

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*



MAGISTRSKO DELO

MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM DRUGE STOPNJE VODARSTVO IN OKOLJSKO INŽENIRSTVO

Ljubljana, 2021

Univerza
v Ljubljani

*Fakulteta za
gradbeništvo in
geodezijo*



Kandidat/-ka:

Magistrsko delo št.:

Master thesis No.:

Mentor/-ica:

Predsednik komisije:

Somentor/-ica:

Član komisije:

Ljubljana, _____

STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	504.12:551.311.1:556.53:516.18(043.3)
Avtor:	Matej Mešl, dipl. inž. ok. grad. (UN)
Mentor:	prof. dr. Franc Steinman
Somentor:	asist. dr. Mateja Škerjanec
Naslov:	Vpliv sonaravnih ukrepov za zmanjšanje erozijske nevarnosti na poplavnih območjih
Tip dokumenta:	Magistrsko delo – univerzitetni študij
Obseg in oprema:	68 str., 4 pregl., 79 sl.
Ključne besede:	erozija, strižne obremenitve, strižna odpornost, HEC-RAS 2D, QGIS, raba tal, sonaravne ureditve

IZVLEČEK

Ker se novi trendi vse bolj nagibajo k sonaravnemu urejanju vodotokov oziroma obvodnega prostora, smo se v nalogi ukvarjali z ukrepom živih mej kot ene od predstavnic le teh, za zmanjšanje erozijske nevarnosti na poplavnih območjih. Sonaravni ukrepi imajo poleg zaščitne tudi ekološko funkcijo, saj izboljšajo življenjske pogoje za vodni in obvodni živelj. Za izbrano poplavno območje reke Hudinje smo s hidravličnim modelom preverili vpliv rabe tal ter različne scenarije uporabe živih mej, ugotovitve pa podkrepili s številnimi prikazi. Vpliv izbranih ukrepov smo primerjali z obstoječim stanjem in tako upravičili njihovo izbiro. Prikazali smo primerjave globin, gladin, hitrosti ter strižnih napetosti za različne pretoke. Ugotovili smo, da raba tal pomembno vpliva na samo odpornost. Zaradi podnebnih sprememb in napovedi večanja tako intenzitete kot pogostosti visokih voda je potrebno skrbno načrtovati rabo prostora ter ukrepe na poplavnih območjih.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC: 504.12:551.311.1:556.53:516.18(043.3)
Author: Matej Mešl, B Sc.
Supervisor: Prof. Franc Steinman, Ph.D.
Co-supervisor: Assist. Mateja Škerjanec, Ph.D.
Title: Impact of the nature based solutions for erosion hazard reduction in flood prone areas
Document Type: Master Thesis – University studies
Scope and tools: 68 p., 4 tab., 79 fig.
Key words: erosion, shear stress, shear resistance, HEC-RAS 2D, QGIS, land use, sustainable measures

ABSTRACT

Due to latest trends which are more oriented to the sustainable regulation of watercourses or riparian space, we focused in this master thesis on the measure of hedgerows, as one of their representatives, to reduce the erosion risk in flood areas. Sustainable measures have beside protection, also ecological function as they improve living conditions for aquatic and riparian life. For the selected flood area of Hudinja river we, used a hydraulic model to check the impact of land use and various scenarios for the use of hedges and supported the findings with numerous demonstrations. We compared the impact of the selected measures with the existing conditions and thus justify their choice. We presented comparisons of depths, levels, velocities, and shear stresses for different flows. We discovered that land use has a significant impact on resilience itself. Due to climate change and the forecast of an increase in both the intensity and frequency of high waters, it is necessary to carefully plan the use of space and measures in flood areas.

ZAHVALA

Za vso pomoč, strokovne napotke, usmerjanje in razumevanje pri izdelavi magistrskega dela se iskreno zahvaljujem mentorju prof. dr. Francu Steinmanu, somentorici asist. dr. Mateji Škerjanec ter doc. dr. Gašperju Raku.

Zahvalil bi se tudi svoji družini za vso podporo ter nasvete v času študija.

KAZALO VSEBINE

STRAN ZA POPRAVKE	I
BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK.....	II
BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION	III
ZAHVALA	IV
KAZALO VSEBINE	V
KAZALO SLIK	VII
KAZALO PREGLEDNIC.....	X
1 UVOD	1
2 TEORETIČNA IZHODIŠČA	3
2.1 Vodni in obvodni prostor	3
2.2 Tok vode s prosto gladino	5
2.2.1 Stalni enakomerni in nestalni neenakomerni tok.....	6
2.2.2 Porazdelitev hitrosti.....	7
2.2.3 Porazdelitev strižnih napetosti na vodnem in obvodnem prostoru.....	8
2.3 Erozijski procesi.....	9
2.4 Odpornost površin na erozijske procese.....	11
2.4.1 Strižna odpornost.....	11
2.5 Uporaba sonaravnih ukrepov ter ekoremediacije v primerjavi s klasičnim pristopom	12
2.6 Uporabljana programska oprema	14
2.6.1 Programsko orodje HEC-RAS	14
2.6.2 Programsko orodje Q-GIS.....	14
2.6.3 Programsko orodje Civil 3D	15
2.7 Zajem topografskih podatkov.....	15
3 OPIS OBRAVNAVANEGA OBMOČJA.....	17
3.1 Opis območja Hudinje.....	17
3.2 Vhodni podatki za hidravlično modeliranje obravnavanega območja	21
3.2.1 Hidrološki podatki.....	22
3.2.2 Opis rabe prostora	25
3.2.3 Opis hidravličnih robnih pogojev.....	27

4 OBDELAVE IN ANALIZE	29
4.1 Izdelava hidravličnega modela HEC-RAS-2D in uporaba QGIS orodja za izbrano območje	29
4.2 Hidravlično modeliranje in erozijska nevarnost za obstoječe stanje rabe prostora	32
4.2.1 Določanje pretočnosti struge in prereza, kjer se voda najprej izlije iz struge.....	33
4.2.2 Določanje porazdelitve hitrosti in strižnih napetosti	34
4.2.3 Prikaz dovoljenih lokalnih hitrosti in dopustnih strižnih napetosti glede na rabo prostora..	37
4.2.4 Določitev območij z erozijsko nevarnostjo – obstoječe stanje	38
4.3 Vpliv rastnega obdobja zarasti na erozijsko nevarnost.....	43
4.4 Vpliv posamičnega ukrepa – umestitev grmovne zarasti za zmanjšanje erozijske nevarnosti....	46
4.5 Umestitev ukrepov za zmanjšanje lokalnih hitrosti na več lokacijah hkrati.....	53
5 ZAKLJUČEK	63
VIRI IN LITERATURA.....	66
PRILOGE	1

KAZALO SLIK

Slika 1: Primer izlivanja in vračanja vode v strugo na območju meandra (Vir: prirejeno po RRC, 2021)	4
Slika 2: Prikaz vodnega in obvodnega prostora (Vir: Giordanengo et.al., 2016).....	4
Slika 3: Shematski prikaz stalnega enakomernega toka (Pivk, 2019).....	6
Slika 4: Porazdelitev hitrosti po prerezu (Vir: Geocaching, 2010)	7
Slika 5: Primer spremembe porazdelitve izotah zaradi zarasti (Vir: Giordanengo, J. et.al., 2016).....	8
Slika 6: Erozijska na nezaščitenem koruznem polju v Tennesseeju po kratki nevihti. (Vir: NRDC, 2021)	10
Slika 7: Prikaz časovne komponente v primerjavi z zaraslost površin (Vir: prirejeno po RRC, 2021)	12
Slika 8: Primer žive meje (Vir: Mestnik, 2020)	13
Slika 9: Vpliv gostote zarasti na zmanjšanje hitrosti (Vir: Rak in sod., 2014)	13
Slika 10: Prikaz obravnavanega območja na pregledni karti (Vir: Atlas okolja, 2021)	17
Slika 11: Prikaz terena in umestitev lokacije glede na celotno porečje Hudinje (Vir: Atlas okolja, 2021)	18
Slika 12: Zaraščenost struge v spodnjem delu območja – pogled gorvodno (foto: Matej Mešl, 2021)	19
Slika 13: Pogled na spodnji del obravnavanega območja – desna poplavna površina – pogled dolvodno (foto: Matej Mešl, 2021)	19
Slika 14: Pogled na levo poplavno površino med mostovoma (foto: Matej Mešl, 2021)	19
Slika 15: Pogled na levo poplavno površino slikano z zgornjega mostu - pogled gorvodno (foto: Matej Mešl, 2021)	19
Slika 16: Prikaz nasipa na levi poplavni površini pri gorvodnem mostu - pogled gorvodno (foto: Matej Mešl, 2021)	19
Slika 17: Zaraščenost struge nad gorvodnim mostom (foto: Matej Mešl, 2021)	19
Slika 18: Parcelne meje nad dolvodnim mostom (Vir: portal iObčina - občina Vojnik)	20
Slika 19: Parcelne meje pod dolvodnim mostom (Vir: portal iObčina - občina Vojnik).....	20
Slika 20: Vojaška karta Habsburžanov iz 18. stoletja na območju obravnavanega odseka Hudinje (Vir: Arcanum Maps).....	21
Slika 21: Izdelan digitalni opis terena z vnesenimi stavbami, ki je podlaga za nadaljnje izračune in obdelave.	22
Slika 22: Prikaz konica visokovodnega dogodka 18. ter 19. 9. 2007 (Vir: ARSO, 2021).....	22
Slika 23: Območje poplavljanja za padavinski dogodek 18-19. 8. 2007 (Vir: Atlas voda, 2021)	23
Slika 24: Konice pretokov zgenerirane glede na obstoječi poplavni dogodek iz leta 2007 (Vir: Anzeljc, 2013)	24
Slika 25: Karte poplavne nevarnosti ter prerez za vtočni robni pogoj, označen z modro črto (Vir: Atlas voda, 2021).....	25
Slika 26: Prikaz obstoječe rabe tal (Vir: iObčina, 2021).....	26
Slika 27: Slika dolvodnega mostu (foto: Matej Mešl, 2021).....	27
Slika 28: Slika gorvodnega mostu (foto: Matej Mešl, 2021)	27

Slika 29: Prečni prerez dolvodnega mostu	28
Slika 30: Prečni prerez gorvodnega mostu	28
Slika 31: Na ortofoto podlagi je prikaz DMR ter izhodiščna velikost numerične mreže za hidravlično orodje HEC-RAS-2D.....	30
Slika 32: Prikaz zgostitve celic v območju ob stavbi, na stiku brežin vodotoka z obvodnim prostorom, na območju prelivanja preko dovozne ceste na most ter v območju mostu idr.	31
Slika 33: Čas simulacije 7:10 v najbolj neugodnem prerezu tik preden se voda izlije iz struge ($Q=36,5 \text{ m}^3/\text{s}$).....	33
Slika 34: Čas simulacije 7:20 v najbolj neugodnem prerezu ko voda že začne prelivati levo brežino ($Q=42,3 \text{ m}^3/\text{s}$)	33
Slika 35: Hidrogram v strugi - naraščanje pretoka v prečnem profilu z najmanjšo pretočnostjo.....	34
Slika 36: Prikaz lokacije prečnega prereza P4 z najmanjšo pretočno sposobnostjo.....	35
Slika 37: Prikaz računskih celic (v okolici prečnega prereza P4) iz katerih so povzete strižne hitrosti ter napetosti pri pretoku Q100	35
Slika 38: Porazdelitev strižnih hitrosti po obravnavanem prečnem prerezu P4 z najmanjšo pretočnostjo	35
Slika 39: Porazdelitev strižnih napetosti po obravnavanem prečnem prerezu P4 z najmanjšo pretočno sposobnostjo	35
Slika 40: Prikaz obstoječega stanja pri Q100: globine, tokovnice, hitrosti ter strižne napetosti.....	36
Slika 41: Naraščanje strižnih napetosti glede na naraščanje pretoka.....	37
Slika 42: Porazdelitev odpornosti, izražene z dovoljeno hitrostjo, za obstoječe stanje.....	38
Slika 43: Porazdelitev odpornosti, izražene z dovoljeno strižno napetostjo za obstoječe stanje.....	38
Slika 44: Karte erozijske nevarnosti (rdeča barva) za obstoječe stanje glede na porazdelitev hitrosti pri različnih pretokih (Q10, Q20, Q50, Q100).....	39
Slika 45: Karte erozijske nevarnosti (rdeča barva) za obstoječe stanje glede na porazdelitev strižnih napetosti pri različnih pretokih (Q10, Q20, Q50, Q100).....	41
Slika 46: Primerjava naraščanja območij erozijske nevarnosti, kjer so presežene vrednosti dovoljenih hitrosti za obstoječe rabe tal za 4 različne pretoke	42
Slika 47: Primerjava naraščanja območij erozijske nevarnosti: presežene so vrednosti dovoljenih strižnih napetosti za obstoječe rabe tal za 4 različne pretoke	42
Slika 48: Povečanje erozijske nevarnosti (rdeča barva) na obravnavanem območju izven vegetacijskega obdobja, pri Q100.....	44
Slika 49: Povečanje strižnih napetosti (rdeča barva) na obravnavanem območju izven vegetacijskega obdobja, pri Q100.....	45
Slika 50: Prikaz lokacije žive meje na prikazanih vrednostih Manningovega koeficienta, vezanega na rabo prostora na parcelah.....	46
Slika 51: Prikaz razmer po vzpostavitvi območja žive meje pri Q100: globine, tokovnice, hitrosti ter strižne napetosti – analiza vpliva posamičnega ukrepa	47

Slika 52: Prikaz hitrostnih polj po vzpostavitvi območja z živo mejo pri pretokih Q10, Q20, Q50 in Q100.....	48
Slika 53: Povečanje območja poplavljenosti (rumena barva) zaradi vpliva žive meje, pri Q100	48
Slika 54: Povečanje hitrosti (rdeča barva) oz. zmanjšanje (zelena barva) zaradi vpliva žive meje, pri Q100.....	49
Slika 55: Prikaz lokacije treh zaporednih prereзов v okolici mosta in dovozne ceste (stanje z živo mejo)	50
Slika 56: Prikaz razmer v prečnem prerezu P1: struga in obvodni prostor, vodne gladine, porazdelitev hitrosti in porazdelitev strižnih napetosti (brez žive meje – zelena črta, z živo mejo – modra črta).....	51
Slika 57: Prikaz razmer v prečnem prerezu P2: struga in obvodni prostor, vodne gladine, porazdelitev hitrosti in porazdelitev strižnih napetosti (brez žive meje – zelena črta, z živo mejo – modra črta).....	52
Slika 58: Prikaz razmer v prečnem prerezu P3: struga in obvodni prostor z vodno gladino, porazdelitev hitrosti in porazdelitev strižnih napetosti (brez žive meje, z živo mejo).....	53
Slika 59: Območja velikih hitrosti pri Q100 (levo) in postavitev več območij z živo mejo (desno) v območje obravnave	53
Slika 60: Več živih mej - prikaz globin, tokovnic, hitrosti ter strižnih napetosti po modeliranju ukrepov pri pretoku Q100	54
Slika 61: Več živih mej: Prikaz hitrostnih polj pri naraščanju pretokov (od Q10 do Q100)	55
Slika 62: Primerjava hitrosti obstoječega stanja z kombinacijo ukrepov pri pretoku Q100	56
Slika 63: Več živih mej: Izris prečnih profilov ter območij živih mej (roza obroba)	57
Slika 64: Profil 5: Primerjava gladin– vpliv več živih mej	58
Slika 65: Profil 5: Primerjava hitrosti – vpliv več živih mej	58
Slika 66: Profil 6: Primerjava gladin – vpliv več živih mej	58
Slika 67: Profil 6: Primerjava hitrosti – vpliv več živih mej	58
Slika 68: Profil 7: Primerjava gladin – vpliv več živih mej	59
Slika 69: Profil 7: Primerjava hitrosti – vpliv več živih mej	59
Slika 70: Profil 8: Primerjava gladin – vpliv več živih mej	59
Slika 71: Profil 8: Primerjava hitrosti – vpliv več živih mej	59
Slika 72: Profil 9: Primerjava gladin – vpliv več živih mej	60
Slika 73: Profil 9: Primerjava hitrosti – vpliv več živih mej	60
Slika 74: Profil 10: Primerjava gladin – vpliv več živih mej	60
Slika 75: Profil 10: Primerjava hitrosti – vpliv več živih mej	60
Slika 76: Povečanje območja poplavljenosti (rumena ter zelena barva) zaradi vpliva več živih mej, pri Q100.....	61
Slika 77: Prikaz prečnih prereзов preko stavb ter živih mej (roza obroba)	61
Slika 78: Prikaz profila P11	62
Slika 79: Prikaz profila P12	62

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Časovna razporeditev pretokov dogodka 18. ter 19. 9. 2007 (Vir: ARSO, 2021).....	23
Preglednica 2: Povratne dobe pretokov ter pripadajoči pretok (Vir: Anzeljc, 2013)	24
Preglednica 3: Prikaz rabe tal ter pripadajočih Manningovih koeficientov, dovoljenih strižnih napetosti ter dovoljenih hitrosti za rastno obdobje	26
Preglednica 4: Prikaz rabe tal ter pripadajočih Manningovih koeficientov, dovoljenih strižnih napetost ter dovoljenih hitrosti za izven vegetativno obdobje.....	27

1 UVOD

Zaradi pomanjkanje prostora se je vse bolj posegalo v vodni prostor in s tem onemogočalo naravne procese, ki so delovali v preteklosti. Iz razloga poselitve, kmetijstva in industrije se je izkoriščal naravno pripadajoči prostor namenjen razlivanju voda ob visokih konicah. Ne dolgo nazaj je bil trend reguliranja vodotokov in s tem pospešitev toka ter prenašanje »bremen« dolvodno. Človeški posegi v obvodni prostor so zmanjšali površine namenjene za razlivanje, vendar voda vedno najde svojo pot, kar pa vodi v materialno in nematerialno škodo. Zaradi podnebnih sprememb in napovedi večanja tako intenzitete kot pogostosti visokih voda so potrebni ponovni premisleki o ravnanju z vodnim in obvodnim prostorom.

Novi trendi se vse bolj nagibajo k sonaravnemu urejanju vodotokov oziroma obvodnega prostora, da bi ohranjali zadrževanje voda v prostoru in zmanjšali erozijsko nevarnost voda, z doseganjem upočasnitve ter razlivanja toka. Posledično bi se izboljšal sam vizualni izgled in povečala biotska pestrost. Vzpostavitev starih strug pred regulacijami je praksa, ki se vse bolj uveljavlja v tujini. Težnja je upočasnitev ter razlivanje struge po obvodnem prostoru in s tem zmanjšanje visokovodnih konic ter izboljšanje življenjskih pogojev za vodni in obvodni živelj. Pri razlivanju vode po obvodnih površinah pa je potrebno zagotoviti ustrezno odpornost oziroma zmanjšati erozijsko nevarnost.

Kako zmanjšati neugodno delovanje voda na poplavnih površinah, bo glavna tema naše naloge. Preverili bomo vpliv različne rabe tal in različne scenarije uporabe živih mej, kot ene od predstavnic sonaravnih ukrepov, za zmanjšanje erozijske nevarnosti. Za posamezne povratne dobe pretokov bomo primerjali globine, hitrosti in strižne napetosti ter na podlagi primerjav obstoječega stanja in stanja po umestitvi izbranih ukrepov prikazali njihov vpliv.

V delu so uporabljena območja grmovne zarasti (tipični predstavnik so žive meje), ki so lahko z zasaditvijo antropogenega izvora ali pa se pojavijo zaradi opustitve kmetijske dejavnosti. V to skupino lahko štejemo tudi grmovno zarast ob vodotoku, ki pa je naravnega izvora.

Opisali smo erozijske procese, ki so nam bili v pomoč pri razumevanju rezultatov modeliranja ter jih podkrepili z enačbami. Povzeli smo Manningove koeficiente, vrednosti hitrosti in strižnih napetosti. Povzeli smo postopke pridobivanja topografskih podatkov, ki so nam bili kot vhodni podatek za nadaljnje delo. Opisali smo izbrano območje reke Hudinje. Obravnavano območje sem izbral, ker je v bližini mojega kraja. Potok, ki izvira blizu mojega doma, je levi pritok reke Dobrnice, ki pa se izlije v Hudinjo. Dolvodno od njunega sotočja se začne tudi naše območje obdelave. Za obravnavan odsek smo predstavili vse potrebne vhodne podatke za hidravlično modeliranje (največje izmerjene pretoke, povratne dobe pretokov, opisali rabo prostora ter opisali hidravlične robne pogoje). Predstavili smo izdelavo hidravličnega modela in prikazali rezultate pretočne sposobnosti struge, kar vpliva na samo razlivanje po poplavnih površinah. Nato smo prikazali rezultate obstoječega stanja (globine, tokovnice, hitrosti in strižne napetosti). Glede na obremenitve ter odpornost smo naredili karte erozijske nevarnosti

in jih združili na skupen prikaz glede na naraščanje pretokov. Preverili smo, kako vpliva rastno obdobje na samo erozijsko nevarnost. Na koncu pa smo analizirali vplive posamičnega ukrepa žive meje in njihovo kombinacijo. Ugotovitve smo podkrepili s tlorsnimi prikazi ter prečnimi profili.

2 TEORETIČNA IZHODIŠČA

Pri teoretičnem delu smo razložili osnovne mehanizme erozijskega delovanja voda in jih povezali z neodpornostjo tal. Pri tem lahko v literaturi zasledimo dva pristopa: ali primerjamo aktivne strižne napetosti zaradi toka vode (tj. obremenitev) z dopustnimi strižnimi napetostmi (tj. odpor), ali pa primerjamo lokalne hitrosti vode (tj. obremenitev) z dopustnimi hitrostmi (tj. odpor). Uporabili smo oba pristopa za preverjanje ali je odpor večji od obremenitve – tedaj na obravnavani lokaciji (numerični celici) naj ne bi bilo erozijske nevarnosti. Razmere v strugi so bile že velikokrat obravnavane, zato smo se usmerili na obvodni prostor, da bi pokazali, kje v poplavnem prostoru se pojavlja erozijska nevarnost (obremenitev je večja od odpora), nato pa za nekaj ukrepov analizirali, kakšni so vplivi (pozitivni, negativni) zaradi izbranih ukrepov za omilitev erozijske nevarnosti.

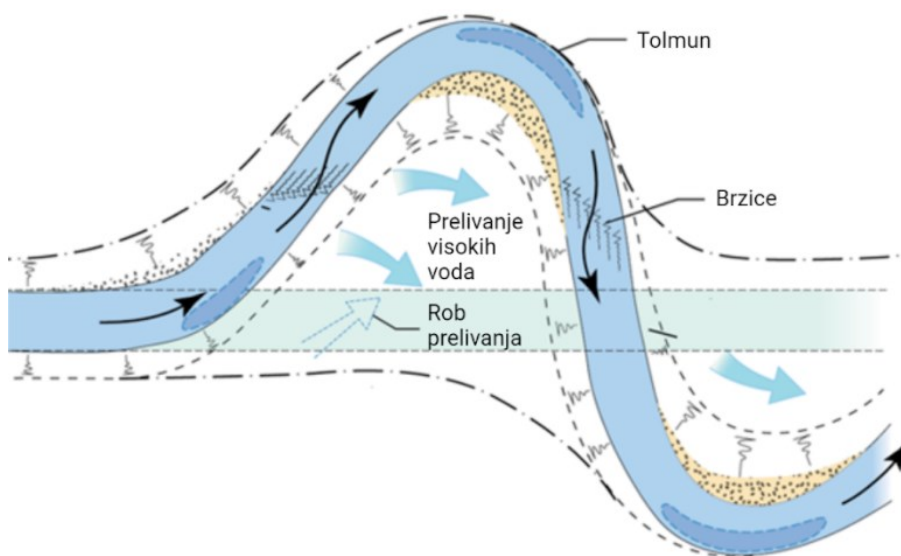
2.1 Vodni in obvodni prostor

Obvodni prostor in druge razlivne površine imajo s svojo zadrževalno sposobnostjo pomemben vpliv na odtočni režim ter poplavno varnost dolvodnih območij. Na zadrževalno sposobnost teh območij imajo pomemben vpliv topografske značilnosti, vplivati pa je mogoče tudi s primerno rabo prostora. Od pokrovnosti, kmetijskih kultur, grmovne ter drevesne zarasti, kot tudi spreminjanje pozelenelosti, gostote ter višine zarasti glede na letni čas se spreminja dinamika odtoka voda. Vse to vpliva na obseg poplavljanja, globine vode, hitrosti ter smeri vodnega toka (Rak in sod., 2014).

Poplavne površine so območja, kamor se v času visokovodnih dogodkov izliva voda, ko se preseže pretočna sposobnost struge. Lahko se pojavijo vzporedni tokovi, ki so praviloma počasnejši od toka vode po strugi. Druga opcija pa je, da se voda iz struge na nekaterih delih samo izlije in tam praktično stoji, dokler se ponovno ne vrne nazaj v strugo (ali pa ponikne), temu pravimo preplavljanje. Razlika med preplavitvijo in poplavitvijo je predvsem, da pri večjih hitrostih, erozijskih silah in hidrodinamičnih obremenitvah govorimo o poplavitvi (Rak in sod., 2014).

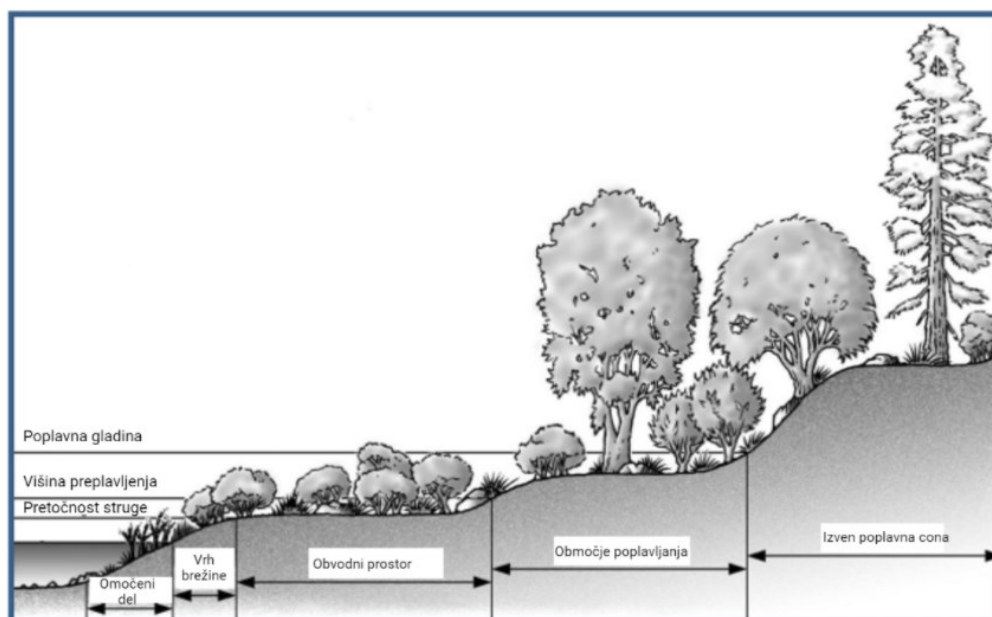
Visoke vode ne »poznajo« meja ter vodnih zemljišč, ampak preplavijo vse površine, ki so na njihovi poti in jih voda lahko doseže. Poznamo več delitev vodnih zemljišč, in sicer na funkcionalna vodna zemljišča (po Zakonu o vodah), katastrska vodna zemljišča (po DKN), vodna zemljišča po »dejanski rabi« (npr. po evidenci GERK) ter vodna zemljišča po Atlasu okolja (začasna metodologija določanja vodnih zemljišč), za katerega vsebine skrbi ARSO. Funkcionalna vodna zemljišča delimo na neposredna območja izvirov, erozijska žarišča, plazljiva zemljišča, plazovita območja, struge hudournikov s 5 metriskim obrežnim pasom, zaplavne in ožje poplavne površine, z razvojnimi načrti določeni varstveni vodni in zaplavni rezervati. Katastrska vodna zemljišča so evidentirana v Katastrskem načrtu ter so lastninsko izločene površine, vendar lahko spremenijo namembnost, če izgubijo značaj funkcionalnih vodnih zemljišč (Steinman, 2019). Vodna zemljišča po dejanski rabi so prikazana v GERK-u, katero evidenco vodi Ministrstvo za kmetijstvo.

Ne glede na evidence vodnih zemljišč pa lahko struga poteka tudi drugače, če se na primer po vodnih ujmah zaradi erozije potek vodotoka prestavi. Vodni tok se pri visokih vodah, večjih od pretočnosti struge (ang. bankful discharge) lahko giblje drugače kot sicer poteka trasa struge. Če je struga odporna na erozijske obremenitve, ohranja svojo geometrijo, sicer jo erozijski procesi preoblikujejo. Na Sliki 1 je vidno prelivanje preko nižjega, notranjega dela meandra, kjer se lahko pri izlivanju ter vračanju vode pojavljajo lokalno povečane obremenitve.



Slika 1: Primer izlivanja in vračanja vode v strugo na območju meandra (Vir: prirejeno po RRC, 2021)

Voda, ki se izlije v obvodni, poplavni prostor ima zato svojo odtočno dinamiko, lokalne razmere pa določajo kdaj in kje se stikata tok v strugi in tok po inundacijah. Vodostaj pri različnih pretokih določa tudi rastne pogoje v dosegu visokih voda.



Slika 2: Prikaz vodnega in obvodnega prostora (Vir: Giordanengo et.al., 2016)

2.2 Tok vode s prosto gladino

Tok vode s prosto gladino ima vzdolž toka oblikovano tako gladino, da vsaj na del površine deluje atmosferski tlak okolice. Osnovne enačbe toka s prosto gladino temeljijo na naslednjih zakonih ter enačbah: zakon o ohranitvi mase, dinamična enačba in zakon o ohranitvi energije (Steinman, 2010).

Zakon o ohranitvi mase:

$$\iint_S \rho \vec{v} d\vec{S} = -\frac{\partial}{\partial t} \iiint_V \rho \vec{v} dV$$

pri čemer je:

- S... sklenjena ploskev,
- ρ ... gostota tekočine,
- $\vec{v}$... vektor hitrosti,
- t... čas,
- V... izbran volumen.

Dinamična enačba:

$$\iiint_V \frac{d\vec{v}}{dt} \rho dV = \iiint_V \vec{F} \rho dV + \iint_S [\sigma] dS$$

pri čemer je:

- ρ ... gostota tekočine,
- $\vec{v}$... vektor hitrosti,
- t... čas,
- V... izbran volumen,
- S... sklenjena ploskev,
- $\vec{F}$... vektor hitrosti,
- $[\sigma]$... tenzor napetosti (matrika normalnih in strižnih napetosti).

Zakon o ohranitvi energije:

$$\frac{dE}{dt} = \frac{dQ}{dt} - \frac{dA_p}{dt} - \frac{dA_{tr}}{dt} - \frac{dA_m}{dt}$$

pri čemer je:

- E... celotna energija sistema,
- Q... energija odvedene toplote,
- A_p ... delo normalnih tlakov,
- A_{tr} ... delo strižnih sil,
- A_m ... mehansko delo.

Pri vodnem toku se pojavljajo hitrosti v vseh treh smereh, v nekaterih pogojih lahko zanemarimo določene komponente, pri toku v strugi lahko pogosto predpostavimo, da ima prevladujoč vpliv komponenta vzdolž toka, in lahko določene problematike obravnavamo kot enodimenzionalne. Ko pa pretočni prerez razdelimo na strugo in poplavna območja, moramo uporabiti dodatno ravninsko komponento hitrosti ter tako obravnavamo dvodimenzionalni tok (Rak, 2013). Ker je možnost modeliranja pri 1D omejena, bomo v nalogi izvajali račune za 2D nestalni tok.

2.2.1 Stalni enakomerni in nestalni neenakomerni tok

V praksi je redko možno popolnoma izpolniti teoretične pogoje za uporabo enačb stalnega enakomernega toka (ti. »normalni tok«), vendar pa je pri praktičnih primerih možno privzeti ustrezne predpostavke, ki nam omogočajo uporabo koncepta stalnega enakomernega toka z napako znotraj sprejemljive tolerance. Če želimo enačbe za stalni enakomerni tok uporabiti za nestalne in neenakomerne tokove, moramo uporabiti dovolj majhen časovni korak in zgostiti izbrano mrežo računskega odseka (Steinman, 2010).

Stalni enakomerni tok nastopi, ko so globina, površina, hitrost in pretok v daljšem časovnem obdobju ter v vsakem prečnem preseku daljšega odseka vodotoka v smeri toka konstante. Potrebno je zadostiti pogojem:

$$Q(t, x) = \text{const.}$$

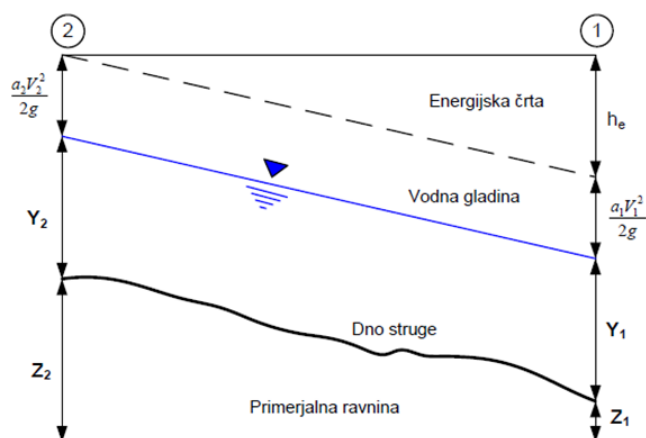
$$S(t, x) = \text{const.}$$

tako velja:

$$v = \text{const.}$$

$$h = \text{const.}$$

Energijska črta je tedaj vzporedna z vodno gladino ter dnom struge in so vzdolžni nakloni enaki.



Slika 3: Shematski prikaz stalnega enakomernega toka (Pivk, 2019)

Padec energije med dvema vzdolžnima profiloma izračunamo po energijski enačbi:

$$Z_1 + Y_1 + \alpha_1 \frac{\bar{u}_1^2}{2g} = Z_2 + Y_2 + \alpha_2 \frac{\bar{u}_2^2}{2g} + h_e,$$

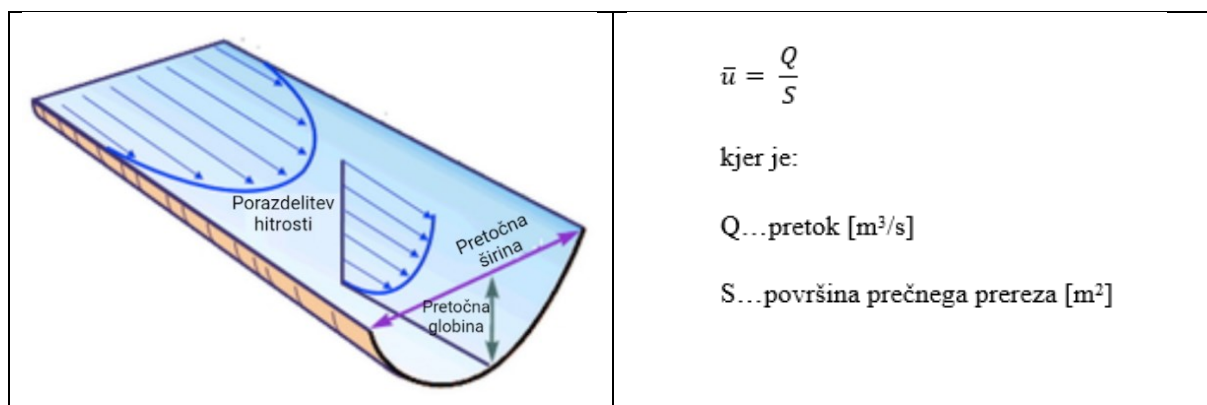
pri čemer je:

- $Z_{1,2}$ kota najnižje točke na lokaciji prečnega prereza 1 ali 2 od primerjalne ravnine,
- $Y_{1,2}$ višina gladine vode v prečnem prerezu,
- $\bar{u}_{1,2}$ srednja pretočna hitrost,
- $\alpha_{1,2}$ Coriolisov energijski koeficient,
- g gravitacijski pospešek,
- h_e izguba energije med vzdolžnima profiloma.

Vpliv podlage površin na vodni tok bomo v nadaljevanju zajeli s pomočjo Manningovega koeficienta hrapavosti, ki ga potrebujemo za simulacijo hidravličnega modela. Manningovi koeficienti bi bili določeni najbolj natančno, če bi jih umerili glede na evidentirana poplavljanja preteklih poplavnih dogodkov. Pri preliminarinih analizah pa koeficiente hrapavosti pogosto izberemo glede na rabo tal in priporočenih vrednostih iz strokovne literature. V literaturi so vidne velike razlike v vrednostih koeficienta glede na rabo tal oz. pokrovnost, kar je posledica tega, da so avtorji to določali v različnih razmerah oziroma pogojih, kot so različna vegetacijska obdobja, gostota zarasti in podobno. Izbira teh vrednosti vpliva na rezultate modeliranja, zato je priporočljivo vsaj grobo umerjanje, ki pa pogosto ni mogoče, zato se vrednosti določijo na podlagi inženirske prakse in izkušenj.

2.2.2 Porazdelitev hitrosti

Za enačbe izračuna 1D toka se predpostavi razmere s povprečnimi parametri, kjer se kot osrednja predpostavka uporablja srednja hitrost $\bar{u}$ po prerezu. Na Sliki 4 je prikazana porazdelitev hitrosti po prerezu ter enačba za izračun 1D toka.

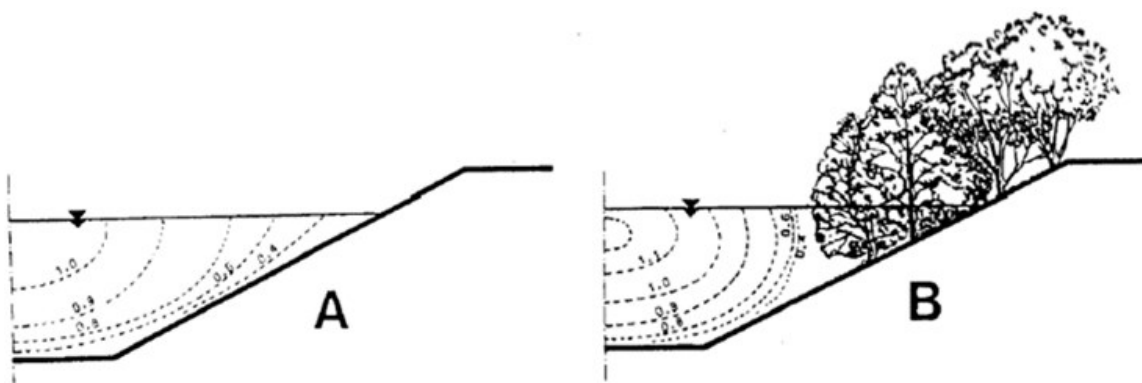


Slika 4: Porazdelitev hitrosti po prerezu (Vir: Geocaching, 2010)

V resnici pa so hitrosti precej neenakomerno porazdeljene, saj prerez ni povsod idealno gladek in raven. Pojavljajo se ovire, hrapavost se vzdolž toka spreminja, kot tudi sama oblika prečnega prereza, vzdolžni

potek trase se nenehno spreminja (meandriranje). Zaradi teh vplivov je potrebno za izračun dejanskega stanja vzeti razne popravne koeficiente (Steinman, 2010).

Porazdelitev hitrosti v prerezu je običajno prikazana z izotahami (črt enakih vzdolžnih hitrosti). Na dolgih ravnih odsekih kanalov s travnatimi brežinami dobimo dokaj enakomerno porazdelitev, ko pa se na brežinah pojavi zarast, ta vpliva na vodni tok. Spremembe izotah kaže Slika 5, na kateri vidimo dve posledici: hitrosti vodnega toka ob zarasti so manjše, hkrati pa zarast s svojim koreninskim sistemom poveča odpornost brežine. Vse skupaj pa ima povratni (negativni) učinek: ker se zaradi zarasti zmanjša pretočnost, se pri istem pretoku zviša gladina vode.



Slika 5: Primer spremembe porazdelitve izotah zaradi zarasti (Vir: Giordanengo, J. et.al., 2016)

Za izračune povprečnih hitrosti 1D toka se za poenostavljene izračune uporabljajo semi-empirične oziroma poleksperimentalne enačbe za enakomerni tok. Oblika takšnih enačb je zapisana:

$$\bar{u} = C \times R^x \times I_0^y$$

pri čemer je:

$\bar{u}$...povprečna hitrost vodotoka

R...hidravlični radij, ki je določen na podlagi preseka ter omočenega oboda

I_0 ...vzdolžni naklon vodotoka

C...koeficient

X, Y...eksponenta.

Za izračun povprečne hitrosti toka se najpogosteje uporabljata de Chezyjeva ter Manningova enačba (Steinman, 2010).

2.2.3 Porazdelitev strižnih napetosti na vodnem in obvodnem prostoru

Vodni tok na dnu in po brežinah povzroča strižno obremenitev, zato vodni tok ob ostenju ustvarja vlečno silo. Na brežinah struge pa v smeri po brežini navzdol deluje na delce še gravitacija. Do premika zemljine na brežini pride, ko silo odpora preseže vsota težnostne in vlečne sile. Zaradi dovolj velikih

sil, ki povzročijo gibanje delcev, nastane pojav, ki mu pravimo erozija. Izračun strižne napetosti τ_R podaja naslednja enačba.

$$\tau_R = \rho_w g R I$$

pri čemer je:

ρ_w ... gostota vode,
 g ... pospešek sile težnosti,
 R ... hidravlični radij,
 I ... naklon dna struge.

Ker se v magistrski nalogi ukvarjamo predvsem s tokom vode po poplavnih površinah, lahko za izračun strižnih napetosti v enačbi hidravlični radij zapišemo kar z globino vode. Ko se voda razlije po poplavnem območju, je vpliv brežin zanemarljiv. Razlog je v tem, da je pri plitvih in širokih kanalih (kakor lahko upoštevamo poplavne površine) pretočna globina v primerjavi s širino struge majhna, tako lahko hidravlični radij zamenjamo s podatkom globine vode (Mikoš, 2000). Strižno napetost τ_R lahko tako izračunamo po enačbi:

$$\tau_R = \rho_w g h I$$

pri čemer je:

ρ_w ... gostota vode,
 g ... pospešek sile težnosti,
 h ... pretočna globina vode na obarvani točki oziroma lokaciji,
 I ... naklon energijske črte vodnega toka.

2.3 Erozijski procesi

Erozija je geološki proces, pri katerem odnaša zemeljski material (tj. zemljine, kamenine, sedimenti) in ga prenaša zaradi naravnih sil, kot sta voda ali veter; včasih je ta proces pospešen zaradi slabega upravljanja s prostorom ali drugih človeških dejavnosti. Erozija tal se nanaša na erozijo zgornje plasti zemljine, ki je rodovitna ter pomembna za življenje. Stopnja erozije tal je odvisna od številnih dejavnikov, vključno s sestavo tal, vegetacijo in intenzivnostjo vetra ter dežja. Ker lahko človeške dejavnosti vplivajo tudi na hitrost erozije tal, je potrebno sprejeti odgovornost ter rešiti enega največjih okoljskih izzivov planeta.

Erozija tal se pojavi predvsem, ko je zemljina izpostavljena močnemu vetru, močnemu deževju in tekoči vodi (Slika 6). V nekaterih primerih človeške dejavnosti, zlasti kmetovanja, so tla določen čas ranljiva za erozijo. Na primer, ko kmetje obdelujejo (zorjejo) zemljo pred setvijo oz. saditvijo ali po pobranem pridelku, jo lahko pustijo izpostavljeno vremenskim vplivom tedne ali mesece. Prekomerna paša

domačih živali, kot so govedo in ovce, lahko pusti tudi velike površine zemlje brez rastlin, ki bi sicer zadržale zemljino na mestu. Druga praksa, ki ima uničujoče posledice za stanje tal, je krčenje gozdov, še posebej jasno, razširjena praksa industrijske sečnje. Ko drevesa odstranimo, pustimo zemljo izpostavljeno vetru in dežju brez varnosti korenin, da preprečimo odnašanje zemljine. Podnebje je tudi glavno gonilo erozije. Spremembe padavin in vodostaja lahko erodirajo tla, ekstremna nihanja temperature lahko povzročijo, da je zgornja plast tal bolj ranljiva za erozijo, dolgotrajne suše pa lahko preprečijo rast rastlin, zaradi česar je zemlja še dodatno izpostavljena (NRCD, 2021).



Slika 6: Erozijska na nezaščitenem koruznem polju v Tennesseeju po kratki nevihti. (Vir: NRDC, 2021)

Vodna erozija, ki je predmet naloge, je najbolj zastopana vrsta erozije na območju Slovenije zaradi specifike goste mreže vodotokov ter vodnatosti. Povzročitelj vodne erozije so tekoče vode, ki erodirajo oziroma sproščajo plavine, jih premeščajo ter odlagajo. Velikost sproščenih plavin in plavja je odvisna od jakosti erozije. Lahko so kamninska preperina, rodovitna prst, deli vegetacije, material človeškega izvora itd.

Prva faza vodne erozije je ploskovna erozija, ki je neposredna posledica pluvialne erozije tj. erozija dežnih kapelj ter stekanja vode s površin v linearne tokove. Količina vode se s stekanjem povečuje kot tudi njena odtočna hitrost ter erozivna sila, posledica pa je povečanje količine ter grobost sproščenih in transportiranih plavin. Glede na razvoj vodne erozije poznamo površinsko erozijo, ki ji sledi brazdanje ter globinsko oblikovanje jarkov do nastanka hudourniških grap ter večanja hudournikov do rečne erozije. Glede na vodni režim toka je odvisna vrsta ter jakost vodne erozije, ki je odvisna od naravnih danosti prispevnega območja. Najvplivnejše lastnosti porečja so: relief, velikost in oblika, razvejanost

hidrografije, višinske razlike in nakloni strug, padavinski režim, poraslost z vegetacijo, geološka podlaga itd. Vodni režim vodotoka se deli na nižinski, hudourniški ali pa prehodne oblike.

Hudourniška erozija je najkompleksnejša vrsta erozije. Tipična značilnost je hudourniški vodni režim, ki ima veliko odzivnost na jakost padavin, kar pomeni neenakomernost pretokov ter veliko erozivno moč. V hudourniških strugah se vrši predvsem globinsko ter bočno erodiranje, posledice so nastanek zajed, spodkopavanje brežin in sprožanje usadov. Na odsekih zelo močne erozije lahko nastanejo večja erozijska žarišča. Plavine, ki so posledica erodiranja, so mešane sestave in v povprečju bolj grobe ter pri transportu tudi same pospešujejo erodiranje. vzdolž struge potekajo procesi prenosa, na izteku hudournikov pa prevladajo procesi odlaganja plavin, posledično se lahko formira hudourniški vršaj. Transport plavin je lahko sprva posamičen ali hiperkoncentriran, ali pa se razvije tudi drobirski tok.

Nižinski vodotoki imajo enakomernejši ter umirjen vodni režim in so manj problematični zaradi erodiranja, zato pa so večji vir poplavljanja. Pri tem prevladujejo lebdeče plavine, bolj drobne rinjene plavine ter plavje. Od erozijskih procesov najbolj prevladuje bočno erodiranje, premeščanje nanosov, odlaganje nanosov v prodiščih. Nižinski vodotoki imajo tendenco meandriranja, erodiranje pa je najmočnejše v konkavah (IZVO-R, 2015).

2.4 Odpornost površin na erozijske procese

Odpornost določenega materiala oziroma ureditve je vztrajnost delcev, da ostanejo v mirovanju glede na obremenitev z delujočo hitrostjo vode, ki povzroča napetost, vse dokler še ne pride do premika. To lahko ponazorimo glede na zakon lepenja. Najprej se delci podlage upirajo obremenilnemu delovanju voda, ko pa je odpornost presežena pride do erozije. Po porušitvi mehanizma odpornosti se ta na prizadetem območju zmanjša (na primer odnese zgornji zaščitni sloj travne ruše), kar glede na časovno komponento samo še poveča erozijo.

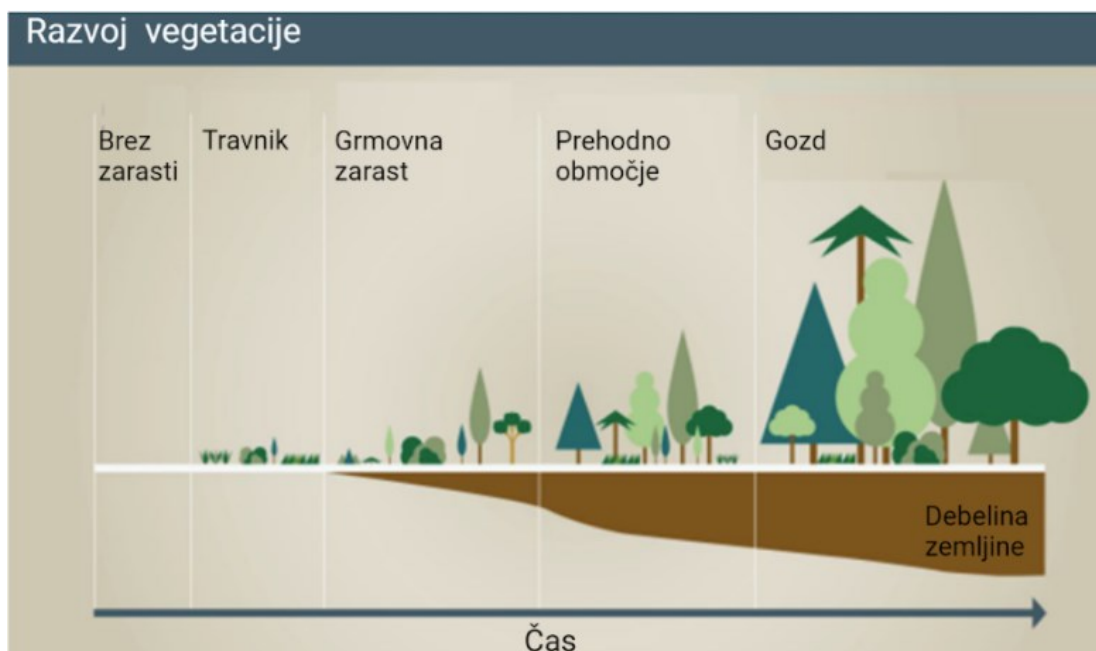
2.4.1 Strižna odpornost

Mejna strižna odpornost površin mora biti večja od vrednosti strižne napetosti obremenitev, da ne prihaja do odnašanja zemljine oziroma procesov erozije. Številni dejavniki vplivajo na razporeditev ter velikost hitrosti, kot so konfiguracija površja, nakloni terena, pretok vode ter hrapavost podlage, kar pa posledično vpliva na strižne napetosti (Steinman, 2010). Vrednosti odpornosti zemljin ter ureditev so v veliki meri dobljene izkustveno. V Prilogi A so zbrane različne zemljine, ureditve in pripadajoča hitrost ter strižna odpornost, vrednosti pa so dobljene po različnih avtorjih. Pri načrtovanju rabe tal je tako pomembna izbira pravih (odpornejših) ureditev, da kljubujejo (obremenilnim) strižnim napetostim, saj se s tem prepreči neugodno delovanje voda.

2.5 Uporaba sonaravnih ukrepov ter ekoremediacije v primerjavi s klasičnim pristopom

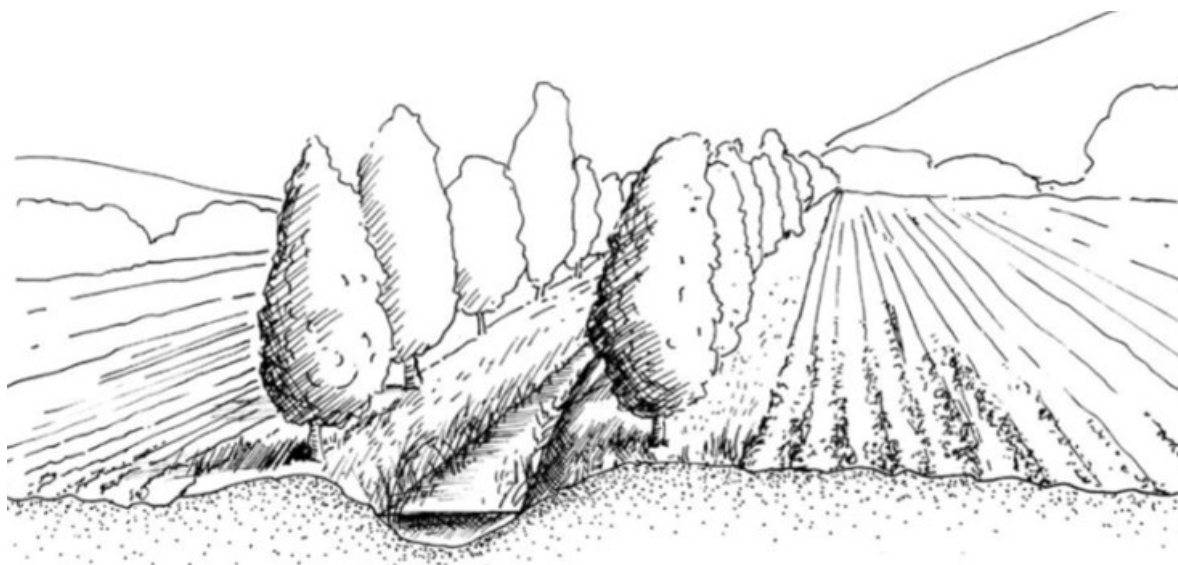
Človek je z različnimi dejavnostmi in rabami posegal v naravno pripadajoče obvodne površine namenjene razlivanju voda. Zaradi preprečitev neposrednega negativnega delovanja vodotokov se je struge kanaliziralo ter poglobljalo. Težnja klasičnega pristopa je bila vodo, kar se da najhitreje spraviti mimo območij, vendar se je s tem poplavna ter erozijska nevarnost samo premaknila dolvodno. Trase vodotokov so se zaradi povečanja hidravlične prevodnosti izravnale, preoblikovale so se brežine, obrežna vegetacija pa se je odstranila. Zaradi povečanja hitrosti vodnega toka se je preprečilo odlaganje sedimentov, hranil in onesnažil. Pri klasičnem pristopu se je tako zmanjšala samočistilna sposobnost, kar je privedlo tudi k slabši kakovosti vode (Zakotnik, 2014).

Pri sonaravnih ukrepih ima velik vpliv tudi čas, saj polno funkcionalnost dosežejo šele po določenem času, običajno po nekaj vegetacijskih obdobjih. Na začetku vgradnje sonaravnih ukrepov, ko se območje z ukrepi še ni zaraslo, je precej zmanjšana odpornost tal, zato se uporabljajo tudi začasni ukrepi za prehodno obdobje. Tudi pri kmetijskih površinah ima čas zelo velik vpliv. Na primer gole njivske površine so najbolj ranljive, zato je ključno pravilno načrtovanje rabe tal. Prikaz razvoja vegetacije v primerjavi s časom prikazuje spodnja Slika 7.



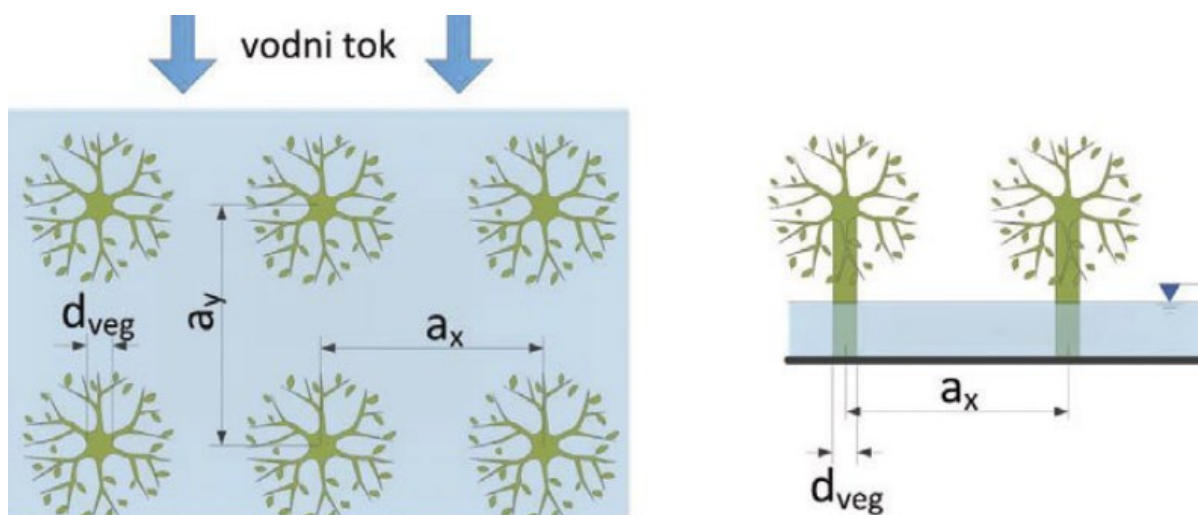
Slika 7: Prikaz časovne komponente v primerjavi z zaraslost površin (Vir: prirejeno po RRC, 2021)

Na poplavnih površinah se kot primer sonaravne ureditve lahko uporabi vegetacijski pas oziroma živa meja (Slika 8), ki ima funkcijo uravnavanja vlažnostnih razmer, izboljšanja samočistilnih sposobnosti ter ohranjanja biodiverzitete (Mestnik, 2020). Ker so žive meje del slovenske tradicije, smo se tudi v tej analogi pri analizi vpliva sonaravnih ukrepov na erozijsko nevarnost odločili za izbiro tega ukrepa. Iz nabora drugih ukrepov pa je mogoče določiti skupino, ki ima po funkcionalnih učinkih podobne lastnosti in so lahko medsebojno zamenljivi.



Slika 8: Primer žive meje (Vir: Mestnik, 2020)

Na hitrost toka skozi vegetacijske pasove vpliva stopnja zaraščenosti in njene geometrijske in druge lastnosti (podajnost mladega grmičevja ...). Vse to ustvarja upor vodnemu toku ter s tem vpliva na energijske izgube toka vode. Na primer pri rabi tal v trajnih nasadih so pomembni razmiki, debeline debel, kako so košate krošnje ter če poplavna voda sega do njih ali ne (Slika 9). Pomembno pa na vrednosti hitrosti vpliva tudi razporeditev teh pasov glede na tok vode (Rak in sod., 2014).



Slika 9: Vpliv gostote zarasti na zmanjšanje hitrosti (Vir: Rak in sod., 2014)

O vplivu zarasti na vodni tok potekajo številne raziskave (Wang in sod., 2019). V tej nalogi pa ostajamo pri osnovnih relacijah med lokalno hitrostjo vodnega toka in vsemi parametri upora vodnemu toku, zajetimi v skupni vrednosti Manningovega koeficienta.

2.6 Uporabljana programska oprema

2.6.1 Programsko orodje HEC-RAS

Inženirske enote ameriške vojske za analizo rek (HEC-RAS) so izdelale programsko opremo, ki omogoča izvajanje hidravlično modeliranje enakomernega ter neenakomernega toka, izračune 1D ter 2D stalnega ali nestalnega toka, tj. rečne hidravlike; modeliranje transporta sedimentov, analizo temperature vode in splošno modeliranje kakovosti vode (hranila ter transport snovi). Prva različica HEC-RAS (različica 1.0) je bila izdana julija 1995, zadnja različica, ki se uporablja v letu 2021 je 6.0 (Brunner, 2021).

Za izdelavo podrobnega in natančnega modela hidravlike je potreben podroben in natančen digitalni model terena. Kakovost podatkov o terenu je lahko omejujoč dejavnik pri kakovosti modela hidravlike, ki ga lahko ustvari uporabnik. Trenutno HEC-RAS za modeliranje terena uporablja mrežne podatke. Uporabnik mora zbrati podatke iz več virov in jih nato pretvoriti/izvoziti v mrežno obliko podatkov, ki jo lahko prebere HEC-RAS (Brunner, 2021).

HEC-RAS ima širok razpon robnih in začetnih pogojev, ki jih je mogoče uporabiti za modeliranje. Robne pogoje sestavljajo zunanji robni pogoji vzdolž oboda 2D območja, pogoji na notranjih mejah (objektih ipd.) in globalni mejni pogoji (meteorološki podatki), ki veljajo za celoten model (Brunner, 2021).

Ker izračun v 1D modelu običajno ni zadovoljivo natančen, se pri modeliranju uporablja pogosteje 2D model, pri katerem se za vsako numerično celico iteracijsko izračuna globina vode ter povprečne komponente hitrosti vode v dveh smereh. Manjše kot so celice bolj natančen je izračun, vendar se poveča računski čas. Pri zgoščevanju celic je ključno, da zmanjšamo velikosti celic, kjer prihaja do geometrijskih sprememb, kot so prelivanja in podobno. (Rak, 2013).

Z uporabo digitalnega zapisa topografije robnih pogojev in hidravličnih parametrov HEC-RAS lahko izračunamo polja globin, hitrosti idr., ob poplavnih dogodkih. Za analizo hitrosti, strižnih napetosti, moči toka, debeline ledu in podatkov o lastnostih in poteku poplavnih poti je mogoče ustvariti dodatne geoprostorske podatke (US Army Corps of Engineers, 2021).

2.6.2 Programsko orodje Q-GIS

Quantum GIS (QGIS) je odprtokodni geografski informacijski sistem. QGIS trenutno deluje na večini platform Unix, Windows in macOS ter je razvit v Qt in C++ programskem jeziku. QGIS podpira veliko rastrskih in vektorskih formatov podatkov, pri čemer je mogoče preprosto dodati podporo za nove oblike z uporabo različnih vtičnikov. Omogoča ustvarjanje digitalnih sistemov, vizualizacijo, poizvedovanje in analizo geoprostorskih podatkov kot tudi pripravo ter izvoz kart. Vektorski podatki predstavljajo točke, linije ali poligone. Rastrski podatki pa predstavljajo sistem poljubno velikih celic s pripadajočimi vrednostmi. Pri pripravi kart za tisk ali PDF oblike ima QGIS poseben vmesnik, ki omogoča dodajanje

različnih odsekov kart ter karakteristik, ki predstavljajo prikaze (legendo, merilo, oznake itd.) (Sherman, 2015).

2.6.3 Programsko orodje Civil 3D

Programsko orodje Civil 3D je računalniško podprta programska oprema za projektiranje, ki jo je razvilo podjetje Autodesk. Omogoča risanje in urejanje digitalnih 2D in 3D modelov. Podpira pa tudi informacijsko modeliranje objektov BIM (Building Information Modeling) z integriranimi funkcijami za izboljšanje priprave in oblikovanja gradbene dokumentacije (Symetri, 2021).

V tem programskem orodju smo pripravili digitalni zapis terena, ki je bil kot vhodni podatek za nadaljnjo delo. Površinske podatke točk lahko povežemo ter sestavimo s površino iz trikotnikov ali mrež. Za izdelavo površine terena, telesa ipd. ustvarimo prazno površino in ji nato dodamo višinske podatke. Prav tako se lahko uvozijo obstoječe datoteke, ki vsebujejo površinske informacije, na primer datoteke LandXML, TIN ali DEM. Ko imamo osnovno površino, lahko izvajamo funkcije izboljšave terena. Dodamo lahko prelomne črte, ki se na površinah TIN uporabljajo za določanje linearnih značilnosti. Teh prelomnih točk trikotniki ne morejo prečkati, tako lahko zamejimo, da na pride do napak pri upoštevanju lastnosti objektov, na primer umestitvi podpornih sten ali strug potokov. Prelomne črte vplivajo na triangulacijo površine, zato lahko na mestih podpornih sten ali struge onemogočimo prečkanje trikotne mreže. Rezultate lahko prikazujemo v trikotni mreži ali pa v konturah, ki jih poljubno zgostimo. Kadarkoli dodamo, ali popravimo podatke površine, se le ta posodobi. Seznam definicij vsebuje vse operacije, ki se izvajajo na obravnavani površini in jih lahko poljubno vklopimo ali izklopimo ter jih tako povrnemo v prejšnje stanje. Programsko orodje prav tako omogoča lepljenje več različnih površin ter jih združi v novo (Autodesk, 2019).

2.7 Zajem topografskih podatkov

Za pripravo geometrije hidravličnega modela je potrebno imeti podatke topografije območja s primerno gostoto točk, zato se za vhodne podatke uporablja podatke tehnologije daljinskega zaznavanja LiDAR, ki temelji na lasersko aktivnih senzorjih. Zajem podatkov poteka preko letala, ki ima vgrajen merilnik, ki oddaja valove, ter meri razdalje med napravo in površjem (terenom). Ker deluje laserski oddajnik v povezavi s tehnologijo GPS, je v vsaki točki točno določena geografska širina, geografska dolžina ter nadmorska višina. Prednost laserskega skeniranja je možnost selektivne zaznave glede na značilnosti odboja, ki omogoča tudi zaznavo pod slojem vegetacije. Lasersko skeniranje omogoča zajem zelo velikega števila točk. Lasersko skeniranje je bilo v Sloveniji izvedeno med letoma 2011 in 2015. Zaradi razlik v številu redov odbojev laserskega žarka, prekrivanj pasov skeniranja ter absorpcije laserskega žarka na primer v vodi, ni mogoče doseči, da bi bila gostota na vseh mestih enotna (Vrhovec, 2019).

Datoteke GOT so vhodni podatek prekrivajočih posameznih snemalnih linij, ki so služile za izdelavo nadaljnjih izdelkov. Podatke GOT se je najprej združilo ter razrezalo na velikost 1 km². Izdelki, kjer datoteke pokrivajo to območje so DMR, OTR ter GKOT. DMR je digitalni model reliefa, ki predstavlja

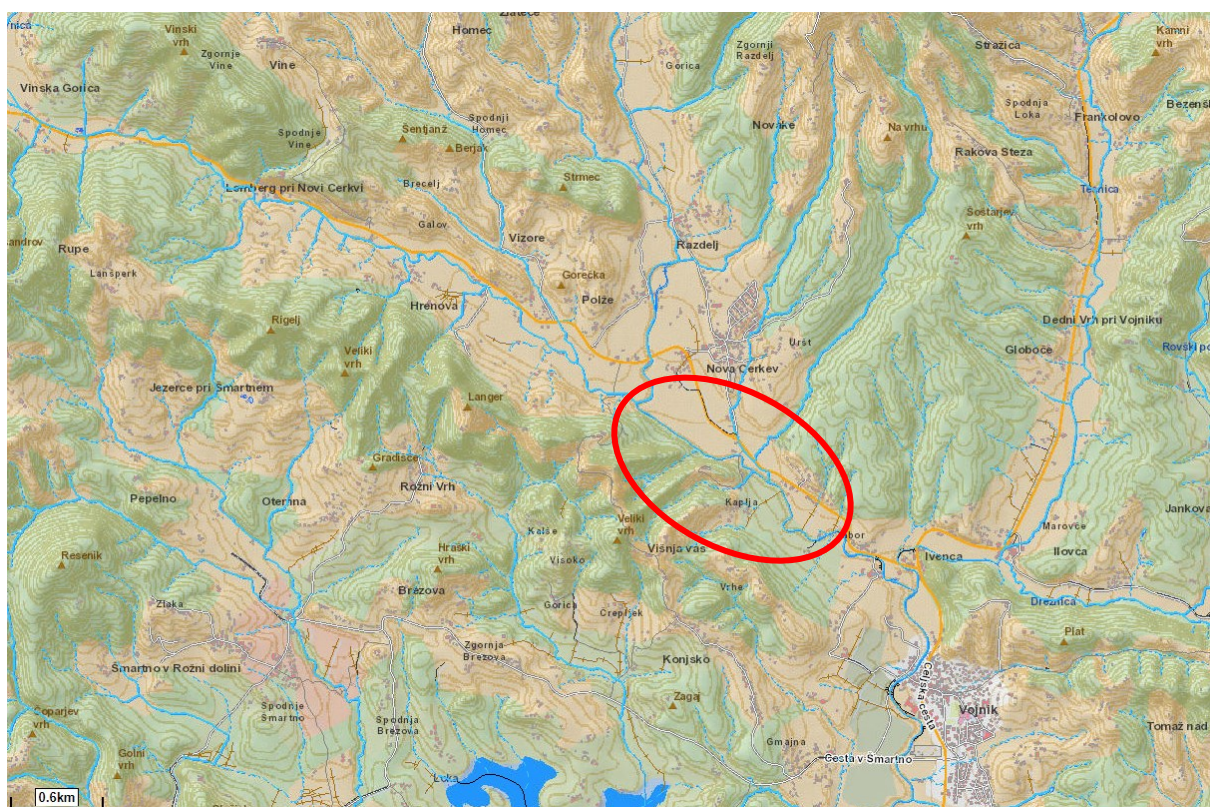
interpolacijo reliefa na osnovi točk OTR, ki je zapisana v mrežo $1\text{ m} \times 1\text{ m}$. OTR pomeni oblak točk reliefa, kjer so shranjene samo točke, ki so klasificirane kot tla, vse ostale točke odboja pa so odstranjene. GKOT pomeni georeferenciran in klasificiran oblak točk, kjer so točke klasificirane na tla, stavbe ter treh različnih tipov vegetacije. Za uporabo hidravličnega modela je tako najprimernejša oblika zapisa OTR (Čekada in sod., 2015).

3 OPIS OBRAVNAVANEGA OBMOČJA

Za določanje erozijske nevarnosti poplavnih območjih smo izbrali vodotok Hudinja, ki je levi pritok reke Voglajne. Naše obravnavano območje pa se nahaja v občini Vojnik in sicer v naseljih Nova Cerkev ter Višnja vas, katerega dolžina meri približno 1400 m. Območje vsebuje predvsem kmetijske in travniške površine, ki so erozijsko ogrožene. Na poplavni površini je tudi nekaj stanovanjskih objektov in mostova na dveh cestah, ki prečkata dolino.

3.1 Opis območja Hudinje

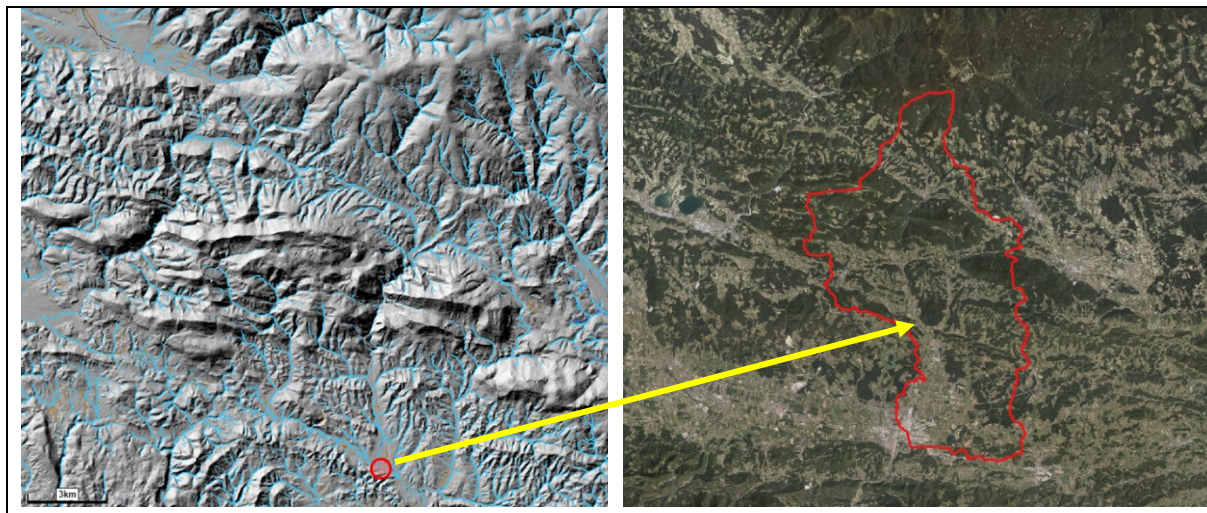
Reka Hudinja izvira na gozdnatem območju hriba Kraguljišče, ki se nahaja na Pohorju. Sprva teče po ozki grapi, nato pa mimo naselja Vitanje. Do vasi Socka ima Hudinja precejšen strmec, nato se podoba krajine precej spremeni ter preide v širšo poplavno ravnico. Pod Novo Cerkvijo se ji pridruži desni pritok Dobrnica, kjer se začne naše obravnavano območje. Nato svojo pot nadaljuje mimo Vojnika proti jugu mimo Škofje vasi. V reko Voglajno se izlije v vzhodnem delu Celja. Na sliki 10 je na pregledni karti prikazano obravnavano območje po sotočju z Dobrnico.



Slika 10: Prikaz obravnavanega območja na pregledni karti (Vir: Atlas okolja, 2021)

Rečna struga je v zgornjem toku skoraj v celoti ohranjena v naravnem stanju, v spodnjem toku pa so bili opravljeni obsežnejši posegi pred nevarnostjo visokih voda. Hudinja ima hudourniške značilnosti in pogosto poplavlja. Zanj je značilno, da s svojimi gostim omrežjem zbira površinske vode s številnih strmih pobočij, kar še pohitri zbiranje vode. Slika 11 prikazuje teren in umestitev lokacije glede na celotno porečje Hudinje. Reka Hudinja izvira na 1380 m nadmorske višine, najnižja točka predno se

izlije v reko Voglajno pa je na nadmorski višini 234 m. Prav hribovitost zaledja botruje k temu, da ima reka Hudinja hudourniški značaj. Vidni so precejšnji padci terena predvsem na območju Pohorja, Paškega Kozjaka ter Stenice. Glavna struga reke Hudinje od izvira do izliva meri 32 km, celotno porečje pa je veliko 207 km². Iz dolžine struge ter razlike nadmorske višine dobimo povprečni padec vodotoka 3,6 %.



Slika 11: Prikaz terena in umestitev lokacije glede na celotno porečje Hudinje (Vir: Atlas okolja, 2021)

Poplavne vode so zelo deroče, trgajo brežine ter transportirajo večje količine različnega drobirja. Na krajših odsekih so že nekoč posegali v njeno strugo, da bi varovali mline in žage pred poplavami ter pretirano rečno erozijo. V ta namen so gradili manjše lesene jezove ali pragove ter mestoma utrjevali brežine. Vendar so bili to le mali posegi v primerjavi s poznejšimi obsežnejšimi regulacijami, s katerimi so povsem spremenili tako rečno strugo kot tudi ekološke razmerje v reki. Prvo poplavno območje se začne nekoliko nad Novo Cerkvijo ter sega mimo Višnje vasi (v obravnavanem območju sta zajeta dela obeh naselij). Najobsežnejše poplavno območje pa je pred regulacijami segalo od Vojnika do izliva Hudinje v Voglajno. Največja povodenj se je zgodila 4. in 5. junija 1954, v precejšnji meri pa tudi ob poplavi 18. septembra 2007, katere doseg je prikazan na našem obravnavanem območju (Wikipedia, 2019).

Iz slik obstoječega stanja (slike 12–17) je razvidna velika zaraščenost po brežinah struge, v obvodnem prostoru pa polja kornjače, katera so bila upoštevana pri koeficientu hrapavosti. Nad gorvodnim mostom je nasip ob strugi, preko katerega so povečane hitrosti pri izlivanju višjih pretokov iz struge.



Slika 12: Zaraščenost struge v spodnjem delu območja – pogled gorvodno (foto: Matej Mešl, 2021)



Slika 13: Pogled na spodnji del obravnavanega območja – desna poplavna površina – pogled dolvodno (foto: Matej Mešl, 2021)



Slika 14: Pogled na levo poplavno površino med mostovima (foto: Matej Mešl, 2021)



Slika 15: Pogled na levo poplavno površino slikano z zgornjega mostu - pogled gorvodno (foto: Matej Mešl, 2021)



Slika 16: Prikaz nasipa na levi poplavni površini pri gorvodnem mostu - pogled gorvodno (foto: Matej Mešl, 2021)



Slika 17: Zaraščenost struge nad gorvodnim mostom (foto: Matej Mešl, 2021)

Ker bomo v nadaljevanju upoštevali dejansko rabo prostora, vezano na parcele, so na spodnjih slikah prikazane parcelne meje v dveh delih, da pokrijejo celotno območje ter da je ustrezna vidnost le teh. Pri načrtovanju rabe prostora je potrebno upoštevati parcelne meje ter pridobiti vsa potrebna soglasja lastnikov parcel za posege. Vse lastnike parcel, katerim bi poseg vplival na njihova območja, je potrebno seznanimi ter jim predstaviti ukrepe s pojasnili, zakaj je smiseln ukrep ter kakšni so predvideni pozitivni, pa seveda tudi negativni učinki po izvedbi.



Slika 18: Parcelne meje nad dolvodnim mostom (Vir: portal iObčina - občina Vojnik)



Slika 19: Parcelne meje pod dolvodnim mostom (Vir: portal iObčina - občina Vojnik)

Iz stare karte časa Habsburžanov je razviden potek takratne struge. Vidimo, da je sotočje Hudinje z Dobrnico locirano nekoliko nižje kot sedaj. Sama struga pa se ni bistveno spreminjala, je rahlo meandrirajoča, kar je značilno za srednji tok vodotoka.

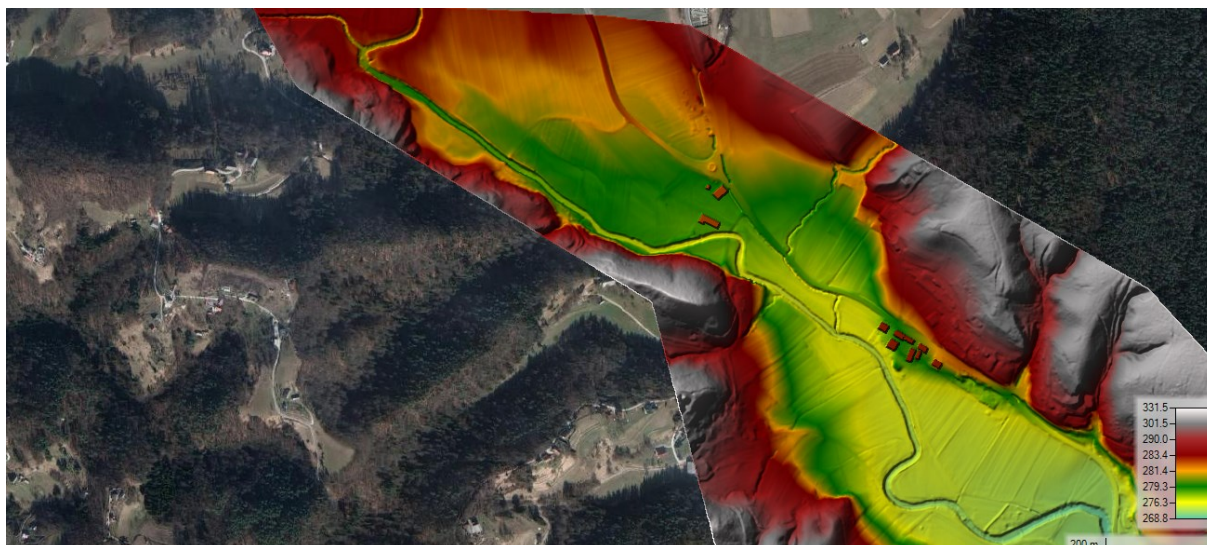


Slika 20: Vojaška karta Habsburžanov iz 18. stoletja na območju obravnavanega odseka Hudinje (Vir: Arcanum Maps)

3.2 Vhodni podatki za hidravlično modeliranje obravnavanega območja

Vhodni podatki, uporabljeni v modelu, so topografija terena in batimetrija struge, raba tal, pretoki različnih povratnih dob ter geometrija objektov, npr. stavbe, mostovi idr., in hidravlične karakteristike premostitev preko vodotoka.

Kot vhodni podatek za izdelavo digitalnega modela terena (DMR) so služili Lidar podatki skeniranja leta 2015 (blok 22 – Celje). Za izdelavo numerične mreže območja poplavne površine se je uporabila datoteka DMR, medtem ko smo za strugo uporabili podatke oblaka točk terena (OTR). Resolucija DMR podatkov je velikost celic 1 x 1 meter, medtem ko je pri podatkih OTR velikost celic 0,25 x 0,25 m. Oba tipa podatkov smo združili v programskem orodju Civil 3D. Rezultat je dodan na ortofoto posnetek obravnavanega območja na spodnji Sliki 21, kot digitalni zapis pa je služil kot osnova za nadaljnje obdelave, tako v hidravličnem modeliranju kot v GIS obdelavah.

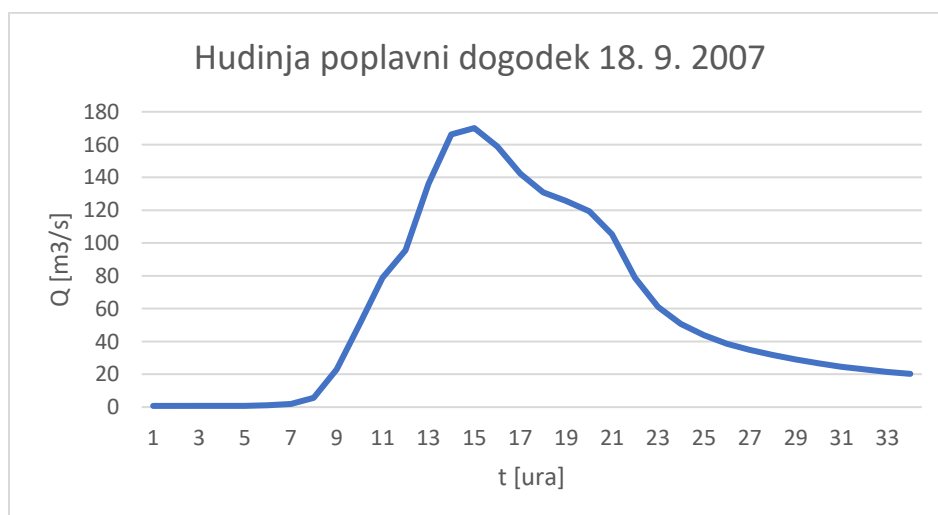


Slika 21: Izdelan digitalni opis terena z vnesenimi stavbami, ki je podlaga za nadaljnje izračune in obdelave.

3.2.1 Hidrološki podatki

Kot vhodne podatke za simuliranje razmer pri visokih vodah potrebujemo pretoke oz. hidrograme pri hidravličnih izračunih nestalnega toka. Na obravnavanem odseku so bile izmerjene največje količine pretokov dne 18. 9. 2007, ko je bil na vodomerni postaji Škofja vas izmerjen pretok $170 \text{ m}^3/\text{s}$, ki je sicer nekoliko nižje od našega vhodnega podatka pretokov za Q_{100} in Q_{50} (hidrološka študija). Prispevna površina za postajo Škofja vas znaša $155,9 \text{ km}^2$.

Za največji izmerjeni dogodek smo pridobili izmerjen hidrogram za to vodomerno postajo (Vir: ARSO, 2021). Uporabili ga bomo za analize obravnavanega območja, saj je v tej nalogi poudarek na povezavi med pretoki in erozijsko nevarnostjo ter ne na natančnejši analizi dejanskih pretokov. Na spodnjem grafu je prikaz časovnega poteka in vrednosti konice tega poplavnega dogodka. Ker smo imeli na voljo le konice visokih voda, smo to obliko hidrograma privzeli za vse štiri skupine vhodnih podatkov tako, da smo jih enostavno raztegnili po ordinati do konic pretokov različnih povratnih dob.



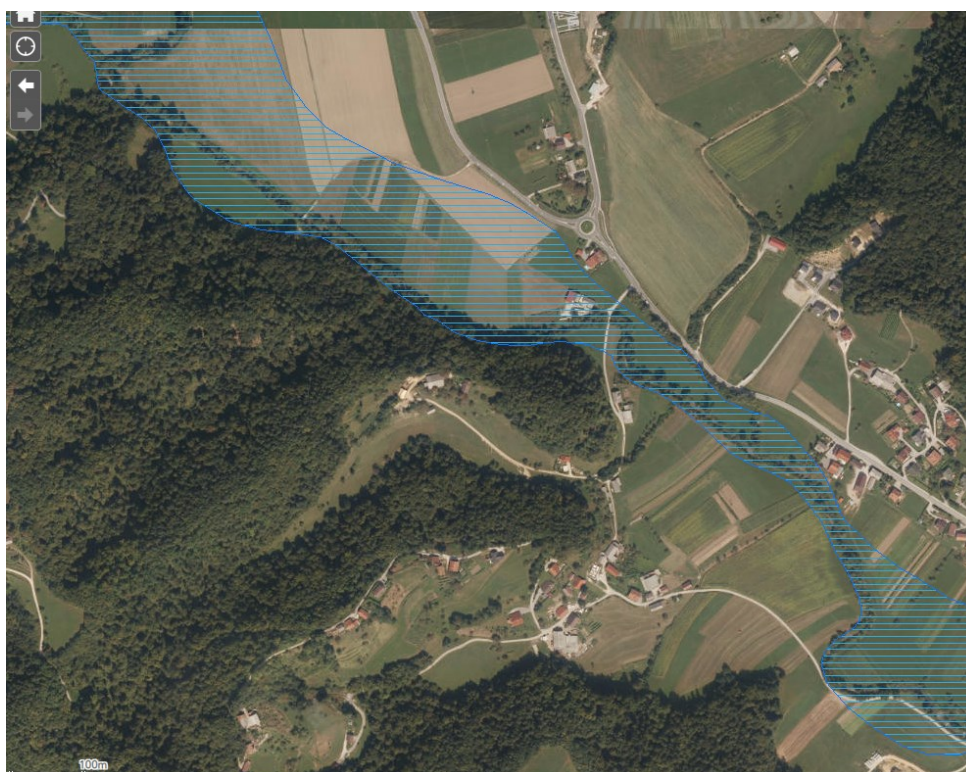
Slika 22: Prikaz konica visokovodnega dogodka 18. ter 19. 9. 2007 (Vir: ARSO, 2021)

Številčni opis hidrograma podaja Preglednica 1.

Preglednica 1: Časovna razporeditev pretokov dogodka 18. ter 19. 9. 2007 (Vir: ARSO, 2021)

Čas	Pretok [m ³ /s]	Čas	Pretok [m ³ /s]
18.09.2007 05:00:00	0.746	18.09.2007 22:00:00	130.87
18.09.2007 06:00:00	0.746	18.09.2007 23:00:00	125.618
18.09.2007 07:00:00	0.817	19.09.2007 00:00:00	119.295
18.09.2007 08:00:00	0.817	19.09.2007 01:00:00	105.343
18.09.2007 09:00:00	0.817	19.09.2007 02:00:00	78.857
18.09.2007 10:00:00	1.057	19.09.2007 03:00:00	61.052
18.09.2007 11:00:00	1.935	19.09.2007 04:00:00	50.745
18.09.2007 12:00:00	5.673	19.09.2007 05:00:00	43.912
18.09.2007 13:00:00	23.011	19.09.2007 06:00:00	38.589
18.09.2007 14:00:00	50.745	19.09.2007 07:00:00	34.956
18.09.2007 15:00:00	78.857	19.09.2007 08:00:00	31.756
18.09.2007 16:00:00	95.678	19.09.2007 09:00:00	28.983
18.09.2007 17:00:00	136.192	19.09.2007 10:00:00	26.615
18.09.2007 18:00:00	166.271	19.09.2007 11:00:00	24.631
18.09.2007 19:00:00	170.072	19.09.2007 12:00:00	23.011
18.09.2007 20:00:00	158.743	19.09.2007 13:00:00	21.423
18.09.2007 21:00:00	142.183	19.09.2007 14:00:00	20.176

Ker je ta visokovodni dogodek povzročil največji obseg poplavljanja v zadnji letih, je bila zanj narejena karta dosega poplavljenosti, kot podlaga za Opozorilno karto poplav. Za naše območje je ta obseg poplavljenosti prikazan na Sliki 23 (Vir: Atlas voda, 2021). V tej nalogi so uporabljeni višji pretoki kot so bili leta 2007, zato je obseg poplavljenosti večji.



Slika 23: Območje poplavljanja za padavinski dogodek 18-19. 8. 2007 (Vir: Atlas voda, 2021)

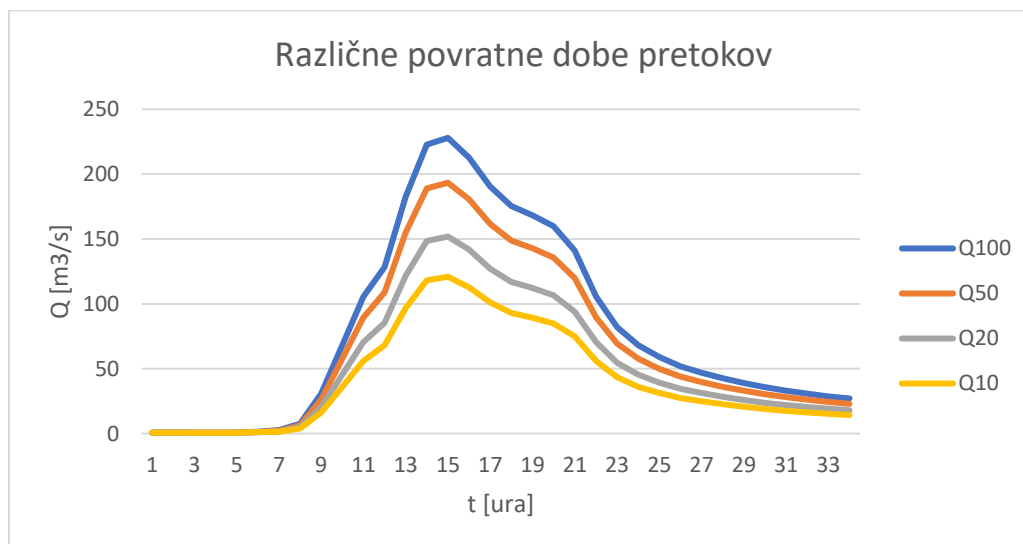
Za potrebe magistrske naloge so se za modeliranje vzeli pretoki iz HIDROLOŠKE ŠTUDIJE - HUDINJA, C – 61, september 1994 (Anzeljc, 2013). Pretoki so iz te študije vzeti za prerez pod pritokom Novaškega grabna, ki se nahaja dolvodno od spodnjega mostu. Tako smo glede pretokov na varni strani, ker smo upoštevali tudi vrednosti pritokov, katerih izlivnih območij pa nismo analizirali. Vključitev teh manjših pritokov pri modeliranju ne bi bistveno vplivala na glavno vsebino te naloge, zato smo vrednosti le teh upoštevali v skupnem pretoku Hudinje.

V Preglednici 2 so podani pretoki za štiri povratne dobe, ki smo jih izbrali za izračune ter so bili s »prirejenimi« hidrogrami kot vhodni podatek uporabljeni izračunih hidravličnih parametrov in pri preverjanju erozijske nevarnosti.

Preglednica 2: Povratne dobe pretokov ter pripadajoči pretok (Vir: Anzeljc, 2013)

Povratna doba [let]	Pretok [m^3/s]
10	120.9
20	151.9
50	193.4
100	228

Da bi lahko opravili izračune za nestalni tok, so bili hidrogrami za višje pretoke »napeti« na dejanski poplavni dogodek iz leta 2007, ki je opisan v prejšnjem poglavju. Čas na abscisi se ne spreminja, le pretoki na ordinati so povečani za vsako konico posebej. Naraščanje hidrogramov do vrednosti maksimalnih pretokov posameznih povratnih dob je prikazano na spodnjem grafu.



Slika 24: Konice pretokov zgenerirane glede na obstoječi poplavni dogodek iz leta 2007 (Vir: Anzeljc, 2013)

Iz Atlasa voda smo povzeli Integralne karte razredov poplavne nevarnosti za to območje (Slika 25), ki so nam služile za določitev prereza označenega z modro črto, v katerem smo lahko definirali zgornji robni pogoj za razdelitev dotekajoče količine na pretok struge in pretok po obvodnem prostoru. Da bi izločili vpliv dogajanja na sotočju Hudinje z Dobrnico, smo vtočni prerez modeliranega območja določili nekoliko dolvodno od samega sotočja. Karta razredov poplavne nevarnosti pa nam je bila v

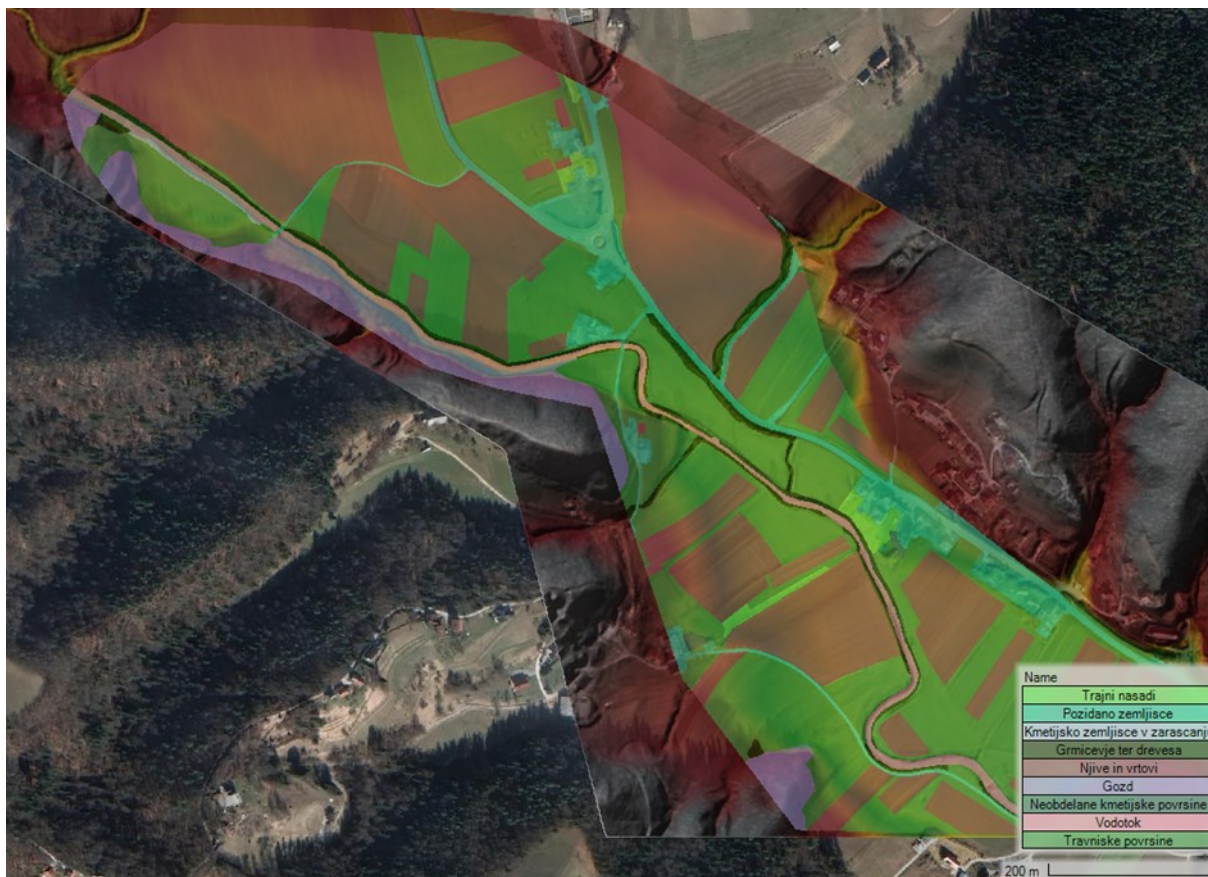
pomoč, da smo zajeli poplavno površino zaradi razlivanja vode preko bregov na zavoju Hudinje še pred sotočjem z Dobrnico. Kjer je najbolj zožen poplavni prostor, smo postavili robni pogoj vtoka, da sovпада z obstoječo karto poplavne nevarnosti.



Slika 25: Karte poplavne nevarnosti ter prerez za vtočni robni pogoj, označen z modro črto (Vir: Atlas voda, 2021)

3.2.2 Opis rabe prostora

Dejansko rabo prostora smo vzeli iz portala iObčina za občino Vojnik, od koder smo za izbrano območje izvozili poligone s pripadajočo rabo tal. Gre za podatke iz evidence GERK, ki smo jih združevali v podobmočja (poligone) z isto rabo tal, kot vhodne podatke za izračune v programskem orodju HEC-RAS. Na območjih, kjer se nahaja zarast (travniki, polja ...) smo upoštevali drugačne rastne razmere v različnih letnih časih. Zato smo naredili dve preglednici, eno za rastno oziroma vegetativno obdobje ter drugo za obdobje mirovanja. Za obe preglednici smo iz literature določili Manningove koeficiente hrapavosti za pripadajočo rabo tal (Chow, 1959), nato pa iz literature povzeli še dovoljene strižne napetosti ter dovoljene hitrosti, ki bi jih prenesla pripadajoča raba tal (Giordanengo, J. et.al., 2016).



Slika 26: Prikaz obstoječe rabe tal (Vir: iObčina, 2021)

Preglednica 3: Prikaz rabe tal ter pripadajočih Manningovih koeficientov, dovoljenih strižnih napetosti ter dovoljenih hitrosti za rastno obdobje

RABA_ID	OPIS	Površina [m ²]	Manningov koeficient [/]	Dovoljene strižne napetosti [N/m ²]	Dovoljene hitrosti [m/s]
1100	Njive in vrtovi	223662.2	0.055	40	1.3
1222	Trajni nasadi	7783.56	0.045	100	1.8
1300	Travnike površine	195547.5	0.03	50	1.4
1410	Kmetijsko zemljišče v zarasčanju	992.23	0.05	110	1.9
1500	Grmičevje, drevesa	13811.54	0.08	120	2
1600	Neobdelane kmetijske površine	999.77	0.04	90	1.7
2000	Gozd	28217.62	0.1	140	2.3
3000	Utrjene površine	42283.51	0.03	80	1.6
7000	Struga	15083.82	0.04	32.1	1.3

Preglednica 4: Prikaz rabe tal ter pripadajočih Manningovih koeficientov, dovoljenih strižnih napetost ter dovoljenih hitrosti za izven vegetativno obdobje

RABA_ID	OPIS	Površina [m ²]	Manningov koeficient [s/m ^{1/3}]	Dovoljene strižne napetosti [N/m ²]	Dovoljene strižne hitrosti [m/s]
1100	Njive in vrtovi	223662.2	0.035	2.2	0.7
1222	Trajni nasadi	7783.56	0.045	90	1.7
1300	Travniške površine	195547.5	0.03	40	1.3
1410	Kmetijsko zemljišče v zaraščanju	992.23	0.04	90	1.7
1500	Grmičevje, drevesa	13811.54	0.06	110	1.9
1600	Neobdelane kmetijske površine	999.77	0.035	90	1.7
2000	Gozd	28217.62	0.08	125	2.1
3000	Utrjene površine	42283.51	0.03	80	1.6
7000	Struga	15083.82	0.04	32.1	1.3

3.2.3 Opis hidravličnih robnih pogojev

Za modeliranje smo morali določiti še zgornji in spodnji robni pogoj in dodati hidravlične lastnosti premostitev.

V zgornjem robnem pogoju so zajeti posamezni pretoki povratnih dob ter naklon energije, ki jo lahko aproksimiramo z vzdolžnim naklonom terena. Pri robnem pogoju vtoka znaša naklon 0,7 %. Spodnji robni pogoj smo predpostavili kot globino normalnega toka (»Normal depth«). Tudi na tem delu je naklon energije privzet kot vzdolžni padec terena in prav tako znaša 0,7 %. Programsko orodje HEC-RAS tako te vrednosti uporabi za izračun globin na obeh robovih modeliranega območja.

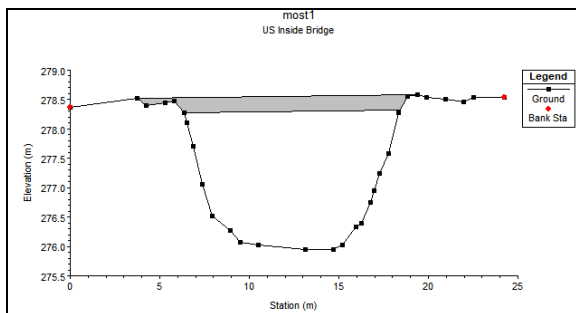
Na območju obdelave imamo dve premostitvi. Sliki premostitev (Slika 27 in Slika 28) ter pripadajoča prečna prereza (Slika 29 in Slika 30) sta prikazana na spodaj.



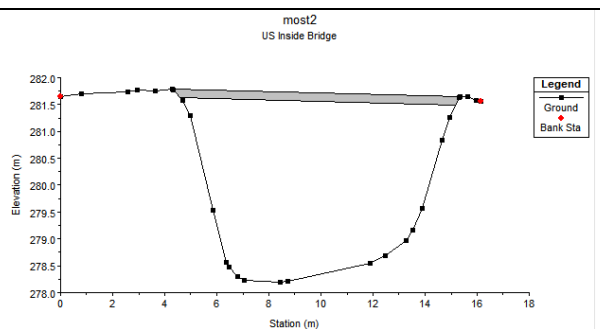
Slika 27: Slika dolvodnega mostu (foto: Matej Mešl, 2021)



Slika 28: Slika gorvodnega mostu (foto: Matej Mešl, 2021)



Slika 29: Prečni prerez dolvodnega mostu



Slika 30: Prečni prerez gorvodnega mostu

Kasnejši izračuni so pokazali, da pride pri dolvodni premostitvi do prelivanja mostu pri visokih vodah, medtem ko je gorvodna premostitev precej višje od okoliškega terena ter jo voda ne preplavi. Primerjava svetlih odprtih obeh mostov kaže na to, da je dolvodni most poddimenzioniran.

4 OBDELAVE IN ANALIZE

Za izbrano območje smo preverili erozijske obremenitve ter z upoštevanjem odpornosti površin glede na rabo prostora izdelali prikaz erozijske nevarnosti. To je bilo izhodišče za morebitne spremembe oz. primernejšo (različno) rabo tal ter druge predlagane sonaravne ukrepe. Kot izhodišče smo uporabljali obstoječe stanje, ter sedanjo erozijsko nevarnost glede na dejansko rabo tal v vegetacijskem obdobju. Na podlagi teh rezultatov naših izračunov smo preverili različna možna stanja, npr. spremembe vrste kmetijske rabe v rastnem obdobju ter razmere izven vegetativnega obdobja, ko je površina terena praviloma manj erozijsko odporna (npr. zorana njiva). Nato smo za obstoječe stanje v vegetativnem obdobju analizirali spremembe, ko smo izbrali posamezen ukrep, tj. na območju večje erozijske nevarnosti ureditev žive meje (pas grmovne zarasti).

Vpliv posameznega lokalnega posega smo prikazali s tem, kakšen vpliv ima na porazdelitev globin, strižnih hitrosti ter strižnih napetosti na obravnavanem območju. Za nekaj prečnih (dolinskih) prereзов smo prikazali tudi, kako se v prečni smeri spreminjajo količine vodnih tokov, ko se zaradi lokalnih ovir (žive meje) vodni tok prerazporeja na lokacije z manjšim uporom vodnega toka. Zaradi ovir živih mej na poplavnem območju lahko lokalno prihaja do povečanja toka vode nazaj v strugo, zato je potrebno preveriti strižne obremenitve v strugi na teh območjih.. Če bi torej s sonaravnim ukrepom na obvodnem (poplavnem) prostoru poslabšali stanje v strugi vodotoka, je treba kot omilitveni ukrep predvideti še utrditev v strugi (primeri utrditev brežin v strugi so prikazani v Prilogi C).

Seveda pa so mogoče številne kombinacije različnih ukrepov na območju obravnave. S hidravličnim modeliranjem lahko ugotovljamo skupni vpliv neke kombinacije ukrepov in s poskušanjem iščemo najprimernejši nabor ukrepov. Zaradi obsežnosti dela smo tukaj obravnavali le eno kombinacijo ukrepov, prilagojeno sedanjemu rabi obvodnih (kmetijskih) površin. Za zmanjšanje erozijske nevarnosti smo torej na primernih lokacijah predlagali kombinacijo ukrepov ter prikazali rezultate.

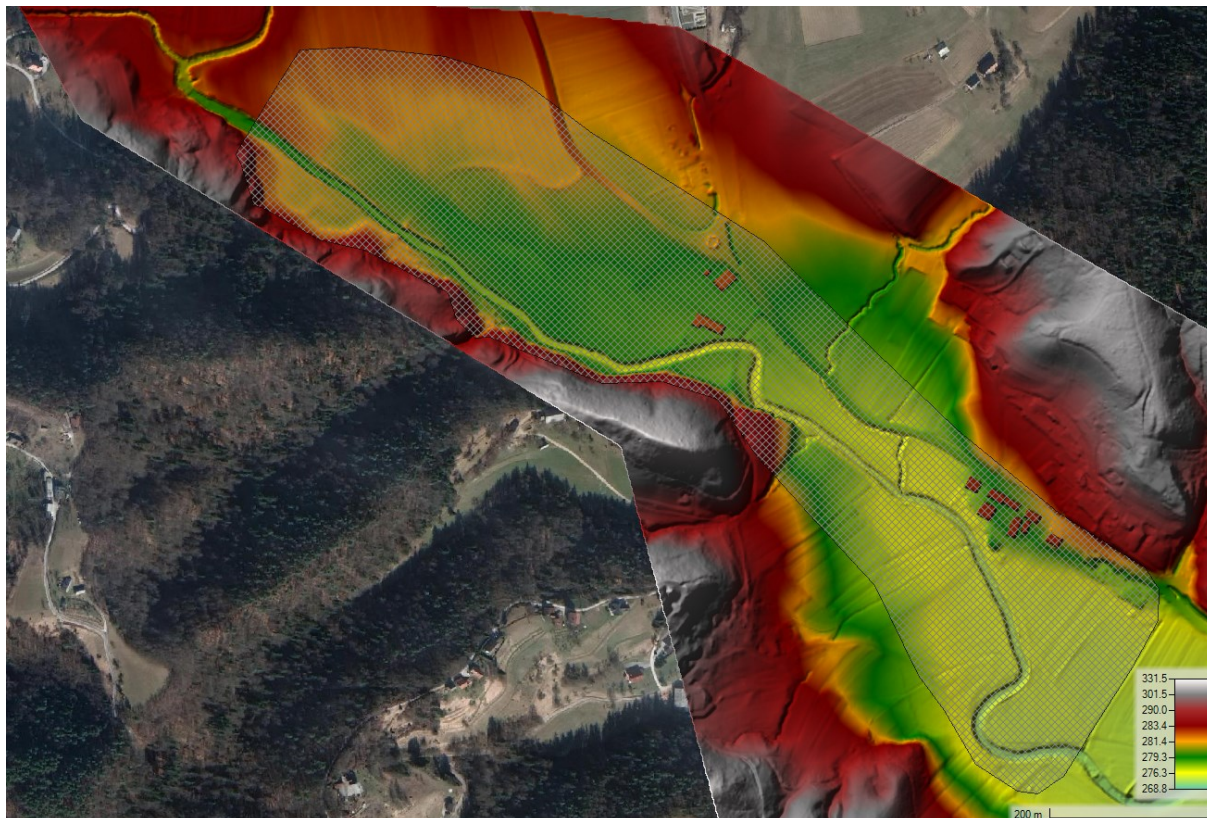
4.1 Izdelava hidravličnega modela HEC-RAS-2D in uporaba QGIS orodja za izbrano območje

Za hidravlično modeliranje potrebujemo numerično zajeto topografijo terena, batimetrijo struge, geometrijo objektov v prostoru (stavbe, premostitve ...) in numerične zapise začetnih pogojev (nestalni tok) in robnih pogojev (gorvodni, dolvodni, ob objektih ...).

Kot vhodni podatek za izdelavo modela v programskem orodju HEC-RAS smo uporabili numerični opis terena, ki smo ga pripravili s programskim orodjem Civil 3D. V njem smo združili digitalni model reliefa (DMR), kjer so celice velikosti 1x1 m, medtem ko smo za območje struge uporabili OTR velikost celic 0,25x0,25 m.

Ko smo uvozili teren v HEC-RAS, smo za hidravlično modeliranje najprej ustvarili osnovno grobo numerično mrežo z osnovno velikostjo celice 3x3m (Slika 31). V RAS Mapperju smo zgladili tudi obliko dna oz. brežin v strugi, kjer so se pojavljale napake pri zajemu točk (npr. pri LIDAR snemanju)

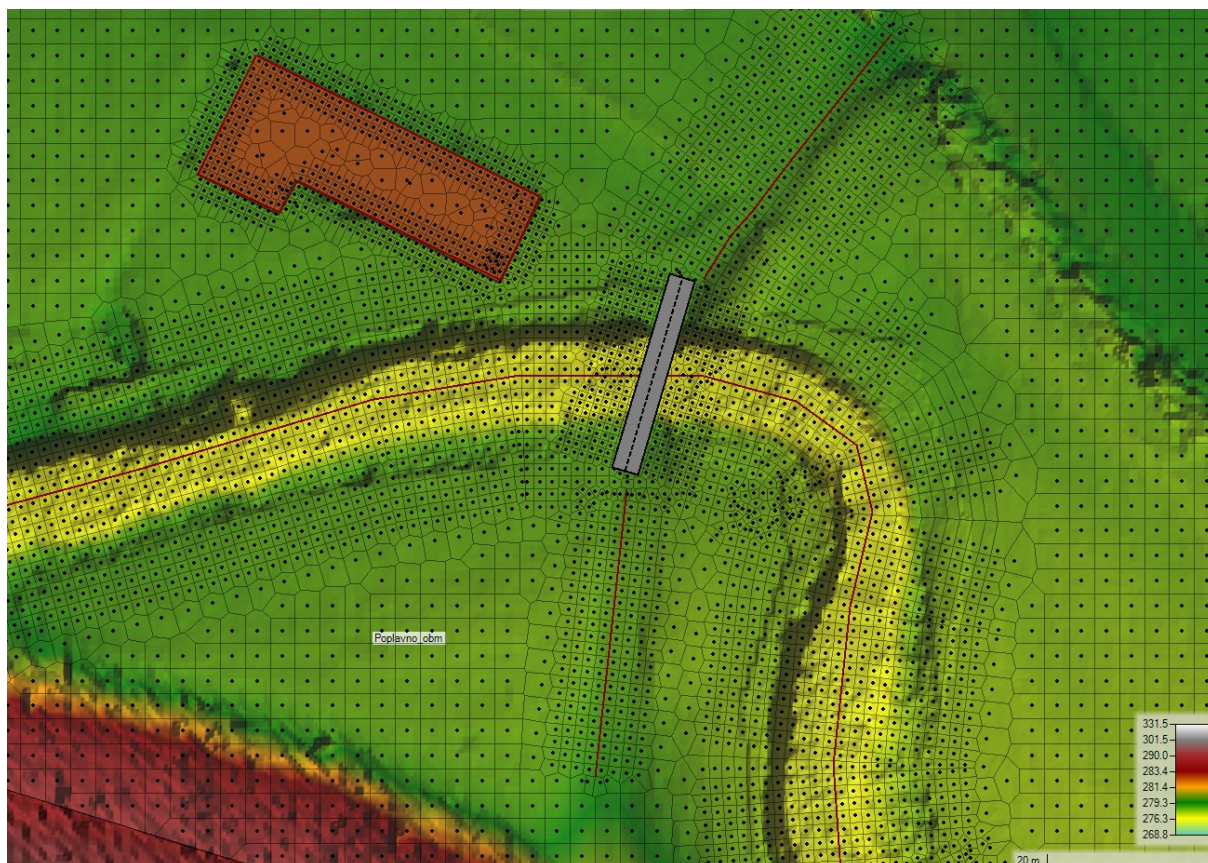
oziroma določanje dejanskega terena, pri čemer je treba odstraniti morebitni zapis vegetacije (odboj od vejevja ipd.). Dodali smo še stavbe, ker vplivajo na potek vodnih tokov in pri tem predpostavili, da skozi njih ni vodnega toka.



Slika 31: Na ortofoto podlagi je prikaz DMR ter izhodiščna velikost numerične mreže za hidravlično orodje HEC-RAS-2D

V naslednjem koraku smo za obravnavano območje lokalno zmanjševali velikost numeričnih celic, da bi čim bolj simulirali hidravlične razmere ob objektih oziroma vplive drugih razgibanosti v prostoru. Na območju vodotoka, cest ter stavb smo celice zgostili na njihovo velikost 1,5x1,5 metra, medtem ko je v okolici obeh mostnih konstrukcij bila velikost celic 1x1 meter.

Ključno vodilo pri zgoščevanju celic je torej bilo, da se na območjih, kjer se za tok vode pojavljajo spremembe, kot so prelivanja, obtekanja okoli stavb ter mostne konstrukcije ipd., predvidijo manjše numerične celice, da je hidravlična simulacija tamkajšnjih razmer čim bolj natančna. Vrednosti posameznih hidravličnih parametrov pa se izberejo znotraj programa HEC-RAS-2D, ko se določajo procesi (vtok v mostno odprtino, prelivanje objektov ...). Slika 32 prikazuje zgostitve celic v okolici ene od premostitev, stavbe ter pri prelivanju preko dovozne ceste.



Slika 32: Prikaz zgostitve celic v območju ob stavbi, na stiku brežin vodotoka z obvodnim prostorom, na območju prelivanja preko dovozne ceste na most ter v območju mostu idr.

Pretoki oz. hidrogrami visokovodnih valov so vhodni podatki, s katerimi izberemo, kakšen visokovodni dogodek obravnavamo. Kot je bilo že opisano, se je hidrogram dejanskega dogodka iz leta 2007 uporabil za določitev »privzetih« hidrogramov za 4 dogodke z različno verjetnostjo pojava, tj. za Q10, Q20, Q50 in Q100. Praviloma so se erozijske razmere obravnavale za različna stanja v prostoru za vse 4 pretoke. Hidravlično modeliranje je bilo opravljeno za nestalni tok. Da bi dobili začetno stanje, smo izvedli simulacijo za čas 12 ur »ogrevanja« modela z začetnimi pretoki, preden se je pojavil visokovodni val. Obravnavan visokovodni dogodek je bil nato simuliran z računskim časom 1 sekunde.

Na zgornjem in spodnjem robu modeliranega območja je treba podati robni pogoj. Za hidravlično modeliranje je bil privzet začetni naklon, povzet kot povprečni vzdolžni padec doline, ki znaša 0,7 %. Na zadnjem dolvodnem prerezu smo uporabili predpostavko, da voda odteka kot normalni tok z globino, ki jo določa naklon 0,7 %. Pritoki na obravnavanem območju niso bili dodatno obravnavani, saj je bil poudarek v nalogi na preučevanju erozijske nevarnosti obvodnega prostora.

Za opis tokovnih razmer na poplavnem območju, kjer so različne rabe tal, je bilo treba privzeti ustrezne Manningove koeficiente trenja, pri čemer so vrednosti koeficientov pri turbulentnem toku odvisne predvsem od hrapavosti terena. Običajno se te vrednosti koeficientov določajo v procesu umerjanja hidravličnega modela na prejšnje visokovodne dogodke. Ker podrobnejših merjenih podatkov o preteklih poplavnih dogodkih nismo imeli, smo se za grobo umerjanje hidravličnega modela naslonili

na Opozorilno karto poplavisne nevarnosti (opis v 3. poglavju) in na tamkajšnje porazdelitev globin ter obsega poplavljanja. Za dejansko hidravlično analizo v praksi je treba umerjanje seveda podrobneje opraviti.

Rezultati hidravličnega modeliranja so za nadaljnje delo uporabljeni predvsem kot karte porazdelitve globin, strižnih hitrosti ter strižnih napetosti. Pri tem je treba opozoriti, da so za primerjalne analize upoštevane maksimalne vrednosti strižnih hitrosti ter strižnih napetosti, ki so se v času simulacije hidrograma pojavile. Pri nestalnem toku namreč ni nujno, da na posameznih lokacijah nastopijo maksimalne strižne vrednosti istočasno z maksimalnim pretokom – pri prelivanju cestnega telesa vpliva namreč tudi, ali gre za prost ali potopljen preliv (ko je spodnja voda že visoka).

Z rezultati HEC-RAS-2D smo opravili številne analize stanja oz. primerjave med posameznimi primeri, da smo lahko pokazali vplive izbranih sonaravnih ukrepov. Za takšno delo je bilo najprimerneje uporabiti programsko orodje QGIS.

Poleg rastrskih rezultatov iz HEC-RAS-2D numeričnih simulacij smo za QGIS obdelave uporabili tudi podatke dejanske rabe tal iz aplikacije iObčine, ki zajema obravnavano območje. Na podlagi te evidence dejanske rabe prostora (oz. kmetijskih, prometnih idr. površin) smo v numerične celice pripisali dovoljene obremenitve, ali v obliki dovoljenih strižnih hitrosti ali strižnih napetosti. Te vrednosti smo povzeli od različnih avtorjev, zato se iz različnih virov med seboj razlikujejo. Za namen te naloge smo izbrali primerne vrednosti, ki so nato enako uporabljene v vseh analizah.

Za območje obdelave smo združili poligone iste rabe prostora. Te poligone smo pretvorili iz vektorskega v rastrski sloj, da smo lahko izvedli različne primerjave oziroma z izračunom razlik med (npr. erozijsko) obremenitvijo in odpornostjo prikazali nove sloje o lastnostih prostora. Tako je npr. z rezultati, v katerih numeričnih celicah so obremenitve večje od odpornosti, bilo mogoče prikazati območja erozijske nevarnosti, kjer obremenitve presežejo dovoljene vrednosti. Enostaven binarni prikaz (tj. kje je oz. ni erozijske nevarnosti) je mogoče v GIS okolju poljubno nadgraditi, npr. z razredi (območji), kjer je nevarnost manjša ali večja ...).

Opravljeni izračuni za 4 pretoke pokažejo tudi porazdelitev oz. povečevanje območij erozijske nevarnosti z naraščanjem pretokov, zato smo to spreminjanje stanja v prostoru združili v en prikaz. Takšna podlaga je dobro izhodišče za nadaljevanje opravljenega dela, kjer bi lahko analizirali, ali je treba res zmanjševati erozijsko nevarnost vse do Q100 ali pa bi se lahko zadovoljili že z odpravljanjem erozijske nevarnosti vsaj pri nižjih visokovodnih dogodkih (npr. Q10, Q20).

4.2 Hidravlično modeliranje in erozijska nevarnost za obstoječe stanje rabe prostora

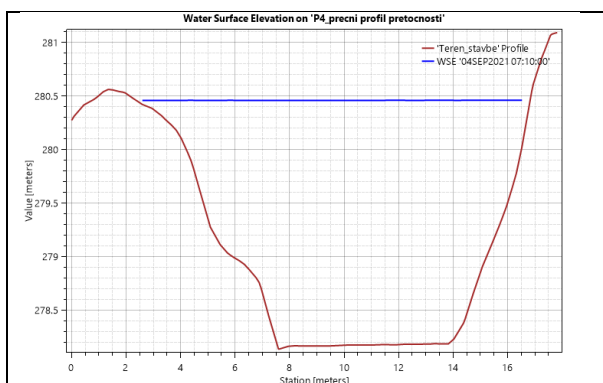
Za obstoječe stanje smo vzeli rastno obdobje poleti 2021, zajeto iz evidence GERK oz. iObčine in ogleda terena z dejanskimi posevki kmetijskih površin. Glede na obstoječe rabe po posameznih parcelah (z mejami po DKN), smo dejanski rabi tal (iz tabele, podane v 3. poglavju) pripisali ustrezne Manningove koeficiente hrapavosti in povzeli dovoljene strižne hitrosti ter dovoljene strižne napetosti. Za kmetijske

površine smo za rabo tal njivskih površin upoštevali, da so zasajene s koruzo, kar je razvidno tudi s fotografij s terenskega ogleda.

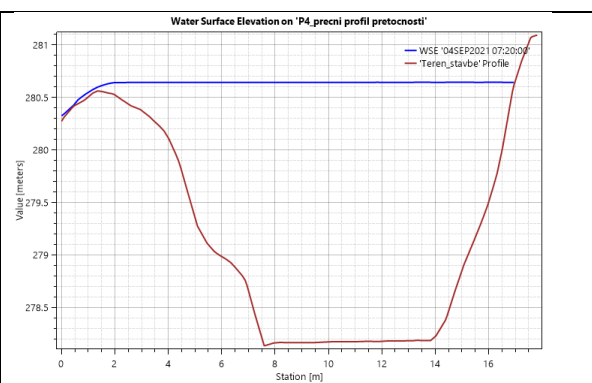
4.2.1 Določanje pretočnosti struge in prereza, kjer se voda najprej izlije iz struge

Tok v prostoru ob strugi se pojavi, ko je dotečajoča količina višja od pretočne sposobnosti (bankful discharge) struge. Tedaj je struga »polna do roba« in se začne izlivanje vode iz struge. Zaradi spremenljivega prečnega prereza struge vzdolž trase vodotoka, različne zaraščenosti, lokalnih ovir itd. je pretočnost vzdolž trase različna. Pri simulaciji nestalnega toka se vzdolž trase pretok spreminja po času, zato se spreminja tudi lokacija in jakost izlivanja v obvodni prostor oz. vračanje vode v strugo. To dinamiko pokaže hidravlično modeliranje, zato smo najprej poiskali količino pretoka in prečni prerez, kjer se voda iz struge najprej izlije preko zgornjega roba brežine struge in prične poplavljeni obvodni prostor.

Za izračun pretočnosti in iskanje prečnega prereza, kjer se voda najprej izlije iz struge, je bil čas prikaza rezultatov simulacije nastavljen na 10 min. Slika 33 kaže, da v relativnem času simulacije 7:10 voda še ne prestopi bregov na nobeni točki območja obdelave (na levem bregu je manjši nasip). V relativnem času 7:20 pa Slika 34 kaže, da se je že pojavilo prvo izlivanje iz struge (preliv na levem bregu).

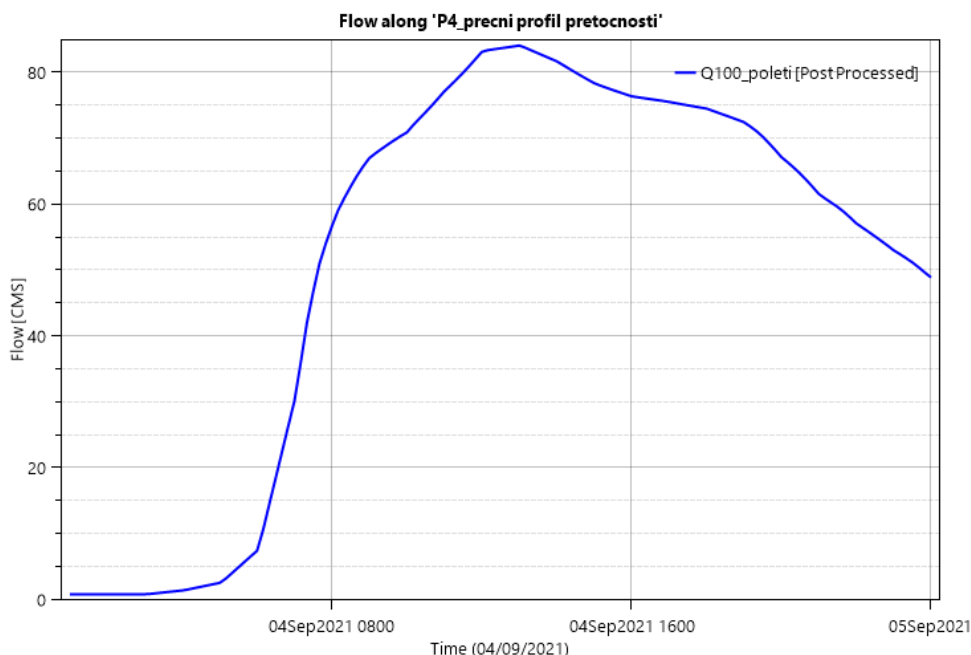


Slika 33: Čas simulacije 7:10 v najbolj neugodnem prerezu tik preden se voda izlije iz struge ($Q=36,5 \text{ m}^3/\text{s}$)



Slika 34: Čas simulacije 7:20 v najbolj neugodnem prerezu ko voda že začne prelivati levo brežino ($Q=42,3 \text{ m}^3/\text{s}$)

Iz časovnega poteka naraščanja pretokov (Slika 35 - hidrogram za strugo) je mogoče tudi razbrati maksimalni pretok v strugi pri Q_{100} , ki se pojavi v prerezu z najmanjšo pretočnostjo. Tam znaša $84 \text{ m}^3/\text{s}$, ostala količina je vodni tok po obvodnem (poplavnem) prostoru. Iz hidrograma za strugo pa je mogoče poiskati tudi pretočnost struge v času, ko se prične izlivanje vode iz struge. V relativnem času 7:10 oz. 7:20 sta vrednosti pretokov v strugi $36,5 \text{ m}^3/\text{s}$ oziroma $Q=42,3 \text{ m}^3/\text{s}$, zato je najmanjša pretočnost struge nekje med tema vrednostma. Za primerjavo $Q_{10}=120,9 \text{ m}^3/\text{s}$.



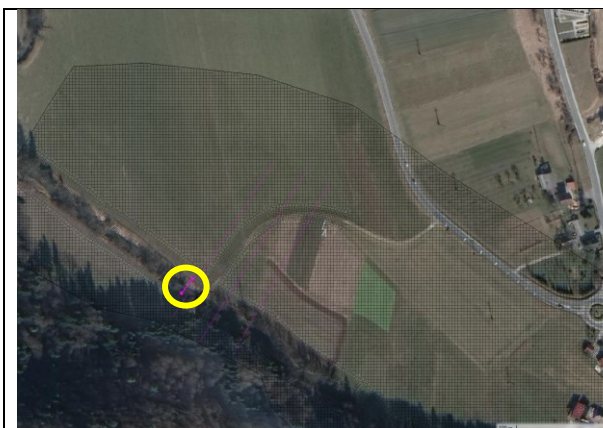
Slika 35: Hidrogram v strugi - naraščanje pretoka v prečnem profilu z najmanjšo pretočnostjo

Seveda se ta vrednost razlikuje vzdolž vodotoka, saj se pretočnost struge spreminja, s tem pa se pojavljajo različne lokacije izlivanja oz. vračanja vode v strugo, kar vpliva na tokovno sliko in velikosti območja razlivanja. Skupni pretok je vsota pretoka v strugi in pretokov v levem/desnem poplavnem območju. Kot bo pokazano kasneje, lahko ukrepi v obvodnem prostoru spremenijo razmerja med njimi, kajti, kjer so velike poplavne površine ter s tem manjša globina vode v strugi bo posledično manjši pretok. Obratno pa bo zoženje terena rezultiralo k večjim hitrostim ter zaradi konfiguracije terena tudi višje gladine vode, kar bi lahko preusmerilo večji pretok v strugo.

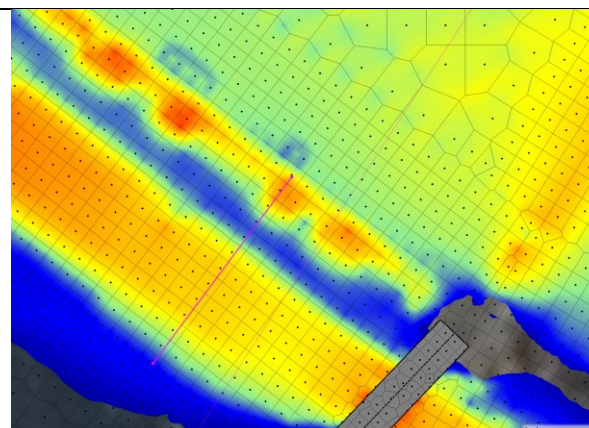
4.2.2 Določanje porazdelitve hitrosti in strižnih napetosti

Strižne napetosti na ostenju se spreminjajo glede na lokalno hitrost vodnega toka, na katero vpliva odpor vodnemu toku (dna, brežin, površine terena), ki je zajet v Manningovem koeficientu hrapavosti. Dodaten delež pa prinaša vpliv zarasti, ki je odvisen od vrste, zgoščenosti, razporejenosti trave, grmovja, dreves, itd. O njem potekajo številne raziskave, zato je v tej nalogi uporabljen poenostavljen pristop, kjer se upoštevajo relacije med lokalno hitrostjo v numerični celici, povprečeni po globini (v 2D toku), za te razmere izračunana strižna hitrost ob ostenju in iz nje izračunana lokalna (v celici) obremenilna strižna napetost. Na ta način lahko dobimo v numeričnih celicah porazdeljene strižne napetosti (obremenitev), ki jih lahko primerjamo z dopustnimi hitrostmi/napetostmi v njih (pokazatelj erozijske odpornosti).

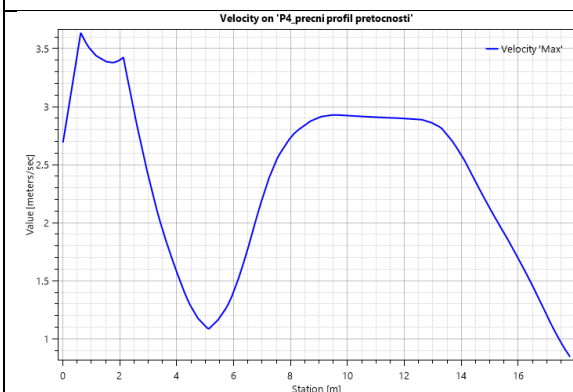
Kot primer si oglejmo razmere v okolici prereza, kjer se najprej pojavi izlivanje iz struge (Slika 36). Ker so prikazane največje vrednosti strižnih napetosti, se pri prelivanju brežin (manjšega nasipa vzdolž levega brega) povečajo strižne napetosti na robovih struge, tj. na kroni nasipov. Ker v začetni fazi prelivanja obvodni prostor še ni poplavljen, se pri toku po brežini nasipa pojavijo večje hitrosti oz. večje strižne napetosti kot kasneje, ko je vodostaj na poplavnem prostoru že višji in se pojavi potopljen preliv.



Slika 36: Prikaz lokacije prečnega prereza P4 z najmanjšo pretočno sposobnostjo



Slika 37: Prikaz računskih celic (v okolici prečnega prereza P4) iz katerih so povzete strižne hitrosti ter napetosti pri pretoku Q100



Slika 38: Porazdelitev strižnih hitrosti po obravnavanem prečnem prerezu P4 z najmanjšo pretočnostjo

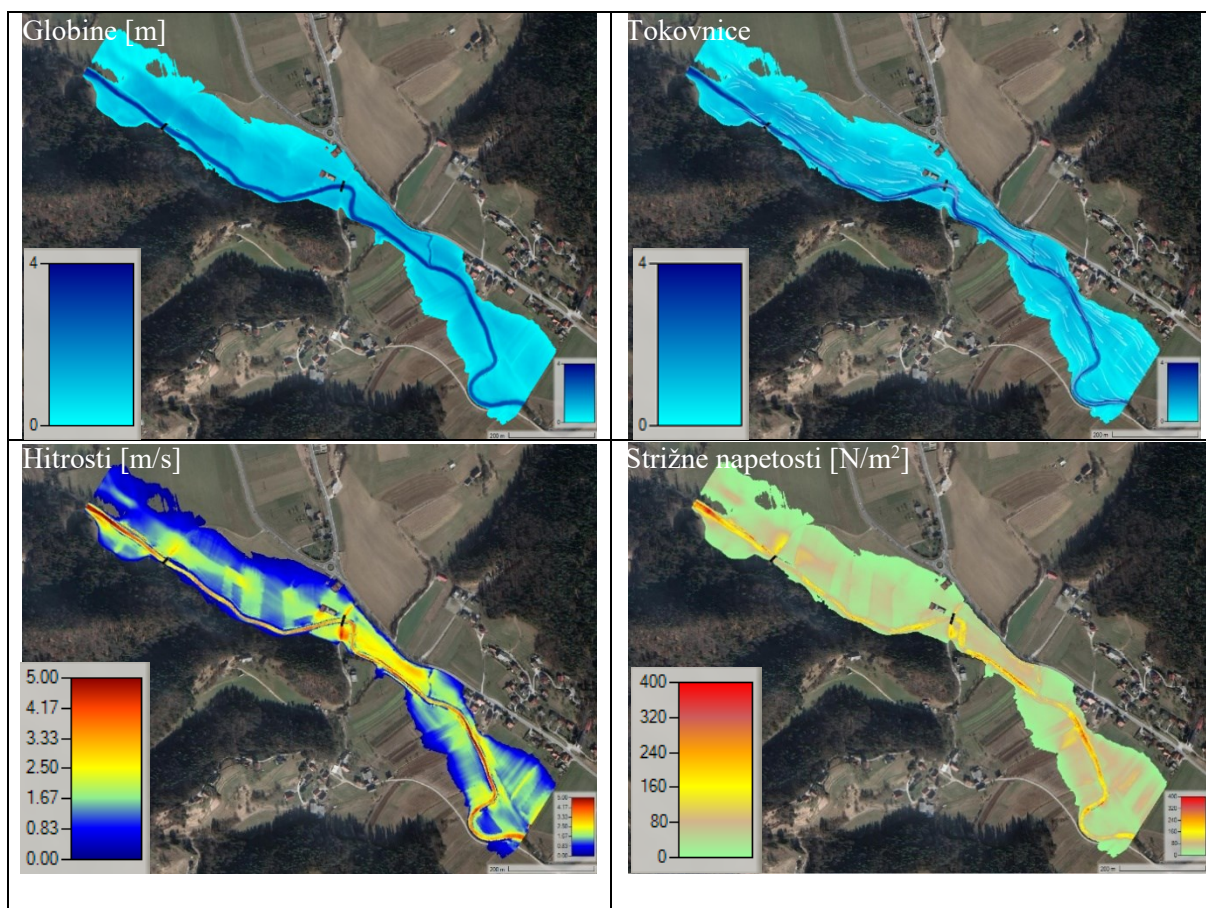


Slika 39: Porazdelitev strižnih napetosti po obravnavanem prečnem prerezu P4 z najmanjšo pretočno sposobnostjo

Račun kaže, da se maksimalna strižna napetost na robovih struge oziroma v območju zračnega pobočja nasipa giblje okoli 240 N/m^2 , ki je v tem primeru precej višja kot na dnu ter po brežinah struge, kjer se v tem prečnem prerezu gibljejo okoli 100 N/m^2 . To opozarja, da je treba pri sonaravnih ukrepih obravnavati tudi razmere na lokacijah izlivanja iz struge, kjer se lokalno pojavlja večja erozijska nevarnost.

Za obravnavano območje smo tukaj prikazali le globine, tokovnice, hitrosti ter strižne napetosti pri pretoku Q100. Za ostale 3 pretoke so rezultati na enak način podani v Prilogah B(B.1, B.2, B.3). Porazdelitev po prostoru kaže, da se globine v strugi gibljejo okoli 3 metrov, na poplavnih površini pa so odvisne od topografije, objektov itd. Maksimalne globine na poplavnem območju so do okoli 1,5 metra, nato pa se z oddaljenostjo od struge praviloma zmanjšujejo, razen v kakšnih depresijah/kanalih, kjer se lahko poveča. Pri tokovnicah je razvidno, da se po poplavnih površinah vzporedno ustvarijo paralelni tokovi. Zaradi vijugaste struge se pri zavojih struge pojavi prelivanje teh tokov v oziroma iz struge. Hitrosti se po poplavnih površinah gibljejo do $2,5 \text{ m/s}$, kjer pa je močnejše zožena konfiguracija terena pa naraste, kot na primer dolvodno od spodnjega mostu na levi poplavni površini, hitrost do 3

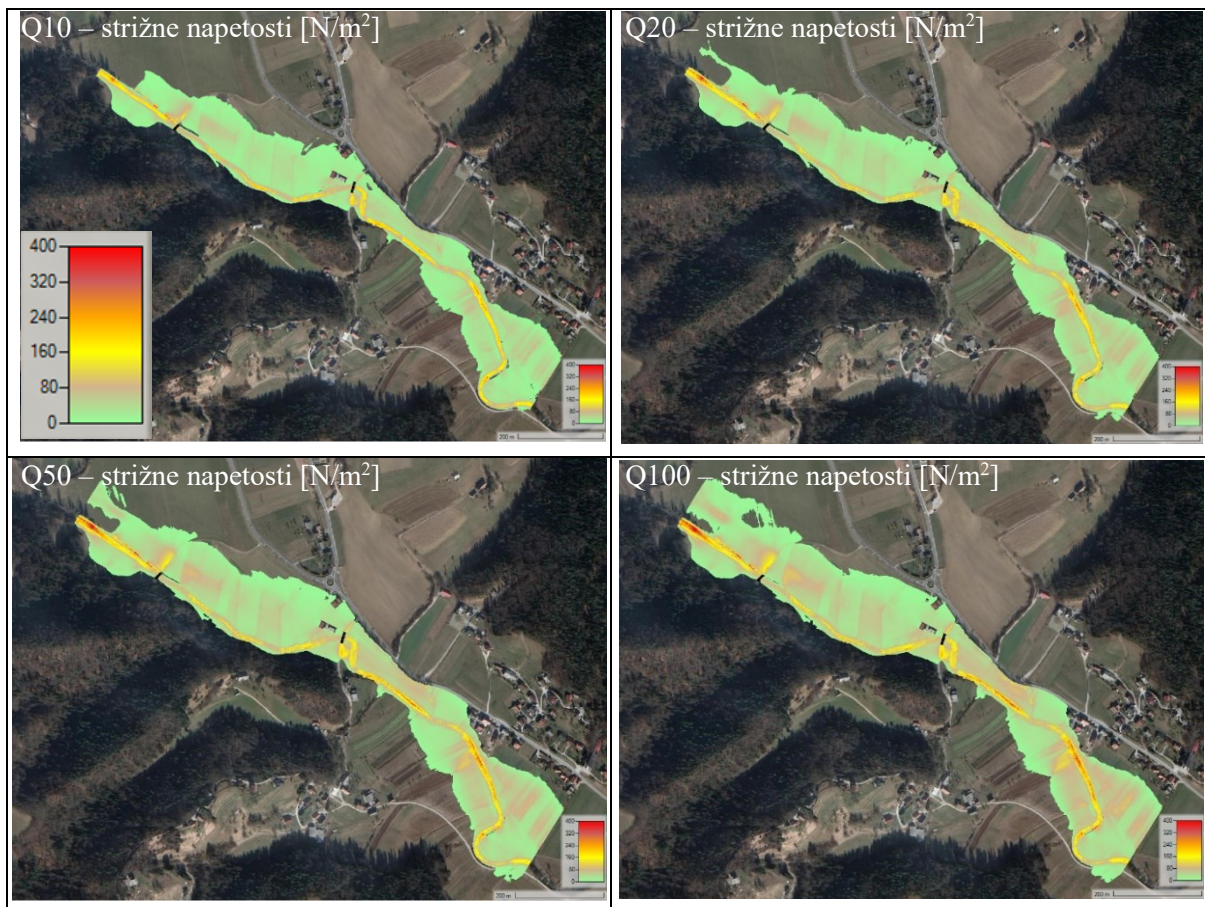
m/s. Do največjih hitrosti prihaja kjer so travniki, saj zarast tam vodni tok manj ovira. Zaradi manjšega koeficienta hrapavosti so energijske izgube na območju travnikov manjše, medtem ko njivske površine z visokoraslo koruzo delujejo kot nekakšna »dušilka« (večji koeficient hrapavosti) in vodni tok zaustavljajo, delno pa tudi preusmerjajo. Prikazane strižne napetosti so zato pod vplivom različnih hitrosti, globlin in Manningovih koeficientov v sosednjih numeričnih celicah, zato je treba njihovo prostorsko porazdelitev razumeti v širšem kontekstu.



Slika 40: Prikaz obstoječega stanja pri Q100: globine, tokovnice, hitrosti ter strižne napetosti

Ker so prikazane maksimalne vrednosti strižnih hitrosti ter napetosti, ki se lokalno pojavljajo, je treba upoštevati tudi, da lahko nastopijo v različnih trenutkih, ne glede na nastop maksimalnega pretoka v strugi/poplavnih površinah. Torej maksimalne vrednosti pretokov in hitrosti/strigov na teh prikazih niso enolično povezane - primer tega se pojavi pri prelivanju cestnega nasipa (dovoza na most), kjer je največja hitrost prelivanja pri prostem prelivu, predno se dolvodno napolni poplavni prostor. Pri tem primeru torej pride do največjih hitrosti predno nastopi maksimalni pretok.

Na spodnji sliki 41 imamo prikazane porazdelitve strižnih napetosti za obstoječe stanje glede na naraščanje pretokov od Q10, Q20, Q50 do Q100.



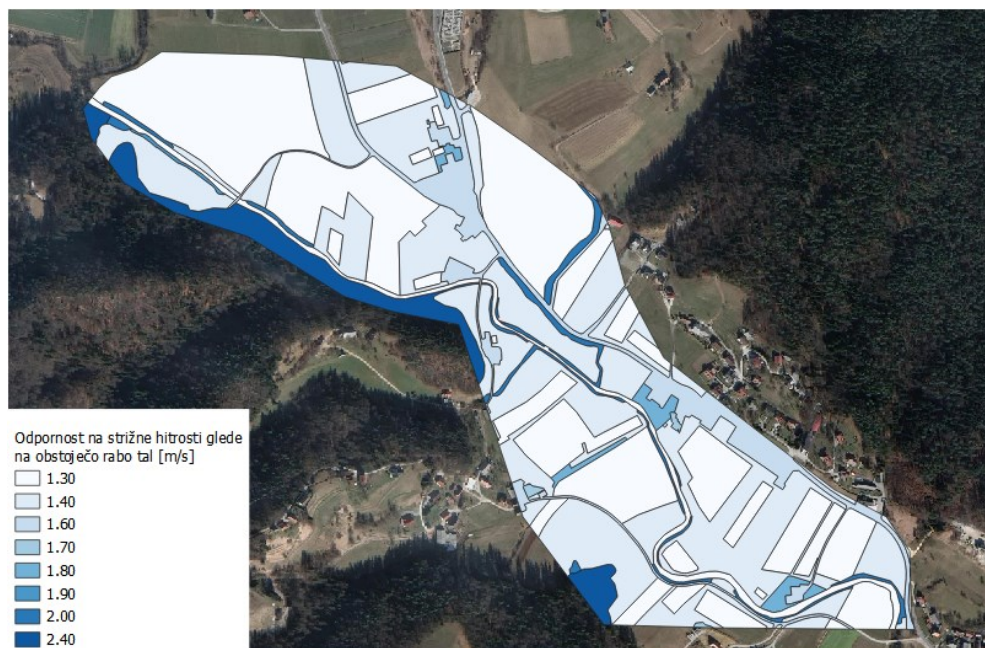
Slika 41: Naraščanje strižnih napetosti glede na naraščanje pretoka

Zaradi preglednosti besedila so grafični rezultati za druge pretoke (Q10, Q20, Q50) podani v prilogah in jih v besedilo povzamemo le, ko prikazujemo primerjave stanja pri različnih pretokih.

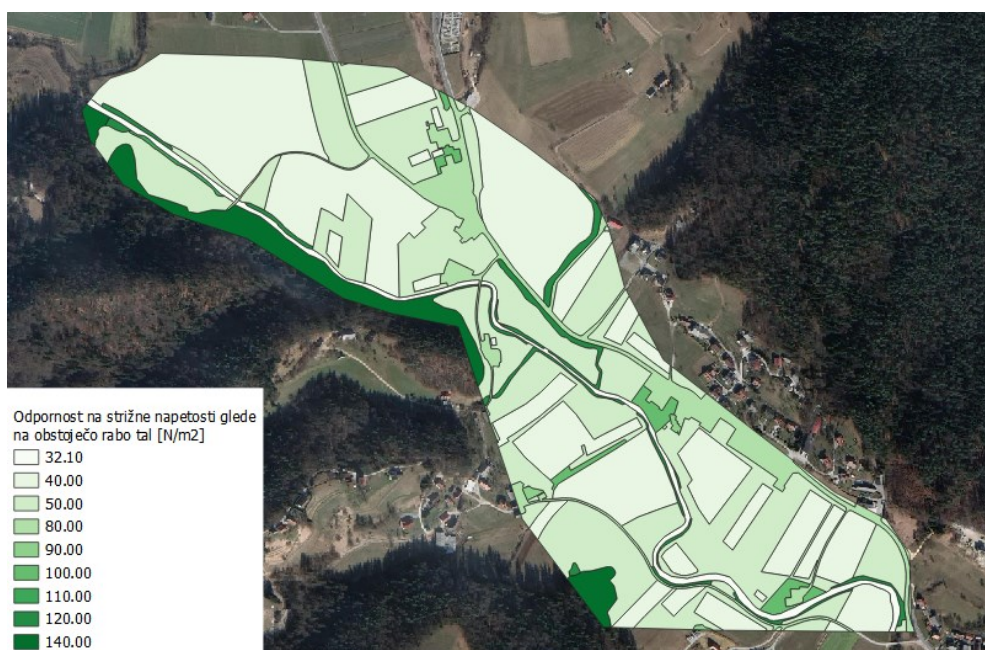
4.2.3 Prikaz dovoljenih lokalnih hitrosti in dopustnih strižnih napetosti glede na rabo prostora

V teoretičnih podlagah je že bilo prikazano, da za določitev erozijske nevarnosti potrebujemo podatek o odpornosti obravnavanih površin na erozivne sile/napetosti. Odpornost je odvisna od zarasti (vrste, starosti ...), kmetijske obdelave (košnja, oranje ..) oz. utrjenosti površin (prometnice ...). Za obstoječe stanje (rabe) prostora je v naslednjem koraku izdelana prostorska porazdelitev erozijske odpornosti. Po različnih avtorjih smo pri pregledu teoretičnih podlag povzeli vrednosti dovoljene/dopustne vrednosti, ki jih v nadaljevanju upoštevamo kot erozijsko »odpornost«, nato pa se odločili za uporabo vrednosti prikazanih v Prilogi A.

Avtorji podajajo te odpornosti kot vrednost dovoljene hitrosti vodnega toka ali kot dovoljene strižne napetosti za posamezno rabo/površino. Na spodnjih dveh slikah sta prikazani obe vrsti izražanja odpornosti, vezani na parcelne meje, povezane v poligone z enako rabo (glej legendo). Z modrimi barvami je prikazana dovoljena strižna hitrost posamezne rabe na parcelah (Slika 42), medtem ko je v zelenih odtenkih prikazana odpornost te iste rabe na parcelah, glede na strižne napetosti (Slika 43).



Slika 42: Porazdelitev odpornosti, izražene z dovoljeno hitrostjo, za obstoječe stanje



Slika 43: Porazdelitev odpornosti, izražene z dovoljeno strižno napetostjo za obstoječe stanje

Pri tem je treba upoštevati, da se lahko porazdelitev obeh odpornosti spreminja tako po prostoru (npr. kolobarjenje v kmetijstvu) kot po času (npr. njiva z žitom, strnišče, praha). Dodaten vir spreminjanja odpornosti pa prinašajo namenski, sonaravni ukrepi za povečanje odpornosti (nova živa meja ...).

4.2.4 Določitev območij z erozijsko nevarnostjo – obstoječe stanje

Z zgornjimi izdelki smo pridobili podlage, na katerih lahko najprej določimo območja z erozijsko nevarnostjo, nato pa analiziramo vzroke zanjo in (kasneje) predvidimo omilitvene sonaravne ukrepe, s katerimi ali zmanjšamo obremenitve ali povečamo odpornost.

Lokalno erozijsko nevarnost lahko določimo tako, da za obstoječe rabe prostora najprej v numeričnih celicah izračunamo razliko med erozijskimi obremenitvami in odpornostjo. Tam, kjer obremenitve presegajo odpornost, privzamemo, da se pojavi erozijska nevarnost. Pri tem ni nujno, da se erozijske poškodbe dejansko pojavijo, saj se lahko v praksi pojavijo še dodatni vplivi, ki povečajo odpornost ali pa zmanjšajo odpornost (npr. slabo stanje travne ruše). V tej nalogi le binarno prikazujemo stanje: JE/NI presežena odpornost.

Slika 44 prikazuje, kako se prostorska porazdelitev erozijske nevarnosti, določena na podlagi izračunanih lokalnih hitrosti, spreminja glede na 4 naraščajoče pretoke, od Q10 do Q100. Prikazane so karte razlik med obremenitvijo in odpornostjo, izdelane v programskem orodju QGIS z uporabo funkcije Raster Calculator, kjer sta oba rastrska sloja za obravnavano območje odšteta. Z rdečo so obarvane numerične celice, kjer obremenitve presegajo odpor, medtem ko je na območjih z modro barvo odpor večji od obremenitve in torej ni erozijske nevarnosti.



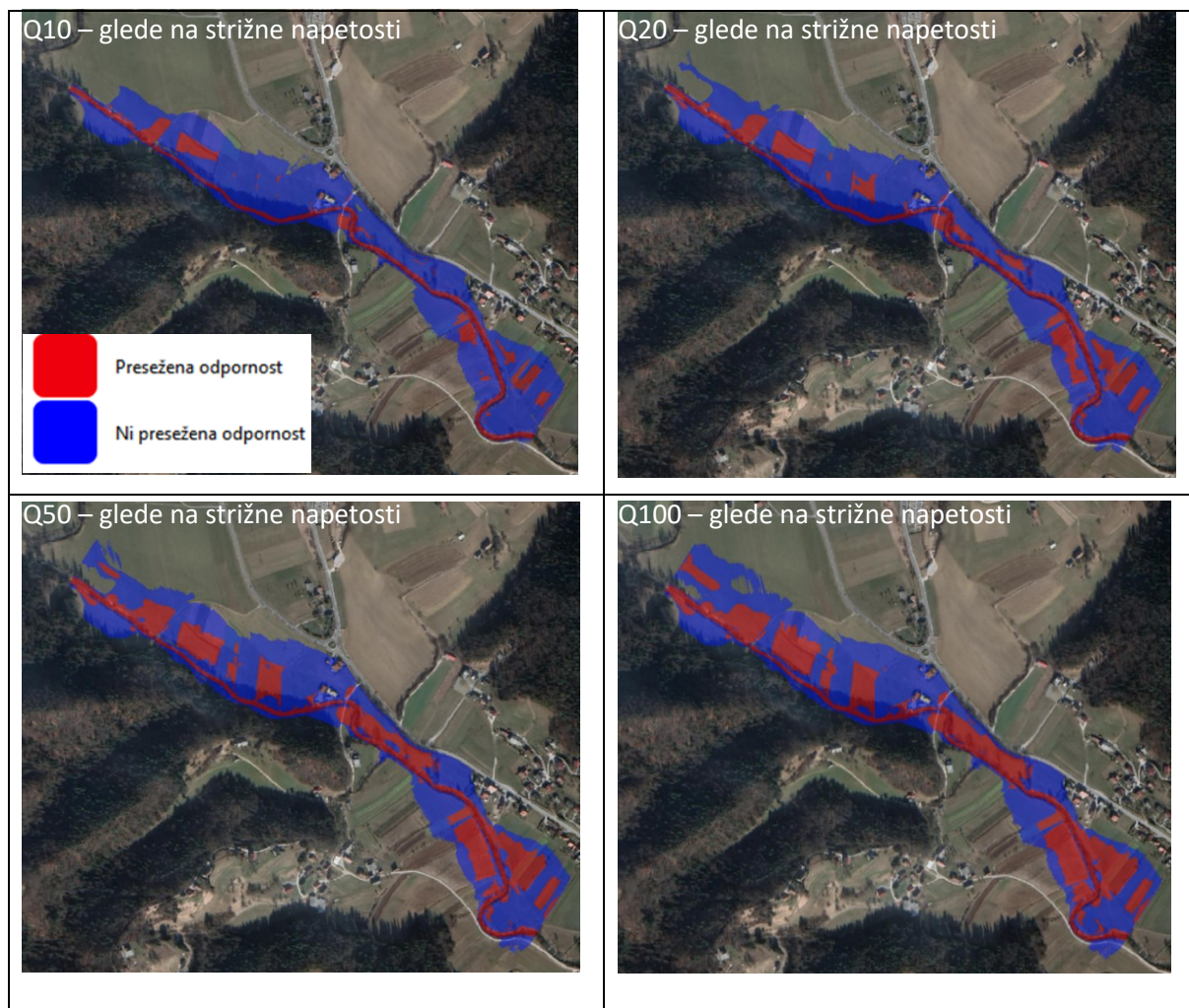
Slika 44: Karte erozijske nevarnosti (rdeča barva) za obstoječe stanje glede na porazdelitev hitrosti pri različnih pretokih (Q10, Q20, Q50, Q100)

Karte pokažejo, da je erozijska nevarnost najbolj prisotna na območju prelivanj ter se z oddaljevanjem od struge po poplavnem prostoru zmanjšuje, kar je posledica manjših hitrosti ter manjših globin zaradi dvigovanja terena. Pri vseh pretokih so najbolj erozijsko obremenjena prelivanja preko nasipov ob strugi, prelivanje preko cestnega telesa pri gorvodnem mostu, v okolici stanovanjskih objektov pri dolvodnem mostu, prelivanja preko cestišča v okolici dolvodnega mostu, levi poplavni prostor dolvodno od mostu.

Prelivanje preko nasipov ob strugi je neugodno zaradi lokalnega povečanja strižnih hitrosti/napetosti ter s tem povezanim odnašanjem zemljine/nasipa. Na zračni strani se na stiku nasipa in terena lahko ustvari erozivnejši vodni skok, kar lahko pri daljšem delovanju »spodjeda« nasip kar v najslabšem primeru privede do porušitve nasipa. Podobna problematika se pojavi zaradi vodnega toka na poplavnem območju, ki se preliva preko cestišča. Cesta na gorvodni strani ustvarja zaježbo, na dolvodni brežini cestnega telesa pa povečanje hitrosti lahko povzroči brazdanje površine, njeno odnašanje oz. drsino, kar lahko privede do poškodbe oz. prekinitve dostopa na most. V okolici stanovanjskih objektov, ki zasedajo del pretočnega prereza in preusmerjajo vodni tok, se zaradi zmanjšanja »razlivnega« prostora povečajo lokalne hitrosti/obremenitve.

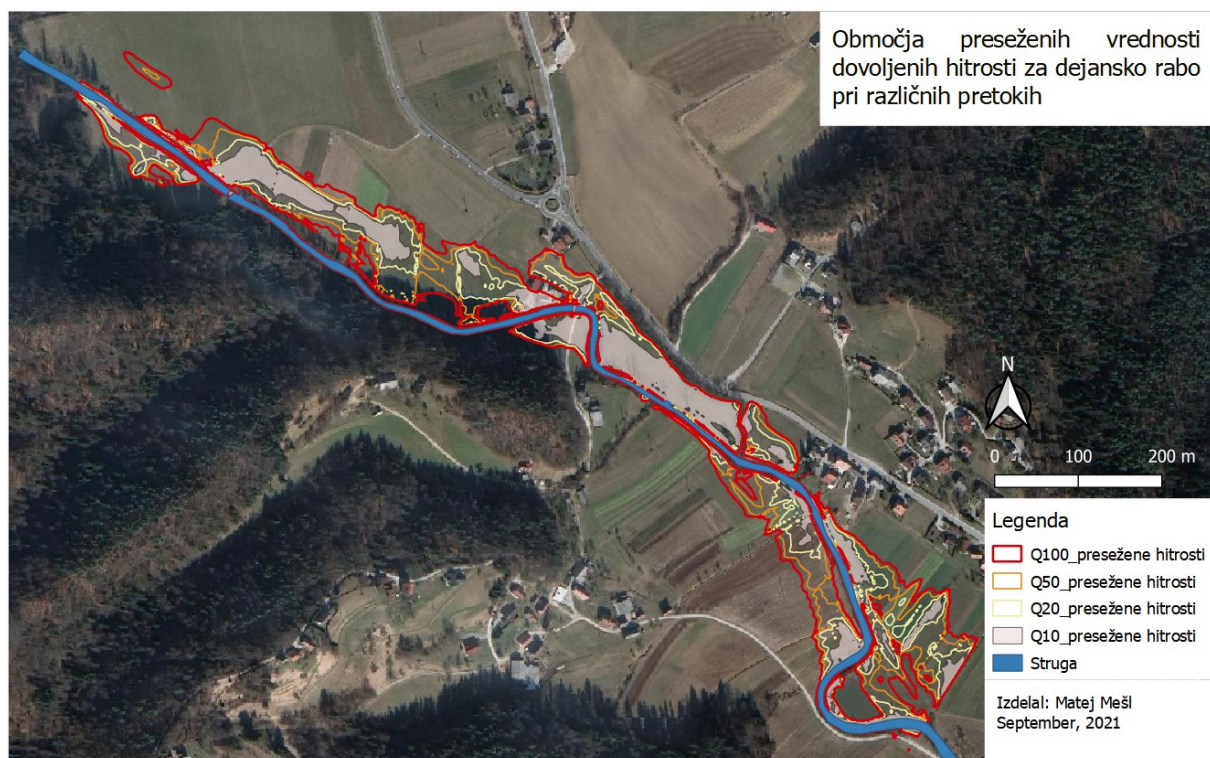
Karte kažejo tudi vpliv topografije, kot se npr. dolvodno od spodnjega mostu tudi nekoliko zmanjša prostor za razlivanje zaradi spremenjene konfiguracije terena, kar privede do večjih hitrosti ($Q=S \cdot v$, na račun zmanjšanja preseka se povečajo hitrosti pri istem pretoku). Pri levem poplavnem prostoru dolvodno od spodnjega mostu se ustvari paralelni tok, ker voda prestopi bregove zaradi izrazitega rečnega zavoja, kar privede do večjih hitrosti. Ta opisana območja so problematična že pri pretoku Q10, medtem ko se območje nevarnosti z večanjem pretoka samo povečuje ter širi. Pri pretoku Q100 so dolvodno od gornjega mostu poplavne površine širine od 125 m do 190 m. Dolvodno od spodnjega mostu pa se nekoliko zmanjša poplavni prostor na okoli 75 m, kar je posledica večja hitrost toka vode. Na spodnjem delu pri drugem izrazitem zavoju vode se poplavni prostor spet poveča in ponekod preseže širine 200 m, kar se odraža tudi v zmanjšani erozijski nevarnosti pri Q10, saj ima voda prostor za razlivanje in se s tem zmanjšajo hitrosti/globine.

Slika 45 prikazuje na enak način kot zgoraj, kako se spreminja prostorska porazdelitev erozijske nevarnosti, določena na podlagi izračunanih strižnih napetosti, glede na 4 naraščajoče pretoke, od Q10 do Q100. Prikaz razlike med obremenitvijo in odpornostjo je prav tako izdelan z uporabo Raster Calculator. Z rdečo so obarvane numerične celice, kjer obremenitve presegajo odpor, medtem ko je na območjih z modro barvo odpor večji od obremenitve in tam torej ni erozijske nevarnosti.

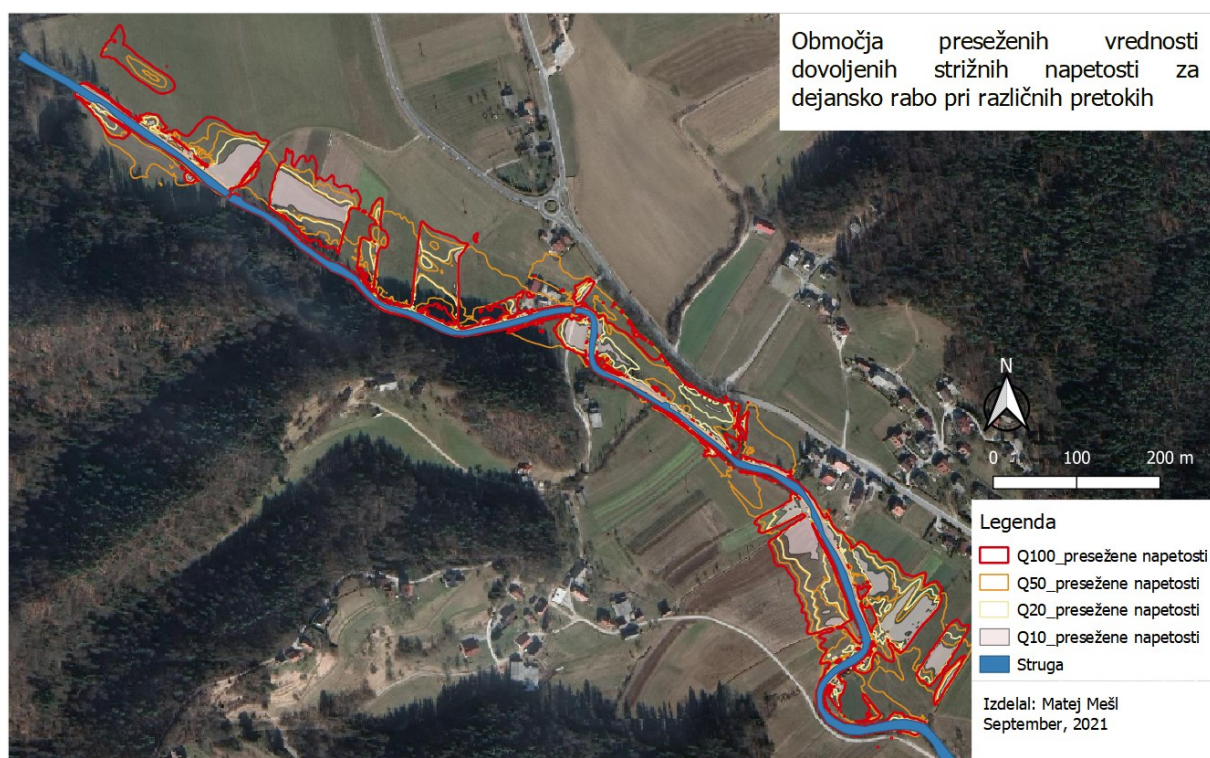


Slika 45: Karte erozijske nevarnosti (rdeča barva) za obstoječe stanje glede na porazdelitev strižnih napetosti pri različnih pretokih (Q10, Q20, Q50, Q100)

Območja preseženih vrednosti odpora pri 4 pretokih smo nato združili v en prikaz za presežene hitrosti (Slika 46) ter presežene strižne napetosti (Slika 47), da je vidno naraščanje obsega erozijske nevarnosti zaradi naraščajočih pretokov. Pri Q10 so celice obarvane, medtem ko je pri ostalih pretokih je prikazan le skrajni rob območja s preseženimi vrednostmi, da je povečevanje površin bolj pregledno. Podana primerjava za 4 pretoke je podana za oba primera, tj. za določitev na podlagi izračunanih hitrosti oziroma na podlagi izračunanih strižnih napetosti.



Slika 46: Primerjava naraščanja območij erozijske nevarnosti, kjer so presežene vrednosti dovoljenih hitrosti za obstoječe rabe tal za 4 različne pretoke



Slika 47: Primerjava naraščanja območij erozijske nevarnosti: presežene so vrednosti dovoljenih strižnih napetosti za obstoječe rabe tal za 4 različne pretoke

Primerjava obeh načinov določanja območij erozijske nevarnosti kaže razlike (primerjajte zgornji sliki). Eden od možnih vzrokov teh razlik je v nejasnih povezavah med dovoljenimi vrednostmi hitrosti oz.

strižnih napetosti. Oboje so določene izkustveno, tukaj povzete iz literature, zato bi bilo zanimivo preveriti njihove skladnosti, tj. ali bi v enakih pogojih na terenu oba načina dala isti rezultat.

Za nadaljnje delo, kjer bomo določili še vplive spremembe rabe prostora oz. izbire sonaravnih ukrepov, smo uporabili določanje erozijske nevarnosti glede na hidravlične izračune porazdelitve lokalnih hitrosti. Na takšen način smo analizirali stanje v prostoru, če se spreminja zarast (rastno – izven vegetativno obdobje) oziroma če predvidimo posamezne ukrepe ali kombinacijo ukrepov za zmanjšanje erozijske nevarnosti. Na podlagi ugotovljenih razlik v območjih erozijske nevarnosti smo za nekaj primerov prikazali, ali bi z omilitvenimi ukrepi dosegli zmanjšanje erozijske nevarnosti, pa tudi, kaj se ob tem dodatno spreminja v prostoru.

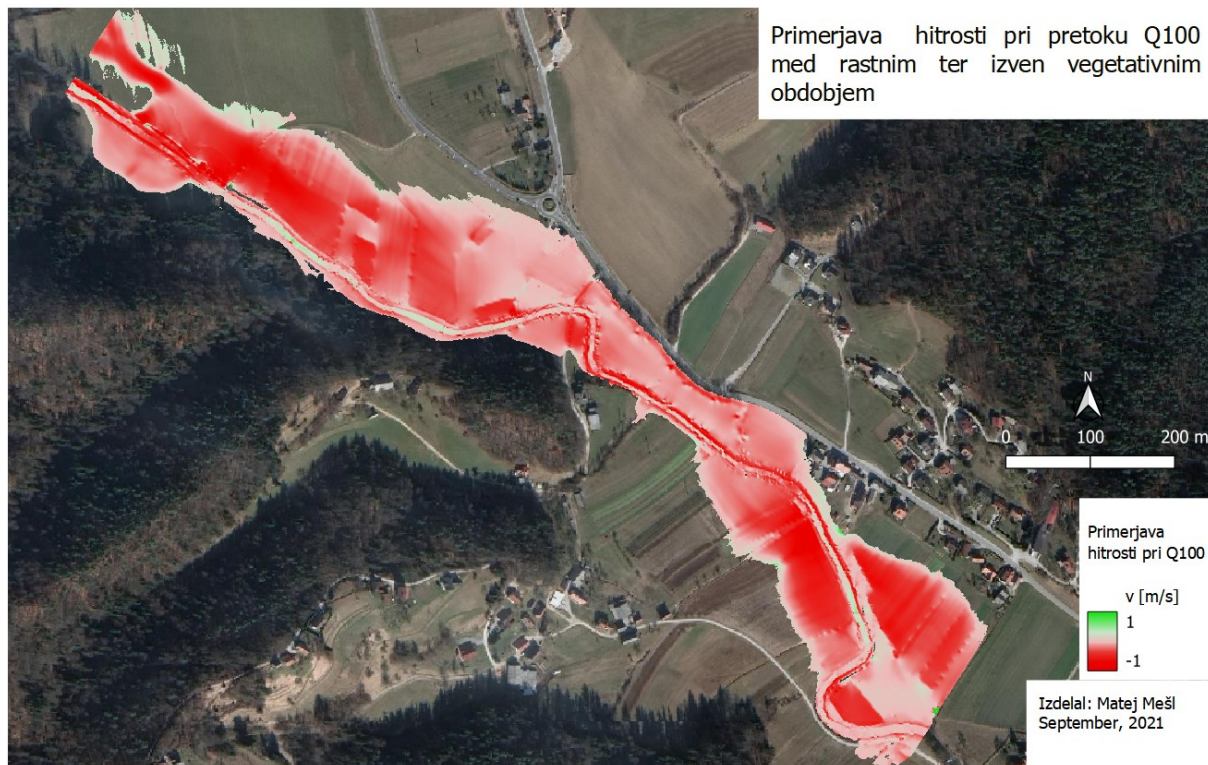
4.3 Vpliv rastnega obdobja zarasti na erozijsko nevarnost

Stanje zarasti se z letnimi časi spreminja, s tem pa tako odpor vodnemu toku kot tudi erozijska odpornost dejanske rabe (rastnega obdobja zarast itd.). Zato smo v nalogi za obstoječo rabo prostora najprej preverili vpliv spreminjanja vegetacije v letnih časih. Primerjali smo stanje, ko imamo zarast oz. kmetijske rastline v najbolj razviti rastni fazi (poleti) in najbolj neugodni scenarij v izven vegetacijskem času (npr. pozimi), ko ni več posevkov na njivskih površinah. V našem primeru smo npr. namesto koruze v dejanskem stanju upoštevali gole (zorane) njivske površine, grmovno zarast brez listja idr. V takem primeru se upošteva drugačno hrapavost ostenja/tal, zajeto v Manningovem koeficientu.

Sprememba stanja zarasti (v jesenskem ter zimskem času) pa zmanjša tudi erozijsko odpornost, izraženo z dopustnimi hitrostmi/strižnimi napetostmi za drugačne pogoje tal. Največje zmanjšanje odpornosti je pri rabi tal njivskih površin, saj v zemljini ni več koreninskega sistema, ki bi zadrževal odnašanje zemljine. Pusta njivska površina ima majhen odpor vodnemu toku (in so hitrosti večje), zato so hkrati obremenitve večje, odpornost pa manjša in je iz njiju izračunana erozijska nevarnost že za obstoječe stanje rabe prostora bistveno spremenjena. Odpornost se seveda zmanjša tudi pri ostalih rabah tal, ki vsebujejo vegetacijo, vendar ne v tolikšni meri kot pri njivskih površinah. Spremembe odpornosti ter upoštevanih koeficientov hrapavosti so prikazane v Preglednici 4 (3 poglavje).

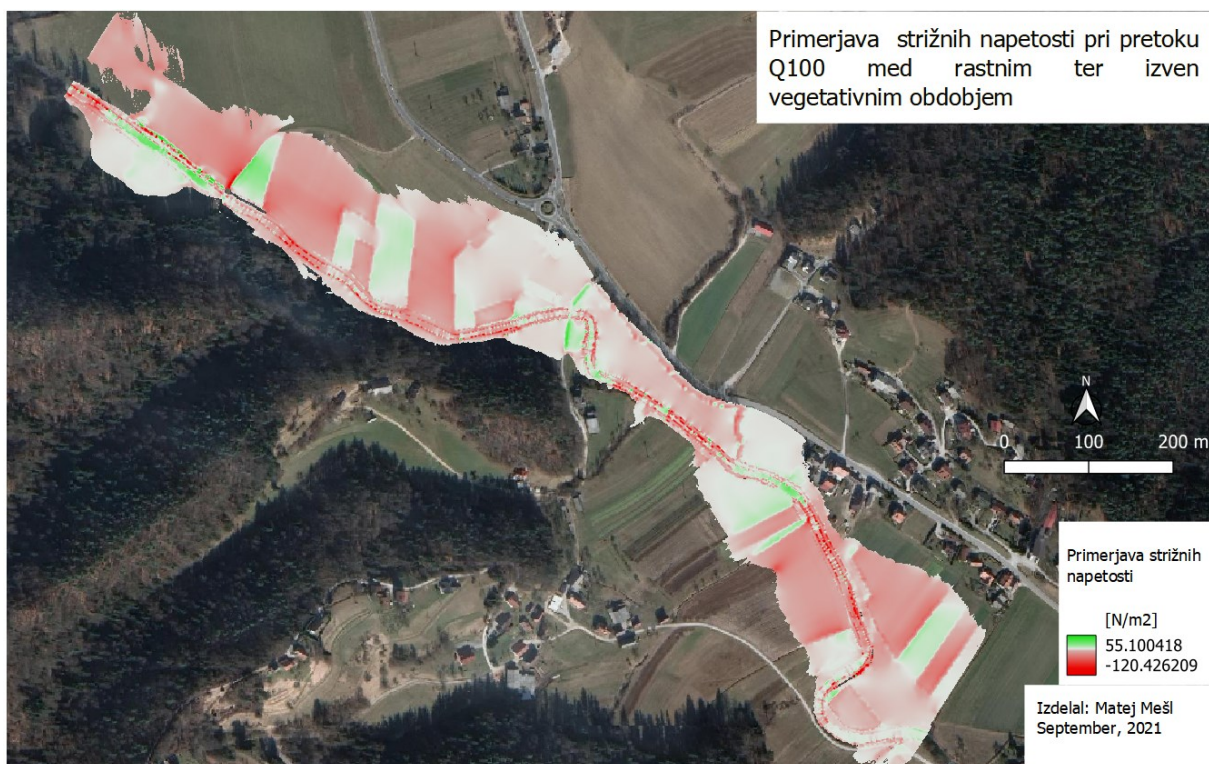
Slika 48 posredno prikazuje povečanje erozijske nevarnosti zaradi povečanja obremenitev. Podana je namreč primerjava lokalnih hitrosti za rastno obdobje in izven vegetativno obdobje pri pretoku Q100. Z rdečimi odtenki je prikazano poslabšanje razmer v izven vegetativnem obdobju, medtem ko zeleni odtenki prikazujejo izboljšanje. Opazno je vidno poslabšanje razmer predvsem na ogoljenih njivskih površinah. Ker v poletnem času učinkujejo njivske površine kot »dušilka« za vodni tok ter s tem zmanjšujejo hitrosti, je opazna sprememba tudi pri drugih rabah tal, saj se v izven vegetacijskem obdobju ustvari hitrejši tok z manjšimi ovirami na svoji poti. Tako se posamično hitrosti povečajo tudi do 1 m/s kot je razvidno na Sliki 48. Ker ima pri zmanjšani zarasti voda olajšano potovanje po poplavnih površinah, je na nekaterih skrajnih delih poplavnega območja ter v strugi vidno minimalno izboljšanje (manjša obremenitev). V poletnem času je zaradi upora koruznih stebel voda nekoliko obtekala ta polja, kar je prinašalo nekoliko večje vrednosti hitrosti v strugi ter na robovih poplavljenih njivskih površin.

V času brez koruznih stebel pa se ustvari večji tok vode po najnižjih delih poplavnih površin, zato povečana erozijska moč vode lahko odnaša tudi večjo količino materiala pri najbolj neugodnih danostih v prostoru.



Slika 48: Povečanje erozijske nevarnosti (rdeča barva) na obravnavanem območju izven vegetacijskega obdobja, pri Q100

Slika 49 prav tako posredno prikazuje povečanje erozijske nevarnosti zaradi spremenjene porazdelitve strižnih napetosti. Izračunane so razlike strižnih napetosti za izven vegetativno obdobje v primerjavi z vrednostmi za rastno obdobje, pri pretoku Q100. Z rdečimi odtenki je prikazano, kje so obremenitve (strižne napetosti) v izven vegetativnem obdobju večje, medtem ko zeleni odtenki prikazujejo zmanjšanje obremenitev.



Slika 49: Povečanje strižnih napetosti (rdeča barva) na obravnavanem območju izven vegetacijskega obdobja, pri Q100.

Za določitev območij erozijske nevarnosti pa je treba upoštevati razliko med obremenitvijo in odpornostjo rabe prostora (npr. zarasti) v različnih obdobjih. Tudi ti izračuni pokažejo za njivske površine poslabšanje razmer, medtem ko je na nekaterih travnikih vidno celo izboljšanje. Razlog je verjetno v upoštevanem drugačnem Manningovem koeficientu, ki je upošteval nizko poletno travo zaradi košnje ali pašnje živali, v izven vegetacijskem obdobju pa nenegovano (poznojesensko) travniško zarast.

Prikazan vpliv kmetovalci poznajo, zato se v praksi, pa tudi v spodbudah okoljske kmetijske politike podpira jesensko-zimsko setev, ki naj zagotovi večjo erozijsko odpornost njivskih površin v tistem obdobju. Tu je bilo prikazano, da je s tem dosežen omilitveni vpliv tako na zmanjševanje hitrosti vodnega toka (obremenitve) kot na povečanje odpornosti (zaraščenost njivskih površin). Ta primer pa lahko služi tudi kot način ovrednotenja vpliva spreminjanja kmetijskih rastlin na posameznih parcelah (kolobarjenja). Za izbiro sonaravnih ukrepov je pomembno tudi, kakšen je njihov učinek v različnih letnih časih.

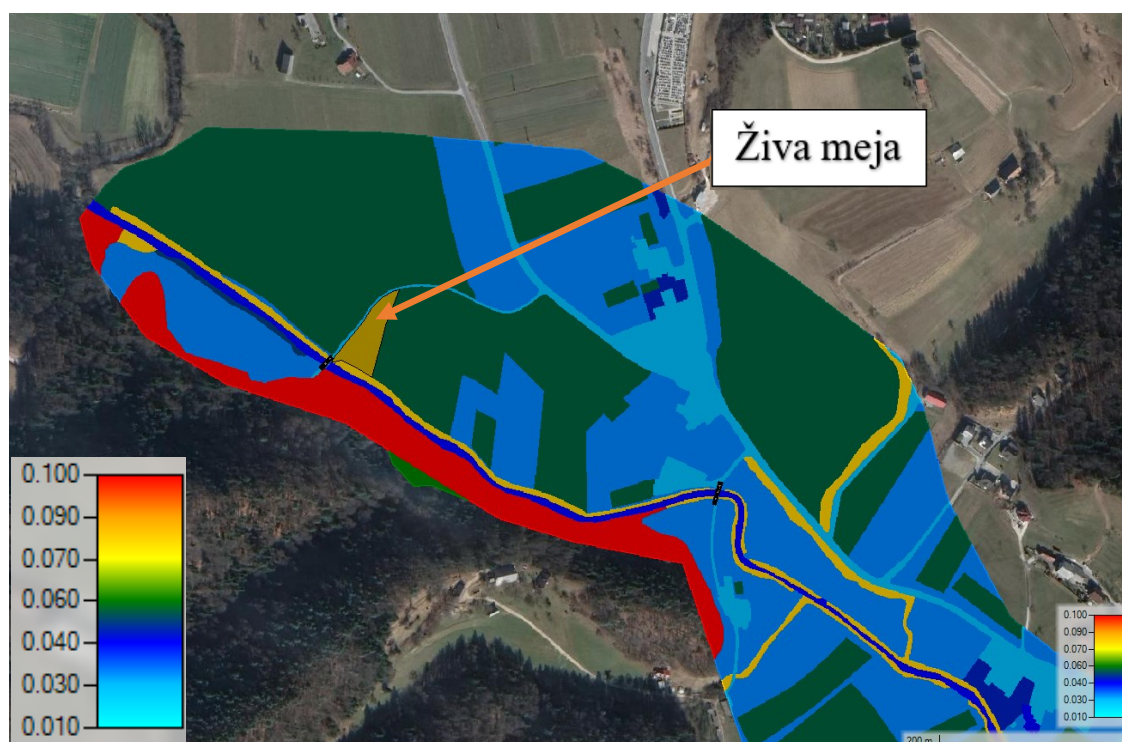
Doslej izdelane podloge omogočajo številne analize. S primerno interpretacijo je mogoče ugotoviti, kje so omilitveni sonaravni ukrepi potrebni ter zanje določiti njihovo prostorsko razmeščanje, pa tudi, kakšna je stopnja njihove potrebnosti. Pri Q10 je iz analiziranih rezultatov vidno, da so potrebni minimalni ukrepi predvsem nad in pod dovozno cesto pri gorvodnem mostu. Pri višjih pretokih pa potreba po ukrepih in njihovi obsežnosti seveda narašča.

4.4 Vpliv posamičnega ukrepa – umestitev grmovne zarasti za zmanjšanje erozijske nevarnosti

V nalogi smo najprej obravnavali posamičen ukrep, saj se tedaj lahko izloči njegov vpliv. Kasneje smo obravnavali tudi kombinacijo ukrepov, s katerimi dosežemo skupne omilitvene učinke na več lokacijah, pri tem pa ne poznamo vpliva posamičnega ukrepa v izbrani skupini.

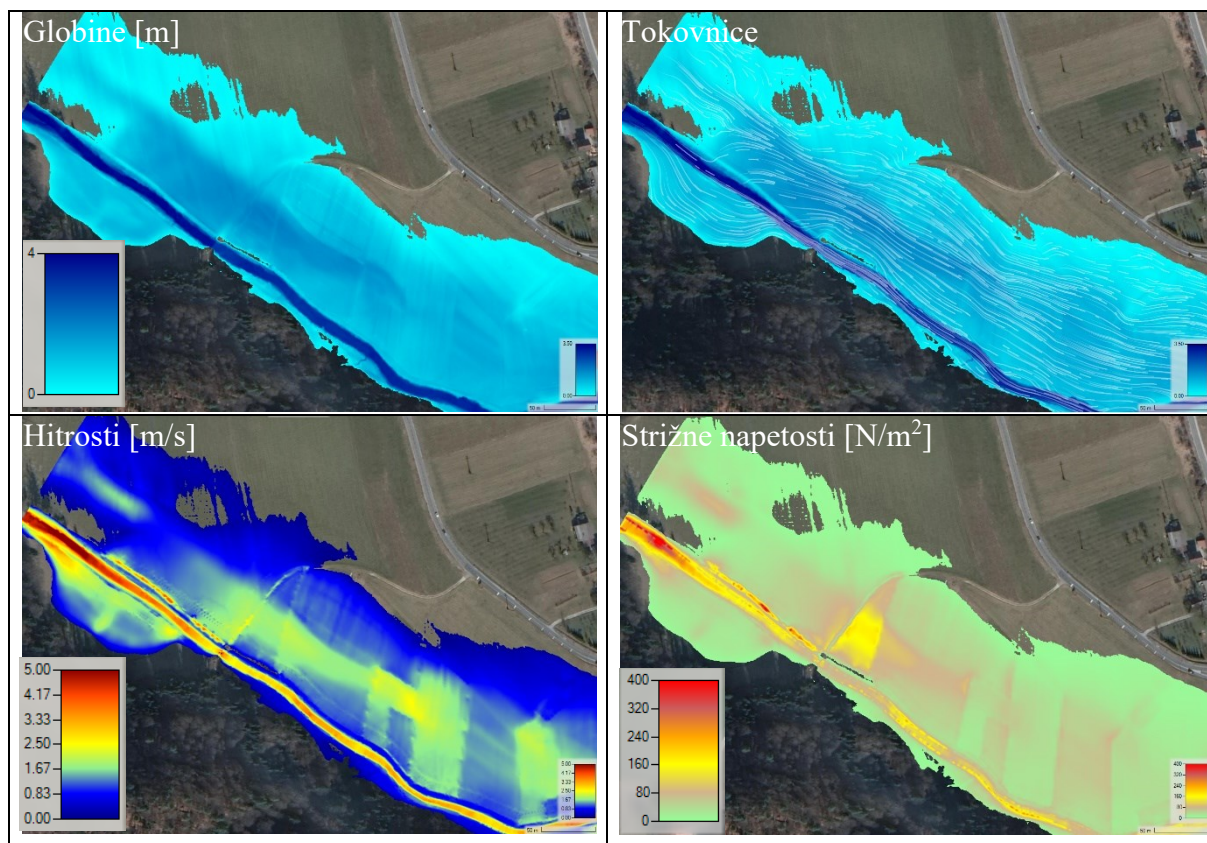
Za območje ob dovozni cesti, kjer so zgornje analize nedvomno pokazale erozijsko nevarnost, je bil izbran posamični ukrep, tj. sprememba iz dosedanje travniške rabe v zasaditev grmovne zarasti. Verjetno bi taka sprememba nastala že z opustitvijo košnje in bi se grmovna zarast sama vzpostavila z naravno sukcesijo. V slovenski tradiciji poznamo tako imenovane žive meje v prostoru. Na vodni tok deluje kot »dušilka«, enako kot že opisan učinek koruznih, žitnih ipd. polj, le da je trajnica, bistveno odpornejša (vraščena v zemljino) ter ima ugoden koeficient hrapavosti (tako poleti kot pozimi), kar na območju grmovne zarasti zmanjšuje hitrosti ob hkrati povečani erozijski odpornosti.

Privzeli smo, da se grmovna zarast vzpostavi na eni travnati parceli, ki se nahaja pod cesto, ki vodi do zgornjega mostu (slika 50). Tokovna slika je namreč pokazala, da se pri prelivanju te ceste, ki se vzpenja na most, pojavijo po brežini cestnega telesa hitrosti vode, zaradi katerih bi lahko bila presežena odpornost travne ruše. Cilj obravnave je zato bil, preveriti, ali ta omilitveni ukrep zadošča za zmanjšanje erozijske nevarnosti na cestnem telesu in hkrati ne povzroča bistvenih dodatnih težav na preostalem obravnavanem območju. Ob tem pa bi preverili tudi, ali uporabljeni pristop lahko prikaže vpliv žive meje in kako se to prikaže v delovanju hidravličnega modela z vidika sprememb hrapavosti ter logičnost oz. smiselnost numeričnih rezultatov.



Slika 50: Prikaz lokacije žive meje na prikazanih vrednostih Manningovega koeficienta, vezanega na rabo prostora na parcelah.

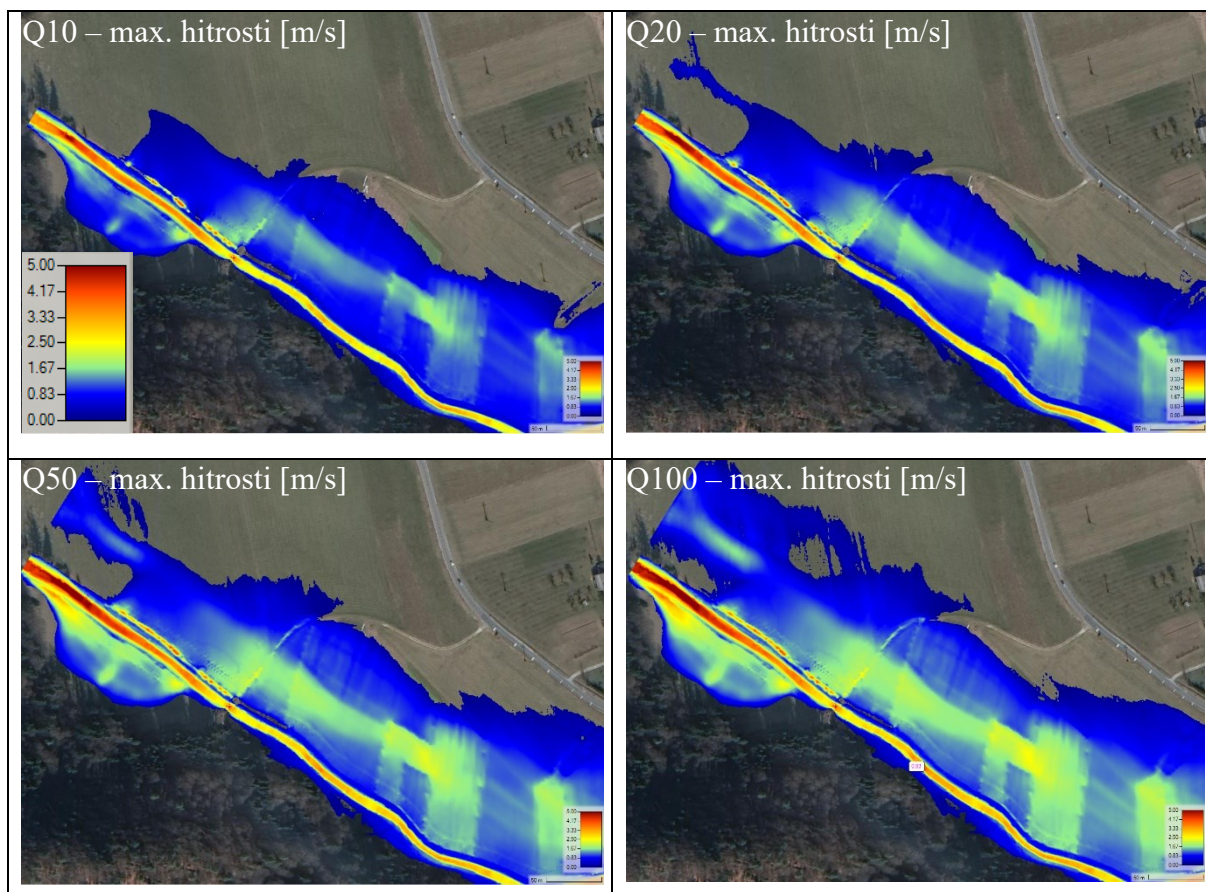
Za območje žive meje smo izbrali vrednost Manningovega koeficienta hrapavosti 0,08, kar je bistveno večje kot brez žive meje, ko je za dejansko stanje upoštevan travnik z Manningovim koeficientom 0,033. Štirje prikazi na skupni sliki (slika 51) prikažejo podrobnejše razmere na lokaciji žive meje ter neposredne okolice pri pretoku Q100. Enako kot zgoraj so prikazane globine in tokovnice ter porazdelitev hitrosti in strižnih napetosti. Iz rezultatov globin je razvidno, da imamo po levem poplavnem prostoru gorvodno ter dolvodno od ceste rahlo depresijo terena glede na okolico, zato se tam, kot je razvidno tudi iz koncentracije tokovnic, pojavi s strugo paralelni tok vode. Izračuni pokažejo ugoden učinek žive meje, saj zmanjšajo že tako visoke hitrosti na tem delu. Pri strižnih napetostih so na območju žive meje vidna povečanja, ker programsko orodje HEC-RAS pri samih izračunih strižne napetosti upošteva večji Manningov koeficient hrapavosti, zaradi spremenjene rabe parcele. To povečanje pa kompenzira večja erozijska odpornost grmovne zarasti.



Slika 51: Prikaz razmer po vzpostavitvi območja žive meje pri Q100: globine, tokovnice, hitrosti ter strižne napetosti – analiza vpliva posamičnega ukrepa

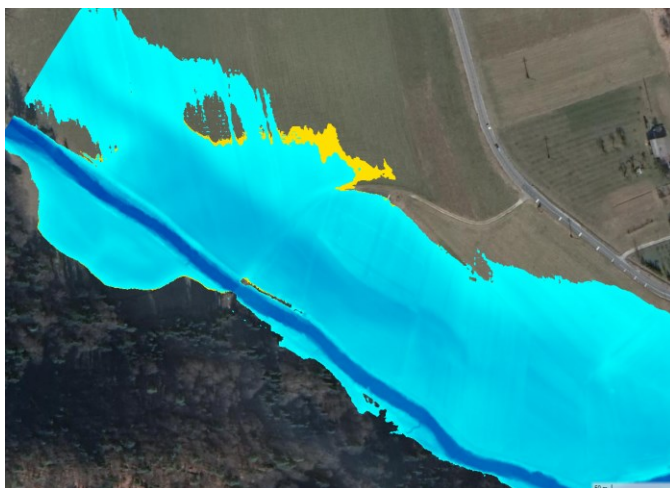
V nadaljnjem delu ne bomo več podajali dvojnih prikazov (hitrosti in strižne napetosti) temveč bomo vplive sprememb v prostoru prikazovali le z upoštevanjem rastrskega sloja hitrosti.

Zgoraj so bile prikazane razmere pri pretoku Q100 obstoječega stanja rabe prostora glede na spremenjeno rabo po ukrepu žive meje pri istem pretoku. Analogno se pojavijo razlike tudi pri drugih pretokih, le da se vrednosti z manjšanjem pretokov znižujejo (Slika 52), spreminja pa se tudi vzorec območij z večjimi hitrostmi.



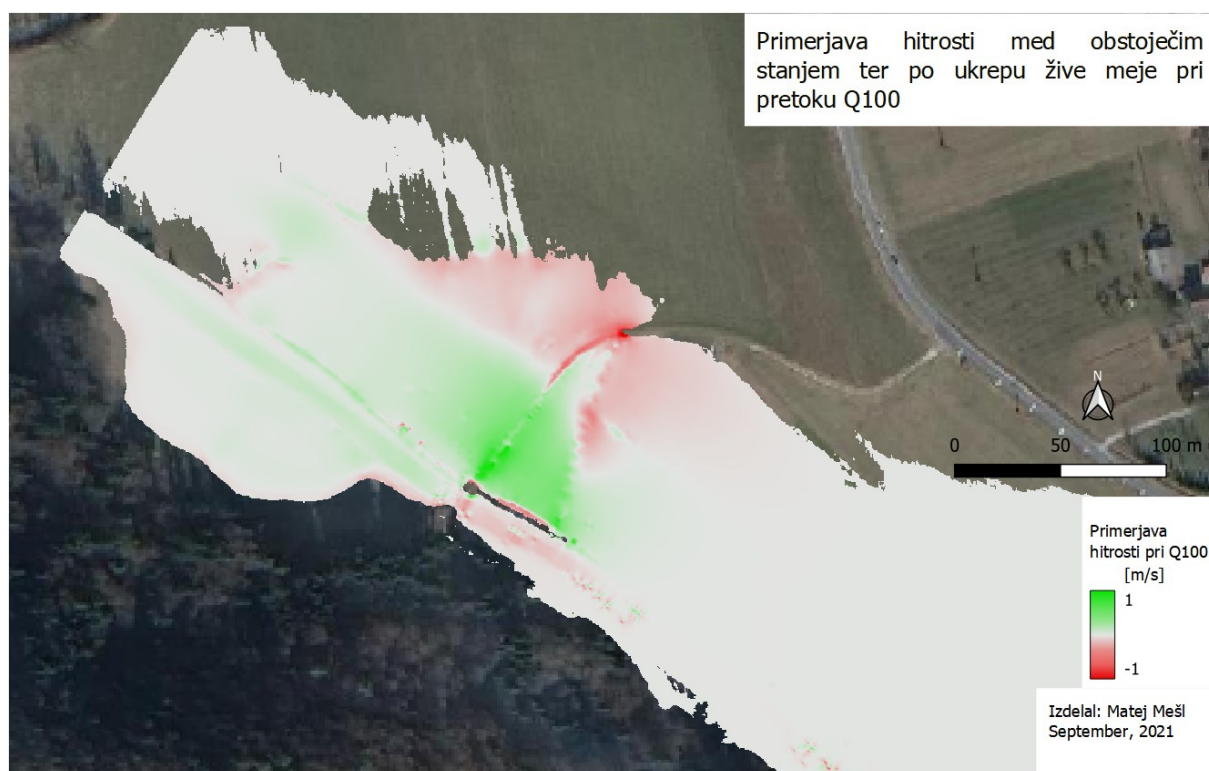
Slika 52: Prikaz hitrostnih polj po vzpostavitvi območja z živo mejo pri pretokih Q10, Q20, Q50 in Q100.

Postavljanje »ovir« vodnemu toku pa lahko razen preusmerjanja vodnih tokov povzroča tudi lokalne zajeze. Slika 53 prikazuje spremembo dosega poplavnega območja pred ter po ukrepu z živo mejo. V modri barvi je prikazan doseg vode pri obstoječem stanju, medtem ko je z rumeno barvo označeno povečanje dosega vode zaradi vpliva žive meje. Povečanje obsega poplavljanja se zgodi zaradi ovire (žive meje), ki zaradi zmanjšanja hitrosti vode skozi živo mejo posledično gorvodno nekoliko dvigne gladino vode. V enačbi $Q=v \cdot S$ (v =hitrost, S =presek), pretok ostaja isti, medtem ko se na račun zmanjšanja hitrosti mora povečati presek, kar pomeni dvig gladin ter večji doseg poplavljanja.



Slika 53: Povečanje območja poplavljenosti (rumena barva) zaradi vpliva žive meje, pri Q100

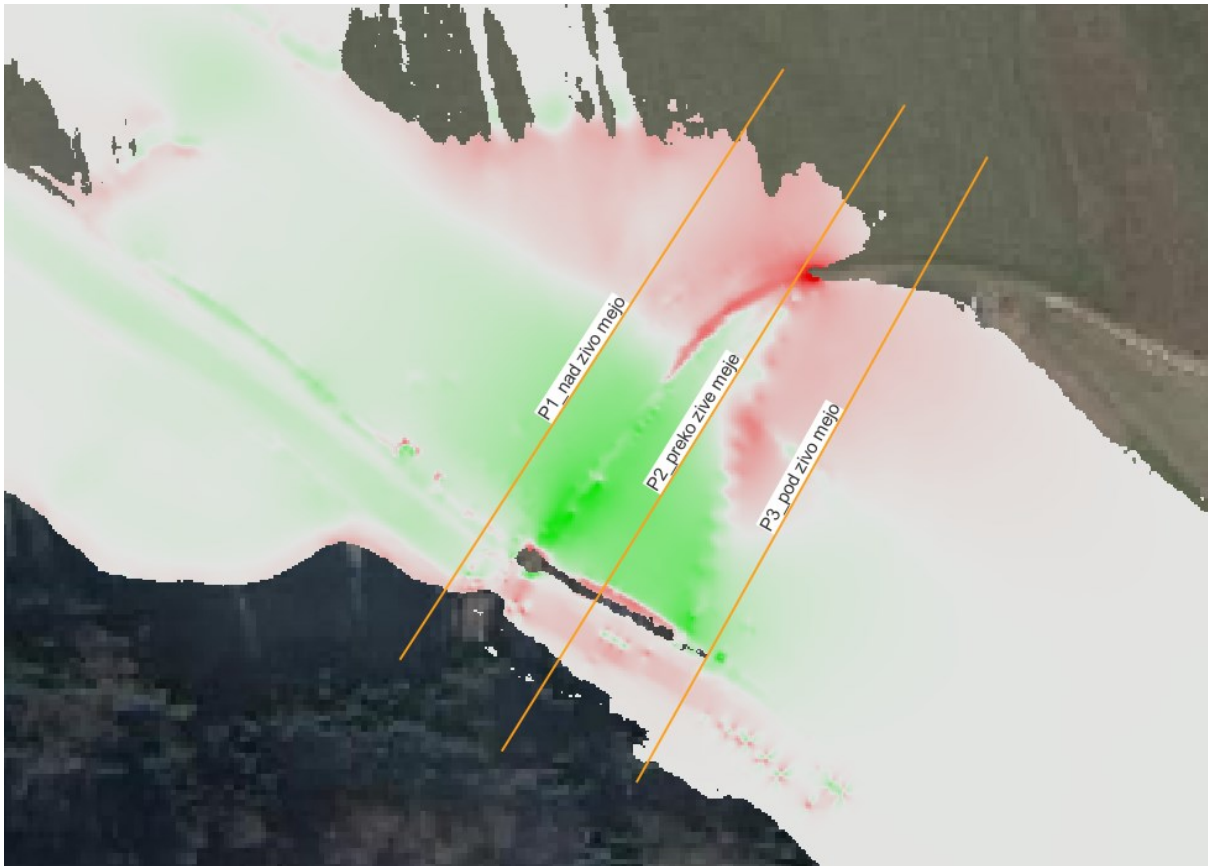
Slika 54 podaja rezultat primerjave obstoječega stanja s stanjem po umestitvi žive meje. Z zeleno barvo so prikazana izboljšanja stanja, rdeči odtenki prikazujejo poslabšanje, sivine pa nam povedo, da ni sprememb zaradi žive meje. Kjer je umeščena živa meja je vidno izboljšanje oziroma zmanjšanje hitrosti. Gorvodno od žive meje je tudi opazno zmanjšanje hitrosti, kar izvira iz ugotovitve pri primerjavi dosega gladin, da se zaradi žive meje gladina na tistem območju dvigne. Iz primerjave je opaziti, da ima ukrep z živo mejo vpliv gorvodno, medtem ko so dolvodno učinki samo v manjšem predelu za živo mejo. Izboljšanja so vidna, kjer je živa meja najbolj široka. To lahko opišemo oziroma utemeljimo s tem, da se hitrost toka vode na dovolj velikem pasu umiri in nato počasneje »prodira« skozi območje žive meje. Ker pa je živa meja nekakšna ovira v prostoru, voda na skrajnem delu prereza obteka živo mejo, kar pa je tudi razvidno iz primerjave. Na tem delu se povečajo hitrosti, kar je vidno v rdečih barvah. Zaradi zajeze, ki jo ustvari živa meja, se del pretoka preusmeri v strugo, zato se poveča hitrost tudi v strugi dolvodno od mostu.



Slika 54: Povečanje hitrosti (rdeča barva) oz. zmanjšanje (zeleno barva) zaradi vpliva žive meje, pri Q100

V celoti gledano ima ukrep z uporabo žive meje več pozitivnih lastnosti. Zmanjšanja hitrosti vode so do okoli 0,9 m/s, medtem ko je povečanje hitrosti (tj. poslabšanje stanja) v večjem delu le do 0,3 m/s. Zgolj lokalno ob cestišču so nekoliko večje vrednosti, kar pa lahko kompenziramo z utrditvijo cestnega telesa. Tudi v strugi ni tolikšnega povečanja hitrosti, da bi bilo potrebno urediti erozijsko zaščito struge. Negativen je le vpliv povečanja poplavnih površin, kar pa je treba preveriti glede na pričakovano poplavno škodo. Lokalne razmere pa lahko obravnavamo še z drugimi primerjavami. Oglejmo si spremembe pri Q100 na podlagi razmer v 3 prečnih prerezih, katerih lokacije so prikazane na spodnji

sliki 55. Pri vsakem prečnem prerezu je prikazana geometrija struge in terena, nato pa v njem opravljena primerjava gladin, hitrosti ter strižnih napetosti.

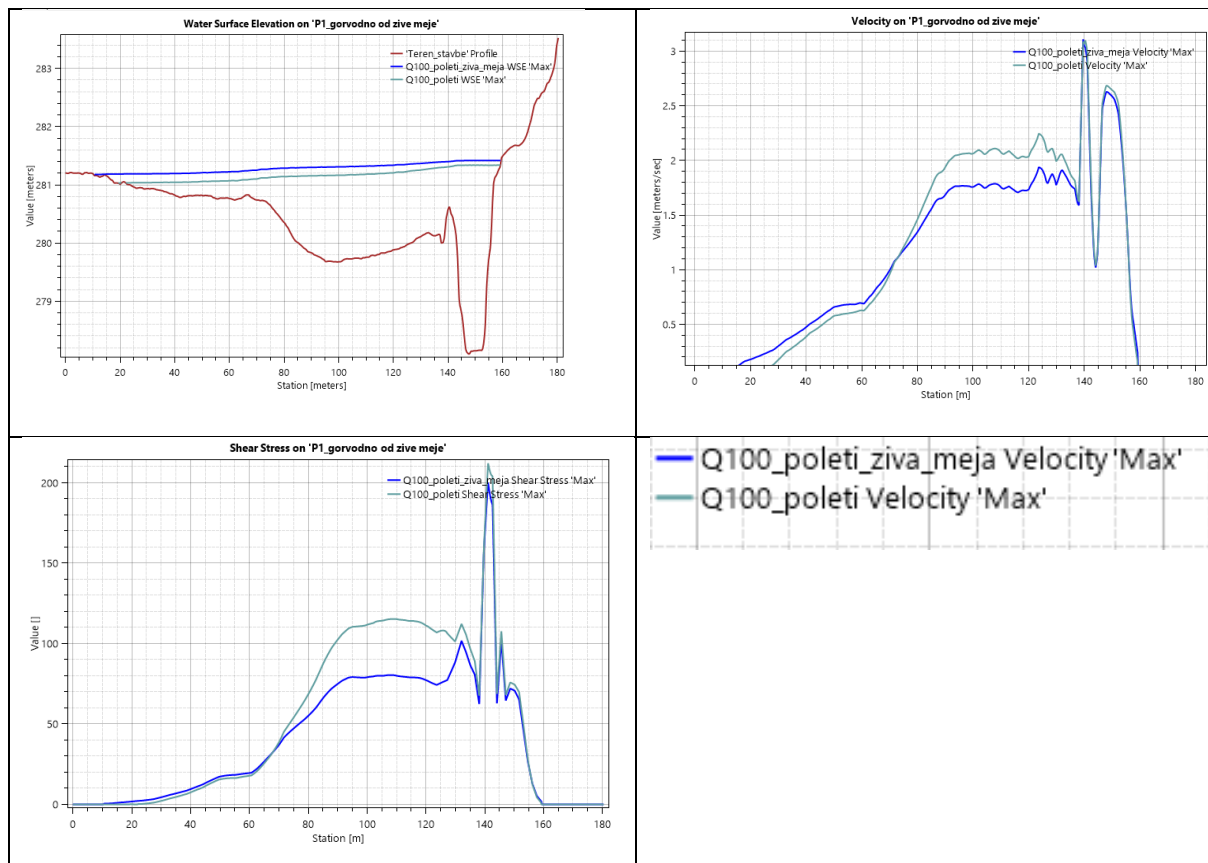


Slika 55: Prikaz lokacije treh zaporednih prerezov v okolici mosta in dovozne ceste (stanje z živo mejo)

Prerez P1: podaja razmere gorvodno od območja z živo mejo

Kot smo ugotovili na florisnih prikazih, se je gorvodno od ceste povečal poplavni prostor. V prečnih prerezih se detajlno vidi dvig gladine po ukrepu žive meje. Z modrimi črtami je prikazan ukrep z živimi mejami, medtem ko je z zelenimi črtami prikazano obstoječe stanje. Na območju struge se glede na rezultate primerjav z obstoječim stanjem dvigne gladina za 8 cm, medtem ko je na poplavnem prostoru ta dvig okoli 15 cm. Ta dvig gladine rezultira k širšemu poplavnemu prostoru, ki se na mestu prečnega profila 1 poveča na levi strani za okoli 7 m. Iz primerjave slojev obstoječega stanja in po ukrepu žive meje smo v programskem orodju QGIS dobili povečanje površine poplavljanja na levi poplavni ravnici za 1385 m². Na desnem bregu zaradi konfiguracije terena ni bistvenega povečanja razlivanja. Pri strižnih hitrostih je razvidno v območju depresije zmanjšanje hitrosti povprečno za okoli 0,3 m/s. Na območju nasipa so vrednosti strižnih napetosti še vedno primerljive z obstoječim stanjem kar priča, da nastop maksimalnih hitrostih preko prelivov ni odvisen od maksimalnega pretoka oziroma ukrepa, kajti največje hitrosti se zgodijo v začetni fazi prelivanja na kar pa živa meja nima vpliva. Se pa kasneje zaradi žive meje prej zapolni prostor, kar bi pomenilo, da bi se prej zmanjšale hitrosti kot sicer. To zmanjšanje neugodnega delovanja voda bi ugodno vplivalo, saj na erozijsko nevarnost ne vpliva samo jakost oziroma moč erozije, temveč tudi, kako dolgo časa je spovržena eroziji. Proti levemu robu pa se nato hitrosti povečajo povprečno za okoli 0,1 m/s, kot smo že ugotovili iz florisnega prikaza, ter tudi

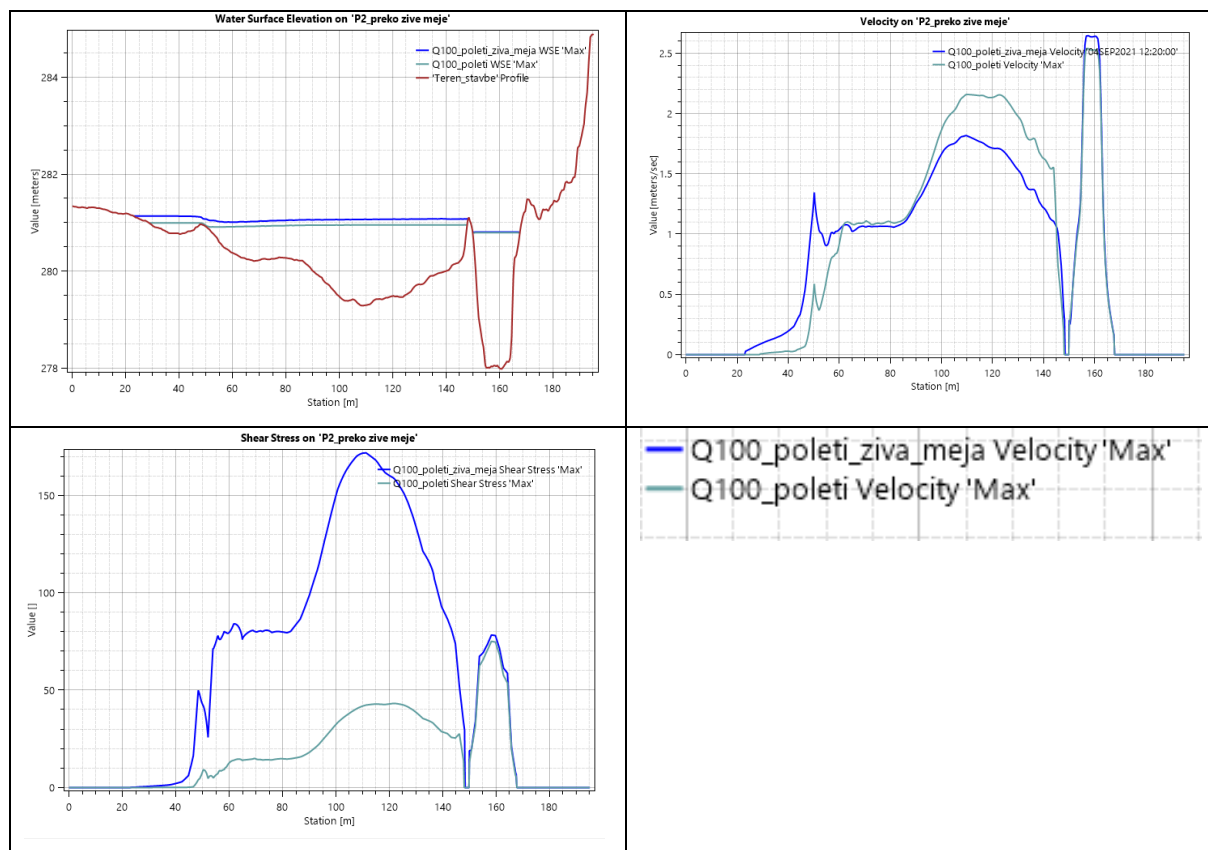
razlog, zakaj je tako. Zmanjšanje strižnih napetosti sledi analogno zmanjšanju hitrosti, ki je velikostnega reda okoli 30 N/m^2 . Kjer so se povečale hitrosti pa je razvidno tudi minimalno povečanje strižnih napetosti.



Slika 56: Prikaz razmer v prečnem prerezu P1: struga in obvodni prostor, vodne gladine, porazdelitev hitrosti in porazdelitev strižnih napetosti (brez žive meje – zelena črta, z živo mejo – modra črta)

Prerez P2: podaja razmere skozi območje z živo mejo

Modra črta prikazuje vpliv žive meje pri pretoku Q100, medtem ko zelena črta kaže obstoječe stanje pri istem pretoku. Živa meja povzroči dvig gladine od 10 do 15 cm v obvodnem prostoru. V tem prečnem profilu je v strugi nižja gladina, kar pomeni, da pride do vpliva na povezavo s strugo že gorvodno. V tem delu pa je viden nasip, ki loči strugo od poplavne površine. Zaradi ovire, ki jo predstavlja živa meja, se zmanjša hitrost toka v njej in posledično gorvodno dvignejo gladine, medtem ko v strugi, kjer teh ovir ni in je posledično hitrejši tok vode, gladine zaradi obrežnega nasipa ostajajo lokalno nižje. Ta trditev se lepo odrazi pri hitrostih, s povečanjem hitrosti v strugi le za okoli $0,15 \text{ m/s}$, na mestu žive meje pa se hitrosti zmanjšajo od $0,4$ do $0,5 \text{ m/s}$. V zgornjem delu, kjer se širina žive meje zmanjšuje, lokalne hitrosti ostajajo približno enake, nato pa se hitrosti povečajo na območju obtekanja ob robovih območja žive meje. Na mestu prelivanja preko ceste se hitrosti povečajo do $0,8 \text{ m/s}$, za kar bi bile potrebne dodatne utrditve na tistem delu. Pri strižnih napetostih pa so vidna velika povečanja, ki so verjetno posledica numerične simulacije oz. lokalnega upoštevanja bistveno višje hrapavosti.

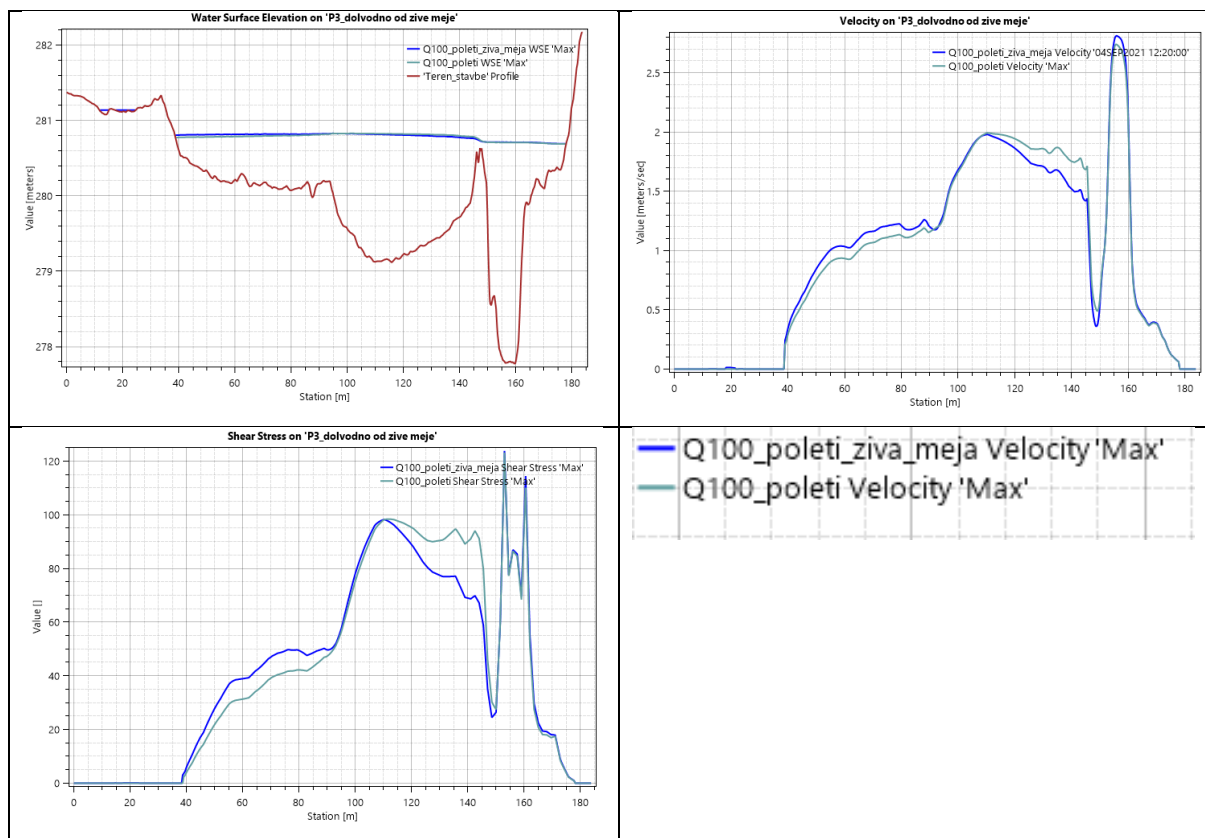


Slika 57: Prikaz razmer v prečnem prerezu P2: struga in obvodni prostor, vodne gladine, porazdelitev hitrosti in porazdelitev strižnih napetosti (brez žive meje – zelena črta, z živo mejo – modra črta)

Prerez P3: podaja razmere dolvodno od območja z živo mejo

Prečni profil pod območjem žive meje nakazuje minimalno spremembo gladin glede na obstoječe stanje, saj dolvodne razmere prevladajo nad vplivom dotoka skozi živo mejo. Hitrosti so v strugi še vedno nekoliko višje kot pri obstoječem stanju (vpliv iz P1), pod živo mejo pa je še nekoliko zaznaven vpliv zmanjšane hitrosti, ker takoj za oviro voda še ne more doseči tamkajšnje lokalne hitrosti. Na območju ob strugi, kjer se del vode vrača v strugo, je nekje do 0,3 m/s zmanjšana hitrost. Nato se proti levemu robu poplavnega območja hitrost približuje obstoječemu stanju ter na koncu spet začne naraščati, kar lahko pripišemo vplivu obtekanja vodnega toka po zunanji strani mimo žive meje. Povečanje hitrosti je velikostnega reda do 0,15 m/s. Strižne napetosti imajo na tem prečnem prerezu podobno razporeditev kot hitrosti - kjer so hitrosti večje so tudi strižne napetosti povečane in obratno.

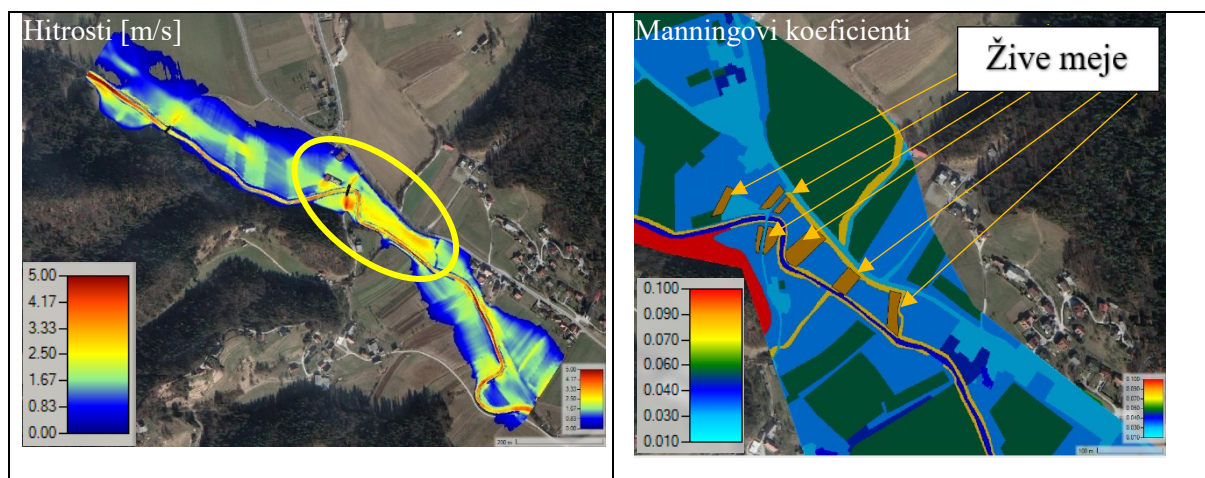
V P3 izračun strižnih napetosti s HEC-RAS nima zaznanega večjega vpliva Manningovega koeficienta (glej P2), saj poteka vzdolž tega prečnega prereza enaka raba tal kot v obstoječem stanju. Razmere v P2 pa kažejo, da bi bilo treba pogledati, kdaj ima pri izračunu strižnih napetosti Manningov koeficient prevelik vpliv.



Slika 58: Prikaz razmer v prečnem prerezu P3: struga in obvodni prostor z vodno gladino, porazdelitev hitrosti in porazdelitev strižnih napetosti (brez žive meje, z živo mejo)

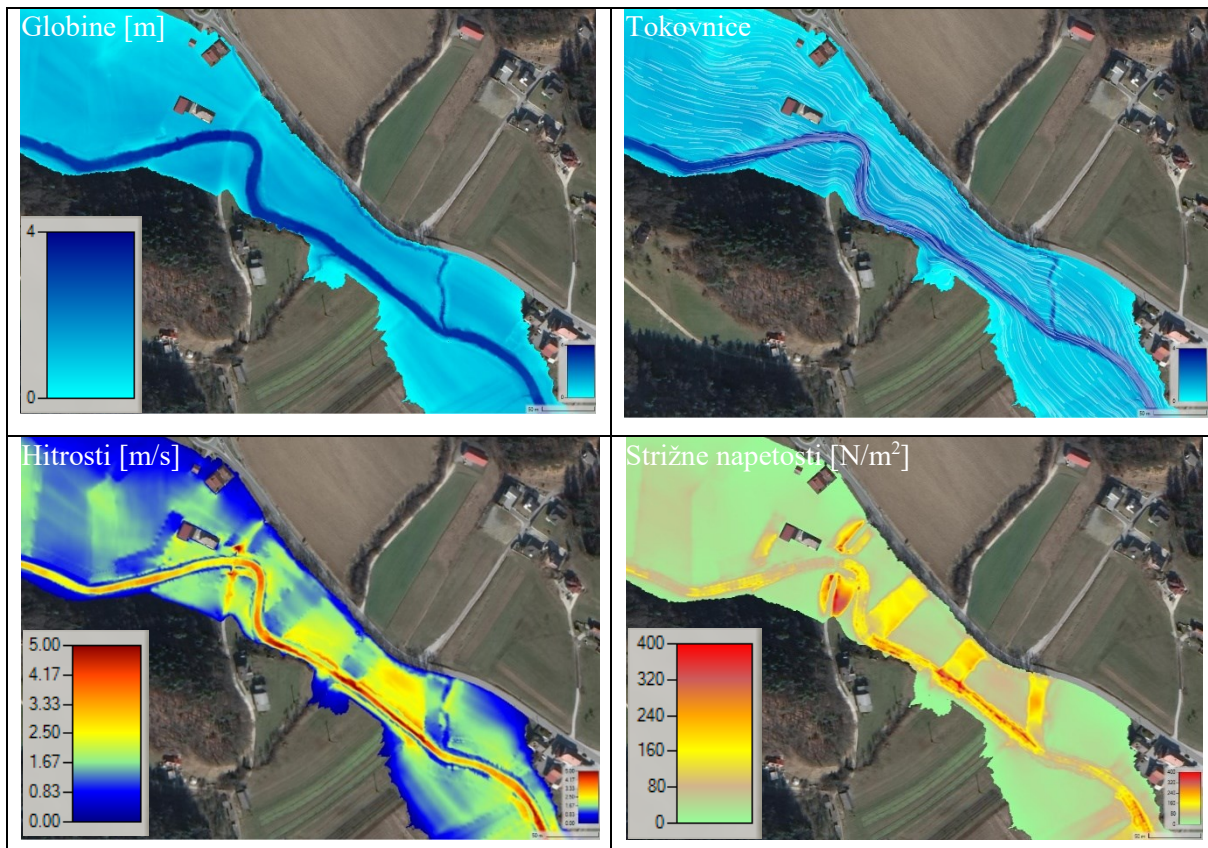
4.5 Umestitev ukrepov za zmanjšanje lokalnih hitrosti na več lokacijah hkrati

Izračuni razmer za obstoječe stanje so pokazali lokacije, kjer prihaja do največjih erozijskih obremenitev. Zato je analizirano, kakšen vpliv bi imela umestitev več območij z živo mejo na v prostoru možne lokacije (glede na objekte, parcelne meje idr.). Postavitev živih mej kaže Slika 59.



Slika 59: Območja velikih hitrosti pri Q100 (levo) in postavitev več območij z živo mejo (desno) v območje obravnave

Glavni namen teh ukrepov je upočasnitev vodnega toka, da se zmanjšajo lokalne hitrosti ter s tem erozijska nevarnost. Za cestna telesa ter prelivanja preko njihovih brežin, za območje stanovanjskega objekta ter levo poplavno površino dolvodno od mostu, kjer prihaja zaradi konfiguracije terena do velikih hitrosti ter erozijskih obremenitev. Predpostavili smo izvedbo gostih živih mej ter zanje upoštevali Manningov koeficient hrapavosti 0,09. Drugje je raba tal ostala enaka kot pri obstoječem stanju. Slika 60 prikazuje za več živih mej stanje pri pretoku Q100: globine, tokovnice, hitrosti ter strižne napetosti.

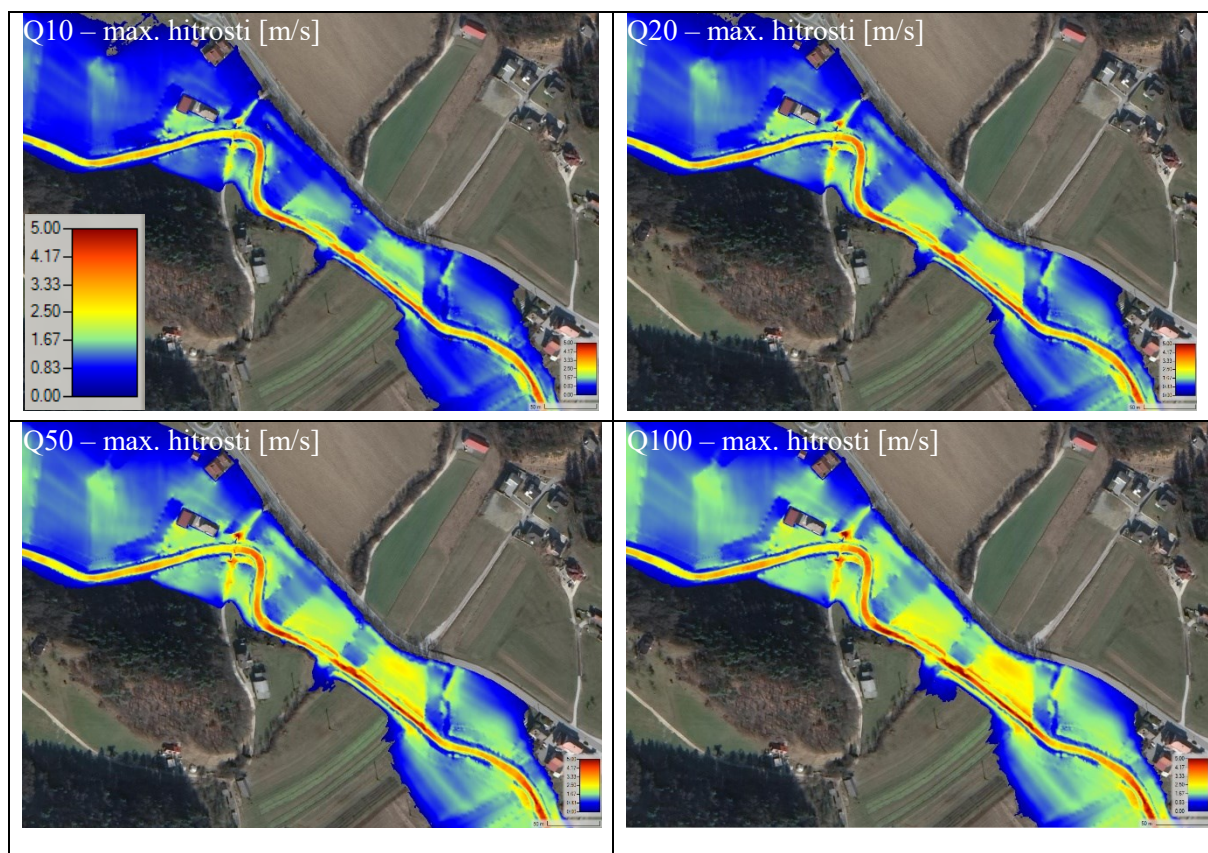


Slika 60: Več živih mej - prikaz globin, tokovnic, hitrosti ter strižnih napetosti po modeliranju ukrepov pri pretoku Q100

Globine v strugi se gibljejo od 3 do 3,5 metra, na poplavnih površinah pa so maksimalne globine vode do nekje 1,5 metra, medtem ko se proti robom poplavnega območja praviloma zmanjšujejo. Kjer so umeščene žive meje je vidno zmanjšana hitrost toka vode, pri prikazu strižnih napetosti pa je opaziti povečanje strižnih napetosti, kot je bilo navedeno že v predhodnih poglavjih (kot vpliv višjega Manningovega koeficienta).

V nadaljevanju smo zato vpliv več živih mej spremljali na podlagi izračunanih lokalnih hitrosti. Slika 61 kaže spreminjanje tokovnih razmer pri povečevanju pretokov. Pri vseh se opazi povečanje hitrosti na območju med stavbo ter vodotokom, na prelivih preko cestišča in na levi poplavni površini, kjer ni živih mej. Pri meandru je opazno povečanje hitrosti zaradi centrifugalne sile, ki deluje v krivini. Ko se struga po zavoju izravna, se konfiguracija terena nekoliko zoži, zato so tudi v strugi opazne večje hitrosti. Na območju tik ob premostitvi so vidne lokalno povečane hitrosti ob objektu, ki so verjetno posledica slabše

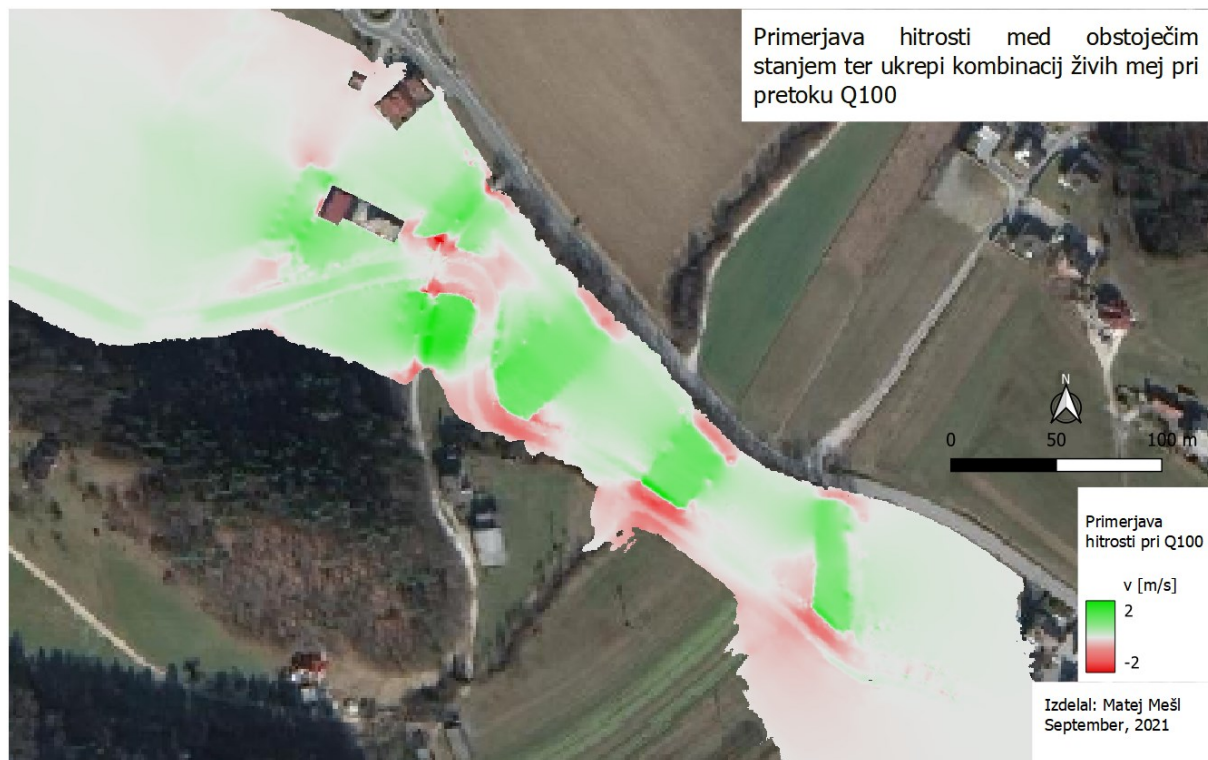
simulacije lokalnih razmer pri izračunu. Spreminjanje velikosti celic ter računskega časa ni odpravilo lokalnega povečanja hitrosti pri mostu. To problematiko bi bilo treba razjasniti, a ni vsebina te naloge.



Slika 61: Več živih mej: Prikaz hitrostnih polj pri naraščanju pretokov (od Q10 do Q100)

V nadaljevanju bomo na podlagi primerjave obstoječega stanja in stanja po umestitvi živih mej ugotovili vpliv teh sonaravnih ukrepov. Prikazali bomo le primerjavo hitrosti med obstoječim stanjem ter po umestitvi živih mej za pretok Q100, pri katerem so največje vrednosti hitrosti.

Slika 62 prikazuje območja izboljšanja stanja (zelena barva - manjše hitrosti), medtem ko rdeče barve nakazujejo poslabšanje razmer. Na območjih z živimi mejami so občutna izboljšanja, saj se hitrosti zmanjšajo tudi do 2 m/s, v povprečju pa je zmanjšanje za okoli 1 m/s. Pred ter za živimi mejami je prav tako opazno izboljšanje stanja do okoli 0,5 m/s. V okolici stanovanjskega objekta se hitrosti zmanjšajo do približno 1 m/s, do manjših povečanj pride le med objektom ter živo mejo pred mostom, ko se voda zaradi zožanja pretočnega prostora nekoliko pospeši. Pri obeh prelivanjih ceste je znatno izboljšanje zaradi žive meje, kjer so bile hitrosti pri obstoječem stanju problematične. Živa meja, ki je locirana na obeh straneh ceste, zagotovi zmanjšanje hitrosti preko ceste do 1,5 m/s. Tudi, če je cesta asfaltirana, kot je v našem primeru, bi pri velikih hitrostih odneslo asfalt zaradi spodjedanja ter uničenja prodne posteljice. Zato je ključen ukrep znižanja hitrosti vode z živo mejo ali s kakšnimi podobnimi ukrepi.



Slika 62: Primerjava hitrosti obstoječega stanja z kombinacijo ukrepov pri pretoku Q100

Če so na enih območjih izboljšanja, pa zaradi fizikalnih zakonov pride na drugih območjih do poslabšanja stanja. Če odmislimo slabšo simulacijo tik ob mostni konstrukciji, so vidna povečanja hitrosti po strugi dolvodno od mostu na zavojih ter na skrajnih delih (zunanjih robovih) umeščenih živih mej. Navsezadnje mora celotna količina vode nekako odteči, kar se odrazi na povečanih hitrostih na območjih, kjer ni oviranja.

Največ težav je na levih brežinah struge, kjer so v neposredni bližini locirane žive meje. Prav tako se povečajo hitrosti tudi na desni strani vodotoka, vendar ne v tolikšni meri. Kot protiukrep bi bilo potrebno brežine zavarovati s kakšno kamnito zložbo, lesenimi kaštami ali z drugimi sonaravnimi ukrepi, ki bi prenesli hitrosti (nekaj jih je prikazanih v Prilogi B).

Analizo vpliva več živih mej smo prikazali s primerjavo stanja pred ter po ukrepih v izbranih prečnih prerezih. V prečnih profilih smo obravnavali analizo gladin ter hitrosti, prikaz strižnih napetosti pa smo v tem poglavju izpustili, ker smo zgoraj že ugotovili, da ni tako primerna kot so primerjave hitrosti. Za boljšo preglednost so na sliki (Slika 63) izrisana območja živih mej in obravnavani prečni profili s pripisi številke ter imen profilov.



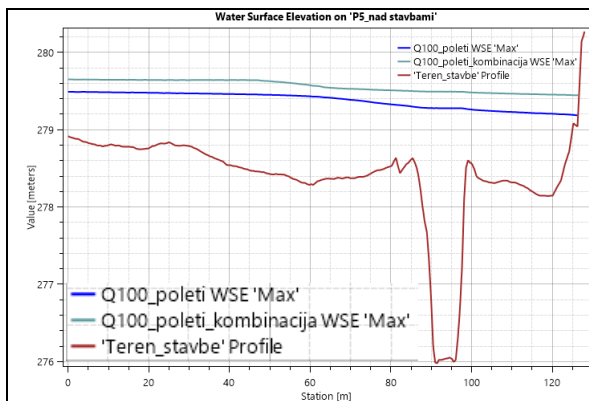
Slika 63: Več živih mej: Izris prečnih profilov ter območij živih mej (roza obroba)

Na prečnih profilih, obravnavanih v nadaljevanju, so z zeleno črto označeni rezultati za stanje z več živimi mejami, medtem ko je z modro barvo prikazano obstoječe stanje. Z rdečo črto je izrisan teren, ki je prikazan na grafu primerjav gladin.

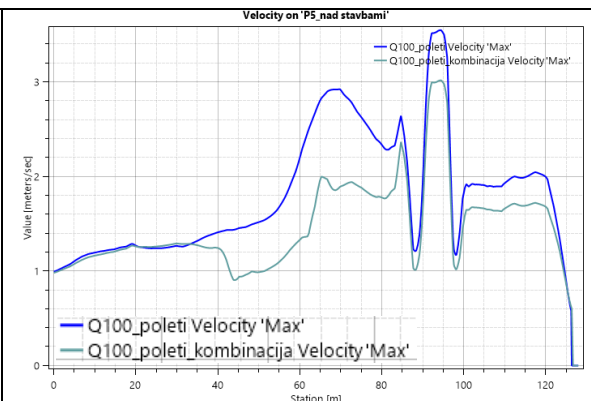
P5: Prečni profil pred stanovanjskim objektom

Na območju pred stanovanjskim objektom se mora vodni tok razdeliti, da obteka stavbo. Torej se na stavbi pojavi zastojna točka, levo in desno od nje pa povečan tok vode. Živa meja pred stavbo zmanjša hitrost proti stavbi in ugodno vpliva na razmere ob stavbi. Kombinacija ukrepov (tj. več živih mej) se na dvigu gladine v P5 kar znatno pozna, saj se povprečno dvigne gladina za okoli 20 cm, se pa zato praktično na celotnem profilu hitrosti zmanjšajo. Na mestu žive meje se hitrosti zmanjšajo za približno 0,5 m/s, medtem ko se dolvodno od žive meje zmanjšajo hitrosti do 0,8 m/s.

Ker živa meja delno preusmerja vodni tok v levo, se v strugi hitrosti zmanjšajo za okoli 0,5 m/s. Na desnem poplavnem območju se zmanjšajo za okoli 0,3 m/s, pri čemer pa hitrosti nekoliko nihajo glede na lokacijo. Dolvodno od P5 sta do robov primerjani hitrosti približno enaki.



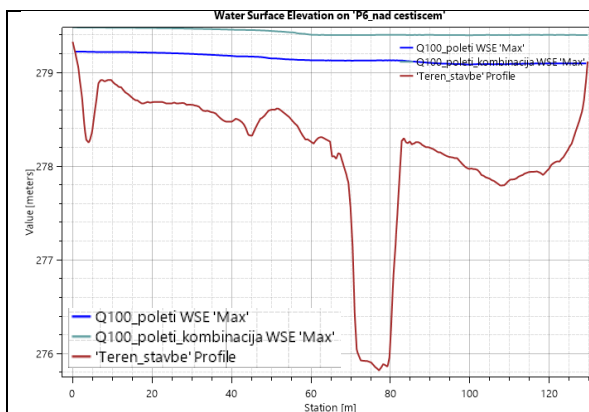
Slika 64: Profil 5: Primerjava gladin – vpliv več živih mej



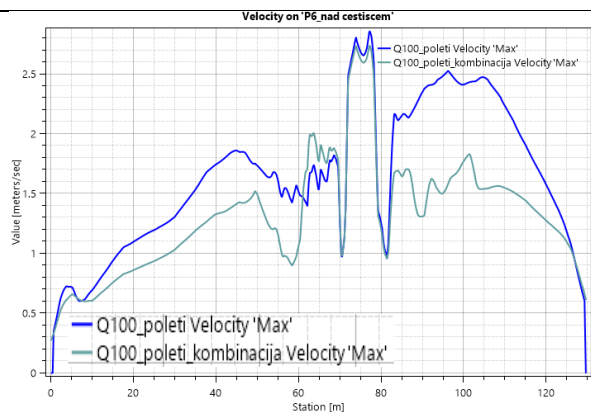
Slika 65: Profil 5: Primerjava hitrosti – vpliv več živih mej

P6: Prečni profil nad cestiščem

Nad cestiščem se povečajo globine praktično po celotnem prerezu, saj je dvig gladine za okoli 35 cm. Pri hitrostih pa imamo kar dinamično sliko, ki kaže v večjem delu zmanjšanje hitrosti. Največje zmanjšanje je na desni poplavni površini, ko je tik pred živo mejo zmanjšanje hitrosti tudi do 1 m/s. Preko vodotoka so hitrosti bolj ali manj enake. Tik zraven struge pri levi brežini je manjša rast hitrosti, vendar kaj kmalu spet ugodno deluje zmanjšanje hitrosti. To povečanje hitrosti, ki je nekje do 0,25 m/s pa se pojavi na vmesnem območju, kjer ni žive meje, zato tam prihaja lokalno do večjih hitrostih. Naprej proti levemu robu so hitrosti ves čas manjše kot pred ukrepi in je nekje med 0,5 m/s ter 0,25 m/s velikostni red zmanjšanja hitrosti.



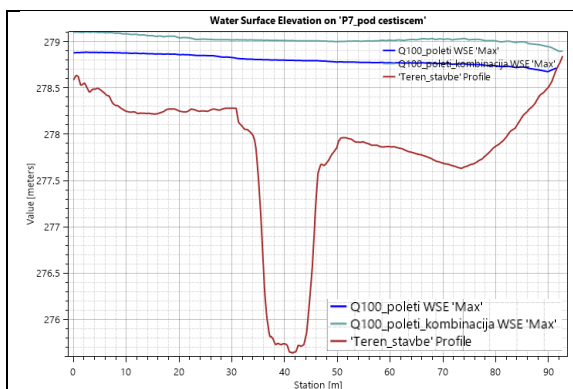
Slika 66: Profil 6: Primerjava gladin – vpliv več živih mej



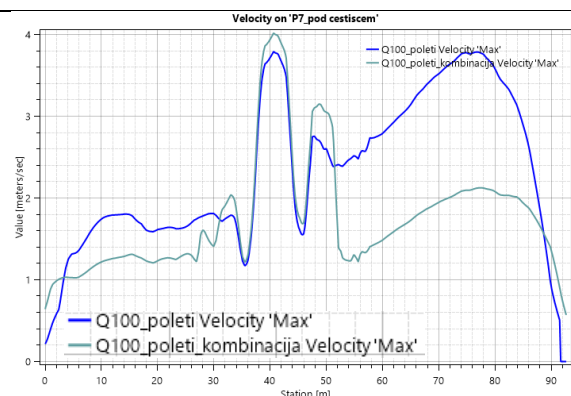
Slika 67: Profil 6: Primerjava hitrosti – vpliv več živih mej

P7: Prečni profil dolvodno od cestišča

Ta prečni profil poteka preko dveh živih mej, zato so lokalni vplivi kar očitni. Gladina se dvigne za okoli 20 cm. Najbolj očitna sprememba zmanjšanja hitrosti je po desni poplavni površini, kjer je bila pri obstoječem stanju zaradi padca terena pred ukrepom zelo povečana hitrost toka voda. Zmanjšanje hitrosti je tudi do 1,8 m/s. Nato se hitrost po koncu žive meje nekoliko poveča, enako tudi v strugi. Tudi po levi poplavni površini je zmanjšanje hitrosti do 0,5 m/s. Na robu poplavnega območja je vidno rahlo povečanje hitrosti, kar je posledica konca območja žive meje in s tem obtekanja vode okoli njega.



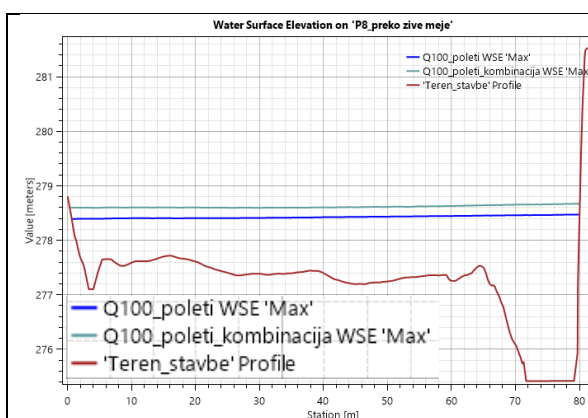
Slika 68: Profil 7: Primerjava gladin – vpliv več živih mej



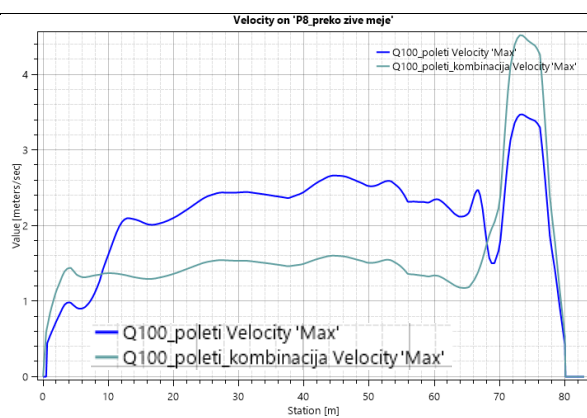
Slika 69: Profil 7: Primerjava hitrosti – vpliv več živih mej

P8: Prečni profil preko območja žive meje

Pri tem prečnem prerezu, ki se nahaja nekoliko dolvodno, je pri gladinah vidna praktično vzporednost. Na tem delu ni nobenih nasipov ob strugi, ki bi ločevali tok vode in bi prihajalo do razlik v gladini. Prav tako je ta del po konfiguraciji terena nekoliko zožen, zato se gladine stabilizirajo. Dvig gladine zaradi živih mej je za okoli 20 cm. Hitrosti v strugi so večje in sicer za slab 1 m/s, medtem ko se na poplavni površini zmanjšajo prav tako do 1 m/s.



Slika 70: Profil 8: Primerjava gladin – vpliv več živih mej

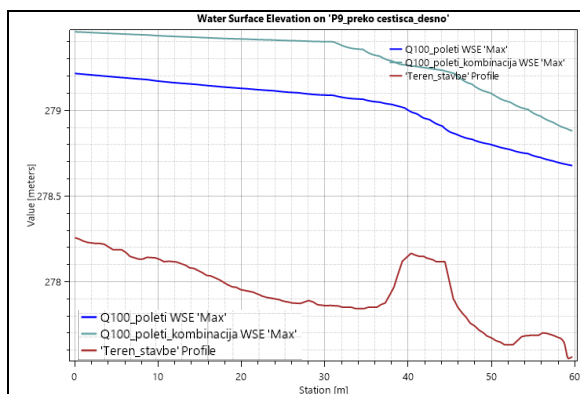


Slika 71: Profil 8: Primerjava hitrosti – vpliv več živih mej

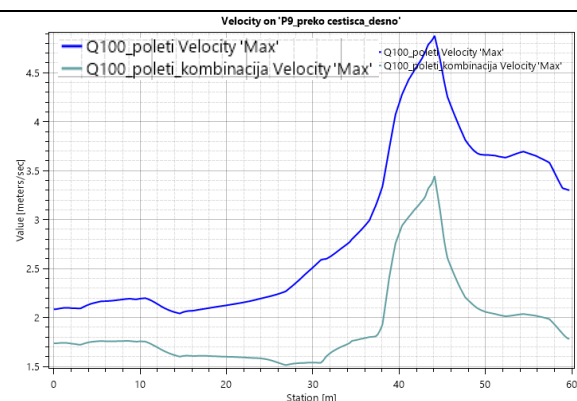
Na levem robu poplavnega območja je lepo viden fenomen obtekanja območja z živo mejo.

P9: Vzdolžni profil preko območja z živo mejo

Ta prečni profil, ki se nahaja na desni strani mostu in poteka preko cestišča, je prikazan zaradi razgibanosti terena. V vzdolžnem profilu je vidna sprememba naklona gladine, ki preliva cestišče. V primeru živih mej vodostaj poveča za okoli 30 cm na mestu cestišča, potek gladine pa kaže zajezbo vodnega toka. Pri porazdelitvi lokalnih hitrostih pa imamo vidne na mestih preliivanja velike skoke, ki pa so z ukrepi z živo mejo na obeh straneh ublaženi. Hitrost je zmanjšana na mestu cestišča za 1,3 m/s, maksimalno zmanjšanje v najnižji točki terena pa znaša 1,65 m/s.



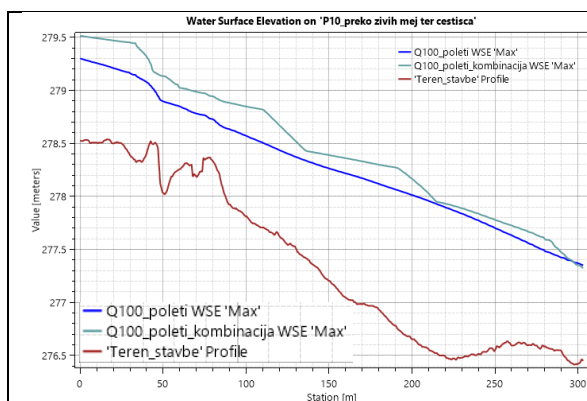
Slika 72: Profil 9: Primerjava gladin – vpliv več živih mej



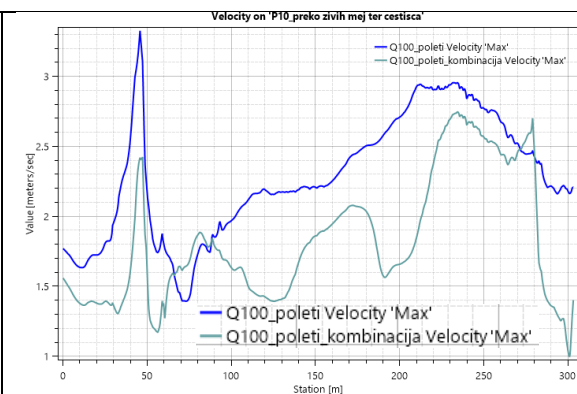
Slika 73: Profil 9: Primerjava hitrosti – vpliv več živih mej

P10: Vzdolžni profil preko območja z živo mejo

Za zaključek smo dodali še daljši odsek prikaza poteka gladin, ki sega preko območij petih živih mej. Pri gladinah so vidna nihanja, medtem ko je pri obstoječem stanju dokaj enakomerni padec gladin. Nihanja so opazna na mestih živih mej, ker ustvarjajo zajezen vodni tok in so največja na začetku le teh. Zanimiv pogled je tudi na spreminjanje hitrosti, kjer vidimo, da se vzdolž celotnega odseka izboljša stanje zaradi zmanjšanja hitrosti in s tem zmanjšanja erozijske nevarnosti. Prvi večji skok hitrosti je na območju prelivanja preko ceste, kjer se z umeščanjem živih mej zmanjša hitrost za do 0,9 m/s. Nato so vidna nihanja zelene črte gledano dolvodno. Kjer je živa meja, je največje izboljšanje hitrostnega stanja, nato pa se razlike, kjer ni živih mej, zmanjšajo napram obstoječemu stanju. Kljub temu pa je povsod izboljšanje stanja, tako, da imajo žive meje tudi vpliv predvsem gorvodno, nekoliko pa tudi dolvodno.



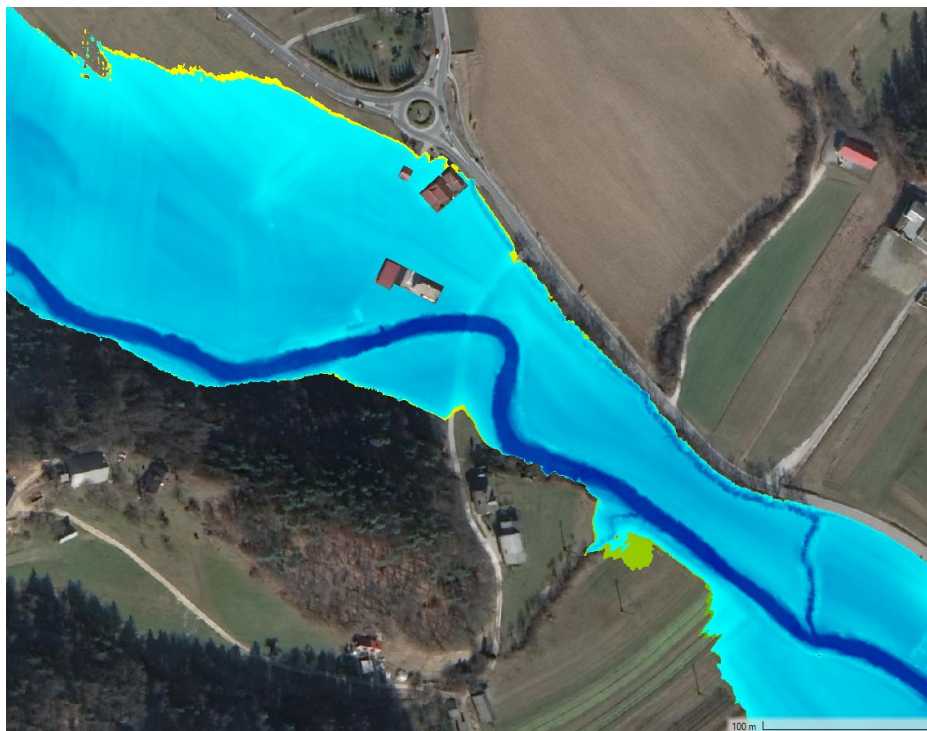
Slika 74: Profil 10: Primerjava gladin – vpliv več živih mej



Slika 75: Profil 10: Primerjava hitrosti – vpliv več živih mej

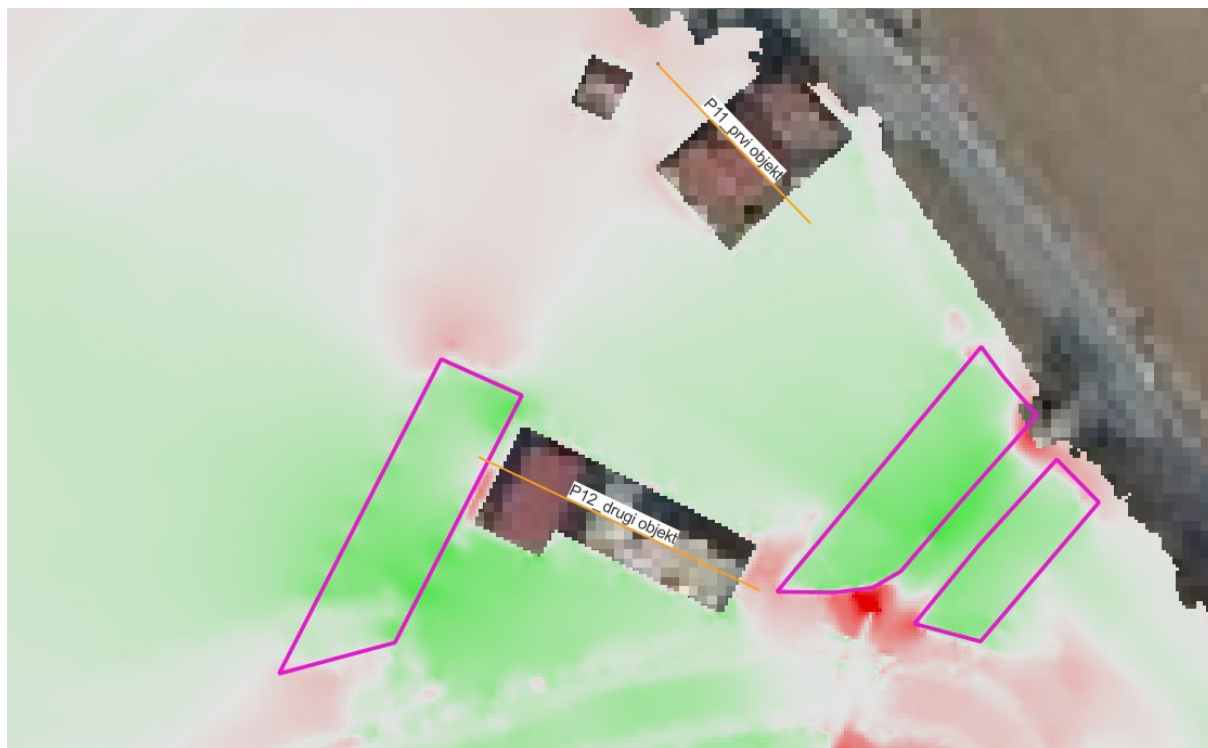
Pri izbrani porazdelitvi oz. zaporedju živih mej je težko določljivo, v kakšni meri katera živa meja vpliva na hitrostno polje. Vpliv posamezne žive meje gorvodno ter dolvodno pa je mogoče oceniti, kar je pokazano v podpoglavju 4.4.

Seveda pa ima prikazan vpliv živih mej tudi negativno plat. Najlažje jo je prikazati s povečanjem poplavljenih površin (Slika 76).



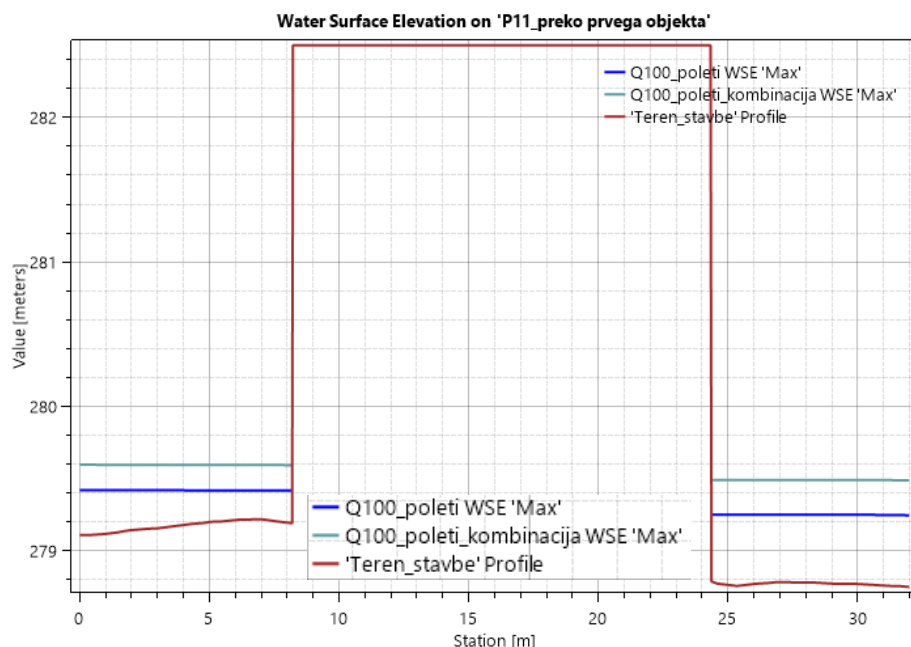
Slika 76: Povečanje območja poplavljenosti (rumena ter zelena barva) zaradi vpliva več živih mej, pri Q100

Pri tehtanju pozitivnih in negativnih vplivov je treba upoštevati, ali povečanje poplavljenih površin bistveno poveča pričakovano poplavno škodo. Zaradi povečanja dosega gladin smo preverili, za koliko se dvigne višina vode pri stavbah.



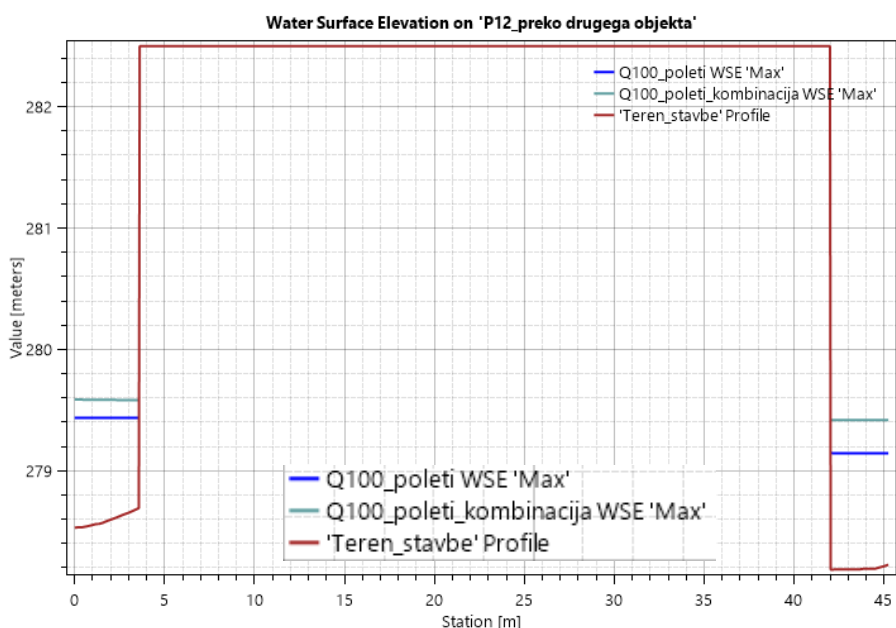
Slika 77: Prikaz prečnih prerezov preko stavb ter živih mej (roza obroba)

Pri stavbi locirane zraven glavne ceste je v prečnem prerezu P11 (Slika 78) viden dvig gladine za 17 cm. Če primerjamo gladine pri ukrepu živih mej pred ter za stavbo vidimo, da se zmanjša gladina za 10 cm, kar je smiselno, kajti pred oviro se gladine nekoliko dvignejo.



Slika 78: Prikaz profila P11

Pri prečnem prerezu P12 (Slika 79), kjer je objekt že tako ali tako močno poplavljen, pa se zgodi dvig gladine pred stavbo za 14 cm, medtem ko na spodnjem delu za 28 cm, kar je posledica žive meje v neposredni bližini. Zmanjšana razlika gladin med gorvodno in dolvodno stranjo stavbe pa pomeni, da se zmanjšajo lokalne hitrosti ob stavbi, kar ugodno vpliva na erozijske obremenitve ob stavbi (temelji).



Slika 79: Prikaz profila P12

5 ZAKLJUČEK

Na izbranem območju so pogosta razlivanja visokih voda, saj je Hudinja hudourniška reka. Zato smo želeli z ukrepi na poplavnih območjih zmanjšati erozijsko nevarnost, ki je prisotna na tem območju. Ukrepe pa smo nato primerjali z obstoječim stanjem, da smo ugotovili, kakšne vplive ima izbira sonaravnih ukrepov, pa tudi, kako vpliva spremenjena pokrovnost tal v različnih letnih časih.

Za pripravo podatkov in obdelave smo uporabili tri programska orodja (Civil 3D, HEC-RAS ter QGIS). Za kvalitetne rezultate modeliranja je ključna priprava digitalnega zapisa ustrezno posnetega terena (LiDAR), da ne prihaja do kakšnih anomalij, ki so lahko posledica napačnega zajema topografskih podatkov. Največ težav pri laserskemu skeniranju lahko pride na območju struge, če je precej zarasla z obrežno vegetacijo. Na našem območju večjih anomalij na srečo ni bilo, kjer pa je bilo odstopanje terena v strugi, smo na podlagi ogleda terena ročno odstranili napake. Če ne bi storili popravkov, bi lahko voda prej prestopila bregove, kot bi jih v resnici.

Digitalni opis terena smo še nekoliko modificirali ter dodali pripadajoče stavbe, pri geometriji modela pa dodali še dva mostova, ki sta prisotna na našem območju. Prav tako je za ustrezne rezultate pomemben vhodni podatek hrapavosti površja, ki smo ga določili glede na posamezno numerično celico pripadajočo rabi tal. Kot vhodni podatek o pretokih smo vzeli povratne dobe pretokov pri Q10, Q20, Q50 ter Q100, za katere smo privzeli enako obliko visokovodnega dogodka (hidrograma) z ustrezno konico, kot je bila v izmerjenem dogodku iz leta 2007. Za vse pretoke smo preverili razmere na poplavnem območju ter jih primerjali med sabo. Da smo se približali že modeliranim vrednostim dosega vode, smo pri pretoku Q100 umerjali porazdelitev pretoka po širini kot robnega pogoja na vtoku. Dotočni prerez na območje obravnave smo izbrali na najbolj zoženem delu že narejenih kart poplavne nevarnosti (iz Atlasa voda), da smo z robnim pogojem dosegli enako vhodno širino poplavljanja.

Preden smo analizirali rezultate obstoječega stanja, smo poiskali območje, kjer voda najprej prelije bregove, tako smo dobili pretočnost struge. Naredili smo prečni prerez ter preverili, kolikšen je maksimalni pretok v strugi ob visokovodni konici. Za obstoječe stanje smo nato na celotnem območju pri pretoku Q100 prikazali globine, potek tokovnic, vrednosti hitrosti ter strižnih napetosti. Za obstoječe stanje smo določili vrednosti hitrosti ter strižnih napetosti, ki bi jih prenesla pripadajoča raba tal. Tako smo dobili odpornost tal, ki smo jo primerjali z obremenitvijo in to nam je bila osnova za izdelavo kart erozijske nevarnosti. Dobili smo območja, kjer mejne vrednosti hitrosti ter strižne napetosti niso bile presežene, kot tudi presežena območja, slednja smo uporabili pri izdelavi kart erozijske nevarnosti. Na kartah so prikazana območja preseženih vrednosti, glede naraščanja pretokov za hitrosti ter strižne napetosti. Glede na rezultate teh kart smo se odločili za nadaljnje ukrepe.

Preden smo umestili ukrepe za zmanjšanje erozijske nevarnosti, smo primerjali obstoječe stanje še z izven vegetativnim stanjem, da smo dobili tudi neugoden scenarij, ki bi se lahko zgodil v obdobju, ko ni vegetacije na njivskih površinah. Ravno na teh površinah je v tem času zelo zmanjšana odpornost na hitrosti ter strižne napetosti, kar smo upoštevali tudi pri drugih rabah tal spremembo zmanjšanja

vegetacije. Prikazali smo razlike glede na obstoječe stanje ter opazili vidno poslabšanje razmer. Primerna rešitev je izbira jesensko-zimske setve, ki bi nekoliko povečala odpornost njivskih površin. Cilj je bil, čim bolj se približati obstoječemu stanju, za katerega so bile narejene nadaljnje primerjave, da bi prikazali vplive po ukrepih z umestitvijo živih mej.

Da smo preverili vpliv žive meje na okoliški prostor, smo najprej umestili en sam pas žive meje na travniško površino dolvodno od zgornjega mostu. Ugotovili smo, da se gladine zaradi žive meje zvišajo, kar pa ima vpliv na doseg vode, tako se nekoliko povečajo poplavne površine. Zaradi žive meje pa se hitrosti precej zmanjšajo ter s tem erozijska nevarnost. Opazna so precejšnja zmanjšanja hitrosti preko ter gorvodno od žive meje, medtem ko dolvodno ni sprememb v tolikšni meri. Model pokaže poslabšanje razmer na zunanjem robu ob živi meji, kjer pride do obtekanja toka vode okoli grmovne ovire ter s tem povečanja hitrosti. Na tistem mestu bi bile potrebne dodatne utrditve cestnega telesa, kjer so zaradi prelivanja največje hitrosti. Prikazali smo razmere za prečne profile nad, preko in dolvodno od žive meje ter detajlno analizirali spremembe. Zaježitev toka s cesto pa pomeni, da se na dolvodni brežini cestnega telesa pojavijo večje hitrosti, tudi če je tam grmovna zarast. Ker smo pri primerjavi strižnih napetosti ugotovili, da model na teh območjih ne upošteva ustrezno lokalnega povečanja Manningovega koeficienta hrapavosti, smo analizo strižnih napetosti pri naslednjem poglavju izpustili.

Pri kombinaciji ukrepov z več živimi mejami smo želeli na večjem območju izboljšati erozijske razmere. To nam je uspelo, vendar so nastala tudi nekatera območja poslabšanja razmer. Za več prečnih prereзов smo analizirali spremembe gladin ter hitrosti. Zaradi nove ovire, ki jo vodnemu toku prinašajo žive meje, se gladine v obravnavnih profilih povečajo, kar je posledica zmanjšanja hitrosti na območju grmovne zarasti. Največja povečanja hitrosti pa v nekaterih primerih nastanejo v sami strugi zaradi preusmerjanja vodnega toka nazaj v strugo, zato bi bilo potrebno na teh mestih utrditi brežine, da bi njihova odpornost presegla vpliv obremenitve. Zaradi povišanja gladin se poveča nekoliko tudi doseg poplavne vode. To nas je predvsem zanimalo zaradi stavb, ki so na tem območju ter vpliva na njih. Stavba blizu struge je že pri obstoječem stanju poplavljen. Zaradi ukrepa živih mej se na precejšnjem območju zmanjša erozijska nevarnost, predvsem na dvorišču, vendar ima to izboljšanje svojo ceno z lokalnim dvigom gladine. Sam dvig gladine ob stavbi za povprečno 20 cm ne bi smel vplivati na kakšno povečanje stroškov sanacije, vendar bi težava lahko nastopila, če bi pri vdoru vode v stavbo tako povišanje vode v stavbi dosegla vtičnice ter ostalo elektronsko napeljavo, kar pa bi poplavno škodo precej povečalo. Pri objektu lociranem blizu glavne ceste, ki je prav tako poplavljen že pri obstoječem stanju, se gladine dvignejo za okoli 15 cm. Pri tem objektu niso gladine že v osnovi tako visoke, vendar bi vseeno lahko s to dodatno globino poplavile objekt.

Prikazani vpliv kaže, da je tudi pri sonaravnih ukrepih potrebno pretehtati vse možnosti koristi in stroškov ter se na podlagi tega odločiti, ali so možni ukrepi sprejemljivi. Prikazano pa je tudi, kako se razmere spreminjajo že zaradi nenamernega spreminjanja pokrovnosti tal, npr. zaradi letnih časov. Za obravnavano območje je prikazano, kako se lahko zmanjša erozijska nevarnost kmetijskih ter ostalih površin, pri čemer predvsem bistveno izboljšamo stanje glede odnašanja rodovitne prsti z njivskih

površin, pa tudi zmanjšamo nevarnost poškodb pri prelivanjih preko cestnega telesa. Negativne posledice kot npr. neugodno povišanje globin ob stavbah je mogoče kompenzirati z različnimi lokalnimi ukrepi, kot so npr. individualni protipoplavni ukrepi na stavbah. Tako bi ob umeščanju živih mej lahko s spremljevalnimi ukrepi zaščitili stavbe in s tem omogočili zmanjševanje erozijske nevarnosti na obravnavanem območju.

VIRI IN LITERATURA

Arcanum Maps. 2021. Europe in the XIX. century.

<https://maps.arcanum.com/en/> (Pridobljeno dne 2. 9. 2021).

Agencija Republike Slovenije za okolje. 2021. Hidrološki podatki za postajo Škofja vas. (Pridobljeno: 25. 8. 2021)

Anzeljc, D. 2013. Izdelava evidence in podatkovnega sloja pretokov Q10, Q100 in Q500 iz HH študij, IzVRS arhiva in rezultatov analiz ARSO. Ljubljana, Inštitut za vode Republike Slovenije: 1380 f.

Atlas okolja. Ministrstvo za okolje in prostor, Agencija Republike Slovenije za okolje. 2021.

<http://gis.arso.gov.si/atlasokolja/> (Pridobljeno dne 26. 8. 2021).

Atlas voda. 2021. Direkcija Republike Slovenije za vode. Območje poplavljanja.

<https://gisportal.gov.si/portal/apps/webappviewer/index.html?id=11785b60acdf4f599157f33aac8556a6> (Pridobljeno dne 25. 8. 2021).

Autodesk. 2019. About Surfaces.

<https://knowledge.autodesk.com/support/civil-3d/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2019/ENU/Civil3D-UserGuide/files/GUID-1BFB673D-F667-410A-9400-0FAABEB5951C-htm.html> (Pridobljeno dne 29. 8. 2021).

Brunner, G. W. 2021. HEC-RAS 2D User's Manual.

<https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs/r2dum/latest/foreword> (Pridobljeno dne 26. 8. 2021).

Chow, V.T. 1959, Open-channel hydraulics: New York, McGraw-Hill Book Co., 680 f.

Čekada, M., Bric, V., Obreza, A., Tršan, S., Dejak, B., Kogoj, M., Karničnik, I. 2015. Izvedba laserskega skeniranja Slovenije. Blok 22. Tehnično poročilo o izdelavi izdelkov.

http://gis.arso.gov.si/related/lidar_porocila/b_22_izdelava_izdelkov.pdf (Pridobljeno dne 1. 9. 2021).

Geochacing. 2010. Tama River.

https://www.geocaching.com/geocache/GC2E81R_tama-river-strata-earthcache?guid=ba14fc88-57eb-41f7-9147-57c638c3799c (Pridobljeno dne 29. 8. 2021).

Giordanengo, J., Mandel, R., Spitz, W. et al. 2016. Living Streambanks: A Manual of Bioengineering Treatments for Colorado Streams: 160 str.

<https://riversedgewest.org/sites/default/files/resource-center-documents/Biostabilization%20Manual%20Draft%20102916.pdf> (Pridobljeno dne 21. 8. 2021).

iObčina. 2021. Občina Vojnik. Podatki rabe tal obstoječega stanja.

<https://gis.iobcina.si/gisapp/Default.aspx?a=vojnik> (Pridobljeno dne 27. 8. 2021)

IZVO-R. 2015. Ureditev vodne infrastrukture za zagotavljanje poplavne varnosti Železnikov – I. faza. Elaborat erozijskih in plazljivih ogroženih območij.

http://www.arso.gov.si/zhelezniki-poplavna-varnost/PROJEKTNA%20DOKUMENTACIJA/projekt%20dokumentacija%20VGU/el_4_EROZIJA/10.4_erozija_plazljivost_PORO%C4%8CILO.pdf (Pridobljeno dne 23. 8. 2021).

Mikoš, M. 2000. Urejanje vodotokov: skripta, verzija 01.2000. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za splošno hidrotehniko: 182 str.

Miklavčič, L. 2013. Sonaravni ukrepi za upočasnitev vodnega toka. Diplomsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba L. Miklavčič): 36 f.

NRCD. 2021. Soil Erosion.

<https://www.nrcd.org/stories/soil-erosion-101#control> (Pridobljeno dne 19. 8. 2021).

Pivk, A. 2019. Strižne obremenitve poplavnih območij ob Selški Sori pri visokovodnih dogodkih. Diplomsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba A. Pivk): 41 f.

Rak, G. 2013. Hidravlična analiza vpliva rabe prostora na poplavnih območjih na potovanje poplavnih valov. Magistrsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba G. Rak): 130 f.

Rak, G., Müller, M., Kompare, K., Steinman, F. 2014. Vpliv zaraščenosti poplavnih površin na potovanje poplavnih valov. Gradbeni vestnik 63: 2–12.

<http://www.dlib.si/details/URN:NBN:SI:DOC-1G8JSFVA> (Pridobljeno dne 26. 8. 2021).

Sherman, G. 2015. Quantum GIS User Guide.

https://download.osgeo.org/qgis/doc/manual/qgis-0.7.4_user_guide_en.pdf (Pridobljeno dne 29. 8. 2021).

Steinman, F. 2010. Hidravlika. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 250 str.

Symetri. 2021. Design better civil infrastructure.

<https://www.symetri.co.uk/products/civil-3d> (Pridobljeno dne 2. 9. 2021).

RRC. 2021. Manual of River Restoration Techniques. Managing Overland Floodwaters.

<https://www.therrc.co.uk/manual-river-restoration-techniques-old> (Pridobljeno dne 27. 8. 2021).

US Army Corps of Engineers. 2021.

<https://www.hec.usace.army.mil/software/hecras/features.aspx> (Pridobljeno dne 26. 8. 2021).

Vrhovec, K. 2019. Primerjava geoinformacijskih metod za zaznavanje jamskih vhodov na podlagi LiDARsko zajetih podatkov. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Filozofska fakulteta, Oddelek za geografijo. (samozaložba V. Vrhovec): 52 f.

Zakotnik, M. 2014. Pregled inženirsko bioloških metod v sonaravnem urejanju vodotokov. Diplomsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Zakotnik): 66 f.

Wang, WJ., Peng, WQ., Huai, WX. et al. Friction factor for turbulent open channel flow covered by vegetation. Sci Rep 9, 5178 (2019).

<https://www.nature.com/articles/s41598-019-41477-7> (Pridobljeno dne 2. 9. 2021).

Wikipedia. 2019. Hudinja (reka).

[https://sl.wikipedia.org/wiki/Hudinja_\(reka\)](https://sl.wikipedia.org/wiki/Hudinja_(reka)) (Pridobljeno dne 23. 8. 2021).

PRILOGE

Priloge A: Dovoljene hitrosti ter strižne odpornosti materialov in ureditev (Vir: Giordanengo, J. et.al., 2016)

Priloga A.1: Dovoljene hitrosti ter strižne odpornosti materialov in ureditev

Priloga A.2: Dovoljene hitrosti ter strižne odpornosti materialov in ureditev – nadaljevanje preglednice

Priloge B: Prikaz obstoječega stanja globin, tokovnic, hitrosti ter strižnih napetosti pri različnih pretokih

Priloga B.1: Prikaz obstoječega stanja pri Q10: globine, tokovnice, hitrosti ter strižne napetosti

Priloga B.2: Prikaz obstoječega stanja pri Q20: globine, tokovnice, hitrosti ter strižne napetosti

Priloga B.3: Prikaz obstoječega stanja pri Q50: globine, tokovnice, hitrosti ter strižne napetosti

Priloga C: Nekaj primerov utrditev brežin kot protiukrep zavarovanja brežin s sonaravnimi ureditvami

PRILOGA A.1

Dovoljene hitrosti ter strižne odpornosti materialov in ureditev (Vir: Giordanengo, J. et.al., 2016)

KATEGORIJA MATERIALA	VRSTA MATERIALA	Strižna odpornost [N/m ²]	Dovoljena 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
	Melasta 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 in trdopan	32.1	1.8	A
Gramoz	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
Vegetacija	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
Razgradljiva vlakna	Vrečevina/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
Nerazgradljiva vlakna	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

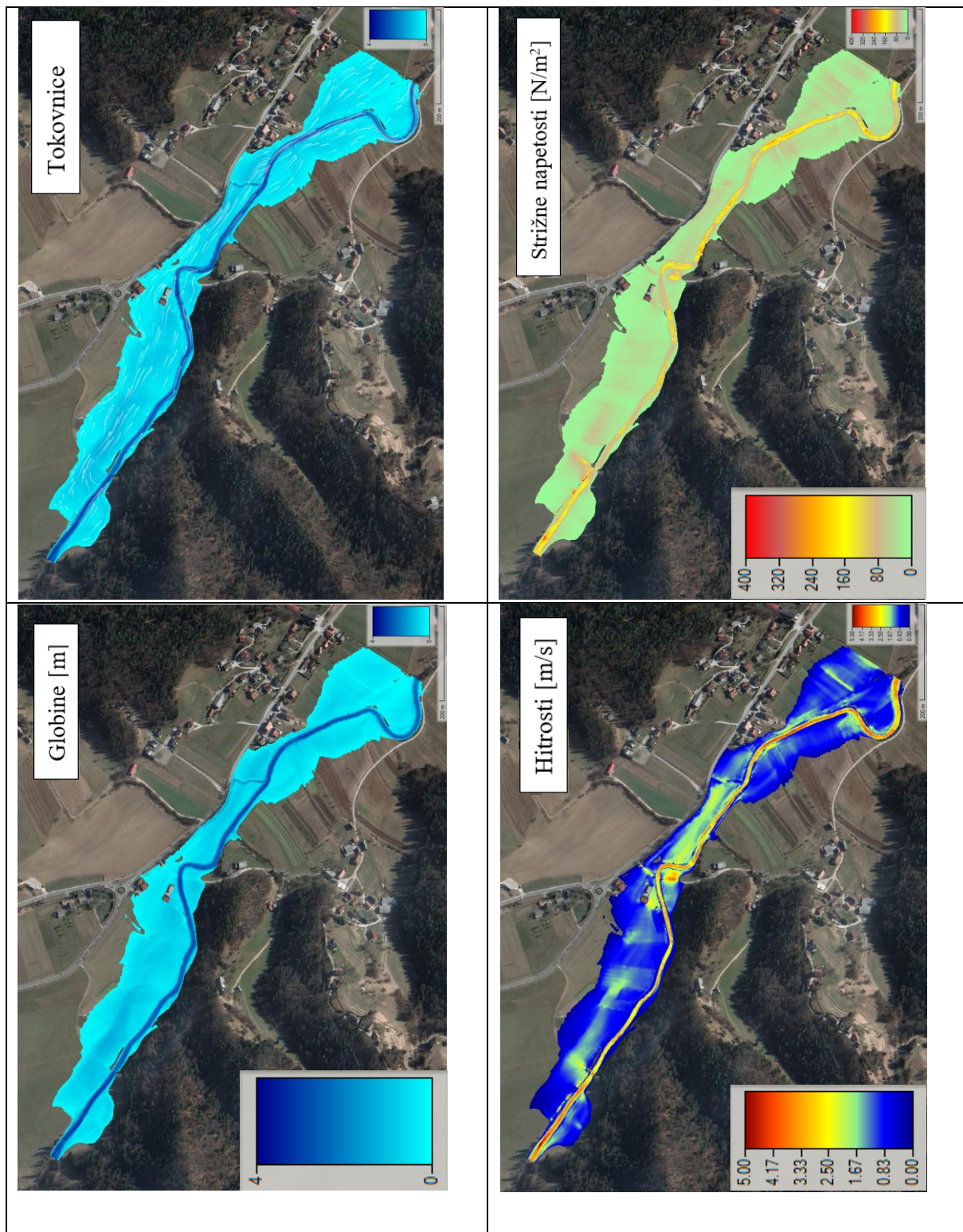
PRILOGA A.2

Dovoljene hitrosti ter strižne odpornosti materialov in ureditev (Vir: Giordanengo, J. et.al., 2016) – nadaljevanje preglednice

Kamen v suho	D₅₀=15cm	119.7	1.5-3.0	F, L, M
	D ₅₀ =23cm	181.9	2.1-3.4	H
	D ₅₀ =30cm	244.2	3.0-4.0	H
	D ₅₀ =46cm	363.9	3.7-4.9	H
	D ₅₀ =61cm	483.6	4.3-5.5	E
Bio-inženirske rešitve	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
Trdne površine	Gabioni	478.8	4.3-5.8	D
	Beton	598.5	5.5	H
VIRI				
A. Chang, H.H. (1988) B. Florineth (1982) C. Gerstgraser, C. (1988) D. Goff, K. (1999) E. Gray, D.H., and Sotir, R.B. (1996)				
F. Julien, P.Y. (1995) G. Kouen, N., Li, R.M., and Simons, D.B. (1980) H. Norman, J.N. (1975) I. Schiechtl, H.M. and Stern, R. (1996) J. Schoklitsch, A. (1937)				
K. Sprague, C.J. (1999) L. Temple, D.M. (1980) M. TXDOT (1999) N. Data from Fischenich (2001) O. USACE (1997)				

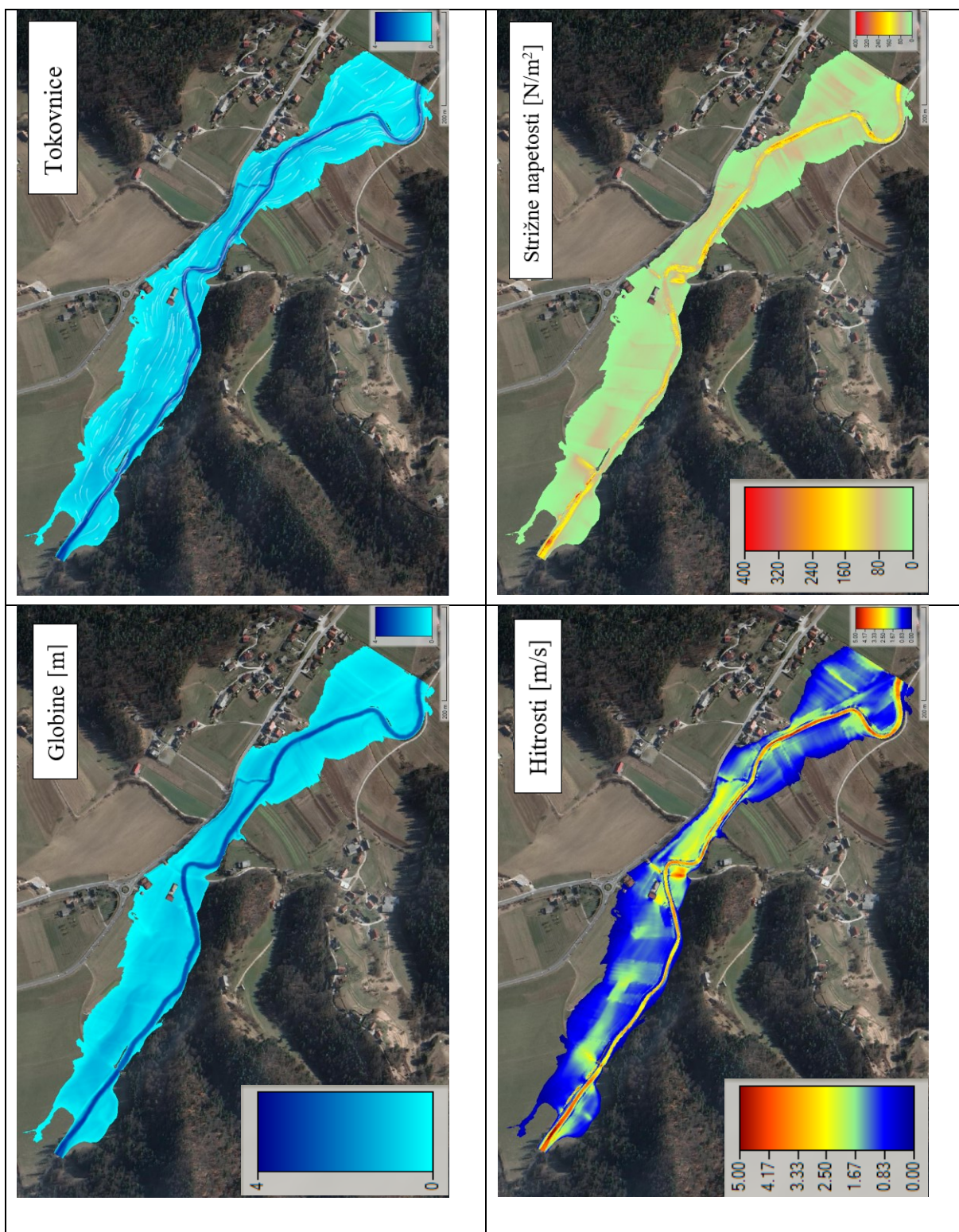
PRILOGA B.1

Prikaz obstoječega stanja pri Q10: globine, tokovnice, hitrosti ter strižne napetosti



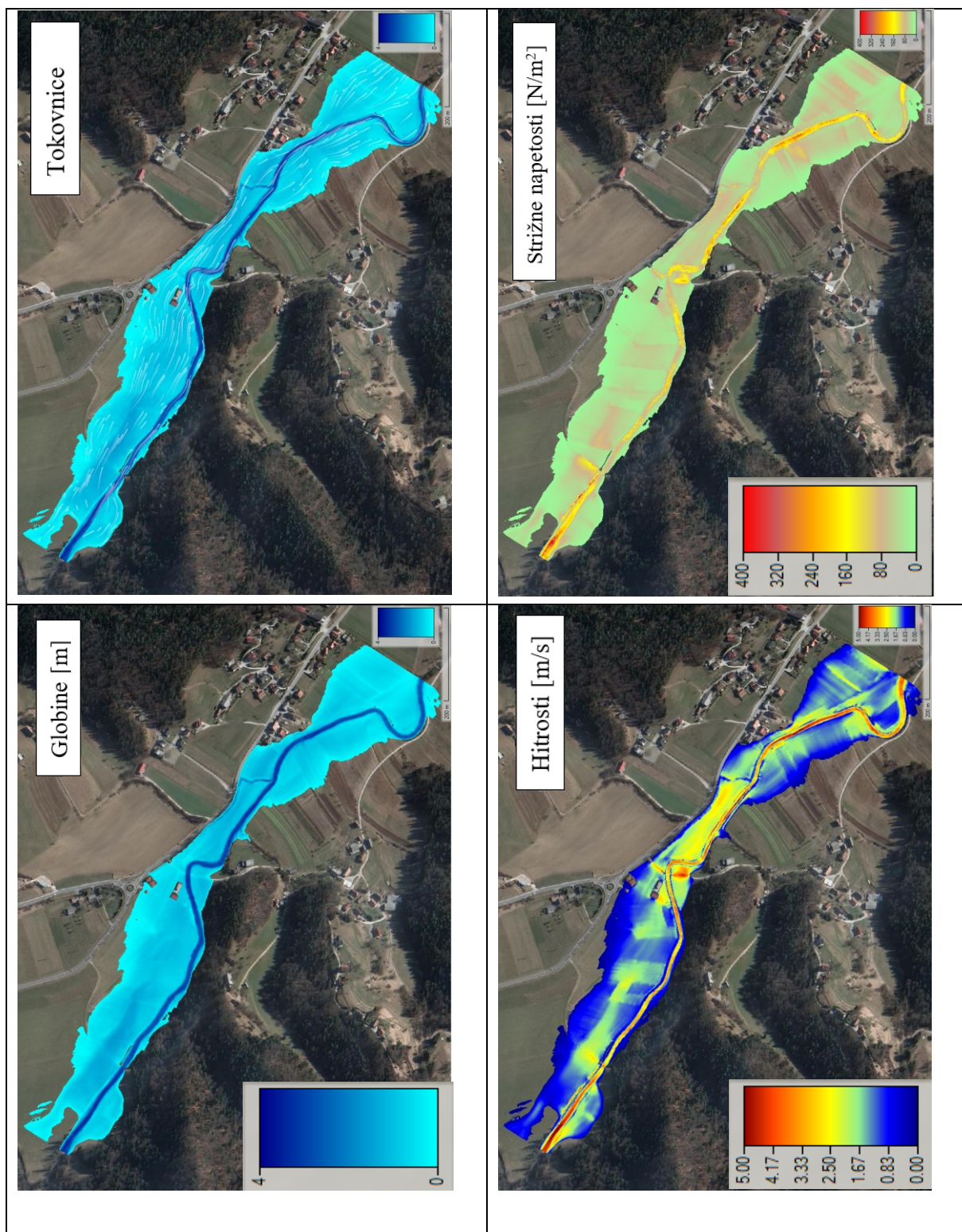
PRILOGA B.2

Prikaz obstoječega stanja pri Q20: globine, tokovnice, hitrosti ter strižne napetosti



PRILOGA B.3

Prikaz obstoječega stanja pri Q50: globine, tokovnice, hitrosti ter strižne napetosti



PRILOGA C

Nekaj primerov utrditev brežin kot protiukrep zavarovanja brežin s sonaravnimi ureditvami

Vir slik: Saša Jokanović

