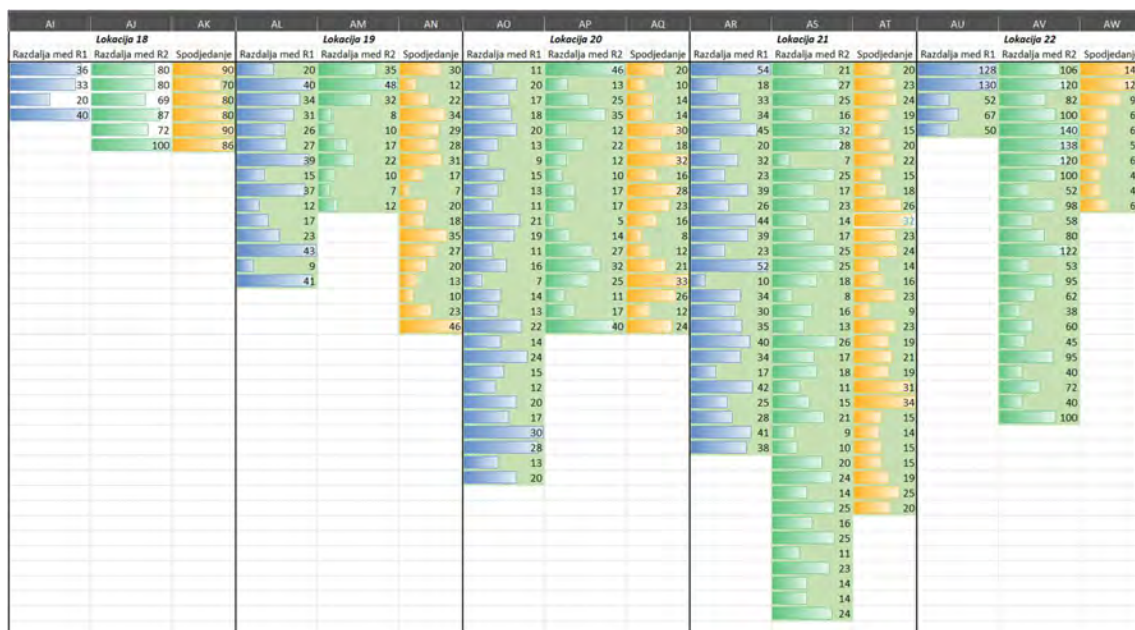
Povezava med diskontinuitetami v flišnih plasteh in erozivnostjo valovanja morja je torej močno vzajemna, diskontinuitete povečujejo ranljivost flišne obale, valovanje pa te šibkosti izkorišča in pogloblja. To vodi do pospešene obalne erozije, kar je še posebej pomembno pri načrtovanju zaščitnih ukrepov in prostorskega načrtovanja v obalnih območjih.

V nadaljevanju podajamo primer meritve diskontinuitet na področju Strunjana, in sicer za plastovitost in dva sistematična sistema razpok R1 in R2 (slika 9.89), ki vse tvorijo ploskve v prostoru. Iz geometrijskih lastnosti oz. prostorskih odnosov vseh diskontinuitetnih ploskev lahko predvidimo potencialne ploskovne zdrse, klinaste zdrse in prevračanje blokov, obenem pa preko gostote in razdalj med diskontinuitetami ugotavljamo tektonsko poškodovanost kamnin in stopnjo dovzetnosti za erozijo.



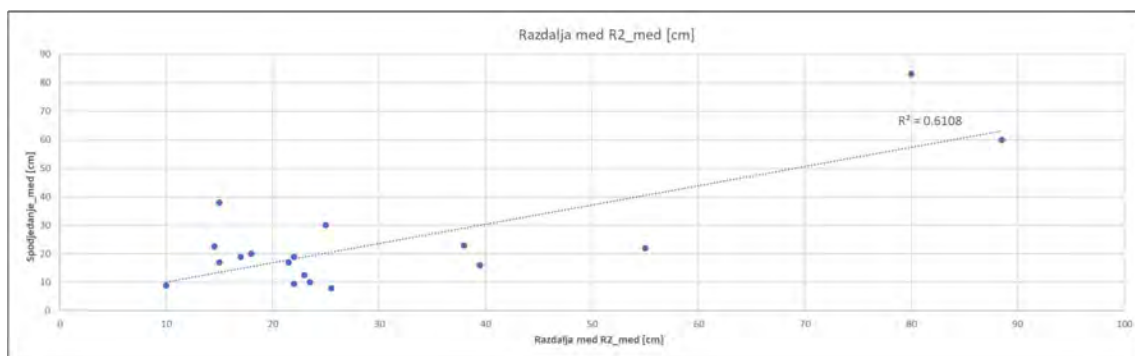
**Slika 9.89:** Primer dveh sistemov razpok R1 in R2, ki tvorita kvadre peščenjaka, ki izpada iz stene zaradi erozijskega spodjedanja laporovca pod peščenjakovo plastjo. Tretji sistem razpok, označen na tlorisu z zeleno barvo, predstavlja nesistematične razpoke, ki zaradi svoje naključnosti in redkosti niso predmet meritev oz. analiz.

Na terenu merimo poleg osnovnih litoloških značilnosti kamnin (Budetta in sod., 2000) tudi ostale parametre razpok, npr. pravokotno razdaljo med razpokami istega sistema in globino spodjedanja peščenjakovih plasti (Admassu in sod. 2012; Niemann 2009; Ledbetter in sod., 2021), ki je z razdaljo med razpokami značilno statistično povezana. Do spodjedanja teh plasti zaradi erozije laporovcev pod peščenjaki namreč prihaja prej pri tanjših debelinah plasti peščenjaka in tudi krajših razdalj med razpokami, saj se tako tvorijo manjši bloki, ki jih erozijsko delovanje morja ali meteoroloških dejavnikov (predvsem erozija padavin) hitreje spodkoplje in posledično izpadajo na nižje ležeče predele obale. Primer meritev za odsek št. 7 je podan na sliki 9.90. Zelo močna korelacija je bila ugotovljena tudi med globino spodjedanja in med debelino plasti, tako da je potrebno meriti tudi ta parameter.



Slika 9.90: Primer meritev razdalj med razpokami sistema 1 in 2 ter globine spodjedanja na lokaciji odsekov 18 do 22. Vse vrednosti so v cm.

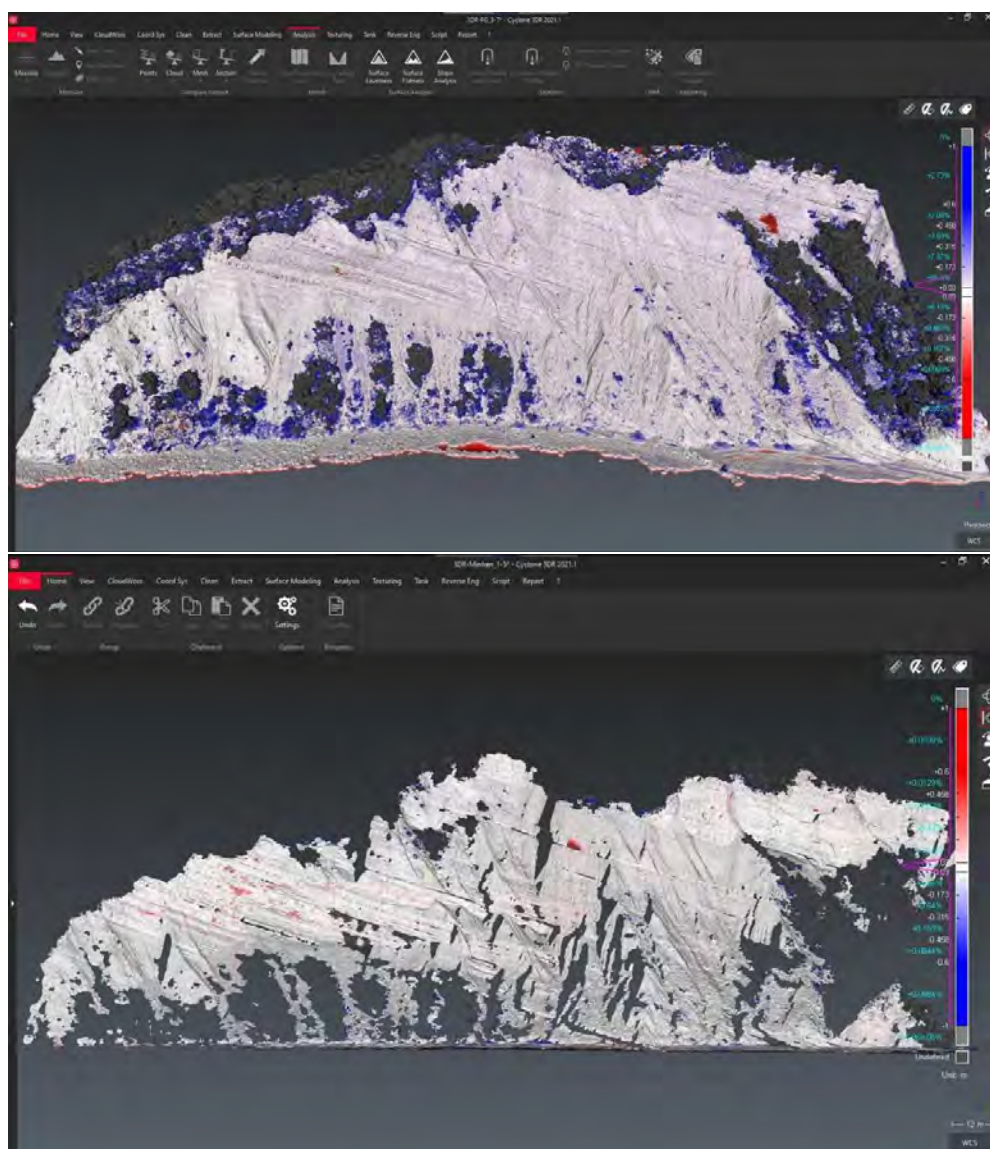
Na sliki 9.91 je prikazan primer korelacije med globino spodjedanja in razdaljo med razpokami sistema R2. Podobno dobri in statistično značilni korelaciji sta tudi med ostalimi parametri, npr. med debelino peščenjakovih plasti in globino spodjedanja ( $r=0,90$ ) ter med debelino plasti laporovca pod peščenjakom in globino spodjedanja ( $r=0,83$ ). Z omenjenimi meritvami dobimo natančen vpogled v dovzetnost za erozijske procese, saj je razpokana kamnina s slabimi mehanskimi parametri bistveno bolj dovzeta za erozijo kot masivna homogena trša kamnina. Več izmerjenih parametrov omogoča tudi dodaten vpogled v te dovzetnosti preko statističnih analiz, zato je potrebno izmeriti čim več podatkov za relevantnost končnih rezultatov. Globina spodjedanja peščenjakovih ali apnenčastih plasti je ena od ključnih parametrov, s katero lahko opredelimo intenzivnost erozije in nevarnosti izpadanja kamnov oz. skal iz plasti.



Slika 9.91: Primer korelacije med globino spodjedanja in razdaljo med razpokami sistema R2 s korelacijskim koeficientom  $r = 0,78$  oz.  $R^2 = 0,61$ .



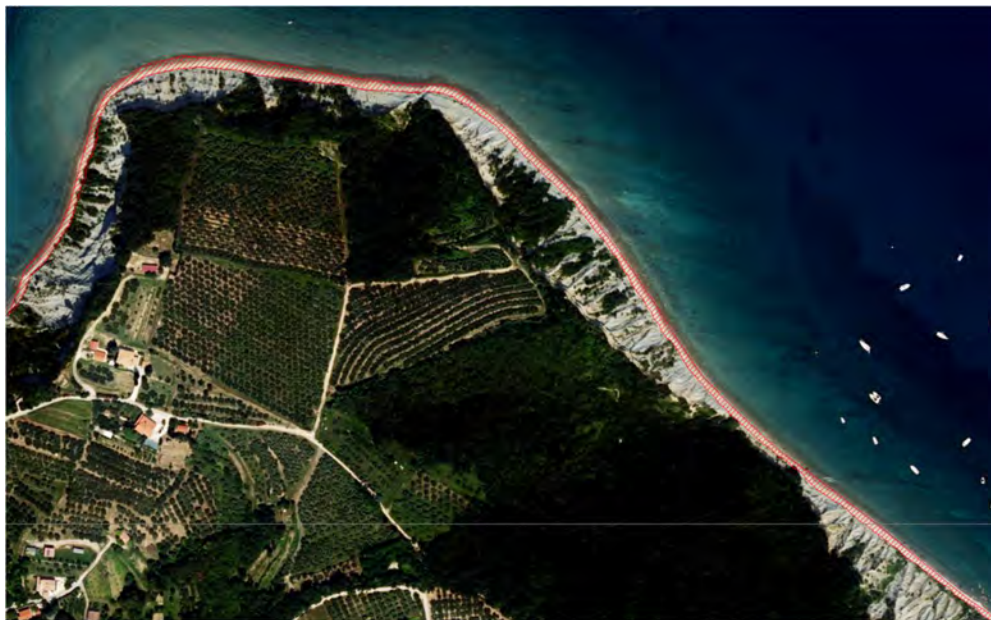
Drugi sklop meritev je namenjen ugotavljanju stopnje erozije kamnin, za katero potrebujemo ničelno meritev in nadaljnje meritve sprememb površja kamnin. Za to uporabljamo natančne meritve v rangi vsaj centimetrske natančnosti, ki jih lahko zagotovimo s fotogrametrijo (brezpilotnim letalnikom oz. SfM) ali z lidarskim skeniranjem površja (prav tako z brezpilotnim letalnikom ali s terestričnim skenerjem (TLS), ki je zaradi pravokotnosti meritev na vertikalna pobočja kamnin primernejši). Sistematične analize lahko delamo v enakih časovnih intervalih (npr. letno, nekajkrat letno), ali občasno (po večjih padavinskih ali izjemnih dogodkih). Iz razlik v površju med časovnimi posnetki izračunamo prostorske spremembe v času, dobimo pa tudi vpogled v lokacije kritičnih območij, kje poteka bolj intenzivna erozija. Obe metodi sta precej uveljavljeni kot merski metodi za spremljanje sprememb v površju (Taddia in sod., 2019; 2020). Na sliki 9.92 prikazujemo rezultate snemanja strunjskega klifa oz. natančneje vzhodnega pobočja zaliva Sv. Križa (Mesečevega zaliva) v Strunjanu, posnetega s TLS in z brezpilotnim letalnikom.



**Slika 9.92:** Posnetek vzhodnega pobočja zaliva Sv. Križa (Mesečevega zaliva) v Strunjanu, pridobljen s snemanjem iz brezpilotnega letalnika (zgoraj) in laserskega skeniranja (TLS, spodaj). Barvna lestvica prikazuje razlike v površju in je v obeh primerih enaka in ima razpon od  $-1$  do  $+1$  m.



Na sliki 9.93 prikazujemo predlog prikaza erozijske nevarnosti na obalnem pasu poplavljanja morja za odsek slovenske obale na območju Strunjana, kjer so erozijski procesi zelo intenzivni. Skladno s Pravilnikom je prikazano območje poplavljanja pri gladinskem stanju morja  $G_{100}$ .



**Slika 9.93:** Primer karte erozijske nevarnosti za odsek obale morja na območju Strunjana.

Kot je razvidno iz slike 9.93 je pas poplavljanja obale na obravnavanem odseku zaradi strme obale zelo ozek, kar velja praktično za vse odseke vzdolž slovenske obale, kjer so erozijski procesi najintenzivnejši. Meja območja poplavljanja je povzeta po rezultatih CRP projekta V2-2369 (Razvoj metode za oceno dosega poplavljanja morja ter oceno poplavne škode za objekte kulturne in stavbne dediščine na območju slovenske Istre), saj na obstoječi integralni karti poplavne nevarnosti obravnavani odsek ni zajet. Predlagamo, da se prikazani odsek obale na območju Strunjana z vidika intenzivnosti erozijskih procesov analiziranih s kompleksnejšimi metodami uvrsti v razred velike erozijske nevarnosti. Ob tem velja opozoriti, da je erozijske procese obale morja zelo težko interpretirati na enak način kot procese rečne erozije (v smislu debelin odlaganja in odplavljanja materiala), saj so mehanizmi, ki povzročajo erozijske procese obale morja precej drugačni. Zato bi bilo treba v analize erozije morja vključiti tudi ostale dejavnike, ki so upoštevani pri izračunih indeksov nevarnosti (npr. primer predstavljen na sliki 9.16) in rezultate kompleksnejših metod.

## DELOVNI SKLOP 4

### 10. SINTEZA PREDLAGANE METODOLOGIJE

V 10. poglavju podajamo sintezo predlagane metodologije s povzetkom rezultatov analiz, predstavljenih v 9. poglavju, ter usmeritev za praktično uporabo predstavljenih pristopov k obravnavi procesov rečne erozije in erozije morja. Kot je bilo predstavljeno v poglavju 6 v okviru pregleda nekaterih teoretičnih konceptov in tehničnih praks pri analizi nevarnosti rečne erozije in erozije obale morja, se tovrstne analize usmerjajo v opredelitev območij koridorjev vzdolž strug vodotokov oz. odsekov obale morja, kjer se pričakuje prisotnost poplavne in erozijske nevarnosti. V smislu opozarjanja pred tovrstnimi nevarnostmi, se v povezavi s procesi rečne erozije spodbuja uporaba izrazov **erozijski koridor vodotoka**, **aktivni koridor vodotoka** oz. širše **koridor rečne nevarnosti**, ki naj bi zaobjel različne vidike in vrste nevarnosti (Blazewicz in sod., 2020). Razmere na območju erozijskega koridorja vodotoka so bile v preteklosti oz. so lahko v prihodnosti pogojene s hidromorfološki procesi, torej procesi rečne erozije, ki jih povzroča gibanje vodnega toka. Kartiranje nevarnosti rečne erozije in erozije morja ima še vedno precej kratko zgodovino in je bilo večinoma opravljeno na lokalni ravni in za posebne projekte, v okviru katerih so se problemi, povezani s procesi rečne erozije oz. erozije morja, izkazali kot izrazito problematični. Iz pregleda nekaterih tujih pristopov k analizi in kartiranju območij rečne erozije je razvidno, da se pristopi metodološko precej razlikujejo. Osnovni namen obravnavanih pristopov je večinoma sorazmerno groba razmejitev območij, na katerih je ocenjen različen potencial za razvoj procesov rečne erozije in nadaljnja ocena relativnih tveganj, ki so jim lahko izpostavljeni različni elementi grajenega okolja. Prostorski dosegi procesov rečne erozije so z vidika prevladujočih procesov odplavljanja materiala, ki običajno povzročijo veliko škode, v splošnem manj obsežni v primerjavi z dosegi razlivanja poplavnih voda. To se prav gotovo odraža tudi v izraziti podcenjenosti potenciala nevarnosti, ki jo predstavljajo procesi rečne erozije v primerjavi z običajnimi, v praksi razširjenimi analizami poplavne nevarnosti, ki so se v sodobno upravljanje voda večinoma vpeljali šele v obdobju zadnjih 15-tih let. Ob tem pa velja opozoriti, da procesi rečne erozije lahko lokalno segajo izven pričakovanih dosegov poplavnih voda. Intenzivnost in nepredvidljivost procesov rečne erozije se je na žalost pokazala ob zadnji uničujočih poplavah v Sloveniji avgusta 2023, ko je rečna erozija povzročila težko predstavljen obseg poškodb na vodni in ostali infrastrukturi. Močno poškodovani in povsem uničeni so bili številni objekti in različna gospodarska javna infrastruktura. Škoda je nastajala tudi na območjih, kjer se tovrstnih pojavov ni pričakovalo glede na predhodno analizirane razmere poplavne nevarnosti.

Nedvomno je pomembna podlaga za zaščito območij različnih rab tal pred rečno erozijo in erozijo obale morja, izboljšana kvalitativna in kvantitativno ocena erozijske nevarnosti, ki jo povzročajo kompleksni erozijski procesi. Izdelava kart poplavne nevarnosti in opredelitev razredov poplavne nevarnosti je skladno z vpeljavo Poplavne direktive (Direktiva 2007/60/ES) v nacionalno zakonodajo držav EU postala ustaljeni del postopka opredelitve prisotnosti poplavne nevarnosti v prostoru. Glede na Pravilnik 2007 sta procesa enakovredno obravnavana, v praksi pa se (predvsem zaradi težav z vhodnimi podatki in kompleksnosti analiz) procesi rečne erozije obravnavajo zelo splošno. Ob tem pa je ocena intenzitete in prostorske razsežnosti spremljajočih erozijskih procesov, ki so posledica poplavnih voda, še vedno dokaj obrobna tema tovrstnih analiz. Problematika pomanjkljivega upoštevanja erozijskih procesov v sklopu ocenjevanja in kartiranja poplavne nevarnosti v prostoru je bila izpostavljena v nekaterih tehničnih dokumentih in smernicah različnih organizacij (npr. FEMA, USGS, ASFPM, DWA, CIRIA), ki veljajo za vodilne v svetovnem merilu na področju obvladovanja naravnih tveganj. Ob tem pa je usmeritev za izdelavo ocen pričakovanih obsegov procesov rečne erozije oz. poskusov napovedovanja njihovega razvoja sorazmerno malo. Dodatno velja izpostaviti, da do sedaj še ni bilo razvitih splošno

sprejetih mednarodnih metod ali strokovnih smernic za oceno obsega in intenzivnosti procesov rečne erozije. Nedvomno je eden od glavnih vzrokov v tem, da so procesi rečne erozije izjemno kompleksni. Prostorska spremenljivost erozijskih procesov je običajno zelo velika ter pogosto predvsem posledica lokalnega erozijskega dogajanja in hidravličnih razmer v času posameznega poplavnega dogodka. Zato je sistematično zbiranje terenskih podatkov o dogajanju v poplavnih dogodkih in spremljajočih erozijskih procesih ključnega pomena za celostno razumevanje dogajanja in ustrezno interpretacijo rezultatov hidravličnih modelov v povezavi z dejanskimi razmerami ob pojavu poplavnih dogodkov. Iz nekaterih do sedaj razvitih pristopov k vrednotenju in opredelitvi prostorske razsežnosti procesov rečne erozije izhaja, da je za ustrezno vrednotenje procesov rečne erozije potrebno poglobljeno znanje hidrologije, hidravlike, rečne hidromorfologije, inženirske hidrotehnike, geotehnike, poznavanje erodibilnostnih lastnosti tal ter agrobotanike (ISJ, 2018; Williams in sod., 2020; Deal in sod., 2018; Blazewicz in sod., 2020).

Sodobni pristopi k prostorski opredelitvi razvitosti procesov rečne erozije se poleg klasičnih terenskih ogledov strug in prepoznavne erozijskih procesov usmerjajo v kombinirano uporabo metod daljinskega zaznavanja ter podrobnejšo interpretacijo rezultatov hidravličnega modeliranja pri prepoznavi območij, kjer je potencial za intenzivnejšo razvitost erozijskih procesov povečan.

Opredelitev erozijskega koridorja vodotoka je zapletena in mora temeljiti na celoviti oceni in sintezi procesnih vidikov (opisani v poglavjih 1 in 2). Dodatno je treba pri opredelitvi erozijskega koridorja vodotoka upoštevati značilnosti okoljskih razmer in rabe tal (npr. na kmetijskih zemljiščih, ki so za procese rečne erozije izrazito dovzetna), opisanih v poglavju 3. Sanacija večjih erozijskih zajed na kmetijskih zemljiščih je običajno zahtevna in dolgotrajna, predvsem izgubo rodovitnih tal pa je zelo težko nadomestiti. Ob tem obstaja velika nevarnost, da se ob neizvajanju protierozijskih in sanacijskih ukrepov na vodnih in priobalnih zemljiščih, ob naslednjih poplavnih dogodkih obseg procesov rečne erozije bistveno poveča. Pri prepoznavanju erozijskega potenciala obale morja je treba biti pozoren predvsem na kombinacijo hidrometeoroloških razmer, inženirsko-geoloških lastnosti obale in hidrodinamičnih sil, ki jih povzročata valovanje morja, kar je predstavljeno v poglavju 4. Pri prepoznavanju in oceni potencialnih intenzitet in prostorskih obsegov procesov rečne erozije so lahko v veliko pomoč podatki o dogajanju v preteklih poplavnih dogodkih. Nekateri takšni primeri so predstavljeni v poglavju 5. Analizirano erozijsko dogajanje v preteklih poplavnih dogodkih služi kot glavno izhodišče za razvoj različnih metod za analizo nevarnosti rečne erozije in erozije morja, predstavljenih v poglavju 6. V okviru poglavja 8 so podrobneje razdelane usmeritve za začetno opredelitev do potencialne razvitosti procesov rečne erozije (t.i. Nivo 1), ki lahko izdelovalcem analiz erozijske nevarnosti na območjih poplavljanja vodotokov in morja služijo kot izhodišče za: (1) nadaljnje manj kompleksne analize za območja, kjer je pričakovan obseg erozijskega delovanja procesov rečne erozije in erozije morja majhen/zmeren (podpoglavje 8.2); (2) kompleksnejše metode za območja, kjer je pričakovan obseg in potencialna škoda zaradi procesov rečne erozije in erozije morja velik (podpoglavje 8.3).

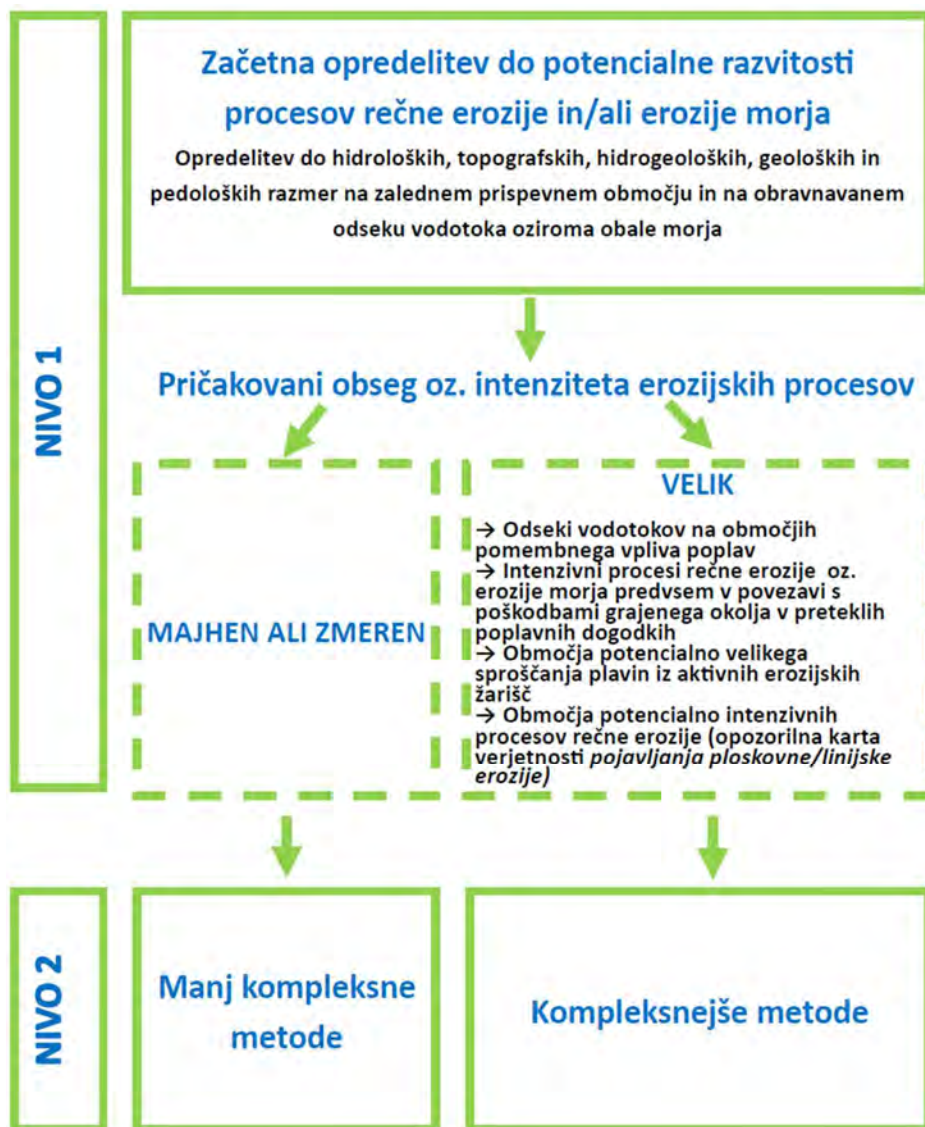
Opredelitev in kartiranje erozijskih območij celinskih voda in morja je skladno s slovensko zakonodajo opredeljena v Uredbi in Pravilniku, kjer so območja poplavne nevarnosti in območja erozijske nevarnosti z vidika pogojev in omejitev za izvajanje posegov v prostor enakovredna. Ob tem velja izpostaviti, da je ocena prostorskega obsega območij erozijske nevarnosti, kot izhaja iz tega poročila, s številnih vidikov kompleksnejša, kot je ocena prostorske razsežnosti območij poplavne nevarnosti. Vse nevarnosti, povezane s hidrološkimi, hidravličnimi in erozijskimi procesi, so podvržene številnim negotovostim, do katerih se morajo izdelovalci tovrstnih analiz ustrezno strokovno opredeliti. Kritična in verodostojna opredelitev do pričakovanega dosega in intenzitete erozijskih razmer je možna na osnovi ustreznih predznanj s področja hidrologije, hidravlike, urejanja vodotokov, hidromorfologije in

načrtovanja hidrotehničnih objektov. Tovrstna znanja v povezavi z analizo terenskih razmer na obravnavanih odsekih vodotokov oz. obale morja (upoštevanje usmeritev za izvedbo terenskih ogledov za prepoznavanje procesov rečne erozije, podanih v poglavju 8.1.4, upoštevanje usmeritev za oceno potencialne razvitosti procesov rečne erozije na podlagi različnih razpoložljivih podatkov o procesih rečne erozije v preteklosti v poglavju 8.1.5., in usmeritve za oceno potencialne razvitosti procesov rečne erozije na podlagi analize terenskih razmer in podatkov o procesih erozije morja v poglavju 8.1.6) lahko po našem mnenju pomagajo pri boljši strokovni opredelitvi do pričakovanih procesov rečne erozije in erozije obale morja.

Osnovno vodilo pri izbiri pristopov/metod za analizo procesov rečne erozije in erozije obale morja, predstavljenih v tem poročilu, je bilo, da so bili uporabljeni pristopi razviti za obravnavo erozijskih procesov v razmerah, ki so primerljive z razmerami, kakršne se pojavljajo vzdolž hidrografske mreže v Sloveniji oz. obale slovenskega morja. Ob tem velja opozorilo, da je bila večina teoretičnih konceptov in rezultirajočih metod, predstavljenih v poglavju 8, razvitih ob upoštevanju bistveno poenostavljenih hidravličnih razmer, kakršne se lahko poustvari v »kontroliranih« laboratorijskih razmerah (npr. večina metod za oceno kritičnih pretočnih hitrosti in kritičnih strižnih napetosti z vidika odpornosti posameznih zrnastih razredov ali rab tal). Podobno velja za hidrodinamične modele, ki so uporabljeni za modeliranje hidravličnih razmer in so bili večinoma razviti za hidravlično analizo vodotokov s sorazmerno majhnimi vzdolžnimi nakloni dna struge oz. nakloni energijske linije. Zato je treba opozoriti na kritično vrednotenje in ustrezno strokovno opredelitev do rezultatov tovrstnih analiz z ustrezno interpretacijo hidravličnih in erozijskih razmer s pomočjo rezultatov hidrodinamičnih modelov.

Na sliki 10.1 je podan osnovni shematski prikaz predlagane metodologije za oceno razvitosti erozijskih procesov in kartiranje erozijske nevarnosti na območjih poplavljanja celinskih voda in morja. V **Prilogi 1** je podan podrobnejši shematski prikaz predlagane metodologije za oceno erozijske nevarnosti celinskih voda in morja s povzetkom ključnih podatkovnih virov, postopkov in analiz, ki bo izdelovalcem tovrstnih analiz pomagala pri strokovni opredelitvi do pristopov. Kot ključen korak v metodologiji izpostavljam »Nivo 1«, kjer se izdelovalci analiz rečne erozije sistematično opredelijo do potencialne razvitosti procesov rečne erozije. Kot je podrobneje predstavljeno v poglavju 8.1, gre za opredelitev do hidroloških, topografskih, hidrogeoloških, geoloških, pedoloških razmer tako na prispevnem območju, kakor tudi na obravnavanem odseku vodotoka na podlagi različnih razpoložljivih podatkovnih virov.





**Slika 10.1:** Shematski prikaz predlagane metodologije za oceno razvitosti erozijskih procesov in kartiranje erozijske nevarnosti na območjih poplavljanja celinskih voda in morja.

V nadaljevanju v okviru sinteze metodologije podajamo osnovne usmeritve, ki bi po našem mnenju z vidikov (1) kompleksnosti procesov rečne erozije in erozije morja, (2) poznanega erozijskega dogajanja v preteklih poplavnih dogodkih in (3) pregleda pristopov za oceno procesov rečne erozije in erozije morja v nekaterih državah in nenazadnje prepoznanih pomanjkljivosti ustaljenih praks, pripomogli k procesno in strokovno bolj utemeljeni oceni pričakovanih prostorskih obsegov procesov rečne erozije in erozije morja ter njihove intenzitete. Tovrstne usmeritve bi lahko bile vključene v smernice za izdelavo tovrstnih analiz. Izpostavili bi predvsem naslednje:

**1)** Ocena *prevodnosti struge* (t.i. *strugotvornega pretoka* oz. angl. *bankfull discharge*) na obravnavanem odseku vodotoka. Pri pretokih, ki popolnoma zapolnijo glavno strugo, so običajno procesi rečne erozije lahko zelo intenzivni. Prevodnost struge je pomembna z vidika bistveno večje verjetnosti pojava erozijskih procesov, saj je povratna doba tovrstnih pretokov običajno krajša od povratnih dob pretokov, ki jih upoštevamo v hidrološko-hidravličnih analizah. To pomeni, da je celotno ostenje strug pogosteje podvrženo velikim hidravličnim obremenitvam, ki lahko glede na prepoznane

lokalne razmere in morebitno sosledje več manjših poplavnih dogodkov vodijo v intenzivnejše procese rečne erozije. Ob tem velja izpostaviti, da je povratna doba pretokov, ki jih struga vodotoka še prevaja na posameznih odsekih vodotokov, zelo spremenljiva ter odvisna od hidroloških in hidromorfoloških lastnosti ter različnih (ureditvenih) posegov v struge vodotokov. Poleg osnovnih hidroloških analiz, ki se v okviru hidrološko-hidravličnih študij opravijo za izrednotenje konic visokovodnih pretokov s povratno dobo 10-, 100- in 500-let skladno z Uredbo in Pravilnikom, je za analizo potenciala procesov rečne erozije na določenem odseku vodotoka zelo pomembno ovrednotenje verjetnosti pojava pretokov z vidika hidravlične prevodnosti struge. Izdelovalcem hidrološko-hidravličnih študij priporočamo, da se opredelijo do povratne dobe pretoka, ki ga je glavna struga vodotoka še sposobna prevajati (če so na voljo podatki verjetnostne analize pretokov). Če teh podatkov ni, naj se opredelijo, ali je prevodnost struge bistveno manjša od pretoka  $Q_{10}$ . V tem primeru je pojavnost tovrstnega pretoka pogosta, kar pomeni pogostejše hidravlične obremenitve ostenja struge, intenzivnejše procese rečne erozije in večjo verjetnost širitve erozijskih procesov izven vodnih zemljišč v obdajajoča poplavna območja. Če je prevodnost struge vodotoka bistveno manjša od 10-letne povratne dobe, je lahko glede na lokalne hidravlične razmere verjetnost intenzivnejših procesov rečne erozije povečana. Vsekakor se je ob zgoraj napisanem treba opredeliti tudi do drugih vidikov pojavnosti procesov rečne erozije pogojenih z lokalnimi hidravličnimi razmerami, stanjem obrežnih zavarovanj, geološke sestave, zrnastostne strukture tal, ki jih lahko ustrezno ovrednotimo na osnovi kombinacije terenskih ogledov in ustrezne interpretacije rezultatov hidravličnih izračunov in simulacij.

**2)** Iz točke 1 izhaja, da procesov rečne erozije in erozije morja ne smemo gledati samo skozi pojavnost poplavnega dogodka s konico določene povratne dobe. Skladno s trenutno veljavno zakonodajo je namreč treba obravnavati erozijske razmere in izdelati karte erozijske nevarnosti zgolj za primer poplavnega dogodka s konico pretoka  $Q_{100}$ . Obravnavo erozijskih razmer je treba razširiti vsaj na trenutno predpisane povratne dobe poplavnih dogodkov, torej na  $Q_{10}$  (in se skladno s točko 1 opredeliti do prevodnosti struge) in na  $Q_{500}$ . Obravnava poplavnega dogodka s povratno dobo  $Q_{500}$  lahko nudi dodaten vpogled v hidravlične razmere in oceno erozijskih razmer, kar velja z vidika razredov erozijske nevarnosti vsekakor upoštevati kot »preostalo« erozijsko nevarnost v prostoru. Interpretacija lokalnih hidravličnih razmer ob upoštevanju ekstremnega poplavnega dogodka (velikostni razred konice pretoka  $Q_{500}$ ) lahko poda dodatne dragocene informacije o potencialnih poplavnih in erozijskih razmerah. Tovrstne razmere se lahko pojavijo že pri poplavnih dogodkih krajših povratnih dob (npr.  $Q_{10}$  in  $Q_{100}$ ), ko se zaradi intenzivnih procesov premeščanja in odlaganja plavin poplavne vode lahko lokalno preusmerijo izven prvotno predvidenih dosegov poplavnih voda. Glede na podatke o kritičnih pretočnih hitrostih in kritičnih strižnih napetostih vezanih na erodibilnostne lastnosti in različne rabe tal na območjih poplavljanja, povzetih iz različne literature, priporočamo pri interpretaciji rezultatov hidravličnih izračunov z vidika potencialne razvitosti procesov rečne erozije (prevladujočih procesov odplavljanja erodiranega materiala) upoštevanje razredov kritičnih vrednosti pretočnih hitrosti ( $V_{krit}$ ) in strižnih napetosti ( $\tau_{krit}$ ) kot so povzete v Preglednici 10.1.

V povezavi s povratnimi dobami pretokov (npr.  $Q_{10}$  in  $Q_{100}$ ) priporočamo, da se na poplavnih območjih ob uporabi manj kompleksnih metod pripišejo razredi erozijske nevarnosti (upoštevanje kriterija globine odplavljanja erodiranega materiala skladno s Pravilnikom) kot je prikazano v Preglednici 10.2. Seveda je treba usmeritve predstavljene v Preglednici 10.2 upoštevati zgolj kot osnovno priporočilo. Za opredelitev do razredov poplavne nevarnosti je treba ustrezno interpretirati priporočene kritične vrednosti z vidika erodibilnostnih lastnosti in rabe tal na obravnavanem območju in potencialnih lokalnih hidravličnih razmer (npr. na podlagi rezultatov hidravličnih izračunov), ki bi lahko vodile v intenzivnejše procese rečne erozije.

**Preglednica 10.1:** Mejne kritične vrednosti pretočnih hitrosti ( $V_{krit}$ ) in strižnih napetosti ( $\tau_{krit}$ ) na podlagi priporočenih vrednosti iz literature.

Zelo erodibilne zemljine brez vegetacijskega pokrova	Manj erodibilne zemljine brez vegetacijskega pokrova	Zatravljena površina (slabše razvita travnata ruša)	Zatravljena površina (dobro razvita travnata ruša)	Pričakovani obsežnejši erozijski procesi ne glede na raba tal
$V_{krit} = 0,5-1 \text{ m/s}$ $\tau_{krit} = 1-5 \text{ N/m}^2$	$V_{krit} = 1 \text{ m/s}$ $\tau_{krit} = 5-10 \text{ N/m}^2$	$V_{krit} = 1-1,5 \text{ m/s}$ $\tau_{krit} = 10-50 \text{ N/m}^2$	$V_{krit} = 1,5-2 \text{ m/s}$ $\tau_{krit} = 50-100 \text{ N/m}^2$	$V_{krit} > 2 \text{ m/s}$ $\tau_{krit} > 100 \text{ N/m}^2$

**Preglednica 10.2:** Priporočeni razredi erozijske nevarnosti v povezavi s povratno dobo pretoka in hidravličnimi razmerami.

Hidravlične razmere	$V_{krit} = 0,5-1 \text{ m/s}$ $\tau_{krit} = 1-5 \text{ N/m}^2$	$V_{krit} = 1 \text{ m/s}$ $\tau_{krit} = 5-10 \text{ N/m}^2$	$V_{krit} = 1-1,5 \text{ m/s}$ $\tau_{krit} = 10-50 \text{ N/m}^2$	$V_{krit} = 1,5-2 \text{ m/s}$ $\tau_{krit} = 50-100 \text{ N/m}^2$	$V_{krit} > 2 \text{ m/s}$ $\tau_{krit} > 100 \text{ N/m}^2$	
$Q_{10}$	majhna	srednja	srednja	velika	velika	
$Q_{100}$	majhna	majhna	majhna	srednja	velika	velika

**3)** Kot ključni korak pri obravnavi nevarnosti rečne erozije in opredelitve erozijskega koridorja vodotoka izpostavljamo upoštevanje hidravličnih in posledično potencialnih razmer na območjih strug vodotokov (vodnih zemljiščih), ki so iz neznanega razloga iz večine praktičnih primerov analize poplavnih in erozijskih razmer ter prikazov kart poplavne in erozijske nevarnosti v raznih hidrološko-hidravličnih razmerah izvzeti. Ravno na območjih strug vodotokov so zaradi velikih hidravličnih obremenitev (preseženih kritičnih pretočnih hitrosti in kritičnih strižnih napetosti) procesi rečne erozije najintenzivnejši. Ob tem se erozijsko dogajanje iz območij strug vodotokov predvsem kot posledica lokalnih hidravličnih razmer razširi na obdajajoča (poplavna) območja, čemur smo priča ob praktično vsakih večjih poplavnih dogodkih. V pod poglavju 10.1 zato predstavljamo kratek povzetek rezultatov analiz prostorskega obsega procesov rečne erozije v poplavnem dogodku 2023 z vidika prepoznanih območij odplavljanja in odlaganja erodiranega materiala. V poglavju 10.2 podajamo primerjavo rezultatov analize procesov rečne erozije z vidika odplavljanja in odlaganja materiala z uporabo manj kompleksnih in kompleksnejših metod (Nivo 2).

**4)** Uporaba manj kompleksnih in kompleksnejših metod za analizo erozije morja je odvisna predvsem od namena in velikosti območja, ki ga preučujemo. Pri manj kompleksnih metodah dobimo osnovni pregled, ki je mišljen za splošno kvalitativno merilo, medtem ko so kompleksnejše metode usmerjene v kvantitativno analizo erozijskih procesov (izračuna prostornin, meritve premikov ipd.) in za projektiranje sanacijskih in protierozijskih ukrepov. Med manj kompleksne analize, ki jih lahko izvedemo relativno hitro, lahko uvrstimo terenske in kabinetne preglede območij in ocene erozijske ogroženosti odsekov z GIS pristopi, pri katerih lahko večino vplivnih faktorjev pridobimo iz obstoječih podatkov in analizo erozijske dovzetnosti opravimo v GIS okolju. Manj kompleksne analize so torej namenjene splošnemu pregledu razmer z ciljem ugotavljanja potencialne erozijske nevarnosti, v nadaljevanju pa uporabimo rezultate za izrednotenje t.i. indeksov, kjer osnovne parametre kamnin, podnebja, erozijskih dejavnikov ipd. sestavimo v razrede nevarnosti, ranljivosti, ogroženosti, in

tveganja, in jih nato prikažemo na kartah v GIS okolju z barvno lestvico (večinoma se uporabljajo barvni odtenki od zelene za varna območja preko rumene in oranžne do rdeče, ki predstavlja nevarnost oz. bolj ogrožene predele).

V nadaljevanju podajamo nekaj predlogov, v katerih primerih bi priporočili uporabo ali vsaj preizkus kompleksnejših metod za analizo procesov rečne erozije in erozije morja:

**1)** Odsek vodotoka se nahaja na območju pomembnega vpliva poplav, pri čemer se opredelimo do potencialnega sproščanja erozijskega materiala v povirnih delih (npr. prisotnost aktivnih erozijskih žarišč) in razvitosti procesov rečne erozije oz. erozije morja (navezava na točko 3).

**2)** Na obravnavanih odsekih vodotokov oz. odsekih obale morja, kjer so bili v preteklih (poplavnih) dogodkih ugotovljeni zelo intenzivni procesi rečne erozije oz. erozijski procesi morja predvsem z vidika poškodb grajenega okolja (kritične infrastrukture, večjega števila objektov idr.) in/ali se za odseke vodotokov domneva, da je dotok plavin iz gorvodnih aktivnih erozijskih žarišč zelo velik.

**3)** Na podlagi ocenjenih prostorskih obsegov območij potencialno intenzivnih procesov erozije na zalednih prispevnih območjih (npr. na podlagi opozorilne karte verjetnosti pojavljanja ploskovne erozije, opozorilne karte pojavljanja zemeljskih plazov in drobirskih tokov) je ocenjen razred velike erozijske nevarnosti oz. je skupni delež razreda velike in srednje erozijske nevarnosti večji od določenega deleža skupne površine prispevnega območja oz. odseka obale morja. Pri tem je morebitni dodatni kriterij tudi ocena povezanosti erozijskih žarišč z rečno mrežo (npr. z indeksom povezljivosti, slika 2.13).

**4)** Na strmih odsekih strug vodotokov, kjer je na podlagi začetne opredelitve na nivoju 1 (npr. opozorilna karta verjetnosti pojavljanja linijske erozije) ocenjen velik potencial intenzivnih procesov linijske erozije na določenem deležu skupne dolžine obravnavanega odseka vodotoka. Pri tem je treba v strokovno presojo vključiti tudi morebitne že izvedene protierozijske ukrepe oziroma obrežna zavarovanja.

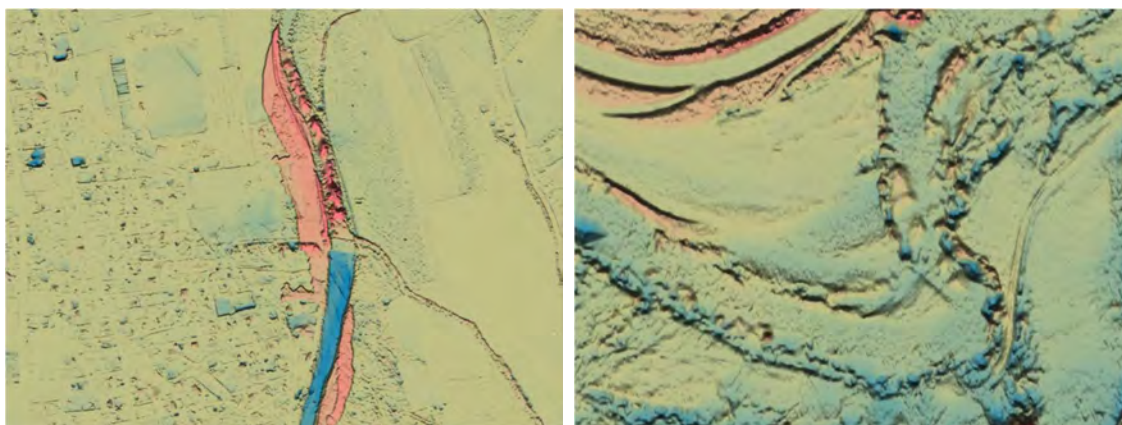
**5)** V primerih kompleksnih analiz erozije morja se predlaga usmeritev predvsem v manjša erozijsko aktivna območja, kjer opravimo analizo erozijske nevarnosti za vsako pod-območje preko meritev diskontinuitet (predvsem razpok, prelomov in lezik med plasti), preučimo lastnosti plasti in predvsem izvajamo natančne meritve spreminjanja reliefa na odseku. Diskontinuitete namreč vplivajo na stopnjo poškodovanosti kamnine, ki posledično vpliva na stopnjo erozijske dovzetnosti. Več izmerjenih parametrov omogoča tudi dodaten vpogled v te dovzetnosti, zato je potrebno tudi pridobiti čim več podatkov za relevantnost končnih rezultatov. Drug sklop kompleksnejših metod pa je namenjen ugotavljanju stopnje erozije kamnin, za katero potrebujemo ničelno meritev in nadaljnje meritve sprememb površja kamnin. Za to uporabljamo natančne meritve v rangi vsaj centimetrskemu natančnosti, ki jih lahko zagotovimo s fotogrametrijo (brezpilotnim letalnikom oz. SfM) ali z lidarskim skeniranjem površja (prav tako s brezpilotnim letalnikom (ALS) ali s terestričnim skenerjem (TLS), ki je zaradi pravokotnosti meritev na vertikalna pobočja kamnin bolj primeren kot ALS in tudi kot tehnologija InSAR). Sistematične analize lahko delamo v enakih časovnih intervalih (npr. nekajkrat letno), ali občasno (npr. po večjih padavinskih dogodkih ali obsežnejšemu poplavljanju morja). Iz razlik v površju med časovnimi posnetki izračunamo prostorninske spremembe v času, dobimo pa tudi vpogled v lokacije kritičnih območij, kje so erozijski procesi bolj intenzivni.

## 10.1 Vpogled v dosege procesov rečne erozije v poplavnem dogodku 2023

V tem poglavju želimo s pomočjo rezultatov analiz ocenjenih prostorskih obsegov procesov rečne erozije utemeljiti priporočilo, naj se v analizo poplavnih in erozijskih razmer vključi čim več



razpoložljivih terenskih podatkov o preteklem dogajanju v času poplav (podrobnejše usmeritve, predstavljene v poglavju 8.1). Pričujočo analizo prostorskih dosegov procesov rečne erozije smo izvedli s pomočjo poligonov vodnih zemljišč celinskih voda. Na ta način smo lahko ocenili prostorske dosege erozijskih procesov z vidika območij odplavljanja/odlaganja erodiranega materiala, ki običajno vodijo v spremenjene trase strug vodotokov in s tem tudi v spremembe območij vodnih zemljišč. Da bi predstavili prostorski obseg in intenziteto procesov rečne erozije v poplavnih dogodkih, v nadaljevanju prikazujemo rezultate analize erozijskih procesov vzdolž struge Kamniške Bistrice v poplavnem dogodku 2023. Osnovno izhodišče za opredelitev dimenzij erozijskih zajed je bil spremenjen potek struge vodotoka, predvsem poteka brežin. Primerjali smo meje poligonov območij vodnih zemljišč (območja glavne struge vodotoka) s potekom brežin struge po poplavnem dogodku avgusta 2023. Kot osnovni vhodni podatek za analize smo izdelali podatkovni sloj višinskih razlik terena in primerjali digitalna modela višin, izdelana na osnovi lidarskega snemanja Slovenije v letih 2014/2015 in LiDARskega snemanja neposredno po poplavnem dogodku 2023, ki je bil izveden 7. in 8. avgusta 2023. Ocenili smo obsege območij odplavljanja in odlaganja erodiranega materiala. Kot okvirne mejne vrednosti za opredelitev območij odplavljanja in odlaganja smo upoštevali razlike v višinah terena v rangi vsaj 20-30 cm v kombinaciji z razpoznavnimi sledmi erozijskih zajed (območij odplavljanja) in odlaganja plavin iz ortofoto posnetkov neposredno po poplavnem dogodku 2023. Na sliki 10.2. sta prikazana dva primera ugotovljenih višinskih razlik na območju pred in po poplavnem dogodku. Na območjih, obarvanih rdeče, so se nivoji terena po poplavnem dogodku znižali. Modro obarvana območja prikazujejo površine, na katerih se je erodiran material odlagal, nivoji terena na teh območjih so po poplavnem dogodku višji.

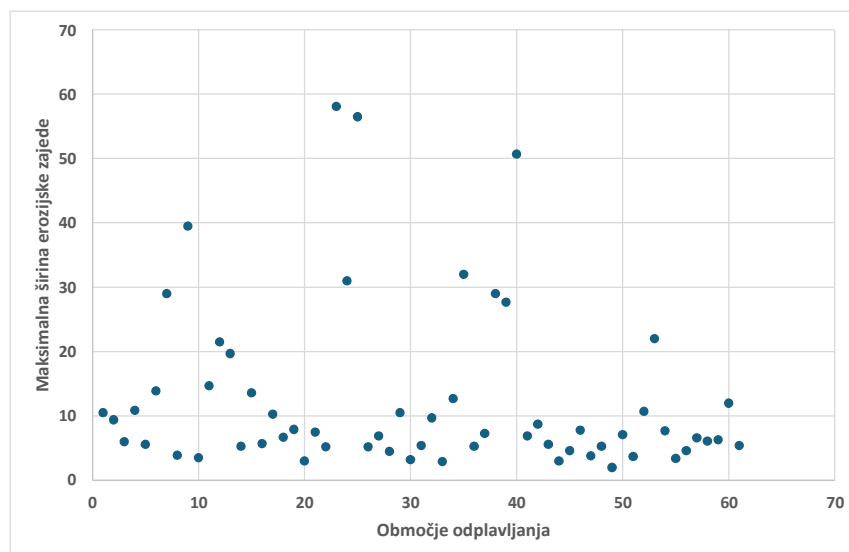


**Slika 10.2:** Primer območij intenzivnih procesov rečne erozije. Rdeče obarvana območja so območja odplavljanja erodiranega materiala in poglobljanja, modro obarvana območja so območja odlaganja erodiranega materiala.

Modro so obarvani številni odseki strug vodotokov. Ob tem velja opozoriti, da je na nekaterih odsekih vodotokov (predvsem v povirnih delih) to posledica dejanskega odlaganja velikih količin erodiranega materiala v strugah. Na številnih odsekih vodotokov pa so ugotovljeni višji nivoji terena posledica višjih gladinskih stanj v strugah vodotokov in posledica dejstva, da je bilo lidarsko snemanje neposredno po poplavnem dogodku (7. in 8. avgusta 2023) izvedeno v vegetacijskem obdobju. V času izvajanja lidarskega snemanja so bili pretoki vodotokov vzdolž večine prizadetih območij še vedno relativno visoki. Sklepamo, da so bile posledično višine gladin v času snemanja na številnih odsekih še vedno precej višje, kot so bile gladine v obdobjih snemanja v letih 2014/2015. Prav tako so bile na številnih poplavnih območjih, ki jih prekriva strnjen vegetacijski pokrov, zaznani višji nivoji terena, ki so najverjetneje posledica vpliva vegetacije na zaznavanje površja z lidarskim snemanjem. Glede na navedeno menimo, da je določitev območij odlaganja (zaradi manjših debelin odloženega materiala,

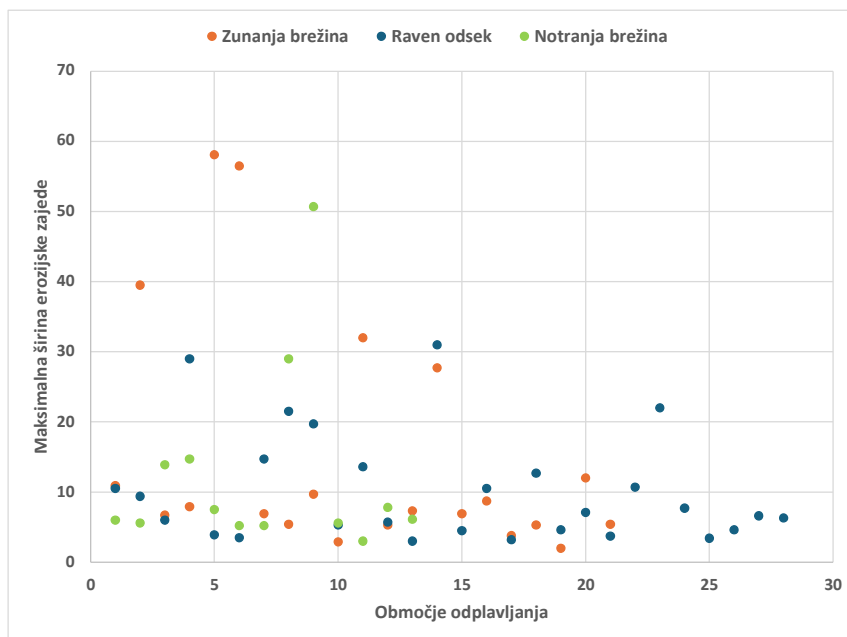
vpliva gladinskih stanj na območjih strug vodotokov in vpliva vegetacijskega pokrova) podvržena precej večjim negotovostim kot ocena prostorskega dosega območij odplavljanja. Intenzivnejši procesi odplavljanja so bili zaznani predvsem na območjih v neposredni bližini rečnih strug. Na obdajajočih poplavnih območjih so bila ponekod območja intenzivnejšega odplavljanja erodiranega materiala prepoznana zgolj na posameznih lokacijah, kjer je zaradi lokalnih hidravličnih razmer (npr. zagodenja plavja na premostitvenih objektih ali obtakanja jezovnih zgradb) prišlo do intenzivnejših preusmeritev poplavnih voda na poplavna območja. Na poplavnih območjih so prevladovali procesi odlaganja erodiranega materiala, kar se najizraziteje dogaja predvsem v obdobjih upadanja konic poplavnih voda, ob umikanju poplavnih voda s poplavnih površin, upočasnjevanju vodnega toka in zmanjšanju premestitvene zmogljivosti tako za rinjene kot lebdeče plavine.

Na sliki 10.3 so prikazane ocenjene maksimalne širine erozijskih zajed vzdolž struge Kamniške Bistrice v času poplavnega dogodka avgusta 2023. Na osnovi razlik v DMV-jih pred in po poplavnem dogodku je bilo prepoznanih 57 območij večjih erozijskih zajed (odplavljanja materiala). Večina maksimalnih širin erozijskih zajed je bila v razredu do 10 m (38 prepoznanih erozijskih zajed), torej znotraj 15 m pasu priobalnega zemljišča na vodah 1. reda. Kar nekaj erozijskih zajed pa je bilo dimenzijsko bistveno obsežnejših, maksimalne širine erozijskih zajed so ponekod segale več 10 m od meje območja vodnega zemljišča, maksimalna širina erozijske zajed je bila ocenjena na nekaj manj kot 60 m.

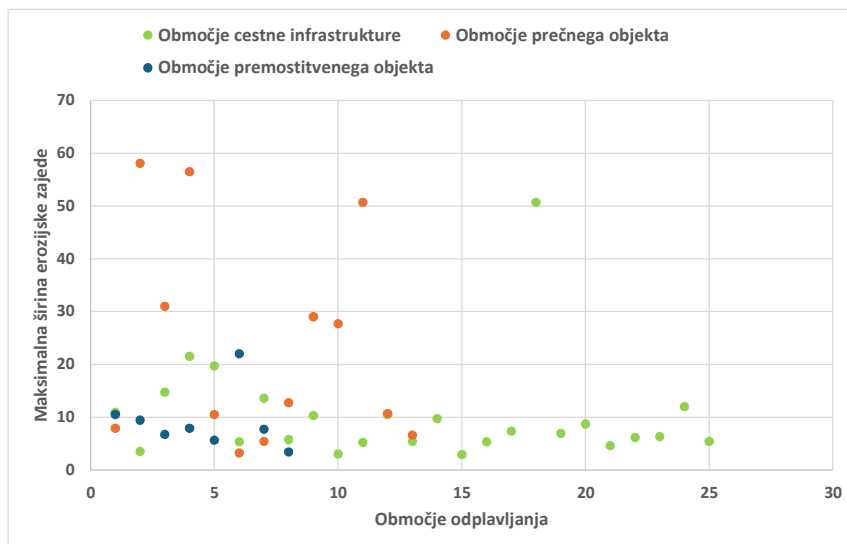


**Slika 10.3:** Ocenjene maksimalne širine erozijskih zajed (območja odplavljanja) vzdolž struge Kamniške Bistrice.

Če podrobneje razdelamo prepoznana območja odplavljanja glede na lokalne hidromorfološke lastnosti (npr. tlorisni potek strug vodotoka pred poplavnim dogodkom 2023), lahko iz slike 10.4 razberemo, da so se pričakovano najintenzivnejši erozijski procesi (v smislu maksimalnih širin erozijskih zajed) pojavili ob zunanjih brežinah rečnih zavojev. Ob tem velja izpostaviti, da so se obsežne erozijske zajed, katerih širine so presegale nekaj 10 m, pojavile tudi na ravnih odsekih vodotokov in celo na območjih notranjih strani rečnih zavojev. Slika 10.5 prikazuje maksimalne širine erozijskih zajed glede na lokalno prisotnost vodne in ostale infrastrukture na lokacijah erozijskih zajed, kot so premostitveni objekti in prečne (jezovne) zgradbe ter neposredna bližina cestne infrastrukture.



**Slika 10.4:** Ocenjene maksimalne širine erozijskih zajed glede na lokalne hidromorfološke lastnosti (prvoten tlorisni potek struge vodotoka).



**Slika 10.5:** Ocenjene maksimalne širine erozijskih zajed glede na lokalno prisotnost vodne in ostale infrastrukture na lokacijah erozijskih zajed.

Tovrstni intenzivni procesi rečne erozije so posledica predvsem lokalnih hidravličnih razmer v času poplavnih dogodkov, ki jih je z metodami hidrodinamičnega modeliranja oz. modeliranja premeščanja plavin praktično nemogoče natančno simulirati in napovedati. Lahko se pa na osnovi preteklega erozijskega dogajanja in ob prepoznanih hidravličnih razmerah pri simuliranju poplavnih razmer pri različnih povratnih dobah poplavnih dogodkov opozori na potencialne lokacije (kot je prikazano v okviru predstavitve rezultatov nekaterih primerov v poglavju 9), kjer bi lahko bil potencial za intenzivnejše oblike procesov rečne erozije večji.

## 10.2 Primerjava rezultatov manj kompleksnih in kompleksnejših metod

V nadaljevanju v okviru sinteze predlagane metodologije predstavljamo primerjavo ocenjenih prostorskih obsegov območij rečne erozije ob uporabi manj kompleksnih in kompleksnejših metod za analizo procesov rečne erozije. Interpretacija rezultatov je bila narejena na osnovi razredov erozijske nevarnosti, ki so bili opredeljeni skladno s Pravilnikom. Primerjava je bila izdelana za testni odsek vodotoka Hrastnica. Za obravnavani odsek je bil izdelan 2D hidrodinamični model, ki je bil umerjen glede na poznane poplavne razmere v poplavnem dogodku 2023. Rezultate hidravličnega modeliranja za poplavni dogodek s konico pretoka v rangi  $Q_{100}$  smo za ta primer navezali na ocenjene mejne vrednosti hidravličnih obremenitev (maksimalne pretočne hitrosti in strižne napetosti z upoštevanjem vidika nevarnosti odplavljanja materiala), kot je prikazano na sliki 10.6. Osnovna predpostavka za izdelavo tovrstne karte erozijske nevarnosti je, da gre na obravnavanem odseku za prevladovanje procesov rečne erozije v smislu nevarnosti odplavljanja materiala, kar je glede na teoretične pristope in tehnične prakse pogost pristop k obravnavi procesov rečne erozije. Tovrstni rezultati v predlagani metodologiji predstavljajo manj kompleksne analize procesov rečne erozije na osnovi rezultatov hidravličnega modeliranja. Iz slike 10.6 lahko vidimo, da je na podlagi modeliranih hidravličnih obremenitev zaradi velikih naklonov dna struge ocenjen prostorski obseg območja velike erozijske nevarnosti za celotno območje glavne struge in lokalno tudi za območja izven struge. Precejšen je tudi prostorski obseg območij srednje erozijske nevarnosti. Pri interpretaciji razredov erozijske nevarnosti v smislu debelin odplavljenega ali nanešenega materiala se je treba zavedati, da je debelina sloja tesno povezana s hkratno časovno dinamiko poplavnega dogodka (trajanje dogodka), intenzivnejšega odlaganja erodiranega materiala v obdobjih upadanja pretokov in dinamike dotoka plavin iz gorvodnih odsekov. Obseg razredov rečne erozije, prikazan na sliki 10.6, predstavlja potencialen kritični primer intenzivnih procesov odplavljanja, ki bi jih lahko pričakovali v teoretičnem primeru dolgega trajanja poplavnega dogodka in ob zanemarljivem dotoku plavin iz gorvodnih odsekov.



**Slika 10.6:** Primer ocene razredov erozijske nevarnosti (upoštevanje kriterija odplavljanja materiala) ob upoštevanju maksimalnih hidravličnih obremenitev iz hidravlične simulacije.

Kot je bilo podrobneje predstavljeno v poglavju 9.2.2, je bilo dejansko erozijsko dogajanje na obravnavanem odseku Hrastnice v času poplavnega dogodka avgusta 2023 (ki je bil primerljiv s poplavnim dogodkom  $Q_{100}$ ) precej drugačno, kot je prikazano na sliki 10.6. V času poplavnega dogodka 2023 je bil dotok plavin iz gorvodnih odsekov zaradi intenzivnih erozijskih procesov v povirnih delih praktično neomejen. Lokalno so bile zaznane poglobitve dna struge na posameznih krajših odsekih do 1,5 m. Vrednost 1,5 m je bila v modelu kot notranji pogoj za transport sedimentov definirana kot maksimalna dovoljena poglobitev erodibilne podlage. Rezultati modela so predstavljeni v poglavju 9.2.2 (primer testiranja kompleksnejše metode za oceno procesov rečne erozije). To seveda pomeni, da smo z vidika kriterijev za opredelitev razredov erozijske nevarnosti skladno s Pravilnikom izključili



možnost pojava razreda velike erozijske nevarnosti. Zaradi upoštevanja sedimentnega robnega pogoja neomejenega dotoka sedimentov iz gorvodnih odsekov (equilibrium load) je bilo izrazito prevladovanje procesov odlaganja plavin. Slika 10.7 prikazuje stanje na koncu simulacije. Interpretacija rezultatov 2D premeščanja plavin kaže na manjšo erozijsko nevarnost na obravnavanem odseku zaradi velike količine odloženih plavin, ki se v sami simulaciji (in v dejanskih poplavnih dogodkih) intenzivno odlagajo predvsem v obdobjih upadanja pretokov po konicah poplavnih dogodkov. Razred velike in srednje erozijske nevarnosti se pojavlja predvsem na območju glavne struge vodotoka, le na posameznih manjših območjih sega razred srednje erozijske nevarnosti izven območja glavne struge. Tovrstni rezultati ne vključujejo morebitnih intenzivnejših procesov odplavljanja materiala v času koničnih pretokov (npr. v obdobjih največjih hidravličnih obremenitev), ki so bili glede na opažene terenske razmere vzdolž posameznih lokacij intenzivno prisotni v poplavnem dogodku avgusta 2023. Podatkovni sloji v .shp formatu, ki so prikazani na slikah 10.6 in 10.7 so podani v Prilogi 2.



**Slika 10.7:** Primer ocene razredov erozijske nevarnosti ob upoštevanju rezultatov 2D modela premeščanja plavin.

Primeri erozijske nevarnosti prikazana na slikah 10.6 in 10.7 kažeta na razhajanja pri interpretaciji razredov erozijske nevarnosti na podlagi različnih kriterijev. Če se do rezultatov hidravličnih izračunov opredeljujemo zgolj na osnovi modeliranih hidravličnih obremenitev, izvednotenih s hidravličnim modelom (manj kompleksne metode), je izdelovalcu tovrstnih analiz prepuščena ocena potencialne debeline odplavljenega oz. odloženega sloja erodiranega materiala skladno s Pravilnikom.

## 11. ZAKLJUČKI

V poročilu so predstavljeni rezultati analiz procesov rečne erozije in erozije morja izvedeni v okviru CRP projekta št. V2-2371, z naslovom »Razvoj metodologije za oceno razvitosti erozijskih procesov in kartiranje erozijske nevarnosti na območjih poplavljanja celinskih voda in morja«. Na podlagi izvedenega pregleda literature s področja procesov rečne erozije in erozije morja ter nekaterih tujih pristopov k analizi nevarnosti rečne erozije in erozije morske obale, smo v okviru razvoja metodologije prilagojene za razmere v Sloveniji, predstavili usmeritve za oceno intenzivnosti erozijskih procesov in kartiranje območij erozijske nevarnosti celinskih voda in morja. Metodologija je v osnovi zasnovana na dveh »nivojih«.

Nivo 1 predstavlja izhodišče za začetno opredelitev do stopnje zahtevnosti analize procesov rečne erozije in erozije morja v zakonodajnem okviru prepoznavanja erozijske nevarnosti celinskih voda in morja. Osnovni namen izvedbe začetne opredelitve do potencialne razvitosti procesov rečne erozije je v prvi vrsti sistematičen pregled nad morebitnimi razpoložljivimi podatki o erozijskem potencialu prispevnega območja ter morebitnimi podatki o preteklih procesih rečne erozije oz. erozijskem dogajanju v času preteklih poplavnih dogodkov na obravnavanih odsekih vodotokov. Pri tem smo izhajali iz splošne opredelitve erozijskih območij, in sicer da so to območja, kjer so prisotni vidni erozijski procesi in hkrati vključujejo površine, na kateri (glede na trenutne razmere) ni vidnih erozijskih procesov, vendar se ti lahko pojavijo predvsem v času ekstremnih hidroloških razmer, neugodnih hidrogeoloških razmer oz. zaradi antropogeno pogojenih dejavnikov (npr. spremenjene rabe zemljišč). Na Nivoju 1 je predvideno, da se izdelovalci tovrstnih analiz sistematično opredelijo do hidroloških, topografskih, hidrogeoloških, hidromorfoloških, geoloških in pedoloških razmer na zalednem prispevnem območju in na obravnavanem odseku vodotoka.

Na podlagi opredelitev na Nivoju 1 se nadalje izdelovalci tovrstnih analiz usmerijo v manj kompleksne metode za območja, kjer je pričakovan obseg/intenziteta erozijskih procesov celinskih voda in morja majhen/zmeren oz. v kompleksnejše metode za območja, kjer je pričakovan obseg/intenziteta erozijskih procesov celinskih voda in morja velik. Ob naraščajoči kompleksnosti analiz erozijskih procesov celinskih voda in morja izrazito naraščajo tudi zahteve glede kvalitetnih vhodnih podatkov.

Pri manj kompleksnih analizah procesov rečne erozije je poudarek na uporabi in nadgradnji vhodnih podatkov, ki so običajno razpoložljivi in uporabljeni za izdelavo hidrološko-hidravličnih študij, v okviru katerih se analizira prostorski obseg poplavne nevarnosti. Kjer so na razpolago podatki hidrometričnih meritev pretokov in hidravličnih razmer (hitrosti vodnega toka in smeri gibanja vodnega toka) na posameznih lokacijah kot vir najbolj verodostojnih vhodnih podatkov, je treba tovrstne podatke vključiti v interpretacijo in analizo rezultatov hidravličnega modeliranja. Pri kompleksnejših analizah procesov rečne erozije in erozije obale morja je poudarek na uporabi novih orodij za modeliranje premeščanja plavin, kot so 2D modeli premeščanja plavin, oz. v primerih erozije morja, na detajlnjših meritvah na nivoju meritev diskontinuitet, preučitvi lastnosti plasti in predvsem izvajanju meritev spreminjanja reliefa na erozijsko aktivnih odsekih obale.

Eden od glavnih zaključkov projekta je, da bo treba v prihodnosti procesom rečne erozije in erozije morja nameniti bistveno več pozornosti v okviru izdelave t.i. hidrološko-hidravličnih študij in ostalih analiz. Prvi korak k temu je skladno s predlagano metodologijo v okviru manj kompleksnih metod nadgraditi obstoječe hidravlične izračune in simulacije s podrobnejšo interpretacijo hidravličnih razmer, ki lahko na določenih lokacijah vodijo v intenzivnejše procese rečne erozije. Programska orodja, ki omogočajo modeliranje premeščanja plavin, so sorazmerno nova in zahtevajo veliko vhodnih podatkov in modelnih predpostavk, njihova uporaba in izrednotenje verodostojnih rezultatov o pričakovanih procesih rečne erozije je zahtevno. Kljub temu priporočamo, da se posamezni odseki

vodotokov, ki so poznani kot kritični z vidika intenzitete procesov rečne erozije oz. se jih opredeli na podlagi predlaganih kriterijev, analizirajo tudi s pomočjo tovrstnih kompleksnejših metod ob zavedanju potencialnih negotovosti, povezanih s tovrstnimi analizami.

## VIRI

- Addy, S., Cooksley, S., Dodd, N., International Union for the Conservation of Nature (IUCN) National Committee UK (NCUK), & Scotland's Centre of Expertise for Waters (CREW). (2016). *River restoration and biodiversity: nature-based solutions for restoring the rivers of the UK and Republic of Ireland*. IUCN NCUK.
- Admassu, Y., in sod. (2012). "Evaluating selected factors affecting the depth of undercutting in rocks subject to differential weathering." *Engineering Geology* 124: 1-11.
- Agencija Republike Slovenije za okolje (ARSO). 2009. Povratne dobe ekstremnih padavin po Gumbelovi metodi.
- Alewell, C., Borrelli, P., Meusburger, K., Panagos, P., 2019. Using the USLE: Chances, challenges and limitations of soil erosion modelling. *Int. Soil Water Conserv. Res.* 7, 203–225. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2019.05.004>
- Ancey, C., 2020. Bedload transport: a walk between randomness and determinism. Part 1. The state of the art. *J. Hydraul. Res.* 58, 1–17. <https://doi.org/10.1080/00221686.2019.1702594>
- ASFPM Riverine Erosion Hazards Working Group 2016. "ASFPM riverine erosion hazards white paper," February 2016, [https://asfpm-library.s3-us-west2.amazonaws.com/ASFPM\\_Pubs/ASFPM\\_Riverine\\_Erosion\\_White\\_Paper\\_2016.pdf](https://asfpm-library.s3-us-west2.amazonaws.com/ASFPM_Pubs/ASFPM_Riverine_Erosion_White_Paper_2016.pdf)
- Batista, P.V.G., Davies, J., Silva, M.L.N., Quinton, J.N., 2019. On the evaluation of soil erosion models: Are we doing enough? *Earth-Science Rev.* 197. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.102898>
- Basegrain (2019). Dostopno na: <https://basement.ethz.ch/download/tools/basegrain.html>
- Beck J.R. 2006. Streambank erosion hazard mapping: concepts, methodology and application on the Venoge river (Switzerland). *Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, Lausanne*.
- Behrens, A., Carraro, M., Georgiev, A. (2010). *Future impacts of climate change across Europe*. CEPS.
- Belletti, B., Rinaldi, M., Buijse, A. D., Gurnell, A. M., Mosselman, E. (2015). A review of assessment methods for river hydromorphology. *Environmental Earth Sciences*, 73, 2079-2100.
- Berghuijs, W., Woods, R., Hutton, C., and Sivapalan, M. (2016). Dominant Flood Generating Mechanisms Across the United States. *Geophys. Res. Lett.* 43(9): 4382-4390.
- Bezzola G.R. 2014. Vorlesungsskript Flussbau, Professur für Wasserbau, Eidgenössische Technische Hochschule ETH Zürich.
- Bezak, N., 2016. Povezanost fluvialnega premeščanja suspendiranih snovi z drugimi hidrološkimi procesi. University of Ljubljana.
- Bezak, N., Borrelli, P., Mikoš, M., Jemec Auflič, M., Panagos, P., 2024. Towards multi-model soil erosion modelling: An evaluation of the erosion potential method (EPM) for global soil erosion assessments. *CATENA* 234, 107596. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107596>
- Bezak, N., Panagos, P., Liakos, L., Mikoš, M., 2023. Brief communication: A first hydrological investigation of extreme August 2023 floods in Slovenia, Europe. *EGU sphere* 2023, 1–13. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2023-1979>
- Bezak, N., Rusjan, S., Petan, S., Sodnik, J., Mikoš, M., 2015. Estimation of soil loss by the WATEM/SEDEM model using an automatic parameter estimation procedure. *Environ. Earth Sci.* 74, 5245–5261. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4534-0>
- Bezak, N., Sodnik, J., Maček, M., Jurček, T., Jež, J., Peternel, T., Mikoš, M., 2021. Investigation of potential debris flows above the Koroška Bela settlement, NW Slovenia, from hydro-technical and conceptual design perspectives. *Landslides* 18, 3891–3906. <https://doi.org/10.1007/s10346-021-01774-7>



- Bezak, N., Grigillo, D., Urbančič, T., Mikoš, M., Petrovič, D., & Rusjan, S., 2017. Geomorphic response detection and quantification in a steep forested torrent. *Geomorphology*, 291, 33-44. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.06.034>
- Bezak, N., Šraj, M., Mikoš, M., 2016. Analyses of suspended sediment loads in Slovenian rivers. *Hydrol. Sci. J.* 61. <https://doi.org/10.1080/02626667.2015.1006230>.
- Blasone, G., Cavalli, M., Marchi, L., Cazorzi, F., 2014. Monitoring sediment source areas in a debris-flow catchment using terrestrial laser scanning. *Catena* 123, 23–36. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.07.001>.
- Blazewicz, M., Jagt, K. and Sholtes, J. 2020. "Colorado Fluvial Hazard Zone Delineation Protocol Version 1.0". Colorado Water Conservation Board.
- Borrelli, P., Alewell, C., Alvarez, P., Anache, J. A. A., Baartman, J., Ballabio, C., ... & Panagos, P. (2021). Soil erosion modelling: A global review and statistical analysis. *Science of the total environment*, 780, 146494.
- Borrelli, P., Alewell, C., Yang, J. E., Bezak, N., Chen, Y., Fenta, A. A., ... & Panagos, P. (2023). Towards a better understanding of pathways of multiple co-occurring erosion processes on global cropland. *International Soil and Water Conservation Research*, 11(4), 713-725.
- Borrelli, P., Panagos, P., Alewell, C., Ballabio, C., de Oliveira Fagundes, H., Haregeweyn, N., ... & Robinson, D. A. (2023). Policy implications of multiple concurrent soil erosion processes in European farmland. *Nature Sustainability*, 6(1), 103-112.
- Bracken, L.J., Turnbull, L., Wainwright, J., Bogaart, P., 2015. Sediment connectivity: A framework for understanding sediment transfer at multiple scales. *Earth Surf. Process. Landforms* 40, 177–188. <https://doi.org/10.1002/esp.3635>
- Brenčič, M., Keršmanc, T., Dolžan, E., Vidmar, I., Torkar, A., 2013. Geološki pogled na vzroke in posledice poplav leta 2012 na Ptujskem polju. Mišičev vodarski dan 2013.
- Brierley, G.J., and Fryirs, K. (2005). *Geomorphology and River Management: Applications of the River Styles Framework*. Blackwell Publishing.
- Brierley, G., & Fryirs, K. (2022). Truths of the Riverscape: Moving beyond command-and-control to geomorphologically informed nature-based river management. *Geoscience Letters*, 9(1), 1-26.
- Budetta, P., in sod. (2000). "A methodology for the study of the relation between coastal cliff erosion and the mechanical strength of soils and rock masses." *Engineering Geology* 56(3-4): 243-256.
- Bunte, K., Abt, S.R., Potyondy, J.P., Swingle, K.W. (2009). Comparison of three pebble count protocols (EMAP, >PIBO, and SFT) in two mountain gravel-bed streams. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* 45, 1209–1227.
- Carey BW, Stone B, Norman PL, Shilton P (2015) Chapter 11 - Stream stability. *Soil conservation guidelines for Queensland*, Department of Science, Information Technology and Innovation, Brisbane.
- Castro J.M., Jackson P.L. (2001) Bankfull discharge recurrence intervals and regional hydraulic geometry relationships patterns in the Pacific Northwest, USA. *Journal of the American Water Resources Association* 37(5): 1249–1262.
- Cavalli, M., Trevisani, S., Comiti, F., Marchi, L., 2013. Geomorphometric assessment of spatial sediment connectivity in small Alpine catchments. *Geomorphology* 188, 31–41. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.05.007>.
- Cendrero, A., Remondo, J., Beylich, A.A., Cienfiala, P., Forte, L.M., Golosov, V.N., Gusarov, A. V, Kijowska-Strugała, M., Laute, K., Li, D., Navas, A., Soldati, M., Vergari, F., Zwoliński, Z., Dixon, J.C., Knight, J., Nadal-Romero, E., Płaczkowska, E., 2022. Denudation and geomorphic change in the Anthropocene; a global overview. *Earth-Science Rev.* 233, 104186. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.104186>

- Charlton, R., 2008, Fundamentals of fluvial geomorphology. Routledge, Abingdon, Združeno kraljestvo. 264p. ISBN 0-203-37108-9.
- Chow, V. T. 1959. Open – Channel Hydraulics. New York, McGraw – Hill, Inc: 680 str.
- Church, M. (1995). Geomorphic response to river flow regulation: Case studies and time scales. *Regulated Rivers: Research & Management*, 11(1): 3-22.
- Ciaccioni, A., Bezak, N., & Rusjan, S. (2016). Analysis of rainfall erosivity using disdrometer data at two stations in central Slovenia. *Acta hydrotechnica*, 29(51), 89-101.
- Cislaghi, A., Chiaradia, E.A., Bischetti, G.B. (2016). A comparison between different methods for determining grain distribution in coarse channel beds. *International Journal of Sediment Research* **31(2)**, 97–107. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2015.12.002>.
- Coldwell, A. E. (1957). Importance of Channel Erosion as a Source of Sediment. *Transactions, American Geophysical Union*, 38(6), 908–912.
- Craswell, T., & Akib, S. (2020). Reducing Bridge Pier Scour Using Gabion Mattresses Filled with Recycled and Alternative Materials. *Eng*, 1(2), 188–210. <https://doi.org/10.3390/eng1020013>.
- Cruden, D.M., Varnes, D.J., 1996. Landslide types and processes, in: Turner, A.K., Schuster, R.L. (Eds.), *Landslides, Investigation and Mitigation*, Special Report 247. Transportation Research Board, Washington D.C., pp. 36–75.
- Davy, P., & Lague, D. (2009). Fluvial erosion/transport equation of landscape evolution models revisited. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 114
- Deal, E., Braun, J., & Botter, G. (2018). Understanding the role of rainfall and hydrology in determining fluvial erosion efficiency. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 123(4), 744-778.
- Del Río, L. and F. J. Gracia (2009). "Erosion risk assessment of active coastal cliffs in temperate environments." *Geomorphology* 112(1-2): 82-95.
- Detert, M., Weitbrecht, V. (2013). User guide to gravelometric image analysis by Basegrain. 8.
- Direktiva 2007/60/ES Evropskega parlamenta in Sveta z dne 23. oktobra 2007 o oceni in obvladovanju poplavne ogroženosti (2007). UL L št. 288, 27.
- Donovan, M., and Belmont, P. (2019). Timescale dependence in river channel migration measurements. *Earth Surface Processes and Landforms*, 44:8,1530-1541. DOI: 10.1002/esp.4590
- Dolenc, T., 2025. Hidravlično modeliranje erozijskih razmer na odseku Hrastnice s predlogom idejne zasnove ureditve po poplavnem dogodku avgusta 2023. Magistrska naloga, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.
- DRSV, 2022. Strategija odvzema naplavin na porečju reke Save, projektna naloga, Direkcija Republike Slovenije za vode.
- Dunne, T., and Leopold, L. (1978). *Water in Environmental Planning*. Macmillan.
- Duró, G., Crosato, A., Kleinhans, M. G., & Uijttewaal, W. S. (2018). Bank erosion processes measured with UAV-SfM along complex banklines of a straight mid-sized river reach. *Earth Surface Dynamics*, 6(4), 933-953.
- DURJAVA, Darjo, RIBIČIČ, Mihael, KLABUS, Aleš, PAPEŽ, Jože, LAJEVEC, Domen, JERIHA, Žiga, FUJS, Zoran, JERŠIČ, Tadej, GALIČ, Rajko, ČERNIVEC, Janko, PAVŠEK, Miha, ZORN, Mitja. Opozorilne karte območij snežnih plazov in opozorilne karte nevarnosti erozije za območja nekaterih občin v Sloveniji. Ljubljana: EHO Projekt d.o.o., 2012.
- DWA, 2021. Merkblatt DWA-M 921 - Bodenerosion durch Wasser - Kartieranleitung zur Erfassung aktueller Erosionsformen (4/2021). Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA).

- Đurović, B., Ribičič, M., Mikoš, M. (2005). RHDM procedure for analysis of the potential specific risk due to a rockfall hazard. *Geologija*, 48(1), 33-51.
- DRSV, (2022). Strokovna ocena analize transporta plavin (Izdelek 9). Strategija odzema naplavin na porečju reke Save – poročilo.
- EHO, (2024). Izdelava podatkovnih slojev s področja erozije v okviru projekta Zeleni slovenski lokacijski okvir (SLO4D), Enotno poročilo.
- Elahi, A. T., Hosseini, M. (2017). Analysis of blasted rocks fragmentation using digital image processing (case study: limestone quarry of Abyek Cement Company). *International Journal of Geo-Engineering* 8: 16.
- FAN (2015). Empfehlung zur Beurteilung der Gefahr von Ufererosion an Fließgewässern. [www.fan-info.ch](http://www.fan-info.ch) bzw.
- Federal Interagency Stream Restoration Working Group (FISRWG). (1998). Stream corridor restoration: Principles, processes, and practices. Federal Interagency Stream Restoration Working Group.
- Fehr, R. (1987). Geschiebeanalysen in Gebirgsflüssen: Umrechnung und Vergleich von verschiedenen Analyseverfahren. Mitteilungen Nr. 92, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich, Switzerland.
- FEMA. (1999). *Riverine Erosion Hazard Areas Mapping Feasibility Study*.
- Fischenich, J. C. (2001). Stability thresholds for stream restoration materials (p. 10). US Army Engineer Research and Development Center [Environmental Laboratory].
- Florsheim, J. L., Mount, J. F., & Chin, A. (2008). Bank Erosion as a Desirable Attribute of Rivers. In *BioScience* (Vol. 58, Issue 6). [www.biosciencemag.org](http://www.biosciencemag.org).
- Fryirs, K., (2013). (Dis)Connectivity in catchment sediment cascades: a fresh look at the sediment delivery problem. *Earth Surf. Process. Landforms* 38, 30–46. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/esp.3242>.
- Furlani, S., in sod. (2022). "Integrated Geomechanical and Digital Photogrammetric Survey in the Study of Slope Instability Processes of a Flysch Sea Cliff (Debeli Rtič Promontory, Slovenia)." *Land* 11(12).
- Gavrilović, S., 1970. Savremeni načini proračunavanja bujičnih nanosa i izrada karata erozije, in: Seminar Erozijska, Bujični Tokovi i Rečni Nanos. Belgrade, pp. 85–100.
- GEOZS, 2005. Analiza pojavljanja plazov v Sloveniji in izdelava karte verjetnosti plazenj. Poročilo Geološkega Zavoda Slovenije, 143 str.
- Gilbert, J.T., Macfarlane, W.W., Wheaton, J.M., 2016. The Valley Bottom Extraction Tool (V-BET): A GIS tool for delineating valley bottoms across entire drainage networks. *Comput. Geosci.* 97, 1–14. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cageo.2016.07.014>.
- Gilson Company. (2019). Dostopno na: <https://www.globalgilson.com/gilson-testing-screen>.
- Giordanengo, J., Mandel, R., Spitz, W. in sod. 2016. *Living Streambanks: A Manual of Bioengineering Treatments for Colorado Streams*: 160 str.
- Globevnik, L. (2001). Celosten pristop k urejanju voda v povodjih. Doktorska disertacija. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana, 176 str.
- Gobiet, A., Kotlarski, S., Beniston, M., Heinrich, G., Rajczak, J., & Stoffel, M. (2014). 21st century climate change in the European Alps-A review. *Science of the Total Environment*, 493, 1138–1151. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.07.050>.
- Gornitz, V. (1991). "Global coastal hazards from future sea level rise." *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 89(4): 379-398.

- Gornitz, V. M., in sod. (1994). "The Development of a Coastal Risk Assessment Database: Vulnerability to Sea-Level Rise in the U.S. Southeast." *Journal of Coastal Research*: 327-338.
- Grams, P., and Schmidt, J.C.(2002). Streamflow Regulation and Multi-level Flood Plain Formation: Channel Narrowing on the Aggrading Green River in the Eastern Uinta Mountains, Colorado and Utah. *Geomorphology*, 44(3-4): 337-360.
- Grangeon, T., Gracianne, C., Favreau, Y., Vandromme, R., Dupeux, G., Cerdan, O., Rohmer, J., Evrard, O., Salvador-Blanes, S., 2023. Catchment-scale variability and driving factors of fine sediment deposition: insights from a coupled experimental and machine-learning-based modeling study. *J. Soils Sediments* 23, 3620 – 3637. <https://doi.org/10.1007/s11368-023-03496-w>.
- Gregory, K. and Walling, D. (1968). The Variation of Drainage Density within a Catchment. *Hydrological Sciences Journal* 13(2): 61-68.
- Hajdukiewicz, H., & Wyzga, B. (2023). Analysis of historical changes in planform geometry of a mountain river to inform design of erodible river corridor. *Ecological Engineering*, 186, 106821.
- Hancock, G.S., Anderson, R.S., Whipple, K.X. (1998) Beyond Power: Bedrock River Incision Process and Form. In *Rivers over Rock: Fluvial Processes in Bedrock Channels*, Geophysical Monograph 107, American Geophysical Union.
- HEC RAS, 2021. HEC-RAS User's Manual, v. 6.0. [WWW Document]. URL <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation.aspx>.
- Hauer C., Habersack H. 2002. The effects of a catastrophic flood event on the morphodynamics of an Austrian River. Vienna. BOKU University of Natural Resources Applied Live Sciences. [http://www.kamptal-flusslandschaft.at/download/Hauer\\_Habersack\\_2005.pdf](http://www.kamptal-flusslandschaft.at/download/Hauer_Habersack_2005.pdf)
- Hrvat, M., Ciglič, R., Lóczy, D., Zorn, M., 2019. Determination of erosion in low hills of Northeast Slovenia with gavrilovič equation; [Določanje erozije v gričevjih severovzhodne slovenije z gavrilovičevo enačbo]. *Geogr. Vestn.* 91, 105 – 124. <https://doi.org/10.3986/GV91206>.
- HMZ SRS. 1970. Gibanje transporta suspendiranega materiala vzdolž reke Save od V.P. Prebačeve do V.P. Čatež za leto 1965 in 1967. Hidrometeorološki zavod SRS. Poročilo.
- Holman-Dodds, J., Bradley, A., and Potter, K. (2003). Evaluation of Hydrologic Benefits of Infiltration Based Urban Storm Water Management. *Journal of the American Water Resources Association* 39(1): 205-215.
- Horvat, A., & Zemljič, M. (1991). Problematika urejanja hudourniških območij. *Gradbeni vestnik*, 41, 1-2.
- Hungr, O., Leroueil, S., Picarelli, L., 2014. The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides* 11, 167–194. <https://doi.org/10.1007/s10346-013-0436-y>.
- Hunzinger L. und Durrer S.: Seitenerosion. in Bezzola G.R., Hegg C. (Ed.) 2008. Ereignisanalyse Hochwasser 2005, Teil 2 – Analyse von Prozessen, Massnahmen und Gefahregrundlagen. Bundesamt für Umwelt BAFU, Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL. Umwelt-Wissen Nr. 0825: 429 S.
- ISJ, 2018. Fluvial Erosion Hazards in Indiana. Indiana Silver Jackets Report.
- ISRM, (1974). The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974-2006 – The Blue Book <https://isrm.net/isrm/page/show/935>.
- ISRM, (1978): »Suggested methods for the Quantitative description of Discontinuities in Rock Masses«.
- ISRM, (2007). The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007-2014 – The Orange Book. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-07713-0>.
- IZVRS in PUH, (2011). Opozorilna karta erozije – III. faza, Končno poročilo;- Št. proj. IV - 09 /2011.



- Janes, V. J. J., Nicholas, A. P., Collins, A. L., & Quine, T. A. (2017). Analysis of fundamental physical factors influencing channel bank erosion: results for contrasting catchments in England and Wales. *Environmental Earth Sciences*, 76(7). <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6593-x>.
- Janicke, S., 2002, Stream channel and floodplain erosion, Report No. RR18, Water and River Commission, Western Australian Government - Department of Environment, ISBN: 9780730975946.
- Janssen, S.R., (2010). Testing sediment transport models under partial transport conditions. Enschede, University of Twente, Water Engineering and Management: 111 str.
- Jemec Auflič, M., Šinigoj, J., Krivic, M., Podboj, M., Peternel, T., Komac, M., 2016. Landslide prediction System for rainfall induced landslides in Slovenia (Masprem). *Geologija* 59, 259–271. <https://doi.org/10.5474/geologija.2016.016>.
- Jesenovec, S., (1995). 110 let organiziranega hudourničarstva na Slovenskem 1884-1994. PUH – Podjetje za urejanje hudournikov.
- Julien, P.Y. (2002) River Mechanics. Cambridge Univ. Press, Cambridge. <http://dx.doi.org/10.1017/CBO9781139164016>
- Juarez-Lucas, A. M., Kibler, K. M., Sayama, T., & Ohara, M. (2019). Flood risk-benefit assessment to support management of flood-prone lands. *Journal of Flood Risk Management*, 12(3), e12476.
- Kirkby, M.J., Irvine, B.J., Jones, R.J.A., Govers, G., Boer, M., Cerdan, O., Daroussin, J., Gobin, A., Grimm, M., Le Bissonnais, Y., Puigdefabregas, J., Van Lynden, G., (2008). The PESERA coarse scale erosion model for Europe. I. - Model rationale and implementation. *Eur. J. Soil Sci.* 59, 1293–1306. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2008.01072.x>
- KIS, 2020. Erozijska tal v Sloveniji.
- Klaneček, M. (2013). Poplave 5. novembra 2012 v porečju Drave. *Ujma*, (27), 52-61.
- Kolbezen, M. (1992) Velike poplave in povodnji na Slovenskem, *Ujma* No. 6, Ljubljana, pp. 214–219.
- Kolega, N., Poklar, M. 2012: Morfološka analiza slovenske obale s podatki lidarskega in sonarskega snemanja. *Acta geographica Slovenica*, 52/1, 121–140.
- Kolega, N., Prelec, P. 2016: Določanje kratkoročnih sprememb na klifu med Fieso in Pacugom s podatki letalskega lidarja. *Dela* 45, 31–48.
- Korpar, J., Juvan, S., Kos, M., Volkar, N., Štern, K., 2013. Sanacija brežin na odvodnem kanalu HE Formin. *Mišičev vodarski dan* 2013.
- KSH. 1997. Hidromorfološka presoja območja sotočja Pišence in Save Dolinke. Katedra za splošno hidrotehniko, FGG, poročilo.
- Langhammer, J., Lendzioch, T., Miřijovský, J., Hartvich, F. (2017). UAV-Based Optical Granulometry as Tool for Detecting Changes in Structure of Flood Depositions. *Remote Sensing* 9(3), 240. <https://doi.org/10.3390/rs9030240>.
- Lazar, A., Beguš, T., Vulić, M. 2018. Monitoring of the Belca rockfall. *Acta Geotechnica Slovenica*, 2, 1-15.
- Ledbetter Ferrill, N. S. and D. A. Ferrill (2021). "Influence of mechanical layering and natural fractures on undercutting and rapid headward erosion (recession) at Canyon Lake spillway, Texas, U.S.A." *Engineering Geology* 280.
- Lenzi, M.A., Mao, L., Comiti, F., 2004. Magnitude-frequency analysis of bed load data in an Alpine boulder bed stream. *Water Resour. Res.* 40, 12. <https://doi.org/10.1029/2003wr002961>.
- Lenzi, M.A., Marchi, L., 2000. Suspended sediment load during floods in a small stream of the Dolomites (northeastern Italy). *Catena* 39, 267–282. [https://doi.org/10.1016/s0341-8162\(00\)00079-5](https://doi.org/10.1016/s0341-8162(00)00079-5).

- Li, X., Cooper, J. R., & Plater, A. J. (2021). Quantifying erosion hazards and economic damage to critical infrastructure in river catchments: Impact of a warming climate. *Climate Risk Management*, 32. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2021.100287>.
- Li, P., Mu, X., Holden, J., Wu, Y., Irvine, B., Wang, F., Gao, P., Zhao, G., Sun, W., 2017. Comparison of soil erosion models used to study the Chinese Loess Plateau. *Earth-Science Rev.* 170, 17–30. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.05.005>
- Loat R. und Petrascheck A. 1997. Empfehlungen zur Berücksichtigung der Hochwassergefahren bei raumwirksamen Tätigkeiten. Bundesamt für Wasserwirtschaft BWB, Bundesamt für Raumplanung BRP, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL.
- Lu, H., Moran, C.J., Prosser, I.P., 2006. Modelling sediment delivery ratio over the Murray Darling Basin. *Environ. Model. Softw.* 21, 1297–1308. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2005.04.021>.
- Magilligan, F. (1992). Thresholds and the spatial variability of flood power during extreme floods. *Geomorphology* 5(3-5): 373-390.
- Marchi, L., D'Agostino, V. 2002: Estimation of debris-flow magnitude in the eastern Italian Alps. *Earth Surface Processes and Landforms* 29. Chichester.
- Massé, S., Demers, S., Besnard, C., Buffin-Bélanger, T., Biron, P. M., Choné, G., & Massey, W. (2020). Development of a mapping approach encompassing most fluvial processes: Lessons learned from the freedom space for rivers concept in Quebec (Canada). *River Research and Applications*, 36(6), 947-959.
- Matič, M. (2019). Primerjava dveh metod za analizo slik za določitev zrnivosti grobih agregatov in sedimentov. Unpublished master thesis. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 140 p. (in Slovenian). Dostopno na: <https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=110383&lang=slv>.
- Matte, D., Larsen, M. A. D., Christensen, O. B., & Christensen, J. H. (2019). Robustness and scalability of regional climate projections over Europe. *Frontiers in Environmental Science*, 7(JAN). <https://doi.org/10.3389/fenvs.2018.00163>
- Matthes, G. H. (1947). Macroturbulence in natural stream flow. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 28(2), 255-265.
- Meunier, M. (1998). *Eléments d'hydraulique torrentielle*. Quae.
- Meadows, J., Emtage, N., & Herbohn, J. (2014). Engaging Australian small-scale lifestyle landowners in natural resource management programmes - Perceptions, past experiences and policy implications. *Land Use Policy*, 36, 618–627. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2013.10.016>.
- Mikoš, M. 2000. Prodna bilanca reke Save od Jeseni do Mokric. *Gradbeni vestnik*, 49, 208-219.
- Mikoš, M., Fazarinc, R., Ribičič, M., 2006. Sediment production and delivery from recent large landslides and earthquake-induced rock falls in the Upper Soca River Valley, Slovenia. *Eng. Geol.* 86, 198–210. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2006.02.015>
- Mikoš, M. 2007. Urejanje vodotokov: skripta. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za splošno hidrotehniko: 200 str.
- Mikoš, M., Jemec-Auflič, M., Jež, J., Bezak, N., 2022. Rock Frost Weathering and Rockfall Activity Assessment in Slovenia, in: Peranić, J., Arbanas, Ž. (Eds.), *Proceedings of the 5th Regional Symposium on Landslides*. pp. 137–144.
- Mikoš, M., Jemec, M., Ribičič, M., Čarman, M., Komac, M., 2013. Earthquake-Induced Landslides in Slovenia: Historical Evidence and Present Analyses, in: Ugai, K., Yagi, H., Wakai, A. (Eds.), *Earthquake-Induced Landslides*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 225–233.

- Müller-Hagmann, M., Albayrak, I., Auel, C., & Boes, R. M. (2020). Field investigation on hydroabrasion in high-speed sediment-laden flows at sediment bypass tunnels. *Water (Switzerland)*, 12(2). <https://doi.org/10.3390/w12020469>.
- Najafi, S., Dragovich, D., Heckmann, T., Sadeghi, S.H., 2021. Sediment connectivity concepts and approaches. *CATENA* 196, 104880. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104880>.
- Nearing, M.A., Yin, S.-Q., Borrelli, P., Polyakov, V.O., 2017. Rainfall erosivity: An historical review. *Catena* 157, 357–362. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.06.004>.
- Niemann, W. L. (2009). "Lessons Learned from Rates of Mudrock Undercutting Measured over Two Time Periods." *Environmental and Engineering Geoscience* 15(3): 117-131.
- NRM, 2014, Managing Waterways, NRM South Natural Resource Management, Landholder series property planning guide.
- NUV (2016). Načrt upravljanja voda na vodnem območju Jadranskega morja za obdobje 2016–2021. Ministrstvo RS za okolje in prostor.
- Oplatka M. 1998. Stabilität von Weidenverbauungen an Flussufern. Mitteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich.156.
- Panagos, P., Borrelli, P., Poesen, J., Ballabio, C., Lugato, E., Meusburger, K., Montanarella, L., Alewell, C., 2015. The new assessment of soil loss by water erosion in Europe. *Environ. Sci. Policy* 54, 438–447. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.08.012>.
- Parker, G., & Garcia, M.H. (Eds.). (2005). *River, Coastal and Estuarine Morphodynamics: Proceedings of the 4th IAHR Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics (RCEM 2005, Urbana, Illinois, USA, 4-7 October 2005) (1st ed.)*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781439833896>.
- Parker, C., & Davey, J. (2023). Stream power indices correspond poorly with observations of alluvial river channel adjustment. *Earth Surface Processes and Landforms*, 48(6), 1290-1304.
- Parsons, A.J., Wainwright, J., Mark Powell, D., Kaduk, J., Brazier, R.E., 2004. A conceptual model for determining soil erosion by water. *Earth Surf. Process. Landforms* 29, 1293–1302. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/esp.1096>
- Petan, S., 2010. Measurements and spatial modelling of rainfall erosivity as a soil erosion factor. University of Ljubljana (PhD thesis).
- Peternel, T., Kumelj, Š., Oštir, K., Komac, M., 2017. Monitoring the Potoška planina landslide (NW Slovenia) using UAV photogrammetry and tachymetric measurements. *Landslides* 14, 395–406. <https://doi.org/10.1007/s10346-016-0759-6>.
- Petit, F., & Pauquet, A. (1997). Bankfull discharge recurrence interval in gravel-bed rivers. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Group*, 22(7), 685-693.
- Piégay, H., Darby, S. E., Mosselman, E., & Surian, N. (2005). A review of techniques available for delimiting the erodible river corridor: A sustainable approach to managing bank erosion. In *River Research and Applications* (Vol. 21, Issue 7, pp. 773–789). <https://doi.org/10.1002/rra.881>.
- Pierson, F., Robichaud, P., and Spaeth, K.E. (2001). Spatial and temporal effects of wildfire on the hydrology of a steep rangeland watershed. *Hydrol. Processes* 15(15): 2905-2916.
- Piltaver, P. (2015). Primerjava pretočnosti Želimeljščice med leti 1985 in 2015 (Dipl. naloga, Univerza v Ljubljani).
- Pintar, J., Mikoš, M., Verbovšek, V., 1986. Elementi okolju prilagojenega urejanja vodotokov – alternativa utesnjevanju živih naravnih procesov v toge objekte, in: Zbornik 2. Kongresa o Vodah Jugoslavije. Ljubljana, pp. 800–814.

- Piton, G., Recking, A. (2015). Design of Sediment Traps with Open Check Dams. I: Hydraulic and Deposition Processes. *Journal of Hydraulic Engineering* 142(2), 04015045. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001048](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001048).
- Pivk, A., 2023. Analiza erozijske nevarnosti poplavnih površin z uporabo 2D hidravličnega modela premeščanja sedimentov. Magistrska naloga, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.
- Prašnikar, K. Analiza padanja kamenja v Zalivu sv. križa pri Strunjanu : diplomsko delo. Ljubljana, 2016. VII, 51 f., pril., ilustr., priloge. <https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=87626>.
- Pravilnik o metodologiji za določanje območij, ogroženih zaradi poplav in z njimi povezane erozije celinskih voda in morja, ter o načinu razvrščanja zemljišč v razrede ogroženosti (Ur. l. RS, št. 60/07),
- PUH, 1994. Pogubna razigranost – 110 let organiziranega hudourničarstva na Slovenskem 1884–1994. Ljubljana, Podjetje za urejanje hudournikov: 276 str.
- PUH, 1999. Sinteza vodnogospodarski vsebin kot podlaga za zasnovo prostorskega razvoja na nivoju države - Zasnova za prostorski plan Republike Slovenije za področje erozije. Podjetje za urejanje hudournikov.
- PUH, 2008. Opozorilna karta erozije – I. faza, končno poročilo. Podjetje za urejanje hudournikov d.d., 220 str.
- PUH, 2010. Opozorilna karta erozije – II. faza, končno poročilo. Podjetje za urejanje hudournikov d.d., 57 str.
- PUH, 2011. Opozorilna karta erozije – III. faza, končno poročilo. Podjetje za urejanje hudournikov d.d., 149 str.
- Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A., McCool, D.K., Yoder, D.C., 1997. Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE), Agricultural Handbook. U.S. Department of Agriculture, Washington.
- Rangel-Buitrago, N. and G. Anfusio (2015). Risk Assessment of Storms in Coastal Zones: Case Studies from Cartagena (Colombia) and Cadiz (Spain).
- Requena R. 2008. Seitenerosion in kiesführenden Flüssen – Prozessverständnis und quantitative Beschreibung. Mitteilung 210, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), Hrsg. Eidgenössische Technische Hochschule ETH Zürich.
- Ricci, G.F., De Girolamo, A.M., Abdelwahab, O.M.M., Gentile, F., 2018. Identifying sediment source areas in a Mediterranean watershed using the SWAT model. *L. Degrad. Dev.* 29, 1233–1248. <https://doi.org/10.1002/ldr.2889>.
- Robert, A. (2014). River processes: an introduction to fluvial dynamics. Routledge.
- Robinson, B.A., 2013. Recent (circa 1998-2011). Channel Migration Rates of Selected Streams in Indiana. U.S. Geological Survey, Scientific Investigations Report 2013-5168, 14 p. and appendix.
- Romang H. (Ed.) 2008: Wirkung von Schutzmassnahmen. Teil F Flüsse. Nationale Plattform für Naturgefahren PLANAT, Bern. 289 S.
- Rosgen, D.L., 1996. Applied River Morphology. Wildland Hydrology.
- Rosgen, D. L., 2001. A Stream Channel Stability Assessment Methodology. In Proceedings of the Seventh Federal Interagency Sedimentation Conference: Vol 1, (II, 18-36). Reno, NV.
- Sánchez-Rodríguez, A. R., Hill, P. W., Chadwick, D. R., & Jones, D. L. (2017). Crop residues exacerbate the negative effects of extreme flooding on soil quality. *Biology and fertility of soils*, 53(7), 751-765.
- Schmautz M. 2003. Eigendynamische Aufweitung in einer geraden Gewässerstrecke. Bericht Nr. 96 der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft der Technischen Universität München.
- Scobey, F. C. (1933). The flow of water in flumes (No. 393). US Department of Agriculture.



- Shahriar, A. R., Ortiz, A. C., Montoya, B. M., & Gabr, M. A. (2021). Bridge Pier Scour: An overview of factors affecting the phenomenon and comparative evaluation of selected models. In *Transportation Geotechnics* (Vol. 28). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.tgrgeo.2021.100549>.
- Shook, D., Rathburn, S., Friedman, J., and Wolf, J. (2017). A 184-year record of river meander migration from tree rings, aerial imagery, and cross sections. *Geomorphology*. 293A:227-239. [doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.06.001](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.06.001)
- SIST EN ISO 14689-1, (2018). Geotehnično preiskovanje in preizkušanje – Prepoznavanje in razvrščanje kamnin 1.del: Prepoznavanje in opisovanje.
- Split-Desktop. (2019). Split-Desktop Software. Dostopno na: <https://www.spliteng.com/products/split-desktop-software/> (pridobljeno 31. 8. 2019).
- Sodnik, J., Mikoš, M., 2010. Modeling of a debris flow from the Hrenovec torrential watershed above the village of Kropa - Modeliranje drobirskega toka v hudourniškem območju Hrenovec nad Kropo. *Acta Geogr. Slov.* 50, 59–84. <https://doi.org/10.3986/AGS50103>.
- Sodnik, J., Mikoš, M., 2006. Estimation of magnitudes of debris flows in selected torrential watersheds in Slovenia. *Acta Geogr. Slov.* 46, 93–123. <https://doi.org/https://doi.org/10.3986/AGS46104>.
- Sodnik, J. (2009). Matematično modeliranje drobirskih tokov in priprava podrobnih kart nevarnosti. Unpublished master thesis. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 218 p.
- Soulsby, R.L., and R. J.S. W Whitehouse. 1997. Threshold of sediment motion in coastal environments. In, *Proceedings Pacific Coasts and Ports '97 Conference*, 1, 149154. New Zealand: Christchurch, University of Canterbury.
- Surian, N. (2015). Fluvial processes in braided rivers. *Rivers—Physical, Fluvial and Environmental Processes*, 403-425.
- Šegina, E., Komac, B., Zorn, M. 2012: Vplivni dejavniki umikanja flišnih klifov na slovenski obali: *Acta geographica Slovenica*, 52/2, 303–334.
- Taddia, Y., in sod. (2020). "Coastal Mapping Using DJI Phantom 4 RTK in Post-Processing Kinematic Mode." *Drones* 4(2).
- Taddia, Y., in sod. (2019). "Using Dji Phantom 4 Rtk Drone for Topographic Mapping of Coastal Areas." *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLII-2/W13*: 625-630.
- Takei, A. 1984: Interdependence of sediment budget between individual torrents and river-system. *Interpreavent 1984 – Villach*, Vol. 2. Villach.
- Thompson, G., Turk, J., 1997, *Introduction to physical geology*. Brooks Cole, Kalifornija, ZDA. ISBN: 978-0030243486.
- Thorne, C.R., Hey, R.D., Newson, M.D., 1997. *Applied Fluvial Geomorphology for River Engineering and Management*. Chichester.
- Turowski, J.M., Rickenmann, D., Dadson, S.J., 2010. The partitioning of the total sediment load of a river into suspended load and bedload: a review of empirical data. *Sedimentology* 57, 1126–1146. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.2009.01140.x>
- Tursi, M. F., in sod. (2022). "A Methodological Tool to Assess Erosion Susceptibility of High Coastal Sectors: Case Studies from Campania Region (Southern Italy)." *Water* 15(1).
- Uredba o pogojih in omejitvah za izvajanje dejavnosti in posegov v prostor na območjih, ogroženih zaradi poplav in z njimi povezane erozije celinskih voda in morja (Ur. l. RS, št. 89/08 in 49/20).
- US Army Corps of Engineers (USACE) (2024a). HEC – RAS Hydraulic Reference Manual.
- US Army Corps of Engineers (USACE) (2024b). HEC – RAS 2D Sediment User's Manual.
- Van Rijn, L. C. (1984). Sediment transport, part I: bed load transport. *Journal of hydraulic engineering*, 110(10), 1431-1456.

- Varnes, D.J., 1978. Slope movement types and processes, in: Schuster, R.L., Krizek, R.J. (Eds.), *Landslides, Analysis and Control*, Special Report 176: Transportation Research Board. National Academy of Sciences, Washington, DC, pp. 11–33.
- van Rijn, L.C. 2007a. Unified view of sediment transport by currents and waves. Part I: Initiation of motion, bed roughness, and bed-load transport. *Journal of Hydraulic Engineering* 133(6): 649-667.
- van Rijn, L.C. 2007b. Unified view of sediment transport by currents and waves. Part II: Suspended Transport. *Journal of Hydraulic Engineering* 133(6): 668-689.
- van Rijn, L.C. 1993. Principles of sediment transport in river, estuaries, coastal seas, and oceans. International Institute for Infrastructural, Hydraulic, and Environmental Engineering, Delft, The Netherlands.
- van Rijn, L.C. 1984a. Sediment transport, Part I: Bed load transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE 110(10): 1431-1456.
- van Rijn, L.C. 1984b. Sediment transport, Part II: Suspended load transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE 110(11): 1613-1641.
- van Rijn, L.C. 1984c. Sediment transport: Part III: Bed form sand alluvial roughness. *Journal of Hydraulic Engineering* 110(12), 1,733-1,754.
- Vázquez-Tarrío, D., Ruiz-Villanueva, V., Garrote, J., Benito, G., Calle, M., Lucía, A., & Díez-Herrero, A. (2024). Effects of sediment transport on flood hazards: Lessons learned and remaining challenges. *Geomorphology*, 446. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2023.108976>.
- Verbovšek, Timotej, Rožič, Boštjan, Žvab Rožič, Petra, Vrabec, Marko, Debevec Jordanova, Galena, Dolenc, Matej, Fifer Bizjak, Karmen, Bezak, Nejc, Mikoš, Matjaž, Kuzmanič, Tamara, Kregar, Klemen, Kozmus Trajkovski, Klemen, Žagar, Dušan, 2021. Ocena relativne erodibilnosti klifov na Slovenski obali. V: Rožič, Boštjan (ur.). *Razprave, poročila = Treatises, reports : 25. posvetovanje slovenskih geologov = 25th Meeting of Slovenian Geologists*. 25. posvetovanje slovenskih geologov = 25th Meeting of Slovenian Geologists, Ljubljana, october, 2021. Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta, Oddelek za geologijo, 2021. Str. 146-147. *Geološki zbornik*, 26. ISSN 0352-3802.
- Verbovšek, Timotej, Rožič, Boštjan, Dolenc, Matej, Debevec Jordanova, Galena, Božič, Mateja, Fifer Bizjak, Karmen, 2023. Factors influencing the depth of undercutting of flysch beds in the coastal cliffs of Slovenia and the resulting rockfall. V: *Landslide science for sustainable development : proceedings of the 6th World Landslide Forum : Florence Italy, 14-17 November 2023 : abstract book*. Firenze: OIC, 2023. Str. 568.
- Vietz, G. J., Lintern, A., Webb, J. A., & Straccione, D. (2018). River Bank Erosion and the Influence of Environmental Flow Management. *Environmental Management*, 61(3), 454–468. <https://doi.org/10.1007/s00267-017-0857-9>
- VGI. 1982. Letne količine proda Save (Krško), Savinje (Laško) in Sopot (Žebnik). Vodnogospodarski inštitut – Vodogradbeni laboratorij, poročilo.
- VGI. 1995. Vodnogospodarski načrt povodja Save Dolinke – pritoki na območju od Jesenic do Rateč. Vodnogospodarski inštitut, poročilo.
- VGI. 1997a. Prodišča Save Dolinke. Vodnogospodarski inštitut, poročilo.
- VGI. 1997b. Ureditveni načrt sotočja Save Dolinke in Pišence. Vodnogospodarski inštitut, poročilo.
- VGO, 1973. Vodnogospodarske osnove Slovenije.- Zveza vodnih skupnosti Slovenije, Strokovna služba.
- Vietz, G., Walsh, C., and Fletcher, T. (2016). Urban hydrogeomorphology and the urban stream syndrome: Treating the symptoms and causes of geomorphic change. *Progress in Physical Geography* 40(3): 480-492.
- Vrabec, M. and B. Rožič (2014). E1-A – Strukturne in sedimentološke posebnosti obalnih klifov. 4. Slovenian Geological Congress. Abstracts and field trips. = 4. Slovenski geološki kongres. Povzetki in ekskurzije. 8.-10.10.2024. B. Rožič,

- T. Verbovšek and M. Vrabc. Ankaran, Slovenia, University of Ljubljana, Faculty of Natural Sciences and Engineering: 84-91.
- Vrabc, M. and G. Jordanova (2017). "Analysis of systematic fracturing in Eocene flysch of the Slovenian coastal region." *Geologija* 60(2): 199-210.
- Vrabc, M., Rožič, B. 2014: E1-A – Strukturne in sedimentološke posebnosti obalnih klifov. V: (uredniki Rožič, B., Verbovšek, T., Vrabc, M.) Vodič ekskurzije E1-A, Povzetki in ekskurzije, 4. Slovenski geološki kongres, Ankaran, 8.–10. oktober 2014, 84–91.
- Vrščaj, B, Kolmanič, A., Germšek, B. s sodelavci (2023). Predlogi za vodeno in organizirano ukrepanje in sanacijo KZ in vrtov. Spremeni dokument k Remediacija poplavljenih tal in ravnanje z muljem na kmetijskih zemljiščih in vrtovih. Ukrepi za remediacijo in sanacijo poplavljenih tal v letu 2023. Kmetijski inštitut Slovenije.
- Walling, D.E., 1983. The sediment delivery problem. *J. Hydrol.* 65, 209–237. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(83\)90217-2](https://doi.org/10.1016/0022-1694(83)90217-2)
- Williams, R.D., Lamy, M.-L., Maniatis, G., Stott, E., 2019. Three-dimensional reconstruction of fluvial surface sedimentology and topography using personal mobile laser scanning. *Earth Surf. Process. Landf.* <https://doi.org/10.1002/esp.4747>.
- WipWare (2019). Sampling and Analysis Guide. Dostopno na: <http://wipware.com/products/WipFrag/>
- Wohl, E., 2010, *Mountain Rivers Revisited*, American Geophysical Union, Water Resources Monograph Series, Volume 19, 573p. ISBN: 978-0-875-90323-1
- Wohl, E., 2014, *Rivers in the landscape*. Wiley-Blackwell, Chichester, Združeno kraljestvo. ISBN: 978-1-118-41483-5.
- Wolman, M. G. (1954). A method of sampling coarse river-bed material. *EOS, Transactions American Geophysical Union* 35, 951–956.
- Wu, L., Liu, X., Ma, X.-Y., 2018. Research progress on the watershed sediment delivery ratio. *Int. J. Environ. Stud.* 75, 565–579. <https://doi.org/10.1080/00207233.2017.1392771>.
- Wu, Y.P., Chen, J., 2012. Modeling of soil erosion and sediment transport in the East River Basin in southern China. *Sci. Total Environ.* 441, 159–168. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.09.057>
- Wu, W., S. S. Y. Wang, Y. Jia. 2000. Non-uniform sediment transport in alluvial rivers. *Journal of Hydraulic Research*, IAHR 38(6): 427434.
- Zhou, X., Lu, X., Mou, T., & Liu, Z. (2020). Analysis of the Prevention Measures for Earthquake Damage and Flood Disasters of Bridges in Mountainous Areas of Sichuan. *Journal of Physics: Conference Series*, 1624(4). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1624/4/042042>.
- Yochum, S., Sholtes, J.S Scott, J., and Bledsoe, B. (2017). Stream Power Framework for Predicting Geomorphic Change: The 2013 Colorado Front Range Flood. *Geomorphology* (292): 178-192.
- Zemljič M. in sod., 1970. Stanje, problemi i suvremene metode za borbu protiv erozije i bujica - Zvezek 5, SR Slovenija, Ljubljana, IGLG BF, ods. za erozijo: 22 str.
- Zorn, M., 2009. Erosion processes in Slovene Istria - part 1: Soil erosion. *Acta Geogr. Slov. Zb.* 49, 39–68. <https://doi.org/10.3986/ags49102>.
- Zakon o katastru nepremičnin (ZKN) Uradni list RS, št. 54/21 in 85/24 – ZAID-A
- Zakon o vodah (ZV-1). Uradni list RS, št. 67/02, 2/04 – ZZdr1-A, 41/04 – ZVO-1, 57/08, 57/12, 100/13, 40/14, 56/15, 65/20, 35/23 – odl. US, 78/23 – ZUNPEOVE in 52/24 – odl. US
- ZVKDS (2008). HE Brežice in HE Mokrice – Poročilo o predhodnih arheoloških raziskavah na območju verige HE na spodnji Savi - Intenzivni podvodni pregled struge Save na območju akumulacijskih bazenov HE Brežice in HE

Mokrice, Zavod za varstvo kulturne dediščine Slovenije, Ljubljana, Poročila Skupine za podvodno arheologijo 25, 1–64.