



REPUBLIKA SLOVENIJA
MINISTRSTVO ZA OKOLJE IN PROSTOR

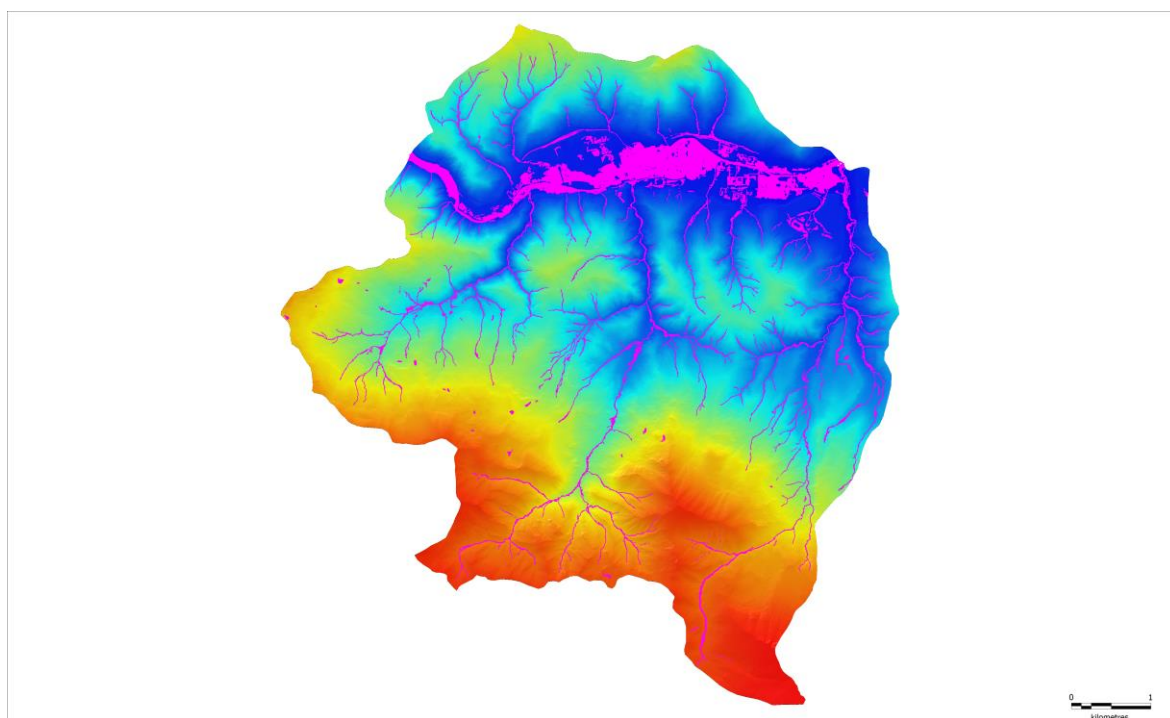
DIREKCIJA REPUBLIKE SLOVENIJE ZA VODE
Hajdrihova ulica 28c, 1000 Ljubljana

T: 01 478 31 00
F: 01 478 31 99
<http://www.dv.gov.si/>
gp.drsv@gov.si

DOLOČITEV OBMOČIJ ZELO REDKIH POPLAV (Q50+)

Porečje Meže pod sotočjem z Šentanelsko reko do sotočja z Zelenbreškim potokom (HGO 3217) in porečje Suhe

POROČILO



Ljubljana, julij 2017

NASLOV NALOGE: DOLOČITEV OBMOČIJ ZELO REDKIH POPLAV (Q50+), Porečje
Meže pod sotočjem z Šentanelsko reko do sotočja z
Zelenbreškim potokom (HGO 3217) in porečje Suhe

PROGRAM: 35558 Urejanje voda – strokovne podlage za izvajanje
negradbenih protipoplavnih ukrepov

IZVAJALEC: DIREKCIJA REPUBLIKE SLOVENIJE ZA VODE
Hajdrihova ulica 28c
1000 Ljubljana

NOSILEC NALOGE: Blažo ĐUROVIĆ, univ. dipl. inž. grad.

AVTOR POROČILA: Blažo ĐUROVIĆ, univ. dipl. inž. grad.

SODELAVCI: Darko ANZELJC, univ. dipl. inž. grad.
Jurij KRAJČIČ, mag. geog.

VODJA ODDELKA: Tina MAZI, univ. dipl. inž. grad.

VODJA SEKTORJA: dr. Nataša SMOLAR ŽVANUT, univ. dipl. biol.

DIREKTOR: Tomaž PROHINAR

(žig)

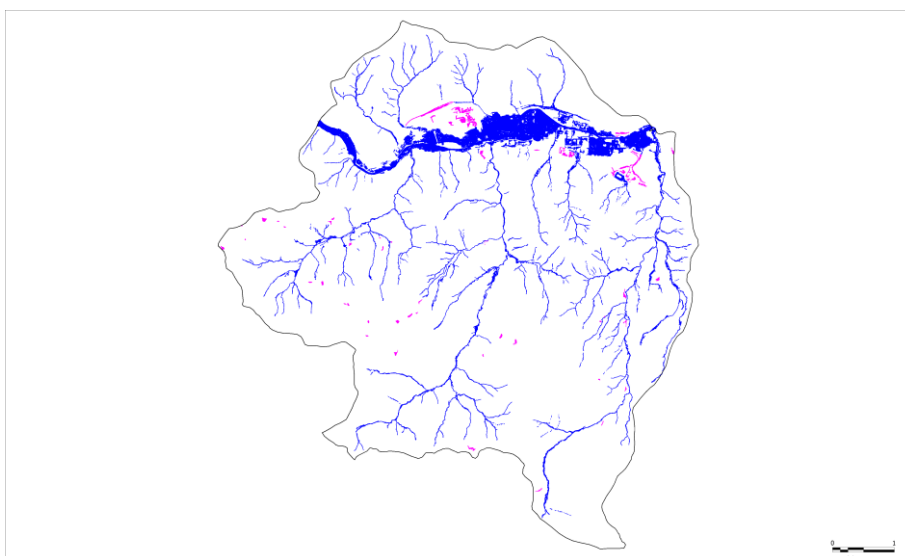
KRAJ IN DATUM: LJUBLJANA, julij 2017

Vsebina

POVZETEK	1
NAMEN IN IZHODIŠČA	3
CILJI	4
ZASNOVA ANALIZE POPLAVNIH TVEGANJ	5
DVODIMENZIJSKI HIDRODINAMIČNI MODEL	9
Zasnova modela	9
Hidrodinamika 2D nestalnega toka	11
Računska metoda	13
Struktura modela obravnavanega porečja	14
Območje obravnave	14
Model reliefa	15
Geometrični podatki in podatki o toku	17
Izračun hidravličnih karakteristik	24
Računske simulacije	25
Umerjanje (kalibracija) modela	27
Kakovost modela	32
Veljavnost (validacija) modela	32
Pravilnost (verifikacija) modela	32
Analiza občutljivosti modela	36
ANALIZA POPLAVNE NEVARNOSTI	39
Izdelava podatkovnega sloja	39
Značilnosti poplavnih območij	42
ZAKLJUČKI	44
PRILOGE	45
LITERATURA IN VIRI	46

POVZETEK

- **Naloga:**
Določitev območij zelo redkih poplav na porečju Meže med Šentanelsko reko in Zelenbreškim potokom in porečju Suhe. Obravnavano prispevno območje je hudourniško območje velikosti 40 km² s povprečnim naklonom terena 36% in z razvejano hidrološko mrežo 2,5 km/km², najnižjo točko 376,69 m in najvišjo 1673,20 m nadmorske višine.
- **Cilj:**
Izdelati ustrezno natančen in dovolj zanesljiv podatkovni sloj območij zelo redkih poplav kot enega od virov za dopolnitev opozorilne karte poplav (OPKp), po poenostavljeni hidrološko-hidravlični metodi, z razpoložljivimi podatki in v razmeroma kratkem času.
- **Rezultat:**
Vektorski podatkovni sloj zelo redkih poplav z atributoma vrsta poplave (fluvialne-rečne poplave in pluvialne-dežne poplave) in zanesljivost vira (oceni 6-7 in 5).



- **Podatki:**
efektivne padavine (24 urne padavine s povratno dobo 100 let, bruto padavine 150 mm, efektivne padavine 53,6 mm, 3 intenzitete), digitalni model reliefa (DMR1), hrapavost (v odvisnosti od pokrovnosti tal CLC), hidrogram na vtočnem profilu glavnega odvodnika (podatki hidroloških študij), podatki o hidrografiji in vodnih zemljiščih (GIS, 2016)
- **Metoda:**
Aplikacija učinkovitih padavin na mrežo računskih celic velikosti 15m, dvodimenzijski hidrodinamični model. Hidravlične značilnosti računske celice velikosti 15m se izračunavajo s pomočjo rastrske podmreže DMR1 (V-H na celici; O-H, A-H, nG-H na stranicah). Umeritev koeficienta hrapavosti na tri kontrolne prereze.
- **Programska orodja:**
HEC-RAS v5.0.3, MapInfo v12.5 (Engage3D Pro v2013), QGIS v2.16

- **Ugotovitve:**

Validacija modela je pokazala, da je model veljaven za določitev dosega poplav v razponu povratne dobe od 50 do 500 let, ki jih lahko uvrščamo v razred zelo redkih poplav (Q50+). Verifikacija izračunanih dosegov na območjih veljavnosti rezultatov (OVR) hidrološko-hidravličnih študij kaže na horizontalno natančnost 15 m in višinsko natančnost 0,5 m, kar pomeni, da so dosegi določeni v okviru predvidene napake za ciljno raven merila. Občutljivost modela kaže, da se pri povečanju povprečnega koeficienta hrapavosti za 0,05, izračunani pretoki Q100 povečajo za 10-15%, pri povečanju koeficienta za 100% pa se površina poplavnih območij poveča za 5-10%. Značilnosti poplavnih območij zelo redkih poplav (fluvialne-rečne poplave in pluvialne-dežne poplave):

 - Površina poplavnih območij: 2,38 km²
 - Površina poplavnih območij izven OVR: 1,24 km²
 - Polovica poplavnih območij se nahaja na območjih, ki še niso bila določena kot poplavna. Pluvialne (dežne) poplave predstavljajo 6% poplavnih območij.
- **Obdelava:**

Prvi rezultat modela je smiselno povezan v celoto z uporabo podatkovnega sloja hidrografije (GIS, 2016) s ciljem povezave poplavnih območij vzdolž vodotokov z uporabo 2,5 m pasu za ločitev med območji fluvialnih (rečnih) poplav in pluvialnih (dežnih) poplav, ter naknadne odstranitve izredno majhnih poplavnih območij. Tako dobljena podatkovna sloja sta bila "ročno" modificirana na podlagi kartografskega pregleda terena (DOF5, DMR1, TTN5, DTK5).
- **Omejitve:**

Uporaba podatkovnega sloja je primerna za kartografske prikaze v merilu 1:50.000 do največ 1:25.000. Ocena zanesljivosti vira za vnos v opozorilno karto poplav je za sloj fluvialne (rečne) poplave 6-7 in pluvialne (dežne) poplave 5 (na lestvici od 1 do 10) in bo dokončno določena ob objavi v OPKp. V splošnem je treba upoštevati možni razpon izračunanih dosegov od Q50 do Q500 in možne precenjene dosege ob glavnih odvodnikih zaradi podcenjenih velikosti profilov strug ali neupoštevanja prepustov.
- **Uporaba:**
 - IZBOLJŠANJE POPLAVNIH EVIDENC: obstoječe evidence poplavnih območij so pomanjkljive, saj je v Sloveniji geografsko opredeljena le polovica poplavnih območij
 - CELOVITO PROTIPOPLAVNO NAČRTOVANJE: načrtovanje zmanjševanja poplavne ogroženosti na podlagi nepopolnih in nehomogenih podatkov o poplavnem nevarnostnem potencialu ni dovolj zanesljivo
 - TRAJNOSTNO UREJANJE VODA: na ravni države še niso določena poplavna območja in zlasti naravna poplavna območja s ciljem izključnega administrativnega varovanja po zgledu na varovana območja drugih sektorjev (npr. območja Natura2000)
 - OPTIMIZACIJA ODLOČANJA O VODNIH SOGLASJIH: ni osnove za enakovredno odločanje o poplavni ogroženosti med variantami v fazi študije variant



NAMEN IN IZHODIŠČA

Strokovne podlage s področja določitve poplavnih območij se izdelujejo zaradi:

- I. IZBOLJŠANJA POPLAVNIH EVIDENC: obstoječe evidence poplavnih območij so pomanjkljive, saj je v Sloveniji geografsko opredeljena le polovica poplavnih območij

Utemeljitev: Podatki integralnih kart poplavne nevarnosti obsegajo tretjino znanih poplavnih območij v Sloveniji (skupaj 500 km² v merilu 1:5.000), preostali dve tretjini pokrivajo podatki opozorilne karte (skupaj 1250 km² v merilu 1:50.000). Razmeroma veliko poplavnih območij, predvsem območij poplavnega in erozijskega delovanja hudournikov, ni vsebovanih v nobenem izmed omenjenih podatkovnih slojev (okoli 850 km²), predvsem pa niso sistematično in homogeno določena na zadovoljivi ravni natančnosti. V povirjih poplavna območja običajno obsegajo 6-10% površine prispevnega območja, od tega je ponavadi znana največ tretjina skupne površine dosegov zelo redkih poplav, na prispevnem območju pa je neobdelanih več kot 85% skupne površine oz. dolžine vodotokov.

Pravna in programska podlaga: Strokovne podlage se izdelujejo na podlagi 7(2). člena Pravilnika o metodologiji za določanje območij, ogroženih zaradi poplav in z njimi povezane erozije celinskih voda in morja, ter o načinu razvrščanja zemljišč v razrede ogroženosti (Uradni list RS, št. 60/07), ki predvideva dopolnjevanje opozorilne karte poplav z novimi podatki o poplavnih in erozijskih razmerah in njeno obnovo na najmanj šest let. Opozorilna karta poplav je bila prvič javno objavljena leta 2007, zadnjič vsebinsko dopolnjena pa leta 2014. Načrt zmanjševanja poplavne ogroženosti za obdobje do leta 2021 predvideva izvajanje ukrepa U1 Določitev in upoštevanje poplavnih območij ter izvajanje ukrepa U5 Vzpostavitev in vodenje evidenc s področja poplavne ogroženosti.

- II. CELOVITEGA PROTIPOPLAVNEGA NAČRTOVANJA: načrtovanje zmanjševanja poplavne ogroženosti na podlagi nepopolnih in nehomogenih podatkov o poplavnem nevarnostnem potencialu ni dovolj zanesljivo

Utemeljitev: Za določitev in razvrstitev poplavno ogroženih območij in določitev območij pomembnega vpliva poplav v drugem ciklusu izvajanja poplavne direktive 2016-2018 je treba opredeliti bolj ali manj enovit (časovno in prostorsko homogen) poplavni nevarnostni potencial na ravni države, ki bo omogočil izboljšanje ocene ogroženosti na ravni posameznih lokacij, porečij, naselij, občin, regij in države.

Pravna in programska podlaga: Uredba o vsebini in načinu priprave podrobnejšega načrta zmanjševanja ogroženosti pred poplavami (Uradni list RS, št. 7/10) v 20. členu predvideva, da se predhodna ocena poplavne ogroženosti pregleda in po potrebi posodobi do 22. decembra 2018, nato pa vsakih šest let. Na podlagi predhodne ocene poplavne ogroženosti in kartiranja območij pomembnega vpliva poplav bo izdelan načrt zmanjševanja poplavne ogroženosti za obdobje 2022-2027.

- III. TRAJNOSTNEGA UREJANJA VODA: na ravni države še niso določena poplavna območja in zlasti naravna poplavna območja s ciljem izključnega administrativnega varovanja po zgledu na varovana območja drugih sektorjev (npr. območja Natura2000)

Utemeljitev: Poplavna območja delimo na poplavno ogrožena območja in naravna poplavna območja. Izbrana poplavno ogrožena območja imenujemo območja pomembnega vpliva poplav ali pomembnejša območja poplavne ogroženosti, izbrana naravna poplavna območja pa naravna poplavna območja oz. pomembnejša območja poplavne nevarnosti. Administrativna zaščita

slednjih pomeni preprečitev povečevanja škodnega potenciala na vplivnih območjih omilitvenih ukrepov urejanja voda in pomemben negradbeni ukrep za ohranitev in izboljšanje stanja ogroženosti dolvodno. Zato je treba oceniti obseg in kapaciteto obstoječih in nekdanjih naravnih poplavnih območij ter njihov učinek na zmanjševanje poplavne ogroženosti dolvodno.

Pravna in programska podlaga: S ciljem zagotovitve prostora poplavnim in erozijskim procesom 86(1). člen Zakona o vodah predvideva določitev poplavnih območij. Določitev naravnih poplavnih območij je predvidena v Uredbi o vsebini in načinu priprave podrobnejšega načrta zmanjševanja ogroženosti pred poplavami (Uradni list RS, št. 7/10), ki v 15(2). členu določa, da mora načrt zmanjšanja poplavne ogroženosti upoštevati tudi vidik območij, kjer bi se poplavne vode lahko zadržale. Poleg tega je tudi v 19(2). členu Pravilnika o metodologiji za določanje območij, ogroženih zaradi poplav in z njimi povezane erozije celinskih voda in morja, ter o načinu razvrščanja zemljišč v razrede ogroženosti (Uradni list RS, št. 60/07) predvidena določitev pomembnejših območij poplavne nevarnosti. Načrt zmanjševanja poplavne ogroženosti za obdobje do leta 2021 predvideva izvajanje ukrepa U2 Identifikacija, vzpostavitev in ohranitev razlivnih površin visokih voda.

IV. OPTIMIZACIJE ODLOČANJA O VODNIH SOGLASJIH: ni osnove za enakovredno odločanje o poplavni ogroženosti med variantami v fazi študije variant

Utemeljitev: Zaradi pomanjkljivih poplavnih evidenc in podatkov o poplavljanju ponekod ni mogoče utemeljiti zahteve po izdelavi hidrološko-hidravlične študije (HHŠ) za pridobitev vodnega soglasja ali izdelati študijo variant s predlogom najustreznejše variante v sklopu priprave državnih prostorskih načrtov.

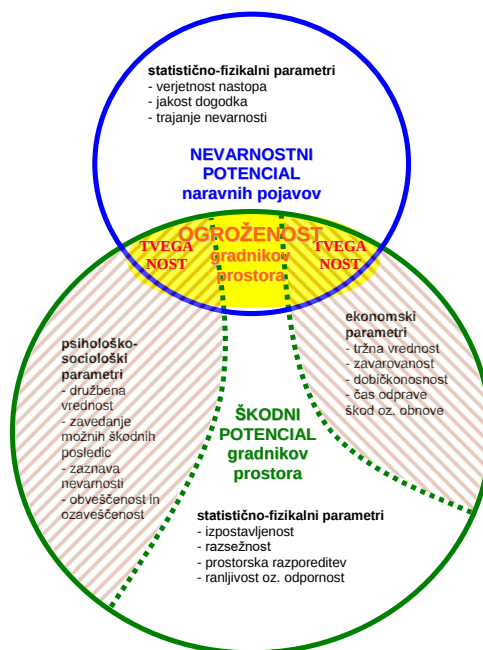
Pravna in programska podlaga: 10(1). člen Uredbe o pogojih in omejitvah za izvajanje dejavnosti in posegov v prostor na območjih, ogroženih zaradi poplav in z njimi povezane erozije celinskih voda in morja (Uradni list RS, št. 89/08) določa dopolnitev opozorilne karte na območju posega v prostor ali izvajanja dejavnosti, kjer poplavna območja niso prikazana, iz novih podatkov ali analiz območja pa izhaja, da obstaja možnost poplav. Načrt zmanjševanja poplavne ogroženosti za obdobje do leta 2021 predvideva izvajanje ukrepa U1 Določitev in upoštevanje poplavnih območij.

CILJI

Namen izdelave strokovnih podlag (enostavnih dvodimenzijskih modelov po metodi neposrednih padavin in kombiniranih dvodimenzijskih modelov) je zagotoviti več kot 90% pokritost državnega ozemlja s podatki o dosegih poplav majhne verjetnosti nastopa na ravni merila 1:50.000 in znatno izboljšati poznavanje lokacij potencialnih poplavnih območij, zlasti na vodotokih z manjšimi prispevnimi površinami, ter pojavljanja pluvialnih (dežnih) poplav. Rezultati posameznih hidravličnih modelov bodo uporabljeni kot novi podatkovni viri opozorilne karte poplav (razred zelo redkih poplav, tj. poplave s povratno dobo 50 let in več). Celovito določena poplavna območja predstavljajo izhodiščni sektorski podatek v procesu načrtovanja zmanjševanja poplavne ogroženosti in v procesu podajanja usmeritev v postopkih izdaje mnenj in vodnih soglasij. Strokovna podlaga bo ena od osnov za podajo prvega mnenja v fazi študije variant. S tem bo omogočeno enakovredno vrednotenje variant z vidika poplavne ogroženosti v postopkih priprave DPN, zlasti za linijske infrastrukturne objekte.

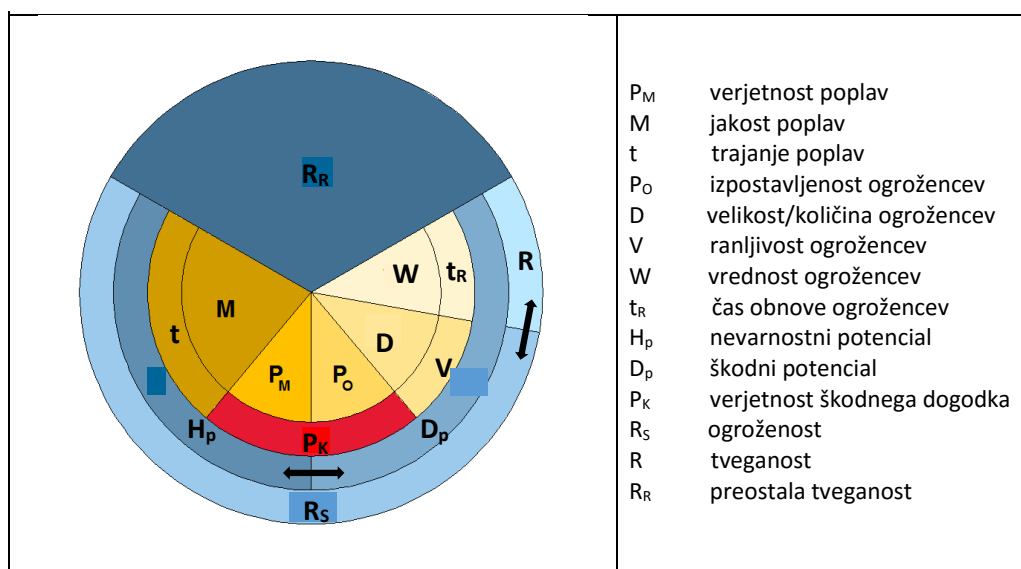
ZASNOVA ANALIZE POPLAVNIH TVEGANJ

Poplave povzročajo škodo, ki je lahko razmeroma velika in vključuje poškodbe bivalnih objektov, gospodarske javne infrastrukture, trgovskih, obrtnih in industrijskih območij, pridelka na kmetijskih zemljiščih idr., pogosto so prekinjeni številni družbeni in gospodarski procesi. Naravno okolje lahko ob poplavah ogrozijo škodljive snovi, ki se sprostijo ob poškodbi ali uničenju naprav in obratov, kjer se predelujejo ali hranijo. Naravne pojave, opisane z obsegom, jakostjo, pogostostjo in trajanjem na določenem območju zaznavamo kot naravne nevarnosti, medtem ko družbeno, gospodarsko in okoljsko ogroženost, kakor tudi škodljive posledice naravnih dogodkov opredeljujejo zlasti prisotnost, razporeditev in značilnosti škodnega potenciala. Prostorsko in časovno sovpadanje nevarnostnega in škodnega potenciala (slika 1) povzroča objektivno ogroženost gradnikov prostora in subjektivno tveganost ohranitve družbene stabilnosti. Poplavna območja delimo na poplavno ogrožena območja, kjer prevladuje škodni potencial in na naravna poplavna območja, kjer prevladuje nevarnostni potencial.



Slika 1: Koncept analize tveganj (IzVRS, 2012)

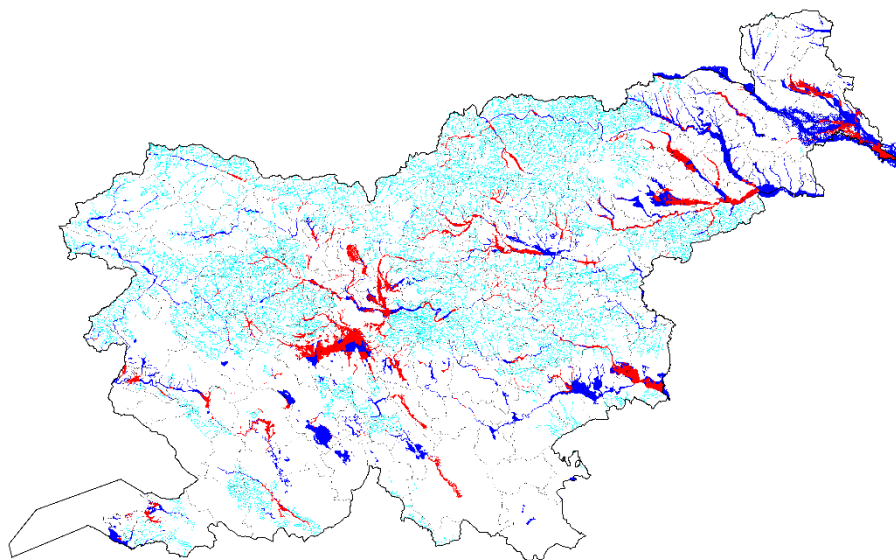
Nearnostni potencial naravnih dogodkov je skupek vseh verjetnih nearnostnih scenarijev na izbranem območju, škodni potencial pa skupek možnih škodnih izidov ob nastopu določene nearnosti, ki ga opredeljuje izpostavljenost, velikost, razporeditev, ranljivost-odpornost in subjektivna vrednost fizičnih gradnikov prostora. Nearnost je naravni pojav, ki lahko na izbranem območju povzroči škodo, ogroženost je okoljsko stanje, ki se pojavi zaradi časovno-prostorskega sovpadanja nearnostnega in škodnega potenciala, tveganost pa izraža družbenogospodarsko dimenzijo ogroženosti. Nearnostni in škodni potencial sta sestavljena iz različnih skupin parametrov, tj. verjetnostne, fizikalne, socialno-ekonomske in časovne skupine (slika 2).



Slika 2: Parametri analize tveganj (DRSV, 2016a)

Nevarnostni potencial prostorsko prikazujemo s pomočjo ti. poplavnih kart, ki so opredeljene s Pravilnikom o metodologiji za določanje območij, ogroženih zaradi poplav in z njimi povezane erozije celinskih voda in morja, ter o načinu razvrščanja zemljišč v razrede ogroženosti (Uradni list RS, št. 60/07). Opozorilno karto poplav je karta natančnosti merila 1:50.000 ali manj, ki z različnimi grafičnimi znaki opozarja na poplavne in erozijske razmere na določenem območju na podlagi prve ocene poplavne nevarnosti, tj. na podlagi analize historičnih in arhivskih podatkov o poplavnih in erozijskih dogodkih in na podlagi že izdelanih študij, raziskav, analiz in drugih podatkov. Vsebinska karte: doseg znanih poplav in erozijskih pojavov in smer poplavljanja, poplavni dogodki, vodni objekti; besedilni del z opisom poplavnih in erozijskih dogodkov in njihovih posledic; **ocene bodočih poplav in njihovih posledic**. Uporaba karte: pomembno izhodišče za določitev območij poplavne in erozijske nevarnosti (člen 9(1)), določitev območij pomembnega vpliva poplav (19(2)). Poseganje v prostor na znanih območjih poplavljanja s strani lokalne skupnosti je regulirano z 22. členom, katerega izhodišče predstavljajo podatki opozorilne karte poplav, medtem ko 23(1). člen določa, da je v postopku izdaje vodnega soglasja na območju iz opozorilne karte, treba izdelati karte nevarnosti. (Vendar OPKp vsebuje tudi izjavo o omejitvi, in sicer »kjer poplavno območje ni prikazano, ne pomeni, da tam poplave ni«, kar v praksi pomeni, da bi se na vseh območjih moralo oceniti, ali je ob predvidenih posegih potrebno izdelati karte nevarnosti, torej tudi tam, kjer v OPKp ni prikazanih poplavnih območij.)

Analiza poplavne nevarnosti je odvisna od kakovosti informacij o nevarnostnem potencialu oz. o območjih poplavljanja, ki pa so razmeroma heterogenega značaja. Na sliki 3 so s svetlo modro barvo zarisana potencialna območja hudourniških poplav, z modro barvo območja poplavljanja opozorilne karte in z rdečo poplavna območja integralnih kart.

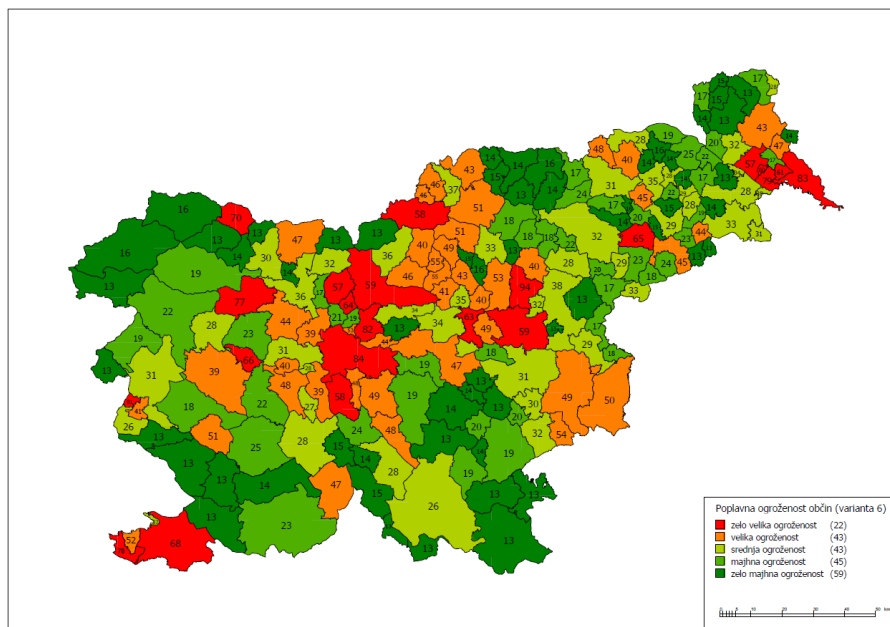


Slika 3: Poplavna območja v Sloveniji (DRSV, 2016b)

Podatki integralnih kart pokrivajo le tretjino znanih poplavnih območij v Sloveniji, izdelani so za raven merila 1:5.000 ali bolj natančno in razvrščajo poplavna območja v štiri razrede poplavne nevarnosti, razred majhne, srednje, velike in preostale nevarnosti (skupaj 500 km²). Približno četrтина površine teh območij se nahaja v razredu majhne nevarnosti, tretjina v razredu srednje nevarnosti, petina v razredu velike nevarnosti in petina v razredu preostale nevarnosti. Preostali dve tretjini znanih poplavnih območij v Sloveniji sta pokriti s podatki opozorilne karte, ki je izdelana za uporabo v merilu 1:50.000 ali manj natančno in razvršča poplavna območja v tri razrede, razred pogostih, redkih in zelo redkih poplav (skupaj 1250 km²). Približno desetina površine teh območij se nahaja v razredu pogostih poplav (2 do 5-letna povratna doba), skoraj polovica površine se uvršča tudi v razred redkih poplav (10 do 20-letna povratna doba), skoraj vsa poplavna območja pa se uvrščajo tudi v razred zelo redkih poplav (50 in več-letna povratna doba). Velik del poplavnih območij in predvsem območij poplavnega in erozijskega delovanja hudournikov ni vsebovanih v nobenem izmed omenjenih podatkovnih slojev, so pa slednja približno ocenjena v velikosti 850 km². Skupna površina poplavnih območij v Sloveniji znaša več kot 6% površine državnega ozemlja (1250 km²), upoštevaje hudourniška (erozijska) območja pa tudi do 10% površine (2000 km²). Prispevne površine hudourniških območij obsegajo polovico državnega ozemlja se nahajajo na ozemlju več kot dveh tretjin občin. Na hudourniških območjih prebiva približno 45 000 prebivalcev in se nahaja 32 000 stavb (za primerjavo, širše vplivno območje največjega OPVP v Sloveniji, tj. OPVP Ljubljana-jug, obsega 57 km² poplavnih območij petstoletne povratne dobe, na katerih se nahaja 8 000 stavb in prebiva 29 000 prebivalcev).

Območja poplavnega in erozijskega delovanja hudournikov še niso sistematično in homogeno določena na zadovoljivi ravni natančnosti (ravni merila 1:50.000 in več). Če primerjamo nekatera območja zelo majhne in majhne poplavne ogroženosti občin (slika 4) in območja brez relevantnih

podatkov o poplavljanju (slika 3), ugotovimo, da je zaradi pomanjkljivih in nehomogenih podatkov o dosegh poplav ocenjena ogroženost nekaterih občin najverjetneje podcenjena.



Slika 4: Stopnje in razredi poplavne ogroženosti občin (DRSV, 2016a).

V analizi porečja Poljanske Sore do Kopačnice (DRSV, 2016b), katerega površina znaša 137,7 km², je bilo ugotovljeno, da je po podatkih integralnih kart v merilu 1:5000 znanih 2,97 km² poplavnih območij Q500, izračunana skupna površina na novo določenih poplavnih območij pa znaša 9,23 km² (6,7% površine porečja), od tega 7,64 km² zaradi poplavljanja vodotokov, 1,59 km² pa zaradi pluvialnih (dežnih) poplav. Iz navedenega lahko sklepamo, da v povirnih delih porečij praviloma ni opredeljeno vsaj 2/3 skupne površine območij zelo redkih poplav. Velikost območij veljavnosti rezultatov hidrološko-hidravličnih študij znaša 8,55 km², torej je bilo dodatno hidravlično obdelanih 94% površine porečja. Po podatkih hidrografije v merilu 1:5000 se na območju veljavnosti rezultatov hidrološko-hidravličnih študij nahaja 54 km vodotokov, izven območja pa 340,6 km vodotokov, torej je dodatno analiziranih 86% skupne dolžine vodotokov na porečju. Površina poplavnih območij ob vodotokih znaša 7,64 km², od tega jih je izven 5-metrskega pasu osi vodotoka 5,80 km², izven 25-metrskega pasu pa 3,32 km² (od tega je na novo določenih 1,21 km²), torej se vsaj polovica površine poplavnih območij nahaja na priobalnih zemljiščih. 16% površine poplavnih območij se nahaja izven 25-metrskega pasu osi vodotoka in izven območij veljavnosti rezultatov že izdelanih hidrološko-hidravličnih študij.



DVODIMENZIJSKI HIDRODINAMIČNI MODEL

Zasnova modela

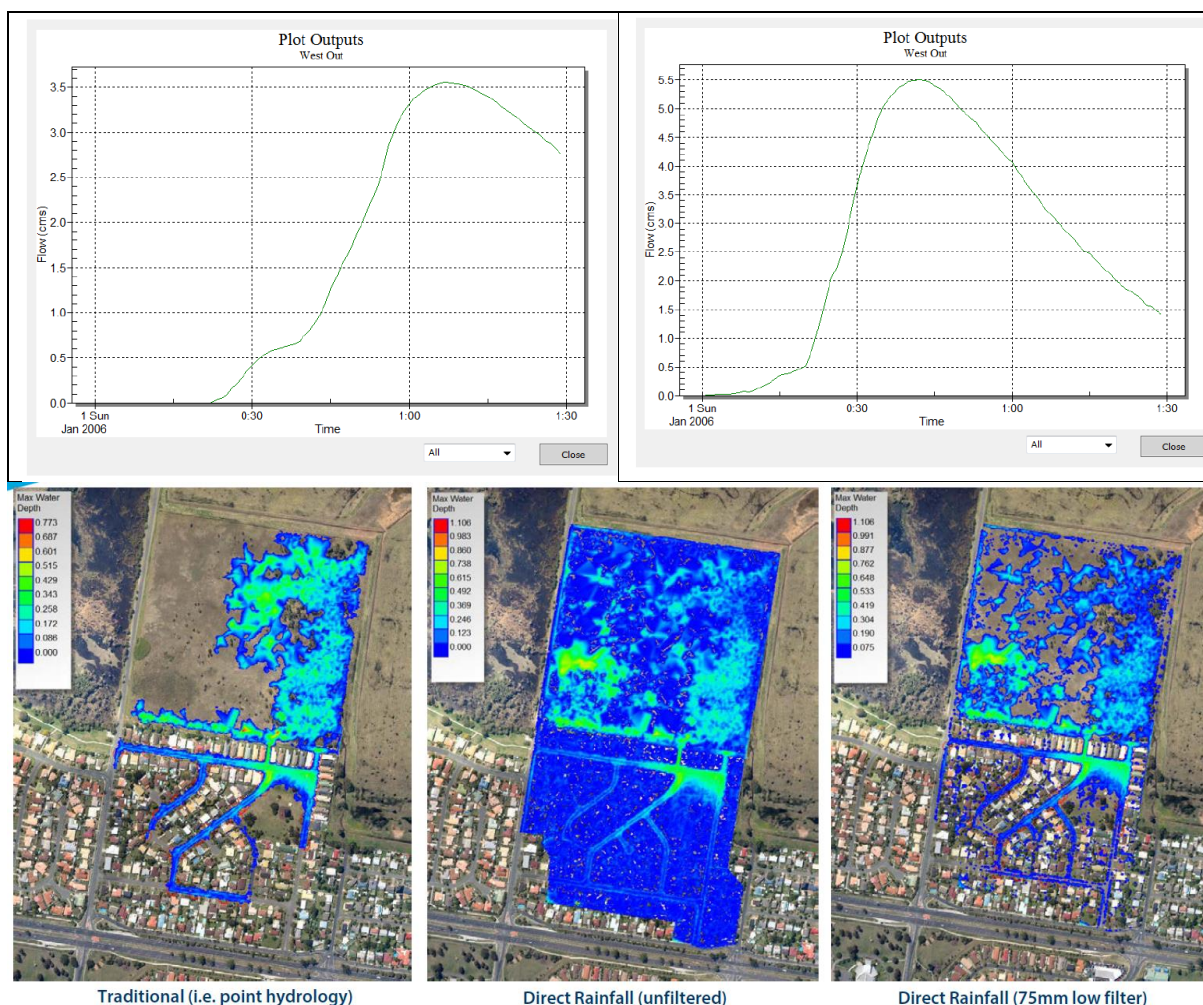
Metoda neposrednih padavin (ang. direct rainfall method) za modeliranje poplav vključuje aplikacijo padavin na vse mrežne celice 2D modela, torej je odtekanje s površin določeno v okviru hidravličnega modela (Hall, 2015). Prednost pristopa je celovito upoštevanje nastanka tokov, dobra natančnost poteka tokov, predvsem pa nadomestitev hidrološkega modela v okviru 2D območja. Težave nastopijo pri uporabi metode, ki lahko pripelje do večjih napak v modelu – gre predvsem za težave v povezavi s hrapavostjo, računskim korakom, velikostjo računske mreže in zelo plitvimi tokovi (preglednica 1). Zato je za namen natančne uporabe, npr. izdelavo kart nevarnosti, pomembno umerjanje modela, validacija in analiza občutljivosti, preveritev masne bilance (volumnov) in seveda primerjava z rezultati analize po običajnih metodah.

Preglednica 1: Prednosti in slabosti 2D hidravličnega modeliranja po metodi neposrednih padavin

Prednosti	Slabosti
Združena sta hidrološki in hidravlični model, kar skrajša čas obdelave	Poredko sta aplicirana umerjanje parametrov in verifikacija rezultatov glede na merjene podatke, kar omejuje uporabnost rezultatov
Ni potrebna vnaprejšnja razmejitev na podporečja in določitev lokacij iztokov	Potreben je kakovosten digitalni model reliefa, znatno povečanje računskih časov; pot toka je odvisna od kakovosti digitalnega modela reliefa
Tokovi lahko nastajajo povsod po porečju	Nezadostna ločljivost manjših tokov lahko vpliva na čas konic
Površinski tok je neposredno vključen (čas koncentracije se izračunava neposredno)	Zaradi plitvega toka na strmih pobočjih se pojavljajo neobičajne vrednosti koeficientov hrapavosti in velika Froudeova števila (normalna globina je veliko manjša od energijske višine zaradi hitrosti; 6 cm normalne globine površinskega toka, 50 cm energijske višine pri 3 m/s). Zaradi kompleksnosti plitvega toka je natančnost rezultatov zelo odvisna od natančnosti vhodnih podatkov in umerjenosti uporabljenih parametrov. Za večino območij (v Sloveniji) lahko rečemo da takih podatkov (še) ni na voljo.

Hidrološki modeli običajno ne vključujejo površinskega odtoka kot dela časa koncentracije tako natančno, po drugi strani pa 2D hidrodinamični modeli pogosto ne uporabljajo padavin kot vhodni podatek. Na sliki 5 je vidna razlika v času konic (konica nastopi pol ure prej, torej za 1/4 skupnega časa trajanja vala).

Združeni (ang. lumped) hidrološki model	Hidrološko-hidravlični model po metodi neposrednih padavin
---	--



Slika 5: Primerjava hidrogramov, dosegov in globin, določenih po običajni metodi in po metodi neposrednih padavin (Fields&Syme)

Prednosti HEC-RAS v5.0 v primerjavi z drugimi hidravličnimi programskimi orodji:

- koncept terenske pod mreže, nestrukturiranost mreže in orodja za prilagajanje mreže za 2d izračun
- robustna uporaba DMR z izračunom hidravličnih parametrov za vsako stranico računskih celic nestrukturirane mreže ter določitev zveze gladina-prostornina na posamezni celici
- računski celici je lahko delno mokra, kar izboljša ločljivost in natančnost rezultatov
- uporabijo se lahko večje računske celice (npr. 10-20m) v primerjavi z modeli, ki uporabljajo pristop z vozlišči (2-4m), kar izboljša skrajša računske čase modelov – na strmih pobočjih je kljub temu potrebno ohraniti manjše računske celice, sicer se v hudourniških graph pojavijo suha območja.

Omejitve:

- omejitve pogovornega okna za izdelavo računske mreže

- ni omogočen vnos različnih minimalnih gladin kot začetni pogoj, tj. začetno omočenje posamezne celice, kar bi kljub večjim računskim celicam izboljšalo povezavo med mokrimi območji v hudourniških grapah.
- za oceno dosegov Q10 bi bilo treba upoštevati prečne profile strug vodotokov in hidravlično pomembne objekte
- erozijo, transport in odlaganje ni mogoče izračunavati na 2D območjih
- črpalnih postaj ni mogoče povezati z 2D območjem
- mostove ni mogoče umestiti v 2D, le prepuste, prelive in porušitve

Za namen naloge predpostavimo, da vnos histograma efektivnih padavin v obliki robnega pogoja ob uporabi natančnega modela reliefa, hrapavosti v odvisnosti od pokrovnosti tal, hidravličnih enačb za ohranitev mase in momenta, omogoča dovolj natančen izračun dosegov izrednih poplavnih dogodkov v razponu povratnih dob od 100 do 500 let, zlasti v primerih intenzivnega odtoka padavin s strmih pobočij, majhne infiltracije in hitre akumulacije padavin v strugah hudournikov ter izlivanja voda iz struge glavnega odvodnika, kakor tudi toka po obsežnih ravninskih območjih. Predpostavimo tudi, da so rezultati v primeru večjih povratnih dob in manjših porečij (10-20 km²) primerljivi z rezultati klasičnih 1D-2D hidrološko-hidravličnih modelov, ki upoštevajo natančne profile strug in vpliv hidravlično pomembnih objektov, zato se na izbranih prerezih reliefa preverijo izračunani hidrogrami in na izbranih območjih tudi doseg in razredi globin. Rezultati se lahko uporabijo za oceno dosega zelo redkih poplav (Q50+) za raven merila 1:50 000. Glavna prednost modela je hkratna določitev dosegov ob vseh strugah, ki jih tvori padavinski odtok, na celotni površini porečja, pri čemer je treba predpostavko o homogenosti padavin omejiti na prispevno območje s površino največ 50 km².

Hidrodinamika 2D nestalnega toka

Programsko orodje HEC-RAS v5.0 uporablja 2D Saint-Venantovo enačbo (ang. shallow water equation). Ob predpostavki nestisljivosti tekočine (gostota je konstantna) in newtonske tekočine (viskoznost je konstantna), odsotnosti sil vetra in nehidrostatičnega pritiska, se iz 3D enačb Navier-Stokes z integracijo po globini in ob predpostavki majhnih vertikalnih hitrosti ter majhne valovne višine v primerjavi z globino, izpelje 2D enačbe Saint-Venant.

3D enačbe Navier-Stokes:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad \text{kontinuitetna enačba}$$

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \vec{v} \right) = \nabla \cdot \vec{\sigma} + \vec{f} \quad \text{momentna enačba}$$

ρ gostota tekočine

$\vec{v}$ vektor hitrosti toka

$\vec{\sigma}$ tenzor napetosti (normalnih in strižnih)

$\vec{f}$ sile

∇ nabra, divergenca vektorskega polja

2D enačbe Saint-Venant:

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \vec{v} &= 0 && \text{kontinuitetna enačba} \\ \rho \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \vec{v} \right) &= -\nabla p + \rho \vec{g} + \mu \nabla^2 \vec{v} && \text{momentna enačba}\end{aligned}$$

Členi momentne enačbe so: lokalni pospešek, konvekcijski pospešek, gradient tlačnih sil, masne sile, viskoznost.

Kontinuitetna enačba določa ohranitev mase, $dm/ds = \text{konst.}$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial((H+h)u)}{\partial x} + \frac{\partial((H+h)v)}{\partial y} = 0$$

Momentna enačba določa ohranitev gibalne količine, $dG/dt = \text{konst.}$

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - fv &= -g \frac{\partial h}{\partial x} - bu + v \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + fu &= -g \frac{\partial h}{\partial y} - bv + v \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right)\end{aligned}$$

v kinematična viskoznost

b koeficient trenja dna

f Coriolisov koeficient

H srednja gladina

h odklon od srednje gladine, ponavadi veliko manjši od H

Koeficient trenja dna lahko opišemo z empirično Manningovo enačbo:

$$b = \frac{n^2 g V}{R^{4/3}}$$

in dobimo enačbo »full momentum«, ki jo uporablja program HEC-RAS.

Če ohranimo štiri člene momentne enačbe, tj. spremembo hitrosti v času (hitrost spremenljiva le v smeri x), inercijo, hidrostatični pritisk (tok se postopoma spreminja vzdolž kanala, globina spremenljiva le v smeri x , naklon dna je majhen in konstanten) in trenje dna (zanemarimo zunanje sile-veter, valovi, viskoznost, atmosferski pritisk in Coriolisov parameter), dobimo 1D enačbe Saint-Venant:

$$\begin{aligned}\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial(Au)}{\partial x} &= 0 && \text{kontinuitetna enačba} \\ \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} + g(S_0 - S_f) &= 0 && \text{momentna enačba}\end{aligned}$$

Za reševanje zgornje enačbe po principu difuznega vala predpostavimo, da je vsota prvih dveh členov enaka 0, torej ostaneta gravitacijski člen in člen trenja dna. S_f se opiše z

Manningovo enačbo, čeprav ta velja za stalni enakomerni tok (stalni: $dv/dt=0$ in $dp/dt=0$ za celoten A, enakomerni: $dA/dx=0$ in $dv/dx=0$). Manningova enačba je empirična poenostavitev momentne enačbe, vnešene v kontinuitetno enačbo:

$$V = \frac{1}{n} * R^{2/3} * \sqrt{S_f}$$

HEC-RAS uporablja enačbo »diffusion wave« kot alternativo enačbi »full momentum«. V splošnem obstajata tudi poenostavitvi po principu »dinamičnega vala« in »kinematičnega vala« (pri slednji zanemarimo vse člene razen padca dna struge in naklona energijske črte, pri dinamičnem valu pa rešujemo vse člene 1D enačbe) S_f pa lahko opišemo tudi z enačbama Darcy-Weisbach in de Chézy.

Glede na navedene poenostavitve in predpostavke bi bilo smiselno uporabiti enačbo »full momentum«, vendar je izračun daljši in z veliko računskimi napakami, ki jih je treba naknadno preverjati. Napake se načeloma ne pojavljajo pri ustrezni velikosti celice in računskem času, izključno 2D modelnem območju, majhnih hitrostih!, počasi spremenljivih pretokih, velikih vrednostih hrapavosti, velikih globinah, površinskem toku po pobočjih. Zaradi ohranitve robustnosti modela in skrajšanja časa računanja uporabimo enačbo »diffusion wave«.

Računska metoda

Napredek tehnik daljinskega zaznavanja omogoča pridobitev topografskih podatkov visoke ločljivosti. Pogosto pa so podatki pregosti za neposredno uporabo v numeričnem modelu (USACE, 2016, str. 2-53), zato (in tudi z namenom izboljšave računskih časov) se uporablja pristop batimetrije pod mreže, ki omogoča uporabo razmeroma grobe računske mreže in natančnejše topografske informacije (Casulli, 2009). Tako računska mreža vsebuje dodatne informacije: hidravlični radij stranic, prostornina in prečni prerez stranic, ki se odražajo pri uporabi kontinuitetne enačbe (prostornina celice in pretočni prerez stranice v odvisnosti od gladine). Tak pristop je ustrezen, saj je prosta gladina bolj gladka kot batimetrija in lahko groba računska mreža učinkovito izračunava prostorsko spremenljivost proste gladine.

Računskim celicam se določi prerez, za vsako stranico se izračunava krivulje višina – površina, omočeni obod, hrapavost, zato so računi volumnov na podlagi terena pod računsko mrežo natančnejši. Stranice mrežnih celic predstavljajo prečne prereze, medtem ko druga programska orodja priredijo le eno višino posamezni računski celici in posamezna stranica predstavlja linijo na enaki višini (programska orodja, ki uporabljajo trikotno mrežo lahko izdelajo tri višine za tri vogale trikotnika in posamezna stranica je linija na dveh višinah). Tak pristop omogoča uporabo manjše računske mreže večjih celic ob ohranitvi detajla terena, kar bistveno skrajša računske čase. Testi so pokazali primerljivost rezultatov za 100m in 50m računsko mrežo pri petkrat večji hitrosti.

Oblika struge vodotoka, omočeni obod in prostornina pod gladino vode so močno odvisni od natančnosti podatkov reliefa, zato omenjene poenostavitve predstavljajo težavo, ki pa jo

uporabljen metoda uspešno reši z uporabo celotnega nabora podatkov DMR. Omočeni obod in oblika struge ter volumen so odvisni od resolucije in zato je težko obenem uporabiti enotno hrapavost, ki bi jo bilo treba prilagajati resoluciji, kar pa uporabljena metoda HECRAS ravno tako uspešno rešuje. HEC-RAS lahko uporablja časovni korak, ki da Courantovo število večje od 1.0, zato je mogoče uporabiti različne časovne korake ob ohranitvi kakovosti rezultatov.

»Full momentum« enačbo program rešuje po Euler-Lagrange metodi končnih razlik, ki je natančna znotraj omejenega razpona Courantovih števil (zlasti kjer se pretežno pojavljajo hitre spremembe hitrosti na kratkih razdaljah). Zato je treba pri takem načinu izračunavanja previdneje izbrati časovni korak, zlasti pri hitro spreminjajočih se hitrostih v prostoru (zagotoviti je treba vrednosti Courantovega števila okoli 1.0, vsaj v območju večjih hitrosti).

»Diffusion wave« enačba ne uporablja Euler-Lagrange metode, zato ni tako občutljiva na časovni korak. Zato je treba testirati različne velikosti celic in različne časovne korake s ciljem doseganja dobre numerične natančnosti ob minimizaciji računskega časa. Testiranja HEC-RAS v pogojih $\theta=0.6$, Eddy 0.2, $Cr=1$, $2 \times 2 \text{ cm}^2$, $nG=0.009$, $t=0.025 \text{ s}$, $H_0=0$ suho, so pokazala, da se pri uporabi enačbe »diffusion wave« pojavi hitrejše naraščanje in upadanje hidrograma ter višja konica (Molls et al., 2016).

NUMERIČNE METODE – prostorska in časovna diskretizacija

Metoda končnih razlik uporablja kombiniranje Taylorjevih vrst za določitev vrednosti v izbrani točki v odvisnosti od sosednjih točk in je običajna pri strukturirani mreži, ki je lahko predstavljena kot matrika, vendar se zaradi prednosti nestrukturirane mreže vedno redkeje uporablja.

Metoda končnih elementov deli prostor na 2D elemente, na katerih so neznanke aproksimirane z linearno kombinacijo poskusnih linearnih funkcij za posamezno stranico elementa. Strogo matematično utemeljena, konceptualno in časovno zahtevna metoda.

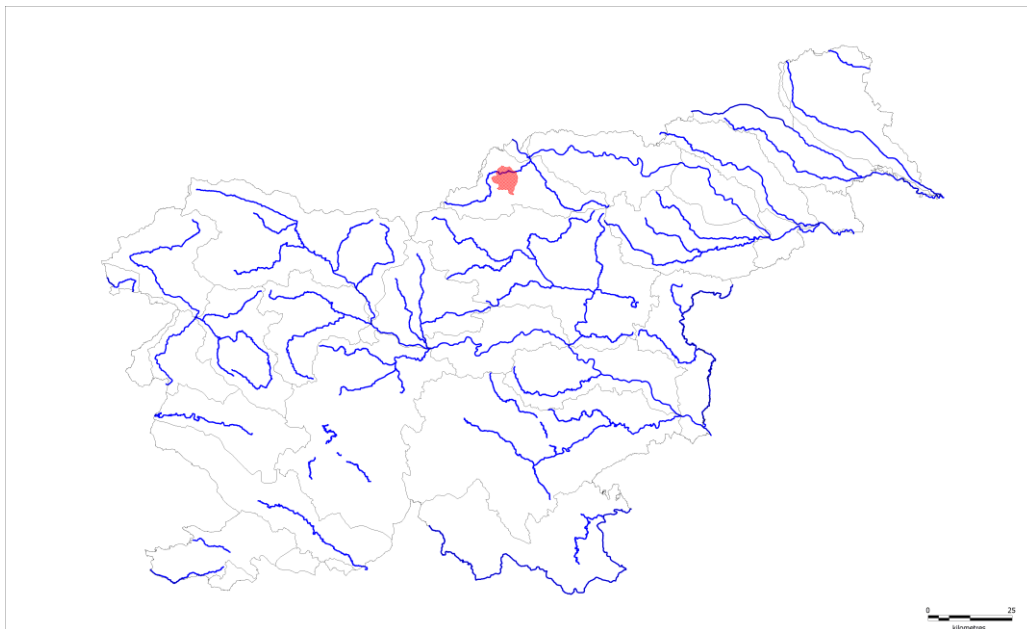
Metoda končnih volumnov je konceptualno preprostejša metoda, ki integrira SW enačbe v konzervativni obliki po kontrolnem volumnu in tako zagotavlja popolno ohranitev mase in momenta. Pri 1D je enaka metodi končnih razlik. Metoda je priljubljena zaradi konzervativnosti, geometrijske prilagodljivosti in konceptualne preprostosti. HEC-RAS jo uporablja za prostorsko diskretizacijo, časovno diskretizacijo pa izvaja po implicitni metodi.

Struktura modela obravnavanega porečja

Območje obravnave



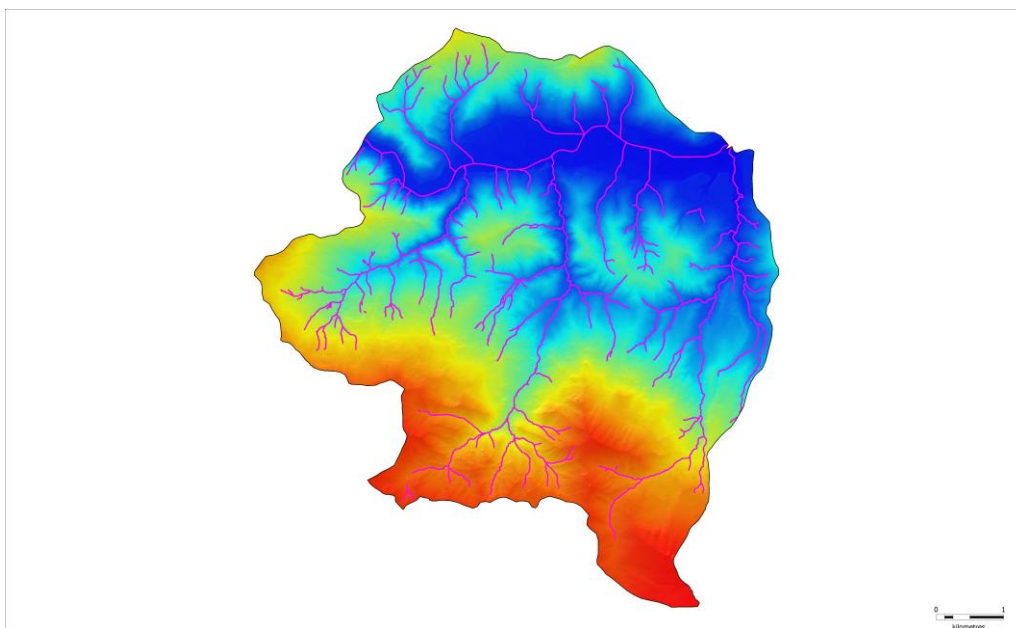
Območje obravnave se nahaja na porečju Meže in obsega 40 km² (slika 6). Skupna dolžina vodotokov znaša 100km, glavni vodotok pa je dolg 7 km.



Slika 6: Lokacija obravnavanega območja na porečju Meže.

Model reliefa

Digitalni model reliefa (slika 7) je bil izdelan s pomočjo javno dostopnih podatkov o položaju višinskih točk, dobljenih z LiDAR snemanjem celotnega državnega ozemlja (GIS, 2016), izvedenih v obdobju junij-oktober 2014, v formatu .asc, preoblikovanih v programu Engage3D (MapInfo v12.5) v rastrski format .ers (ER Mapper) in nato .flt, v katerem je bil nato uvožen v HEC-RAS in preveden v format GeoTiff.

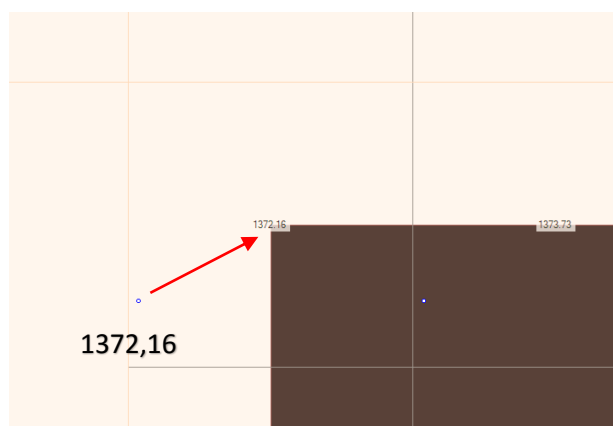


Slika 7: Digitalni model reliefa 1m*1m in hidrografija porečja.

Značilnosti DMR na porečju: površina rastrske celice 1m*1m, 40 mio celic, razpon vrednosti (376.69m; 1673.20m), povprečna vrednost 652.34m

Povprečni naklon površja: 36%

Preverjena je ustreznost koordinatnih sistemov različnih programskih orodij (MapInfo, QGIS, HEC-RAS). Slika kaže, da v HEC-RAS med gridom 1m*1m in listi 1km*1km ni zamika in da je vrednost točke v izhodiščnem LiDAR .asc formatu ustrezno pretvorjena v vrednost mrežne celice v .tif formatu, znotraj katere se nahaja točka (slika 8).



Slika 8: Primerjava LiDAR točkovnih podatkov o višinah in rastrskih podatkov modela reliefa.



Pri različnih pretvorbah podatkovnih vektorskih in rastrskih slojev v različnih programskih orodjih so bile uporabljeni naslednji projekcijski zapisi oz. datoteke:

HEC-RAS in ArcMap:

```
PROJCS["D48_Slovenia_TM",GEOGCS["GCS_D48",DATUM["D_D48",SPHEROID["Bessel_1841",6377397.155,299.1528128]],PRIMEM["Greenwich",0.0],UNIT["Degree",0.0174532925199433]],PROJECTION["Transverse_Mercator"],PARAMETER["False_Easting",500000.0],PARAMETER["False_Northing",-5000000.0],PARAMETER["Central_Meridian",15.0],PARAMETER["Scale_Factor",0.9999],PARAMETER["Latitude_Of_Origin",0.0],UNIT["Meter",1.0]]
```

MapInfo:

```
"GK Slovenija", 8, 9999, 10, 426.9466, 142.5844, 460.0891, -4.907790, -4.488389, 12.423059, 17.1131, 0, 7, 15, 0, 0.9999, 500000, -5000000
```

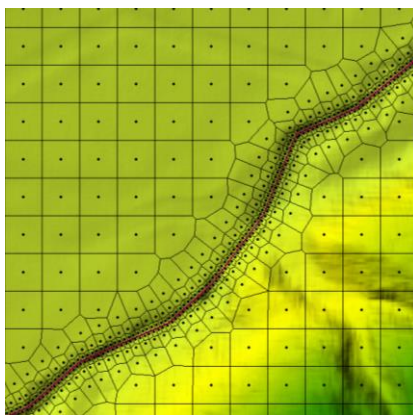
QGIS:

```
+proj=tmerc +lat_0=0 +lon_0=15 +k=0.9999 +x_0=500000 +y_0=-5000000 +ellps=bessel  
+towgs84=426.9466,142.5844,460.0891,4.90779,4.488389,-12.423059,17.1131 +units=m +no_defs
```

Geometrični podatki in podatki o toku

RAČUNSKA MREŽA (ang. Mesh): strukturirana, nestrukturirana (3 do 8 stranic), kombinirana

HEC-RAS lahko uporablja nestrukturirano mrežo celic (trikotnike, kvadrate, pravokotnike in like z največ osmimi stranicami), pri čemer je možno prilagajanje in ravnanje celic vzdolž roba struge, nasipov, cest in drugih tokovnih ovir (slika 9). S tem zagotovimo natančnost izračuna prevodnosti strug (kota prelivanja!). Vodni tok lahko prečka katerokoli stranico pod poljubnim kotom, pri čemer se rezultat ohranja.



Slika 9: Nestrukturirana mreža računskih celic, prilagojena vzdolž struge vodotoka.

Za obravnavano porečje je izdelana kombinirana (strukturirana in nestrukturirana) računska mreža velikosti celice na 2D območju 15m (ca. 190 000 celic), velikosti celic vzdolž objektov notranjih pogojev 10m in kontrolnih profilov 1m. Izbira velikosti osnovne računske celice pogojuje izbiro računskega koraka, ki ob konzervativno izbranem Courantovem številu (1,0 za full momentum enačbo; 2,0 za diffusion wave enačbo) in predpostavljeni maksimalni hitrosti 6 m/s znaša $(15\text{m} * 1,0) / 6\text{m/s} = 2\text{s}$.

POVEZAVE Z DRUGIMI STRUKTURAMI (ang. Connections)

V splošnem se uporabljajo povezave:

- z 1D odsekom prek vzdolžnega objekta
- z 1D odsekom prek gorvodnega konca odseka
- z 1D odsekom prek dolvodnega konca odseka
- z zadrževalnikom prek prečnega objekta
- z drugim 2D območjem prek hidravličnega objekta (kontrolni prerezi s pomočjo preliva)

Pri izdelavi modela niso bile uporabljene povezave z drugimi strukturami.

PREČNIH PROFILI

Podatke o reliefu bi bilo mogoče izboljšati z interpolacijo podatkov o prečnih prerezih struge vodotoka in izdelavo kombiniranega modela reliefa DMR1.

NOTRANJI POGOJI (ang. Breaklines)

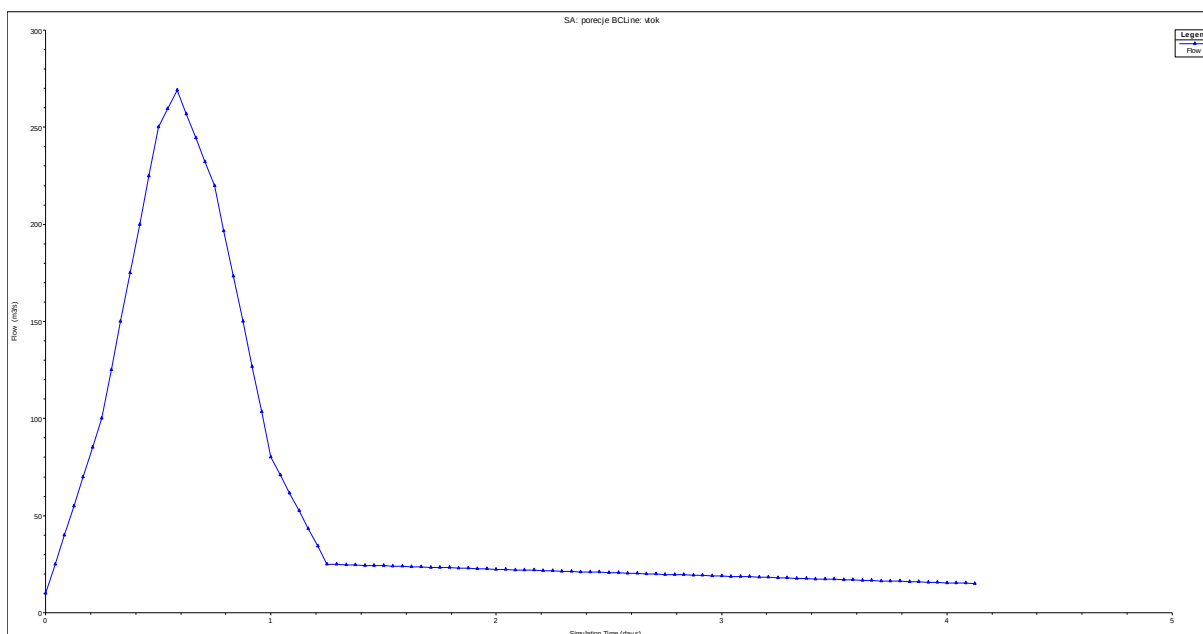
- zagotoviti, da so stranice celic usmerjene vzdolž osi objekta

Uporabljeni so podatki o hidrografiji (GIS, 2016), pri čemer je bil uporabljen podatkovni sloj vodnih zemljišč v smislu zmanjšanja in vzdolžne poravnave računskih celic. Če je potrebno, se linije predhodno generalizira in zmanjša število vozlišč. Podatkovni sloj »Linijski_PV« je bil uporabljen pozneje za povezavo poplavnih območij vzdolž vodotokov HIDRO5 s pomočjo 2,5 m bufferja (potrebno zaradi pomanjkanja podatkov o prepustih, mostovih).

ROBNI POGOJI (ang. Boundary Conditions)

- Hidrogram (pretok-čas) ali nivogram (gladina-čas) – zgornji robni pogoj

Za porečje Meže pod Šentanelsko reko je vnesen hidrogram Q100 z vrednostjo konice 269 m³/s 14 ur po začetku simulacije (slika 10; konica hidrograma - podatki IzVRS, 2005, oblika hidrograma – podatki VGBM, 2012). Izbran je naklon energijske črte 0.007 za distribucijo toka vzdolž linije robnega pogoja.



Slika 10: Hidrogram Q100 (Meža pod Šentaneljsko reko).

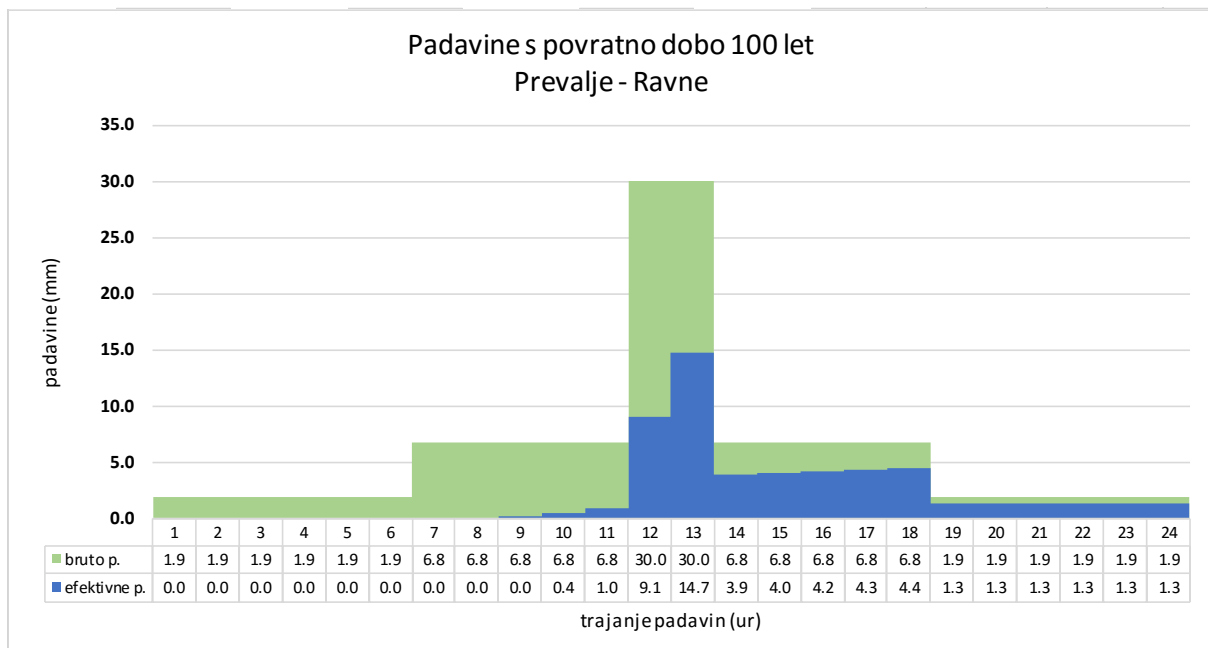
- Normalna globina (padec energijske črte) – spodnji robni pogoj

Predpostavimo enakomerni tok ($dA/dx=0$, $dv/dx=0$) na iztoku iz modelnega območja, kar pomeni vzporedni potek energijske črte in vodne gladine in nato izračuna globine po Manningovi enačbi. Vrednost normalne globine ocenimo na podlagi povprečnega padca dna struge vodotoka v dolžini vsaj 500 m dolvodno od iztočnega prereza ($5m/600m=0.8\%$), saj se na tej razdalji gorvodno še kaže velik vpliv izbire normalne globine. Nekatera literatura navaja, da je vpliv običajno opazen tudi do 1500 m gorvodno pri razponu padcev od 0,1% do 1,5%.

- Histogram efektivnih padavin (padavine-čas) – zgornji robni pogoj

Za namen določitve efektivnih padavin je bila uporabljena razporeditev 12 in 24 urnih padavin s povratno dobo 100 let ki jo je izdelal ARSO za obdobje 1961-2000 za celotno površino Slovenije. Na podlagi te prostorske razporeditve je bila dobljena povprečna bruto padavina za obravnavano območje. Izbrana je vrednost ki je upoštevala tudi obstoječe analize padavinskih postaj na in izven obravnavanega območja.

Za uporabo v modelu je bila izbrana 24 urna razporeditev padavin s tremi stopnjami intenzitete z največjo jakostjo na sredini. Potrebne vrednosti za tak histogram so 24, 12 in 2 urna vrednost padavin s povratno dobo 100 let. Izbira take oblike je bila prilagojena izbranemu modelu za hitro določitev poplavnih območij na hudourniških območjih. Efektivne padavine so bile opredeljene z uporabo krivulje CN na bruto padavinah. Krivulja CN opisuje infiltracijo, ki je bila opredeljena s pomočjo podatkov o dejanski rabi zemljišč. Za obravnavano območje je bil kot povprečni CN opredeljen z vrednostjo 63. Padavine uporabljene za razporeditev so 24 ur=150mm, 12 ur=127,5 mm in 2 uri=60 mm (slika 11).



Slika 11: Histogram P100 (celotno porečje).

ZAČETNI POGOJI (ang. Initial Conditions)

Ohranjena je globina 0m za vse računske celice. Naknadno je mogoča določitev »warm up« časa do nestalnega izračuna. Lahko pa se uporabijo končni rezultati prejšnjih simulacij kot začetni pogoji. Začetni pogoji razmeroma hitro ne bodo vplivali na napovedane vrednosti.

HRAPAVOST

V koeficientu hrapavosti Manningove enačbe je vsebovanih veliko dejavnikov, ki vplivajo na tokovne značilnosti, tj. globina toka, turbulenca, morfološke nepravilnosti dna, poraščenost tal, sedimenti, drobir, hidravlične ovire, oblika prereza, geomorfološki procesi, interakcija med vodotokom in poplavnim območjem, morfološka oblika vodotokov, nestalnost toka in medsebojna interakcija vsega navedenega. V primeru 2D toka zaradi aplikacije učinkovitih padavin na model reliefa je namesto enotnega koeficienta v razponu vrednosti od npr. 0.12 do 0.40, povprečno 0.246 (Wang, 1998) ali glede na povprečne merodajne vrednosti štirih kontrolnih prereзов površnega dela porečja Poljanščice v razponu od 0.09 do 0.35, utežno povprečje **0,26** (DRSV, 2016b), smiselno izbrati koeficient hrapavosti vsaj v odvisnosti od pokrovnosti tal. Opazimo lahko, da je dejanska vrednost koeficienta štirikrat večja od običajne povprečne vrednosti (npr. HEC-RAS 0,06), dobljene na podlagi umerjanj rezultatov klasičnih 1D-2D kombiniranih hidrodinamičnih modelov, kar potrjuje pomembnost ustrezne izbire koeficienta hrapavosti pri dvodimenzionalnem toku po celotnem površju.

Površinski tok se običajno pojavlja v površnih vodotokih in ima obliko tanke plasti vode na relativno gladki zemljini ali hribini, ki se koncentrija v plitve žlebiče, ki se pozneje stekajo v jarke. Mikoš (2002) navaja, da je površinski tok (ang. overland flow) tok vode po površini tal preden steče v določeno strugo. Maksimalna globina vode pri površinskem toku znaša 1,5 cm pri intenziteti 10cm/h, površinski tok se koncentrija po 15m do največ 30m (Merkel, 2001).

Engman (1986) v svoji razpravi o koeficientih hrapavosti za površinski tok navaja, da je za vodotoke, struge in kanale informacija za izbiro koeficienta običajno znana, pri majhnih globinah površinskih tokov po naravnih površinah pa je na voljo zelo malo informacij. Engman je koeficiente dobil na podlagi erozijske študije različnih kmetijskih in naravnih površin z aplikacijo različnih konstantnih padavinskih intenzitet. Koeficienti hrapavosti so tako »efektivni koeficienti«, ki vključujejo: učinek udarca kapelj, učinek kanalizacije toka, učinek ovir (drobir, grebeni njiv, skale, hrapavost zaradi oranja), trenje po površju, erozija in transport sedimentov). Vrednosti Manningovega koeficienta hrapavosti za 3 cm zelo plitev površinski tok so prikazane na sliki 12.

Table 3-1 Roughness coefficients (Manning's n) for sheet flow	
Surface description	n ^{1/}
Smooth surfaces (concrete, asphalt, gravel, or bare soil)	0.011
Fallow (no residue)	0.05
Cultivated soils:	
Residue cover ≤20%	0.06
Residue cover >20%	0.17
Grass:	
Short grass prairie	0.15
Dense grasses ^{2/}	0.24
Bermudagrass	0.41
Range (natural)	0.13
Woods: ^{3/}	
Light underbrush	0.40
Dense underbrush	0.80

¹ The n values are a composite of information compiled by Engman (1986).
² Includes species such as weeping lovegrass, bluegrass, buffalo grass, blue grama grass, and native grass mixtures.
³ When selecting n, consider cover to a height of about 0.1 ft. This is the only part of the plant cover that will obstruct sheet flow.

Slika 12: Vrednosti koeficienta hrapavosti za površinski tok (Engman, 1986).

England (2007) je korelacijsko povezal USGS National Land Cover Dataset z Engmanovimi (1986) vrednostmi koeficientov: vodotok 0,05; površinska voda 0,07; stanovanjsko/industrijsko 0,02; skala/pesek/glina/gramoz/prehodno 0,03; gozd 0,52; grmičevje 0,59; travnik/zeli 0,20; pašnik/seno 0,46; njive 0,21; urbano/trava na igriščih 0,33.

Za površinski tok se uporabljajo večje vrednosti koeficienta hrapavosti kot pri toku v odprtih vodotokih, zlasti zaradi manjših globin vode in večjega upora toku. Smith&Walker ugotavljata, da so Engmanove vrednosti koeficienta hrapavosti primerne za gosto poraščena in nepreoblikovana območja večjih padavinskih intenzitet (50-100 mm/h) (turbulentnega toka ter spremenljivih stopenj neporaščenosti površja), medtem ko so vrednosti Yen (2001) v razponu od 0,012 (asfaltna površina) do 0,120 (grmovje) primerne za manj poraščena območja manjših padavinskih intenzitet.

Priročnik za uporabo GSSHA (2006) dvodimenzijskega hidrološko-hidravličnega modela priporoča vrednosti koeficienta hrapavosti posamezne mrežne celice porečja za plitev površinski tok

prek različnih vrst površja: poselitev/industrija 0.0137; kmetijsko 0.05; pašnik 0.13; travnik 0.15-0.24; gozd 0.192. Priročnik navaja tudi, da gre za orientacijske vrednosti, ki jih je treba prilagoditi v procesu kalibracije in utemeljiti.

V priročniku za hidrološko-hidravlični program Flo2D (Flo2D, 2009) so navedeni razponi vrednosti koeficienta hrapavosti (slika 13) in pravila določitve hrapavosti posamezne celice: hrapavost pri plitvem toku (globina do 6 cm) v razponu od 0-0,4; hrapavost pri plitvem toku / 2 (globine med 6 cm in 15 cm); po enačbi v odvisnosti od koeficienta pri plitvem toku in globine (za globine med 15 cm in 1m); uporabniško določene hrapavosti za globine nad 1m. V domači literaturi najdemo ob praktični uporabi programa Flo2D naslednje uporabljene vrednosti: 0.2 za gozd, 0.03 za trajni travnik in 0.05 za urbano (Mole, 2016) na porečju Mačkovega grabna (2,33 km²) in na porečju Glinščice (19,3 km²) vrednosti gozd 0.1, njiva/travniki 0.06, urbano 0.03 in struga 0.04 oz. z upoštevanjem globinske spremenljivosti koeficienta 0,1 in 0,25 za plitvi tok (Pestotnik, 2012).

Table 1. Overland Flow Manning's n Roughness Values ¹	
Surface	n-value
Dense turf	0.17 - 0.80
Bermuda and dense grass, dense vegetation	0.17 - 0.48
Shrubs and forest litter, pasture	0.30 - 0.40
Average grass cover	0.20 - 0.40
Poor grass cover on rough surface	0.20 - 0.30
Short prairie grass	0.10 - 0.20
Sparse vegetation	0.05 - 0.13
Sparse rangeland with debris	
0% cover	0.09 - 0.34
20 % cover	0.05 - 0.25
Plowed or tilled fields	
Fallow - no residue	0.008 - 0.012
Conventional tillage	0.06 - 0.22
Chisel plow	0.06 - 0.16
Fall disking	0.30 - 0.50
No till - no residue	0.04 - 0.10
No till (20 - 40% residue cover)	0.07 - 0.17
No till (60 - 100% residue cover)	0.17 - 0.47
Open ground with debris	0.10 - 0.20
Shallow flow on asphalt or concrete (0.25" to 1.0")	0.10 - 0.15
Fallow fields	0.08 - 0.12
Open ground, no debris	0.04 - 0.10
Asphalt or concrete	0.02 - 0.05

¹Adapted from COE, HEC-1 Manual, 1990 and the COE, Technical Engineering and Design Guide, No. 19, 1997 with modifications.

Slika 13: Razponi vrednosti koeficienta hrapavosti za površinski tok (Flo2D, 2009).

Na podlagi testnih rezultatov umerjanja vrednosti koeficientov na povirnem delu porečja Poljanščice (DRSV, 2016b) so bile kot izhodiščne vrednosti izbrane tiste, ki so dale ustrezni Q100 v prerezih P1 (74 m³/s, 19,2 km²) in P4 (39 m³/s, 9,2 km²). Enake vrednosti koeficientov so dale tudi ustrezni pretok Q100 v iztočnem profilu Horjulščice (60 m³/s, 47 km²) (DRSV, 2017a).

Manjkajoči vrednosti za pokrovnost 121, 142, 322 izberemo na podlagi literature, ki se najbolj približa vrednostim ostalih vrst CLC pokrovnosti, predvsem tistih z največjim deležem: mešan in iglasti gozd,



ekstenzivno kmetijstvo in pašnik. Huang (2009) izkazuje v primerjavi s Pestana (2013) manjše razlike pri gozd-mešano, večje pri gozd-iglavci, manjše pri kmetijstvo-ekstenzivno in pašnik.

Srednje vrednosti koeficientov dobimo na podlagi povprečenja minimalnih in maksimalnih vrednosti rezultatov umerjanja v vseh profilih P1, P2, P3 in P4 povirnega dela porečja Poljanščice.

Celoten razpon uporabnih vrednosti koeficientov hrapavosti dobimo z uporabo rezultatov umerjenih vrednosti koeficientov v prerezi povirnih delov porečja Poljanščice P2 (120 m³/s, 28,6 km²) in P3 (79 m³/s, 15,6 km²).

V analizi obravnavanega območja Meže so uporabljene tri kombinacije koeficientov hrapavosti, minimalne, maksimalne in srednje vrednosti (preglednica 2):

Meza_v1: umerjeno na Poljanščico P1 in P4, dopolnjeno s Huang (2009) vrednostmi CLC

Meza_v2: povprečje za Poljanščico P1234, dopolnjeno s Kalyanapu (2009) vrednostmi za NLCD

Meza_v3: umerjeno na Poljanščico P2 in P3, dopolnjeno z Liu (2004) vrednostmi za NLCD

Preglednica 2: Vrednosti koeficienta hrapavosti glede na vrsto pokrovnosti tal po nomenklaturi CLC, ki so bile uporabljene v preteklih študijah in za obravnavano območje Meže (3 variante)

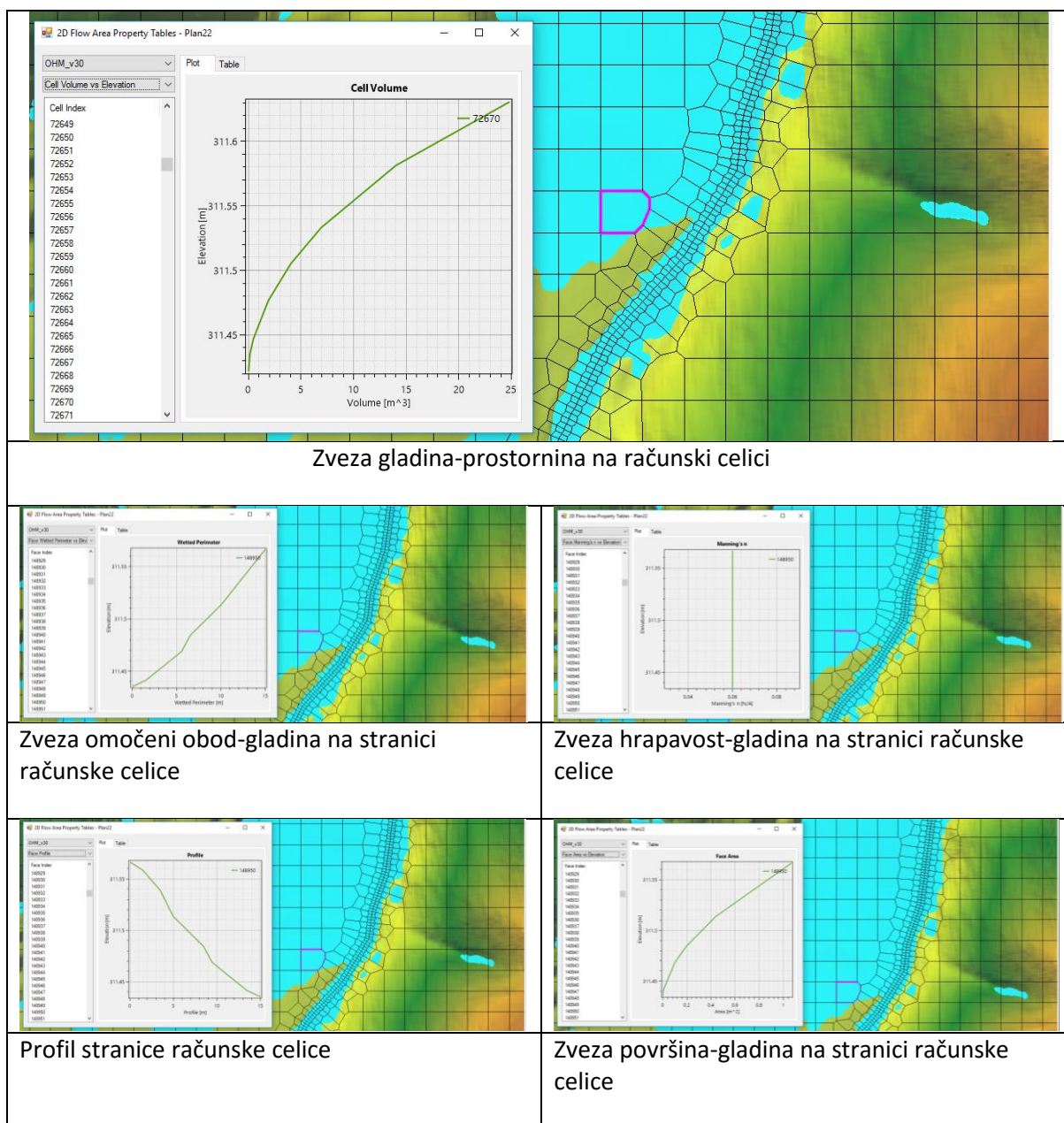
CLC šifra	000	112	121	142	231	242	243	311	312	313	321	322
CLC opis	vodno zemljišče	pozidano	industrija, trgovina	šport in prosti čas	pašnik	kmetijsko-intenzivno	kmetijsko-ekstenzivno	gozd - listavci	gozd - iglavci	gozd - mešano	travnik	barja in resave
Površinski delež	1%	4%	2%	1%	9%	0%	21%	1%	26%	34%	0.1%	0.4%
PSora_P1P4	0.052	0.094	-	-	0.112	0.055	0.068	0.159	0.126	0.153	0.064	-
Huang (2009)	0.03	0.108	0.200	0.086	0.072	0.072	0.072	0.108	0.108	0.108	0.108	0.108
Pestana (2013)	0.035	0.115	0.23	0.023	0.298	0.023	0.058	0.23	0.127	0.23	0.039	0.058
Lopes (2013)	0.0225	0.12	0.085	0.06	0.04	0.0375	0.0375	0.16	0.17	0.165	0.035	0.07
Meza_v1	0.05	0.09	0.20	0.08	0.11	0.06	0.07	0.16	0.13	0.15	0.06	0.11
CLC šifra	000	112	121	142	231	242	243	311	312	313	321	322
PSora_P1234AV	0.04	0.07	-	-	0.23	0.20	0.21	0.43	0.26	0.35	0.18	-
Kalyanapu (2009)	-	0.0678	0.0404	0.0404	0.325	0.0113	0.0113	0.36	0.32	0.40	0.368	0.368
Flo2D (2009)	-	0.04	0.04	0.07	0.35	0.14	0.10	0.35	0.35	0.35	0.30	-

Meza_v 2	0.04	0.07	0.04	0.04	0.23	0.20	0.21	0.43	0.26	0.35	0.18	0.37
	000	112	121	142	231	242	243	311	312	313	321	322
PSora_P 2P3	0.03	0.05	-	-	0.35	0.35	0.35	0.7	0.4	0.55	0.3	-
Goldin (2015)	0.001	0.02	0.02	0.02	0.25	0.2	0.2	0.4	0.4	0.4	0.1	0.3
Liu (2004)	0.03	0.05	0.05	0.05	0.35	0.35	0.35	0.7	0.4	0.55	0.3	0.4
England (2007)	0.05	0.02	0.02	0.33	0.46	0.21	0.21	0.52	0.52	0.52	0.20	0.20
Meza_v 3	0.03	0.05	0.05	0.05	0.35	0.35	0.35	0.7	0.4	0.55	0.3	0.4

Koeficient hrapavosti na vodnih zemljiščih se glede na Chow (1959) nahaja v razponu vrednosti od 0,025 do 0,150, v primeru hudournikov pa v razponu od 0,03 do 0,07. Za mrežne celice, kamor konvergira tok, Wang (1998) uporabi vrednost 0,1. Mikoš (2008) navaja, da je za manjše hudournike in erozijske jarke ter širino vodne gladine do 8m primeren koeficient v razponu 0,067 do 0,125. Na primeru Poljanščice in Horjulščice se je izkazala ustreznost koeficienta v razponu od 0,02 do 0,07, za merodajna prereza P1 in P4 pa 0,05. Pri izbiri je upoštevan manjši hidravlični radij zaradi podcenjene velikosti prereza struge (v Sloveniji množično aplicirani valovni spekter LiDAR tehnologije zajame le profil do gladine vode), kar npr. pri zmanjšanju prereza 16m² za četrtino pomeni zmanjšanje koeficienta 0,1 za tretjino, na 0,07. Kljub temu pa je treba upoštevati tudi odvisnost hrapavosti od globine vode, saj se zaradi manjše globine vode v strugi vrednost koeficienta poveča. Fields&Syme navajata primer, ko hrapavost pozidanih območij z globino vode narašča (z 0,01 na 0,3), hrapavost območij grmičevja pa z naraščanjem globine vode pada (z 0,08 na 0,03), vendar glede na zahtevano raven natančnosti teh zvez v modelnih izračunih ni bilo smiselno upoštevati.

Izračun hidravličnih karakteristik

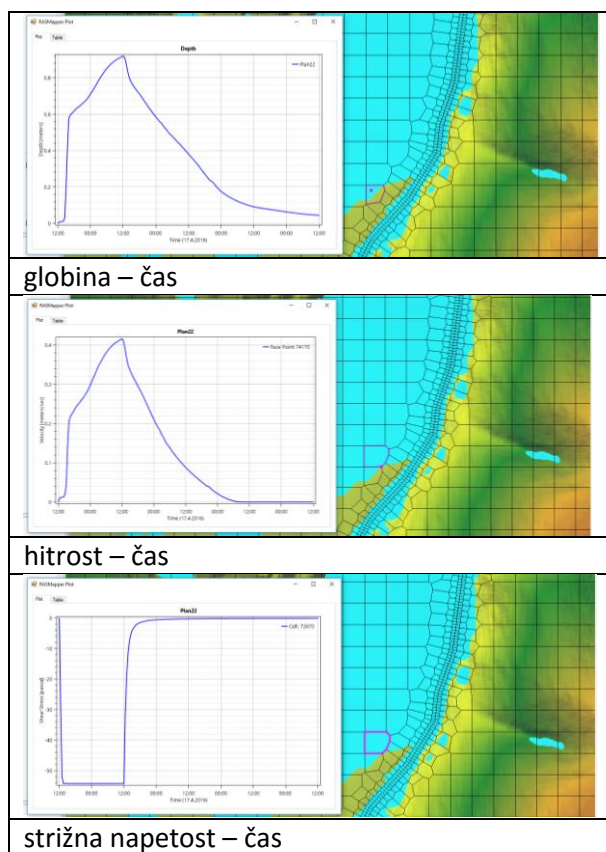
Običajno 2D modeli uporabljajo eno višino v središču računskega elementa in iz robnih točk elementa dobljen naklon elementa. HEC-RAS 2D na podlagi podrobnejšega digitalnega modela reliefa izračunava krivuljo zveze med gladino in prostornino na posameznem računskem elementu (kapaciteta zadrževanja!), na straneh računskih celic pa druge zveze (slika 14).



Slika 14: Hidravlične karakteristike računske mrežne celice na podlagi podatkov DMR1.

Računske simulacije

Za posamezno rastrsko celico DMR1 je mogoče izračunati vrednosti naslednjih spremenljivk za maksimum, minimum in izbrani časovni presek: globina, gladina, hitrost, maksimalni doseg, pretok (1d), strižna napetost, globina*hitrost, globina*hitrost², čas pritekanja do izbrane globine vode, čas odtekanja od izbrane globine vode, trajanje namočenosti do izbrane globine, delež namočenosti v času simulacije, jakost toka (pgQI). Osnovni rezultati na ravni računske celice so: gladina oz. globina – čas, hitrost – čas in strižna napetost – čas (slika 15).



Slika 15: Rezultati na posamezni računski mrežni celici.

Sprememb osnovnih nastavitev pri analizi obravnavanega območja Meže ni bilo. Pri vsaki simulaciji je bila zaradi hudourniškega značaja vodotokov potrjena opcija izračunavanja »mixed flow regime«, ki omogoča boljši prehod med mirnim in deročim tokom oz. stabilnost v območju kritične globine, kljub temu, da jo pri nestalnem toku HEC-RAS avtomatično izračunava ne glede na označitev.

Testiranja na Poljanski Sori in Horjulščici (DRSV, 2016b, 2017a) so pokazala, da velikost izbrane računske celice npr. od 15m do 50m ne vpliva bistveno na obliko hidrograma in dosege poplav, le zveznost poplavnih območij se poslabša, zlasti na strmejših pobočjih z manjšimi globinami vode, zato še vedno velja pravilo manjša celica-natančnejši izračun, kar pa seveda posledično zahteva krajšanje računskega koraka in s tem podaljšanje časa izračuna s 3h (50m, 10s) na 41h (15m, 2s).

Simulacije:

Plan_v7

Robni pogoji: padavine P100 (porečje), pretok Q100 (Meža pod Šentanelsko reko); normalna globina (iztok iz porečja)

Računska celica: površina 15m*15m

Koeficient hrapavosti: Meza_v1; nG (CLC, površinsko utežno povprečje) = 0.12



CLC	000	112	121	142	231	243	311	312	313	321	322
nG	0.05	0.09	0.2	0.08	0.11	0.07	0.16	0.13	0.15	0.06	0.11

Hidrodinamične enačbe: diffusion wave

Računski koraki: 2s, kartiranje 1h, hidrogram 1h, detajli 1h

Čas izračuna: 41h

Plan_v8

Robni pogoji: padavine P100 (porečje), pretok Q100 (Meža pod Šentanelsko reko); normalna globina (iztok iz porečja)

Računska celica: površina 15m*15m

Koeficient hrapavosti: Meza_v2; nG (CLC, površinsko utežno povprečje) = 0.26

CLC	000	112	121	142	231	243	311	312	313	321	322
nG	0.04	0.07	0.04	0.04	0.23	0.21	0.43	0.26	0.35	0.18	0.37

Hidrodinamične enačbe: diffusion wave

Računski koraki: 2s, kartiranje 1h, hidrogram 1h, detajli 1h

Čas izračuna: 50h

Plan_v9

Robni pogoji: padavine P100 (porečje), pretok Q100 (Meža pod Šentanelsko reko); normalna globina (iztok iz porečja)

Računska celica: površina 15m*15m

Koeficient hrapavosti: Meza_v3; nG (CLC, površinsko utežno povprečje) = 0.41

CLC	000	112	121	142	231	243	311	312	313	321	322
nG	0.03	0.05	0.05	0.05	0.35	0.35	0.35	0.70	0.40	0.55	0.3

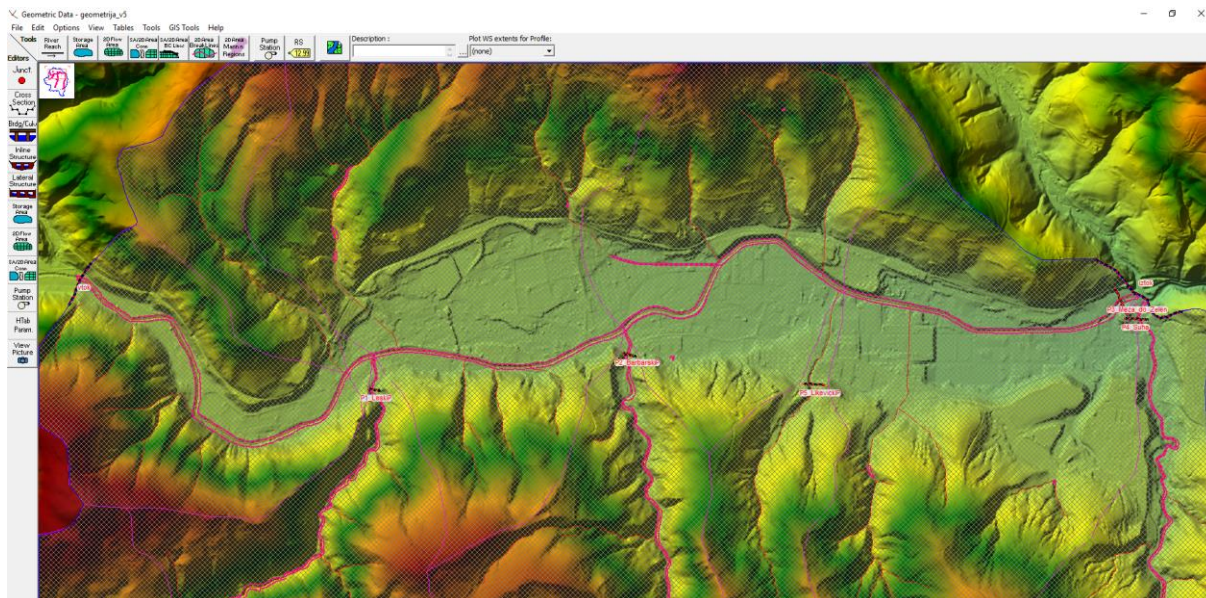
Hidrodinamične enačbe: diffusion wave

Računski koraki: 2s, kartiranje 1h, hidrogram 1h, detajli 1h

Čas izračuna: 53h

[Umerjanje \(kalibracija\) modela](#)

Neposredna kalibracija ni bila mogoča, ker na kontrolnih prerezih (slika 16) ni vodomernih postaj. Posredna kalibracija na treh kontrolnih prerezih je bila opravljena s pomočjo podatkov hidrološke študije (IzVRS, 2005).



Slika 16: Lokacije kontrolnih prerezov.

Primerjava rezultatov s teoretičnimi vrednostmi pretokov Q100 kaže na merodajnost kombinacije Meza_v1 (preglednica 3), vendar je zaradi hidrološke metode, uporabljene v študiji IzVRS (2005) treba upoštevati nekoliko nižje vrednosti pretokov Q100 (dejanske pretoke).

Preglednica 3: Primerjava izračunanih pretokov Q100 s podatki hidrološke študije (IzVRS, 2005).

		Q100_model (m3/s)		
		Leški potok	Barbarski potok	Suha
Prispevno območje (km2)		6.5	11.3	9.8
kombinacija nG (CLC)	nG (utež. povpr.)			
Meza_v1	0.12	22	39	25
Meza_v2	0.26	14	29	15
Meza_v3	0.41	11	23	10
Q100 (m3/s) (IzVRS, 2005) – teoretična vrednost		25	35	30
Q50 (m3/s) (IzVRS, 2005) – teoretična vrednost		20	29	24

Iz preglednice 4 je razvidno, da se kar 40% do 55% volumna (odvisno od variante) neto padavin na porečju Suhe zadrži v "kotanjah". S porečja Leškega in Barbarskega potoka odteče tako rekoč celoten volumen neto padavin.



Preglednica 4: Izračunani volumni pri pretokih Q100.

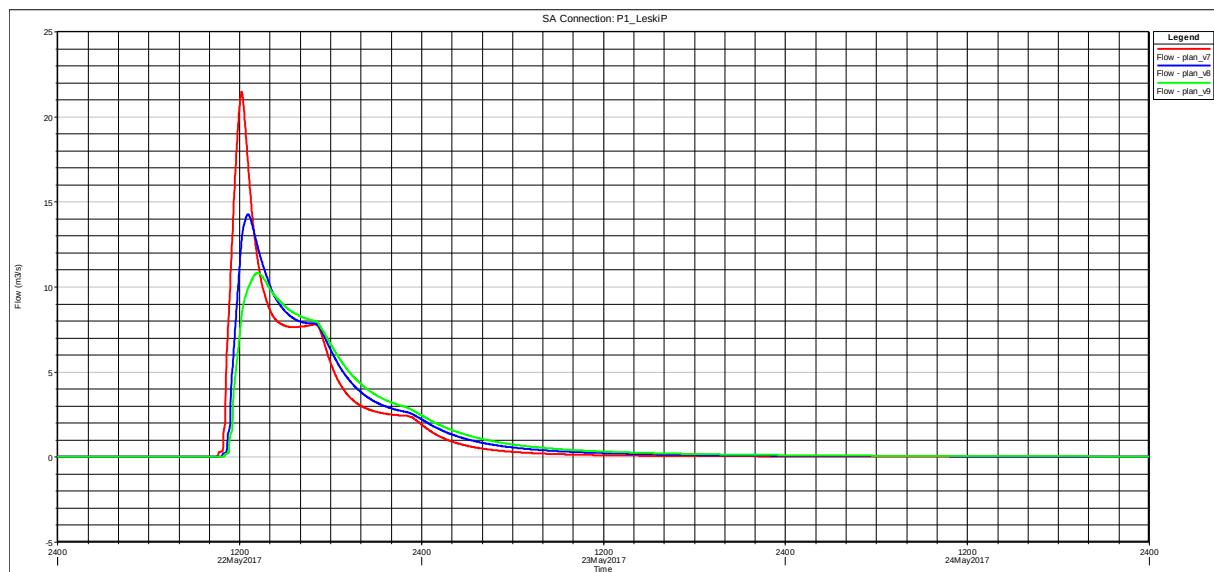
		Volumen (mio m3)		
		Leški potok	Barbarski potok	Suha
Prispevno območje (km2)		6.5	11.3	9.8
kombinacija nG (CLC)	nG (utež. povpr.)			
Meza_v1	0.12	0.343	0.596	0.310
Meza_v2	0.26	0.342	0.594	0.269
Meza_v3	0.41	0.340	0.592	0.232

Volumni na iztoku porečja Suhe so torej preveč spremenljivi (do 25%), zato je za dodatno umerjanje izbran Barbarski potok, ki ima tudi največjo površino prispevnega območja (preglednica 5).

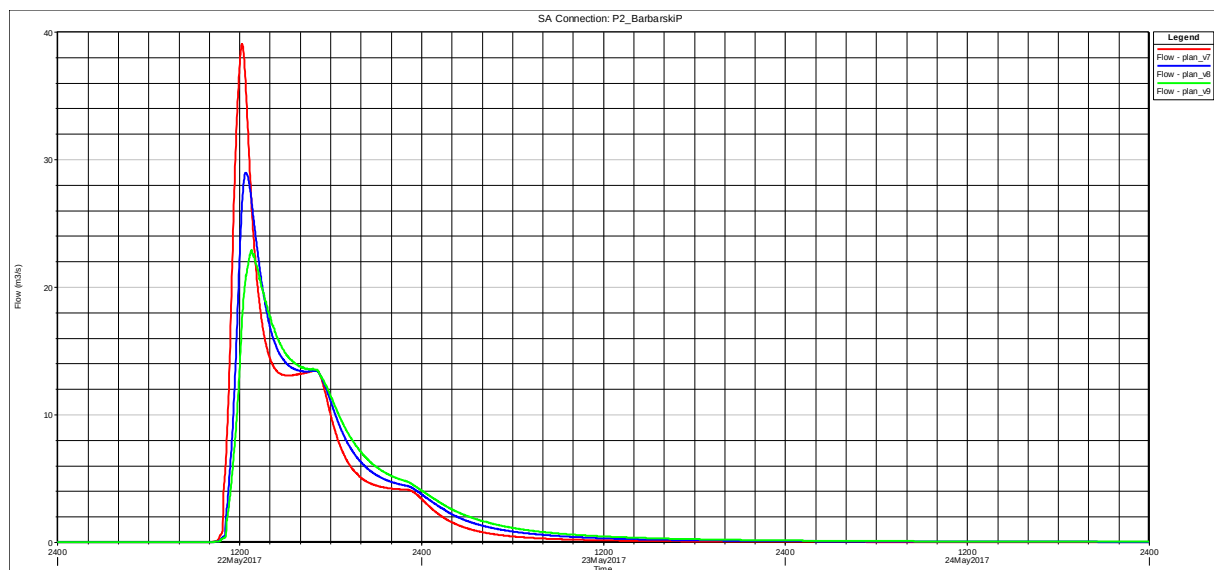
Preglednica 5: Primerjava kombinacij koeficienta hrapavosti in pretokov Q100 Barbarskega potoka.

nG (CLC)	000	112	121	142	231	243	311	312	313	321	322	nG (ut. povp.)	Q100 (Barb. p.)
Meza_v1	0.05	0.09	0.2	0.08	0.11	0.07	0.16	0.13	0.15	0.06	0.11	0.12	39
Meza_v2	0.04	0.07	0.04	0.04	0.23	0.21	0.43	0.26	0.35	0.18	0.37	0.26	29
Meza_v3	0.03	0.05	0.05	0.05	0.35	0.35	0.7	0.4	0.55	0.3	0.4	0.41	23
Površinski delež (%)	1	4	2	<1	9	21	1	26	34	<1	<1		
Q100 (IzVRS, 2005) – teoretični pretok													35

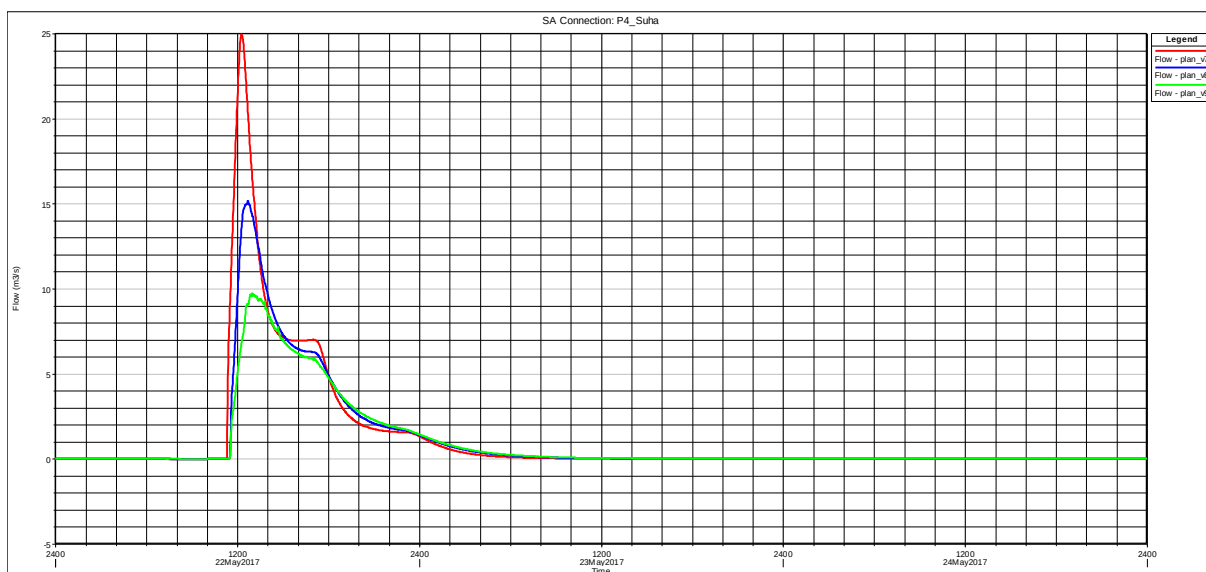
Glede na ugotovljene razlike zaradi različnih hidroloških izhodišč, je kljub boljšim teoretičnim rezultatom kombinacije Meza_v1, kot merodajno smiselno izbrati kombinacijo koeficientov hrapavosti **Meza_v2**, ki glede na utežno povprečje nG **0,26** ustreza že testiranim vrednostim (DRSV, 2016b; Wang, 1998) in rezultira s pretoki ki so nižji od teoretičnih, bližje dejanskim pretokom, obenem pa večje vrednosti koeficienta zmanjšujejo vpliv koincidence pretokov na vrednosti v iztočnem prerezu Meže (slike 17-20).



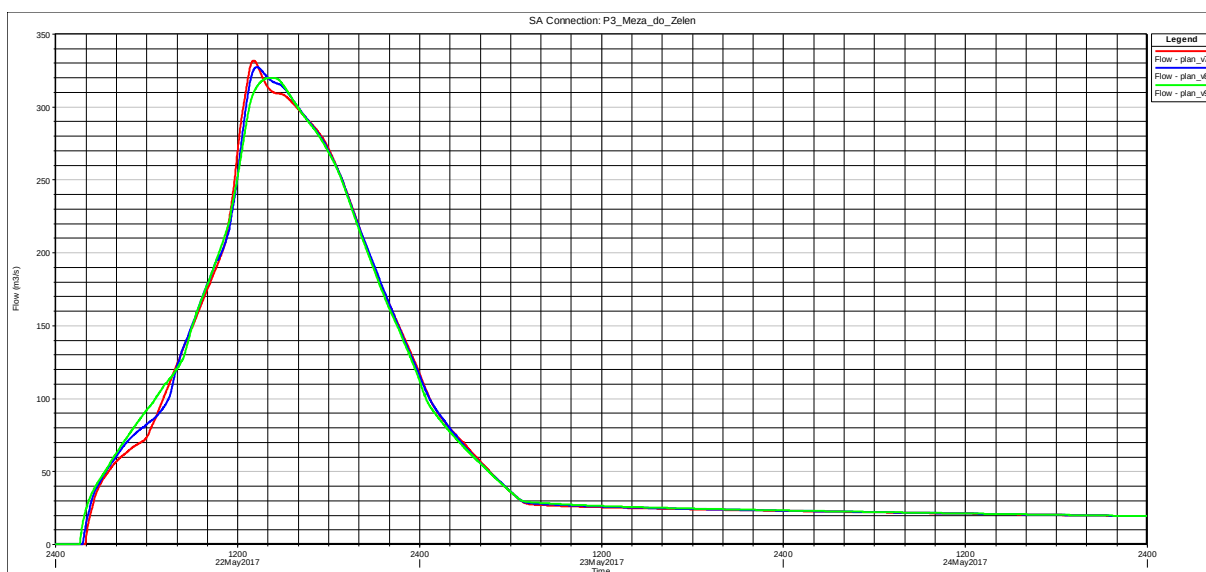
Slika 17: Primerjava hidrogramov v kontrolnem prerezu (Leški potok).



Slika 18: Primerjava hidrogramov v kontrolnem prerezu (Barbarski potok).



Slika 19: Primerjava hidrogramov v kontrolnem prerezu (Suha).



Slika 20: Primerjava hidrogramov v kontrolnem prerezu (Meža do Zelenbreškega potoka).

Pri izvajanju simulacij bi bilo v prihodnje smiselno preveriti tudi:

- Izboljšanje natančnosti izračunov z uporabo 2D Saint-Venantove enačbe »full momentum« za počasnejše naraščanje in upadanje in nižjo konico hidrograma
- Vpliv uporabe koeficientov pospeška, turbulence in viskoznosti (Coriolis in Eddy)
- Izboljšanje natančnosti z zniževanjem vrednosti koeficienta theta z 1,0 proti 0,6
- Vpliv »warm up« časa stalnega toka do trenutka izračunavanja nestalnega toka
- Vpliv upoštevanja geometrije prepustov in stavb

Kakovost modela

Veljavnost (validacija) modela

Validacija modela mora odgovoriti na vprašanje, ali se izračunani dosegi res lahko uvrščajo v razred zelo redkih poplav. Validacija modela na Poljanski Sori (DRSV, 2016b) je pokazala, da ob vnosu trikotne porazdelitve 24h učinkovitih padavin P100 na manjših pritokih (10, 15 in 20 km²) vrednost konice hidrograma na iztoku znaša Q100 in Q100+, medtem ko se koincidenca več pritokov (sočasnost nastopa enakih padavin P100 na različnih manjših pritokih) na glavnem toku odraža v povečani povratni dobi pretoka oz. večjih vrednostih pretoka kot Q500 (30 km², 50 km² in 100km² skupne prispevne površine). Ob upoštevanju kombinacije koeficientov hrapavosti Meza_v2 s površinskim utežnim povprečjem 0,26 so bile navedene ugotovitve na obravnavanem porečju Meže potrjene (preglednica 6).

Preglednica 6: Ocena povratnih dob izračunanih pretokov v obravnavanih hidroloških prerezi.

P1 - Leški potok	P2 - Barbarski potok	P3 - Meža do Zelenbreškega potoka	P4 - Suha	Prerez
14	29	327	15	Q100 (m ³ /s) – konica hidrograma
0.342	0.594	19.728	0.269	Volumen (mio m ³)
25	35	288	30	Q100 (m ³ /s) – teoretični pretok (IzVRS, 2005)
20	50	100+	10-20	Povratna doba glede na teoretične pretoke (leta)

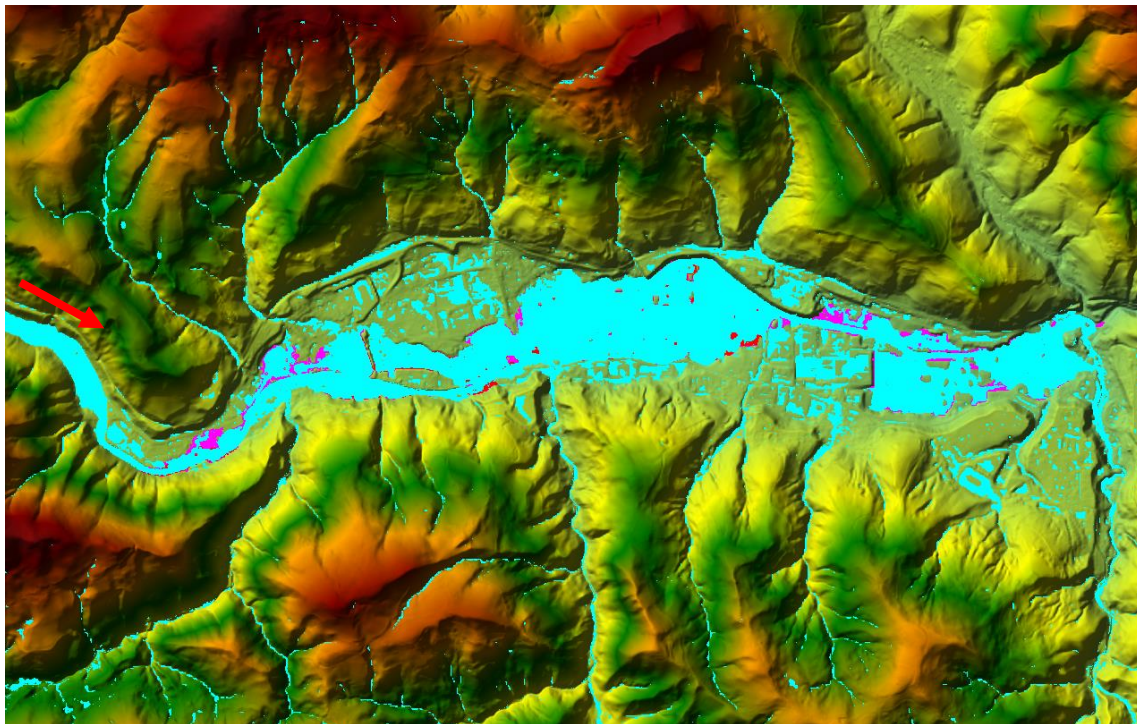
Sklepamo, da je glede na vrednosti teoretičnih pretokov Q100 model veljaven za določitev dosega poplav v razponu povratne dobe od 20 do 500 let, upošteva nižje dejanske vrednosti pretokov Q100 pa je model veljaven za določitev poplavnih območij povratnih dob od 50 do 500 let, ki se uvrščajo v razred zelo redkih poplav (Q50+).

Pravilnost (verifikacija) modela

Verifikacija modela mora odgovoriti na vprašanje, ali je linija dosega pravilno določena, kar lahko dosežemo s primerjavo dosegov, globin in hitrosti iz že izdelanih hidrološko-hidravličnih študij na obravnavanem območju. Območja veljavnosti rezultatov (OVR) študij se nahajajo le ob Meži, katere vtočni profil je v modelu obravnavan kot zgornji robni pogoj s hidrogramom, zato je izračunane dosege ob Meži v smislu metode neposrednih padavin na pritokih, mogoče primerjati le pogojno. V kolikor bi padavine aplicirali kot edini zgornji robni pogoj na celotnem prispevnem območju Meže do Zelenbreškega potoka, bi bila verifikacija modela ustreznejša.

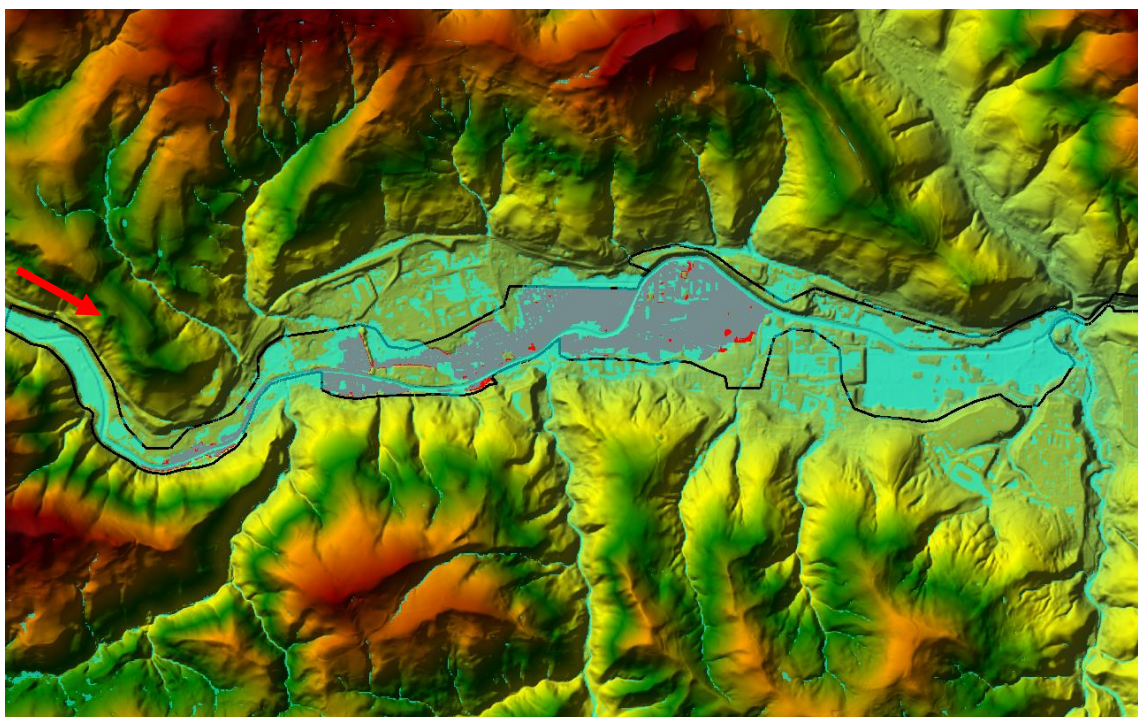
Ugotovljeno je bilo, da z izračuni določena območja v splošnem pokrivajo dosege Q100 in Q500 iz hidrološko-hidravlične študije (VGBM, 2012). Za določitev končnega podatkovnega sloja dosegov je bil uporabljen kriterij 5cm minimalne globine.

Poplavna območja večinoma dosega in presegajo območja Q100 (VGBM, 2012), le na nekaterih mestih so izračunani dosegi podcenjeni (območja rdeče barve). Tudi v primerjavi z dosegi Q500 (VGBM, 2012) so dosegi ponekod podcenjeni (slika 21; območja vijolične barve).



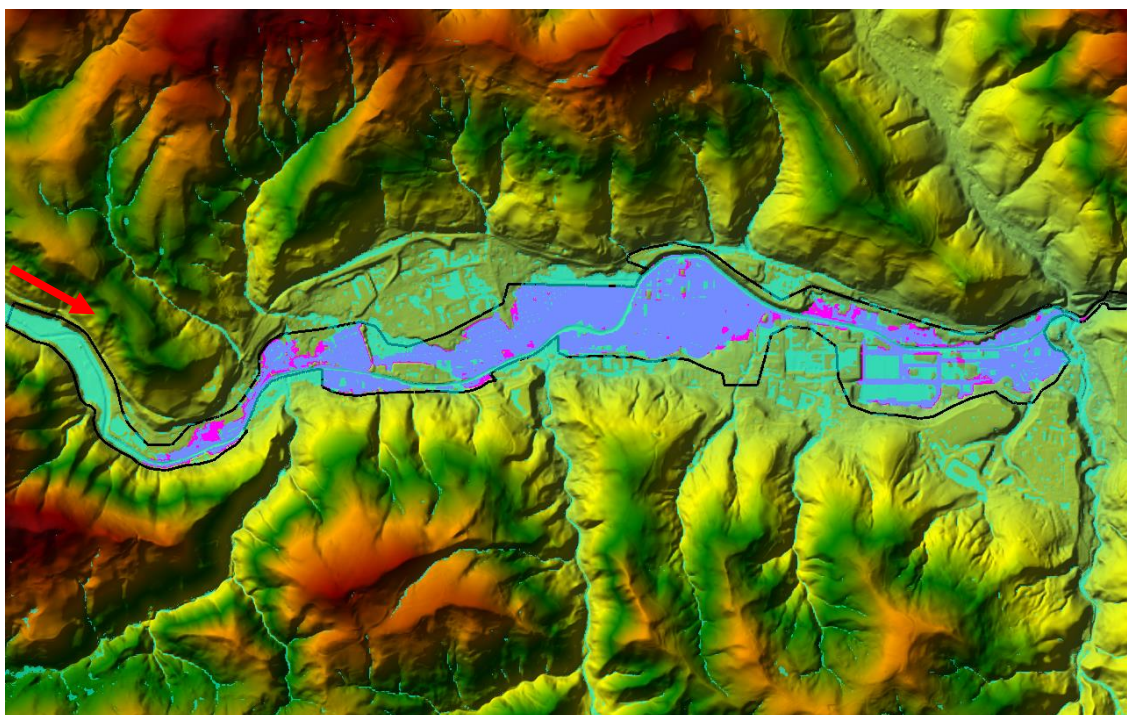
Slika 21: Podcenitev dosegov poplavnih območij v primerjavi z dosegi Q100 in Q500 (VGBM, 2012).

Precenitev dosegov nastane zlasti zaradi koincidence pretokov Q100 na pritokih in posledično povečevanja povratne dobe po prerezi vzdolž glavnega toka (slika 22; območja svetlo modre barve znotraj OVR). Poleg omenjenega pa se je potrebno zavedati, da so na nekaterih mestih poplavna območja povečana zaradi obeh vrst poplav (fluvialne in pluvialne poplave).



Slika 22: Precenitev dosegov poplavnih območij v primerjavi z dosegi Q100 (VGBM, 2012).

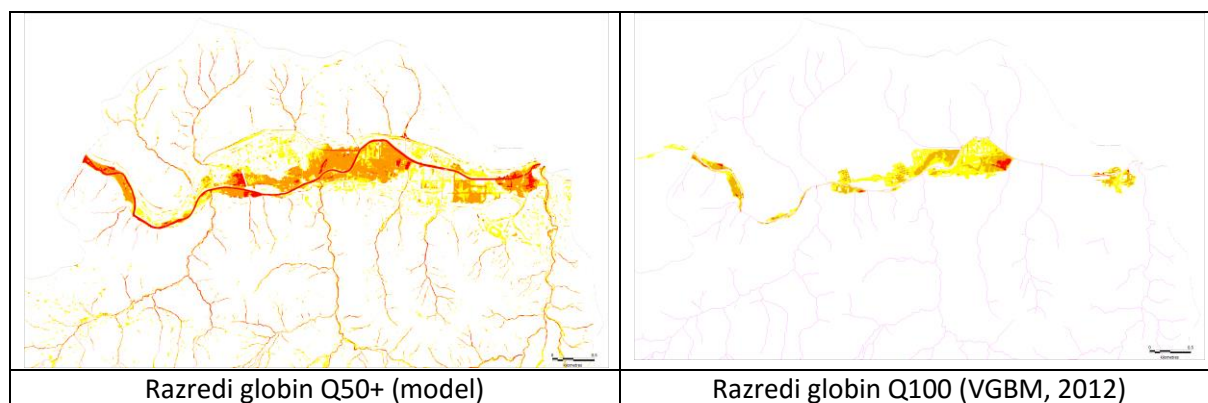
Primerjava z območji Q500 (VGBM, 2012) kaže boljše ujemanje dosegov (slika 23). Ponekod ob strugi model izkazuje poplavna območja, HHŠ pa ne (najverjetneje zaradi napake pri upoštevanju profila struge glavnega vodotoka). Tudi na sotočjih s pritoki so poplavne razmere nekoliko drugačne od tistih, prikazanih v HHŠ. Ob pritokih in na sotočjih z glavnim vodotokom je treba upoštevati tudi, da se v modelu določene vodne količine preusmerijo in zadržijo zaradi topografskih ovir (niso upoštevani prepusti, mostovi).



Slika 23: Podcenitev poplavnih območij v primerjavi z dosegi Q500 (VGBM, 2012).

V splošnem na nekaterih mestih izračunana območja odstopajo od tistih, določenih v HHŠ, za 10-20m horizontalno. Položajna natančnost je pogojena s položajno natančnostjo računske mreže, ki ne more biti boljša od velikosti računske celice, torej 15m. Uporaba podatkov o reliefu na večjih računskih celicah omogoča skrajšanje računskih časov in posledično obravnavo večjih porečij, ne izboljšuje pa položajne natančnosti rezultatov. Položajna (horizontalna) natančnost objektov izbrane skupine (robovi prometnic, posamezni objekti, vegetacija) na državni topografski karti v merilu 1:50.000, dokončno izdelane leta 2005, znaša 21,7 m (Petrovič, 2006).

Primerjava izračunanih razredov globin vode (do 0,5 m; od 0,5 m do 1,5 m; od 1,5 m) z razredi globin Q100 hidrološko-hidravlične študije kaže na izrazita odstopanja (slika 24), ki so razumljiva glede na zlasti zaradi dejstva, da koincidenca nastopa Q100 pretokov na pritokih in glavnem odvodniku povzroča skupne pretoke daljših povratnih dob in tem večje globine, večje dosege pa v odvisnosti od morfologije terena.



Slika 24: Primerjava območij treh razredov globin (model - HHŠ).

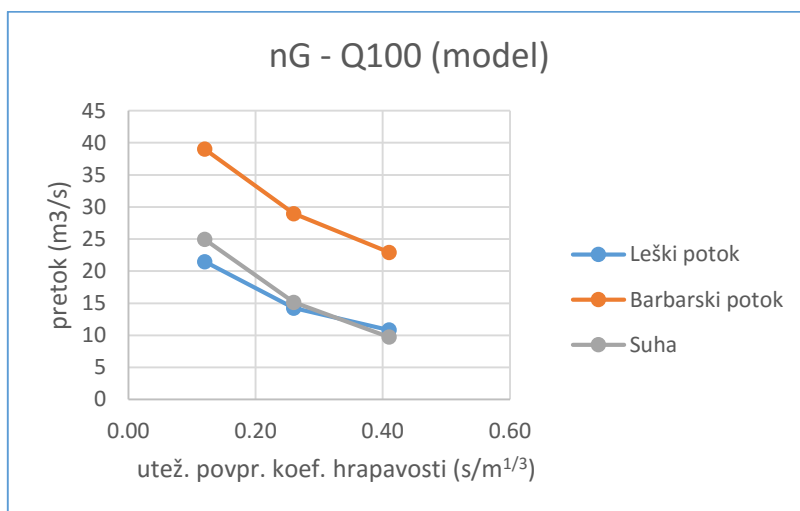
Na območju razreda majhnih globin dosegov Q100 hidrološko-hidravlične študije predpostavimo vrednost 0,25 m in na rastrskem sloju 1m*1m izračunamo povprečno absolutno razliko 0,58 m. Na območju razreda srednjih globin predpostavimo vrednost 1,00 m in izračunamo povprečno absolutno razliko 0,41 m. Na območju razreda velikih globin predpostavimo vrednost 2,00 m in izračunamo povprečno absolutno razliko 0,79 m. Površinsko utežno povprečje znaša 0,52 m, zato sklepamo, da je vertikalna natančnost približno 0,5 m, kar npr. v alpskem tipu ravnine z naklonom površja 3,5 % pomeni 15m in ta rezultat je primerljiv z ocenjeno položajno natančnostjo.

Analiza občutljivosti modela

Občutljivost modela je mogoče določiti s pomočjo merjenja vpliva spremembe utežnega povprečnega koeficienta hrapavosti (glede na deleže površin CLC razredov) na konice hidrogramov (preglednica 7, slika 25) in dosege poplav.

Preglednica 7: Pretok Q100 v odvisnosti od povprečnega koeficienta hrapavosti.

PLAN	nG (CLC)	nG (utež. povpr.)	Q100 (model)		
			Leški potok	Barbarski potok	Suha
Plan7	Meza_v1	0.12	21	39	25
Plan8	Meza_v2	0.26	14	29	15
Plan9	Meza_v3	0.41	11	23	10



Slika 25: Pretok Q100 v odvisnosti od povprečnega koeficienta hrapavosti.

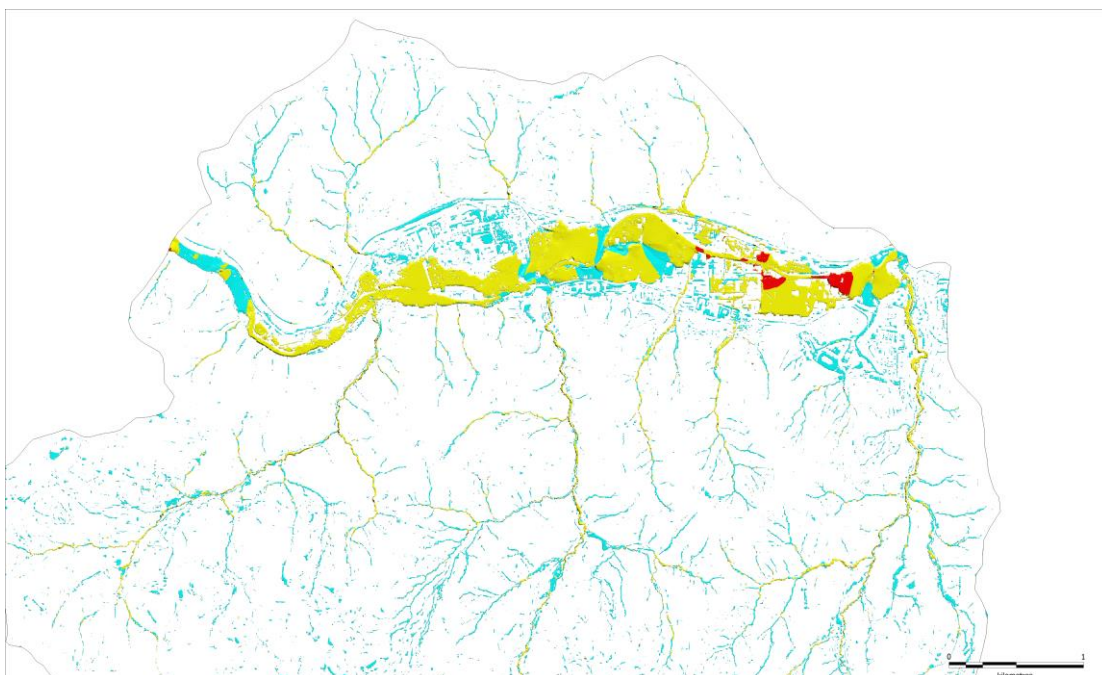
V povprečju se povečanje koeficienta nG za 0.05 odraža kot zmanjšanje pretoka Q100 za 12% na Leškem potoku (6.5 km²), 9% na Barbarskem potoku (11.3 km²) in 15% na Suhi (9.8 km²).

Povečanje koeficienta hrapavosti vpliva na skupno površino poplavnih območij in se pri povečanju hrapavosti za 100% odraža kot povečanje površin za 5-10% (preglednica 8).

Preglednica 8: Površina izračunanih območij zelo redkih poplav v odvisnosti od povprečnega koeficienta hrapavosti.

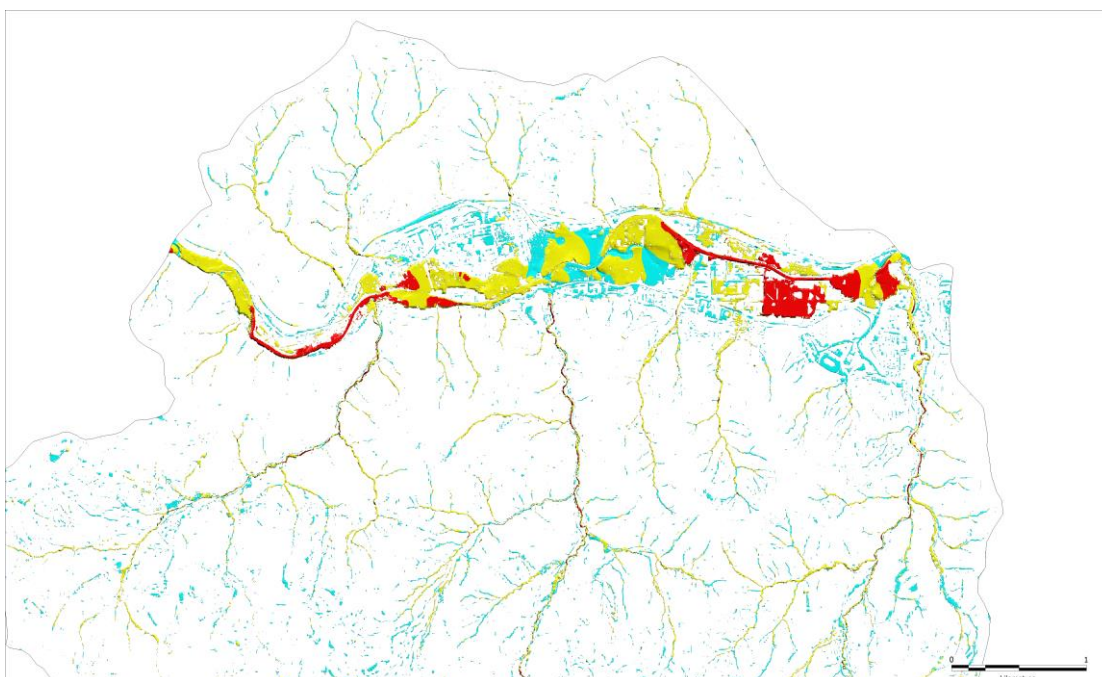
	nG (utež. povpr.)	Površina območij zelo redkih poplav (km ²)		
		Leški potok	Barbarski potok	Suha
Meza_v1	0.12	0.191	0.370	0.366
Meza_v2	0.26	0.201	0.379	0.391
Meza_v3	0.41	0.213	0.399	0.405

S primerjavo rezultatov simulacij Plan7 in Plan8 (absolutna razlika globin na posamezni mrežni celici DMR1) določimo lokacije največjega vpliva spremembe koeficienta hrapavosti. Območja razlik do 10 cm so označena z modro barvo, območja razlik od 10 cm do 50 cm so označena z rumeno barvo in območja največjih razlik z rdečo (od 50 cm do 2m) (slika 26).



Slika 26: Vpliv spremembe povprečnega koeficienta hrapavosti (z 0,12 na 0,26) na globine.

Če primerjamo rezultate simulacij Plan7 in Plan9 (maksimalni razpon koeficientov n_G) pa se znatno povečajo območja več kot 50 cm razlik v globinah (rdeča barva), ponekod pa se območja srednjih razlik celo zmanjšajo (slika 27).

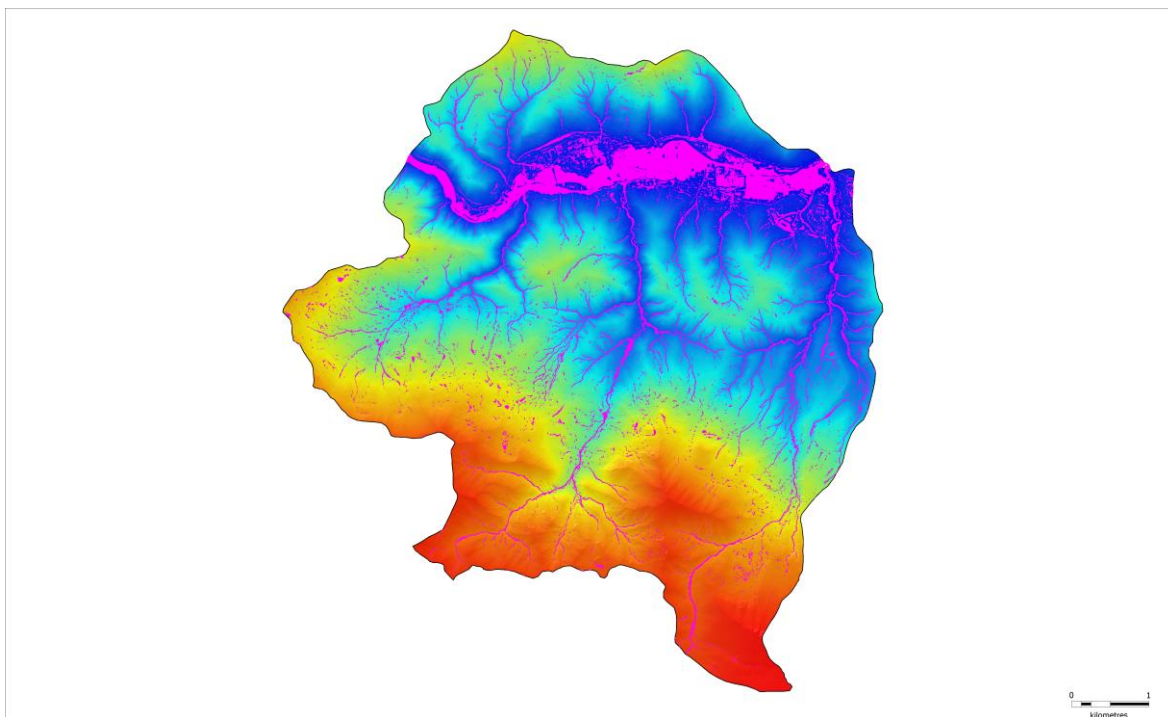


Slika 27: Vpliv spremembe povprečnega koeficienta hrapavosti (z 0,12 na 0,41) na globine.

ANALIZA POPLAVNE NEVARNOSTI

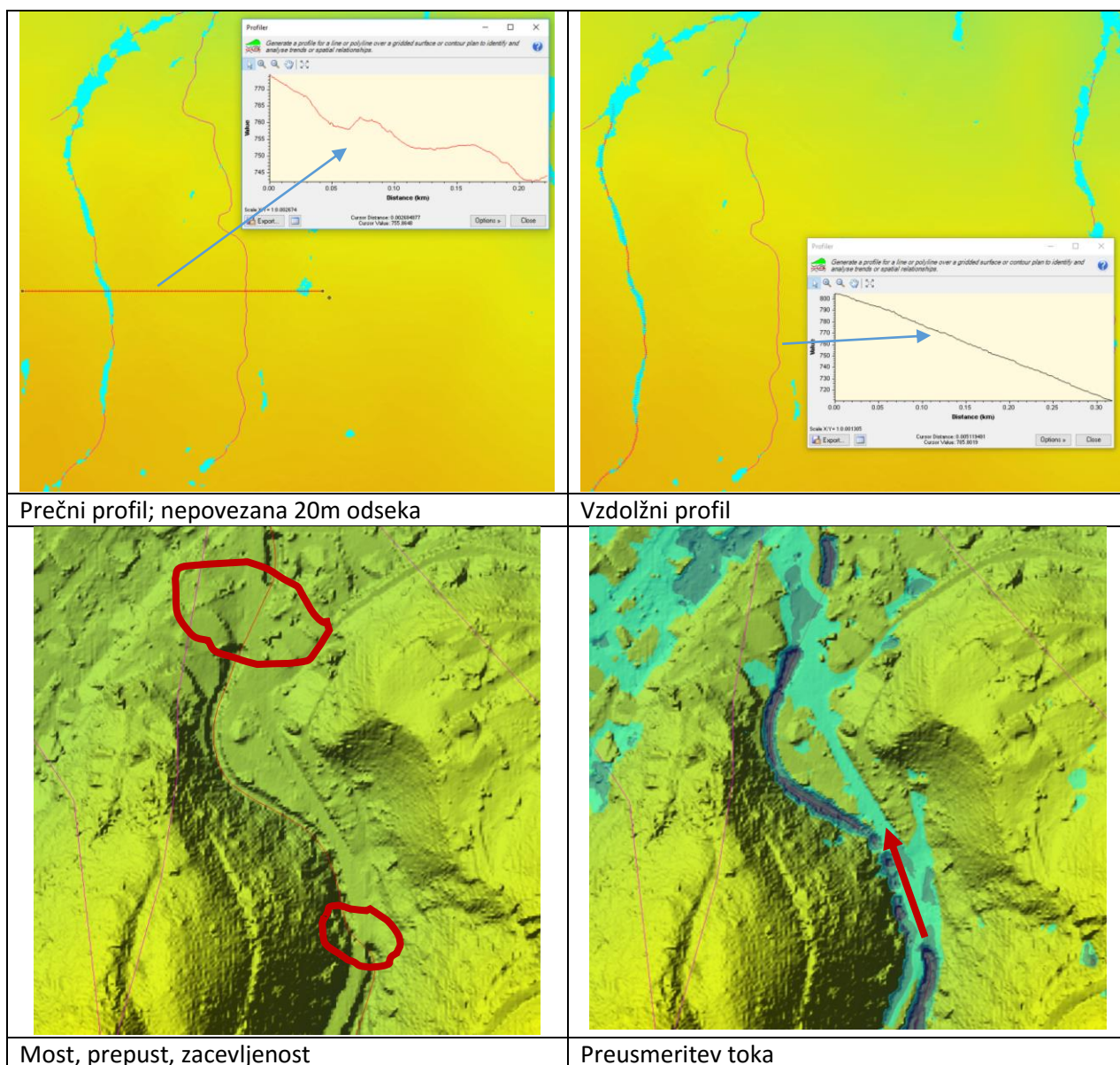
Izdelava podatkovnega sloja

Osnovni rezultat modela predstavlja rastrski podatkovni sloj globin vode pri zelo redkih poplavah na digitalnem modelu reliefa 1m*1m (slika 28).



Slika 28: Rastrski podatkovni sloj globin vode velikosti celice 1m.

V postopku izdelave končnega podatkovnega sloja je treba obravnavati tudi nepovezanost poplavnih območij, ki nastane zaradi višinskih napak pri LiDAR snemanju in interpretaciji reliefa, velikosti računske celice, neodpravljenih umetnih tokovnih ovir (ceste, železnice, mostovi), plitvega površinskega toka zaradi večjih naklonov (33%) (slika 29). Nezveznost poplavnih območij v razdaljah do 15m gre pripisati izbrani velikosti računske mrežne celice in nastane na strmih pobočjih kot posledica neposredne projekcije gladine, izračunane v posamezni »mokri« celici, na ravnino – če gladina v nižje ležeči celici ne dosega kote dna višje ležeče celice, nastane »suh« vmesni prostor.

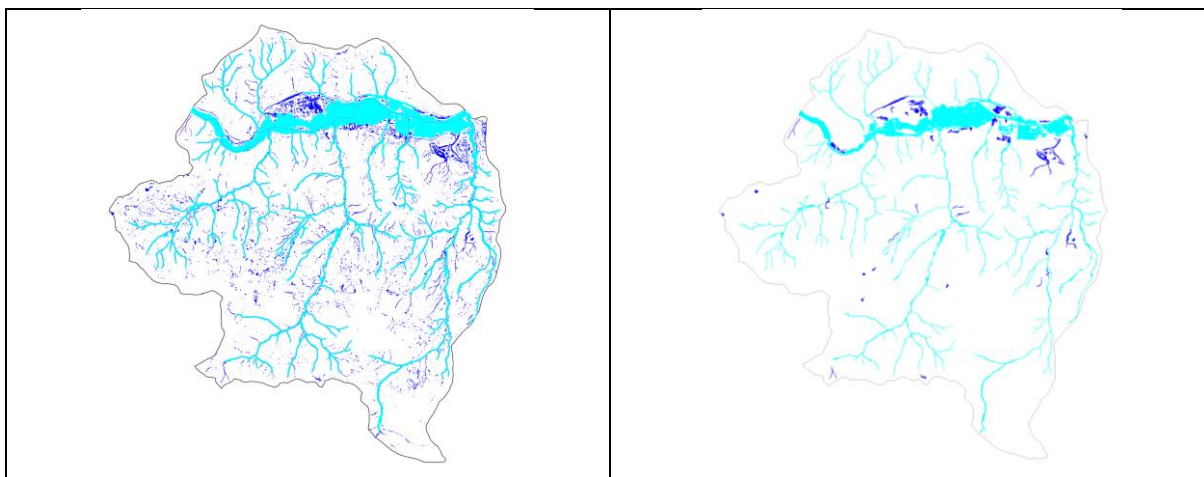


Slika 29: Posebnosti in napake rastrskega podatkovnega sloja globin.

Postopek izdelave končnega podatkovnega sloja:

1. Globine reda velikosti nekaj cm je smiselno pri izdelavi shp dosega poplav omejiti vsaj v okviru višinske natančnosti modela reliefa in pojavljanja površinskega toka, zato je bila uporabljena **5cm** omejitev globin
2. Določitev odsekov HIDRO5 izven poplavnih območij: HIDRO5 ERASE na poplavna območja (na vodnih zemljiščih praktično ne ostane noben preostali objekt HIDRO5, zato pri analizi uporaba sloja VZ ni mogoča v smislu povezovanja poplavnih območij prek VZ)
3. Izdelava 5m navideznega vodnega zemljišča na odsekih: Buffer HIDRO5 2,5m L, D (»one buffer for all object«), prilagodi TABLE STRUCTURE poplavnim območjem

4. Združitev poplavnih območij z navideznim vodnim zemljiščem: APPEND buffer2,5m TO poplavna območja in združitev v en objekt: COMBINE ALL
5. Razgraditev glede na povezanost: DISAGGREGATE ALL (nastane eno območje fluvialnih in 17608 območij pluvialnih poplav)
6. Pri območjih pluvialnih poplav vpeljava površinskega izločitvenega kriterija zaradi negotovosti rezultatov na ravni računske celice (pri kriteriju $A < 15m * 15m * 7 = 0,0016 \text{ km}^2$ ostane le še 48 območij) ob predpostavki, da se na izbrani celici voda lahko ali pa ne prelije prek največ osmih stranic v sosednjih 7 celic (najmanj 2 celici zavzame tok vode). Rezultat avtomatske generalizacije podatkovnega sloja je prikazan na sliki 30.



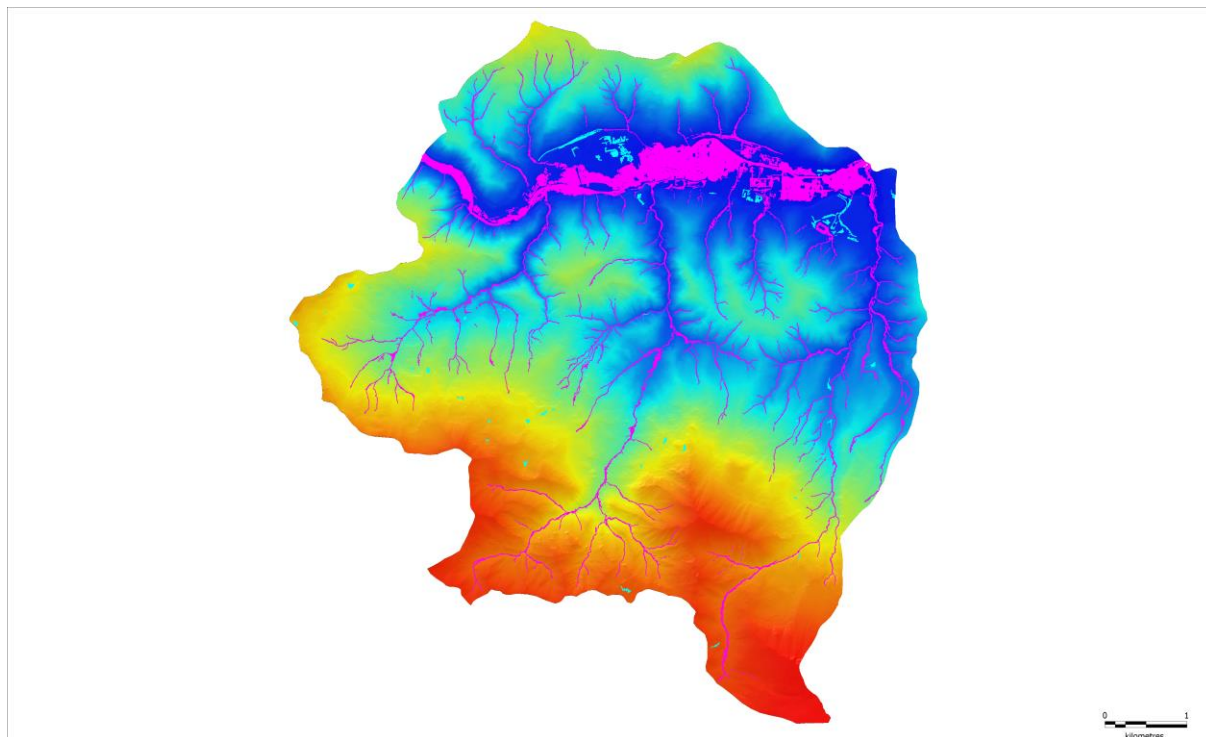
Slika 30: Primerjava osnovnega rastrskega podatkovnega sloja globin in urejenega podatkovnega sloja dosegov fluvialnih in pluvialnih poplav.

7. Za določitev končnega sloja poplavnih območij sta bila sloja fluvialnih in pluvialnih poplav "ročno" modificirana na podlagi kartografskega pregleda terena (DOF5, DMR1, TTN5, DTK5). Končni podatkovni sloj sestavljajo območja zelo redkih poplav z atributom vrste poplave fluvialne (rečne) poplave, ki lahko vsebujejo tudi pluvialne (dežne) poplave, kjer ti dve vrsti poplav lahko nastopata na istem območju. Pričakovano je, da so v tem primeru fluvialne (rečne) poplave dominantnejše (ocena zanesljivosti 6-7). V končnem podatkovnem sloju se nahajajo tudi območja zelo redkih poplav z atributom vrste poplave pluvialne (dežne) poplave, ki lahko vsebujejo tudi fluvialne (rečne) poplave, kjer ti dve vrsti poplav lahko nastopata na istem območju. Pričakovano je, da so v tem primeru pluvialne (dežne) poplave dominantnejše (ocena zanesljivosti 5).

Za uporabo pri analizi ogroženosti je včasih treba nekatere rezultate tudi generalizirati (na pozidanem območju je veliko fragmentiranih majhnih poplavnih območij, ki jih je potrebno povezati in zamejiti celotno območje, kjer se nahaja veliko prebivalcev in stavb). Poleg tega morajo biti med poplavna območja vedno vključena območja vodnih zemljišč.

Značilnosti poplavnih območij

Poplavna območja zelo redkih poplav so ločena na območja fluvialnih (rečnih) poplav in na območja pluvialnih (dežnih) poplav (slika 31). Med pluvialnimi poplavami opazimo tudi linijske odseke, ki se lahko uvrščajo med fluvialne poplave, vendar na podlagi uporabe podatkovnega sloja vodotokov HIDRO5 kot taki niso bili avtomatsko prepoznani.



Slika 31: Območja pluvialnih poplav (vijolična) in fluvialnih poplav (svetlo modra).

Površina poplavnih območij zelo redkih poplav (fluvialne poplave): 2,25 km²

Površina poplavnih območij zelo redkih poplav (pluvialne poplave): 0,13 km²

Površina poplavnih območij zelo redkih poplav: **2,38 km²**

Površina poplavnih območij zelo redkih poplav izven OVR (fluvialne poplave): 1,12 km²

Površina poplavnih območij zelo redkih poplav izven OVR (pluvialne poplave): 0,12 km²

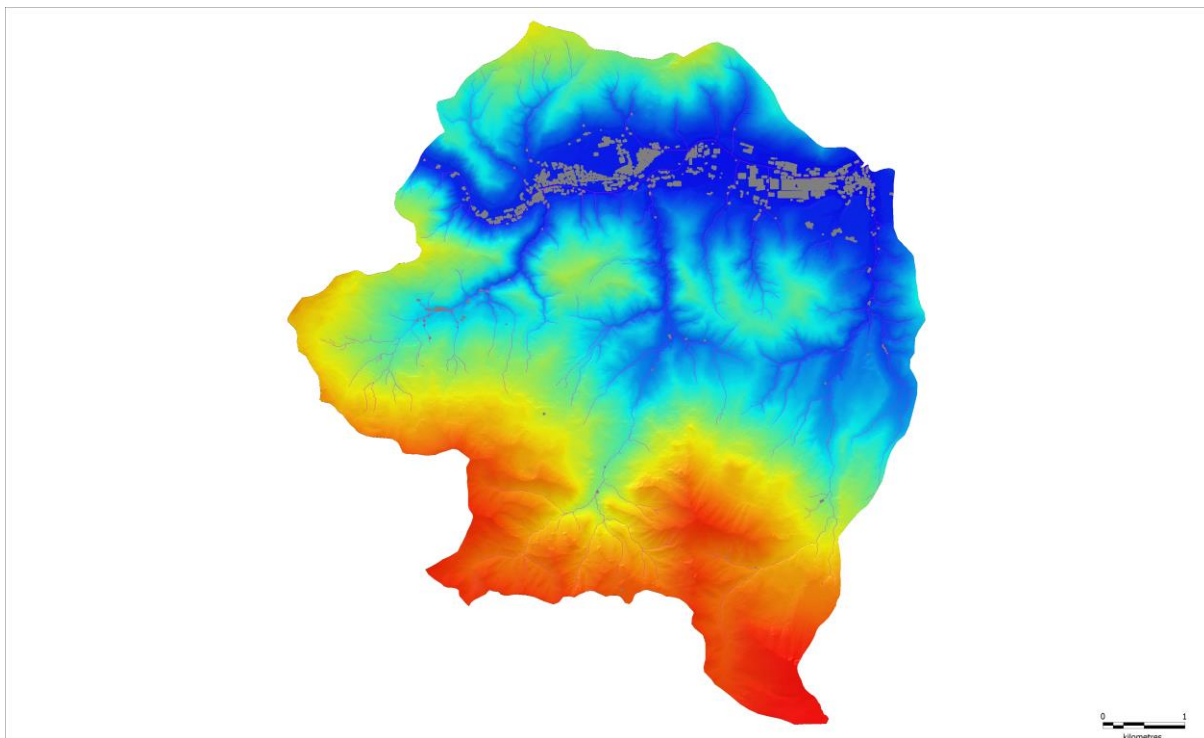
Površina poplavnih območij zelo redkih poplav izven OVR: **1,24 km²**

Skupno je bilo določenih 2,38 km² poplavnih območij, od tega jih je polovica določenih na novo (1,24 km²). Pluvialne poplave predstavljajo 6% poplavnih območij.

Število stavb na območjih zelo redkih poplav (fluvialne poplave): 1259

Število stavb na območjih zelo redkih poplav (pluvialne poplave): 154

Število stavb na območjih zelo redkih poplav (slika 32): **1413**



Slika 32: Stavbe na poplavnih območjih.

Število stavb na območjih zelo redkih poplav izven OVR (fluvialne poplave): 412

Število stavb na območjih zelo redkih poplav izven OVR (pluvialne poplave): 145

Število stavb na območjih zelo redkih poplav izven OVR: **557**

Skupno se na poplavnih območjih nahaja 1413 stavb, od tega jih je 40% določenih na novo (557 stavb). Stavbe na območjih pluvialnih poplav predstavljajo 11% stavb na poplavnih območjih. V primerjavi z ogroženimi stavbami na obstoječem območju veljavnosti rezultatov hidrološko-hidravličnih študij je opazno povečanje števila ogrožencev na sotočjih pritokov z Mežo.

ZAKLJUČKI

Pri izdelavi dvodimenzijskega hidravličnega modela po metodi neposrednih padavin, apliciranih na računsko mrežo hidravličnih karakteristik, dobljenih iz digitalnega modela reliefa 1m*1m, je treba dobro oceniti ustrezno ločljivost računske mreže, časovni korak simulacije in pravilno oceniti koeficient hrapavosti v odvisnosti od pokrovnosti tal. Kljub pomembnosti poznavanja specifičnih hidravličnih struktur (nasipi, mostovi, prepusti, pregrade, preliv) se zaradi ohranitve kratkega časa izdelave modela teh struktur ni določalo, kar pa večinoma ni slabo vplivalo na rezultat, saj se ravno manjši prepusti ob poplavih pogosto zamašijo in voda teče izven struge. Nekoliko več dela je bilo opravljeno na upoštevanju podatkov o vodnih zemljiščih in korekciji računske mreže glede na njihov vzdolžni potek. Uporaba podatkov o reliefu na večjih računskih celicah sicer omogoča skrajšanje računskih časov in posledično obravnavo večjih porečij, ne izboljšuje pa položajne natančnosti rezultatov in povzroča večjo nezveznost poplavnih območij.

Kalibracija na znane konice hidrogramov Q100 iz razpoložljivih hidrološko-hidravličnih študij je bilo opravljeno v smislu iskanja razpona vrednosti nG in izbire merodajne povprečne vrednosti, ki bo zadostil več kontrolnim prerezom v okviru sprejemljivega.

Validacija modela je pokazala, da je model veljaven za določitev dosega poplav v razponu povratne dobe od 50 do 500 let, ki jih lahko uvrščamo v razred zelo redkih poplav (Q50+).

Verifikacija modela kaže na lokalno podcenitev oz. precenitev dosegov. Poplavna območja v splošnem dosegajo in presegajo območja Q100, v primerjavi z dosegi Q500 pa se je pokazalo tudi nekaj območij podcenitve dosegov. Položajna natančnost rezultatov znaša okoli 15 m, vertikalna pa 0,5m. Podatkovni sloj se lahko prikazuje na kartah merila 1:25.000 do 1:50.000.

Občutljivost modela kaže, da se povprečno povečanje koeficienta nG za 0.05 odraža kot zmanjšanje pretoka Q100 za 10%. Sprememba povprečnega koeficienta z 0,12 na 0,26 na pretežnem delu poplavnih območij povzroči spremembo globin od 10 cm do 50 cm, največkrat povečanje globin.

Na obravnavanem porečju je bila približno polovica površine območij zelo redkih poplav določena na novo, ravno tako tudi skoraj polovica ogrožencev (stavbe), kar potrjuje smiselnost izdelave dvodimenzijskih hidravličnih modelov po metodi neposrednih padavin. Ugotovljeno je tudi, da se na območjih pluvialnih poplav nahaja 11% ogrožencev, kar kaže na pomembnost obravnave te vrste poplav v prihodnje, zlasti na pozidanih zemljiščih.



PRILOGE

Priloga 1: vektorski podatkovni sloj območij zelo redkih poplav (fluvialne in pluvialne poplave)

Priloga 2: rastrski podatkovni sloj maksimalnih globin vode zelo redkih poplav na DMR1 (fluvialne in pluvialne poplave)

LITERATURA IN VIRI

Alam, M. S., 2015. Calibration of a flood model using the MIKE FLOOD modelling package employing the direct rainfall technique. 21st International Congress on Modelling and Simulation, Gold Coast, Australia.

Casulli, V., 2009. A high resolution wetting and drying algorithm for free-surface hydrodynamics. International Journal for Numerical Methods in Fluids, Volume 60, Issue 4, 391–408.

Chow, V. T., 1959. Open-channel hydraulics. McGraw-Hill, New York.

Downer, C. W., Ogden, F. L., 2006. Gridded Surface Subsurface Hydrologic Analysis (GSSHA) User's Manual, Version 1.43 for Watershed Modeling System 6.1. US Army Corps of Engineers, Engineer Research and Development Center.

DRSV, 2016a. Razvrstitev občin v razrede poplavne ogroženosti.

DRSV, 2016b. Testiranje dvodimenzijskega hidrodinamičnega modela z uporabo metode neposrednih padavin na porečju Poljanščice do Kopačnice.

DRSV, 2017a. Testiranje dvodimenzijskega hidrodinamičnega modela z uporabo metode neposrednih padavin na porečju Horjulščice.

DRSV, 2017b. Integralna karta poplav, verzija april 2017. Direkcija Republike Slovenije za vode.

EEA, 2012. Pokrovnost tal po nomenklaturi Corine Land Cover. European Environment Agency.

Engman, E.T. (1986). Roughness Coefficients for Routing Surface Runoff. *ASCE Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 112(1), 39-53.

England, J. F., Velleux, M. L., Julien, P. Y, 2007. Two-dimensional simulations of extreme floods on a large watershed. *Journal of Hydrology* 347, 229– 241.

Fields&Syme, <http://xpsolutions.com/assets/dms/XP2D%20Direct%20Rainfall%20Webinar.pdf>

GIS, 2016. Metodologija za zajem podatkov hidrografije in dejanske rabe – vodno zemljišče. Geodetski inštitut Slovenije. Naročnik: Ministrstvo za okolje in prostor.

GIS, 2014. Izvedba laserskega skeniranja Slovenije, Tehnično poročilo o izdelavi izdelkov (po blokih). Geodetski inštitut Slovenije. Naročnik: Ministrstvo za okolje in prostor.

Goldin, B., 2015. Geomorphometric analysis and sediment dynamics in mountainous basins: spatial and temporal scales. Doktorska disertacija. Univerza v Padovi.

Hall, 2015. Direct Rainfall Flood Modelling: The Good, the Bad and the Ugly. *Australasian Journal of Water Resources*, Volume 19, 2015 - Issue 1, 74-85.

Huang, Y. (2009): Rapid flood risk assessment using GIS technology, *International Journal of River Basin Management*, 7:1, 3-14

IzVRS (2012). Razvrstitev poplavno ogroženih območij in določitev območij pomembnega vpliva poplav v Sloveniji. Letno poročilo o delu na nalogi I/2/1.1, program dela IzVRS za leto 2012, naročnik: Ministrstvo za okolje in prostor. Inštitut za vode Republike Slovenije, Ljubljana.



IzVRS (2014). Posodobitev opozorilne karte poplav 2007, objavljene na Atlasu okolja. Letno poročilo o delu na nalogi I/2/7, program dela IzVRS za leto 2014, naročnik: Ministrstvo za okolje in prostor. Inštitut za vode Republike Slovenije, Ljubljana.

Kalyanapu, A. J., Burian, S. J., McPherson, T. N., 2009. Effect of land use-based surface roughness on hydrologic model output. *Journal of Spatial Hydrology*, Vol. 9, No. 2 Fall 2009.

Liu, Y. B., Smedt F. De, 2004. WetSpa Extension, A GIS-based Hydrologic Model for Flood Prediction and Watershed Management Documentation and User Manual.

Lopes, C. L., Azevedo, A., Dias, J. M., 2013. Flooding assessment under sea level rise scenarios: Ria de Aveiro case study. *Journal of Coastal Research*, Special Issue No. 65.

Merkel, W., 2001. References on time of concentration with respect to sheet flow. www.hydrocad.net/pdf/SheetFlowRefs.pdf

Mikoš, 2008. Osnove hidroinženjirstva, skripta. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo

Mikoš, M., Kranjc, A., Matičič, B., Müller, J., Rakovec, J., Roš, M., Brilly, M., 2002. Hidrološko izrazje. *Acta hydrotechnica* 20/32.

Mole, M., 2016. Hidrološko modeliranje potoka Mačkov graben s programoma Flo-2D in Hec-HMS. Diplomski naloga. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentorica Šraj, M., somentor Rusjan, S.): 62 str.

Molls, T., Brunner, G., Sanchez, A., 2016. Comparing HEC-RAS v5.0 2-D Results with Verification datasets. Sacramento FMA conference. http://c.ymcdn.com/sites/membersfloodplain.site-ym.com/resource/resmgr/2016Conference/FMA2016_Sacramento_RAS2DVeri.pdf

IzVRS, 2005. Hidrološka študija Meže in Mislinje s Suhadolnico. Številka projekta C-373.

Flo-2D, 2009. FLO-2D Reference Manual. FLO-2D Software, Inc. Dostopno z: <https://www.flo-2d.com/wp-content/uploads/2014/04/Manuals-Pro.zip>

Pestana, R., Matias, M., Canelas, R., Araújo, A., Roque, D., Van Zeller, E., Trigo-Teixeira, A., Ferreira, R., Oliveira, R., Heleno, S., 2013. Calibration of 2D hydraulic inundation models in the floodplain region of the lower Tagus river. Zbornik simpozija ESA Living Planet Symposium 2013, ESA SP-722. Edinburgh, UK.

Pestotnik, S., Hojnik, T., Šraj, M., 2012. Analiza možnosti uporabe distribuiranega dvodimenzijskega modela Flo-2D za hidrološko modeliranje. *Acta hydrotechnica* 25/43, Ljubljana.

Petrovič, D., 2006. Ocena kakovosti državne topografske karte v merilu 1 : 50 000. *Geodetski vestnik* 50/2006-2.

RAS-Solution, 2017. Spletna stran: <http://hecrasmodel.blogspot.si/>

Smith, A. J., Walker, T. R. Improving Accuracy in Continuous Hydrologic Modeling: Guidance for Selecting Pervious Overland Flow Manning's n Values in the San Diego Region http://www.projectcleanwater.org/images/stories/Docs/LDW/BMPDM/TRWE_SD_Manning_Roughness0816.pdf

Steinman, F., 2010. Hidravlika. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 243 str.

USACE, 2016. HEC-RAS River Analysis System, 2D modeling user's manual, verzija 5.0, US Army Corps of engineers, Hydrologic engineering center.

USACE, 2016. HEC-RAS River Analysis System, Hydraulic reference manual, verzija 5.0, US Army Corps of engineers, Hydrologic engineering center.

USACE, 2016. HEC-RAS River Analysis System, User's manual, verzija 5.0, US Army Corps of engineers, Hydrologic engineering center.

VGBM, 2010. Izdelava kart poplavne nevarnosti ter kart razredov poplavne nevarnosti v dolini Meže za zagotavljanje poplavne varnosti urbaniziranih območij v občinah Ravne na Koroškem in Prevalje. Vodnogospodarski biro Maribor, številka projekta 3211/10, naročnik: Ministrstvo za okolje in prostor.

VGBM, 2012a. Študije poplavnosti pritokov Meže v občini Ravne na Koroškem. Vodnogospodarski biro Maribor, številka projekta 3253/10, naročnik: Občina Ravne na Koroškem.

VGBM, 2012b. Povzetek treh obstoječih strokovnih podlag in izdelava kart poplavne nevarnosti in razredov poplavne nevarnosti na območju poslovne cone Ravne v Dobji vasi. Vodnogospodarski biro Maribor, številka projekta 3400/12, naročnik: Občina Ravne na Koroškem.

Wang, M., Hjermfelt, A. T., 1998. DEM based overland flow routing model. Journal of hydrologic engineering, Vol. 3, Issue 1.

Yen, B. C., 2001. Stormwater Collection Systems Design Handbook, Chapter 6: Hydraulics of Sewer Systems. McGraw-Hill, New York.