

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*



Jamova cesta 2
1000 Ljubljana, Slovenija
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

DRUGG – Digitalni repozitorij UL FGG
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

To je izvirna različica zaključnega dela.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

Rak, G., 2013. Hidravlična analiza vpliva rabe prostora na poplavnih območjih na potovanje poplavnih valov. Magistrska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Steinman, F.): 130 str.

University
of Ljubljana

Faculty of
*Civil and Geodetic
Engineering*



Jamova cesta 2
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

DRUGG – The Digital Repository
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is original version of final thesis.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Rak, G., 2013. Hidravlična analiza vpliva rabe prostora na poplavnih območjih na potovanje poplavnih valov. M.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Steinman, F.): 130 pp.

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
za gradbeništvo
in geodezijo

Jamova 2, p.p. 3422
1115 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si



MAGISTRSKI ŠTUDIJ
GRADBENIŠTVA
HIDROTEHNIČNA SMER

Kandidat:

GAŠPER RAK, univ. dipl. inž. vod. in kom. inž.

**HIDRAVLIČNA ANALIZA VPLIVA RABE PROSTORA
NA POPLAVNIH OBMOČJIH NA POTOVANJE
POPLAVNIH VALOV**

Magistrsko delo štev.: 240

**HYDRAULIC ANALYSIS OF FLOODPLAIN LAND USE
EFFECTS ON FLOOD WAVE PROPAGATION**

Master of Science Thesis No.: 240

Mentor:
prof. dr. Franc Steinman

Predsednik komisije:
prof. dr. Matjaž Četina

Člana komisije:
doc. dr. Mojca Šraj
izr. prof. dr. Roman Klasinc, TU Graz

Ljubljana, 26. september 2013

STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako	Vrstica z napako	Namesto	Naj bo

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisani **GAŠPER RAK**, univ. dipl. inž. vod. in kom. inž., izjavljam, da sem avtor magistrskega dela z naslovom: »**HIDRAVLIČNA ANALIZA VPLIVA RABE PROSTORA NA POPLAVNIH POVRŠINAH NA POTOVANJE POPLAVNIH VALOV**«

Izjavljam, da je elektronska različica v vsem enaka tiskani različici.

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v repozitoriju UL FGG.

Ljubljana, september 2013

.....
(podpis)

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	556.166:711(043.3)
Avtor:	Gašper Rak
Mentor:	prof. dr. Franc Steinman
Naslov:	Hidravlična analiza vpliva rabe prostora na poplavnih območjih na potovanje poplavnih valov
Obseg in oprema:	130 str., 6 pregl., 67 sl., 26 en.
Ključne besede:	hidravlično modeliranje, raba prostora, poplavni valovi, poplavna nevarnost

IZVLEČEK

Obsežna ravninska poplavna območja zaradi svojih topografskih lastnosti predstavljajo retenzijski prostor. Ta ima pomemben vpliv na preoblikovanje poplavnih valov, podaljševanje potovalnega časa ter posledično ugoden vpliv na poplavno varnost dolvodnih območij. Vpliv retenzijskega prostora na potovanje visokovodnega vala prek obravnavanega območja je odvisen predvsem od količin vodne mase, ki se prelijejo na retenzijsko površino, in odtočnih razmer na njej. Na pretočno in zadrževalno sposobnost pa med drugim pomembno vpliva tudi raba prostora. V magistrskem delu je bila opravljena hidravlična analiza vpliva rabe prostora na odtočne razmere v retenziji in s tem na potovanje poplavnih valov. Raba prostora retenzije je bila upoštevana s hidravlično hrapavostjo. Vpliv rabe prostora retenzije na odtočne razmere in poplavno nevarnost znotraj obravnavanega območja je bil preverjen s kazalniki, kot so globine in hitrosti vodnega toka, obseg poplavljenosti, razredi poplavne nevarnosti po pravilniku za določanje poplavne nevarnosti itd. Vpliv rabe prostora retenzije na dolvodne razmere, ki so pomembne z vidika poplavne varnosti, pa je bil analiziran z uporabo kazalnikov, kot so potovalni čas, vodostaj in konica visokovodnega vala v izhodnem prerezu. Analiza je bila opravljena v dveh sklopih. V prvem sklopu so bile na teoretičnem območju modeliranja s poenostavljeno geometrijo opravljene simulacije vpliva spreminjajoče se hrapavosti za izbrane poplavne valove. Na tem območju je bilo mogoče izločiti vpliv topografskih lastnosti obrežnih in retenzijskih površin na komunikacijo vode med strugo in inundacijo ter oblikovanje vzporednih tokov v retenziji. Na topografsko bolj kompleksnih območjih topografija v primerjavi z rabo prostora namreč lahko prevladujoče vpliva na odtočne razmere. Ugotovitve, ki so izhajale iz rezultatov prvega sklopa simulacij na teoretičnem območju, so bile v drugem sklopu preverjene še na v praktičnem primeru Krško-Brežiškega polja.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC: 556.166:711(043.3)
Author: Gašper Rak
Supervisor: prof. Franc Steinman Ph.D.
Title: Hydraulic Analysis of Floodplain Land Use Effects on Flood Wave Propagation
Notes: 130 p., 6 tab., 67 fig., 26 eq.
Key words: hydraulic modeling, land use, flood waves, flood hazard

ABSTRACT

Due to its topographical characteristics extensive flat floodplains present a retention area. This area has a significant impact on the transformation of flood waves, lengthening of the propagation time and consequently positive impact on flood safety of downstream areas. The impact of the retention area on the flood wave propagation over the studied area depends on the quantity of water mass spilled into the retention area and runoff regime over it. The conveyance and retention capacity of the area is significantly influenced by the land use. The thesis consists of a hydraulic analysis of the land use impact on the runoff regime in a retention area and consequently on flood wave propagation. The land use of the retention area was presented by the hydraulic roughness. In the analysis, the impact of the land use on the runoff regime and flood hazard within the studied area was checked by indicators, such as water depth, velocity of the water current, extent of flooded areas, classes of flood hazard in accordance to the Slovenian regulation on flood hazard, etc. Moreover, using selected impact indicators such as propagation time, water surface elevation and peak of flood wave in outlet cross-section, it was possible to analyze the impact on downstream conditions that are relevant in terms of flood safety. The analysis was performed in two phases. The first phase consists of simulations of changing roughness in a theoretical modeling area with simplified geometry for selected flood waves. This modeling area was used to isolate the impact of topographical characteristics of riparian and retention areas on the communication of water between the channel and retention area as well as on the formation of parallel streams in the area. On the other hand, the runoff regime of topographically more complex areas is more significantly influenced by the topography of the area than its land use. Conclusions based on the results of the first-phase simulations on the theoretical modeling area were tested on a practical case in the second phase, namely on the plain Krško-Brežiško polje.

ZAHVALA

Za podporo, vzpodbudo in predvsem za strokovno pomoč se najlepše zahvaljujem prof. dr. Francu Steinmanu.

Ravno tako hvala staršem in ženi Nasti za leta podpiranja na študijski poti.

KAZALO VSEBINE

1.0	UVOD	1
2.0	TEORETIČNA IZHODIŠČA	4
2.1	Hidravlika vodotokov	4
2.1.1	Osnovna hidravlična načela	4
2.1.1.1	Zakon o ohranitvi mase	4
2.1.1.2	Zakon o ohranitvi gibalne količine (dinamična enačba).....	5
2.1.1.3	Zakon o ohranitvi energije	6
2.1.2	Globinsko povprečne enačbe (Shallow water equations)	7
2.2	Hidravlično modeliranje	8
2.2.1	Postopki in procesi hidravličnega modeliranja	9
2.2.2	Izbira primernega modela	10
2.2.2.1	Fizični modeli	11
2.2.2.2	Numerični hidravlični modeli	12
2.2.3	Geometrija obravnavanega območja	17
2.2.3.1	Opis tehnik za zajem batimetrije	18
2.2.3.2	Opis tehnik za zajem topografije poplavnih območji	19
2.2.3.3	Izdelava geometrije modela (prečni profili, računsko mrežo)	19
2.2.4	Hidrološki podatki in hidravlični robni pogoji	21
2.2.4.1	Hidrometrija in statistična obdelava podatkov meritev	21
2.2.4.2	Merilna negotovost v hidrometriji	22
2.2.4.3	Hidravlični robni, notranji in začetni pogoji.....	23
2.3	Opis uporabljenega numeričnega modela – MIKE FLOOD	24
2.3.1	Enodimenzionalen model MIKE 11	25
2.3.2	Dvodimenzionalen model MIKE 21	26
2.3.3	Povezave 1D in 2D modela znotraj programa MIKE FLOOD	27
2.4	Upor vodnemu toku (lokalne in trenjske energijske izgube)	28
2.4.1	Hidravlična hrapavost in njen vpliv na vodni tok	28
2.4.1.1	Opis semi-empričnih enačb povezave med hidravlično hrapavostjo in gladino oz. hitrostjo vode	28
2.4.1.2	Določanje koeficientov hrapavosti	30
2.4.1.3	Porazdelitev dejavnikov vpliva na hidravlično hrapavost pretočnega prereza... 30	
2.4.1.4	Trenje in upor oblike vegetacije se spreminja z vodostajem	32

2.4.2	Lokalne izgube kot posledice topografije, batimetrije in objektov z lokalnim vplivom.....	33
2.4.3	Trendi spreminjanja rabe prostora na poplavnih površinah	34
2.5	Potovanje visokovodnih valov in zadrževalna sposobnost poplavnih površin.....	34
2.5.1	Potovanje in preoblikovanje hidrogramov visokovodnih dogodkov.....	35
2.5.2	Vloga retenzijskih površin pri blažitvi intenzitete in obsežnosti poplavnih dogodkov.....	36
2.5.3	Vpliv hidravlične hrapavosti retenzije na potovanje visokovodnih valov	37
2.6	Poplavna nevarnost	38
2.7	Kazalniki vpliva spreminjajoče se hrapavosti hrapavosti	40
2.7.1	Konica hidrograma VV vala v izhodnem prerezu	41
2.7.2	Potovalni čas konice čez obravnavani odsek	41
2.7.3	Doseg poplavnih vod oz. obseg poplavljenosti.....	42
2.7.4	Spreminjanje stopnje poplavne nevarnosti	43
2.7.5	Predpisi s področja poplav	43
3.0	ZNAČILNOSTI OBMOČJA MODELIRANJA	47
3.1	Opis teoretičnega območja modeliranja s poenostavljeno geometrijo	47
3.1.1	Opis zasnove geometrije območja modeliranja.....	47
3.1.1.1	Komunikacija vode vzdolž celotnega odseka	48
3.1.1.2	Omejeno območje razlivanja vode v retenzijo in vračanja nazaj v strugo.....	49
3.1.2	Sintetični vhodni hidrogrami in robni pogoji.....	49
3.1.3	Scenariji spreminjanja hidravlične hrapavosti.....	50
3.1.3.1	Povečevanje hidravlične hrapavosti	51
3.1.3.2	Prostorska razporeditev območij povečane hrapavosti retenzije	51
3.2	Primer Krško-Brežiškega polja.....	52
3.2.1	Podatki topografije in batimetrije	53
3.2.2	Razmere ob visokovodnih dogodkih na obravnavanem območju in komunikacija vode med strugo in retenzijo pri obstoječem stanju	53
3.2.2.1	Vzdolžna komunikacija vode med strugo in retenzijo po celotnem odseku	54
3.2.2.2	Gorvodno razlivanje vode v retenzijo in dolvodno vračanje v strugo	55
3.2.3	Hidrološke značilnosti in hidravlični robni ter notranji pogoji.....	56
3.2.4	Podatki za umerjanje in verifikacijo modela	58
3.2.5	Scenariji spreminjanja hidravlične hrapavosti.....	58
3.2.5.1	Povečevanje hidravlične hrapavosti	58

3.2.5.2 Spreminjanje obstoječega razmerja med gozdnimi in kmetijskimi površinami .	59
4.0 HIDRAVLIČNA ANALIZA.....	61
4.1 Vzpostavitev in umerjanje numeričnega modela	61
4.1.1 Numerično modeliranje teoretičnega območja	62
4.1.2 Numerično modeliranje območja Krško-Brežiškega polja	62
4.1.3 Umerjanje in verifikacija modela Krško-Brežiškega polja	63
4.2 Hidravlična analiza vpliva spreminjanja hidravlične hrapavosti na območju s poenostavljeno geometrijo	66
4.2.1 Izračunan vpliv spreminjanja hrapavosti na tokovne razmere na retenziji.....	67
4.2.2 Vpliv spreminjajočih se tokovnih razmer na retenziji na izhodni hidrogram .	69
4.2.3 Vpliv spreminjanja hrapavosti retenzije na potovanje VV valov za primer vmesne stene pri razlivanju vode v retenzijo in vračanja v strugo	74
4.2.4 Vpliv lokalno povečane hrapavosti na retenziji na odtočne razmere in preoblikovanje hidrograma.....	81
4.2.5 Ugotovitve hidravličnega modeliranja na območju s poenostavljeno geometrijo	84
4.3 Vpliv spreminjanja hidravlične hrapavosti na Krško-Brežiškem polju.....	86
4.3.1 Vpliv spreminjanja hrapavosti na zadrževalno sposobnost poplavnih površin, preoblikovanje VV vala, konico VV vala in njen potovalni čas.....	87
4.3.2 Vpliv spreminjanja hidravlične hrapavosti na poplavno nevarnost	90
4.3.3 Vpliv povečanja oziroma zmanjšanja deleža kmetijskih površin na zadrževalno sposobnost poplavnih površin, preoblikovanje VV vala, konico VV vala in njen potovalni čas.....	93
4.3.4 Vpliv spreminjajoče se hrapavosti na potovanje VV valov za primer lokalno določenega območja dotoka vode v retenzijo in vračanja v strugo	96
4.3.5 Ugotovitve hidravličnega modeliranja na območju Krško-Brežiškega polja .	104
4.4 Skupne ugotovitve in potrditev hipoteze.....	106
5.0 ZAKLJUČEK	110
6.0 POVZETEK.....	114
7.0 SUMMARY.....	117
VIRI IN LITERATURA.....	120
PRILOGE	126

KAZALO SLIK

Slika 1: Fizični model odseka reke Save nad mestom Krško z jezovno zgradbo HE Krško in načrtovanim mostom regionalne ceste Krško–Brežice (Hidroinštitut, 2011).	11
Slika 2: Primer ločenega modeliranja toka v glavni strugi in vzporednih tokov v obvodnem prostoru (Rak in sod., 2008b).	13
Slika 3: Levo – DMT gradbene jame HE Brežice; desno – isto območje, zajeto z numerično mrežo 2D hidravličnega modela (UL FGG, KMTe, 2012).	14
Slika 4: Zasnova numeričnega modela, ki združuje 1D in 2D model (Mlačnik in sod. 2011).	15
Slika 5: Porazdelitev vektorjev hitrosti, dobljenih s 3D modelom (Müller, 2012).	16
Slika 6: Povezovanje in prepletenost postopkov HHM, ki povezuje fizični model (FM) in numerični model (NM) (Rak in sod., 2013).	16
Slika 7: Podroben digitalni model terena (DMT) vodotoka s poplavnimi površinami kot podlaga za pripravo geometrije hidravličnega modela.	17
Slika 8: Snemanje batimetrije z ultrazvočnim sistemom (High School Earth Science/Seafloor Spreading, Wikibooks, 2013).	18
Slika 9: Levo – sistem LIDAR (USGS, 2013); sredina – oblak točk izmerjenih s tehnologijo LIDAR; desno – DMT, izdelan iz točk LIDAR.	19
Slika 10: Prikaz topografije terena z DMT z različno resolucijo posnetih točk površja in posplošenja, ki pri tem nastajajo (Alemseged, 2005; strani 58 in 59, slike od 5–29 do 5–34).	20
Slika 11: Upodobitev terena glede na dimenzionalnost DMT (Burdziej, 2003; stran 14, slika 26).	20
Slika 12: Levo – merilna vodomerna lata; desno – sodobna tlačna sonda (ENCVO, 2013). ..	22
Slika 13: Sistematična negotovost (nasprotje točnosti, accuracy) in naključna negotovost (nasprotje natančnosti, precision), dve različni možnosti predstavitve (merilna negotovost) (Hočevar, 2009).	23
Slika 14: Shematski prikaz hidravličnega modela z robnimi in notranjimi pogoji.	24
Slika 15: Povezava struge vodotoka (1D model) in poplavnih površin (2D model).	27
Slika 16: Razporeditev vegetacijskih vrst po prečnem prerezu rečne struge in poplavnih površin.	31
Slika 17: Shematski prikaz dimenzij zarasti, ki nastopajo v Mertensovih enačbah.	33
Slika 18: Značilno preoblikovanje hidrograma VV vala pri prehodu čez retenzijska območja.	36

Slika 19: Različno preoblikovanje hidrograma VV vala v strugi glede na začetek prelivanja na retenzijo (English Nature, 2002).....	37
Slika 20: Tipi poplavne nevarnosti glede na vrsto vodnih virov (Steinman in sod, 2010).....	39
Slika 21: Znižanje konice hidrograma zaradi začasnega zadrževanja dela vodne mase VV vala v retenziji.....	41
Slika 22: Časovni zamik nastopa konice vala na izhodnem prerezu, ki se pojavi zaradi vpliva retenzije.....	42
Slika 23: Primerjava medsebojne odvisnosti vodostaja vodotoka in obsega poplavljenosti od pretoka za topografsko različni obvodni prostor.....	43
Slika 24: Relacije med nevarnostjo, ranljivostjo in tveganjem (Rak in sod., 2008).....	44
Slika 25: Predpisani kriteriji in oznake za kartiranje (razredov) poplavne nevarnosti in ogroženosti (MOP, 2007).....	45
Slika 26: Shematski prikaz teoretičnega območja s poenostavljeno geometrijo (primer A - komunikacija vzdolž celotne dolžine retenzije; primer B - komunikacija omejena na zgornji in spodnji del retenzije).....	48
Slika 27: Hidrogrami VV valov, ki so bili upoštevani za območje s poenostavljeno geometrijo.....	50
Slika 28: Prikaz različnih razporeditev območij s povečano hrapavostjo (primer s 40 in 50% deležem območij s povečano hrapavostjo; zeleno $n_g = 0,03$, siva $n_g = 0,1$).....	52
Slika 29: Pregledna karta modeliranega območja Krško-Brežiškega polja (GURS, 2010).....	53
Slika 30: Iz izrisa vektorjev hitrosti vodnega toka so jasno razvidne smeri vodnih tokov pri Q_{100} in mesta izlivanja/vračanja vodne mase v/iz retenzije pri obstoječem stanju.....	54
Slika 31: Prikaz mest komunikacije med strugo in retenzijo za primer z vzdolžnima predelnima stenama (rdeče linije).....	56
Slika 32: Hidrogrami VV valov, ki so bili upoštevani za modeliranje območja Krško-Brežiškega polja.....	57
Slika 33: Različna razmerja površin posamezne rabe prostora, ki so bili upoštevani v izračunih.....	59
Slika 34: Zasnova numeričnega modela območja Krško-Brežiškega polja (Sava, poplavne površine, pritoki).....	63
Slika 35: Poplavna območja modelirana z 2D modelom so bila razdeljena glede na rabo prostora – upoštevane so bile tri kategorije: travnate in kmetijske površine, gozdne in zaraščene površine ter pozidana območja. Struga je obravnavana posebej v 1D modelu.....	64

Slika 36: Primerjava obsega poplavljenosti za visokovodni dogodek decembra 2009. Zgoraj – fotografija iz zraka obsega poplave ob dogodku 26. 12. 2009 (POP TV); spodaj – 3D prikaz izračunanega obsega s hidravličnim modelom (Steinman in sod. 2012).	65
Slika 37: Shematski prikaz lokacij kontrolnih prerezov, v katerih so v nadaljevanju podani hidrogrami:	66
Slika 38: Odvisnost hitrosti in globine vode od koeficienta hrapavosti n_g (polna črta prikazuje hitrost vode, črtkana črta pa globino vode).	67
Slika 39: Zniževanje amplitude hidrograma s povečevanjem hidravlične hrapavosti v retenziji. Graf prikazuje spreminjanje amplitude hidrograma v kontrolnem prerezu v spodnjem delu retenzije (R_{sp}) za ozek VV val s konico $3500 \text{ m}^3/\text{s}$	68
Slika 40: Preoblikovanje hidrograma po strugi vzdolž odseka pri konstantni hrapavosti retenzije $n_g = 0,03$ za ozek VV val s konico $3500 \text{ m}^3/\text{s}$. Hidrogrami so podani v prerezih, kot so označeni na sliki 37.	70
Slika 41: Preoblikovanje hidrograma vzdolž odseka pri različni hrapavosti retenzije za ozek VV val s konico $3500 \text{ m}^3/\text{s}$	71
Slika 42: Preoblikovanje hidrograma vzdolž retenzije, kot posledica različne hrapavosti retenzije za primer nižjega VV vala (ozek VV val s konico $2500 \text{ m}^3/\text{s}$).	72
Slika 43: Odvisnost potovalnega časa konice od koeficienta hrapavosti n_g za različne VV valove.	73
Slika 44: Zniževanje amplitude hidrograma s povečevanjem hidravlične hrapavosti. Graf prikazuje spreminjanje amplitude hidrograma v kontrolnem prerezu v spodnjem delu retenzije (R_{sp}) za ozek VV val s konico $3500 \text{ m}^3/\text{s}$	75
Slika 45: Primerjava pretokov v kontrolnem prerezu v zgornjem delu retenzije (R_{zg}) za največjo in najmanjšo vrednost hrapavosti retenzije za primera s predelno steno oz. brez nje (ozek VV val s konico $3500 \text{ m}^3/\text{s}$).	76
Slika 46: Preoblikovanje hidrograma ozkega VV vala s konico $3500 \text{ m}^3/\text{s}$ v izhodnem prerezu (G) pri spreminjajoči hrapavosti retenzije.	77
Slika 47: Sprememba potovalnega časa in znižanje konice VV vala glede na primer brez predelne stene (hrapavost retenzije $n_g = 0,03$, ozek VV vala s konico $3500 \text{ m}^3/\text{s}$).	79
Slika 48: Preoblikovanje hidrograma ozkega VV vala s konico $3000 \text{ m}^3/\text{s}$ v izhodnem prerezu (R_{sp}) pri spreminjajoči hrapavosti retenzije.	80
Slika 49: Preoblikovanje hidrograma širokega VV vala s konico $3000 \text{ m}^3/\text{s}$ v izhodnem prerezu (R_{sp}) pri spreminjajoči se hrapavosti retenzije.	81
Slika 50: Primer različne razporeditve območij s povečano hrapavostjo za primer s 40% deležem območij s povečano hrapavostjo (zelena $n_g = 0,03$, siva $n_g = 0,1$), (levo – prečni pasovi z večjo vrednostjo koeficienta hrapavosti, desno – vzdolžni pasovi z večjo vrednostjo koeficienta hrapavosti).	82

Slika 51: Znižanje konice vala (ozek VV val s konico 3500 m ³ /s) pri različnih deležih površin s povečano hrapavostjo in pri različni razporeditvi območij s povečano hrapavostjo.....	83
Slika 52: Časovni zamik pri različnih deležih površin s povečano hrapavostjo in pri različni razporeditvi območij s povečano hrapavostjo.....	84
Slika 53: Prikaz lokacij kontrolnih prerezov na območju Krško- Brežiškega polja, v katerih so v nadaljevanju podani hidrogrami.....	86
Slika 54: Primerjava maksimalnih hitrosti vodnega toka pri ozkem VV valu s konico 2560 m ³ /s in različni hrapavosti retenzije (levo – $n_g = 0,03$, desno – $n_g = 0,14$).....	87
Slika 55: Zniževanje konice hidrograma v izhodnem prerezu (PP_{iz}) s povečanjem hidravlične hrapavosti v retenziji (ozek VV val s konico 2560 m ³ /s).	88
Slika 56: Preoblikovanje hidrograma v izhodnem prerezu (PP_{iz}) za ozke VV valove z različnimi konicami pri enaki hrapavosti retenzije ($n_g = 0,08$).....	89
Slika 57: Primerjava razredov poplavne nevarnosti po 1. kriteriju Pravilnika (zgoraj) in polja hitrosti (spodaj), kot podatek za 2. kriterij, za različno hrapavost retenzije (levo – $n_g = 0,03$; desno – $n_g = 0,14$). Ozek VV val Q_{100} s konico 3750 m ³ /s.....	91
Slika 58: Odvisnost velikosti poplavljenih površin v celoti in po posameznih razredih po 1. kriteriju Pravilnika, velikosti območja poplavljenih površin s hitrostmi vodnega toka nad 1 m/s, znižanja konice vala, potovalnega časa in znižanje vodostaja v izhodnem prerezu (PP_{iz}) od hrapavosti retenzije (ozek VV val Q_{100} s konico 3750 m ³ /s).....	92
Slika 59: Prikaz primera postopnega zaraščanja kmetijskih površin in s tem povečanja hrapavosti retenzije, kot je bilo upoštevano v izračunih.....	93
Slika 60: Odvisnost velikosti poplavljenih površin v celoti in po posameznih razredih po 1. kriteriju Pravilnika, velikosti območja poplavljenih površin s hitrostmi vodnega toka nad 1 m/s, znižanja konice vala, potovalnega časa in znižanje vodostaja v izhodnem prerezu (PP_{iz}) glede na spreminjanje deleža kmetijskih in gozdnih površin (ozek VV val Q_{100} s konico 3750 m ³ /s).	94
Slika 61: Primer postopnega povečevanja deleža kmetijskih površin in posledičnega zmanjšanja hrapavosti retenzije, kot je bilo upoštevano v izračunih.....	95
Slika 62: Območja komunikacije vode med strugo in retenzijo ter glavne vodne poti v retenziji (ozek VV val Q_{100} pri primeru z vzdolžnima predelnima stenama (rdeče linije) med strugo in retenzijo).	96
Slika 63: Preoblikovanje hidrograma ozkega VV vala Q_{100} s konico 3750 m ³ /s v izhodnem prerezu pri spreminjajoči se hrapavosti retenzije. Za primerjavo sta podana tudi izhodna hidrograma za primer brez predelnih sten pri najmanjši ter največji hrapavosti retenzije.	97
Slika 64: Preoblikovanje hidrograma ozkega VV vala Q_{10} s konico 2560 m ³ /s v izhodnem prerezu (PP_{iz}) pri spreminjajoči se hrapavosti retenzije.....	98

- Slika 65: Prikaz obsega poplavljenosti in porazdelitev razredov poplavne nevarnosti za 1. kriterij za VV val s konico $3750 \text{ m}^3/\text{s}$, pri enaki hrapavosti retenzije, za primera s predelnima stenama oz. brez njiju (levo – brez predelnih sten; desno – s predelnima stenama)..... 100
- Slika 66: Primerjava velikosti poplavljenih območij v celoti in po posameznih razredih poplavne nevarnosti za primera s predelnima stenama oz. brez njiju (ozek VV val s konico $3750 \text{ m}^3/\text{s}$)..... 101
- Slika 67: Odvisnost velikosti poplavljenih površin v celoti in po posameznih razredih po 1. kriteriju Pravilnika in znižanje vodostaja v izhodnem prerezu (PP_{iz}) od hrapavosti retenzije za oba primera komunikacije med strugo in retenzijo (ozek VV val Q_{100} s konico $3750 \text{ m}^3/\text{s}$). 102

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Znižanje konice za vse VV valove v izhodnem prerezu – primerjava je podana v absolutnih vrednostih, v odstotkih glede na konico vhodnega hidrograma (*) in glede na znižanje konice pri hidravlični hrapavosti retenzije $n_g = 0,03$ (**).	72
Preglednica 2: Znižanje konice za posamezne VV valove v izhodnem prerezu – primerjava je podana v absolutnih vrednostih, v odstotkih glede na konico vhodnega hidrograma (*) in glede na znižanje konice pri hidravlični hrapavosti retenzije $n_g = 0,03$ (**).	78
Preglednica 3: Znižanje konice za posamezne VV valove v izhodnem prerezu – primerjava je podana v absolutnih vrednostih, v odstotkih glede na konico vhodnega hidrograma (*) in glede na znižanje konice pri hrapavosti retenzije $n_g = 0,03$ (**).	89
Preglednica 4: Spreminjanje analiziranih parametrov v procesu povečevanja oz. zmanjševanja deleža kmetijskih površin glede na obstoječe stanje (ozek VV val Q_{100} s konico $3750 \text{ m}^3/\text{s}$). 95	
Preglednica 5: Znižanje konice za posamezne VV valove v izhodnem prerezu – primerjava je podana v absolutnih vrednostih, v odstotkih glede na konico vhodnega hidrograma (*) in v odstotkih glede na znižanje konice pri hrapavosti retenzije $n_g=0,03$ (**).	99
Preglednica 6: Spreminjanje analiziranih parametrov v procesu povečevanja in zmanjševanja deleža kmetijskih površin za primera s predelnima stenama oziroma brez njiju (ozek VV val Q_{100} s konico $3750 \text{ m}^3/\text{s}$). Primerjava je izdelana glede na obstoječe stanje razmerja med gozdnimi in kmetijskimi površinami pri primeru brez predelnih sten.	103

LIST OF FIGURES

Figure 1: Physical model of the Sava River reach upstream of Krško city, with the weir of HPP Krško and planned bridge of regional road Krško-Brežice (Hidroinštitut, 2011).	11
Figure 2: An example of separated modeling of the stream in main channel and the parallel streams on flooded area (Rak et. al. 2008b).	13
Figure 3: Left – an orthophoto of the construction pit of HPP Brežice; right –a generated mesh of the 2D hydraulic model (UL FGG, KMTe, 2012).	14
Figure 4: Design of a numerical model, which couples 1D and 2D model (Mlačnik et. al. 2011).	15
Figure 5: Distribution of the velocity vectors, generated with a 3D model (Müller, 2012).	16
Figure 6: Connections between different procedures in the hybrid hydraulic modeling approach, which combines physical model (FM) and numerical modeling (NM) (Rak et. al., 2013).	16
Figure 7: A detailed digital terrain model of a river with floodplains as a basis for preparation of the geometry for the hydraulic model.	17
Figure 8: Acquisition of bathymetry with echo sounder (High School Earth Science/Seafloor Spreading, Wikibooks, 2013).	18
Figure 9: Left – the LIDAR system (USGS, 2013); middle – a point cloud acquired with the LIDAR technology; right – a DTM generated from the LIDAR data.	19
Figure 10: Presentation of the terrain topography with DTM from points with different resolution and occurring generalization (Alemseged, 2005; page 58 and 59, figures from 5–29 to 5–34).	20
Figure 11: Representation of the terrain according to dimensions of DTM (Burdziej, 2003; page 14, figure 26).	20
Figure 12: Left – a gauge board; right – an up-to-date wet pressure transducers (ENCVO, 2013).	22
Figure 13: Systematic uncertainty (opposite of accuracy) and random uncertainty (opposite of precision), two variants of representation (uncertainty of measurements) (Hočevar, 2009). ..	23
Figure 14: A schematic review of the hydraulic model with boundary and internal conditions.	24
Figure 15: A link of the river channel (1D model) and floodplains (2D model).	27
Figure 16: Distribution of vegetation types across the cross-section of the river channel and floodplains.	31
Figure 17: A schematic view of vegetation dimensions that appear in Mertens's equations. ...	33

Figure 18: A typical flood wave hydrograph transformation in the passage across the retention areas.	36
Figure 19: Different transformation of HW wave hydrograph of the river channel according to beginning of the spilling on the retention area (English Nature, 2002).	37
Figure 20: Types of flood hazards according to types of water hazard source (Steinman et. al., 2010).	39
Figure 21: A hydrograph attenuation due to temporary retention of water mass of the HW wave in the retention.	41
Figure 22: A time delay of wave peak in the outlet section due to the retention effect.	42
Figure 23: Comparison of inter-dependence of the river water surface elevation in the river channel and on flooded areas on the discharge for topographically different flooded area. ...	43
Figure 24: Relations between the hazard, vulnerability, threat and risk (Rak et. al. 2008).	44
Figure 25: Regulated criteria and marks for flood hazard and flood risk mapping (MOP, 2007).	45
Figure 26: A schematic presentation of the theoretical area with simplified geometry (an example A – communication along entire length of the retention; an example B – limited communication on upstream and downstream section of the retention).	48
Figure 27: Hydrographs of HW waves considered for the theoretical area with simplified geometry.	50
Figure 28: A presentation of varied distributions of areas with increased roughness (examples with 40 and 50 % proportion of areas with increased roughness; green $n_g = 0.03$, grey $n_g = 0.1$).	52
Figure 29: An overview map of the modeling area Krško-Brežiško polje (GURS, 2010).	53
Figure 30: The directions of water streams for Q_{100} and spilling/returning of water mass in/from retention area for current state can be seen from the plot of velocity vectors of the water flow.	54
Figure 31: Locations of communication between the channel and retention area for the variant with longitudinal partition walls (red lines).	56
Figure 32: Hydrographs of the HW waves considered for modeling area on the plain Krško-Brežiško polje.	57
Figure 33: Different proportions of specific land use areas considered in calculations.	59
Figure 34: A design of a numerical model of Krško-Brežiško polje (Sava, floodplains areas, tributaries).	63

- Figure 35: Floodplains that were modelled with the 2D model were divided according to the land use – three categories were taken into consideration: meadows and agricultural areas, forest and undergrowth and settled areas. The channel was modelled with a 1D model. 64
- Figure 36: A comparison of the flooded areas extent for the flood event in December 2009. Top – an aero photo of the flood extent for the flood event in 26.12.2009 (POP TV); bottom – a 3D view of the calculated extent with the hydraulic model (Steinman et. al. 2012). 65
- Figure 37: A schematic presentation of the locations of control sections in which hydrographs are given hereinafter: 66
- Figure 38: Dependence of a water velocity and depth of roughness coefficient n_g (solid line presents water velocity and dotted line presents water depth). 67
- Figure 39: A decrease of the hydrograph amplitude with the increase of the hydraulic roughness in the retention. The graph presents a change of the hydrograph amplitude in the control section in the lower part of the retention area (R_{sp}) for a narrow HW wave with the peak discharge of $3500 \text{ m}^3/\text{s}$ 68
- Figure 40: A hydrograph transformation in the channel along the reach at a constant roughness of the retention area $n_g = 0.03$ for a narrow HW wave with the a peak discharge of $3500 \text{ m}^3/\text{s}$. Hydrographs are given in sections as they are marked on the Figure 37. 70
- Figure 41: A hydrograph transformation along the reach at varied roughness of retention the area for a narrow HW wave with the peak discharge of $3500 \text{ m}^3/\text{s}$ 71
- Figure 42: A hydrograph transformation along the reach at varied roughness of the retention area for a lower HW wave (a narrow HW wave with the peak discharge of $2500 \text{ m}^3/\text{s}$). 72
- Figure 43: A peak propagation time dependence on the roughness coefficient n_g for different HW waves. 73
- Figure 44: A decrease of the hydrograph amplitude with the increase of the hydraulic roughness in retention area. The graph presents a change of hydrograph amplitude in control section in lower part of retention area (R_{sp}) for a narrow HW wave with the peak discharge of $3500 \text{ m}^3/\text{s}$ 75
- Figure 45: A comparison of the discharges in the control section in the upper part of the retention area (R_{zg}) for a maximum and minimum value of the retention area roughness for variants with and without partition walls (a narrow HW wave with the peak discharge of $3500 \text{ m}^3/\text{s}$). 76
- Figure 46: A hydrograph transformation of a narrow HW wave with a peak discharge of $3500 \text{ m}^3/\text{s}$ in the outlet section (G) at varied roughness of the retention area. 77
- Figure 47: Changing of the propagation time and attenuation of the HW wave peak according to variant without the partition walls (the retention area roughness $n_g = 0.03$, a HW wave with the peak discharge $3500 \text{ m}^3/\text{s}$). 79
- Figure 48: A hydrograph transformation of a narrow HW wave with the peak discharge of $3000 \text{ m}^3/\text{s}$ in the outlet section (R_{sp}) for varied roughness of the retention area. 80

Figure 49: A hydrograph transformation of a wide HW wave with the peak discharge of 3000 m ³ /s in the outlet section (R _{sp}) for varied roughness of the retention area.	81
Figure 50: An example of different distribution of areas with increased roughness for example with 40% of areas with increased roughness (green n _g = 0.03, grey n _g = 0.1), (left - transversal strips with higher value of the roughness coefficient, right - longitudinal strips with higher value of the roughness coefficient).	82
Figure 51: The peak attenuation (a narrow HW wave with the peak discharge of 3500 m ³ /s) for different proportion of areas with increased roughness and with varied distribution forms of the areas with increased roughness.	83
Figure 52: Translation time for the different proportion of areas with increased roughness and with varied distribution of areas with increased roughness.	84
Figure 53: Locations of control sections in which hydrographs are given hereinafter.	86
Figure 54: A comparison of maximum water stream velocities for a narrow HW wave with the peak discharge of 2560 m ³ /s and different roughness on the retention area (left – n _g = 0.03; right – n _g = 0.14).	87
Figure 55: A hydrograph peak attenuation in the outlet section (PP _{iz}) with an increase of hydraulic roughness on the retention areas (a narrow HW wave with the peak discharge of 2560 m ³ /s).	88
Figure 56: A hydrograph transformation in the outlet section (PP _{iz}) for a narrow HW waves with different values of the peak discharge at constant roughness (n _g = 0.08).	89
Figure 57: Figure 57: A comparison of flood hazard classes for the 1. criterion of the rules on methodology for determination of hazard areas (MOP, 2007) (above) and field of velocities (below), as the information for the 2. Criterion, for the different roughness of the retention area (left – n _g = 0.03; right – n _g =0.14) (a narrow HW wave Q ₁₀₀ with the peak discharge of 3750 m ³ /s).	91
Figure 58: A dependence of the extent of flooded areas in total and in each class according to the 1. criterion of the rules on methodology for determination of hazard areas (MOP, 2007), the extent of the flooded areas with the stream velocities above 1 m/s, the peak attenuation, the propagation time and a decrease of water surface elevation in the outlet section (PP _{iz}) of roughness of the retention area (a narrow HW wave Q ₁₀₀ with the peak discharge of 3750 m ³ /s).	92
Figure 59: An example of a gradual overgrowing on agricultural areas and an increasing of roughness of the retention area, as it was considered in the calculations.	93
Figure 60: A dependence of the extent of flooded areas in total and in each classes according to the 1. criterion of the rules on methodology for determination of hazard areas (MOP, 2007), the extent of the flooded areas with the stream velocities above 1 m/s, the peak attenuation, the propagation time and a decrease of water surface elevation in the outlet section (PP _{iz}) of changing the proportion of the agricultural and forest areas (a narrow HW wave Q ₁₀₀ with the peak discharge of 3750 m ³ /s).	94

- Figure 61: An example of gradual increase of the proportion of the agricultural areas and the consecutive decrease of the roughness of the retention area, as it was considered in the calculations. 95
- Figure 62: The communication areas of water between the channel and retention area and main streams in the retention area (narrow HW wave Q_{100} for the variant with the partition walls (red lines) between channel and retention area)..... 96
- Figure 63: A hydrograph transformation of a narrow HW wave Q_{100} with the peak discharge of $3750 \text{ m}^3/\text{s}$ in the outlet section at varied roughness of the retention areas. The outlet hydrographs for variant without the partition walls at the maximum and minimum values of the roughness are added for comparison. 97
- Figure 64: A hydrograph transformation of a narrow HW wave Q_{10} with the peak discharge of $2560 \text{ m}^3/\text{s}$ in the outlet section (PP_{iz}) at varied roughness of the retention areas..... 98
- Figure 65: The extent of the flooded area and flood hazard classes for the 1. criterion for HW wave with the peak discharge of $3750 \text{ m}^3/\text{s}$ at equal roughness of the retention area for variants with or without the partition walls (left – without the partition walls; right – with the partition walls)..... 100
- Figure 66: A comparison of the extent of flooded areas in total and in each class of the flood hazard for variants with and without the partition walls (a narrow HW wave with the peak discharge of $3750 \text{ m}^3/\text{s}$). 101
- Figure 67: A dependence of the extent of flooded areas in total and in each class according to the 1. criterion of the rules on methodology for determination of hazard areas (MOP, 2007) and a decrease of the water surface elevation in the outlet section (PP_{iz}) on roughness of the retention area (a narrow HW wave Q_{100} with the peak discharge of $3750 \text{ m}^3/\text{s}$). 102

LIST OF TABLES

Table 1: Peak attenuation for all HW waves in outlet section – comparison is given in absolute values, in percentage according to peak discharge of inlet hydrograph (*) and according to peak attenuation for hydraulic roughness of retention area $n_g=0.03$ (**).	72
Table 2: A peak attenuation for each HW wave in the outlet section – a comparison is given in the absolute values, in the percentage according to the peak discharge of the inlet hydrograph (*) and according to the peak attenuation for the hydraulic roughness of the retention area $n_g = 0.03$ (**).	78
Table 3: A peak attenuation for all the HW waves in the outlet section – a comparison is given in the absolute values, in the percentage according to the peak discharge of the inlet hydrograph (*) and according to the peak attenuation for the hydraulic roughness of the retention area $n_g = 0.03$ (**).	89
Table 4: Changing of analyzed parameters in process of increasing or decreasing of the extent of agricultural areas proportion according to current state (narrow HW wave Q_{100} with the peak discharge $3750 \text{ m}^3/\text{s}$).	95
Table 5: A peak attenuation for all the HW waves in the outlet section – a comparison is given in the absolute values, in the percentage according to the peak discharge of the inlet hydrograph (*) and according to the peak attenuation for the hydraulic roughness of the retention area $n_g = 0.03$ (**).	99
Table 6: A change of the analyzed parameters in the process of increase or decrease of the proportion of agricultural areas according to the current state for variants with and without the partition walls (a narrow HW wave Q_{100} with the peak discharge of $3750 \text{ m}^3/\text{s}$). A comparison is given according to the current proportion of the forest and agricultural areas in variant without the partition walls.....	103

OKRAJŠAVE IN SIMBOLI

ADMP	akustični Dopplerjev merilec pretoka
ARSO	Agencija Republike Slovenije za okolje
CAD	Computer Aided Design (računalniško podprto načrtovanje)
DIAL	Differential Absorption LIDAR
DMT	digitalni model terena
DTK	državna topografska karta
EMV	elektro-magnetno valovanje
ESRI	Environmental System Research Institute
EU	Evropska unija
EK	Evropska komisija
FM	fizični model
GIS	geografski informacijski sistemi (globalni sistem pozicioniranja)
HE	hidroelektrarna
KPN	Karta poplavne nevarnosti
KRPN	Karta razredov poplavne nevarnosti
LIDAR	Light Detection And Ranging (lasersko skeniranje)
NM	numerični model
VV	visokovodni

1.0 UVOD

Opredelitev področja dela in opis problematike

Vodni in obvodni prostor je nekaterim pomembna naravna danost, nekaterim pa velik razvojni potencial. Celovito gospodarjenje z vodami obsega cel niz ukrepov in omejitev, s katerimi je mogoče ravnati na dolgi rok kot dober gospodar – uravnovežiti danosti in razvojne cilje oziroma interese. Na eni strani nas tako žene gospodarski interes in želja po ureditvi človeku prijaznega okolja, na drugi pa moramo ohranjati naravo in vodno okolje.

Vode predstavljajo tako razvojni potencial, v primerih visokih voda, neprimernega ravnanja z njimi oziroma poseganja v njihov vodni in obvodni prostor pa lahko tudi ogrožajo človeka in njegovo lastnino. Ena takih nevarnosti ob visokih vodah je tudi poplavljanje vodotokov, ki sodi med največje ujme, katerih intenzivnost in pogostost naraščata. Poleg samih naravnih procesov nevarnosti je lahko povečana ogroženost tudi posledica antropogenih dejavnikov – vse pogostejši nepremišljeni in kapitalsko visoko vredni posegi človeka v obvodni prostor in na poplavne ravnice, povečujejo ranljivost/občutljivost teh območij. Ker na procese naravnih nevarnosti človek nima neposrednega vpliva, lahko ogroženost, katere stopnjo določimo na podlagi ranljivosti in izpostavljenosti nevarnosti, delno umilimo s primerno gradnjo na negativne vplive vode odpornih objektov oziroma s proti-poplavnimi ukrepi, predvsem pa s primernim pristopom k prostorskemu načrtovanju, ki je predvsem s preventivnimi ukrepi usmerjeno v zmanjšanje ranljivosti. Pri tem je treba obravnavati posamezne primere celovito z analizo morebitnih negativnih vplivov na širšem območju gor in dolvodno ter predvsem upoštevati tudi naravne danosti prostora (Rak in sod., 2008).

Z nekaterimi antropogenimi posegi v prostor, npr. z visokovodnimi nasipi, lahko lokalno sicer izboljšamo stanje, posledično pa z zožanjem vodne poti izločimo naravno funkcijo retenzijskih površin. Na ta način na eni strani lahko dvignemo gladine vode v strugi in s tem poslabšamo razmere gorvodno, na drugi strani pa izključevanje retenzijskega prostora pomeni potovanje konice VV vala dolvodno z nezmanjšano ali celo povečano hitrostjo. Ker se retenzija ne polni z vodo, prav tako ne prihaja do zadrževanja vode v njej, zaradi česar se tudi konica VV valov ne znižuje (Sholtes, 2009). Oboje ima negativne posledice za območje ob vodotoku dolvodno. Poplavne površine, posebej kadar predstavljajo velik retenzijski volumen, predstavljajo namreč naravne suhe zadrževalnike, ki se jih danes pogosto uporablja kot možen ukrep za zmanjšanje poplavne nevarnosti (Hill, 2010). Območja, ki imajo to funkcijo že zaradi samih naravnih danosti, je zato smiselno oziroma nujno ohranjati ali pa celo izboljšati njihovo zadrževalno sposobnost.

Na odtočne razmere čez retenzijske površine ima močan vpliv tudi raba prostora. Različne vrste pokrovnosti, različne kmetijske kulture in drugi dejavniki rabe prostora ter spreminjanje ozelenelosti, višine in gostote vegetacije po posameznih letnih časih vplivajo na odtočne razmere, tj. na zadrževanje vode na območju retenzije, na hitrosti in smeri vodnega toka, globine vode in obseg poplavljenosti. Na eni strani to vpliva na stopnjo in obseg poplavne nevarnosti na območju retenzije, na drugi pa ima tudi vpliv na preoblikovanje hidrograma visokovodnega vala, znižanje oziroma zvišanje konice, kot tudi na čas potovanja konice visokovodnega vala čez obravnavani odsek (Anderson, 2009).

V zadnjih 15 letih je bilo narejeno veliko raziskav na temo gospodarjenja s poplavnimi območji na način, ki omogoča tudi blaženje negativnih posledic visokovodnih dogodkov. S pravilno rabo prostora, predvsem obsežnejših poplavnih območij, je mogoče upočasniti

potovanje VV valov čez poplavne površine in s tem zmanjšati pretok v strugi vodotoka ter zakasniti sproščanje voda iz poplavnih površin in izboljšati rabo vode (Nisbet, 2004). Thomas in Nisbet (2007) sta v svoji raziskavi pokazala, da je mogoče z gozdom poraslimi poplavnimi območji povečati zadrževalno sposobnost za 15–71 odstotkov in zakasniti čas potovanja konice za 30–140 minut. Pri raziskavah z enodimenzionalnim (1D) modelom je bilo ugotovljeno, da se je z zmanjševanjem gostote zarasti na poplavnih območjih povečala njihova pretočna sposobnost. Z nadaljnjim zmanjševanjem gostote zarasti in s tem zmanjševanjem hidravlične hrapavosti se poveča območje aktivnih poplavnih površin pri prevajanju vode in hkrati zmanjša pretok v strugi, kar zmanjšuje skupno pretočno sposobnost, medtem pa kote vodne gladine nihajo v zanemarljivem razponu (Helmio, 2002).

Med pretočno sposobnostjo (oz. pretočnostjo) in zadrževalno (oz. retenzijsko) sposobnostjo poplavnih območij obstaja močna povezava. S povečano hidravlično hrapavostjo se zmanjšuje pretočna sposobnost poplavnih površin in povečuje retenzijska sposobnost (Hill, 2010). Manningov koeficient hrapavosti, ki zajema vrsto in gostoto vegetacije, nepravilnosti topografije/batimetrije, nepravilnosti rečnega korita in druge morebitne ovire vodnemu toku, se uporablja kot običajen parameter za upoštevanje hidravlične hrapavosti (Chow, 1959). Pri 1D izračunih pretočnosti Manningova enačba opisuje povezavo vodne gladine, hitrosti in karakteristik rečne struge (Whatmore and Landstrom, 2009).

Namen in cilj magistrskega dela

Ne glede na podrobno obdelano teorijo in prakso v znanstveni in strokovni literaturi se je treba zavedati, da so hidravlični parametri, ki se določajo v postopku umerjanja numeričnega hidravličnega modela, dejansko vplivni parametri modela. Določajo se glede na vhodne podatke kot tudi glede na zasnovo modela, torej so dejansko »povezovalnik« robnih pogojev z modelom. Zato bodo v teoretičnem delu podrobneje predstavljene vsebine o določanju parametrov numeričnega modela s poudarkom na določanju koeficientov hrapavosti in bo opisano numerično hidravlično modeliranje propagacije visokovodnih valov vzdolž struge vodotokov in čez poplavne površine, določanje volumnov retenzijskih površin itd. Iz literature je razvidno, da je bila večina raziskav vpliva hidravlične hrapavosti na propagacijo visokovodnih valov in zadrževalno sposobnost poplavnih površin izdelanih z 1D matematičnimi modeli. Ker gre pri poplavnih dogodkih za tok vode po retenziji, kjer se v veliki meri pojavljajo majhne globine vode in izraziti dvodimenzionalni (2D) tokovi, je jasno, da 1D modeli ne morejo povsem pravilno simulirati dogodkov. Zato so lahko 1D rezultati precenjeni ali podcenjeni in napačno interpretirani. V magistrskem delu je bil zato za simuliranje poplavnih tokov po retenziji uporabljen 2D hidravlični model. Uporaba 2D hidravličnega modela pri modeliranju odprtih vodotokov, določanju poplavne nevarnosti, načrtovanju na območju vodne infrastrukture in drugih prostorskih analizah vodnega in obvodnega prostora postaja stalna praksa oziroma je v nekaterih državah tudi že obvezna.

Cilj magistrskega dela je prikazati, da izbran pristop modeliranja omogoča zanesljivejšo oceno vpliva hidravlične hrapavosti (tj. rabe prostora) na odtočne razmere in da se z uporabo kazalnikov, kot so obseg površine poplavljenih območij (doseg poplavnih linij), volumen retenzijskih površin, potovalni čas konice VV vala skozi obravnavani odsek in vrednost konice izhodnega hidrograma VV vala, lahko ovrednoti vpliv spreminjajoče rabe prostora, zajete s hidravlično hrapavostjo, na odtočne razmere pri VV valovih. Prav tako je bil cilj dela pokazati kvalitativno kot tudi kvantitativno povezavo med hidravlično hrapavostjo in zadrževalno sposobnostjo poplavnih površin, potovalnimi časi in konicami VV valov ter

pokazati, v kolikšni meri je mogoče z rabo prostora vplivati na zadrževalno sposobnost retenzijskih površin in posledično na poplavno varnost na dolvodnih odsekih vodotoka. Tudi v Sloveniji se 2D modeliranje vse bolj uveljavlja, kot kaže primer hibridnega hidravličnega modeliranja pri umeščanju HE na Spodnji Savi (Hidroinštitut, 2011). Zato se je teoretični pristop preveril tudi na praktičnem primeru za Krško-Brežiško polje. Preverjen je bil vpliv spreminjajoče hidravlične hrapavosti na obseg območja nastopa poplavne nevarnosti, potovanje konice visokovodnih valov in njegovo preoblikovanje zaradi aktivacije retenzijskega prostora.

Hipoteza, metoda in struktura dela

V magistrskem delu želimo preveriti naslednji trditvi:

1. Z modeliranjem poplavnih tokov z 2D modelom je možno natančneje kot z 1D modelom analizirati in ovrednotiti vpliv spreminjanja hidravlične hrapavosti zaradi sprememb v rabi prostora oziroma sprememb zarasti na odtočne razmere po retenziji.
2. Z ustrezno rabo prostora je možno vplivati na pretočno sposobnost poplavnih površin in tako vsaj ohranjati zadrževalno sposobnost retenzije, ter na preoblikovanje, znižanje konic in potovalne čase VV valov.

V teoretičnem delu so podana izhodišča s področja modeliranja odprtih vodotokov, določitev vhodnih parametrov in kritična ocena njihove natančnosti. Podan je pregled strokovne literature, stanja tehnike in uveljavljenega pristopa k modeliranju odtočnih razmer čez poplavne površine ter glavne strokovne ugotovitve in stališča s tega raziskovalnega področja.

V praktičnem delu je bilo v prvi fazi za območje s poenostavljeno geometrijo s primerjalno analizo preoblikovanja izhodnega hidrograma in kontrolnih parametrov ugotovljen vpliv spreminjajoče hidravlične hrapavosti na potovanje visokovodnih valov. Ugotovitve, dobljene iz prve faze, so bile v drugi fazi preverjene na primeru Krško-Brežiškega polja, ki predstavlja veliko poplavno območje in retenzijski prostor reke Save. Na podlagi umerjenega modela je bila izvedena serija izračunov za visokovodne valove različnih volumnov, različnih časov trajanja in z različnimi konicami, pri čemer je bil analiziran vpliv spreminjanja koeficientov hrapavosti glede na trenutno in možno spreminjanje vegetacije glede na predpostavljeni obseg zarasti. V nadaljevanju je bila izvedena analiza in sinteza rezultatov, kjer se je analiziral trend spreminjanja celotne poplavne površine, povprečnih in maksimalnih hitrosti vode in spreminjanja območij posameznih razponov vodne globine, kot je to določeno v predpisih o določanju poplavne nevarnosti. Predvsem pa je bil glavni cilj magistrskega dela ugotoviti, v kakšni meri hidravlična hrapavost retenzijskih površin vpliva na zadrževalno sposobnost retenzije, na preoblikovanje hidrograma, znižanje konice in čas potovanja visokovodnih valov.

2.0 TEORETIČNA IZHODIŠČA

Za celovito razumevanje, reševanje in analiziranje obravnavane problematike je treba najprej preučiti teoretična izhodišča in pregledati že opravljeno delo na tem področju. Zato bodo predstavljene osnovne zakonitosti in specifični postopki hidravličnega modeliranja odprtih vodotokov, od zajema podatkov topografije, določitve hidravličnih parametrov z meritvami v naravi oziroma dobljenimi na podlagi empiričnih raziskav, do vzpostavitve hidravličnega modela, njegovega umerjanja, validacije in verifikacije. Predstavljeni bodo različni pristopi modeliranja, od fizičnih modelov, različnih tipov matematičnih modelov, ki so danes v splošni strokovni rabi, do sodobnih hibridnih hidravličnih pristopov. Podane bodo teoretične podlage potovanja visokovodnih valov, določitve retenzijskih volumnov in določevanja vpliva zadrževanja voda na retenziji, zakasnjeno pretakanje in postopno sproščanje/vračanje voda v strugo vodotoka in posledično znižanje konice visokovodnih valov ter upočasnjeno potovanje konice. V nadaljevanju bodo predstavljena programska orodja za matematično modeliranje odprtih vodotokov, njihova primerjava s podanimi prednostmi in slabostmi ter ocena primernosti za simuliranje posameznih pojavov iz narave.

2.1 Hidravlika vodotokov

Reševanje in opisovanje hidravličnih problemov vodotokov (tj. toka s prosto gladino) temelji na elementarnih zakonih o ohranitvi mase, ohranitvi gibalne količine in ohranitvi energije. Osnovne enačbe gibanja je možno izpeljati na več načinov, v različnih koordinatnih sistemih (kartezični, krivočrtni ortogonalni) in pri tem uporabiti različno zahtevne matematične pristope. Pri obravnavi praktičnih primerov, ko je treba upoštevati še robne in začetne pogoje ter dinamiko pojava, pa je običajno treba poiskati ustrezne poenostavitve, tj. domneve in povprečenja, da se lahko izračuna parametre toka oziroma dobijo posamezne rešitve za dane razmere (Steinman, 2010).

2.1.1 Osnovna hidravlična načela

Osnovne enačbe dinamike tekočin so izpeljane iz ohranitvenih zakonov mase, gibalne količine, energije in snovi. Osnovo za izpeljavo ohranitvenih zakonov pa predstavlja t. i. Reynoldsov prenosni teorem za nestisljivo tekočino, ki pravi, da je skupna sprememba spremenljivke v nekem območju (volumnu) možna le, če obstajajo izviri ali ponori te spremenljivke v tem istem območju (Rodi, 1993).

V nadaljevanju so podane osnovne enačbe, ki se uporabljajo za račun gibanja tekočine in transporta snovi znotraj tekočine, to so zakoni o ohranitvi mase, gibalne količine in energije.

2.1.1.1 Zakon o ohranitvi mase

Osnovna oblika kontinuitetne enačbe, ki izhaja iz pogoja, da je sprememba mase v izbranem volumnu enaka razliki dotoka in iztoka na njegovi površini, je:

$$\iint_S \rho \cdot \vec{v} \cdot dS = - \frac{\partial}{\partial t} \iiint_V \rho \cdot \vec{v} \cdot dV \quad (1)$$

kjer so:

S ... sklenjena ploskev,

ρ ... gostota tekočine,
 \vec{v} ... vektor hitrosti,
 t ... čas,
 V ... obravnavan volumen.

Diferencialna oblika kontinuitetne enačbe za prostorski (3D) tok je:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \cdot \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = 0 \quad (2)$$

kjer pomeni:

v_x ... komponenta hitrosti v x smeri,
 v_y ... komponenta hitrosti v y smeri,
 v_z ... komponenta hitrosti v z smeri.

Kadar lahko tokovne razmere poenostavimo v takšni meri, da jih dovolj natančno opišemo z 2D pristopom, govorimo o ravninskem toku. Le-tega lahko obravnavamo kot tok v vertikalni ravnini (npr. stratifikacija) ali v horizontalni ravnini (npr. tok na poplavnih območjih).

2.1.1.2 Zakon o ohranitvi gibalne količine (dinamična enačba)

Dinamična enačba ima v osnovi naslednjo obliko:

$$\iiint_V \frac{d\vec{v}}{dt} \cdot \rho \cdot dV = \iiint_V \vec{F} \cdot \rho \cdot dV + \iint_S [\sigma] \cdot d\vec{S} \quad (3)$$

kjer pomeni:

V ... obravnavan volumen,
 \vec{v} ... vektor hitrosti,
 t ... čas,
 ρ ... gostota tekočine,
 \vec{F} ... rezultanta delujočih sil,
 S ... sklenjena ploskev,
 $[\sigma]$... tenzor napetosti.

Enačba izhaja iz domneve, da lahko sile, ki na izbrani volumen delujejo, razdelimo na masne in površinske.

Če upoštevamo lastnosti tekočin in preoblikujemo posamezne člene, dobi enačba obliko, imenovano Navier-Stokesova enačba za realne tekočine:

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F} + \frac{1}{\rho} \cdot \text{div}[\sigma] = \vec{F} - \frac{1}{\rho} \cdot \text{grad}(p) + \nu \cdot \Delta \vec{v} + \frac{\nu}{3} \cdot \text{grad}(\text{div}(\vec{v})) \quad (4)$$

kjer pomeni:

ν ... koeficient kinematične viskoznosti,

p ... tlak.

Če upoštevamo še domnevo, da je tekočina

- nestisljiva: $\text{div}(\vec{v}) = 0$ in
- idealna: $\nu = 0$,

dobi dinamična enačba za prostorski tok naslednjo obliko:

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F} - \frac{1}{\rho} \cdot \text{grad}(p) \quad (5)$$

To enačbo uporabljamo pri hipnih spremembah v vodnem toku (npr. vodni skok).

2.1.1.3 Zakon o ohranitvi energije

Zakon o ohranitvi energije pove, da na spremembo celotne energije v sistemu vplivata dovedena (oziroma odvedena) toplota in sistemu odvzeta (oziroma dodana) energija zaradi dela, ki ga sistem opravi na okolico (Steinman, 2010). Tako ima enačba zakona o ohranitvi energije sledečo obliko:

$$\frac{dE}{dt} = \frac{dQ}{dt} - \frac{dA}{dt} \quad (6)$$

kjer pomeni:

E celotna energija sistema,

Q energija dovedene toplote,

A odvzeta (dodana) energija zaradi opravljenega dela.

Opravljenno delo lahko razčlenimo glede na izvor in tako dobimo obliko enačbe:

$$\frac{dE}{dt} = \frac{dQ}{dt} - \frac{dA_p}{dt} - \frac{dA_{tr}}{dt} - \frac{dA_m}{dt} \quad (7)$$

Kjer pomeni:

A_p ... delo normalnih tlakov,

A_{tr} ... delo strižnih sil,

A_m ... mehansko delo.

V najenostavnejših primerih, ko lahko privzamemo, da je tok stacionaren in enodimenzionalen, kar pomeni, da so količine parametrov enakomerno razporejene po prerezu vzdolž smeri toka, lahko operiramo z njihovimi povprečnimi vrednostmi. Tako dobimo obliko enačbe:

$$\frac{dQ}{dt} - \frac{dA_m}{dt} = \rho \cdot Q \cdot \left(e_{ir} + \frac{p}{\rho} + g \cdot h + \frac{v^2}{2} \right)_{izhodno} - \rho \cdot Q \cdot \left(e_{ir} + \frac{p}{\rho} + g \cdot h + \frac{v^2}{2} \right)_{vhodno} \quad (8)$$

Pri čemer e_{ir} predstavlja nepovratno notranjo energijo na enoto mase.

Pri analiziranju hidravlike odprtih vodotokov, kjer ni hidravličnih ali hidroenergetskih strojev, razlike med dovedeno oziroma odvzeto energijo zaradi mehanskega dela ni. Energijsko bilanco med dvema prečnima prerezoma lahko tako predstavimo s pomočjo energijske enačbe. Pri tem preoblikujemo člene, da dobijo dimenzije oblike enote dolžine [m]:

$$\frac{p_1}{\rho \cdot g} + h_1 + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} = \frac{p_2}{\rho \cdot g} + h_2 + \frac{v_2^2}{2 \cdot g} + \Delta E_{ir} \quad (9)$$

kjer predstavlja ΔE_{ir} spremembo vseh oblik nepovratnih notranjih energij.

2.1.2 Globinsko povprečne enačbe (Shallow water equations)

Pri številnih primerih lahko pri obravnavanju plitvega vodnega toka, kot je tudi tok vode po poplavnih površinah, vertikalno komponento hitrosti vode zanemarimo. Z integracijo tridimenzionalnih enačb po vertikalni smeri dobimo dvodimenzionalno obliko Navier-Stokesovih enačb.

Pri tem upoštevamo domneve (Rajar, 1980):

- Tok je v tlorisu dvodimenzionalen, kar pomeni, da voda teče le v smeri osi x in y .
- Vertikalna komponenta hitrosti je zanemarljivo majhna v primerjavi s komponento hitrosti v x in y smeri:
 $v_z \approx 0$.
- Porazdelitev hitrosti po globini je enakomerna, zaradi česar je porazdelitev pritiskov po globini hidrostatična.
- Naklon dna je majhen, tako da z zadovoljivo natančnostjo velja zamenjava:
 $I_{0,x} = tg(\beta_x) \approx \sin(\beta_x)$,
 $I_{0,y} = tg(\beta_y) \approx \sin(\beta_y)$.
- Notranjega trenja v tekočini ni (oz. je zanemarljivo majhno); trenje med tekočino in steno kanala pa je obravnavano kot zunanja sila.

Zgoraj navedene enačbe lahko za globinsko povprečen dvodimenzionalen tok tako zapišemo:

- **Zakon o ohranitvi mase:** Kontinuitetna enačba

$$\frac{\partial(v_x \cdot h)}{\partial x} + \frac{\partial(v_y \cdot h)}{\partial y} + \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \quad (10)$$

kjer h predstavlja globino vode

- **Zakon o ohranitvi gibalne količine (dinamični enačbi):**

$$\begin{aligned}\frac{Dv_x}{Dt} &= F_x - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \\ \frac{Dv_y}{Dt} &= F_y - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial y}\end{aligned}\tag{11}$$

Dinamični enačbi se lahko razvije v naslednjo obliko (Rajar, 1980):

$$\begin{aligned}\frac{\partial v_x}{\partial t} + \frac{\partial v_x}{\partial x} \cdot v_x + \frac{\partial v_x}{\partial y} \cdot v_y + g \cdot \frac{\partial h}{\partial x} &= g \cdot \left(I_{0,x} - \frac{n_G^2 \cdot v_x \cdot \sqrt{v_x^2 + v_y^2}}{h^{4/3}} \right) \\ \frac{\partial v_y}{\partial t} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \cdot v_x + \frac{\partial v_y}{\partial y} \cdot v_y + g \cdot \frac{\partial h}{\partial y} &= g \cdot \left(I_{0,y} - \frac{n_G^2 \cdot v_y \cdot \sqrt{v_x^2 + v_y^2}}{h^{4/3}} \right)\end{aligned}\tag{12}$$

kjer so:

v_x ... komponenta hitrosti v x smeri,

v_y ... komponenta hitrosti v y smeri,

$I_{0,x}$... padec dna v x smeri,

$I_{0,y}$... padec dna v y smeri,

n_G ... Manningov koeficient trenja.

Vidimo, da izraza v oklepaju podajata odstopanja dejanskega naklona energetske črte od naklona pri stalnem, enakomernem toku (I_0), seveda v dveh smereh x, y .

2.2 Hidravlično modeliranje

Za opisovanje pogosto zapletenih pojavov hidrodinamike in reševanje različnih problemov na področju hidrotehnike se uporabljajo fizični ali numerični modeli, pri najbolj kompleksnih primerih tudi kombinacija obeh. Medtem ko imajo fizični modeli dolgoletno tradicijo, so se numerični modeli razvili v zadnjih desetletjih prejšnjega stoletja z razcvetom računalništva. Kljub dovršenosti numeričnih modelov, le-ti ne morejo popolnoma izpodriniti fizičnih modelov, ki so še vedno nepogrešljivi pri simuliranju kompleksnih pojavov hidrodinamičnih razmer, kot so na primer tok čez hidrotehnične objekte, kjer se pojavljajo izrazite tridimenzijske razmere z močnim vplivom turbulence. Na drugi strani pa je prednost numeričnih modelov relativno hitra vzpostavitev, možnost analiziranja številnih računskih variant in shranitev modela za morebitno kasnejšo ponovljivost izračunov oziroma spreminjanje, dopolnjevanje in nadgrajevanje variantnih rešitev. Glede na razpoložljivost vhodnih podatkov, vrsto in kompleksnost obravnavanega primera ter želene cilje, je treba že v fazi zbiranja podatkov in priprave zasnove poteka raziskave dobro preučiti prednosti posameznih hidravličnih modelov in izbrati najprimernejši pristop. Ne glede na pristop pa je treba v modelno raziskavo vključiti ključne faze modeliranja, ki zagotavljajo verodostojne rezultate želene natančnosti. Med te faze, ki so podrobneje opisane v nadaljevanju, sodijo izbira in zasnova modela, zbiranje in obdelava vhodnih podatkov, priprava geometrije in robnih ter začetnih pogojev, umerjanje in verifikacija modela, analiza občutljivosti in na koncu predvsem tudi kritična presoja rezultatov.

2.2.1 Postopki in procesi hidravličnega modeliranja

Ne glede na izbiro vrste modela, tipa obravnavanega problema ali želenih rezultatov, hidravlično modeliranje sestoji iz zaporedja faz izvedbe raziskave. V nadaljevanju so opisani potrebni postopki inženirskega obravnavanja problema s hidravličnim modelom, ki omogočajo izvedbo zanesljive in verodostojne hidravlične raziskave.

- **Zbiranje in obdelava podatkov**

Natančno poznavanje in definiranje problema ter ocena sprejemljivih poenostavitev in domnev nam narekuje zahtevan obseg in vrsto podatkov. Prvi sklop vhodnih podatkov vključuje geometrijske podatke, s katerimi opišemo topografijo terena poplavnih površin, batimetrijo, tj. del terena pod vodno gladino, in geometrijo objektov v vodnih telesih in zunaj njih, ki bi lahko pomembno vplivali na odtočne razmere in končne rezultate. Geometrijske podatke pridobimo z različnimi tehnikami daljinskega zaznavanja, iz projektne dokumentacije objektov in ureditev itd. V drugi sklop podatkov pa sodijo hidrološki in hidravlični podatki, ki omogočajo definiranje robnih, notranjih in začetnih pogojev, umerjanje ter verifikacijo modela. Med te podatke sodijo nivogrami in hidrogrami, meritve globinskih, hitrostnih in tlačnih polj, tipi in količine suspendiranih snovi, prodonosnosti itd. Količina podatkov pa še ne zagotavlja kakovosti raziskave. Podatke je treba skrbno analizirati, kritično ovrednotiti njihovo točnost in zanesljivost ter jih smiselno vključiti v proces modeliranja. Iz količine in kakovosti podatkov je treba oceniti zadostnost le-teh za želeno vrsto in namen modelne raziskave ter določiti ciljno natančnost rezultatov.

- **Izbira in vzpostavitev modela**

Kompleksnost in obsežnost obravnavanega problema ter želena točnost rezultatov narekujejo vrsto modela, ki bo omogočal simuliranje pojava v zahtevanih okvirih. Skladno s kompleksnostjo modela je potreben tudi kakovosten in zadosten obseg podatkov. Če ni zadovoljivih vhodnih podatkov, je treba uporabiti model z dopustnimi poenostavitvami, ki še omogočajo zadovoljivo oziroma zahtevano natančnost. V prvem koraku je zato običajno potrebna odločitev med fizičnim in numeričnim modelom.

Ne glede na vrsto modela se v prvem koraku vzpostavitve modela pripravi geometrija obravnavanega območja. Pri tem gre za posnemanje topografije terena v pomanjšanem merilu pri fizičnem modelu oziroma upodobitev z računsko mrežo pri numeričnem modelu. Pri tem se določi tudi zaprte in odprte meje modela ter definira robne pogoje ter pri nestalnem toku še začetne pogoje.

- **Umerjanje in verifikacija modela**

V postopku umerjanja se poskuša s spreminjanjem koeficientov in parametrov modela čim bolj približati merjenim veličinam preteklih dogodkov v naravi in/ali na fizičnem modelu. Pri tem mora biti prilagajanje parametrov in koeficientov v smiselni razponi vrednosti in ne orodje za prisilno doseganje obnašanja modela v skladu s pričakovanji. Tako podatke, na katere model umerjamo, kot tudi obnašanje modela in verodostojnost rezultatov je treba z inženirsko presojo kritično ovrednotiti, s čimer preprečimo nesmiselne rezultate. S kritično kontrolo rezultatov namreč lahko tudi še v tej fazi odkrijemo grobe napake pri meritvah, njihovo sistemsko negotovost ali napake pri zasnovi in vzpostavitvi modela. Tako pri fizičnih kot numeričnih modelih vodotokov je glavni parameter, ki se ga spreminja v fazi umerjanja,

hrapavost ostenja rečnega korita in poplavnih površin. Pri fizičnih modelih se za to uporabljajo različne frakcije peska in proda, pomešane s cementnim mlekom, pri numeričnih modelih pa je to večinoma koeficient hrapavosti. Pri numeričnih modelih se poleg koeficienta hrapavosti v postopku umerjanja prilagajajo tudi koeficienti lokalnih izgub zaradi zožitev in razširitev, koeficienti prelivov in prepuštov, koeficient turbulentne viskoznosti itd.

Če je na voljo dovolj podatkov o parametrih iz drugih scenarijev ali dogodkov, se umerjeni model v naslednji fazi preizkusi še z naborom podatkov, ki v postopku umerjanja niso bili upoštevani. Pri tem je smiselno, da podatki, uporabljeni v postopku verifikacije, velikostno odstopajo od podatkov, uporabljenih pri umerjanju. Na ta način lahko bodisi potrdimo veljavnost modela na nekem spektru robnih pogojev (npr. za pretoke različnih povratnih dob) ali pa ovržemo njegovo verodostojnost zunaj območja pogojev umerjanja.

- **Analiza občutljivosti**

Analiza občutljivosti se izvaja pri numeričnem modeliranju, posebej v primerih, ko ni na voljo dovolj podatkov za verifikacijo modela. Analiza občutljivosti je empirično orodje, s katerim se z nizom poskusov ugotavlja vpliv spreminjanja posameznih vhodnih parametrov na rezultate modela. Pri hidravličnem modeliranju lahko pogosto nastopajo vhodni podatki z relativno veliko merilno negotovostjo, ki je posledica neugodnih razmer, v katerih se meritve izvajajo. Na primer v času visokovodnih dogodkov imamo opravka z nestalnimi razmerami in spremljajočimi motečimi pojavi (vrtinčenje, pulzacije hitrosti, valovanje itd.), ki povečujejo razpon merilne negotovosti. Prav tako lahko prihaja do večjih nepravilnosti pri določanju koeficientov in parametrov modela (npr. koeficienti prelivov, hrapavosti itd.), ki jih v naravi ni mogoče izmeriti in se izberejo glede na priporočljive vrednosti predhodnih raziskav. Pri hidravličnem modeliranju ima lahko nezanesljivost podatkov za določanje robnih pogojev in umerjanje modela velik vpliv na rezultate določanja odtočnih razmer (Hall, 2005). S postopkom analize občutljivosti pa se lahko ugotavlja dejanski vpliv netočnosti posameznih merjenih ali empirično določenih vhodnih podatkov na končne rezultate hidravličnega modela.

- **Uporaba modela in kritična presoja rezultatov**

Šele umerjen in verificiran model je primeren za izvedbo simulacij različnih scenarijev robnih pogojev, hidravlično analizo predvidenih variacij prostorskih ureditev, nadgradnje modela itd. Z dobrim poznavanjem simuliranega pojava in obnašanja modela lahko dobljene rezultate tudi kritično ocenimo, pri čemer nam je lahko v pomoč tudi modeliranje pojava z različnimi pristopi in modifikacijami določenih parametrov in koeficientov. Analiza in kritična presoja rezultatov je nujna pred njihovo uporabo v nadaljnjih fazah načrtovanja objektov in ureditev oziroma pri prostorskem načrtovanju.

2.2.2 Izbira primerne modela

Glede na razpoložljive podatke, njihovo (ne)gotovost, želen red točnosti rezultatov in kompleksnost obravnavanega primera ter poznavanje njegovih bistvenih fizikalnih pojavov in opredelitvijo ključnih ciljev se odloči za najprimernejšo vrsto modela. Pri tem je smiselno oceniti prednosti in slabosti posameznih modelov in izbrati najpreprostejši model, ki še omogoča simuliranje pojava v naravi z želeno točnostjo (DHD, 2013). V nadaljevanju je podan opis fizičnih in numeričnih modelov.

2.2.2.1 Fizični modeli

Fizični modeli imajo dolgoletno tradicijo in so bili dolgo časa edina možna oblika posnemanja procesov in pojavov iz narave. Temeljijo na modelni podobnosti pojava v naravi in na modelu. Pri fizičnem modelu gre praviloma za izdelavo in prikaz stanja v naravi v pomanjšanem merilu, izjemoma se raziskava izvaja za prototip ali celo v povečanem merilu. Pri tem je lahko uporabljeno nepopačeno ali popačeno (distorzirano) modelno merilo. Z distorziranim modelnim merilom, kjer je uporabljeno različno merilo v vodoravni in navpični smeri (višinsko popačen model), se je mogoče izogniti neugodnim pojavom, na primer pri modeliranju toka po poplavnih površinah (preveč) plitvemu toku oz. vplivu površinskih napetosti, in zagotoviti ustrezno zanesljive meritve poteka gladin oz. globin vode. Za simuliranje prodonosnosti in preoblikovanje rečne morfologije se uporabljajo fizični modeli z gibljivim dnom.

Kljub delni nadomestitvi fizičnih modelov na nekaterih področjih hidravličnih raziskav z numeričnimi modeli so fizični modeli še vedno nepogrešljivi v določenih segmentih hidravličnega modeliranja. Z razvojem numeričnih modelov se pomen fizičnih modelov ne zmanjšuje, temveč se le spreminja njihova vloga. Največ se uporabljajo za modeliranje pojavov, ki jih z matematičnimi modeli ni mogoče simulirati oziroma jih ni mogoče simulirati z zahtevano natančnostjo, ter za vzporedno modeliranje z numeričnimi modeli. Takšen pristop imenujemo hibridno hidravlično modeliranje (HHM), pri katerem fizični modeli služijo za pridobivanje dodatnih podatkov za umerjanje in verifikacijo numeričnih modelov, ter za preveritev končnih variant in rezultatov, določenih z numeričnimi modeli.

Slika 1 prikazuje fizični model odseka reke Save mimo Krškega, z jezovno zgradbo HE Krško in načrtovanim mostom obvozne ceste mimo Krškega.



Slika 1: Fizični model odseka reke Save nad mestom Krško z jezovno zgradbo HE Krško in načrtovanim mostom regionalne ceste Krško–Brežice (Hidroinštitut, 2011).

Figure 1: Physical model of the Sava River reach upstream of Krško city, with the weir of HPP Krško and planned bridge of regional road Krško-Brežice (Hidroinštitut, 2011).

Za preračun na fizičnem modelu izmerjenih veličin na stanje v naravi je treba upoštevati zakone modelne podobnosti, ki podajo razmerja dolžin, hitrosti in sil, s čimer se zagotavlja podobnost oblike (*geometrijska podobnost*), podobnost gibanja (*kinematična podobnost*) in podobnost sil (*dinamična podobnost*). Razmerje dimenzij v naravi in dimenzij na modelu se zagotavlja z geometrijsko podobnostjo. Popačenje distorziranih modelov se nanaša na geometrijsko podobnost, torej je treba pri tem upoštevati različno geometrijsko merilo za vodoravne dimenzije in za dimenzije v vertikalni smeri. S kinematično podobnostjo se na modelu ohranja geometrijska slika tokovnic in razmerja karakterističnih hitrosti v naravi in modelu. Tretje merilo modelne podobnosti je dinamična podobnost, ki zahteva ohranjanje razmerij sil, ki vplivajo na gibanje oziroma razmerje mas, vključenih v gibanje (Prešeren, 2005).

2.2.2.2 Numerični hidravlični modeli

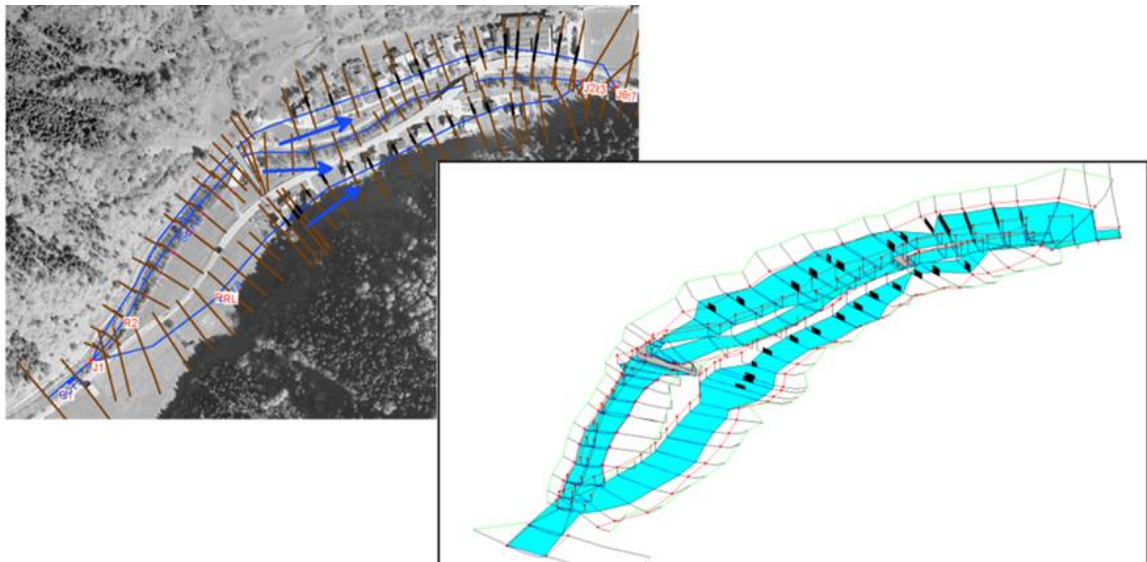
Začetki matematičnega modeliranja odprtih vodotokov segajo v 19. stoletje, ko je Francoz J. B. Belanger razvil postopek za reševanje sistema enačb za protitočni račun energijskih izgub (backwater equation) stalnega, mirnega in postopno spreminjajočega se režima toka. Pri tem je za integracijo enačb uporabil metodo končnih razlik (Chanson, 2009). Matematične in hidravlične zakonitosti, na katerih temeljijo numerični modeli, so tako sicer že dolgo znane, vendar reševanja sistema enačb ni bilo mogoče obvladati v časovno sprejemljivih okvirih do razvoja računalniške tehnologije in numeričnih metod. Pri numeričnih modelih gre za konceptualne modele, saj jedro modelov predstavlja sistem enačb točno določenih procesov, dopolnjen z nekaterimi empiričnimi členi, ki zajamejo še vpliv drugih procesov, ki niso zajeti v sistem enačb. Sistem enačb se rešuje z numeričnimi iteracijskimi metodami. Prednost konceptualnih modelov je njihova veljavnost na celotnem območju pojava, z zanemarjanjem ali dodajanjem določenih členov pa model tudi prilagajamo zahtevam po stopnji natančnosti (DHD, 2012)

Prednost numeričnih modelov v primerjavi s fizičnimi modeli je predvsem cena izvedbe, hitrost raziskave v primeru številnih modifikacij geometrijskih podatkov in robnih ter notranjih pogojev. Matematični model je sestavljen iz dveh sklopov. Prvi sklop sestavljajo matematične enačbe, s katerimi so opisani pojavi in procesi modeliranja. Sistem enačb je zapisan v numerični algoritmi, ki omogoča reševanje tega sistema. Če gre za komercialni model, je ta del modela uporabniku nedostopen in do njega posredno dostopa po (grafičnem) vmesniku. Pred samo izbiro modela je zaradi onemogočenega spreminjanja oziroma razvijanja matematičnega in numeričnega dela modela nujno dobro poznavanje problema oziroma pojava ter modela, ki ga želimo uporabiti. Glede na zahtevnost problema in zahtevane točnosti rezultatov se lahko odločimo za nič-, eno-, dvo- ali tridimenzionalni model. Numerični modeli danes že omogočajo simuliranje zelo zapletenih in kompleksnih pojavov vodnega toka in spremljajočih oziroma posledičnih pojavov in procesov, kot so transport nekohezivnih sedimentov, transport raztopljenih in suspendiranih snovi, simuliranje ekološko pomembnih parametrov itd. Danes je na voljo cela paleta najrazličnejših modelov, pri izboru pa se odločimo na podlagi analize področja uporabe, vrste problematike, glavne simulirane in spremljajoče procese in pojave, razpoložljivih podatkov in zelene natančnosti

itd. Glede na število upoštevanih komponent hitrosti pa jih lahko delimo na eno-, dvo- in tridimenzionalne.

- **Enodimenzionalni model**

Numerično modeliranje vodotokov se je pričelo z enodimenzionalnimi modeli, pri katerih so bile upoštevane številne domneve (stalni enakomerni tok, mirni režim toka, enostavni pretočni prerezi z enakomerno porazdelitvijo hitrosti itd.). Kasnejši razvoj modelov je prinesel številne dodatne možnosti. Tako danes enodimenzionalni modeli omogočajo simuliranje mirnega, mešanega in deročega režima toka pri stalnih in nestalnih pogojih, razdelitev pretočnega prereza na več segmentov (lamele za strugo in poplavne površine), v katerih se upoštevajo različni hidravlični parametri. Omogočajo tudi simuliranje hipnih sprememb pretočnega prereza in hidravlične razmere na različnih hidrotehničnih objektih ter simulirajo njihovo delovanje oziroma obratovanje.



Slika 2: Primer ločenega modeliranja toka v glavni strugi in vzporednih tokov v obvodnem prostoru (Rak in sod., 2008b).

Figure 2: An example of separated modeling of the stream in main channel and the parallel streams on flooded area (Rak et. al. 2008b).

Razdelitev pretočnega prereza na strugo in poplavna območja sicer omogoča analizo odtočnih razmer na odsekih vodotokov s poplavnimi ravnici, vendar pa so enodimenzionalni modeli za obravnavanje takšnih območjih le pogojno uporabni. Na poplavnih površinah se praviloma pojavljajo izraziti dvodimenzionalni tokovi vode, katerih z enodimenzionalnimi modeli, ki upoštevajo le eno komponento hitrosti vode, ni mogoče dovolj natančno simulirati (Hubbard, 2001). Kot je prikazano na sliki 2, je vzporedne vodne tokove, ki se pojavijo zunaj glavne struge vodotoka, mogoče obravnavati z vejičastim modelom, če ni povratnih tokov. Pri tem je komunikacija med posameznimi vejami simulirana z razcepi, sotočji in odtokom vode čez bočne prelive. Takšen pristop se imenuje "kvazi 2D model" (Willems et al., 2001).

- **Dvodimenzionalni model**

Za modeliranje odprtih vodotokov, določanje poplavne nevarnosti, načrtovanje na območju vodne infrastrukture in drugih prostorskih analizah vodnega in obvodnega prostora, postaja uporaba 2D modelov stalna praksa, v nekaterih državah tudi že predpisana obveza. Na območjih, kjer se pojavijo izrazite dvodimenzionalne tokovne razmere, z 1D modelom namreč ni mogoče simulirati odtočnih razmer z zadovoljivo natančnostjo, kar lahko vodi v precenjene ali podcenjene ocene nevarnosti ter posledično napačno načrtovanje in omejevanje rabe prostora, projektiranje zaščitnih ukrepov itd. Pri 2D modelih poteka račun z uporabo računske mreže, kjer se za posamezen element (celica, vozlišče) iteracijsko izračuna globina vode in povprečne komponente hitrosti vode v dveh smereh. Porazdelitev tlakov po globini je običajno upoštevana kot hidrostatična.



Slika 3: Levo – DMT gradbene jame HE Brežice; desno – isto območje, zajeto z numerično mrežo 2D hidravličnega modela (UL FGG, KMTe, 2012).

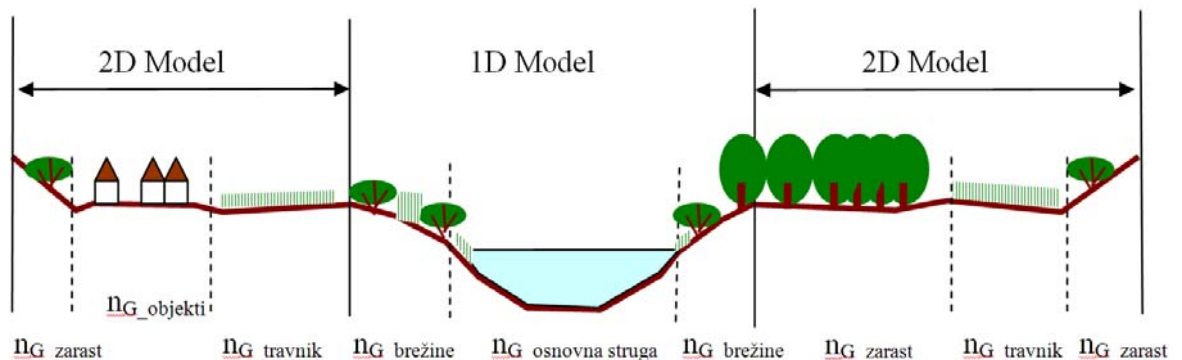
Figure 3: Left – an orthophoto of the construction pit of HPP Brežice; right – a generated mesh of the 2D hydraulic model (UL FGG, KMTe, 2012).

Kljub že pred časom postavljenim temeljem teoretičnih izhodišč (Rajar, 1980; Abbott et al., 1981) in številnim prednostim, ki jih 2D modeli prinašajo na področje hidravličnega modeliranja, če se pojavljajo 2D odtočne razmere, pa so 2D hidravlični modeli dosegli širšo uporabo šele z razvojem naprednejše računalniške tehnologije in s tem možnostjo izvedbe obsežnih računskih simulacij v sprejemljivem času. Natančnost 2D modelov je namreč odvisna tudi od natančnosti upodobitve topografije, pri čemer pa se z zmanjšanjem dimenzij osnovnih računskih elementov povečuje število izračunanih parametrov, kar povečuje računski čas.

- **Kombinirani eno- in dvodimenzionalni model**

Na trgu so danes na voljo tudi številni hidravlični modeli, ki združujejo eno- in dvodimenzionalne modele, pri čemer se izkoristijo prednosti posameznih modelov. Z 1D modelom je možno dovolj natančno simulirati tokovne razmere v strugi, kjer se večinoma pojavljajo hitrosti vodnega toka v eni smeri, ob tem pa je možno analizirati vpliv različnih

objektov (mostovi, prepusti itd.) oziroma simulirati dinamično delovanje objektov s hidromehansko opremo (jezovne zgradbe, zapornični elementi itd.), ki so običajno preizkušani na fizičnih hidravličnih modelih. Iz preteklih raziskav je na voljo veliko rezultatov, uporabnih za 1D izračune, saj podajajo lastnosti objekta ali npr. posameznega prelivnega polja v celoti in ne namenjenih za 2D analize.



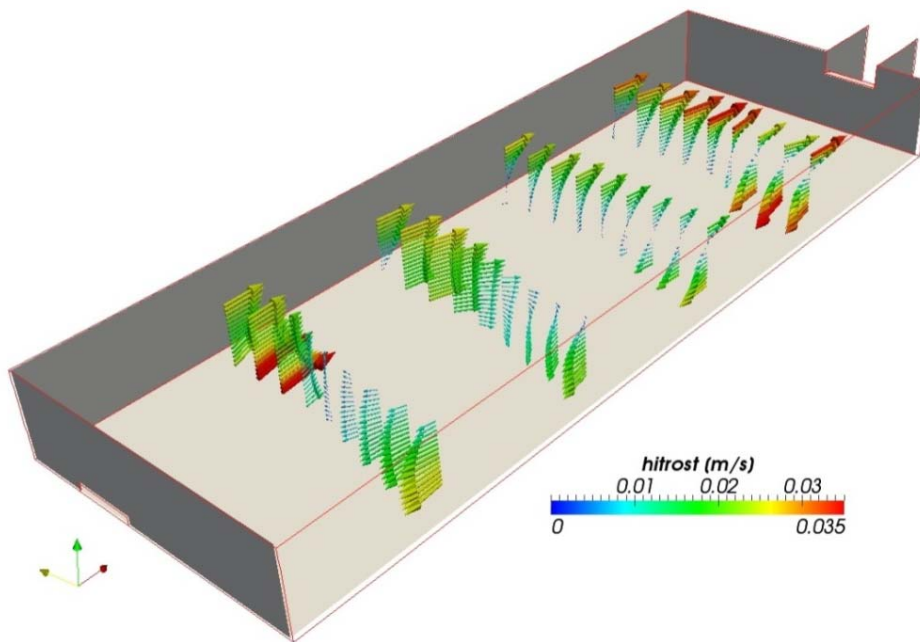
Slika 4: Zasnova numeričnega modela, ki združuje 1D in 2D model (Mlačnik in sod. 2011).

Figure 4: Design of a numerical model, which couples 1D and 2D model (Mlačnik et. al. 2011).

Povezani 1D-2D modeli predstavljajo učinkovito orodje za simuliranje poplavnih scenarijev na širših območjih, kjer je glavni cilj analiziranje glavnih smeri toka po poplavnih površinah, globine in hitrosti vode ter obseg poplavljanja. Manj primerni pa so za analiziranje lokalnih pojavov na stikih med 1D in 2D modelom (Weisgerber et al., 2010), tj. na prehodu iz brežine struge v retenzijo.

- **Tridimenzionalni model**

Tridimenzionalni (3D) modeli se pri modeliranju odprtih vodotokov uporabljajo še razmeroma redko. Poleg omejitev računalniške opreme, ki še ne omogoča računa daljših odsekov vodotokov z gostejšo računsko mrežo v treh dimenzijah in z zahtevano primerno natančnostjo, se omejitve pojavljajo tudi pri količini in kakovosti vhodnih podatkov za vzpostavitev, umerjanje in verifikacijo modela. Tridimenzionalni modeli se tako večinoma uporabljajo na krajših odsekih vodotokov, kjer prihaja do izrazitih tridimenzionalnih hidravličnih razmer. Področje njihove uporabnosti je tudi analiza tokovnih razmer čez hidrotehnične objekte. Za krajše odseke vodotokov in hidrotehnične objekte je mogoče uporabiti dovolj gosto numerično mrežo in izvesti meritve (na fizičnih modelih, redko na že zgrajenih objektih) potrebnih podatkov za umerjanje in verifikacijo numeričnih modelov. V primerih, ko se tridimenzionalni modeli uporabljajo pri načrtovanju in optimiziranju elementov hidrotehničnih objektov, ki v naravi še niso izvedeni in za katere posledično tudi ni mogoče pridobiti podatkov za umerjanje in verifikacijo, se uporabi hibridno hidravlično modeliranje. Pri tem numerični model služi za preizkus številnih variacij, umerjanje in verifikacija ter kontrola končne variante pa se izvede na podlagi izmerjenih vrednosti z vzporednim fizičnim modeliranjem.



Slika 5: Porazdelitev vektorjev hitrosti, dobljenih s 3D modelom (Müller, 2012).

Figure 5: Distribution of the velocity vectors, generated with a 3D model (Müller, 2012).

- **Hibridno hidravlično modeliranje**

Hibridno hidravlično modeliranje (HHM) imenujemo pristop, pri katerem se modeliranje vzporedno izvaja s fizičnim in numeričnim modelom. Na ta način je možno združiti prednosti posamezne vrste modela. Ker gre pri hibridnem modeliranju za dokaj zapleten in dolgotrajen pristop, se ga uporablja v raziskavah kompleksnih primerov prostorskega načrtovanja z navzkrižnimi interesi in umeščanja pomembnejših posegov v prostor, pri katerih so možne bistvene spremembe odtočnega režima, zahteve po natančnosti in zanesljivosti rezultatov pa so velike (Šantl in sod. 2010).



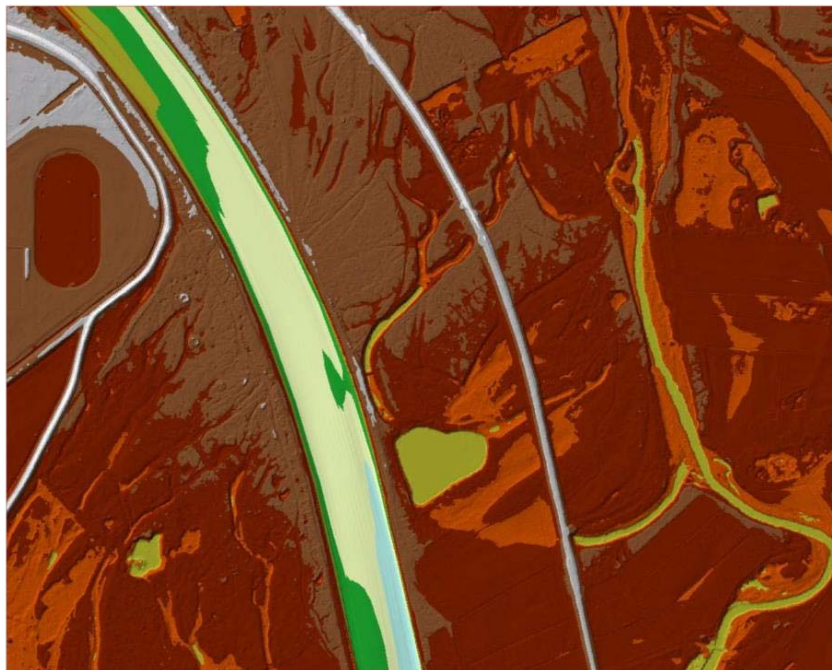
Slika 6: Povezovanje in prepletenost postopkov HHM, ki povezuje fizični model (FM) in numerični model (NM) (Rak in sod., 2013).

Figure 6: Connections between different procedures in the hybrid hydraulic modeling approach, which combines physical model (FM) and numerical modeling (NM) (Rak et. al., 2013).

S fizičnim modelom je mogoče natančneje simulirati izrazite tridimenzionalne in turbulentne pojave ter pridobiti dodatne podatke za umerjanje numeričnega modela. Prednosti numeričnega modela so na drugi strani možnost analize številnejših variant načrtovanih posegov pri različnih začetnih in robnih pogojih, za razliko od fizičnih modelov pa omogočajo tudi modeliranje obširnejših poplavnih območij. V prvi fazi postopki vzpostavitve in grobega umerjanja potekajo na posameznem modelu samostojno in neodvisno. V naslednji fazi se izvede primerjava rezultatov fizičnih in numeričnih modelov ter odkrivanje razlogov za morebitna odstopanja. Po potrebi sledijo modifikacije modelov in postopek finega umerjanja in verifikacije. Z umerjenim in verificiranim numeričnim modelom se nato izvede potreben nabor variacij načrtovanih posegov in scenarijev dogodkov. Končne, po potrebi pa tudi vmesne variante se preizkusijo in s tem potrdijo še na fizičnem modelu.

2.2.3 Geometrija obravnavanega območja

Za natančno simuliranje tokovnega polja vodnega toka in spremljajočih procesov, posebej na poplavnih območjih s kompleksno topografijo, je bistvena detajlna in skrbno pripravljena geometrija obravnavanega območja. Takšno geometrijo je možno pripraviti le z dobrim poznavanjem območja in s podatki topografije, zajetimi s tehnikami, ki omogočajo zajem podatkov z veliko gostoto in visoko natančnostjo.



Slika 7: Podroben digitalni model terena (DMT) vodotoka s poplavnimi površinami kot podlaga za pripravo geometrije hidravličnega modela.

Figure 7: A detailed digital terrain model of a river with floodplains as a basis for preparation of the geometry for the hydraulic model.

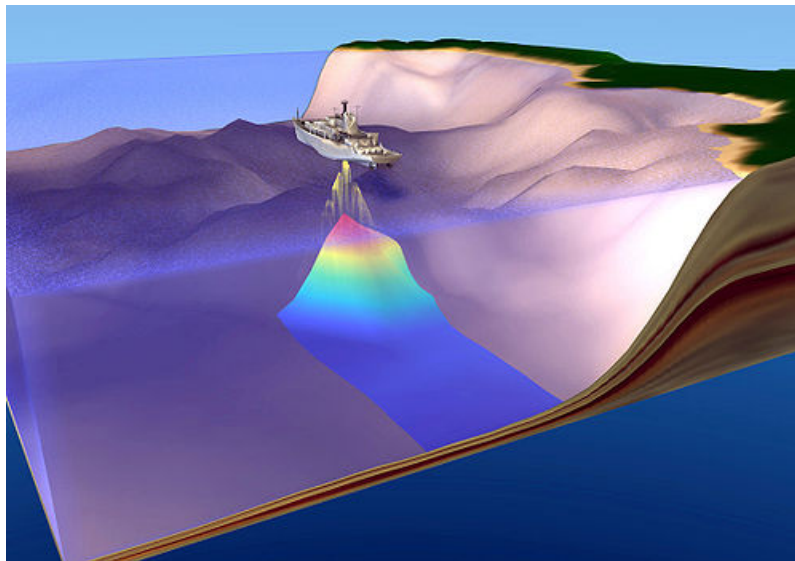
Pri topografsko preprostih območjih, kot so na primer ozke rečne doline, so enostavnejši, enodimenzijski hidrodinamični modeli še dovolj učinkoviti. Za natančne hidravlične simulacije poplavljanja, kjer se v praksi vse pogosteje uporabljajo dvodimenzijski modeli, pa so potrebni visoko resolucijski modeli, pri čemer je bistvena natančnost izmer elementov, kot so del rečnega korita in površin, kjer se razliva voda pri višjih vodostajih ali ovir vodnemu toku (npr. ceste) v retenziji. Seveda morajo biti takšni elementi tudi ustrezno upodobljeni v

geometriji modela. Večja natančnost podatkov topografije omogoča boljšo natančnost priprave geometrije in posledično boljšo natančnost hidravličnih analiz.

2.2.3.1 Opis tehnik za zajem batimetrije

Za zajem podatkov rečnega dna so nekatere, sicer širše uporabljene tehnike daljinskega zaznavanja, manj primerne. Na vodni gladini prihaja do loma ali celo odboja signala, zato to še posebej velja za večje, bolj vodnate vodotoke oziroma vodotoke z večjo količino suspendiranih snovi. Za meritve geomorfologije rečnega korita se najpogosteje uporabljajo:

- Geodetske meritve z uporabo tahometra ali GPS naprav. Ta metoda je primerna za plitvejšje in manjše odseke.
- Meritve iz plovila s pomočjo merilnih lat. To je zelo počasen postopek, ki je prav tako zelo omejen glede globine vode.
- Uporaba ultrazvočnih instrumentov na plovilih, kjer s pomočjo zvočnih signalov, ki se v vodi gibljejo zelo hitro in se odbijajo na rečnem dnu, na podlagi meritve časa med oddajo in prejetjem signala določamo globino. Težava seveda nastopi, če je na dnu plast blatnega (muljastega) toka. Prav tako je potrebna oprema za določanje točne lokacije merilnih naprav, kar omogoča za določitev koordinat X, Y, Z posameznih točk.



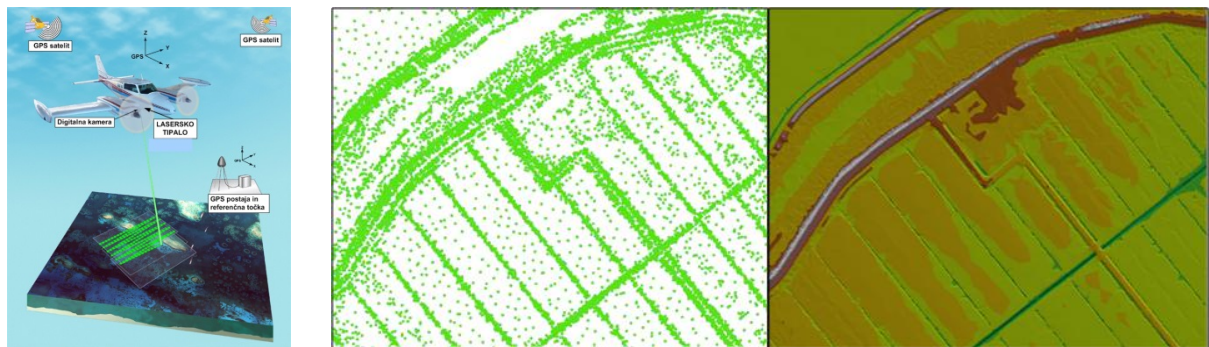
Slika 8: Snemanje batimetrije z ultrazvočnim sistemom (High School Earth Science/Seafloor Spreading, Wikibooks, 2013).

Figure 8: Acquisition of bathymetry with echo sounder (High School Earth Science/Seafloor Spreading, Wikibooks, 2013).

Včasih se lahko uporabi posebna vrsta laserskega skeniranja, kjer se uporabljajo tako infrardeči kot tudi modro-zeleni žarki (DIAL - Differential Absorption LIDAR). Medtem ko se infrardeči žarki odbijejo na vodni gladini pa modro-zeleni prodrejo skozi vodo in se odbijejo šele na dnu. Bistvena domneva pri tem postopku je, da je voda dovolj bistra in kar se da mirna. V nasprotnem primeru se žarki odbijejo na disperziranih delcih, kar privede do napak. To je tudi vzrok, da metoda ni primerna za reke, kjer se pojavlja turbulentni tok, ki povzroča dviganje in lebdenje delcev sedimentov oz. suspenzij.

2.2.3.2 Opis tehnik za zajem topografije poplavnih območji

Izdelava visoko resolucijskega digitalnega modela terena kot podlage za pripravo geometrijskih podatkov hidravličnega modela zahteva natančne podatke topografije območja, s primerno gostoto. Posebej za zajem podatkov obsežnejših poplavnih območij so zato klasične geodetske tehnike zajema podatkov prezamudne, hkrati pa tudi težko dosegaajo željeno gostoto posnetih točk. Prav tako so podatki, dobljeni z digitalizacijo linije izohips ali točk z znanimi višinskimi kotami obstoječih kart, večinoma premalo natančni. Digitalizacija takih kartje sicer cenovno ugodna in tudi relativno hitra, natančnost pa je odvisna od kakovosti in natančnosti kart, ki pa sta navadno premajhni za izdelavo DMT, ki bi omogočal natančnejše analize. Delno se tako uporablja fotogrametrija, ki preučuje in obdeluje metode merjenj dimenzij predmetov, ki se nahajajo na fotografskih in digitalnih perspektivnih posnetkih. Na voljo so programska orodja, ki omogočajo avtomatično triangulacijo, kar občutno zmanjša čas obdelave in je zato metoda primerna tudi za masovno pridobivanje geografskih podatkov na podlagi ortofotoposnetkov. Predvsem pa v zadnjem desetletju prevladujejo tehnike, ki temeljijo na laserskih aktivnih senzorjih (tehnologija LIDAR – Light Detection and Ranging).

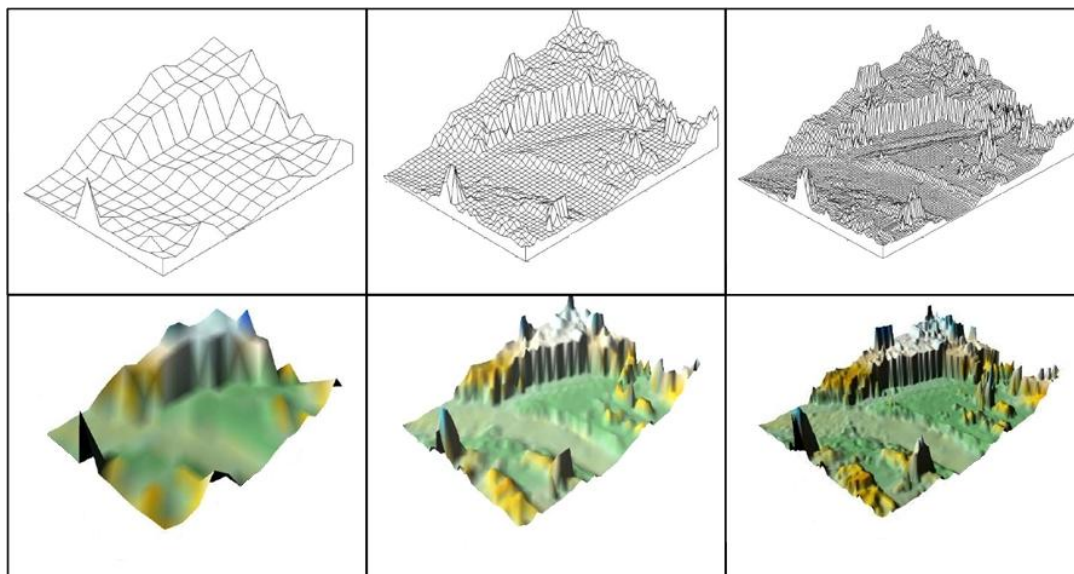


Slika 9: Levo – sistem LIDAR (USGS, 2013); sredina – oblak točk izmerjenih s tehnologijo LIDAR; desno – DMT, izdelan iz točk LIDAR.

Figure 9: Left – the LIDAR system (USGS, 2013); middle – a point cloud acquired with the LIDAR technology; right – a DTM generated from the LIDAR data.

2.2.3.3 Izdelava geometrije modela (prečni profili, računski mreža)

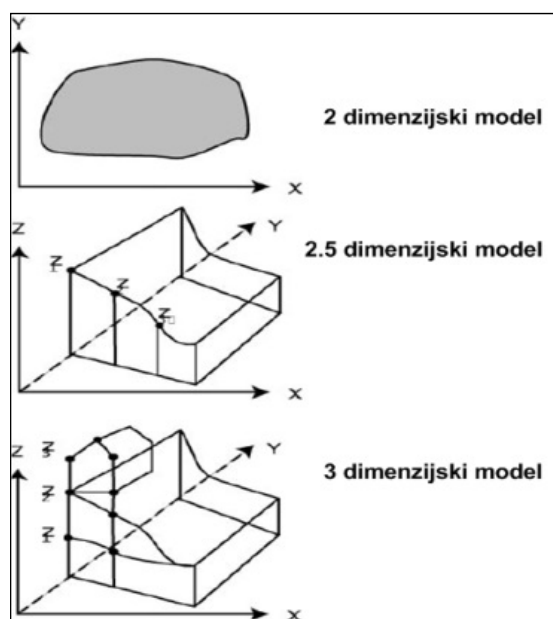
Za pripravo visoko resolucijske geometrije struge vodotoka in obvodnega prostora za hidravlične modele se vse pogosteje uporabljajo sodobne tehnologije daljinskega zaznavanja in programska orodja GIS ter CAD. S povezavo orodij in hidravličnih modelov GIS je namreč mogoča učinkovitejša obdelava topografskih podatkov in priprava geometrije obravnavanega območja, ki prikazuje tudi manjše detajle topografije, ki pa lahko pomembno vplivajo na tokovne razmere. Posebno na ravninskih območjih je natančnost hidravličnih analiz odtočnih razmer močno povezana z resolucijo DMT oz. natančnostjo geometrijskih podatkov (Sanyal, 2004).



Slika 10: Prikaz topografije terena z DMT z različno resolucijo posnetih točk površja in posplošenja, ki pri tem nastajajo (Alemseged, 2005; strani 58 in 59, slike od 5–29 do 5–34).

Figure 10: Presentation of the terrain topography with DMT from points with different resolution and occurring generalization (Alemseged, 2005; page 58 and 59, figures from 5-29 to 5-34).

DMT je model terena v obliki rastrske mreže ali mreže nepravilnih trikotnikov, kateremu so dodane glavne topografske značilnosti terena, kot so denimo padnice, kote, grape, grebeni itd. (Šumrada, 2005). Glede na vrsto uporabljenega hidravličnega modela se na podlagi DMT z uporabo orodij GIS in CAD pripravi geometrija v obliki prečnih profilov ali numerične mreže. Izboljšanje detajlne podobe terena z večanjem resolucije DMT in posledično numerične mreže je razvidno iz zgornje slike. Računski čas hidravličnih simulacij je v veliki meri odvisen od števila računskih elementov, zato je navadno resolucija numerične mreže nižja od izvornih podatkov meritev topografije oz. DMT.



Slika 11: Upodobitev terena glede na dimenzionalnost DMT (Burdziej, 2003; stran 14, slika 26).

Figure 11: Representation of the terrain according to dimensions of DMT (Burdziej, 2003; page 14, figure 26).

Pri nekaterih vrstah numeričnih mrež je na podlagi visoko resolucijskih DMT mogoče lokalno zgostiti število računskih elementov in na ta način natančneje zajeti detajle topografije na mestih, kjer je to pomembno za natančnost hidravličnega izračuna. Prav tako je tudi pri nižji resoluciji numerične mreže na podlagi natančnih vhodnih podatkov možno s korekcijami numerične mreže zajeti elemente prostora za izboljšanje natančnosti izračunov pomembnih elementov topografije (npr. nasipi, cestna telesa itd.). Nekatero naravne topografske entitete (npr. stene, strmi deli sotesk itd.) in tudi antropogene gradnje (npr. stavbe, zidovi itd.) imajo lahko pri istih horizontalnih koordinatah X in Y različno višinsko koto Z, kar z običajnimi DMT ni mogoče opisati. Zato je takšen DMT imenovan kvazi 3D model oz. 2,5-dimenzionalen. Pri uporabi visoke resolucije numerične mreže na takšnih mestih je napaka modela majhna, pri izbiri večjih numeričnih elementov pa so potrebne lokalne korekcije numerične mreže. V nasprotnem lahko prihaja do generalizacije terena in posledično manjše natančnosti DMT, geometrije modela ter rezultatov analiz.

2.2.4 Hidrološki podatki in hidravlični robni pogoji

Pri vzpostavitvi numeričnega modela je pomembna natančna določitev robnih in notranjih pogojev, ki vplivajo na izračun sistema enačb modela. Določitev robnih pogojev je pri modeliranju vodotokov večinoma oprta na podatke hidrološke merilne mreže postaj državnega monitoringa oziroma na podatke specifičnih meritev, namenoma izvedenih za posamezne raziskave. Državni monitoring se izvaja na mreži merilnih postaj, ki morajo biti za verodostojnost, natančnost in reprezentativnost podatkov locirane na primernih mestih in opremljene s primerno in zanesljivo opremo. Razvoj sistema opazovanj so narekovali predvsem nameni uporabe, kot so varstvo naselij pred poplavami, uporaba vode v energetske, tehnološke in vodooskrbne namene, v zadnjih desetletjih pa vse bolj tudi za potrebe preučevanja naravnih danosti in varstva okolja (Kolbezen, 1998).

2.2.4.1 Hidrometrija in statistična obdelava podatkov meritev

Tako za razumevanje samih pojavov v vodotokih, kot tudi za posnemanje teh pojavov s fizičnimi in numeričnimi modeli, so ključnega pomena zanesljive in točne meritve posameznih veličin. Za kakovostne in kontinuirane meritve v izbranem časovnem intervalu so poleg zanesljive, natančne in na neugodne klimatske in druge vplive odporne opreme, pomembna tudi primerna lokacija za izvajanje meritev ter usposobljenost merilca oziroma osebe, ki vodi izbiro in ureditev merilnega mesta ter inštalira merilne naprave. Najpomembnejša pa je zanesljivost izvedbe meritev, saj izpadlih meritev, posebej kadar gre za izredne dogodke, ni mogoče nadomestiti (Brilly, Šraj, 2005). V Sloveniji meritve vodostajev in ostalih hidroloških parametrov opravlja Agencija Republike Slovenije za okolje (ARSO), podatki pa so na voljo različnim uporabnikom in raziskovalcem, ki delujejo na področju voda in z njimi povezanimi dejavnostmi. Na podlagi podatkov daljših časovnih obdobij, ki jih zagotavljajo stalne merilne postaje, je možno izvajati različne statistične analize (določevanje pretokov z različnimi povratnimi dobami, trendi sprememb hidroloških spremenljivk itd.). Za raziskave, za katere podatki stalne mreže merilnih postaj ne zadoščajo, se izvajajo dodatne meritve, bodisi z večjo gostoto merilnih mest bodisi s posebno opremo za meritve specifičnih parametrov. Temeljni parametri, potrebni za hidravlično modeliranje, so pretoki in vodostaji, ki predstavljajo robne pogoje in podatke za umerjanje ter verifikacijo modelov.

Tokovna slika in razporeditev hitrosti po prerezu se lahko izrazito spreminja v nekem spektru pretokov, kar pomembno vpliva na izvedbo meritev. Na odtočne razmere v izbranem odseku

vplivajo številni dejavniki, kot so krivine, vegetacija, ovire vodnemu toku, objekti v strugi in ob njej, oblika prečnega prereza, vzdolžni padec dna itd. Za zagotavljanje zanesljivih in natančnih meritev je najprimernejše za merilno mesto izbrati raven rečni odsek s karseda pravilno oblikovanim in enakomernim prečnim prerezom, voda pa se v ciljnem razponu meritev ne razliva na poplavna območja. Predvsem za primerljivost meritev v daljšem časovnem obdobju je pomembno, da je rečni odsek stabilen, torej ni izpostavljen erozijskim procesom oz. odlaganju sedimentov (Brilly, Šraj, 2005). Preoblikovanje pretočnega prereza in nivelete dna lahko namreč bistveno spremeni razmerje med vodostajem in pretokom. Pri vzdolžnem padcu je pomembno, da je le-ta enakomeren in da se merilno mesto ne nahaja na prehodih med posameznimi gladinskimi krivuljami.

Na merilnih mestih se izvajajo meritve vodostajev, na podlagi teh podatkov pa se lahko s pretočno krivuljo določi tudi pretok v izbranem profilu. Klasična izvedba merilnega mesta obsega eno ali več merilnih lat, na katerih opazovalec odčitava kote gladin. Poleg možnosti poškodb merilnih lat v času visokovodnih dogodkov zaradi plavja je pogosto težava tudi dostopnost merilnega mesta. Poleg merilnih lat se za meritve gladin uporabljajo še kontinuirani merilci s plovcem ali komprimiranim zrakom, elektronske sonde itd.



Slika 12: Levo – merilna vodomerna lata; desno – sodobna tlačna sonda (ENCVO, 2013).

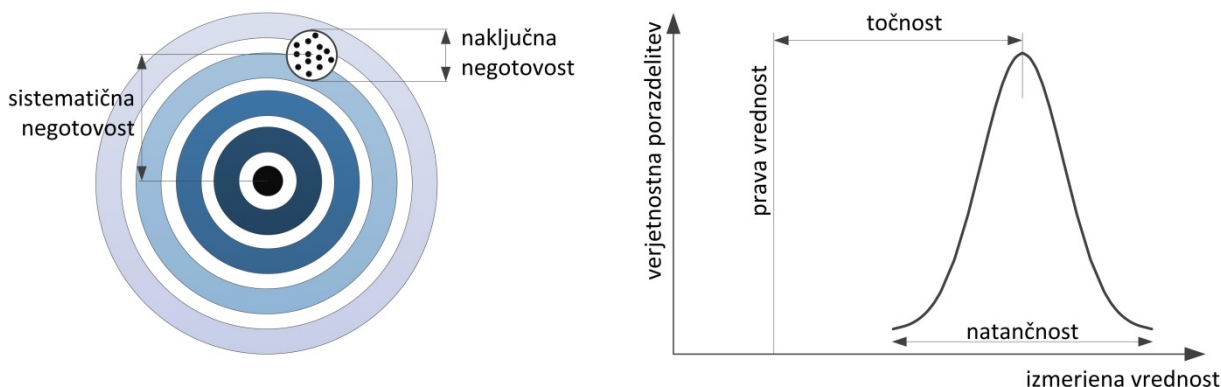
Figure 12: Left – a gauge board; right – an up-to-date wet pressure transducers (ENCVO, 2013).

Za meritve hitrostnega polja in posledično meritve pretokov se danes najpogosteje uporabljajo akustični Dopplerjevi merilniki (ADMP). ADMP merilnik oddaja signal z določeno frekvenco (med 500 in 2000 kHz), ki se odbije od suspendiranih in razstopljenih snovi v vodi oziroma od dna. Hitrosti in globine se določijo na podlagi spremembe oddane in prejete frekvence (Jecl in sod., 2010). Predvsem pri vodotokih s širšim pretočnim prerezom se meritve izvajajo po posameznih lamelah prereza. Prav tako se pri večjih globinah izvaja tudi meritve v več točkah vertikale posamezne lamele. Skupni pretok se določi z integracijo po vertikali in vsoto pretokov posameznih lamel.

2.2.4.2 Merilna negotovost v hidrometriji

Pri podajanju vrednosti meritev se praviloma poda tudi oceno merilne negotovosti, ki predstavlja razpon možnih vrednosti dane meritve. Merilna negotovost je parameter s pozitivno vrednostjo, ki jo lahko določimo na podlagi statistične obdelave ponavljajočih meritev in/ali na podlagi specifikacije merilne opreme, standardov o merilni metodi, priročnikov itd. Manjša kot je vrednost merilne negotovosti, bolj je meritev kakovostna.

Za kakovostne meritve je treba najprej natančno poznati same pojave, pri katerih izvajamo meritve, temu primerno izbrati merilno opremo, zagotoviti usposobljenega merilca in merilne pogoje. Pri posamezni meritvi je merilna negotovost sestavljena iz sistemske negotovosti (točnost/accuracy) in naključne negotovosti (natančnost/precision). Sistemska napaka se pojavi zaradi lastnosti merilnega sistema, vgradnje celotnega sistema in/ali njegovih komponent ter delovnih pogojev, njena vrednost pa pri enakih pogojih, brez sprememb sistema ostaja enaka (Hočevar, 2009). Naključna negotovost pa je odstopanje vrednosti meritve od povprečne vrednosti zaporednih meritev.



Slika 13: Sistematična negotovost (nasprotje točnosti, accuracy) in naključna negotovost (nasprotje natančnosti, precision), dve različni možnosti predstavitve (merilna negotovost) (Hočevar, 2009).

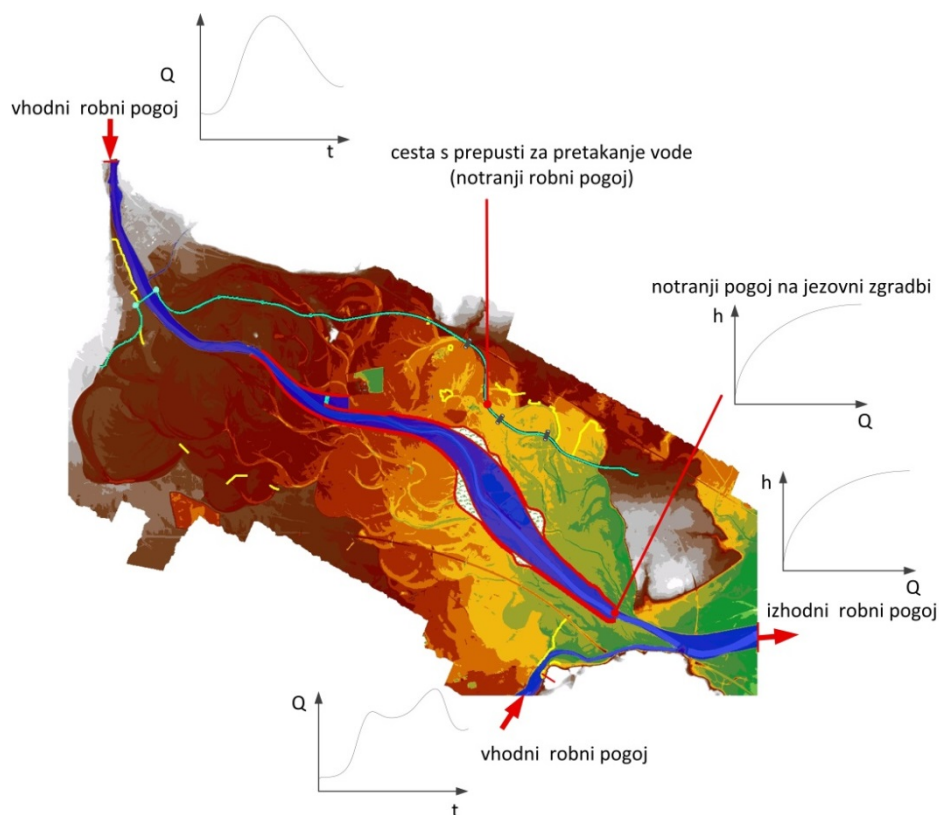
Figure 13: Systematic uncertainty (opposite of accuracy) and random uncertainty (opposite of precision), two variants of representation (uncertainty of measurements) (Hočevar, 2009).

Kadar je pri meritvah vključen tudi sistem za zapisovanje podatkov (npr. merilna kartica), lahko poleg sistematične in naključne napake k skupni negotovosti meritev delno prispeva tudi analogno digitalni pretvornik.

2.2.4.3 Hidravlični robni, notranji in začetni pogoji

Pri vzpostavitvi numeričnega modela je pomembna natančna določitev hidravličnih robnih in notranjih pogojev, s katerimi definiramo razmere na odprtih mejah modela (vhodni in izhodni rob modela), kot tudi na lokacijah znotraj modela, kot so na primer različne vodne zgradbe, izviri in ponori itd. Z dobro določitvijo začetnih pogojev povečamo stabilnost numeričnega modeliranja. Vrsta robnih pogojev je odvisna od kinematičnih lastnosti vodnega toka (stalni/nestalni tok, režim vodnega toka na odseku vodotoka (mirni, deroči ali mešani)), kompleksnosti modela in vrste procesov, ki jih želimo simulirati. Robni pogoji se določijo bodisi na podlagi podatkov terenskih meritev, mreže vodomernih postaj, bodisi na podlagi rezultatov predhodnih ali vzporedno vzpostavljenih modelov (npr. fizični model pri hibridnih modelih). Osnovni robni pogoji so pri hidrodinamičnem modelu konstantni pretok ali hidrogram oziroma (Q-t krivulja) kot vhodni robni pogoj, in gladina, (Q-h ali h-t krivulja) na izhodnem robu, v primeru deročega režima toka tudi na vhodnem robnem pogoj. Pri deročem režimu toka se namreč motnje širijo v smeri toka, zato tudi račun poteka v dolvodni smeri. Hidrogram podaja spreminjanje pretoka v odvisnosti od časa, Q-h krivulja pa gladino vode pri določenem pretoku. V primeru spreminjanja pretoka vzdolž odseka zaradi odvzemov ali dotokov ali pa zaradi simuliranja toka čez hidrotehnične objekte na obravnavanem odseku lahko definiramo tudi notranje robne pogoje. Na sliki 14 je kot primer prikazana trasa ceste s prepusti, lahko pa se upošteva npr. denivelacijska krivulja na jezovni zgradbi HE itd. V tem

primeru z notranjim pogojem (obratovanjem zapornic) narekujemo potek gladin v odvisnosti od pretoka na prelivnem objektu HE.



Slika 14: Shematski prikaz hidravličnega modela z robnimi in notranjimi pogoji.

Figure 14: A schematic review of the hydraulic model with boundary and internal conditions.

Če z modelom simuliramo tudi druge pojave v vodotoku, kot so procesi prodonosnosti, advekcije in disperzije, se temu primerno poveča tudi število robnih, notranjih in začetnih pogojev.

Začetni pogoji na eni strani podajajo krajevni potek gladin in razporeditev drugih parametrov (suspendirane snovi, temperatura itd.) v začetnem času simulacije, na drugi pa podajo začetno stanje pred pojavom nestalnega toka, zato jih uporabimo, da povečajo stabilnost simulacije v začetni fazi računa.

2.3 Opis uporabljenega numeričnega modela – MIKE FLOOD

Pri hidravlični analizi je bil uporabljen numerični hidravlični model MIKE FLOOD danskega hidravličnega inštituta DHI (Danish hydraulic institute). Model povezuje enodimenzionalen model MIKE 11 in dvodimenzionalen model MIKE21 ter je širše uporabljen pri modeliranju vodotokov, pri katerih prihaja do poplavljanja obvodnega prostora. Model omogoča tudi povezavo z modelom MIKE URBAN, ki omogoča modeliranje kanalizacijskih in drenažnih sistemov ter sistemov za distribucijo vode. Ker modul MIKE URBAN pri delu ni bil uporabljen, tudi ni podrobneje predstavljen.

Kot je bilo omenjeno v enem od prejšnjih poglavij, je z 1D-2D kombiniranim modelom možno dovolj natančno določiti razmerje pretočnih količin med strugo in poplavnimi površinami ter zajeti tokovne razmere na poplavnih površinah. V sodelovanju s proizvajalcem

GIS programskih orodij ESRI (*Environmental System Research Institute*) so bili razviti tudi dodatni moduli, ki omogočajo povezljivost hidravličnega modela z okoljem GIS. Povezljivost hidravličnih modelov in orodij GIS olajša in izboljšuje tako pripravo geometrijskih podatkov za hidravlični model na podlagi natančnega DMT, kot tudi obdelavo drugih prostorsko lociranih podatkov in predvsem omogoča učinkovit, pregledan in nazoren prikaz rezultatov v obliki kartiranja poplavnih površin, izboljša natančnost in ločljivost izrisa poplavnih linij in razporeditev hitrosti vodnega toka v prostoru ter možnost vizualizacije v 3D okolju. Analiza možnosti vključitve orodij GIS v postopke priprave geometrijske podlage in prikaz rezultatov je pokazala, da je natančnost take analize odvisna predvsem od natančnosti DMT (Rak in sod., 2006).

2.3.1 Enodimenzionalen model MIKE 11

Hidravlični model MIKE 11 predstavlja programsko okolje za modeliranje odtočnih razmer vodotokov in rečnih sistemov ter omogoča simuliranje številnih spremljajočih procesov v vodnih telesih. Z nadgradnjo osnovnega modela z različnimi moduli je namreč mogoče simulirati obratovanje hidrotehničnih objektov in naprav v odvisnosti od časovne spremembe pretoka, upoštevanje njihovih značilnosti (npr. pretočne krivulje). Prav tako so na voljo moduli za napovedovanje poplav, simuliranje procesov advekcije in disperzije, transport nekohezivnih plavin itd. (DHI, 2012).

Pri modeliranju z MIKE FLOOD, kjer gre za povezavo 1D in 2D modela, se MIKE 11 uporablja za modeliranje mreže vodotoka, kjer vektorji hitrosti vodnega toka potekajo vzdolž osi vodotoka, prečno in vertikalno komponento pa je možno zanemariti. Model za izračun dinamike vala uporablja Saint-Venantove enačbe, ki temeljijo na kontinuitetni enačbi in zakonu o ohranitvi gibalne količine ter upoštevanju spodnjih predvidevanj:

- voda je nestisljiva in homogena oziroma je spreminjanje gostote zanemarljivo,
- padec dna je zelo majhen (da sta vrednosti $\sin\alpha$ in $\tan\alpha$ praktično enaki),
- tok je vzporeden z dnom vodotoka (dolžine poplavnih valov so velike v primerjavi z globino vode).

Program uporablja t.i. St.-Venantove enačbe s povprečnimi vrednostmi po prečnih prerezih, ki opisujejo spreminjanje globine vode in pretoka vzdolž odseka x v nekem času t :

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (13)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\alpha_c Q^2 / A) + gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gQ|Q|}{C^2 AR} = 0 \quad (14)$$

kjer so:

h	...globina vode
Q	...pretok
α_c	...Coriolisov koeficient, ki upošteva porazdelitev hitrosti
x	...stacionaža
t	...čas
g	...gravitacijski pospešek
A	...površina omočenega prečnega prereza

C	...de Chezy-jev koeficient
R	...hidravlični radij
q	...izvir/ponor

Numerično reševanje teh enačb temelji na implicitni metodi končnih razlik, ki uporablja posebno iteracijsko shemo po Abbott-Ionescu (DHI, 2012).

2.3.2 Dvodimenzionalen model MIKE 21

Odtočnih razmer čez poplavne površine z 1D ni mogoče modelirati z zadostno natančnostjo, saj se na njih pojavijo izrazitejšje komponente hitrosti pravokotno na smer glavnega toka oziroma prihaja do izrazitih dvodimenzionalnih pojavov toka vode. Kadar je vertikalna komponenta hitrosti na poplavnih območjih praviloma zanemarljiva, se lahko pri takšnih primerih uporabljajo dvodimenzionalni modeli.

Pri programski opremi MIKE FLOOD se poplavna območja modelirajo s hidrodinamičnim modulom MIKE 21. Program temelji na numeričnem reševanju Reynoldsovih povprečenih Navier-Stokersovih (RANS) enačb, ki so po vertikalni integrirani zakona o ohranitvi gibalne količine in zakon o ohranitvi mase. Z enačbami je opisano spreminjanje globine in specifičnega pretoka vode (DHI, 2012b). Za reševanje sistema enačb se uporablja tehnika Alternate direction implicit (ADI), za matrične enačbe pa se uporabljajo t. i. algoritmi Double Sweep (DS).

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = \frac{\partial d}{\partial t} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{gp\sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 \cdot h^2} \\ - \frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{xy}) \right] - \Omega_q - fVV_x + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial x} (p_a) = 0 \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{gp\sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 \cdot h^2} \\ - \frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xy}) \right] - \Omega_p - fVV_y + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial y} (p_a) = 0 \end{aligned} \quad (17)$$

kjer je:

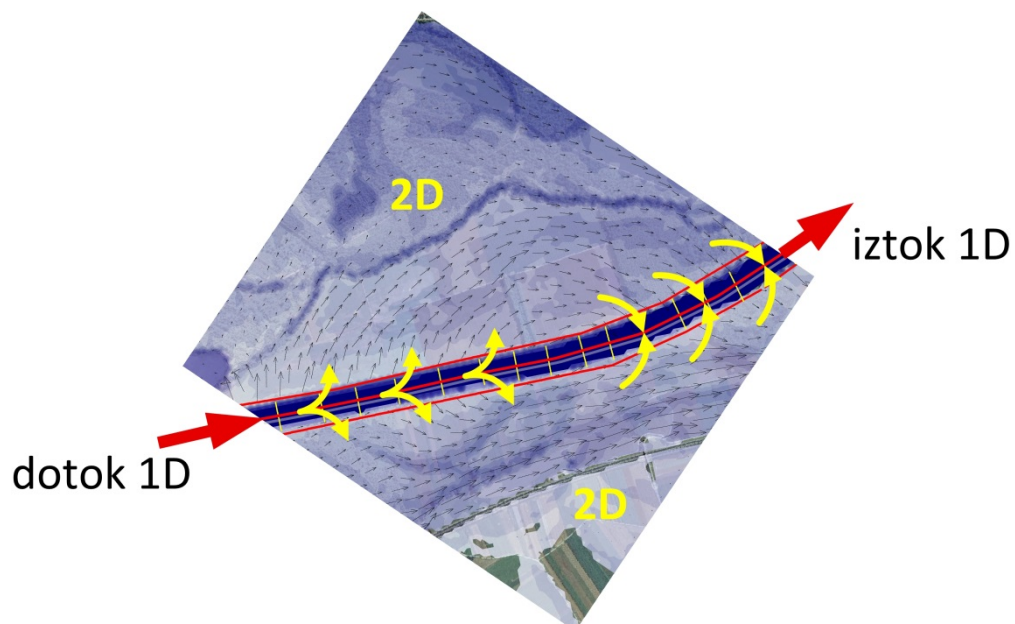
h	... globina vode ($\zeta-d=h$),
d	... časovno spremenljiva globina vode,
ζ	... absolutna višina gladine,
p, q	... specifični pretok v y in x smeri ($=uh, =vh$),
u, v	... komponente hitrosti v x in y smeri,
g	... gravitacijski pospešek,
$f(V)$... faktor trenja zaradi vetra,
V, V_x, V_y	... hitrost vetra in komponenti v x ter y smeri,

Ω_q, Ω_p ... Coriolisov parameter (odvisen od geografske dolžine),
 p_a ... atmosferski pritisk ($f(x,y,t)$),
 p_w ... gostota vode,
 x,y ... prostorske koordinate ,
 t ... čas,
 $\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{yy}$...komponente strižnih napetosti.

Kot omenjeno je z 2D modeli mogoče natančneje modelirati poplavne tokove. Natančnost rezultatov je odvisna tudi od velikosti računske celice. Vendar se z manjšanjem računske celice povečuje računski čas simulacije in numerična nestabilnost modela. Stabilnost modela je sicer možno povečati z manjšim časovnim korakom, kar pa dodatno povečuje čas simulacij. Zato je pri vzpostavitvi modela potrebno dobro poznavanje modela in problema oziroma pojava, ki ga želimo z njim modelirati. Velikost računskih elementov navadno narekuje topografska kompleksnost obravnavanega območja in želen red točnosti rezultatov. Stabilnost modela je možno oceniti s Courantovim številom, ki podaja razmerje med časovnim korakom in hitrostjo vodnega toka ter velikostjo računske celice (DHI, 2012b).

2.3.3 Povezave 1D in 2D modela znotraj programa MIKE FLOOD

MIKE FLOOD povezuje zgoraj opisana modela in tako izkorišča prednosti posameznega hidravličnega orodja glede na hidravlične razmere. Na ta način se izognemo oz. zmanjšamo napako, ki pri dvodimenzionalnih modelih nastane pri opisu geometrije struge vodotoka zaradi prevelike celicemreže s katero sicer opišemo obsežna poplavna območja, in napako, ki nastane pri enodimenzionalnih modelih zaradi neupoštevanja obeh komponent hitrosti v tok vode na retenzijah (Müller, 2009). Za povezavo eno- in dvodimenzionalnega modela se uporablja več možnih načinov glede na področje aplikacije povezave (npr. interakcija struge in retenzij, vgrajevanje objektov z uporabo 1D veje itd.).



Slika 15: Povezava struge vodotoka (1D model) in poplavnih površin (2D model).

Figure 15: A link of the river channel (1D model) and floodplains (2D model).

Za komunikacijo vode med strugo vodotoka in poplavnimi površinami na izbranem odseku ali vzdolž celotnega odseka oz. za povezavo računskih celic 2D modela z odsekom 1D modela se uporablja bočno povezavo (*Lateral link*). Za določitev pretoka med točkami 1D modela in posameznimi celicami 2D modela pa se lahko uporabljajo različne enačbe prelivov (DHI, 2012c).

2.4 Upor vodnemu toku (lokalne in trenjske energijske izgube)

Osnovna energijska enačba za realno tekočino opisuje, da se celotna energija ohranja. Če enačbo poenostavimo za enodimenzionalni tok in izločimo oblike energije, ki so medsebojno popolnoma pretvorljive, torej predstavljajo energijo v povratno izmenljivi obliki ter v zaporednih prerezi primerjamo povračljivi del energije (tj. energijo prereza), vidimo, da se razpoložljiva energija prereza v smeri toka zmanjšuje. Ugotovimo torej, da se pri toku realne tekočine sestava celotne energije spreminja, saj se vzdolž toka vedno večji del celotne energije spreminja v ireverzibilne oblike. Za prakso je posebno pomembna obravnava tistega dela energije, ki se pretvori v ireverzibilno obliko energije zaradi odpora pri toku vode. Del celotne energije, ki se ob tem pretvori v ireverzibilno obliko, imenujemo "energijske izgube" (Steinman, 2010). Energijske izgube vzdolž toka vode lahko delimo na trenjske ali linijske izgube, ki naraščajo z dolžino kontrolnega odseka in večanjem hidravlične hrapavosti ter lokalne izgube, ki so posledica lokalnih motenj.

2.4.1 Hidravlična hrapavost in njen vpliv na vodni tok

Pri toku vodotokov je na eni strani prevladujoča sila sistema (*driving force*) sila težnosti. Na drugi strani pa glavno nasprotno silo (poleg lokalnega odpora objektov, kot so mostovi in prepusti) predstavljajo sile zunanega trenja, ki se pojavljajo zaradi hrapavosti ostenja rečnega korita in poplavnih površin. Meritve so namreč pokazale, da je notranje trenje (običajno prikazano z viskoznostjo tekočine) zanemarljivo. Hrapavost in relief ostenja rečne struge in poplavnih površin imata velik vpliv na hidravlične razmere. V praksi se pri računu toka odprtih vodotokov najbolj pogosto uporabljata de Chézyjeva in Manningova enačba. Izgube zaradi trenja med vodnim telesom in hrapavim omočenim obodom so v njih izražene z de Chézyjevim oziroma Manningovim koeficientom linijskih izgub. Za primerno ocenitev vrednosti koeficienta hrapavosti, ki ga potrebujemo v izračunih, je potrebno dobro poznavanje dejavnikov, od katerih je hidravlična hrapavost odvisna. Posebno pri naravnih vodotokih je leta funkcija večjega števila spremenljivk. Vrednosti koeficientov hrapavosti je v konkretnem primeru možno najnatančneje določiti, če imamo za določen pretok znane (izmerjene) globine in hitrosti vodnega toka v posameznih točkah. V primeru, da teh podatkov ni na voljo, so nam v pomoč v številni literaturi tako opisno kot tabelarično podane vrednosti glede na posamezne dejavnike vpliva, kot tudi metode za določitev hidravlične hrapavosti glede na vrsto in gostoto vegetacije. Večina takšne literature temelji na empiričnih in eksperimentalnih raziskavah določanja koeficienta hrapavosti.

2.4.1.1 Opis semi-empiričnih enačb povezave med hidravlično hrapavostjo in gladino oz. hitrostjo vode

Hrapavost ostenja vpliva tako na vertikalno razporeditev hitrosti, kot tudi na tokovno sliko celotnega prereza. Pri naravnih vodotokih je hidravlična hrapavost odvisna od zrnaste sestave struge in vrste ter gostote obrežne zarasti. S spreminjanjem pretoka se spreminja nivo vode, potopljenost obrežne vegetacije in s tem njen vpliv na tokovne razmere. Poleg hrapavosti na tokovno sliko prereza vplivajo tudi ovire v toku, vzdolžni potek trase, geometrija prereza. Za

izračun povprečne hitrosti vodnega toka so bile na podlagi eksperimentov razvite semi-empirične enačbe, pri čemer je vpliv posameznih dejavnikov izgub podan z koeficientom hrapavosti. V osnovi imajo takšne enačbe naslednjo obliko (Steinman, 2010):

$$\bar{u} = C \cdot R^x \cdot I_0^y \quad (18)$$

kjer pomeni:

- \bar{u} ... povprečna hitrost v prečnem prerezu,
- R ... hidravlični radij, ki predstavlja razmerje med površino in omočenim obodom,
- I_0 ... vzdolžni naklon kanala (stalni enakomerni tok),
- C ... koeficient hrapavosti,
- x,y ... eksponenta.

Od številnih enačb sta v splošni uporabi najpogosteje uporabljeni de Chézyjeva in Manningova enačba.

- de Chezyjeva enačba:

$$v = C \cdot \sqrt{I \cdot R}, \quad (19)$$

kjer pomeni "C" de Chezyjev koeficient $C = \sqrt{\rho \cdot g / K}$, ki pa ima dimenzijo $[m^{1/2} \cdot s^{-1}]$!

- Manning-Stricklerjeva enačba:

$$v = \frac{1}{n_g} I^{1/2} \cdot R^{2/3}, \quad (20)$$

kjer n_g predstavlja Manningov koeficient trenja, ki pa tudi ni brezdimenzijski $[s \cdot m^{-1/3}]$!

Pri numeričnem modeliranju predstavlja spreminjanja koeficienta hrapavosti glavni način umerjanja modela. Pri tem so merjene gladine vode ob znanem pretoku nujen podatek. Koeficient hrapavosti se lahko spreminja z globino in hitrostjo vode, tipom in stopnjo potopljenosti vegetacije itd. Pri različnih pristopih modeliranja so v koeficientu hrapavosti lahko zajeti tudi drugi vplivi na potek gladin in hitrostno polje, kot so spreminjanje prečnega preseka (tolmuni, prodišča), trasa vodotoka (meandriranje), stik območij vode z različnimi hitrostmi vodnega toka (mejno območje med strugo in poplavnimi površinami), itd. Pristop, pri katerem v n_g zajema celo vrsto vplivov, je leta 1972 podal W. H. Shen in ima obliko:

$$n_g = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) \cdot m \quad (21)$$

kjer pomenijo:

- n_0, n_1, n_2, n_3, n_4 vpliv materiala, ki sestavlja omočeni obod rečnega korita, stopnjo hrapavosti oboda, relativni vpliv ovir v koritu, zaraslosti z vegetacijo in
- m vpliv stopnje meandriranja osi vodotoka.

2.4.1.2 Določanje koeficientov hrapavosti

V numeričnih modelih so s koeficientom hrapavosti zajete izgube, ki nastajajo vzdolž toka vode in so posledica sil, ki na omočenem obodu nastajajo zaradi hrapavosti ostenja. Izgube, ki jih zajamemo s koeficientom hrapavosti, lahko vključujejo tudi energijske izgube zaradi mikro in makro lastnosti topografije in batimetrije itd. Pri vzpostavitvi modela je v primeru razpoložljivih zanesljivih meritev iz narave koeficiente hrapavosti mogoče najnatančneje določiti s postopkom umerjanja. Meritve ob visokovodnih dogodkih, kjer se pojavljajo spremljajoči procesi, kot so transport plavja, premeščanje rinjenih in lebdečih plavin, valovanje itd., so pogosto nezanesljive. Prav tako je delno vprašljiva tudi natančnost meritev sledi visokih voda, če ni zabeležen še čas pojava. Pri vključitvi nabora meritev je zato vedno potrebna kritična inženirska presoja meritev, upoštevanje možnih napak, lokacije meritve (npr. zastojna točka) itd. Ker so merilna mesta opremljena s primerno merilno opremo, navadno razporejena vzdolž vodotoka na večjih razdaljah, na poplavnih površinah pa jih praktično ni, se je pri določanju koeficienta hrapavosti treba opreti tudi na inženirsko presojo rabe prostora in določanju koeficientov hrapavosti na podlagi izkušenj in priporočljivih vrednosti za različno rabo, kot jih podaja številna literatura (Chow, 1959; Mays, 1999). Predvsem pri različni vrsti vegetacije (npr. drevo z bujno krošnjo) se lahko uporabi, ki ga vegetacija povzroča vodnemu toku, bistveno spreminja glede na globino in hitrost vodnega toka. Če so na voljo meritve različnih visokovodnih dogodkov, je smiselno preveriti ustreznost izbranih vrednosti v postopku verifikacije modela. Pri tem morajo biti uporabljeni podatki, ki niso bili upoštevani v postopku umerjenja. Če je potrjena verodostojnost modela, je le-ta tem večja, čim bolj dogodki, katerih meritve so bile uporabljene v postopku umerjenja in verifikacije, med seboj velikostno odstopajo.

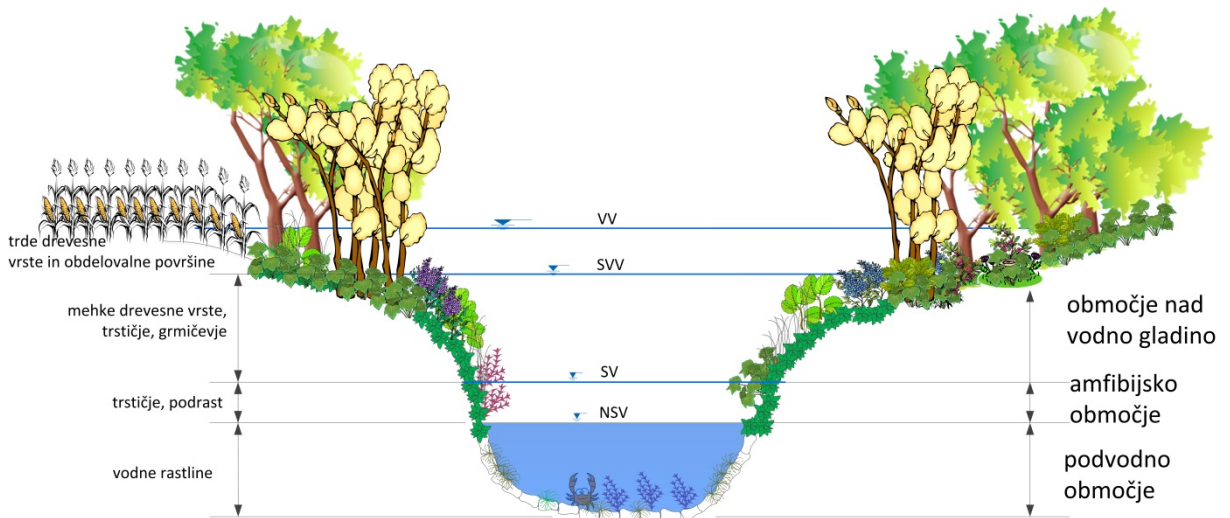
2.4.1.3 Porazdelitev dejavnikov vpliva na hidravlično hrapavost pretočnega prereza

Oblikovanje naravnega pretočnega prereza vodotoka je v veliki meri odvisno od odtočnih razmer in hidrodinamičnih obremenitev, ki pri tem nastajajo. Hitrosti vodnega toka, nihanje vodostajev čez krajša in daljša časovna obdobja in količine rinjenih in lebdečih plavin vplivajo tako na procese oblikovanje posteljice in spodnjih delov brežin, ki so večinoma iz mrtvih gradiv (kamenje, prod itd.), kot tudi na sestavo flore vodnega in obvodnega prostora. Granulacijska sestava posteljice vodotoka in makro oblik dna, ki pri tem nastajajo (sipine, tolmeni), vrste vegetacije, njena gostota, stopnja olesenosti in potopljenosti pa vplivajo na upor toku vode. Upor, ki nastane na ostenju omočenega dela prereza, predstavlja nasprotno sile komponenti težnosti in vpliva na pretočno sposobnost prereza, razporeditev hitrosti v njem in na potek gladin. Pretočni profil lahko razdelimo glede na vodostaj nizkih voda na tri območja (Steinman in sod., 2009):

- območje pod vodno gladino (akvatično),
- območje nihanja vodne gladine (amfibijsko) in
- območje nad vodno gladino (terestrično).

Območje pretočnega prereza pod vodno gladino je večinoma prekrito s peskom, prodom oziroma muljem. Velikosti frakcij so odvisne od hidrodinamičnih obremenitev. Na odsekih vodotokov z večjimi hitrostmi vode nastajajo večje vlečne sile, zaradi česar se iz vrhnjega dela posteljice spirajo fine frakcije, grobe frakcije, ki ostajajo, pa se bolj ali manj prilagajajo vodnemu toku. Nasprotno na odsekih z manjšim padcem prihaja do odlaganja finih delcev, s čimer prihaja do zapolnjevanja in zamuljenja prostora med večjimi granulacijami. Na takšnih odsekih je sicer sama gladkost dna večja, vendar pa se pogosto, posebej na območjih, kjer

prihaja da dotoka večjih količin hranljivih snovi, lahko pojavi bujna rast podvodnega rastlinja, kar zmanjšuje pretočno sposobnost. Hrapavost ostenja vpliva na samo velikost hitrosti, kot tudi na njeno razporeditev po prerezu.



Slika 16: Razporeditev vegetacijskih vrst po prečnem prerezu rečne struge in poplavnih površin.

Figure 16: Distribution of vegetation types across the cross-section of the river channel and floodplains.

Prehodni del brežin, ki je izpostavljen pogostemu nihanju gladine, večino leta pa je pod gladino vode (več kot 6 mesecev), imenujemo amfibijsko območje (Steinman in sod., 2009). Na tem območju se kot zarast pojavlja, trstičje, mehke lesne vrste itd. Dobra lastnost te vegetacije je zaščita brežin pred erozijo, v primeru bujne rasti pa lahko bistveno poslabša pretočno sposobnost. Pri sonaravnem urejanju vodotokov je tako treba veliko pozornosti posvetiti na eni strani ohranjanju naravnega videza in pogojem, ki omogočajo raznovrstnost flore in favne, na drugi strani pa preprečiti, da bi s preveliko gostoto in prekomernim deležem trdih, neupogljivih lesnih/olesenelih vrst poslabšali pretočno sposobnost struge in posledično povečali poplavno nevarnost. S hidravlično neugodnim prekomernim obsegom zarasti je namreč mogoče izrazito zmanjšati pretočno sposobnost glavnega dela struge.

S prehajanjem v območje pretočnega profila, ki je poplavljen ob vse bolj izrednih visokovodnih dogodkih, drevje bolj prehaja iz mehkih v trde drevesne vrste. Pod drevjem se pojavlja bolj ali manj gosta zarast. Poplavne ravnice pogosto predstavljajo tudi rodovitna območja, zato je večina že podvržena antropogenim vplivom. Površine, ki so ob visokovodnih dogodkih še vedno poplavljene in ohranjajo retenzijsko funkcijo, so praviloma namenjene poljedelskim površinam, travnikom, pašnikom in sadjarstvu. Vpliv na pretočno sposobnost je odvisen od vrste gojenih kultur, stopnje potopljenosti, upogljivosti trdnih delov vegetacije, letnega časa ipd. Natočna geometrija vegetacije je lahko zelo kompleksna, zato se njen vpliv lahko bistveno spreminja z višino vode in stopnjo potopljenosti.

Pri urejanju vodnega in obvodnega prostora je tako treba dobro poznavanje ustreznosti uporabljenih vrst vegetacije in ostalih materialov, njihovo časovno dinamiko spreminjanja in razvoja ter tudi njihov vpliv na hidravlične lastnosti vodotoka. Z vegetacijo preprečujemo intenzivne procese erozije in zagotavljamo ekološke zahteve po raznovrstnosti flore in favne. Pozornost pa je treba namenjati tudi vzdrževanju rasti vegetacije, preprečiti prekomerno razraščanje in morebitno preusmerjanje vodnega toka, nadomeščati rastline s prevelikimi preseki, ki zmanjšujejo pretočno površino in izgubljajo upogibno zmožnost, z mladikami itd.

2.4.1.4 Trenje in upor oblike vegetacije se spreminja z vodostajem

Na poplavnih območjih je pestrost vegetacije lahko izredno velika. Gozdovi različni drevesnih vrst z bolj ali manj gosto podrastjo, različne kmetijske kulture in drugi dejavniki rabe prostora ter spreminjanje ozelenelosti, višine in gostosti vegetacije v posameznih letnih časih vplivajo na hidravlično hrapavost in posledično na odtočne razmere, zadrževanje vode na območju retenzije, hitrosti in smeri vodnega toka, globine vode in obseg poplavljenosti. Natočna geometrija vegetacije in oblikovni upor se lahko spreminja z višino vode, stopnjo potopljenosti, hitrostjo vodnega toka, vrste, gostote in upogljivosti vegetacije itd. Določanje koeficienta hrapavosti, s katerim v hidravličnih modelih določamo trenjske izgube, je zato kompleksna naloga. Posebej, ker so podatki o gladinah in hitrostih vode na poplavnih površinah le izjemoma na voljo. Ker se lahko vrednosti spreminjajo pri različnih nivojih vode, je težko določiti vrednost, ki bi kar najbolje ustrezala širšemu naboru pretokov, obravnavanem v modelni raziskavi.

Na podlagi eksperimentov je bila razvita metoda za določanje koeficienta hidravličnega upora, ki upošteva obliko vegetacije, stopnjo potopljenosti in zmanjšanje natočne površine zaradi upogiba stbla (Mertens, 2006). Metoda omogoča natančnejšo določitev upora vegetacije za določen pretok in nivo vodne gladine, vendar pa je pomanjkanje podatkov in izvajanje izračunov za večji nabor pretokov razlog, da je redko uporabljena. Metoda pri večini numeričnih modelov ni uporabna za simuliranje visokovodnih dogodkov, kjer je kot robni pogoj uporabljen hidrogram. Numerični modeli večinoma uporabljajo konstantno vrednost koeficienta hrapavosti, za uporabo metode, ki upošteva odvisnost koeficienta hrapavosti od globine vode, pa bi morali upoštevati dodatno iteracijo za spreminjanje hidravličnega upora glede na globino vode. Silo upora vodnemu toku se po Mertensu določi z uporabo enačbe:

$$F = \gamma \cdot C_u \cdot A_{\perp} \cdot \frac{u^2}{2g} \quad (22)$$

$$A_{\perp} = d_{veg} \cdot h \quad (23)$$

kjer pomeni:

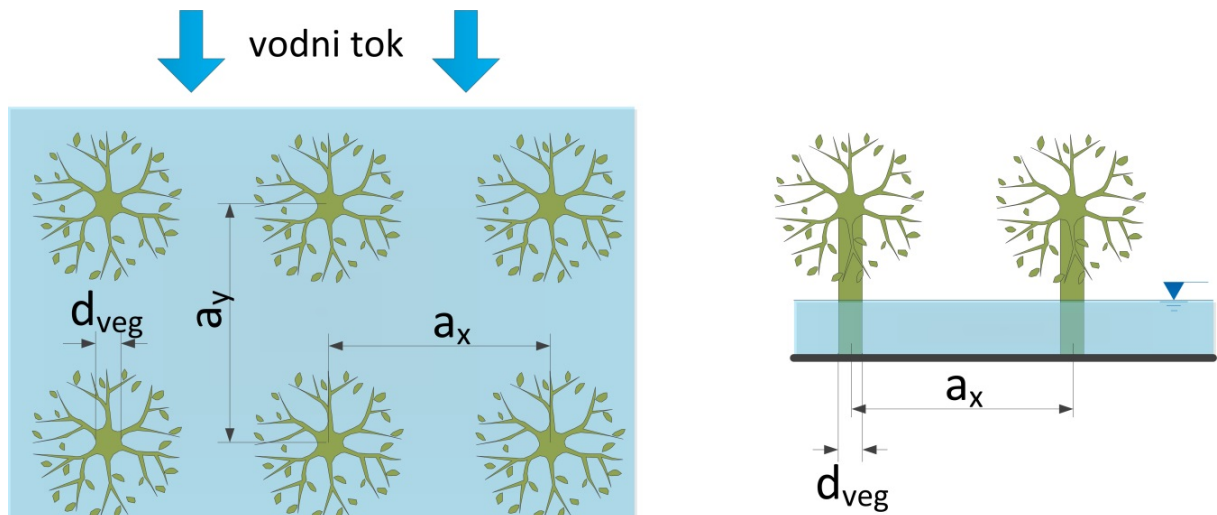
- F ... sila upora oblike [N],
- u ... hitrost toka [m/s],
- γ ... specifična teža vode [N/m³],
- A_{\perp} ... natočna površina vegetacije (površina pravokotna na smer toka) [m²],
- d_{veg} ... povprečni premer stebel vegetacije [m],
- H ... višina vegetacije pod vodo [m],
- C_u ... koeficient upora [-], vrednosti v razponu 0,6 → 2,4 (Landesanstalt für Umweltschutz, 2002).

Neolesenelo vegetacijo in mehke lesne vrste vodni tok pri relativno večjih globinah poleže, zaradi česar se, če pride do popolne potopljenosti, zmanjša natočna površina (A_{\perp}) in s tem upor vegetacije (Mertens, 2006). Koeficient upora je odvisen od hitrosti vodnega toka, Froudovega in Reynoldsovega števila. Ker v enačbi nastopa d_{veg} , moramo uporabiti povprečno vrednost preseka debel oziroma sestoj zarasti (grmovje, drevje) klasificiramo glede na presek debel. S koeficientom trenja λ_{veg} zajamemo upor oblike (DVWK, 1999):

$$\lambda_{veg} = \frac{A_{\perp}}{A} C_u = \frac{4 \cdot d_{veg} \cdot h}{a_x \cdot a_y} \cdot C_u \quad (24)$$

kjer pomeni:

- λ_{veg} ... Darcy-Weisbachov koeficient trenja [-],
- A ... celotna površina pretočnega prereza [m²],
- a_x ... razdalja med stebli oz. debli v smeri x [m],
- a_y ... razdalja med stebli oz. debli v smeri y [m].



Slika 17: Shematski prikaz dimenzij zarasti, ki nastopajo v Mertensovih enačbah.

Figure 17: A schematic view of vegetation dimensions that appear in Mertens's equations.

V primeru pestrega sestojja vegetacije in velikim razponom debelin stebel je mogoče vegetacijo klasificirati in upor določiti za posamezno skupino. Pri določanju skupnega koeficienta se upošteva, da se posamezne izgube seštejejo (Müller, 2009).

2.4.2 Lokalne izgube kot posledice topografije, batimetrije in objektov z lokalnim vplivom

Lokalne energijske izgube pri vodnem toku se pojavijo zaradi sprememb smeri tokovnic (razširitev ali zožitev pretočnega prereza, razcepi, krivine, različni objekti, spremembe trase oziroma smeri toka itd). Pri takšnih spremembah smeri tokovnic prihaja do vrtnčenja in turbulence, zaradi česar pride do disipacije energije osnovnega vodnega toka.

Določanje lokalnih izgub zahteva detajlno hidravlično, pogosto tudi eksperimentalno obdelavo. Le v nekaterih primerih, ko lokalne izgube niso bistvene oziroma ko gre za enostavne geometrijske oziroma hidravlične razmere, jih je možno vključiti v običajen račun gladin in jih upoštevati z izračunom ustreznih koeficientov za lokalne izgube (ξ), ki jih najdemo v literaturi. Kadar pa lokalna ovira spremeni režim toka oz. bistveno vpliva na potek gladine, je ustrežnejše, če profil z lokalno motnjo upoštevamo kot kontrolni (merodajni) profil. To pomeni, da račun poteka gladin izvršimo na odsekih med takimi kontrolnimi profili, dogajanje v kontrolnih profilih posebej (hidravlično) analiziramo, rezultate pa upoštevamo kot robni pogoj za račun gladin na ustreznem (vplivnem) odseku (Steinman, 2010).

2.4.3 Trendi spreminjanja rabe prostora na poplavnih površinah

Obvodni prostor in poplavne površine je človek zaradi ugodnih topografskih in pedoloških značilnosti od nekdanj izkoriščal. Tudi danes pri koriščenju poplavnih površin prihaja do številnih teženj po izvajanju kmetijskih in industrijskih dejavnosti, gradnji prometne infrastrukture, energetskih objektov, stanovanjskih sosesk in tudi namenjanju površin rekreacijskim dejavnostim. Kot pomemben kriterij pri reševanju navzkrižnih interesov prostorskega načrtovanja in umeščanja različnih objektov v prostor se upošteva tudi analiza vpliva načrtovanega stanja na odtočne razmere in poplavno varnost na vplivnem območju. Številne možne variacije spreminjanja rabe obvodnega prostora in poplavnih površin, predvsem vezane na industrijske dejavnosti in poselitve, ki povečujejo ranljivost in občutljivost območij, vključujejo tudi protipoplavne ureditve, s čemer pa se izločajo poplavne (retenzijske) površine. Analiza vpliva načrtovanega stanja se za takšne posege izvede na podlagi projektnih rešitev objektov in ureditev, ki so pripravljene na podlagi projektnega pretoka. Ker se s protipoplavnimi ureditvami izniči retenzijska funkcija poplavnih površin, so z vidika hidravličnih analiz, ki so bile izvedene v sklopu hidravlične analize, zanimivi predvsem trendi sprememb rabe prostora, ki bi morebiti lahko pozitivno vplival na odtočne razmere na retenziji.

Vodni in obvodni prostor, posebej na odsekih z manjšimi padci in s poplavnimi ravnici, je človeku nudil ugodne razmere za bivanje in preživetje. Rodovitna zemlja morfološko ugodnih poplavnih ravnici, možnost ribolova, odvzemanje vode za namakanje obdelovalnih površin, kasneje tudi možnost izkoriščanja vodne moči za mline in žage so le nekatere prednosti, ki so človeku omogočile lažje preživetje in ga prepričale o stalni naselitvi ob njih. Obvodni prostor tudi danes igra pomembno vlogo. Pritiski po razvoju in širjenju antropogenih dejavnosti so vse močnejši. Na eni strani so takšni, vse pogosteje kapitalsko visoko vredni posegi človeka v obvodni prostor in na poplavne ravnice tvegani, ker povečujejo ranljivost in posledično ogroženost območij. Po drugi strani pa se s protipoplavnimi posegi in ureditvami vodotokov izloča obsežne površine in na ta način jemlje prostor vodi v času visokovodnih dogodkov. Na ta način se zmanjšuje ali celo izniči naravna zadrževalna sposobnost poplavnih površin, poplavna nevarnost pa se prenaša na druge lokacije.

Poplavne površine imajo torej izredno pomembno vlogo pri oblikovanju odtočnih razmer ob visokovodnih dogodkih, zato se zadrževalni učinek danes pogosto posnema s suhimi zadrževalniki. Posebej kadar gre za obsežnejše površine, lahko namreč sprejmejo velike količine vode, ki zaradi topografskih lastnosti in rabe prostora čez njih teče počasneje, njena pot pa se podaljša. Na ta način prihaja do začasnega shranjevanja mase in upočasnjenega toka vode na retenziji, njeno zakasnjeno in postopno sproščanje oziroma vračanje v strugo vodotoka pa vpliva na znižanje konice visokovodnih valov dolvodno in povečanje potovalnega časa VV. Območja, ki imajo to funkcijo že zaradi samih naravnih danosti, je zato smiselno oziroma nujno ohranjati. Ohranjanje obvodnega prostora je izredno pomembno tudi z ekološkega vidika, zagotavljanja virov pitne vode, z vidika ohranjanja naravne pestrosti flore in favne itd.

2.5 Potovanje visokovodnih valov in zadrževalna sposobnost poplavnih površin

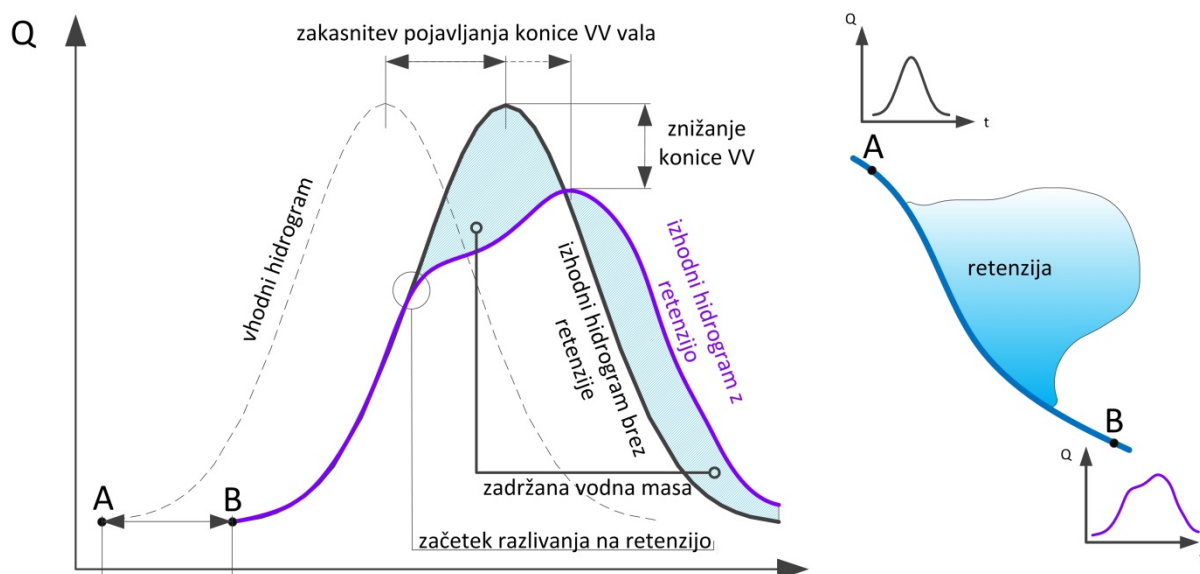
Čez odseke vodotokov z enakomernim padcem in nespreminjajočim pretočnim prerezom ter brez večjih retenzijskih površin VV valovi potujejo večinoma s konstantno hitrostjo, konica pa pri tem ostaja praktično nespremenjena. Z razlivanjem dela volumna vode VV vala na retenzijo se na njej pojavijo vzporedni tokovi s spremenjenimi hidravličnimi karakteristikami.

Na retenziji prevladujejo razmeroma plitvi tokovi z manjšimi hitrostmi, zaradi česar se pojavi pojav zadrževanja vode in postopnega vračanja vode nazaj v strugo vodotoka s časovnim zamikom. Posebej v primerih, ko je volumen retenzije relativno velik v primerjavi z volumnom vala nad pretočno sposobnostjo struge, ima zadrževanje voda na retenziji in postopno sproščanje oz. vračanje vodne mase ugoden vpliv na povečanje potovalnega časa konice čez območja in njeno znižanje. Pri tem imajo odtočne razmere, ki so odvisne od mikro in makro topografskih značilnosti, vrste pokrovnosti, kmetijskih kultur in drugih dejavnikov rabe prostora ter spreminjanje ozelenelosti, višine in gostosti vegetacije v posameznih letnih časih, velik vpliv na zadrževalno sposobnost. Vpliv retenzije na VV val se odraža v zmanjšani intenziteti in podaljšanem času visokovodnega dogodka.

2.5.1 Potovanje in preoblikovanje hidrogramov visokovodnih dogodkov

Dokler v naraščajoči fazi VV vala ni presežena pretočna sposobnost struge, je potovanje VV vala enakomerno, gradient naraščajočega dela hidrograma pa vzdolž odseka ostaja praktično enak. Ko je presežena pretočna sposobnost struge, se pojavi izlivanje iz struge in s tem interakcija med strugo in poplavnimi območij. Na hidrogramu se začetek razlivanja na retenzijo pokaže kot zmanjšanje gradienta naraščanja pretoka v strugi in pojav "rame" v naraščajočem delu (Leopold, 1994).

Volumen VV vala, relativna velikost retenzije, odtočne razmere (hitrosti, smeri in gladine vode) in topografske lastnosti retenzije vplivajo tako na količino vode, ki se prelije na retenzijo, kot tudi na čas zadrževanja in začetek ter lokacijo vračanja vodne mase nazaj v strugo. Položnejši del naraščajoče veje hidrograma lahko iz različnih razlogov postane zopet bolj strm. Po obliki izhodnega hidrograma je ob poznavanju razmer na retenziji mogoče določiti vzrok ponovnega prevoja v bolj strmo naraščanje pretoka. V primeru razmeroma hitrih tokov po retenziji in manjšega časovnega zadrževanja vode se hitrejše naraščanje pojavi zaradi sovpadanja tokov po strugi in retenziji. Prav tako pa se povečan gradient naraščanja pretoka v strugi pojavi zaradi zmanjšane sposobnosti odlivanja vode na retenzijo. Bolj ali manj upočasnjeno odlivanje se pojavi zaradi nizkih hitrosti vodnega toka po retenziji (zaradi velike hidravlične hrapavosti, vpliva topografskih lastnosti itd.) in relativno hitrejšega naraščanja gladin na retenziji v primerjavi z naraščanjem gladin v strugi vodotoka. Prav tako se odlivanje na retenzijo upočasni oz. praktično povsem prekine, če je volumen retenzije relativno majhen v primerjavi z volumnom VV vala. Če je retenzija praktično že povsem zapolnjena ob nastopu konice, le-ta potuje dolvodno z nespremenjeno hitrostjo in konico.



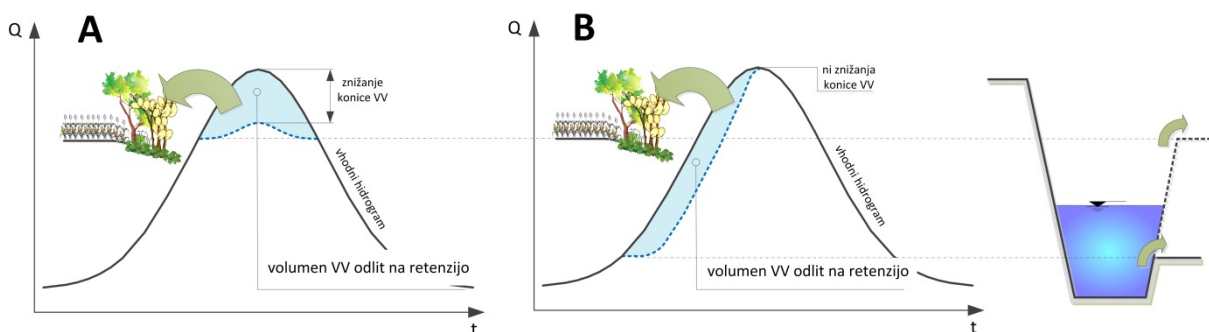
Slika 18: Značilno preoblikovanje hidrograma VV vala pri prehodu čez retenzijska območja.

Figure 18: A typical flood wave hydrograph transformation in the passage across the retention areas.

V primeru daljšega zadrževanja vode na retenziji je možen pojav "trebuh" hidrogama v padajoči fazi. Trebuh v padajoči fazi se pojavi v primerih izrazito počasnejših vzporednih tokov po retenziji, ko se vračanje vodne mase v strugo pojavi po prehodu konice VV vala čez obravnavani odsek.

2.5.2 Vloga retenzijskih površin pri blažitvi intenzitete in obsežnosti poplavnih dogodkov

Retenzijske površine so območja, ki jih voda preplavi v času visokovodnih dogodkov, ko je presežena pretočna sposobnost struge vodotoka. S poplavljanjem retenzije se pojavijo vzporedni tokovi, praviloma počasnejši od glavnega toka vode po strugi, zaradi česar prihaja do zadrževanja vodne mase, zmanjšanje konice VV vala in posledično zmanjšano poplavno nevarnost na območjih dolvodno. Zadrževanje voda, upočasnjeno pretakanje in postopno vračanje vodne mase v glavno strugo vodotoka je odvisno od odtočnih razmer, ki so posledica makro in mikro topografije retenzije (padec, stari rokavi itd.), rabe prostora, višine in gostosti vegetacije v posameznih letnih časih itd. Predvsem je vpliv retenzije na znižanje konice odvisen od velikosti retenzije v primerjavi z volumnom visokovodnega vala nad pretočno sposobnostjo struge. Ob zapolnjeni retenziji oziroma v primeru majhnega volumna je ugoden vpliv retenzije majhen. Izrazitejši vpliv retenzije se zato pojavi pri visokovodnih dogodkih nižjih povratnih dob, krajših trajanj in z večjim gradientom naraščanja pretoka (Williams et al., 2012). Retenzija ima ugoden vpliv na znižanje konice pri VV valovih z določenim razponom volumna in konice oziroma pri VV valovih, pri katerih se odlije vršni del vala, z retenzijo torej odrežemo konico VV vala (slika 19). Kolikšen del VV vala se odlije za največji učinek, je odvisen od začetka prelivanja, volumna retenzije in odtočnih razmer čez retenzijo.



Slika 19: Različno preoblikovanje hidrograma VV vala v strugi glede na začetek prelivanja na retenzijo (English Nature, 2002).

Figure 19: Different transformation of HW wave hydrograph of the river channel according to beginning of the spilling on the retention area (English Nature, 2002).

Večjo funkcionalnost retenzije z omejenim volumnom in povratne dobe VV vala je posebej treba upoštevati, kadar se z gradbenimi ukrepi (nasipi, prelivni itd.) spreminja režim odlivanja na retenzijo oziroma pri projektiranju suhih zadrževalnikov, pri katerih gre za posnemanje naravnih retenzijskih sposobnosti. Pri projektiranju prelivanja s fiksno prelivno krono je potrebna odločitev, za kakšno povratno dobo dogodkov (projektni pretok) je rešitev projektirana. Pri objektih s hidromehansko opremo, je treba določiti pravilnik obratovanja, ki temelji na kakovostni hidrološki osnovi in omogoča optimalno izkoriščenje koristnega volumna retenzije oziroma zadrževalnika. V obeh primerih je treba preveriti tudi vpliv objektov na dinamiko potovanja VV valov s povratnimi dobami zunaj ciljnega območja. Posegi morajo namreč izboljšati oziroma vsaj ohranjati odtočne razmere tudi pri VV dogodkih, za katere objekti niso z izbranim projektним pretokom namenjeni. Optimalno izkoriščenje koristnega volumna pomeni obratovanje z zaporničnimi elementi, ki je volumensko in časovno usklajeno z dinamiko poplavnega vala. Polnjenje v prezgodnji fazi naraščanja pretoka pomeni zapolnitev retenzije pred nastopom konice in posledično nezmožnost znižanja konice. Prav tako tudi prepozno aktiviranje retenzije onemogoča izkoriščenje njene polne prostornine in vpliva na znižanje konice.

2.5.3 Vpliv hidravlične hrapavosti retenzije na potovanje visokovodnih valov

Na retenziji se večinoma pojavljajo plitvi vodni tokovi, zaradi česar imajo vrste pokrovnosti, kmetijske kulture in drugi dejavniki rabe prostora ter spreminjanje ozelenelosti, višine in gostote vegetacije v posameznih letnih časih, kakor tudi mikro topografske lastnosti, ki dodatno vplivajo na hidravlično hrapavost, velik vpliv na odtočne razmere.

Če izhajamo iz osnovnih enačb za pretok

$$Q = \bar{u} * S \quad (25)$$

in Manningove enačbe za hitrost vodnega toka \bar{u} , ki je odvisna od Manningovega koeficienta trenja n_g

$$\bar{u} = \frac{1}{n_g} R^{2/3} I_0^{1/2} \quad (26)$$

lahko ugotovimo, da se z večanjem hidravlične hrapavosti hitrosti vodnega toka zmanjšujejo, globine vode pa povečujejo. Ob upoštevanju principa delovanja vpliva zadrževanja vodne mase na retenziji sledi, da povečevanje hidravlične hrapavosti povečuje zadrževalno sposobnost retenzije in posledično vpliva na zniževanje konice VV vala in povečevanje poplavne varnosti dolvodno. Številni avtorji (English Nature, 2002; Thomas in Nisbet, 2007; Hill, 2010 in drugi) ugotavljajo, da lahko povečanje gostote vegetacije pomembno vpliva na zniževanje konice VV. Predvsem pri raziskavah, ki so bile opravljene z enodimenzionalnimi modeli, je treba poudariti, da lahko rezultati izkazujejo precenjen ali podcenjen vpliv oziroma so rezultati napačno interpretirani. Na eni strani so 1D modeli veliko bolj odzivni na spreminjanje hidravlične hrapavosti, po drugi strani pa z 1D modeli ni mogoče zajeti izrazitih 2D tokovnih razmer, ki praviloma prevladujejo na poplavnih površinah. Daljša vodna pot, ki je posledica topografskih značilnosti poplavnih območij, ima lahko pomembno večji vpliv od hidravlične hrapavosti. Pri oceni ugodnega vpliva hidravlične hrapavosti na zadrževalno sposobnost in zniževanje konice VV vala pa je treba upoštevati tudi negativni vpliv pretirano visoke hidravlične hrapavosti. Z rabo prostora oziroma s spreminjanjem hidravlične hrapavosti je mogoče vplivati tako na količino vodne mase, ki se razlije na poplavno območje, kot tudi na hitrosti vodnega toka čez nje. S povečano hrapavostjo se sicer upočasni vodni tok čez retenzije, zaradi česar se voda dlje zadržuje v njej in se kasneje vrača v strugo vodotoka. Hkrati se z večanjem hrapavosti zmanjšuje količina razlite vode, gladine na retenziji pa naraščajo hitreje, kar lahko povzroči, da ob nastopu konice ni zadostne razlike med gladino vode v strugi in retenziji, zaradi česar se konica vala ne razlije na retenzijo in potuje po strugi brez znižanja. Če je v celotni naraščajoči fazi VV vala dovolj velika razlika gladin med strugo in retenzijo oziroma retenzija še ni v celoti napolnjena pred nastopom konice VV vala, se razlivanje pojavlja ves čas naraščanja pretoka. Če pa je retenzija že zapolnjena v času nastopa konice, ker se zaradi velikega upora toku vode pojavijo višji vodostaji, konica neznižana potuje skozi obravnavani odsek brez vpliva retenzije.

2.6 Poplavna nevarnost

Poplavna nevarnost je možnost nastanka poplav, predvsem kot posledica izrednih naravnih ali antropogenih dogodkov. Stopnja nevarnosti je odvisna od verjetnosti nastopa in intenzitete dogodka. Intenziteta poplavnega dogodka se določa z globino vode ali z gibalno količino, tj. produktom globine vode in hitrosti vodnega toka (MOP, 2007). Podatek o globini in hitrosti vode je ključen za določanje stopnje intenzitete dogodka, saj je sila vode neposredno povezana z ranljivostjo človeka in objektov. Posamezni objekt je na primer lahko povsem varen do določene globine preplavitve in hitrosti vode, pri višjih vodostajih oziroma hitrostih pa sila vodnega toka že lahko bodisi ogrožena človeška življenja ali stabilnost objekta. Z analiziranjem obeh kriterijev, upošteva pa se bolj neugoden, se poplavna območja kategorizirajo v razrede poplavne nevarnosti.

Slovenijo od vseh ujm najbolj ogrožajo nevarnosti, povezane z vodotoki. Glede na to, da leži na prehodu alpskega sveta v nižinski panonski svet, se ta nevarnost pojavlja tako ob hudourniških strugah hribovitih območij kot tudi ob vodotokih na ravninskih območjih. Kar 15 odstotkov površin Slovenije je poplavno ogroženih, 7 odstotkov ljudi živi na območjih, kjer so poplave običajen pojav, in 24 odstotkov prebivalstva na območju velikih poplav (Penca in sod. 1999). Poplavitev (tekoča voda) oziroma preplavitev (stoječa voda) navadno suhih območij je lahko posledica presežene pretočne sposobnosti odvodnikov, dvig gladine morja in podtalnice, nezadostno ali poškodovano vodovodno ali kanalizacijsko omrežje itd.

- **Vrste poplav, vzroki za njihov nastanek in vrste negativnih vplivov**

Vzroki za pojav poplavljanja so lahko različni naravni in antropogeni dejavniki, pri tem pa gre za poplavljanje lastnih, zalednih ali tujih vod. Najpogostejši vzroki poplav so vremenski in klimatski pojavi, topografske, kamninsko-pedološke lastnosti območja, pokrovnost in raba prostora ter tudi antropogeni dejavniki, ki neposredno in posredno vplivajo na odtočne razmere.



Slika 20: Tipi poplavne nevarnosti glede na vrsto vodnih virov (Steinman in sod, 2010).

Figure 20: Types of flood hazards according to types of water hazard source (Steinman et. al., 2010).

- ❖ **Poplave naraslih vodotokov**

Najpogostejše in tudi z največ negativnimi posledicami so poplave vodotokov, ko je presežena pretočna sposobnost glavne struge in se voda začne razlirati na obvodni prostor in poplavne ravnice. Za te vrste poplav so od naravnih vzrokov najpogostejši vremenski in klimatski pojavi, kot so dolgotrajna deževja, taljenje snežne odeje oziroma kombinacija obeh pojavov. To opisujemo z vodnim režimom vodotoka. Med poplave naraslih vodotokov sodijo tudi hudourniške poplave ob sicer kratkih, a izredno izdatnih padavinah (flash floods). Te poplave so sicer kratkotrajne, pogosto pa je njihova intenziteta zaradi velikega površinskega odtoka velika. Antropogeni dejavniki tovrstnih poplav sicer redkeje nastopajo kot glavni vzrok, pogosto pa poslabšajo razmere ob nastopu visokovodnih dogodkih. Med njih sodijo porušitev nasipov in jezov, napačno obratovanje na jezovnih zgradbah z mehansko opremo, zmanjšanje pretočne sposobnosti struge vodotoka zaradi nevezdrževanja zadostne pretočne površine in poddimenzioniranje objektov itd. Pri poplavih vodotokov se v obvodnem prostoru pojavijo vzporedni vodni tokovi, v katerih se pojavljajo tudi večje globine in hitrosti vode ter posledično hidrodinamične obremenitve. S sodobnimi prognostičnimi in hidravličnimi modeli je mogoče učinkovito analizirati in napovedati poplavne dogodke, njihovo intenziteto in obseg ter na tokovne razmere projektirati rešitve za zaščito oziroma pripraviti strokovne podlage za prostorsko načrtovanje in načrtov zaščite in reševanja.

❖ Poplave zaradi zalednih voda

Izdatne padavine v vodozbirnem območju, ki kot tok po površini doteka na območje poselitve s sosednjih vzpetin, povečan površinski odtok zaradi sprememb rabe prostora in nezadostna kapaciteta odvodnikov oziroma njihova trenutno zmanjšana pretočna sposobnost so glavni vzroki poplav zalednih voda. Spremljajoči pojav je tudi erozija, ki je praviloma lokalno omejena, lahko pa erodirani material dodatno poslabša odtočno sposobnost odvodnikov z zamašitvijo prepustov, mostnih odprtih, kanalizacijskega omrežja itd (Trček, 2003).

❖ Poplave zaradi lastnih vod in poddimenzioniranega ali poškodovanega kanalizacijskega omrežja

Odvajanje lastnih voda je v Sloveniji do določene verjetnosti pojava urejeno s kanalizacijskem omrežjem. Glede na statistično verjetnost nastopa količine padavin in pričakovanega površinskega odtoka se omrežja dimenzionirajo na dogodke s 2- do 5-letno povratno dobo (Trček, 2003). V primeru večje količine in intenzitete padavin je presežena pretočna sposobnost omrežja, zaradi česar je preprečen vtok vode iz odprtih površin, na predvidenih mestih pa prihaja tudi do razbremenjevanja sistema. Vzrok poplav iz kanalizacijskih omrežij je lahko tudi omejen ali onemogočen oziroma tehnično nepravilno rešen iztok iz sistema. V takšnih primerih so najpogosteje prizadeta območja naravnih in antropogenih depresij in kaset (podvozi, garaže itd). Danes se vse bolj uveljavlja ločen sistem kanalizacije, kjer pa je sposobnost kanalizacije za padavinske vode tudi omejena, zato je treba za višje odtokove načrtovati vodne poti pri pojavu VV dogodkov.

❖ Poplave zaradi dviga gladine jezer oz. morja

Poplave kot posledice dviga gladine stoječih voda so v Sloveniji sicer redke in manjšega obsega, če seveda ne upoštevamo presihajočih jezer. Nastopijo ob močnih južnih vetrovih, izrazito visoki plimi in nizkem zračnem tlaku, poplavljeni pa so večinoma le ožja območja obale. Intenzivnejše in obsežnejše poplave lahko nastanejo ob obalah večjih odprtih morij in oceanov ter so posledica izrednih naravnih dogodkov, kot so poplavni valovi in cunamiji ob potresih in premikih v zemeljski skorji.

2.7 Kazalniki vpliva spreminjajoče se hrapavosti

Za analiziranje in določitev vpliva spreminjajoče se hidravlične hrapavosti poplavnih površin na potovanje visokovodnih valov so bili izbrani kriteriji, s katerimi je mogoče obravnavati spremenjene odtočne razmere na retenziji in preoblikovanje izhodnega hidrograma. Z vidika poplavne varnosti je s spremembami odtočnih razmer mogoče doseči ugoden učinek pri nekaterih parametrih oziroma kazalnikih, pri drugih pa se spremembe odražajo negativno. Za celovito presojo vplivov so bili izbrani tako kazalniki, ki odražajo vpliv na obravnavanem območju, kakor tudi kazalniki, ki odražajo vpliv na izhodne razmere in so pomembni z vidika poplavne varnosti območij dolvodno.

Kot kazalnika vpliva spremenjenih odtočnih razmer na obravnavanem območju na izhodne parametre, sta bila izbrana:

- konica izhodnega hidrograma in
- potovalni čas konice VV vala čez izbrani odsek.

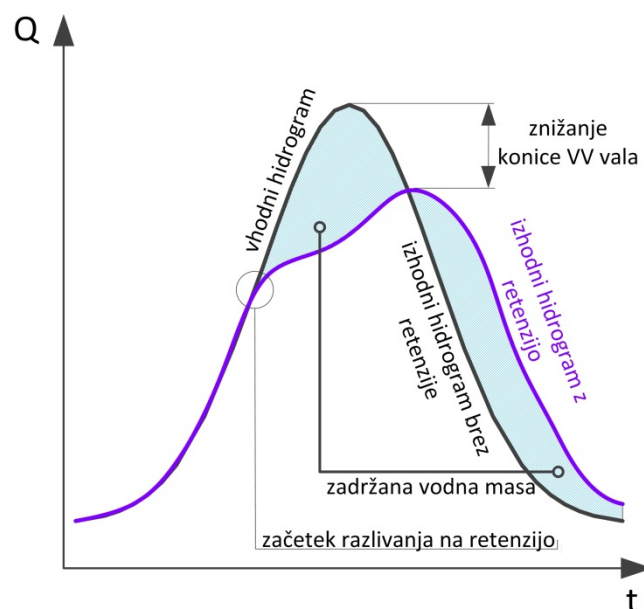
Zaradi spremenjenih odtočnih razmer na obravnavanem območju, ki bi ugodno vplivali na razmere dolvodno, pa se lahko poslabšajo tudi poplavne razmere na samem obravnavanem območju. Kot kazalnika poplavne varnosti na območju sta bila izbrana:

- doseg poplavnih voda in
- porazdelitev razredov poplavne nevarnosti

Prvega določajo t. i. "poplavne linije", drugi je določen po Pravilniku o metodologiji za določanje območij, ogroženih zaradi poplav in z njimi povezane erozije celinskih voda in morja ter o načinu razvrščanja zemljišč v razrede ogroženosti.

2.7.1 Konica hidrograma VV vala v izhodnem prerezu

Z razlivanjem vode na poplavna območja ob visokovodnih dogodkih prihaja do začasnega shranjevanja vodne mase na retenziji, zaradi česar se konica izhodnega hidrograma zniža. Tokovne razmere in čas zadrževanja so odvisni od topografije območja in rabe prostora.



Slika 21: Znižanje konice hidrograma zaradi začasnega zadrževanja dela vodne mase VV vala v retenziji.

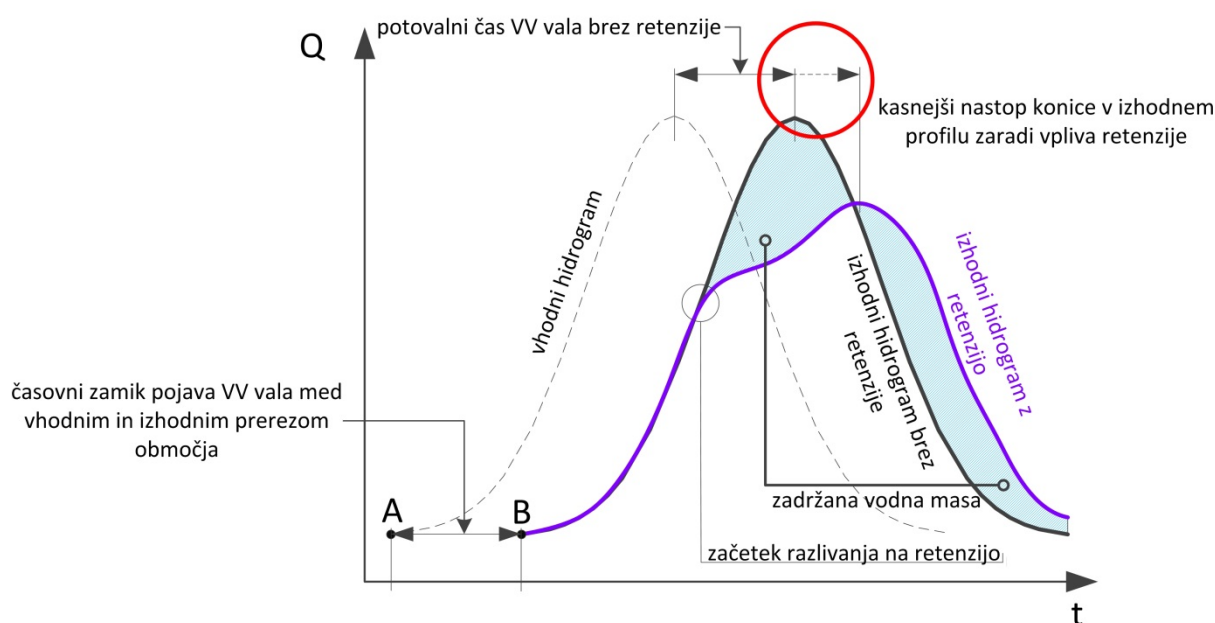
Figure 21: A hydrograph attenuation due to temporary retention of water mass of the HW wave in the retention.

Analiza vpliva hidravlične hrapavosti retenzijskih površin na konico VV vala za posamezni scenarij je bila izvedena s primerjavo maksimalnega pretoka izhodnega hidrograma pri primeru brez retenzijskega prostora. Ker je možno po obliki izhodnega hidrograma in ob poznavanju razmer na retenziji določiti vzroke bolj ali manj ugodnega vpliva na znižanje konice VV, je bila za posamezni scenarij izvedena tudi analiza spremenjenih odtočnih razmer kot posledica spreminjajoče se hrapavosti retenzije.

2.7.2 Potovalni čas konice čez obravnavani odsek

Zaradi enake funkcije retenzijskih površin, kot je bila opisana pri vplivu na zmanjšanje konice, se praviloma tudi upočasni potovanje konice in s tem časovno zamakne nastop konice na izhodnem profilu. Ko pretok v naraščajoči fazi VV vala preseže pretočno sposobnost

struge vodotoka, se pojavi prelivanje na retenzijo, na kateri se pojavijo s strugo vzporedni vodni tokovi, voda teče počasneje, se zadržuje in se vrača nazaj v strugo vodotoka v kasnejši fazi VV vala, oz. ko so gladine vode v strugi vodotoka nižje od gladin na retenziji. Glede na sovpadanje hidrograma v strugi vodotoka in hidrogramov vzporednih tokov ob vračanju nazaj v strugo je odvisen nastop konice na izhodnem profilu obravnavanega območja. V primeru daljših zadrževalnih časov se lahko voda vzporednih tokov vrača s tako velikim zamikom, da ne prispeva več k sami konici, temveč le povečuje dolžino trajanja VV vala. V primeru relativno velikega volumna VV vala v primerjavi z velikostjo retenzije se lahko pojavi zaplnitev retenzije pred nastopom konice v vhodnem profilu, zaradi česar se masa vode v najvišjem delu VV vala ne more več v znatnem obsegu razlivati v retenzijo in tako konica praktično neznižana potuje z enako hitrostjo, kot bi v primeru brez retenzije. Kakšna je dinamika interakcije tokov med strugo in poplavnimi površinami, je bilo torej analizirano s potovalnim časom konice VV vala.



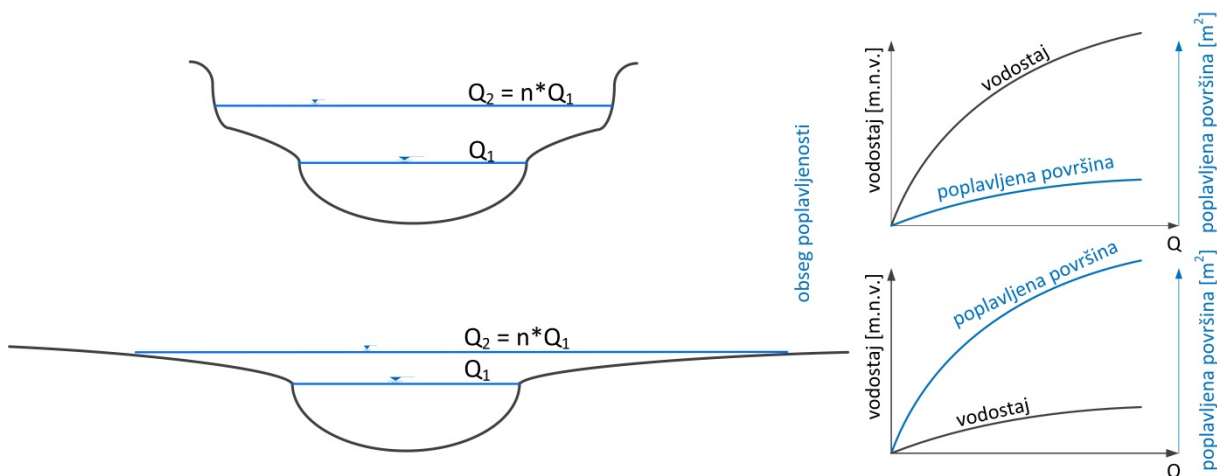
Slika 22: Časovni zamik nastopa konice vala na izhodnem prerezu, ki se pojavi zaradi vpliva retenzije.

Figure 22: A time delay of wave peak in the outlet section due to the retention effect.

Kriterij za določanje vpliva hidravlične hrapavosti retenzijskih površin na upočasnitev VV vala je bil določen s primerjavo potovalnega časa konice hidrograma pri različni hrapavosti glede na primer brez vpliva retenzije. Če je v celotni naraščajoči fazi VV vala dovolj velika razlika gladin med strugo in retenzijo oziroma retenzija še ni v celoti napolnjena pred nastopom konice VV vala, se razlivanje pojavlja ves čas naraščanja pretoka. Če pa je retenzija že zapolnjena v času nastopa konice, le-ta praktično neznižana potuje skozi obravnavani odsek.

2.7.3 Doseg poplavnih vod oz. obseg poplavljenosti

Spreminjanje odtočnih razmer zaradi spreminjajoče hidravlične hrapavosti se odraža tudi na nivojih vodne gladine in posledično v obsegu poplavljenosti. S povečevanjem hrapavosti in s tem trenjskih sil, ki nasprotujejo vodnemu toku, se ob enakem pretoku pojavijo višje gladine vode, višje gladine pa povzročijo večje območje poplavljenosti. Na eni strani aktiviranje večjih površin retenzije ugodno vpliva na prva dva kriterija (pretok in potovalni čas konice VV vala), na drugi strani pa se s tem povečuje površina poplavljenih območij.



Slika 23: Primerjava medsebojne odvisnosti vodostaja vodotoka in obsega poplavljenosti od pretoka za topografsko različni obvodni prostor.

Figure 23: Comparison of inter-dependence of the river water surface elevation in the river channel and on flooded areas on the discharge for topographically different flooded area.

Pojav povečevanja poplavljenih območij zaradi dviga gladin je predvsem izrazit na ravninskih območjih brez izrazitih topografskih sprememb, kjer lahko majhen dvig gladine v vodotoku povzroči bistveno povečanje dosega poplavnih voda.

2.7.4 Spreminjanje stopnje poplavne nevarnosti

Na ravninskih območjih lahko majhen dvig gladine povzroči relativno veliko povečanje obsega površin s potencialno nevarnostjo poplav. V ožjih dolinah in na poplavnih območjih, ki so omejena z izrazito topografsko spremembo (protipoplavni nasipi, terasa, cestno telo, hribovje ipd.), pa lahko dvig gladine ne povzroči bistveno oz. praktično nobene spremembe v obsegu poplavljenosti. V nasprotju z obsegom poplavljenosti se zato bolj odzivno spreminja nivo gladine vode. Ker so ob enakem pretoku v neposredni in obratno sorazmerni povezavi gladine in hitrosti vode, spreminjajoča hidravlična hrapavost vpliva na oba parametra. Da bi določili vpliv hidravlične hrapavosti na poplavno varnost, je bil izbran kriterij stopnje poplavne nevarnosti, kot ga določa Pravilnik o metodologiji za določanje območij, ogroženih zaradi poplav in z njimi povezane erozije celinskih voda in morja ter o načinu razvrščanja zemljišč v razrede ogroženosti (v nadaljevanju Pravilnik). Pravilnik pri določanju poplavne nevarnosti zajema tako kriterij globine vode kot tudi kriterij gibalne količine vodne mase oz. produkt hitrosti in globine vode. Kot omenjeno je bil kriterij stopnje poplavne nevarnosti povzet po Pravilniku, zato so v nadaljevanju podani predpisi s področja poplav, ki so podlaga za Pravilnik.

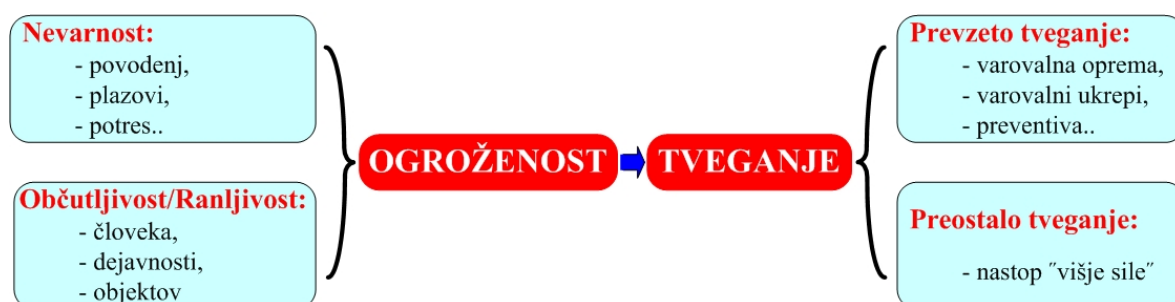
2.7.5 Predpisi s področja poplav

Za celovito, sistematično in trajnostno obvladovanje poplavne nevarnosti so bili na podlagi evropske poplavne in vodne direktive v Sloveniji pripravljene predpisi za določanje poplavno ogroženih območij, na katerih je, glede na stopnjo poplavne nevarnosti, določene na podlagi več dejavnikov, omejena raba prostora. Pravilnik (2007) in Uredba o pogojih in omejitvah za izvajanje dejavnosti in posegov v prostor na območjih, ogroženih zaradi poplav in z njimi povezane erozije celinskih voda in morja (v nadaljevanju Uredba) sta pravni podlagi za izpolnjevanje zahtev EU po izdelavi načrtov za obvladovanje poplavne ogroženosti, s

poudarkom na preprečevanju in varstvu ter pripravljenosti za ukrepanje, vključno z napovedovanjem poplav in sistemi zgodnjega obveščanja (EU poplavna direktiva, 2007).

- **Poplavna direktiva**

Podobno kot na drugih področjih se je v Evropski uniji poskušala uskladiti tudi zakonodaja za trajnostno gospodarjenje z vodnim in obvodnim prostorom, za določanje in obvladovanje poplavne nevarnosti ter s smernicami in omejitvami za zmanjšanje negativnih posledic, ki nastanejo zaradi škodljivega delovanja voda. Poplavna direktiva temelji na obravnavanju posameznih segmentov relacije nevarnost, ranljivost in ogroženost ter njihovem smotrnem povezovanju v celoto, kar omogoča oblikovanje učinkovitega pristopa k reševanju poplavne problematike (Rak in sod., 2008).



Slika 24: Relacije med nevarnostjo, ranljivostjo in tveganjem (Rak in sod., 2008).


































Figure 24: Relations between the hazard, vulnerability, threat and risk (Rak et. al. 2008).

Pri poplavni ogroženosti se pogosto preveč izpostavlja poplavno nevarnost, premajhen poudarek pa se je do sedaj dajal nekontroliranemu povečevanju ranljivosti območij, izpostavljenim poplavni nevarnosti. Pri tem izraz "ranljivost" pomeni "neodpornost na škodljivo delovanje voda", kar se običajno skuša zajeti s t. i. "škodnim potencialom". Z nepremišljenim prostorskim razvojem v obvodnem prostoru in na poplavnih ravninah se namreč povečuje ranljivost oziroma občutljivost in posledično tudi ogroženost. Glavni cilj Poplavne direktive, ki je nastala na podlagi primerov dobre prakse, je tako podajanje smernic in obveznosti članicam EU območja za pripravo z EU usklajene zakonodaje s tega področja, pripravo oceno poplavne nevarnosti in ranljivosti ter predvsem načrtov za zmanjšanje in obvladovanje poplavne ogroženosti. Pri pripravi načrtov je glavno vodilo upoštevanje vseh vidikov obvladovanja poplavne ogroženosti, s poudarkom na prostorskem načrtovanju, ki s preventivnimi ukrepi zmanjšuje poplavno ogroženost, ter na preprečevanju, varstvu, pripravljenosti, napovedovanju in opozarjanju pred VV dogodki (Direktiva, 2007).

- **Pravilnik o metodologiji za določanje območij, ogroženih zaradi poplav in z njimi povezane erozije celinskih voda in morja ter o načinu razvrščanja zemljišč v razrede ogroženosti**

S Pravilnikom, ki je bil sprejet 1. junija 2007, se je uskladila slovenska zakonodaja s področja določanja poplavno ogroženih območij s Poplavno direktivo. Metodologija določanja poplavne nevarnosti v skladu z zahtevami direktive ne upošteva le dosega poplavnih voda, temveč kategorizira poplavna območja na podlagi več dejavnikov. Doseg poplavnih vod je vezan na dogodke z različnimi povratnimi dobami. Poleg območij dosega 100-letnih voda, kar je običajno upoštevano v projektih za posege v prostor, so določena tudi poplavna območja 10- in 500-letnih voda. Medtem ko 10-letne vode predstavljajo pogostejše poplave z veliko verjetnostjo pojava, pa 500-letne predstavljajo poplave z majhno verjetnostjo oz. izredne

dogodke. Za dogodke s 100-letno povratno dobo se poleg dosega vode upošteva tudi njena globina in hitrost. Podatek o globini in hitrosti vode je ključen za določanje stopnje intenzitete dogodka, saj je sila vode (oz. impulz) neposredno povezana z ranljivostjo človeka in objektov. Posamezni objekt je na primer lahko povsem varen do določene globine preplavitve in hitrosti vode, pri višjih vodostajih oziroma hitrostih pa so že lahko bodisi ogrožena človeška življenja ali stabilnost objekta. Z analiziranjem obeh kriterijev, upošteva pa se bolj neugoden, so poplavna območja kategorizirana v štiri razrede, in sicer na območja z veliko, srednjo, majhno in preostalo nevarnostjo (Rak in sod, 2008).

KARTA POPLAVNE NEVARNOSTI		RAZRED OGROŽENOSTI	KARTA POPLAVNE NEVARNOSTI			
GLOBINA VODE (Q_{100})	GLOBINA x HITROST VODE (Q_{100})		VELIKA	SREDNJA	MAJHNA	PREOSTALA
 < 0,5 m	 < 0,5 m ² /s	VELIKA  SREDNJA  MAJHNA  ZELO MAJHNA 	 Ov	 Ov	 Os	 Om
 0,5 m < 1,5 m	 0,5 m ² /s < 1,5 m ² /s		 Ov	 Ov	 Os	 Om
 > 0,5 m	 > 0,5 m ² /s		 Ov	 Os	 Om	 Om
velja za vsa območja			 Os	 Om	 Om	 Om
velja za območja, kjer je hitrost vode ≥ 1 m/s						
$V < 1$	območja, kjer so hitrosti ≤ 1 m/s					
Q_{500}	meja območja pri pretoku Q_{500}					
Q_{100}	meja območja pri pretoku Q_{100}					
Q_{10}	meja območja pri pretoku Q_{10}					
KARTA POPLAVNE NEVARNOSTI						
 Rm	območja zelo majhne ranljivosti					
 Rs	območja majhne ranljivosti					
 Rv	območja srednje ranljivosti					
 Rg	območja velike ranljivosti					
		 Om	majhna ogroženost			
		 Os	srednja ogroženost			
		 Ov	velika ogroženost			

Slika 25: Predpisani kriteriji in oznake za kartiranje (razredov) poplavne nevarnosti in ogroženosti (MOP, 2007).

Figure 25: Regulated criteria and marks for flood hazard and flood risk mapping (MOP, 2007).

Podrobnejšo analizo poplavne nevarnosti se izdelava za območja, na katerih se predvideva pripravo prostorskih načrtov, na njih pa, glede na Opozorilno karto poplav (<http://gis.arso.gov.si/>), obstaja nevarnost poplav. Opozorilna karta poplav namreč le označuje območja v Republiki Sloveniji, kjer so z različno stopnjo zanesljivosti in natančnosti obdelave že bile zaznane poplave. Gre torej za v preteklosti že evidentirane dogodke ali pa za območja z že izvedenimi hidravličnimi analizami, ki so po Pravilniku že lahko tudi podlaga za izris kart poplavne nevarnosti in določitev razredov nevarnosti (Šantl in sod, 2010). Na podlagi določitve poplavne nevarnosti na določenem območju so mogoči načrtovanje rabe prostora, morebitna izvedba ukrepov za zmanjšanje poplavne ogroženosti oziroma načrtovanje ukrepov zaščite in reševanja.

- **Uredba o pogojih in omejitvah za izvajanje dejavnosti in posegov v prostor na območjih, ogroženih zaradi poplav in z njimi povezane erozije celinskih voda in morja**

Medtem ko je Pravilnik leta 2007 uredil način določanja poplavne nevarnosti, je Uredba iz 2008 dokument, ki ureja področje zmanjševanja poplavne ogroženosti z omejevanjem in zmanjšanjem ranljivosti na območjih, kjer je poplavna nevarnost prisotna. Uredba podaja

zahteve, pogoje in omejitve za načrtovanje posegov v prostor in izvajanje dejavnosti na poplavam izpostavljenim območjih na načine, ki ne poslabšujejo obstoječega stanja, izpolnjujejo zahteve po ohranjanju in trajnostnem gospodarjenju z vodnim in obvodnim prostorom ter uresničevanje okoljskih ciljev (Vlada RS, 2008).

Glede na stopnjo poplavne nevarnosti, Uredba konkretno določa omejitve in pogoje za rabo prostora in izvedbo potrebnih omilitvenih ukrepov. Pri tem upošteva ranljivost (tj. neodpornost) na škodljivo delovanje voda na človeka, dejavnosti in objekte, ki so klasificirani na podlagi njihove pomembnosti (stanovanjski in nestanovanjski objekti, transportne, energetske in komunikacijske infrastrukture, kulturno in zgodovinsko pomembni objekti, itd.). Predvsem je pri industrijskih objektih upoštevan tudi njihov možen negativni vpliv na okolje. Za posamezne razrede nevarnosti so podane tudi sprejemljive dejavnosti, ki lahko bodisi pozitivno ali negativno vplivajo na stopnjo ogroženosti oziroma so pomembne za varnost ljudi, okolja in kulturne dediščine.

Kot indikator vpliva hrapavosti retenzije na odtočne razmere se je analiziral tudi obseg poplavljenosti. Pri VV valovih z 10- in 50-letno povratno dobo je bila obravnavana le površina poplavljenega območja in povprečna globina vode, za VV valu s 100-letno povratno dobo pa tudi razvrstitev poplavljenega območja po razredih KRPN, kot jih določa Pravilnik.

3.0 ZNAČILNOSTI OBMOČJA MODELIRANJA

Pri delu sta bila za analizo vpliva spreminjanja hidravlične hrapavosti na odtočne razmere visokovodnih valov uporabljeni dve območji modeliranja, in sicer primer s poenostavljeno geometrijo ter primer naravnega vodotoka z obsežnimi poplavnimi površinami, ki imajo razmeroma veliko retenzijsko sposobnost. Pri naravnih vodotokih ima lahko topografija obvodnega prostora, kjer se ob visokovodnih dogodkih oblikujejo vzporedni tokovi, izrazit vpliv na odtočne razmere, dolžina poti vode pred ponovnim vračanjem v strugo pa lahko bistveno vpliva na zadrževalno sposobnost.

Zato se je v prvi fazi vpliv hidravlične hrapavosti na potovanje in preoblikovanje visokovodnih valov analiziral na primeru z enostavno topografijo, da bi izločili vpliv lokalnih sprememb terena na tokovne razmere oz. na zadrževalno sposobnost. V drugi fazi se je ugotovitve preverilo še na območju reke Save na odseku Krško–Brežice, kjer se voda ob visokovodnih dogodkih razliva na obsežna poplavna območja. Pri obeh primerih se je komunikacija med strugo in poplavnimi površinami izvedla na dva načina. V prvi varianti je komunikacija potekala vzdolž celotne retenzije, pri drugi pa se je komunikacija omejila na zgornji del, kjer se je voda večinoma le razlivala, in na spodnji odsek, kjer se je razlita voda lahko akumulirala, predvsem pa se je vračala v glavno strugo vodotoka. Pri drugem načinu se je z omejitvijo komunikacije preverila možnost povečanja učinka retenzije na znižanje konice visokovodnega vala in njen potovalni čas. Opravljene analize za dejansko poplavno območje na Savi prinašajo pomembne informacije za ohranjanje oz. morebitno izboljšanje odtočnih razmer, če naj celoviti nabor posegov v prostor (HE, protipoplavni ukrepi, prometnice itd.) ohranja v naslednjem dolgoročnem obdobju zadrževalne lastnosti prostora, kot so bile upoštevane pri izdaji dovoljenj oz. pri presoji vplivov na okolje.

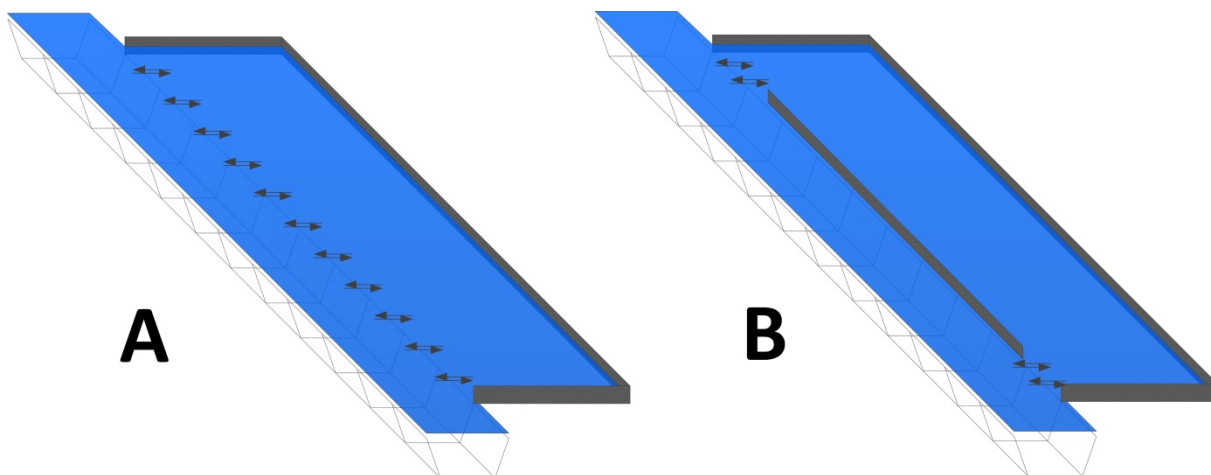
3.1 Opis teoretičnega območja modeliranja s poenostavljeno geometrijo

Poleg hidravličnih parametrov ima geometrija rečnega korita in poplavnih površin največji vpliv na potovalni čas in preoblikovanje visokovodnih valov. Za analizo vpliva hidravlične hrapavosti poplavnih površin na količine v retenzijo prelite vode, pretočno sposobnost poplavnih površin in posledično preoblikovanje poplavnega vala ter znižanje njegove konice je bilo najprej privzeto teoretično območje modeliranja s poenostavljeno geometrijo. Poenostavljena topografija retenzije je bila izbrana tako, da je bila ne glede na volumen in konico vala retenzija aktivirana praktično v celoti. Pri kompleksni topografiji retenzije se namreč lahko pojavljajo vzporedni tokovi (npr. po starih strugah, rokavih itd.) z bistveno daljšo potjo do mesta ponovnega vračanja vode v glavno strugo vodotoka, kot je razdalja vzdolž brežine vodotoka. V takih primerih je zadrževalna sposobnost retenzije veliko bolj odvisna od topografije kot od hidravličnih parametrov, hkrati pa se aktivacija površin in tokovne razmere lahko spreminjajo s samim pretokom. S topografsko poenostavljeno geometrijo je bil topografski dejavnik izvzet.

3.1.1 Opis zasnove geometrije območja modeliranja

Da bi bilo magistrsko delo čim bolj uporabno za prakso, so se pri geometrijski zasnovi območja modeliranja upoštevale nekatere podobnosti z območjem, ki je bilo kasneje uporabljeno za analizo za praktični primer naravnega vodotoka. Za tak primer je bil namreč izbran odsek reke Save dolvodno od Krškega, kjer se visoke vode razlivajo na obsežno območje Krško-Brežiškega polja. Povprečni padec Save na tem odseku je cca. 1 ‰. Takšen padec je bil tudi upoštevan pri rečnem koritu in na poplavnih površinah poenostavljenega

območja, s čimer se je poskušalo ohranjati tudi razmerje med vztrajnostnimi silami in silo teže oziroma hitrosti podobnega velikostnega reda. Podobnost z odsekom Save se je upoštevala tudi pri rečnem koritu, torej pri širini struge, nagibu brežin, pretočno sposobnostjo, vzdolžnim padcem itd. Velikost retenzije je po prostornini velikostnega reda desne retenzije reke Save med Krškim in Brežicam. Kot možni varianti komunikacije vode med glavno strugo in retenzijo sta bili obravnavani dve varianti, in sicer varianta s komunikacijo vzdolž celotne dolžine retenzije (Slika 26; A) in varianta, kjer je bila komunikacija omejena na zgornji in spodnji del retenzije (Slika 26; B).



Slika 26: Shematski prikaz teoretičnega območja s poenostavljeno geometrijo (primer A - komunikacija vzdolž celotne dolžine retenzije; primer B - komunikacija omejena na zgornji in spodnji del retenzije).

Figure 26: A schematic presentation of the theoretical area with simplified geometry (an example A – communication along entire length of the retention; an example B – limited communication on upstream and downstream section of the retention).

Število možnih spremenljivk je pri analizi komunikacije struge in obvodnega prostora veliko. Zato je zelo veliko tudi število možnih kombinacij. Ker je treba pri modeliranju vpliva posameznih spremenljivk preostale spremenljivke upoštevati kot konstantne, nato pa takšne postopke ponoviti še za preostale spremenljivke, se pojavi veliko možnih izračunov.

Da bi omejili obseg dela v območje hipotez, so bile opravljene analize le za omejen nabor spremenljivk. Tako npr. niso bile analizirane variante s spremenljivimi razmerji širine in dolžine poplavnega prostora, spreminjanje nadmorske višine prelivnega roba v strugi ipd., pa tudi ne parametrov visokovodnega vala v primerjavi s prostornino retenzije. Takšne raziskave ostajajo tako izziv za naslednja obdobja oz. druge raziskovalce.

3.1.1.1 Komunikacija vode vzdolž celotnega odseka

Pri naravnih vodotokih brez antropogenih posegov komunikacijo vodne mase med strugo in poplavnimi območji narekujejo morfološke značilnosti struge in topografija obrežnega dela vodotoka. Pri delu sta bila obravnavana dva primera. V prvem je komunikacija potekala vzdolž celotnega odseka retenzije. Tako se je voda lahko razlivala na retenzijo povsod, kjer je bila presežena pretočna sposobnost struge, oziroma je voda vračala iz retenzije nazaj v strugo, ko se je energija prereza in s tem povezane gladine v strugi v padajoči fazi hidrograma znižala pod energijski nivo in s tem koto gladin na retenziji. V primeru komunikacije vzdolž celotnega odseka se na retenzijo lahko razlijejo večje količine vode, kar ugodno vpliva na znižanje konice. Vendar pa se zaradi vračanje vodne mase vzdolž celotnega odseka nazaj v strugo v padajoči fazi VV zmanjša zadrževalna sposobnost retenzije.

Zato se je v drugem primeru vzdolž struge vgradila pregradna stena z vtočno in iztočno odprtino, s čimer se je poskušalo povečati zadrževalno sposobnost in tako povečati ugoden vpliv retenzijskega prostora na preoblikovanje VV vala.

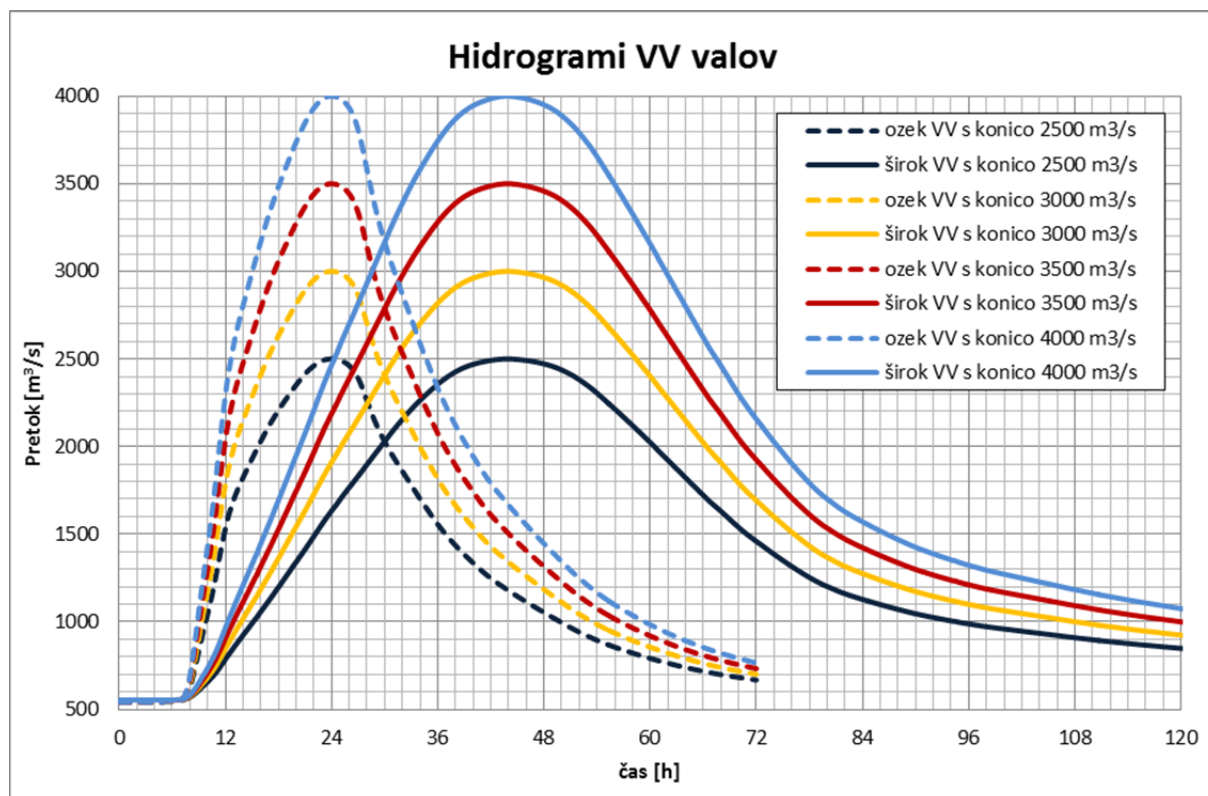
3.1.1.2 Omejeno območje razlivanja vode v retenzijo in vračanja nazaj v strugo

Pri variantnem območju razlivanja s pregradno steno je bila komunikacija omejena na 500 m dolga komunikacijska odseka na zgornjem in spodnjem delu retenzije. Na zgornjem delu se pojavlja le vtok na retenzijo, medtem ko se na spodnjem delu pojavlja v začetni fazi vtok, kasneje pa prevlada odtekanje iz retenzije. Na ta način se je poskušalo povečati zadrževalno sposobnost retenzije. Vračanje vodne mase v strugo je potekalo praktično le na spodnji komunikacijski odprtini, s čimer se je v celoti izkoristilo odtočne razmere, ki ugodno vplivajo na preoblikovanje VV vala čez retenzijo.

Z območjem razlivanja določenimi s predelno steno je bilo mogoče analizirati vpliv hidravlične hrapavosti pri suhih zadrževalnikih, ki izkoriščajo enak mehanizem, kot se pojavlja pri tem modelu. Pri zadrževalnikih, ki se polnijo le od spodaj navzgor (tj. imajo le spodnjo komunikacijsko odprtino), hidravlična hrapavost vpliva le na hitrost polnjenja in praznjenja, pri tem pa se izkoristi le čisti volumen retenzije (kasete). Zadrževalniki s polnjenjem v zgornjem delu in praznjenjem v spodnjem izkoriščajo še upočasnen odtok vode čez retenzijo, s čimer se lahko doseže večji efektivni retenzijski volumen. Pri privzetih območjih modeliranja s poenostavljeno geometrijo in predelno steno se je analiziral vpliv različne hidravlične hrapavosti na potovanje in preoblikovanje VV valov.

3.1.2 Sintetični vhodni hidrogrami in robni pogoji

Pri delu analize niso bile usmerjene v relacije med prostornino VV valov in prostornino retenzije, saj je bilo treba omejiti število možnih scenarijev oz. zožiti obseg raziskav na obvladljivo število spremenljivk. Ker so se pri zasnovi geometrije območja modeliranja s poenostavljeno geometrijo posnemale topografske značilnosti Krško-Brežiškega polja, so bili tudi hidrogrami kot zgornji robni pogoj skonstruirani na podlagi sintetičnih hidrogramov reke Save. Pri tem so bili upoštevani hidrogrami iz hidrološke študije Save Medsebojni vplivi infrastrukturnih in energetskih ureditev na spodnji Savi v času izrednih hidroloških dogodkov, Določitev sintetičnih poplavnih valov dolgih povratnih dob, (Inženiring za vode, 2005). Simulacije so bile opravljene za osem VV valov, to je za VV valove s štirimi različnimi vrednostmi konic in dvema različnima dolžinama trajanja. Vrednosti konic valov so bile določene tako, da pokrivajo razpon konic in volumnov VV valov, od takšnih, pri katerih se na poplavno območje razlije le konica VV vala, do takšnih, pri katerih je volumen vala nad pretokom, pri katerem se prične poplavljanje, zelo velik in je retenzija ob nastopu konice že povsem zapolnjena ter na ta način nima velikega vpliva na preoblikovanje hidrograma VV vala. Upoštevani sta bili ozka in široka oblika VV valov. Pri enaki vrednosti konice ima ozki VV val krajši čas trajanja, gradient naraščajoče in padajoče faze hidrograma je večji, volumen pa je manjši kot pri širokem VV valu. Na sliki 27 so prikazani upoštevani hidrogrami VV valov.



Slika 27: Hidrogrami VV valov, ki so bili upoštevani za območje s poenostavljeno geometrijo.

Figure 27: Hydrographs of HW waves considered for the theoretical area with simplified geometry.

Pretočna sposobnost korita na območju modeliranja s poenostavljeno geometrijo je $2400 \text{ m}^3/\text{s}$, pri tem pa pretok pri valu z najnižjo vrednostjo konice znaša $2500 \text{ m}^3/\text{s}$. Poleg najnižjega VV vala so bili izračuni opravljeni še za VV valove s konicami $3000 \text{ m}^3/\text{s}$, $3500 \text{ m}^3/\text{s}$ in $4000 \text{ m}^3/\text{s}$. Pri širokem VV valu s konico $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ je zaradi velikosti volumna in časa trajanja VV vala nad pretočno sposobnostjo struge vpliv retenzije praktično že zanemarljiv.

Na odtočnem prerezu območja modeliranja je bila Q-h krivulja, upoštevana kot spodnji robni pogoj določena na podlagi privzetih tokovnih razmer dolvodno od območja modeliranja. Padec struge in poplavne površine je pri modelu s poenostavljeno geometrijo enakomeren in znaša 1 ‰. Enak padec za odsek dolvodno se je upošteval tudi pri konstruiranju Q-h krivulje na odtočnem prerezu.

3.1.3 Scenariji spreminjanja hidravlične hrapavosti

V izračunih se je spreminjanje rabe prostora upoštevalo s spreminjanjem Manningovega koeficienta hrapavosti n_g po prostoru. Številna literatura sicer podaja priporočljive vrednosti koeficienta hrapavosti za različno rabo prostora, vendar pa se v praksi dejanski koeficient hrapavosti za posamezno vrsto rabe prostora praviloma določi s postopkom umerjanja. Pri tem lahko vrednost koeficienta zajema tudi druge vplive (npr. nepravilnosti topografije). Pri delu zato same vrednosti koeficienta hrapavosti n_g niso bile direktno določene oziroma opisane z rabo prostora, kultur rastlin itd., temveč so bile upoštevane vrednosti v celotnem razponu realnih vrednosti za poplavna območja ($0,03 \leq n_g \leq 0,2$) (Chow, 1959; Mays, 1999).

Analiza vpliva hidravlične hrapavosti poplavnih površin je bila razdeljena na dva sklopa izračunov. V prvem je bil preverjen vpliv povečanja hidravlične hrapavosti po celotni retenziji

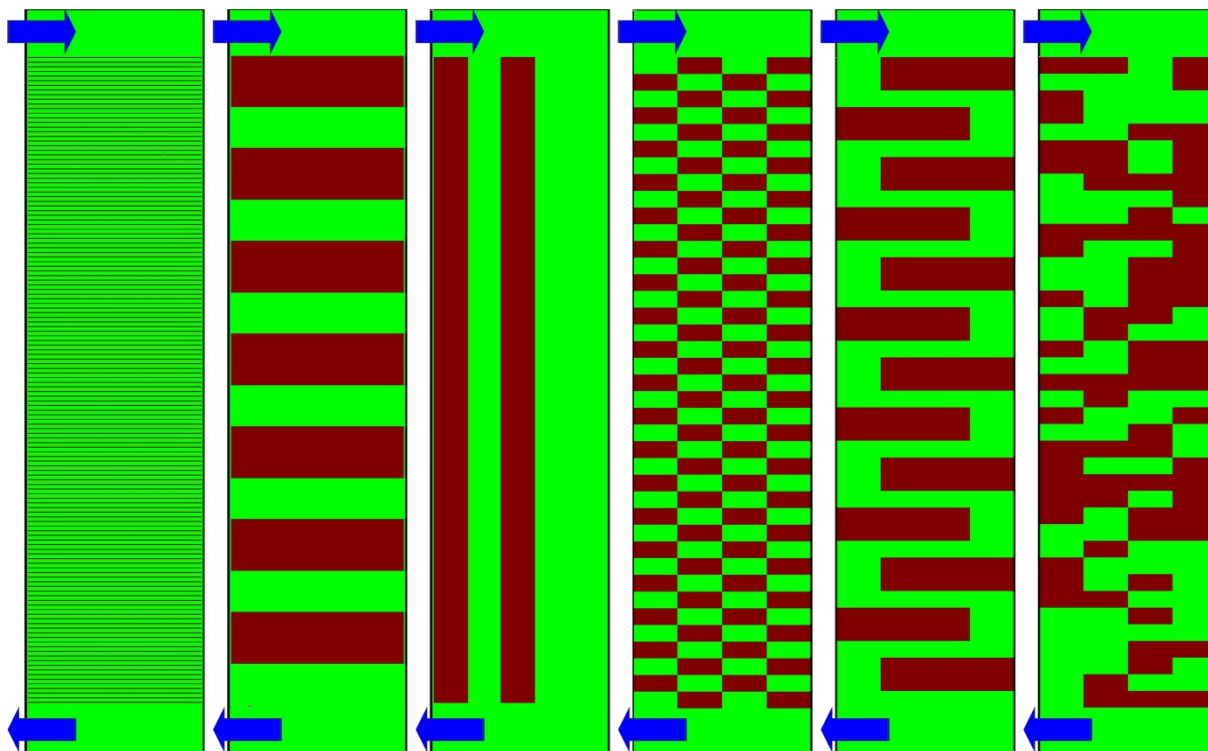
($0,03 \leq n_g \leq 0,2$; s korakom 0,01 do $n_g = 0,1$ in s korakom 0,02 za obseg sprememb v območju $0,1 \leq n_g \leq 0,2$), v drugem sklopu pa se je preveril še vpliv različne razporeditve območij s povečano hrapavostjo po prostoru. Pri tem je bila upoštevana vrednost Manningovega koeficienta hrapavosti na območjih z nižjo hrapavostjo $n_g = 0,03$, na območjih z večjo hrapavostjo pa $n_g = 0,1$.

3.1.3.1 Povečevanje hidravlične hrapavosti

V prvem sklopu analiz so bili za vse VV valove izvedeni izračuni, pri čemer se je spreminjal koeficient hrapavosti n_g celotne retenzije v razponu vrednosti, uporabljenih v praksi. Upoštewane so bile vrednosti koeficienta hrapavosti n_g od 0,03 (npr. nizka pokošena trava, njiva brez poljščin itd.) do 0,2 (npr. gozd z gosto podrastjo, nizko drevje v poletnem času, kjer so v vodnem toku tudi krošnje dreves) (Chow, 1959; Mays, 1999). Hidravlična hrapavost vpliva na hitrosti vodnega toka in posledično na vodostaj (oz. na globine vode), zato je bilo na ta način mogoče analizirati vpliv hidravlične hrapavosti na odlivanje vodne mase iz glavne struge na retenzijo, vpliv na odtočne razmere čez retenzijo in skupen vpliv na potovanje ter preoblikovanje VV vala v izhodnem profilu.

3.1.3.2 Prostorska razporeditev območij povečane hrapavosti retenzije

V drugem sklopu izračunov se je preveril vpliv lokalno povečane hrapavosti na odtočne razmere. Za doseg čim bolj ugodnega vpliva retenzije na znižanje konice VV vala v izhodnem profilu in povečanje potovalnega časa konice (tj. zadrževanje vode) je pomemben čim večji odliv vode na retenzijo (predvsem v zgornjem delu VV vala) in čim daljši čas zadrževanja te vodne mase na retenziji pred pričetkom vračanja nazaj v strugo. Iz tega vzroka je bilo pri tem delu uporabljeno območje modeliranja s predelno steno, pri čemer je bila hrapavost lokalno povečana le na transportnem delu retenzije – torej le na odseku med obema odprtinama. Na ta način je bilo mogoče doseči boljšo oceno vpliva hrapavosti na odtočne razmere čez retenzijo. Analizirane so bile različne variante razporeditve in različen odstotek površine s povečano hrapavostjo. Upoštewane so bile prečne in vzdolžne proge z različno širino z 20-, 40-, 50-, 60-, 80- in 100-odstotnim deležem površine s povečano hrapavostjo. Za 50-odstotni delež je bil preverjen tudi vpliv razporeditve povečane hrapavosti v obliki šahovnice. Spodaj so za primera s 40- in 50-odstotnim deležem območja modeliranja s povečano hrapavostjo podani različni primeri razporeditve območij z večjo hrapavostjo.



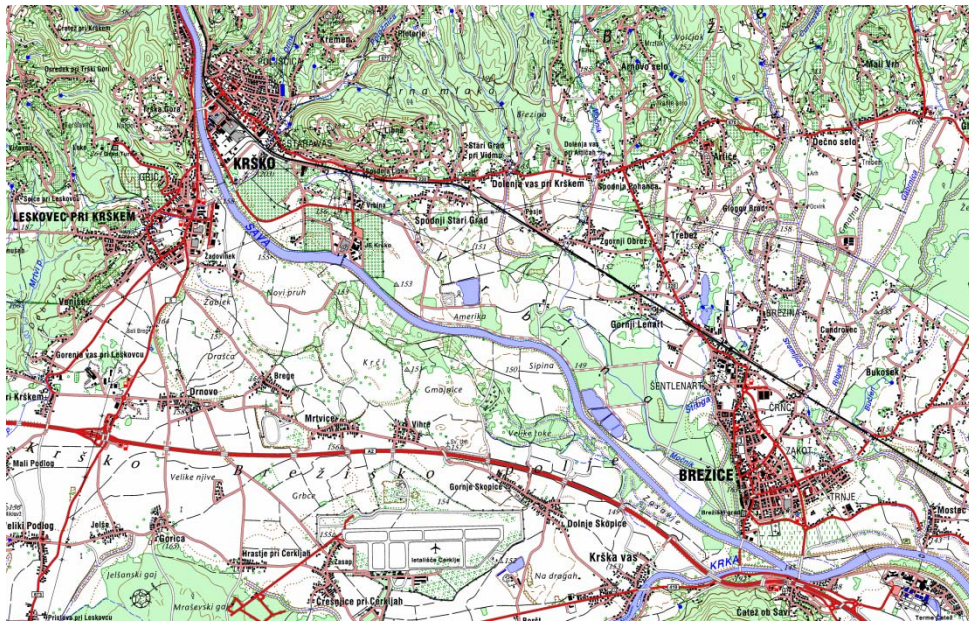
Slika 28: Prikaz različnih razporeditev območij s povečano hrapavostjo (primer s 40 in 50% deležem območij s povečano hrapavostjo; zeleno $n_g = 0,03$, siva $n_g = 0,1$).

Figure 28: A presentation of varied distributions of areas with increased roughness (examples with 40 and 50 % proportion of areas with increased roughness; green $n_g = 0.03$, grey $n_g = 0.1$).

Seveda je takih porazdelitev neskončno mnogo, na kar v praktičnih primerih pomembno vpliva raba prostora, vezana na parcelne meje, pedologija ipd. Privzete razporeditve pa podajo dovolj informacij o tem, kako vpliva prečno, podolžno oz. vzorčasto povečanje hrapavosti v retenzijah.

3.2 Primer Krško-Brežiškega polja

Za analizo spreminjanja hidravlične hrapavosti poplavnih površin na odtočne razmere in potovanje poplavnih valov pri naravnem vodotoku, je bil izbran odsek reke Save in poplavna območja med Krškim in Brežicami. Ravninsko območje vzhodnega dela Krške kotline, prekrto z aluvialnimi naplavinami reke Save in Krke predstavlja pomemben retenzijski prostor, ki vpliva na odtočne razmere dolvodno. Obravnavni odsek Save je dolg približno 13 km, pri Brežicah pa se, kot pomembnejši pritok, v Savo izliva še reka Krka. vzdolžni padec na tem območju je razmeroma majhen (cca. 1‰). Na območju se nahaja tudi Nuklearna elektrarna Krško (NEK), ki s svojimi objekti na in ob strugi Save vpliva tudi na odtočne razmere. Z jezom NEK se zagotavlja nivo vode na gorvodni strani, ki zagotavlja nemoten odvzem hladilne vode. Prav tako je NEK z visokovodnimi nasipi varovana pred najvišjimi verjetnimi poplavnimi dogodki, zato je celotno razbremenjevanje vode na retenzijo ob poplavnih dogodkih na tem odseku usmerjeno na desno retenzijo. Odtočne razmere na območju jezov NEK predstavljajo pomemben notranji pogoj, ki ga je bilo treba natančno simulirati in umeriti v postopku kalibracije (Šantl in sod. 2010).



Slika 29: Pregledna karta modeliranega območja Krško-Brežiškega polja (GURS, 2010).

Figure 29: An overview map of the modeling area Krško-Brežiško polje (GURS, 2010).

3.2.1 Podatki topografije in batimetrije

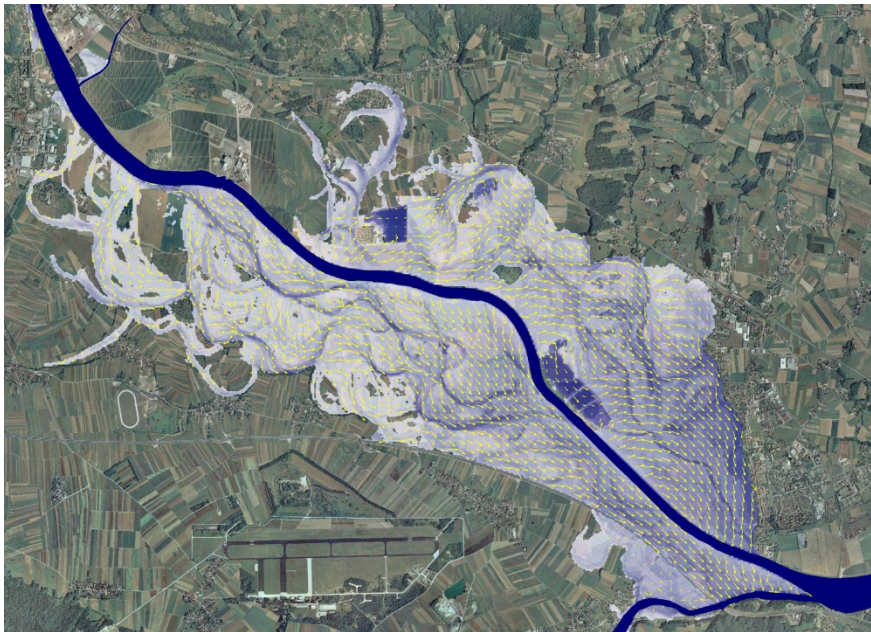
Pri delu uporabljeno območje modeliranja je bilo v digitalni obliki predstavljeno na podlagi podatkov topografije in batimetrije, izmerjenih v letu 2007. Pri tem so bili uporabljeni podatki LIDAR z mrežo 5 x 5 m (Flycom, 2007) in prečni profili Save in Krke (Slatinšek, 2007). LIDAR posnetek je bil izveden v ugodnih razmerah, torej ob pogojih, ko je bilo razmeroma malo motečih dejavnikov. Meritve topografije so se namreč izvajale v zimskem času brez snega (med 14.–16. januarjem 2007), ko je bila vegetacija brez listja, pretoki Save pa so bili razmeroma majhni (cca. 100 m³/s), saj je bilo pred meritvami daljše obdobje brez padavin. Na način je bila natančnost meritev večja, prav tako je bilo mogoče z LIDAR tehnologijo zajeti tudi večji del obrežja struge nad gladino vode. Uporabljeni podatki LIDAR so bili pred izdelavo DMT obdelani s strani izvajalca meritev na način, da je bil z oblakom točk opisan potek terena obvodnega prostora in poplavnih ravnin. Poleg morebitnih napak meritev so bili pri tem odstranjeni tudi objekti, vegetacija in drugi odboji laserskega signala, ki niso dajali informacije o dejanskem terenu poplavnega območja.

Za pridobivanje podatkov o topografiji terena pod vodno gladino (batimetriji) s tehnologijo LIDAR je potrebna uporaba sistema s kombinacijo žarkov različnih spektrov valovne dolžine. Ker so pri tem potrebni še ugodni pogoji (vodno telo brez suspendiranih snovi itd.), se predvsem pri vodotokih ta tehnologija redko uporablja. Za izdelavo DMT območja struge in obrežnega prostora Save in Krke je bila tako uporabljena kombinacija podatkov LIDAR in klasično izmerjenih prečnih profilov, ki so bili prav tako izmerjeni v letu 2007. V numeričnem modelu je bila batimetrija struge Save in Krke zajeta z 1D hidravličnim modelom, torej prav tako s prečnimi profili struge.

3.2.2 Razmere ob visokovodnih dogodkih na obravnavanem območju in komunikacija vode med strugo in retenzijo pri obstoječem stanju

Poplavne površine na odseku Save med Krškim in Brežicami predstavljajo pomemben retenzijski prostor, ki se prične izraziteje polniti med 1600 in 1700 m³/s (Mlačnik in sod.,

2011). Pri VV valovih z nižjimi povratnimi dobami (npr. $Q_5 = 2190 \text{ m}^3/\text{s}$ (IzVRS, 2011)) polnjenje retenzije prevladuje praktično le na spodnji polovici retenzije, dolvodno od gramoznic. Pri tem gre v veliki meri le za razlivanje vodne mase, ne oblikujejo pa se vzporedni tokovi. Z višanjem pretoka se aktivira retenzija tudi v zgornjem delu. Dolvodno od VV nasipa NEK se prične razlivanje na levo poplavno območje, čez katerega se oblikuje izrazit vodni tok, voda pa se vrača nazaj v strugo šele pod teraso Brežic, kjer se izliva tudi potok Močnik. Tokovne razmere lepo pokažejo vektorji hitrosti na obravnavanem območju (slika 30).



Slika 30: Iz izrisa vektorjev hitrosti vodnega toka so jasno razvidne smeri vodnih tokov pri Q_{100} in mesta izlivanja/vračanja vodne mase v/iz retenzije pri obstoječem stanju.

Figure 30: The directions of water streams for Q_{100} and spilling/returning of water mass in/from retention area for current state can be seen from the plot of velocity vectors of the water flow.

Tudi na desni retenziji se oblikujejo vzporedni tokovi. Pri pretokih nad $2400 \text{ m}^3/\text{s}$ se prične prelivanje na desno inudacijo med naseljem Žadovinek in jezom NEK. Pri višjih pretokih se sicer del nad jezo prelite vode vrača v strugo Save dolvodno od jezu NEK, vendar večina vodne mase teče vzdolž celotne retenzije in se izliva v strugo Krke. Dodatno se večje količine vodne mase izlivajo na ravnem odseku nasproti naselja Vihre. Ta vodna masa se združi z vodno maso, prelito nad jezo NEK, teče po retenziji med strugo Save in AC Ljubljana–Zagreb in se prav tako izliva v Krko. Vodna masa, ki se razlije na levo in desno retenzijo na ravnem odseku med obstoječimi gramoznicami in sotočjem Save in Krke, se zaradi vzporednih tokov, ki prihajajo iz odsekov gorvodno, ne širi globlje v retenzijo in teče večinoma tik ob strugi Save. Na tem odseku deloma poteka stalna komunikacija med retenzijo in strugo. Iz slike 30 je na podlagi vektorjev hitrosti razvidna tokovna slika po retenziji in glavna območja, kjer se voda izliva iz struge na retenzijo oziroma kjer se voda iz retenzije vrača nazaj v strugo Save in Krke.

3.2.2.1 Vzdolžna komunikacija vode med strugo in retenzijo po celotnem odseku

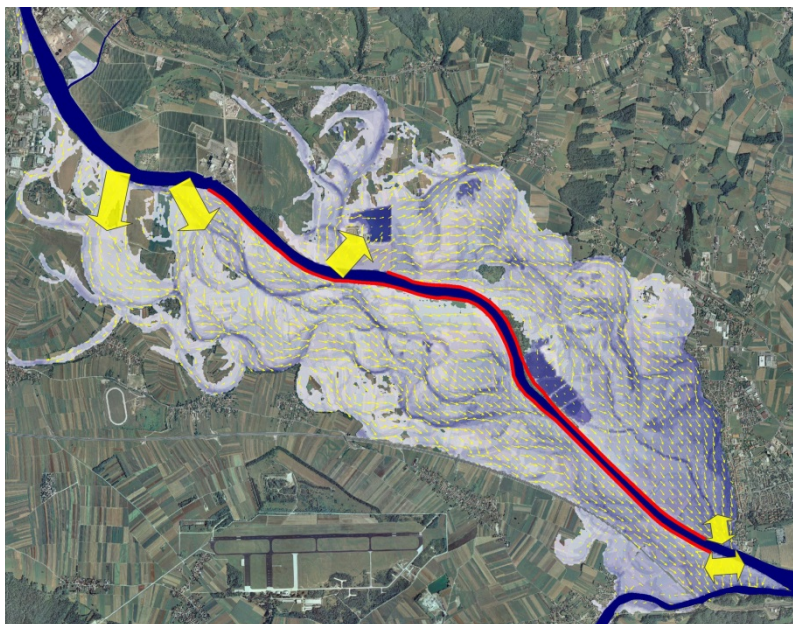
Podobno kot pri modelu s poenostavljeno geometrijo sta bila tudi pri modelu Krško-Brežiškega polja obravnavana dva primera. V prvem je komunikacija potekala vzdolž celotnega odseka retenzije, kot jo narekujejo obstoječe morfološke značilnosti struge in in

topografija obrežnega dela vodotoka. Razlivanje vode na retenzijo se pojavi na mestih, kjer je presežena pretočna sposobnost struge, širjenje vodne mase po retenziji pa ni omejeno z naravnimi topografskimi ovirami oziroma z antropogenimi posegi. Nasprotno se voda iz retenzije vrača nazaj v strugo na mestih, kjer je energijski nivo na retenziji višji od energije prereza v strugi. Vračanje vode v strugo je pogojeno bodisi s topografskimi in tokovnimi razmerami bodisi se pojavi v padajoči fazi hidrograma, ko se gladine v strugi znižajo zaradi upadanja pretoka. Glavne značilnosti odtočnih razmer pri obstoječem stanju so že opisane v prejšnjem poglavju. Pri izbranem območju se zaradi topografskih značilnosti poplavnih območij delno podaljša pot vode, kar ugodno vpliva na zadrževalno sposobnost območja.

3.2.2.2 Gorvodno razlivanje vode v retenzijo in dolvodno vračanje v strugo

Pri naravnih vodotokih je komunikacija vode med strugo in retenzijo odvisna od topografije obvodnega prostora in navadno ne poteka enakomerno vzdolž celotnega odseka. Tako se pogosto že brez antropogenih posegov oblikujejo območja izlivanja in vračanja vode iz struge in v njo. To velja tudi za območje Krško-Brežiškega polja, kjer ima topografija velik vpliv na zadrževalno sposobnost že pri obstoječem stanju. Kljub temu se je, enako kot pri modelu s poenostavljeno geometrijo, tudi na modelu Krško-Brežiškega polja preverila možnost omejitve območja komunikacije vode med strugo in retenzijo s pregradno steno na obeh bregovih Save. Zaradi omejenega območja izlivanja se zmanjšajo količine vode na retenziji, vendar pa se hkrati tudi prepreči vračanje vode ob upadanju pretoka in gladin v strugi vzdolž odseka, saj je z vzdolžno oviro prekinjena komunikacija. Na ta način se podaljša pot vzporednih tokov, v celoti se izkoristijo odtočne razmere čez retenzijo, ki ugodno vplivajo na preoblikovanje VV valov in zadrževalno sposobnost retenzije. Predvsem pri nižjih VV valovih pa se zaradi take ureditve lahko odlijejo le majhne količine vodne mase, zaradi česar se vpliv retenzije zmanjša.

Za analizo Krško-Brežiškega polja se je na podlagi tokovne slike pri obstoječem stanju določilo območja na gorvodnih delih leve in desne retenzije, kjer je polnjenje retenzije najbolj izrazito. Na teh mestih, kjer je možen največji odliv na enoto dolžine, se je ohranila komunikacija med strugo in retenzijo. Na levem bregu je bila odprtina dolga 700 m, in sicer s pričetkom dolvodno od konca VV nasipa ob NEK, kjer je pri obstoječem stanju polnjenje retenzije največje. Ker se odprtina nahaja na skrajnem gorvodnem delu leve retenzije, se s tem tudi v celoti ohranjajo vzporedni tokovi čez levo retenzijo. Izlivanje v naraščajoči fazi in vračanje vode iz retenzije v strugo Save v padajoči fazi VV vala je na levem bregu omejeno na cca. 400 m dolg odsek pod teraso Brežic. Tudi na tem delu se ohranjajo odtočne razmere obstoječega stanja, kjer se v zgodnji fazi VV valov najprej začne polnjenje retenzije, prav tako pa se čez to območje vrača glavna vodna masa, ki se izliva na levo retenzijo. Iz slike 31 so razvidna mesta komunikacije med strugo in retenzijo ter glavne vodne poti čez levo in desno retenzijo.



Slika 31: Prikaz mest komunikacije med strugo in retenzijo za primer z vzdolžnima predelnima stenama (rdeče linije).

Figure 31: Locations of communication between the channel and retention area for the variant with longitudinal partition walls (red lines).

Na desnem bregu se je izlivanje omejilo čez obrežni del nad jezom NEK. V času gradnje NEK je bil obrežni del spremenjen na način, ki ob visokih vodah povečuje odlivanje na desno retenzijo. Pri nižjih VV valovih je odlivanje na tem odseku razmeroma majhno, z višanjem VV valov pa je razbremenjevanje vse večje. Ker se odsek nahaja na skrajnem gorvodnem delu retenzije, se ohranjajo odtočne razmere in vzporedni tokovi čez desno retenzijo. Prelita vodna masa odteka čez celotno desno retenzijo in se pretežno izliva v Krko. Na spodnjem delu desne retenzije se sicer ohranjajo komunikacijske poti med strugo in retenzijo (slika 31), vendar se na tem delu pojavlja tudi izrazito izlivanje v naraščajoči fazi VV vala, kar preusmerja vodo, ki priteka po desni inudaciji v Krko, po kateri voda odteka dolvodno proti sotočju.

3.2.3 Hidrološke značilnosti in hidravlični robni ter notranji pogoji

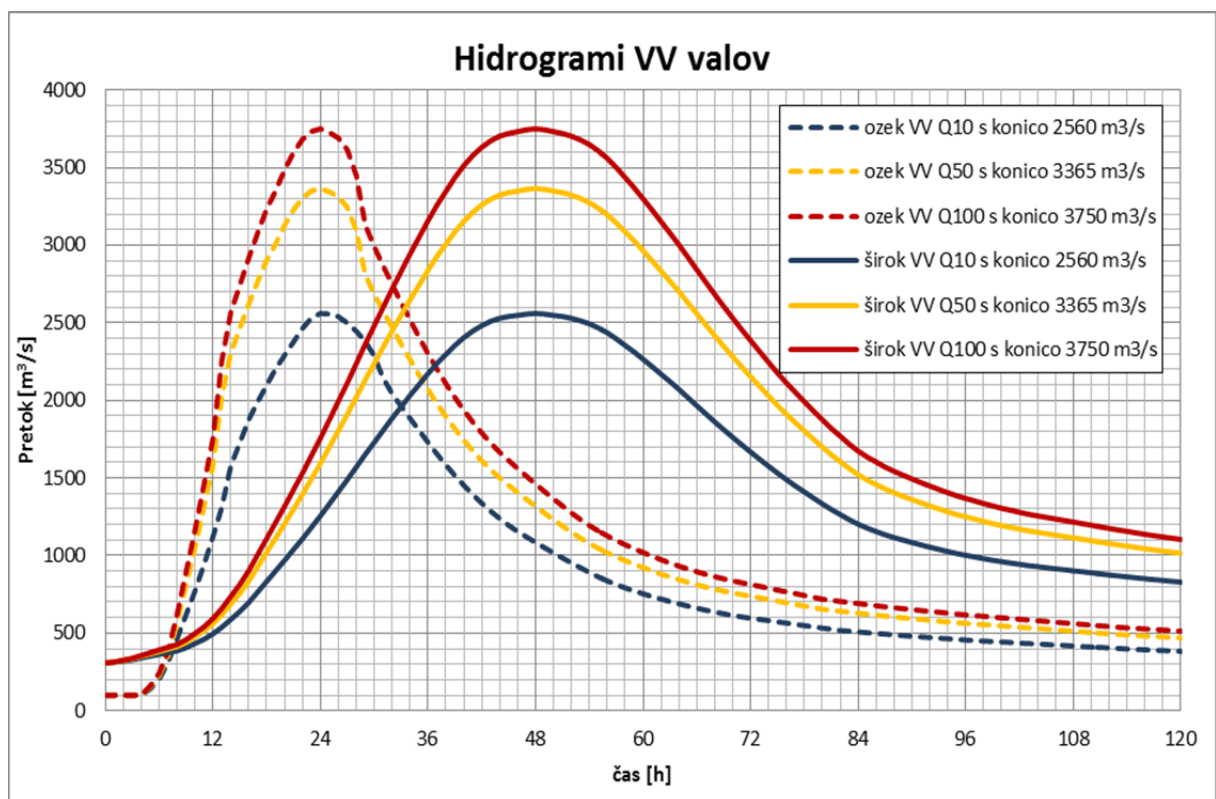
Vodozbirni območji Save in Krke se precej razlikujeta. Imata različen padavinski in odtočni režim, zaradi česar je tudi koincidenca VV Save in Krke zelo raznolika. Glavno vodozbirno območje Krke obsega območje južno od Zasavskega hribovja, Škocjansko podolje, Kočevsko-Ribniško in Radensko polje in Suho krajino (MOP, HMZS, 1998). Vodozbirno območje reke Save do obravnavanega odseka obsega praktično celotno vodozbirno območje Save v Sloveniji, brez porečja Krke in Sotle. Torej obsega porečje Save Bohinjke in Save Dolinke, Sore, Ljubljance, Kamniške Bistrice in Savinje. Podnebna pestrost Slovenije se kaže tudi v spreminjanju rečnega režima Save vzdolž toka. V zgornjem toku ima Sava snežno-dežni režim, na območju, obravnavanem pri delu, pa že prevladuje dežno-snežni (pluvionivalni) rečni režim. Letni maksimumi prevladujejo v jesenskih in spomladanskih mesecih, najnižji pretoki pa v poletnih in zimskih časih.

Krka je ob visokih vodah Save povsem zajezena s strani Save, vendar pa bi lahko imela, predvsem v začetni in končni fazi VV vala, vpliv na odtočne razmere na območju sotočja. Za zmanjšanje vpliva reke Krke na odtočne razmere na spodnjem delu obravnavanega območja, koincidenca VV valov Save in Krke pri izračunih ni bila upoštevana. Prav tako ni bilo na

voljo sintetičnih hidrogramov Krke, zato je bil pri vseh primerih upoštevan stalni dotok Krke $20 \text{ m}^3/\text{s}$, saj takšna vrednost pretoka nima pomembnejšega vpliva na izhodni hidrogram pod sotočjem.

Računski primeri visokovodnih valov – Q10, Q50 in Q100

Kot zgornji robni pogoji so bili v hidravličnem računu upoštevani hidrogrami pretokov s povratnimi dobami 10, 50 in 100 let. Hidrogrami so bili povzeti po hidrološki študiji Save Medsebojni vplivi infrastrukturnih in energetskih ureditev na spodnji Savi v času izrednih hidroloških dogodkov, Določitev sintetičnih poplavnih valov dolgih povratnih dob, (Inženiring za vode, 2005). Ker so bili statistični hidrološki podatki spodnje Save v letu 2011 na novo določeni (IzVRS, 2011), so bili tudi uporabljeni hidrogrami temu primerno korigirani.



Slika 32: Hidrogrami VV valov, ki so bili upoštevani za modeliranje območja Krško- Brežiškega polja.

Figure 32: Hydrographs of the HW waves considered for modeling area on the plain Krško-Brežiško polje.

VV val s povratno dobo 10 let ima konico $2560 \text{ m}^3/\text{s}$, torej se izraziti vzporedni tokovi na levi in desni retenziji pojavijo šele v vršnem delu vala. VV val s povratno dobo 50 let ima konico $3365 \text{ m}^3/\text{s}$, zato je aktiviran že večji del retenzije, ki ugodno vpliva na preoblikovanje izhodnega hidrograma. Pri VV valu s 100-letno povratno dobo (konica $3750 \text{ m}^3/\text{s}$) ima retenzija, predvsem pri široki varianti VV vala z velikim volumnom, že razmeroma majhen vpliv na znižanje konice. Za analizo izbrani VV valovi tako pokrivajo razpon poplavnih valov, pri katerih ima retenzija vpliv na odtočne razmere in preoblikovanje VV vala. Prav tako se preoblikovanje spreminja glede na hrapavost retenzije, kar omogoča analizo vpliva hrapavosti na odtočne razmere.

Za vse tri VV valove sta bili upoštevani ozka in široka oblika vala. Pri enaki vrednosti konice ima ozki VV val krajši čas trajanja, gradient naraščajoče in padajoče faze hidrograma je večji, volumen pa manjši kot pri široki obliki VV valova. Na sliki 32 so prikazani upoštevani hidrogrami VV valov.

3.2.4 Podatki za umerjanje in verifikacijo modela

Podatki za postopke umerjanja in verifikacije modela območja Krško-Brežiškega polja so bili povzeti po modelni raziskavi jezovne zgradbe NEK in meritev ob visokovodnih dogodkih Save iz preteklosti. Pri tem je bilo treba zagotoviti podatke za določanje dolvodnega robnega pogoja, za določitev parametrov jezovne zgradbe NEK, kot notranji robni pogoj in za umerjanje koeficientov hrapavosti struge Save in poplavnih območjih.

Pretočna krivulja na spodnjem robnem pogoju in prva faza umerjanja se je izvedla na podlagi meritev ob visokovodnih dogodkih iz obdobja 2007–2010. Poleg meritev sledi VV dogodkov in meritev stalnih vodomernih postaj na tem odseku so za to obdobje jedro podatkov predstavljale meritve vodostajev reke Save, ki jih je izvajal Inštitut za hidravlične raziskave za potrebe naloge Izvedba hibridnih hidravličnih modelov za območje spodnje vode HE Krško, območje HE Brežice in območje HE Mokrice (HHM), (Mlačnik in sod., 2011).

Za verifikacijo modela so bili uporabljeni podatki dveh VV dogodkov. Prvi dogodek, ki je bil upoštevan, je dobro dokumentiran VV dogodek iz leta 1990, pri katerem so bili za simulacije uporabljeni tudi podatki batimetrije iz leta 1986. Drugi sklop podatkov so predstavljale meritve ob poplavnem dogodku iz septembra 2010, s podatki batimetrije iz 2007.

3.2.5 Scenariji spreminjanja hidravlične hrapavosti

V praksi se koeficient dejanske hidravlične hrapavosti za posamezno vrsto rabe prostora določi s postopkom umerjanja, vrednost koeficienta pa lahko zajema tudi druge vplive (npr. mikro topografijo terena, relativni vpliv ovir v toku, vpliv meandriranja). Enako kot pri modelu s poenostavljeno geometrijo je bila tudi na modelu Krško-Brežiškega polja analiza vpliva hidravlične hrapavosti poplavnih površin razdeljena na dva sklopa izračunov. V prvem sklopu so bile vrednosti koeficienta hrapavosti n_g definirane s sedanjo rabo prostora, pri čemer so bile upoštevane vrednosti v razponu realnih vrednosti za poplavna območja ($0,03 \leq n_g \leq 0,2$) (Chow, 1959; Mays, 1999 itd.).

V drugem sklopu so bile za obstoječe stanje vrednosti koeficientov hrapavosti določene v postopku umerjanja modela glede na pretekle VV dogodke, nato pa se je preveril vpliv trenda spreminjanja rabe prostora s spreminjanjem n_g glede na zmanjšan oz. povečan delež različne rabe prostora. Pri obstoječem stanju na tem območju prevladujejo gozdovi in kmetijska zemljišča. Pri delu se je zato raba prostora simulirala kot vpliv krčenja gozdnih površin oz. kot vpliv zaraščanja obstoječih kmetijskih površin.

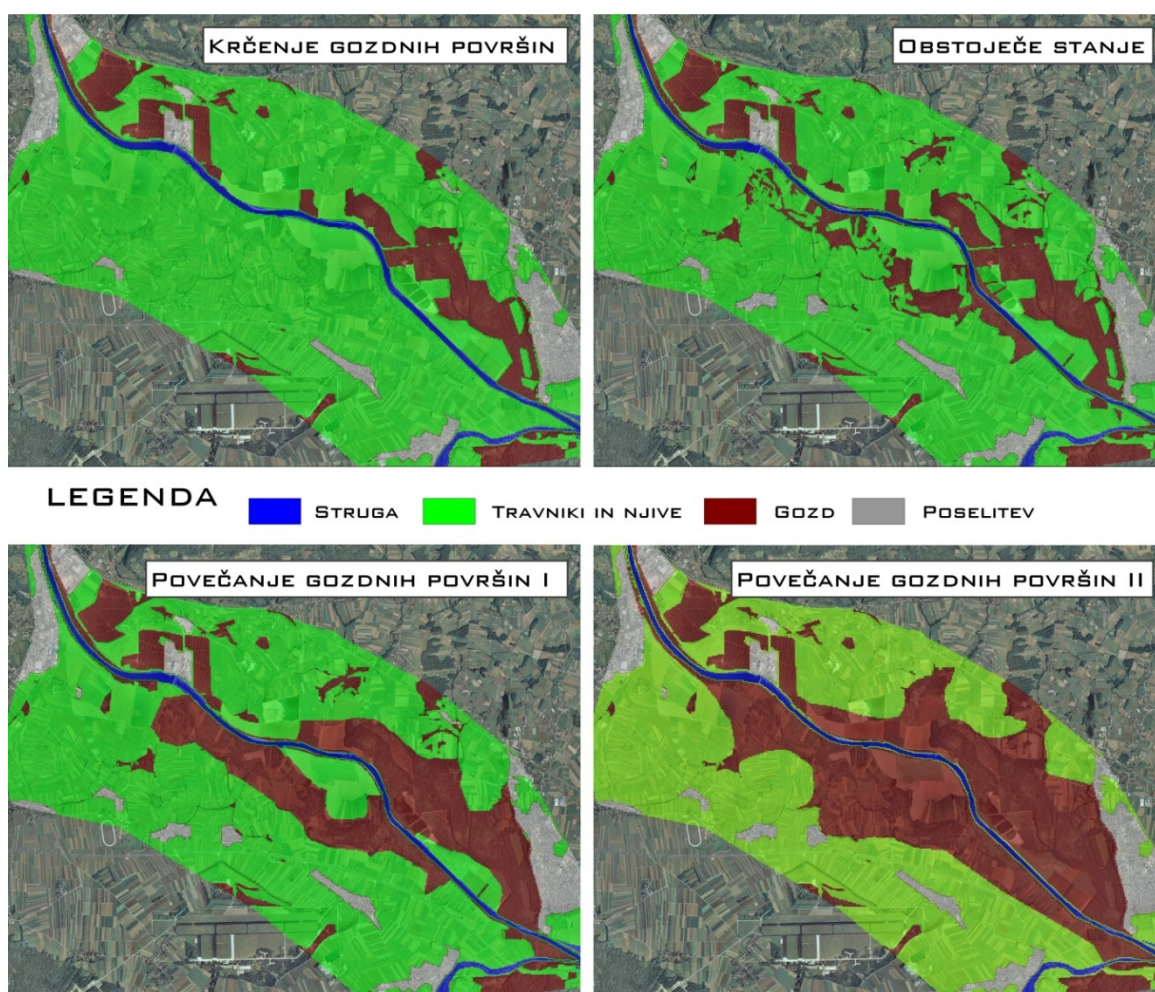
3.2.5.1 Povečevanje hidravlične hrapavosti

Enako kot pri modelu s poenostavljeno geometrijo so bili v prvi fazi za izbrane VV dogodke izvedeni številni izračuni, pri čemer se je spreminjala vrednost koeficienta hrapavosti n_g celotne retenzije v razponu v praksi uporabljenih vrednosti za poplavna območja. Upoštevane so bile vrednosti koeficienta hrapavosti n_g od 0,03 (npr. nizka pokošena trava, njiva brez poljščin itd.) do 0,2 (npr. gozd z gosto podrastjo, nizko drevje v poletnem času, kjer so v

vodnemu toku tudi krošnje dreves). Koeficient hidravlične hrapavosti n_g se je v razponu $0,03 \leq n_g \leq 0,08$ spreminjal s korakom 0,01, v razponu $0,08 \leq n_g \leq 0,2$ pa s korakom 0,02.

3.2.5.2 Spreminjanje obstoječega razmerja med gozdnimi in kmetijskimi površinami

Danes so pojavljajo najrazličnejši interesi in pritiski po koriščenju obvodnega prostora in poplavnih območij. V sklopu magistrskega dela so nas zanimali predvsem trendi sprememb rabe prostora, ki vplivajo na odtočne razmere na retenziji. Posegi, s katerimi se izgublja retenzijska funkcija poplavnega prostora, tako pri delu niso bili obravnavani, analizirani pa so bili vplivi trenda spreminjanja obstoječega razmerja med gozdom in kmetijskimi površinami, saj te na obravnavanem območju obsegajo praktično celotno površino.



Slika 33: Različna razmerja površin posamezne rabe prostora, ki so bili upoštevani v izračunih.

Figure 33: Different proportions of specific land use areas considered in calculations.

Za vse VV valove je bil preverjen tako vpliv trenda povečevanja gozdnih površin kot tudi trend krčenja gozdnih površin na račun povečevanja kmetijskih površin. Pri tem je bilo kot izhodišče za primerjavo vzeto obstoječe stanje. Območja posameznih rab so bila na podlagi ortofoto posnetka razdeljena glede na obstoječo rabo prostora. Koeficient hrapavosti n_g za kmetijske površine je bil v postopku umerjanja določen na $n_g = 0,04$, za gozdne površine $n_g = 0,125$ in $n_g = 0,2$ za poseljena območja. V fazi analiziranja vpliva trendov rabe prostora na odtočne razmere se je preverilo postopno zaraščanje do 100-odstotnega deleža gozdnih

površin in nasprotni trend širjenja kmetijskih površin, prav tako do 100-odstotnega deleža. Na sliki 33 so prikazani štiri različni primeri razmerja površin posamezne rabe prostora, ki so bili upoštevani v izračunih, ko se je na območju dosega 100-letne vode spreminjalo razmerje med gozdnimi in kmetijskimi površinami. Kot omenjeno, sta bili v izračunih upoštevani še skrajni varianti – 100-odstotna pokritost z gozdnimi površinami in 100-odstotna pokritost s kmetijskimi površinami.

4.0 HIDRAVLIČNA ANALIZA

Hidravlična analiza je bila razdeljena na dva večja sklopa, kakor so v nadaljevanju razdeljeno podani tudi rezultati. V prvem sklopu so bili izvedeni izračuni in analize na območju modeliranja s poenostavljeno geometrijo. Cilj analiz na teoretičnem območju modeliranja je bil boljše poznavanje mehanizma komunikacije med strugo vodotoka in retenzijskimi površinami ter odtočnih razmer na inundaciji, ki vpliva na potovanje in preoblikovanje VV valov. Ugotovitve so bile nato preverjene še na območju Krško-Brežiškega polja, kjer pa vlogo pri odtočnih razmerah igrajo tudi drugi dejavniki, zaradi česar je težje izračunani vpliv pripisati samo spreminjanju enega parametra.

Na obeh območjih so bile izvedene analize vpliva spreminjanja hrapavosti retenzije v razponu realnih vrednosti koeficienta hrapavosti n_g za poplavna območja ($0,03 \leq n_g \leq 0,2$). Poleg vpliva spreminjajoče se hrapavosti po celotnem območju se je na območju modeliranja s poenostavljeno geometrijo preveril tudi vpliv lokalno povečane hrapavosti. Pri čimer se je spreminjala tako prostorska razporeditev kot tudi odstotek deleža površin s povečano hrapavostjo. Z analizo na območju Krško-Brežiškega polja se je preveril še vpliv spreminjanja obstoječih razmerij rabe prostora. Na obeh območjih modeliranja se je preveril tudi vpliv spreminjajoče se hrapavosti retenzije na potovanje VV valov za primer vmesne stene vzdolž retenzije, s čimer je bilo omejeno razlivanje vode v retenzijo in vračanje v strugo. Na ta način je bila preverjena možnost dosegati enake zadrževalne sposobnosti retenzije kljub manjšim količinam vodne mase v retenziji.

Na območju modeliranja s poenostavljeno geometrijo so bili izračuni opravljeni za osem VV valov, in sicer za ozke in široke VV valove s konicami $2500 \text{ m}^3/\text{s}$, $3000 \text{ m}^3/\text{s}$, $3500 \text{ m}^3/\text{s}$ in $4000 \text{ m}^3/\text{s}$. VV valovi, upoštevani na območju Krško-Brežiškega polja, so bili vezani na povratne dobe pretokov v prerezu Krškega. Tako so bili izračuni opravljeni za šest VV valov, tj. za ozke in široke VV valove s povratno dobo Q_{10} ($Q_{\max}=2560 \text{ m}^3/\text{s}$), Q_{50} ($Q_{\max}=3365 \text{ m}^3/\text{s}$) in Q_{100} ($Q_{\max}=3750 \text{ m}^3/\text{s}$).

Za obe območji modeliranja je bil uporabljen isti numerični model, in sicer MIKE FLOOD, ki je podrobneje že predstavljen v prejšnjih poglavjih. S kombiniranim 1D-2D modelom je bilo možno dovolj natančno določiti razmerje pretočnih količin med strugo in poplavnimi površinami ter zajeti tokovne razmere na poplavnih površinah. Na obeh območjih so bile struge vodotokov zajete z 1D modelom, poplavne površine, kjer se pojavljajo izraziti dvodimenzionalni tokovi, pa z 2D modelom.

4.1 Vzpostavitev in umerjanje numeričnega modela

V poglavju je podan natančnejši opis modeliranja območja s poenostavljeno geometrijo, karakteristike in dimenzije ter izhodiščne vrednosti hidravličnih parametrov. Prav tako je predstavljeno numerično modeliranje Krško-Brežiškega polja. Medtem ko je šlo pri območju modeliranja s poenostavljeno geometrijo za teoretičen primer, pri katerem so bile spremenljivke določene na podlagi inženirske prakse, pa so bili pri modeliranju Krško-Brežiškega polja vključeni tudi postopki umerjanja in verifikacije. Na ta način so rezultati poleg teoretične dobili tudi praktično vrednost.

4.1.1 Numerično modeliranje teoretičnega območja

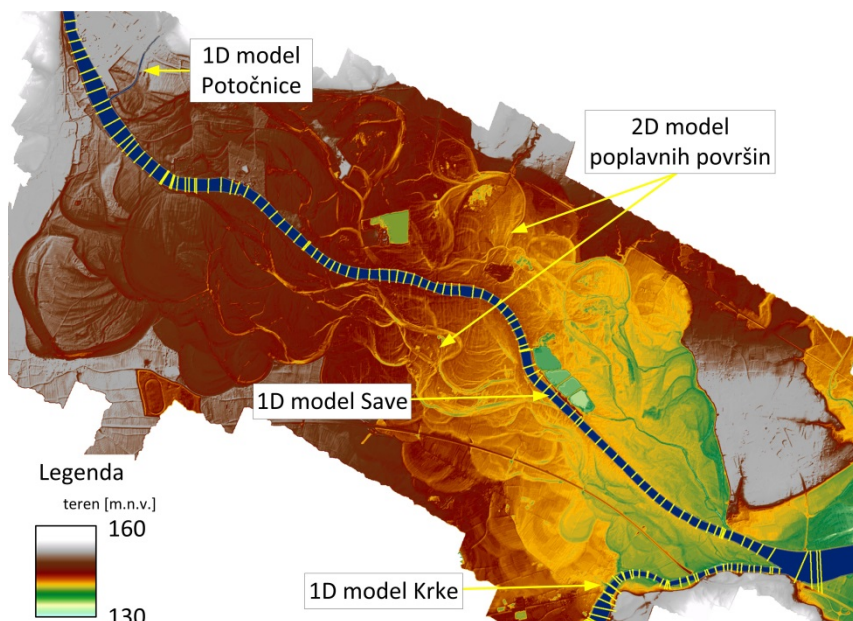
Pri modeliranju območja s poenostavljeno geometrijo je bilo korito vodotoka zajeto z 1D modelom, in sicer s prečnimi profili na medsebojni razdalji 100 m. Rečno korito prizmatične oblike s širino dna struge 80 m in z nagibom brežin 1:1 je imelo pretočno sposobnost cca. 2400 m³/s. Vzdolžni padec rečnega korita je bil konstanten, in sicer enak povprečnemu padcu Save na odseku med Krškim in Brežicami, tj. cca. 1 ‰. V rečnem koritu je bila za Manningov koeficient hrapavosti uporabljena konstantna vrednost $n_g = 0,03$.

Enak padec, kot je bil upoštevan pri rečnem koritu, je bil upoštevan tudi pri poplavnih površinah. Na ta način se je poskušalo ohranjati tudi razmerje med vztrajnostnimi silami in silo teže oziroma hitrosti podobnega velikostnega reda. Velikost retenzije je po prostornini velikostnega reda desne retenzije reke Save med Krškim in Brežicami in je bila dimenzija širina x dolžina = 700 m x 8000 m. Vsi robovi retenzije so bili zaprti, da je volumen vode ostal znotraj območja, možna komunikacija vode pa je bila le med glavno strugo in retenzijo. Kot izhodišče je bila vzeta varianta s komunikacijo vzdolž celotne dolžine retenzije (slika 26; A), v drugem primeru pa je bila komunikacija omejena na zgornji in spodnji del retenzije (slika 26; B). Kot omenjeno v poglavju 3.1.1.2 je bila pri variantnem območju razlivanja s pregradno steno komunikacija omejena na dva 500 m dolga komunikacijska odseka na zgornjem in spodnjem delu retenzije.

4.1.2 Numerično modeliranje območja Krško-Brežiškega polja

Numerični model, uporabljen v pri hidravlični analizi, je bil vzpostavljen na UL FGG, KMTe in je bil podrobneje predstavljen v končnem poročilu naloge HHM (Mlačnik in sod., 2011) in v številnih člankih, ki opisujejo hibridno modeliranje tega območja (Rak in sod., 2010; Šantl in sod., 2010; Rak in sod., 2013 itd.). Ker je avtor magistrskega dela aktivno sodeloval pri izdelavi naloge HHM, je opis vzpostavitve, umerjanja in verifikacije podan v tem poglavju, ki opisuje praktično delo kandidata. Nadaljnji tekst je delno povzet po zgoraj navedenih delih.

Pri modeliranju območja Krško-Brežiškega polja so bile z 1D modelom zajete struge vodotokov (tj. Save, Krke in Potočnice). Prav tako je bilo mogoče natančno simulirati notranji robni pogoj na jezovni zgradbi NEK. Struge vodotokov na obravnavanem območju so bile s prečnimi profili zajete do izrazite geomorfološke spremembe, kot so krone visokovodnih nasipov, prehod z brežine struge na poplavno območje itd. Vrednosti Manningovega koeficienta hrapavosti, ki so za območje struge bile odsekoma določene v postopku umerjanja, so bile v razponu $0,03 \leq n_g \leq 0,045$.



Slika 34: Zasnova numeričnega modela območja Krško-Brežiškega polja (Sava, poplavne površine, pritoki).

Figure 34: A design of a numerical model of Krško-Brežiško polje (Sava, floodplains areas, tributaries).

Topografija obvodnega prostora in poplavnih območij je bila zajeta z numerično mrežo z velikostjo osnovne računske celice 20 x 20 m. Glede na velikost obravnavanega območja (cca. 30 km² v naravi), je bilo s takšno velikostjo celice mogoče zajeti topografijo obvodnega prostora in poplavnih površin dovolj natančno, hkrati pa je bil računski čas posamezne simulacije še vedno sprejemljiv. Z zmanjšanjem računske celice bi se lokalno lahko nekoliko povečala natančnost rezultatov, vendar pa bi se bistveno podaljšal računski čas. Pri simulacijah je bil uporabljen časovni korak 1 s. Z zmanjšanjem računske celice pa bi bilo treba za zagotavljanje ustreznosti Courantovega števila oziroma stabilnosti računa zmanjšati tudi časovni korak simulacije, kar bi dodatno podaljšalo računski čas simulacij. Računski čas posamezne simulacije je predvsem v primerih, kjer je treba izvesti številne simulacije (torej tudi v tem delu), pomemben dejavnik, ki vpliva na proces izvedbe naloge. Lokacije, na katerih bi zaradi velikosti računskih celic lahko prišlo do večjih odstopanj med dejanskim terenom in numerično mrežo ter posledično do bistvenega vpliva na tokovno sliko (visokovodni nasipi in zidovi, cestna telesa, dvignjena nad okoliški teren, topografske značilnosti manjših dimenzij in izrazitih oblik itd.), se je natančno preverilo na podlagi DMT z mrežo 1 x 1 m. S korekcijami numerične mreže se je nato doseglo največjo možno podobnost topografije, ki omogoča simuliranje tokovnih razmer z zahtevano natančnostjo.

4.1.3 Umerjanje in verifikacija modela Krško-Brežiškega polja

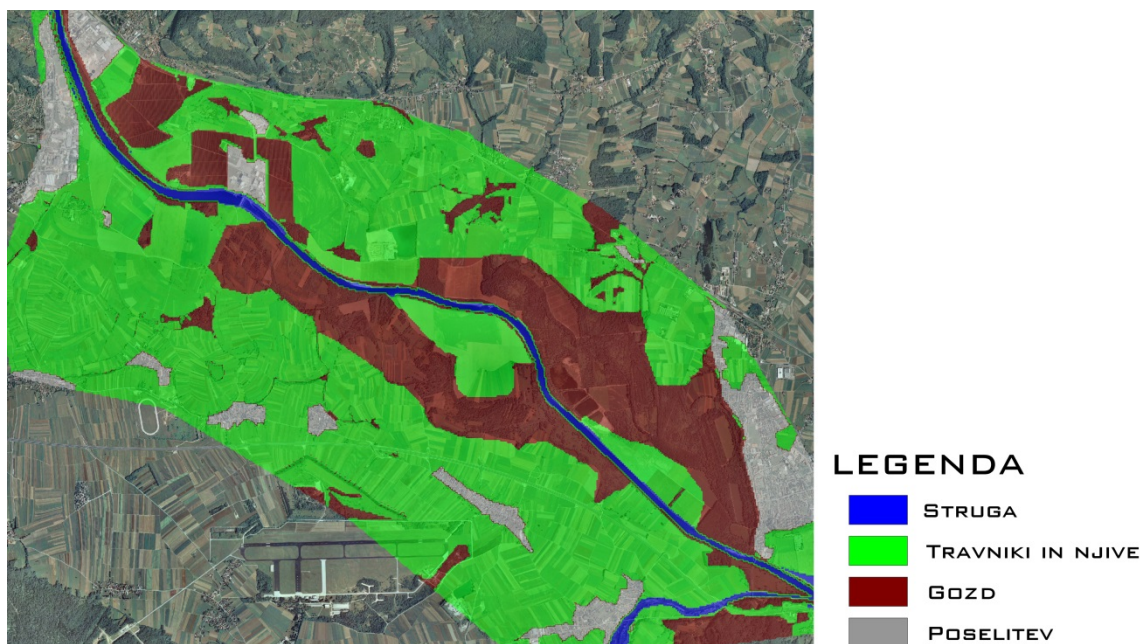
Postopki umerjanja in verifikacije hidravličnih parametrov so bili opravljeni v sklopu naloge projektiranja elektrarn na Spodnji Savi. Kot je v navadi v praksi pri vzporednem modeliranju s fizičnim in numeričnim modelom, se je numerični model v prvi fazi umerjal neodvisno od fizičnega modela. V postopku umerjanja so bili določeni doseg in velikost vplivov, če je nekoliko negotov dolvodni robni pogoj, analizirani parametri jezovne zgradbe NEK kot notranji robni pogoj, in koeficienti hrapavosti struge Save in poplavnih območij.

Pretočna krivulja na spodnjem robnem pogoju je bila določena na podlagi meritev iz obdobja 2007–2010. Za pretoke nad izmerjenimi vrednostmi iz narave je bila krivulja ekstrapolirana

na podlagi meritev na fizičnem modelu in upoštevanju razmer na poplavnih površinah na levem bregu Save.

Parametri jezovne zgradbe NEK so bili določeni s simuliranjem pretočnosti, kot je bila ugotovljena v modelni raziskavi iz leta 1976 (Vodogradbeni laboratorij, 1976). Vrednosti parametrov preliva so bile določene pri pretokih, pri katerih še ne prihaja do razlivanja vode nad jezom NEK na desno poplavno območje (do $2000 \text{ m}^3/\text{s}$).

Prva faza umerjanja koeficientov hrapavosti struge in poplavnih površin je potekala na podlagi meritev, izvedenih v času visokovodnih dogodkov med leti 2007 in 2009. Izmerjeni VV valovi, ki so bili uporabljeni v postopku umerjanja, so imeli v profilu Krškega konice med $Q=1230 \text{ m}^3/\text{s}$ in $Q=2466 \text{ m}^3/\text{s}$. Meritve gladin so bile izvedene s pomočjo tlačnih sond, in sicer na 13 mestih vzdolž obravnavanega odseka. Meritve ob pretokih, pri katerih se poplavljanje še ne pojavlja oziroma je omejeno na ožji obvodni prostor, so bile uporabljene za umerjanje koeficientov hrapavosti struge. Pri višjih pretokih, kjer je retenzijski prostor izraziteje aktiviran, so se spreminjali tudi koeficienti poplavnih površin. Ker meritve gladin na poplavnih območjih ni bilo na voljo, so se koeficienti hrapavosti določili in spreminjali glede na rabo prostora, določene na podlagi ortofoto posnetkov in terenskih ogledov. Po izvedbi fizičnega modela so bile na voljo tudi meritve stanja na retenziji.



Slika 35: Poplavna območja modelirana z 2D modelom so bila razdeljena glede na rabo prostora – upoštewane so bile tri kategorije: travnate in kmetijske površine, gozdne in zaraščene površine ter pozidana območja. Struga je obravnavana posebej v 1D modelu.

Figure 35: Floodplains that were modelled with the 2D model were divided according to the land use – three categories were taken into consideration: meadows and agricultural areas, forest and undergrowth and settled areas. The channel was modelled with a 1D model.

V drugi fazi, fazi finega umerjanja, so se rezultati numeričnega modela primerjali z meritvami na fizičnem modelu pri pretokih $3000 \text{ m}^3/\text{s}$, $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ in $5000 \text{ m}^3/\text{s}$. V postopku finega umerjanja so se analizirala lokalna odstopanja, glede na vzrok neskladnosti pa so se izvedle korekcije enega ali drugega modela.

Na sliki 36 je prikazana poplavljenost za visokovodni dogodek decembra 2009. Maksimalni pretok Save na prikazanem območju je znašal $2430 \text{ m}^3/\text{s}$. S primerjavo fotografije obsega poplave (slika 36, zgoraj) in 3D prikaza območja poplavljenosti, izračunanega s hidravličnim modelom (slika 36, spodaj), je nazorno prikazano dobro ujemanje izračunov s stanjem v naravi.



Slika 36: Primerjava obsega poplavljenosti za visokovodni dogodek decembra 2009. Zgoraj – fotografija iz zraka obsega poplave ob dogodku 26. 12. 2009 (POP TV); spodaj – 3D prikaz izračunanega obsega s hidravličnim modelom (Steinman in sod. 2012).

Figure 36: A comparison of the flooded areas extent for the flood event in December 2009. Top – an aero photo of the flood extent for the flood event in 26.12.2009 (POP TV); bottom – a 3D view of the calculated extent with the hydraulic model (Steinman et. al. 2012).

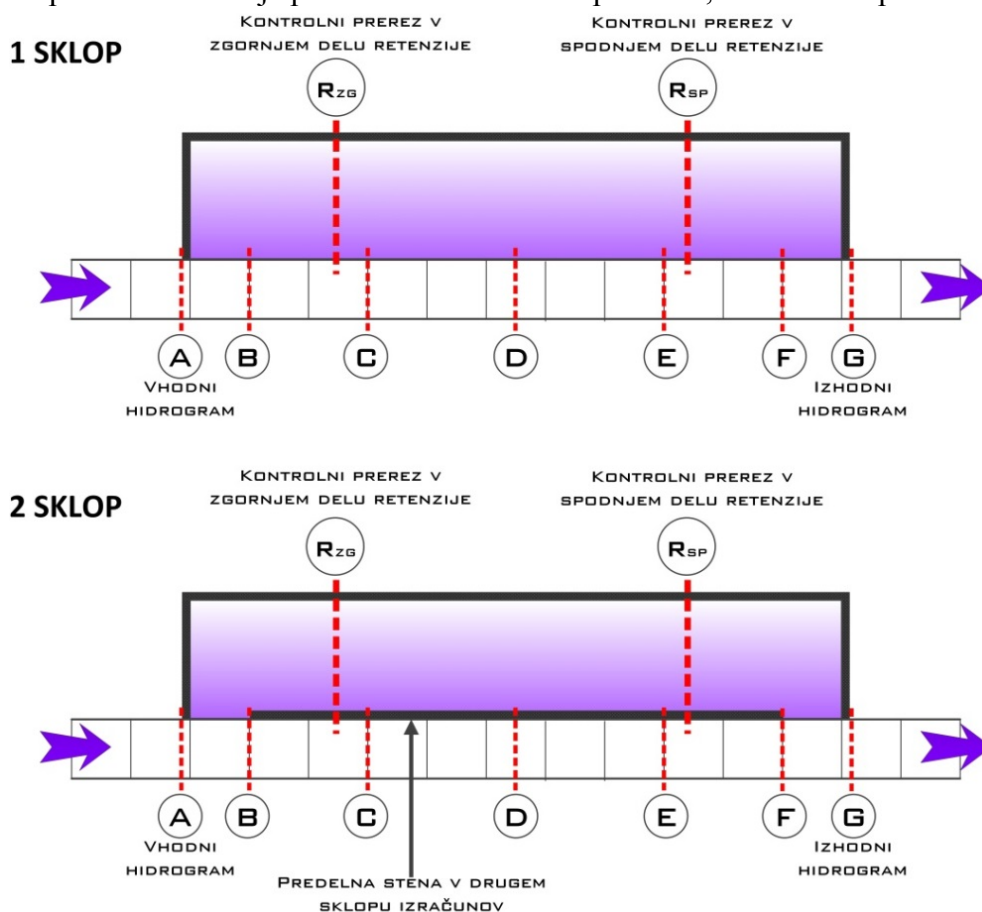
Verifikacija modela je bila opravljena s simulacijami poplavnih dogodkov iz leta 1990 in 2010. Verifikacija z dogodkom iz leta 1990 je bila mogoča zaradi številnih meritev iz narave, ker pa so se v tem obdobju na nekaterih mestih zgodile spremembe topografije in batimetrije struge Save, je bila potrebna modifikacija modela. Pri tem so bili uporabljeni podatki batimetrije Save iz leta 1986. Kljub spremembam topografije in rabe prostora na poplavnih območjih v obdobju med letom 1990 in časom HHM, le-te zaradi pomanjkljivih podatkov o dejanski rabi niso bile upoštevane. Verifikacija je bila izvedena tudi na poplavni dogodek iz septembra 2010 ($Q_{\text{SAVA}}=3860 \text{ m}^3/\text{s}$). Dogodek, ki je bil dobro dokumentiran, je bil uporaben predvsem tudi zaradi velikosti pretoka, saj sta imeli tako Sava kot tudi Krka približno 100-letni pretok. Z uporabo rezultatov (hidravličnih parametrov) iz HHM je bilo pripravljeno

dobro izhodišče za modeliranje vplivov spreminjajoče rabe obvodnega prostora in poplavnih površin.

4.2 Hidravlična analiza vpliva spreminjanja hidravlične hrapavosti na območju s poenostavljeno geometrijo

Za teoretično območje modeliranja s poenostavljeno geometrijo so podani rezultati in ugotovitve hidravlične analize vpliva hidravlične hrapavosti poplavnih površin na količine v retenzijo prelite vode, pretočno sposobnost poplavnih površin in posledično preoblikovanje poplavnega vala. S poenostavljeno topografijo retenzije se je bilo mogoče izogniti komplicirani tokovni sliki, ki se pojavljaja pri razgibani topografiji retenzije, kar lahko pri bistveno daljši poti do mesta ponovnega vračanja vode v glavno strugo vodotoka pomembno vpliva na rezultate analize. S poenostavljeno topografijo je bil vpliv topografije izločen, rezultati pa tako kažejo dejanski vpliv spreminjajoče hrapavosti.

Rezultati so podani grafično in tabelarično ter podrobneje opisani v besedilu. Na sliki 37 so shematično prikazane lokacije posameznih kontrolnih prereзов, v katerih so podani rezultati.



Slika 37: Shematski prikaz lokacij kontrolnih prereзов, v katerih so v nadaljevanju podani hidrogrami:

- 1. sklop izračunov: brez predelne stene
- 2. sklop izračunov: s predelno steno

Figure 37: A schematic presentation of the locations of control sections in which hydrographs are given hereinafter:

- 1. set of calculations: without the partition wall
- 2. set of calculations: with the partition wall

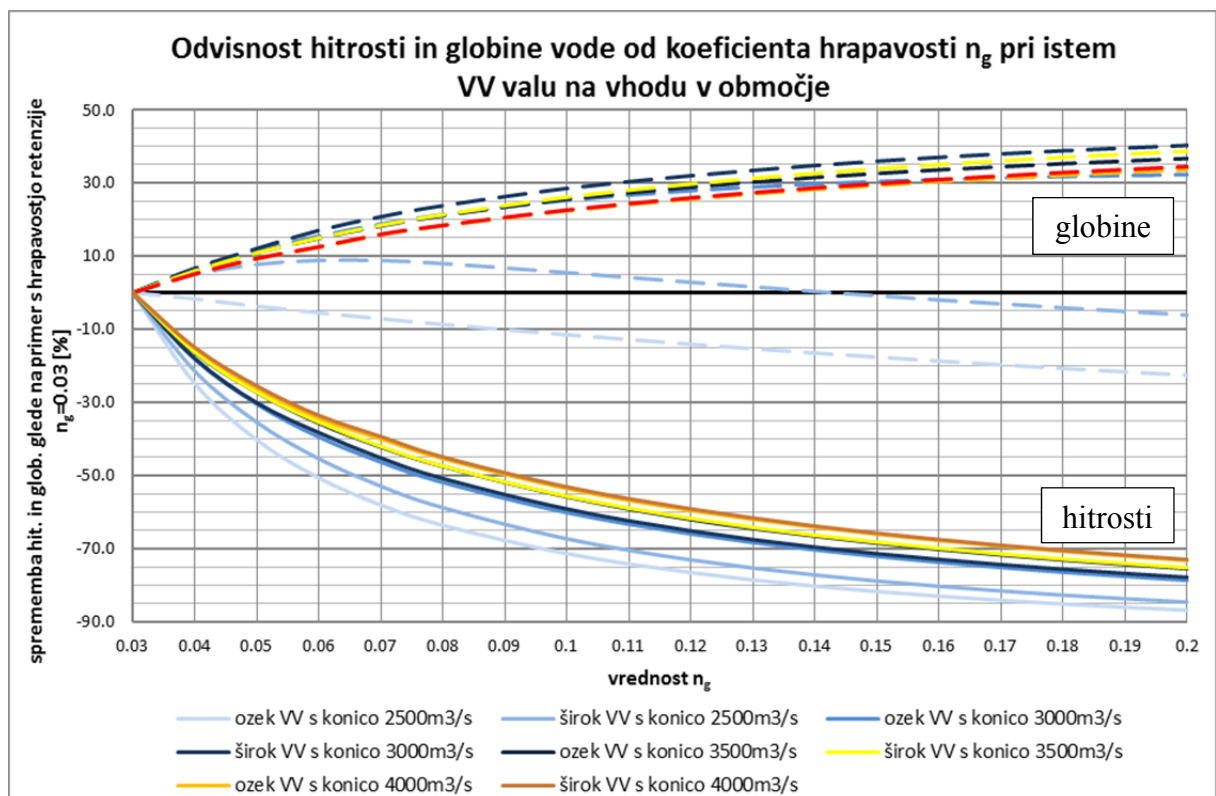
Ob podajanju rezultatov so se uporabile naslednje okrajšave, ki pomenijo:

- OS → osnovno območje brez predelne stene (komunikacija med strugo in poplavnimi površinami poteka vzdolž celotnega odseka)
- NAS → modificirano območje s predelno steno (komunikacija med strugo in poplavnimi površinami je omejena na 500 m dolga komunikacijska odseka na zgornjem in spodnjem delu retenzije)

Za vsak sklop izračunov so bile predvidene različne oblike spreminjanja hrapavosti na retenziji. V strugi se je ohranjala vedno ista porazdelitev koeficienta hrapavosti n_g .

4.2.1 Izračunan vpliv spreminjanja hrapavosti na tokovne razmere na retenziji

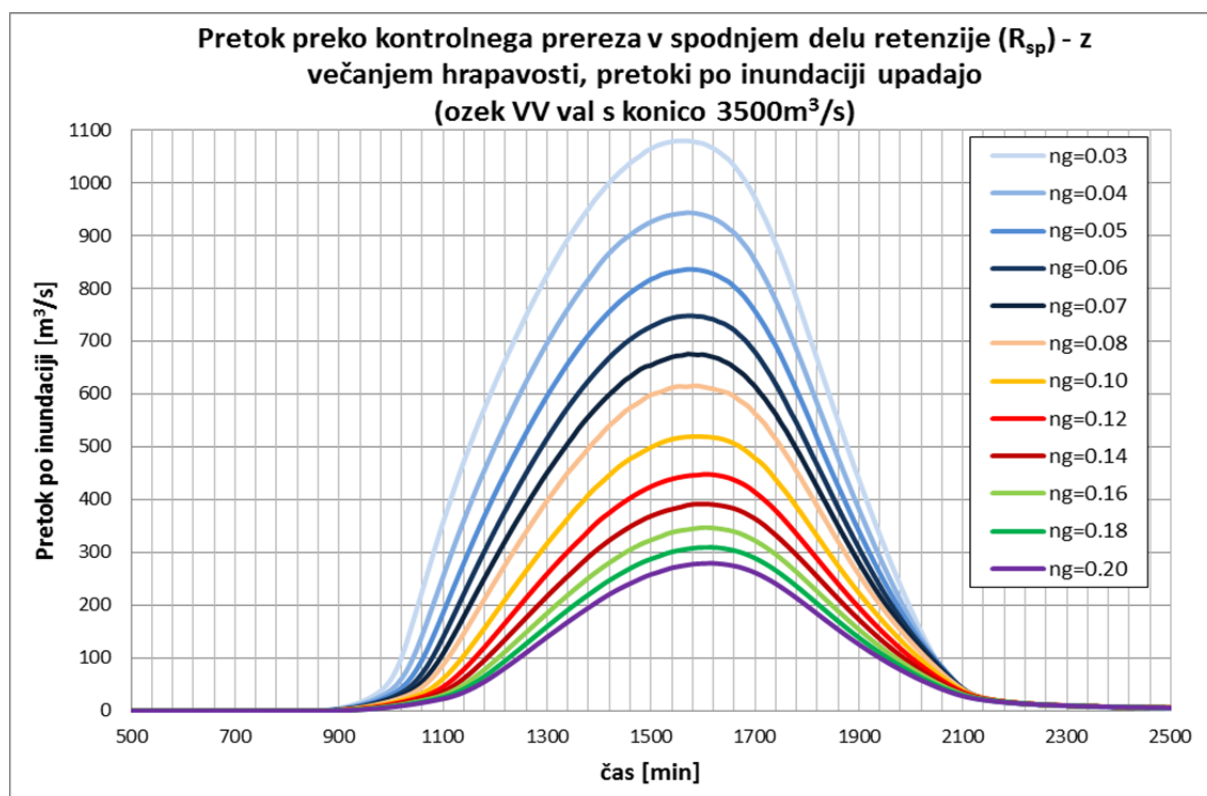
Iz osnovnih semiempiričnih enačb (npr. de Chézyjeva in Manningova enačba), ki podajo odvisnost med pretokom, hitrostjo in globino vode, je razvidno, da se pri enakem pretoku in pretočnem prerezu s konstantno širino z večanjem hidravlične hrapavosti zmanjšuje hitrost vode in posledično povečuje njena globina. Enak pojav je opazen tudi pri poplavnih površinah, kjer hidravlična hrapavost poplavnih površin vpliva na odtočne razmere čez retenzijo. Spreminjanje razmer je bilo opazovano pri ozkih in širokih VV valovih s konicami 2500 m³/s, 3000 m³/s, 3500 m³/s in 4000 m³/s. Kot je razvidno iz slike 38, se z večanjem hidravlične hrapavosti zmanjšujejo hitrosti vode tudi do 80 odstotkov glede na hitrosti pri hidravlično najbolj gladki retenziji ($n_g = 0,03$), posledično pa se povečujejo globine vode.



Slika 38: Odvisnost hitrosti in globine vode od koeficienta hrapavosti n_g (polna črta prikazuje hitrost vode, črtkana črta pa globino vode).

Figure 38: Dependence of a water velocity and depth of roughness coefficient n_g (solid line presents water velocity and dotted line presents water depth).

Medtem, ko odvisnost hitrosti od hrapavosti pri vseh VV valovih kaže enak trend vpliva, je pri VV valovih z nižjimi konicami pri spreminjanju globine vode opazen drugačen trend. Pri VV valovih, pri katerih konica izrazito presega pretočnost struge, odlivanje pa se začne še v izrazito strmem delu naraščajoče veje hidrograma, torej se v retenzijo odlivajo večje količine vodne mase, se globine z naraščanjem hidravlične hrapavosti na retenziji povečujejo. Pri ozkem in širokem VV valom s konico $2500 \text{ m}^3/\text{s}$, kjer se odlivanje prične v zgornjem delu hidrograma, kjer je gradient naraščajočega dela hidrograma vse manjši, pa se odlije le konica VV vala. Zaradi vse počasnejšega naraščanja gladine v strugi vodotoka, je odlivanje upočasnjeno. Z naraščanjem hidravlične hrapavosti se sicer hitrosti vode zmanjšujejo, vendar pa se zaradi manjših količin vodne mase na retenziji znižujejo tudi gladine vode. Vzrok za zmanjševanje količin prelite vodne mase na retenzijo je na eni strani v upočasnjevanju naraščanja vodostajev v strugi glede na retenzijo, po drugi strani pa se z večanjem hidravlične hrapavosti hitrosti vode zmanjšujejo, zaradi česar voda po retenziji odteka počasneje, gladine vode pa so tako zaradi nižjih hitrosti vode, kot tudi zaradi vpliva gladin vode dolvodno, višje. Na ta način se zmanjšuje razlika med energijo prereza, kar zmanjšuje odtok na retenzijo. Slika 39 prikazuje odvisnost amplitude hidrograma v kontrolnem prerezu v zgornjem delu retenzije (R_{zg}) za ozek VV val s konico $3000 \text{ m}^3/\text{s}$.



Slika 39: Zniževanje amplitude hidrograma s povečevanjem hidravlične hrapavosti v retenziji. Graf prikazuje spreminjanje amplitude hidrograma v kontrolnem prerezu v spodnjem delu retenzije (R_{sp}) za ozek VV val s konico $3500 \text{ m}^3/\text{s}$.

Figure 39: A decrease of the hydrograph amplitude with the increase of the hydraulic roughness in the retention. The graph presents a change of the hydrograph amplitude in the control section in the lower part of the retention area (R_{sp}) for a narrow HW wave with the peak discharge of $3500 \text{ m}^3/\text{s}$.

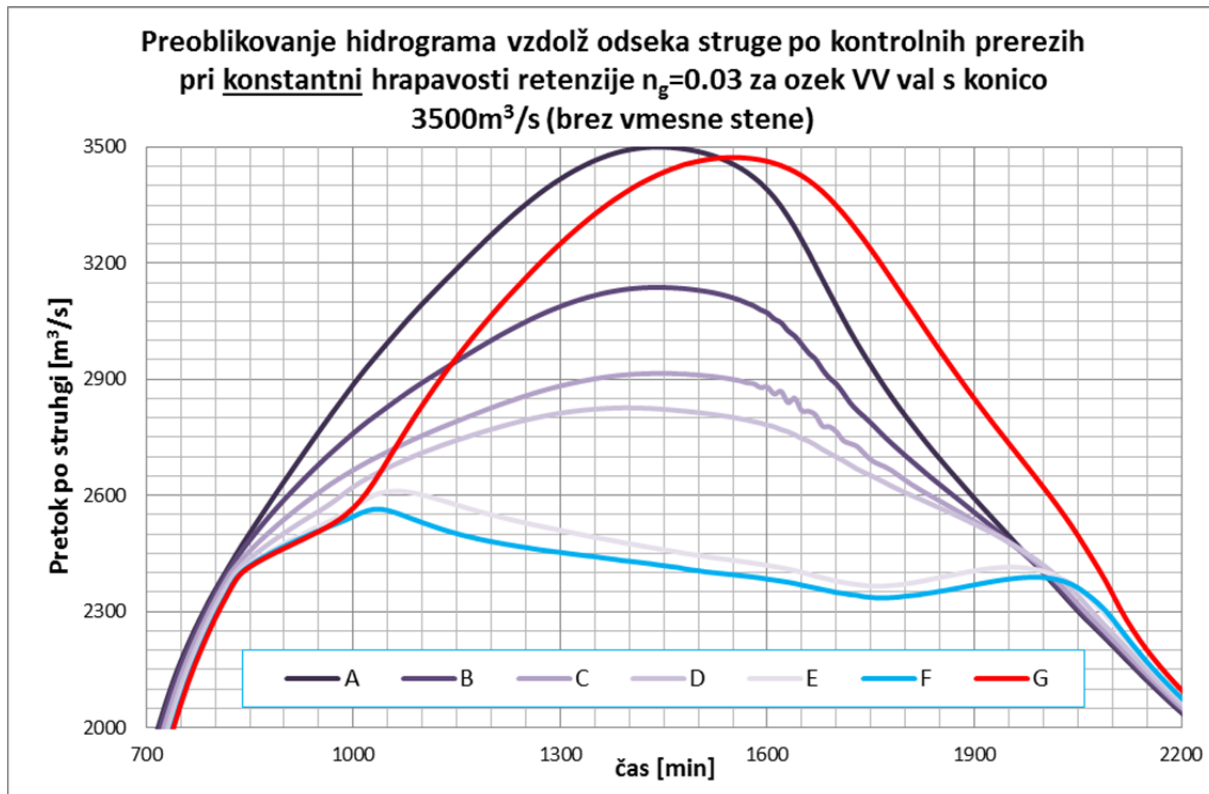
Zadrževalna sposobnost retenzije je odvisna od dejanske količine prelite vodne mase, hitrosti vodnega toka čez retenzijo in posledično sovpadanja hidrogramov na odseku, kjer se voda vrača iz retenzije v strugo. Zaradi nizkih hitrosti vodnega toka lahko povečanje hrapavosti v retenziji negativno vpliva na proces polnjenja retenzije. Predvsem pri nižjih VV valovih se pri

večji hidravlični hrapavosti in posledično visokih gladinah vode na retenziji le-ta posebej ob sami konici VV vala ne polni, zaradi česar konica čez odsek potuje nebitveno nižana. Ker ne prihaja do razlivanja konice, je tudi hitrost potovanja konice čez odsek praktično nezmanjšana. Pri drugem skrajnem primeru, ko je retenzija zelo gladka, se na retenzijo sicer prelijejo večje količine vodne mase, vendar pa so hitrosti vode po vzporednih tokovih v retenziji velike, tj. reda velikosti hitrosti v strugi, zaradi česar ne prihaja do znatnega zadrževanja vodne mase, sovpadanje VV valov po strugi in retenziji pa je za znižanje konice VV vala neugodno, torej konici po strugi in inudaciji na delu, kjer se voda vrača nazaj v strugo, nastopita približno istočasno. Hitrosti vodnega toka vplivajo tudi na intenziteto vračanja vode iz retenzije nazaj v strugo vodotoka. Pri višjih hitrostih čez retenzijo je energijski nivo oziroma potencialna gladina vode namreč višja, kar pospešuje vračanje vode v strugo v padajoči fazi VV vala.

Z večanjem hrapavosti retenzije je tok vode po retenziji vse počasnejši, zaradi česar se voda vrača šele v kasnejši fazi hidrograma nazaj v strugo in manj prispeva h konici dolvodno. Pri določeni hidravlični hrapavosti, ki je različna za različne VV valove, je tok po retenziji že prepočasen, gladine posledično previsoke, kar zmanjšuje delež odlite količine vode ob nastopu same konice, kar zmanjšuje znižanje konice, konica pa potuje večinoma po strugi. Tok vode po retenziji je sicer počasen in le malenkostno prispeva k zvišanju konice v izhodnem profilu, vendar pa so zaradi nizkih hitrosti vode gladine v njej že previsoke, da bi lahko retenzija sprejela dodatno količino vode. Ko se ob povečanju hrapavosti zgodi izrazit preskok v dolžini potovalnega časa (potovalni čas se zmanjša), je to posledica "previsokih" gladin vode na retenziji, zaradi česar ni zadostnega odliva na retenzijo. Pojav na izhodnem profilu bo opisan v poglavju Vpliv spreminjajočih se tokovnih razmer na retenziji na preoblikovanje hidrograma.

4.2.2 Vpliv spreminjajočih se tokovnih razmer na retenziji na izhodni hidrogram

Odtočne razmere čez retenzijo neposredno vplivajo na potovanje VV vala čez obravnavani odsek. Količine vodne mase odlite na retenzijo, hitrosti vzporednih vodnih tokov oz. sovpadanje potovanja valov po strugi in retenziji ter režim vračanja vode nazaj v strugo vplivajo tako na preoblikovanje hidrograma, kot tudi na nastop konice v izhodnem profilu. Te povezave si pogledjmo na hidrogramih v posameznih prečnih prerezi. Na sliki 40 je za primer ozkega VV vala s konico $3500 \text{ m}^3/\text{s}$ prikazano preoblikovanje hidrograma vzdolž vodotoka kot posledica odtočnih razmer na retenziji. Komunikacija z retenzijo se pojavlja vzdolž celotnega odseka, saj ni vmesne stene. Konica hidrograma v strugi se v smeri toka vse bolj znižuje, saj se del vode iz struge odliva na retenzijo (modre krivulje). Zniževanje v smeri vodotoka sega do mesta, kjer se začne voda vračati nazaj v strugo na spodnjem delu retenzije. Tam se konica zviša za dotok vode iz retenzije (rdeča krivulja).

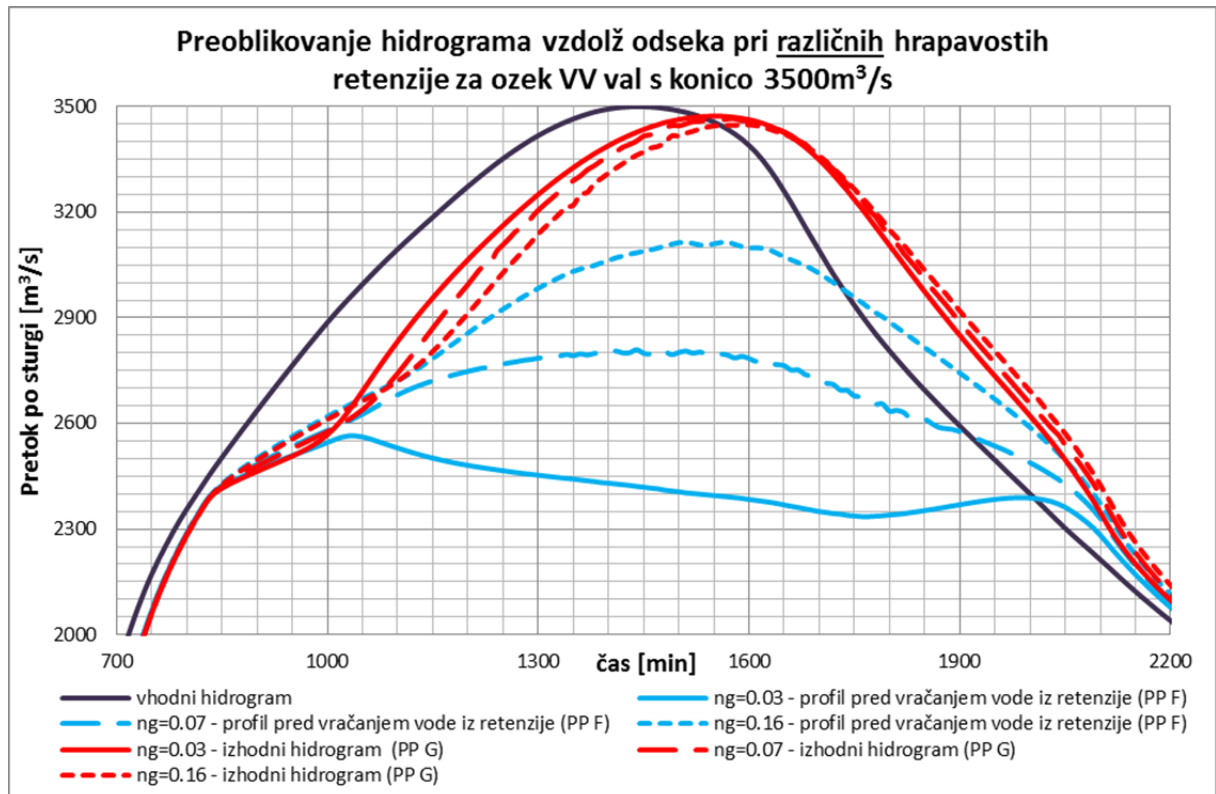


Slika 40: Preoblikovanje hidrograma po strugi vzdolž odseka pri konstantni hrapavosti retenzije $n_g = 0,03$ za ozek VV val s konico 3500 m³/s. Hidrogrami so podani v prerezih, kot so označeni na sliki 37.

Figure 40: A hydrograph transformation in the channel along the reach at a constant roughness of the retention area $n_g = 0.03$ for a narrow HW wave with the a peak discharge of 3500 m³/s. Hydrographs are given in sections as they are marked on the Figure 37.

Kot je razvidno iz slike 40, je tudi v primeru razmeroma majhne razlike med vhodnim in izhodnim hidrogramom dinamika vzdolž retenzije precej bolj pestra. Prav tako je dinamika preoblikovanja vzdolž retenzije odvisna od hrapavosti retenzije. Iz slike 41 je razvidno preoblikovanje hidrograma vzdolž toka za tri različne vrednosti hidravlične hrapavosti retenzije. Hidrogram v profilu pred pričetkom odlivanja na retenzijo je za vse primere enak in je izrisan s črno linijo. Pri vseh primerih se konica vzdolž toka znižuje in sicer do profila, kjer prihaja do vračanja vode nazaj v strugo. Razvidno je, da se konica znižuje v odvisnosti od hrapavosti retenzije. Bolj kot je gladka večji je odliv. Na sliki je zniževanje konice vzdolž toka po strugi prikazano z modro barvo in sicer za tri vrednosti hidravlične hrapavosti retenzije. V istem prerezu so hidrogrami izrisani z enako barvo in različnim slogom črte. Rdeče krivulje prikazujejo hidrograme v izhodnem profilu.

Iz slike 41 je razvidno, da pri nižji hrapavosti retenzije sicer dobimo večji odliv na retenzijo, vendar pa se zaradi hitrejšega vodnega toka pojavi sovpadanje valov po strugi in retenziji ter posledično intenzivnejše vračanje vode v strugo. Znižanje konice v strugi pred profilom vračanja vode iz retenzije je največje pri najmanjši hidravlični hrapavosti retenzije. Kljub temu prihaja zaradi hitrega toka vode v retenziji do zvišanja gladin vode v spodnjem delu retenzije in hitrejšega vračanja vode nazaj v strugo, zaradi česar se pojavi izrazit dvig konice kot posledica vode, ki se steka iz retenzije v strugo. Z večanjem hidravlične hrapavosti se sicer zmanjšuje količina prelite vode, vendar pa se pojavlja daljši zadrževalni čas in kasnejše ter manj izrazito vračanje vode nazaj v strugo.



Slika 41: Preoblikovanje hidrograma vzdolž odseka pri različni hrapavosti retenzije za ozek VV val s konico 3500 m³/s.

Figure 41: A hydrograph transformation along the reach at varied roughness of retention the area for a narrow HW wave with the peak discharge of 3500 m³/s.

Pri višjih VV valovih, ki imajo razmeroma velik volumen nad pretočnostjo struge, se torej z večanjem hidravlične hrapavosti, še zmanjšuje konica. Vendar pa, kot je razvidno iz preglednice 1, se z večanjem volumna VV valov nad pretočnostjo struge vpliv retenzije glede na vhodni hidrogram VV valov zmanjšuje. Z večanjem hidravlične hrapavosti retenzije se konica sicer znižuje, vendar pa je znižanje glede na vhodni hidrogram majhno. V preglednici 1 so na lokaciji izhodnega prereza (prerez G) za posamezne VV valove podane absolutne vrednosti znižanja konice, v odstotkih so podane vrednosti znižanja konice glede na konico vhodnega hidrograma in glede na znižanje konice pri hidravlično najbolj gladki retenziji ($n_g=0,03$).

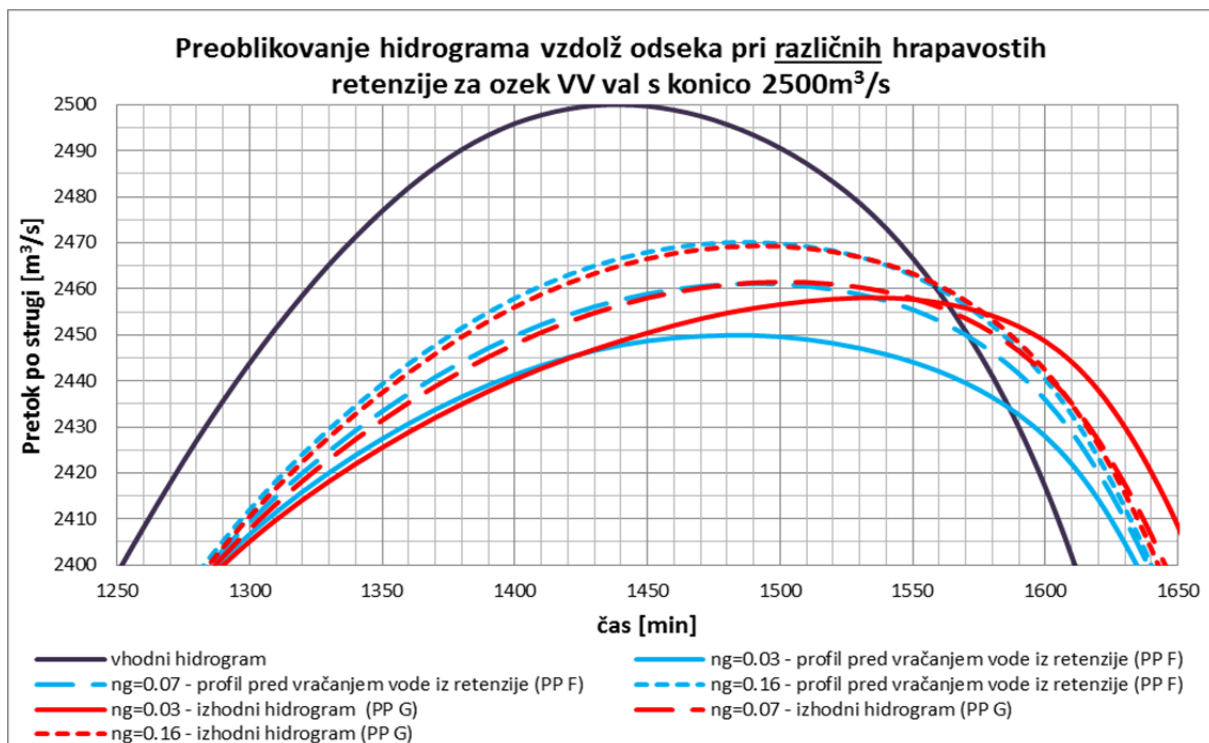
Kot je razvidno iz vrednosti v preglednici, povečevanje hidravlične hrapavosti retenzije pri VV valovih, pri katerih se prelije le vršni del VV vala, neugodno vpliva na znižanje konice oz. se konica dolvodno povečuje. Na sliki 42 je prikazano preoblikovanje hidrograma vzdolž odseka kot posledica različne hrapavosti retenzije, in sicer za primer VV vala z majhno konico glede na pretočnost struge (ozek VV val s konico 2500 m³/s), zaradi česar ima povečevanje hrapavosti retenzije neugoden vpliv. Posamezne barve in slogi črte prikazujejo enake parametre kot pri sliki 41. Hidrogram v profilu pred pričetkom odlivanja na retenzijo je za vse primere enak in je izrisan s črno linijo. Pri vseh primerih se konica vzdolž toka znižuje, in sicer do profila, kjer prihaja do vračanja vode nazaj v strugo. Iz poteka modrih linij na grafu je razvidno, da se konica znižuje v odvisnosti od hrapavosti retenzije. Bolj kot je gladka, večji je odliv. Na sliki 42 je zniževanje konice vzdolž toka prikazano z modro barvo, in sicer za tri vrednosti hidravlične hrapavosti. V istem profilu so hidrogrami izrisani z enako barvo in različnim slogom črte. Rdeče krivulje prikazujejo hidrograme v izhodnem profilu.

Preglednica 1: Znižanje konice za vse VV valove v izhodnem prerezu – primerjava je podana v absolutnih vrednostih, v odstotkih glede na konico vhodnega hidrograma (*) in glede na znižanje konice pri hidravlični hrapavosti retenzije $n_g = 0,03$ ().**

Table 1: Peak attenuation for all HW waves in outlet section – comparison is given in absolute values, in percentage according to peak discharge of inlet hydrograph (*) and according to peak attenuation for hydraulic roughness of retention area $n_g=0.03$ ().**

	znižanje konice, ko se n_g spreminja od 0,03 do 0,2			
	[m ³ /s]	[%] (max) (*)	[%] (max) (**)	opomba
ozek VV Q2500 m ³ /s	42 → 29	1,4	-33	večja hrapavost, manjše zmanjšanje
širok VV Q2500 m ³ /s	10 → 26 → 22	0,9	110	obrat trenda zniževanja konice pri $n_g=0,08$
ozek VV Q3000 m ³ /s	20 → 78	2,6	286	večja hrapavost, večje zmanjšanje
širok VV Q3000 m ³ /s	5 → 17	0,6	242	večja hrapavost, večje zmanjšanje
ozek VV Q3500 m ³ /s	27 → 60	2,0	117	večja hrapavost, večje zmanjšanje
širok VV Q3500 m ³ /s	7 → 13	0,4	89	večja hrapavost, večje zmanjšanje
ozek VV Q4000 m ³ /s	39 → 60	2,0	53	večja hrapavost, večje zmanjšanje
širok VV Q4000 m ³ /s	10 → 14	0,5	38	večja hrapavost, večje zmanjšanje
*	primerjava zmanjšanja glede na konice VV vala za primer brez retenzije			
**	primerjava glede na primer z najmanjšo vrednostjo hrapavosti n_g retenzije ($n_g=0,03$)			

Pri majhni hrapavosti retenzije (slika 42, $n_g=0,03$) se odlije največja količina vodne mase, zaradi česar je tudi znižanje konice do profila, kjer se začne vračanje nazaj v strugo, največje. Tok vode po retenziji je sicer hiter in prihaja le do časovno krajšega zadrževanja vode, s tem pa do sovpadanja potovanja vrhov vodne mase po retenziji in strugi.



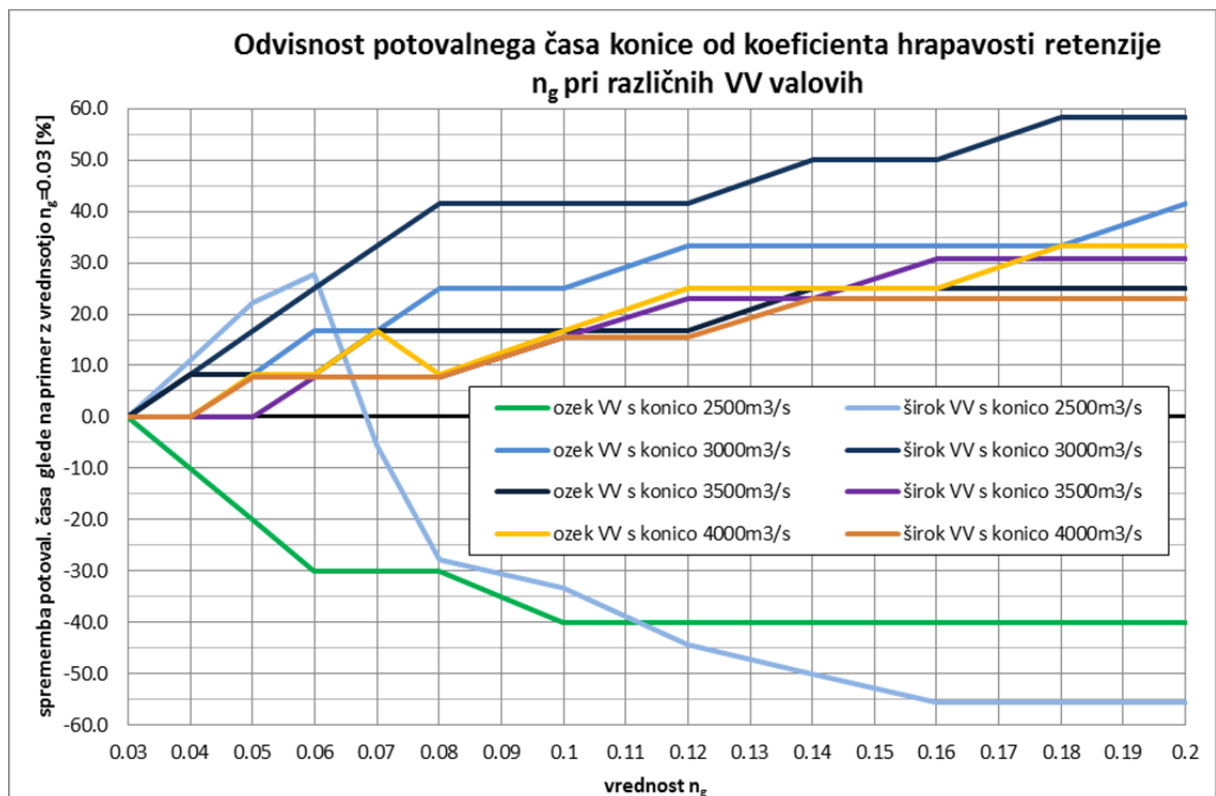
Slika 42: Preoblikovanje hidrograma vzdolž retenzije, kot posledica različne hrapavosti retenzije za primer nižjega VV vala (ozek VV val s konico 2500 m³/s).

Figure 42: A hydrograph transformation along the reach at varied roughness of the retention area for a lower HW wave (a narrow HW wave with the peak discharge of 2500 m³/s).

Kot je razvidno iz slike 42, se pri večji hrapavosti (na sliki $n_g=0,07$ in $n_g=0,16$) na retenzijo odlije vse manjši delež vodne mase. Pri večji hrapavosti je tok vode po retenziji sicer počasnejši, vendar pa je na retenzijo odlita količina premajhna, da bi imele odtočne razmere po retenziji izrazitejši vpliv na izhodni hidrogram. Zaradi majhnih hitrosti vodnega toka so namreč gladine višje, kar onemogoča odlivanje iz struge in konica VV vala potuje dolvodno z majhnim znižanjem. Ker je količina vodne mase na retenziji majhna, tok vode pa počasen oziroma se pojavi izrazito časovno zadrževanje vode, tok iz retenzije v strugo minimalno prispeva h konici v izhodnem profilu.

Na zgornjih dveh slikah (slika 41 in 42) sta prikazana dva primera, prvi, kjer povečevanje hrapavosti v retenziji ugodno vpliva na znižanje konice, in drugi, pri katerem se zaradi povečevanja hrapavosti prelije premajhna količina vode, da bi imele odtočne razmere čez retenzijo izrazitejši vpliv na razmere dolvodno. V prilogi A je prikazan tudi tretji primer (širok VV val s konico $2500 \text{ m}^3/\text{s}$), pri katerem se neugoden vpliv povečevanja hrapavosti retenzije pojavi šele pri določeni vrednosti. Iz vseh treh primerov je torej možno sklepati oziroma potrditi, da je največje znižanje konice dolvodno možno doseči pri takšni hrapavosti retenzije, pri kateri je razmerje med količino odlite vode na retenzijo in hitrostmi vodnega toka oz. odtočnih razmer čez retenzijo najugodnejše.

Odtočne razmere na retenziji zelo podobno kot na znižanje konice hidrograma v izhodnem profilu vplivajo tudi na potovalni čas konice čez obravnavano območje. Tako konica v izhodnem profilu kot tudi potovalni čas konice VV vala sta namreč odvisna od preoblikovanja hidrograma. S povečevanjem zadrževalne sposobnosti retenzije, kot je prikazano zgoraj (slika 42), se podaljšuje potovalni čas VV vala.



Slika 43: Odvisnost potovalnega časa konice od koeficienta hrapavosti n_g za različne VV valove.

Figure 43: A peak propagation time dependence on the roughness coefficient n_g for different HW waves.

Iz slike 43 je razvidno, da je, enako kot pri vplivu na konico, trend trajanja oz. potovalnega časa ob povečevanja hidravlične hrapavosti ugoden. Vendar pa se tudi v tem primeru pojavi neugoden vpliv pri nižjih VV z majhnim volumnom nad pretočno sposobnostjo struge. Kot je bilo že opisano in prikazano na sliki 42, pri VV valu z nižjo konico oziroma manjšim volumnom nad pretočno sposobnostjo struge pri večji hidravlični hrapavosti ne prihaja do zadostnega odlivanja vodne mase, da bi zadrževanje vodne mase na retenziji pomembno vplivalo na preoblikovanje VV vala. Zaradi majhne razlike med energijo prereza v strugi in energijskim nivojem na retenziji, ki so posledica majhnega gradienta naraščanja pretoka v zgornjem delu hidrograma, ne prihaja do zadostnega odlivanja na retenzijo. Kot je razvidno iz slike 41 je pri večji hrapavosti retenzije tok vode dovolj počasen, da se voda iz retenzije v strugo vrača že v padajoči fazi VV vala, zaradi česar vodna masa iz retenzije ne povečuje konice v izhodnem profilu.

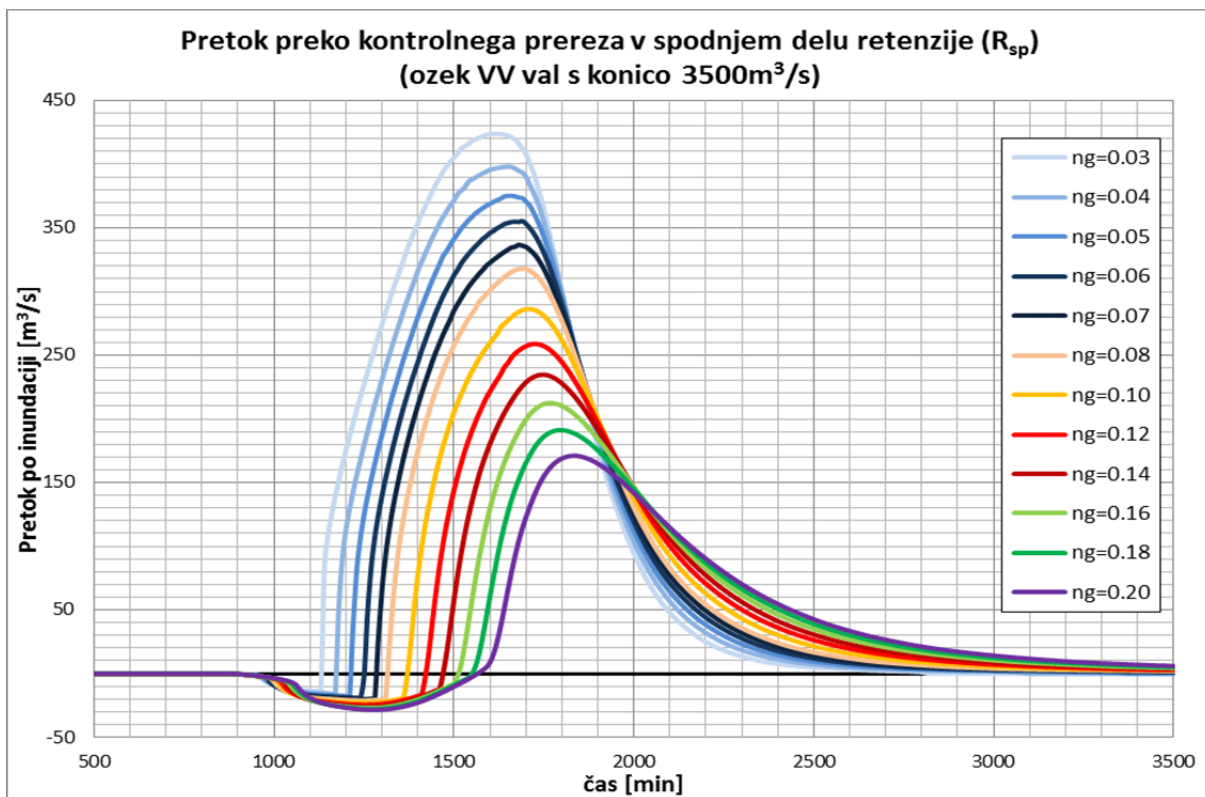
V prilogi A je prikazano preoblikovanje hidrograma vzdolž retenzije, kot posledica različne hrapavosti retenzije, za primer VV vala (ozek VV val s konico $2500 \text{ m}^3/\text{s}$), kjer povečanje hrapavosti negativno vpliva na znižanje konice in na podaljševanje potovalnega časa. V prilogi A je prikazano tudi preoblikovanje hidrograma vzdolž retenzije, kot posledica različne hrapavosti retenzije, za primer VV vala (širok VV val s konico $2500 \text{ m}^3/\text{s}$), kjer povečanje hrapavosti nad določeno vrednostjo negativno vpliva na znižanje konice in na podaljševanje potovalnega časa. Kot tretji primer v prilogi A je prikazan primer VV vala (ozek VV val s konico $3000 \text{ m}^3/\text{s}$), kjer povečanje hrapavosti nad določeno vrednostjo negativno vpliva na znižanje konice in na podaljševanje potovalnega časa. V prilogah od B.1 do B.8 je za vse obravnavane VV valove prikazano preoblikovanje hidrogramov VV valov v izhodnem prerezu pri različni hrapavosti retenzije. V prilogah od C.1 do C.4 pa so za vse VV valove pri različni hrapavosti retenzije tabelarično prikazane vrednosti znižanja konice, dolžine potovalnega časa, vrednosti maksimalnih pretokov v kontrolnih prerezih na retenziji (R_{zg} in R_{sp}), ter povprečne vrednosti hitrosti in globin.

4.2.3 Vpliv spreminjanja hrapavosti retenzije na potovanje VV valov za primer vmesne stene pri razlivanju vode v retenzijo in vračanja v strugo

V prvem sklopu izračunov je bila spremenljivka koeficient hrapavosti. Izračuni so pokazali, da se z večanjem hidravlične hrapavosti zmanjšujejo hitrosti vodnega toka v retenziji, globine vode pa se povečujejo kljub manjšim količinam vodne mase na retenziji. V drugem sklopu izračunov pa analiziramo primer, ko se je s predelno steno in omejitvijo komunikacije med strugo in poplavnimi površinami na 500 m dolgem komunikacijskem odseku na zgornjem in spodnjem delu retenzije poskušalo povečati zadrževalno sposobnost retenzije ter kljub manjšim količinam vodne mase na retenziji doseči enak oz. celo bolj ugoden vpliv retenzije na povečanje potovalnega časa (tj. upočasnitve) VV vala čez območja in znižanje konice v izhodnem profilu. V vseh izračunih s predelno steno je bila uporabljena konstantna dolžina in tudi višina prelivnega roba iz struge. Seveda bi lahko z modifikacijami dolžine odprtine za komunikacijo vode med strugo in retenzijo analizirali še vpliv geometrije teh dveh odprtin na rezultate, vendar pa bi se v tem primeru število izračunov povečalo čez obseg magistrskega dela.

Tudi pri primeru s predelno steno so bili izračuni opravljeni za vse VV valove, kot pri primeru brez predelne stene, tj. ozki in široki VV valovi s konicami 2500, 3000, 3500 in $4000 \text{ m}^3/\text{s}$. Upoštevane so bile tudi enake vrednosti koeficienta hrapavosti retenzije ($0,03 \leq n_g \leq 0,2$). Pri povečevanju hidravlične hrapavosti se pri odtočnih razmerah na retenziji kažejo enaki trendi,

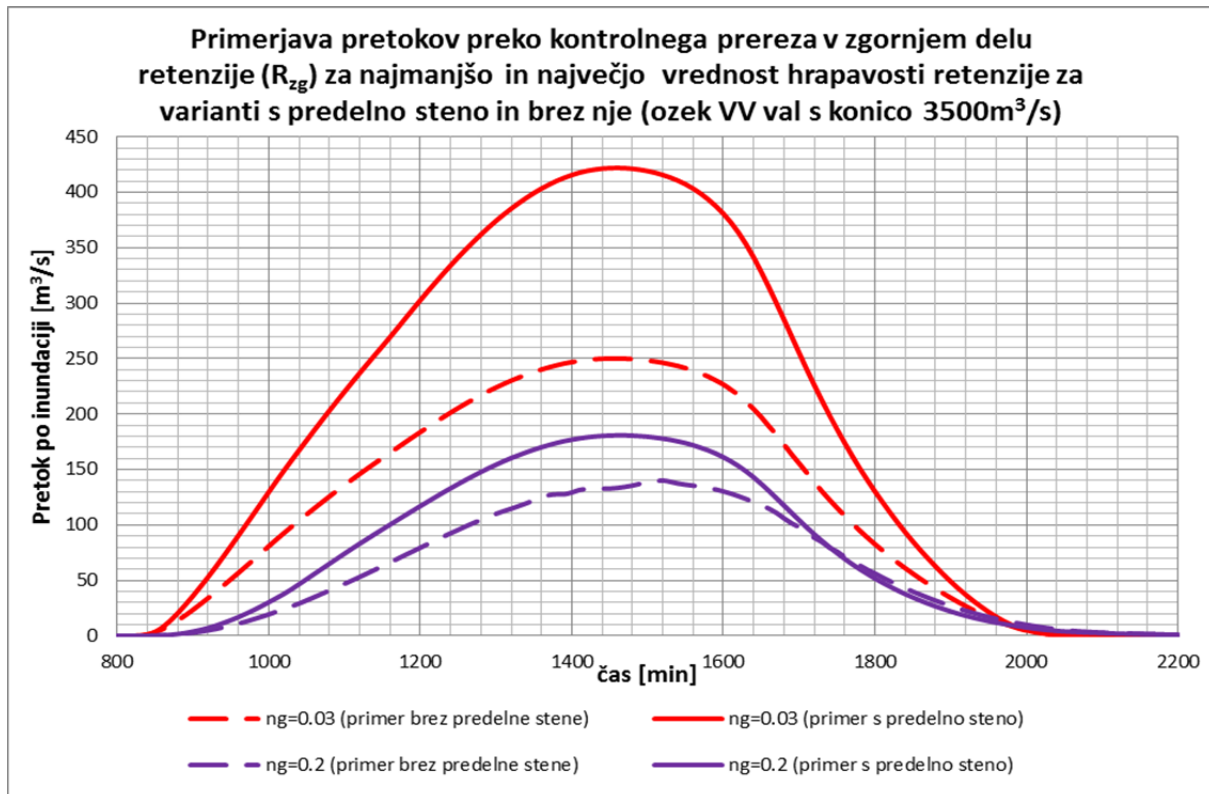
kot so bili opazni pri modelu, kjer je komunikacija potekala vzdolž celotne dolžine retenzije. Količine vodne mase se s povečanjem hidravlične hrapavosti zmanjšujejo (slika 44).



Slika 44: Zniževanje amplitude hidrograma s povečevanjem hidravlične hrapavosti. Graf prikazuje spreminjanje amplitude hidrograma v kontrolnem prerezu v spodnjem delu retenzije (R_{sp}) za ozek VV val s konico $3500\text{ m}^3/\text{s}$.

Figure 44: A decrease of the hydrograph amplitude with the increase of the hydraulic roughness in retention area. The graph presents a change of hydrograph amplitude in control section in lower part of retention area (R_{sp}) for a narrow HW wave with the peak discharge of $3500\text{ m}^3/\text{s}$.

Primerjava hidrogramov v kontrolnem prerezu v spodnjem delu retenzije (R_{sp}) (npr. primerjava hidrogramov iz slike 39 in 44) pokaže, da je pri enakem VV valu na vstopu v model skupna količina vodne mase na retenziji v primeru območja s predelno steno manjša. Vendar pa primerjava hidrogramov pri enakem VV valu na vstopu v model, v kontrolnem prerezu v zgornjem delu retenzije (R_{zg}) pokaže, da se na enaki dolžini prelivanja, kot je dolžina odprtine pri varianti s predelno steno, v primeru predelne stene v retenzijo odlije večja količina vodne mase (slika 45).

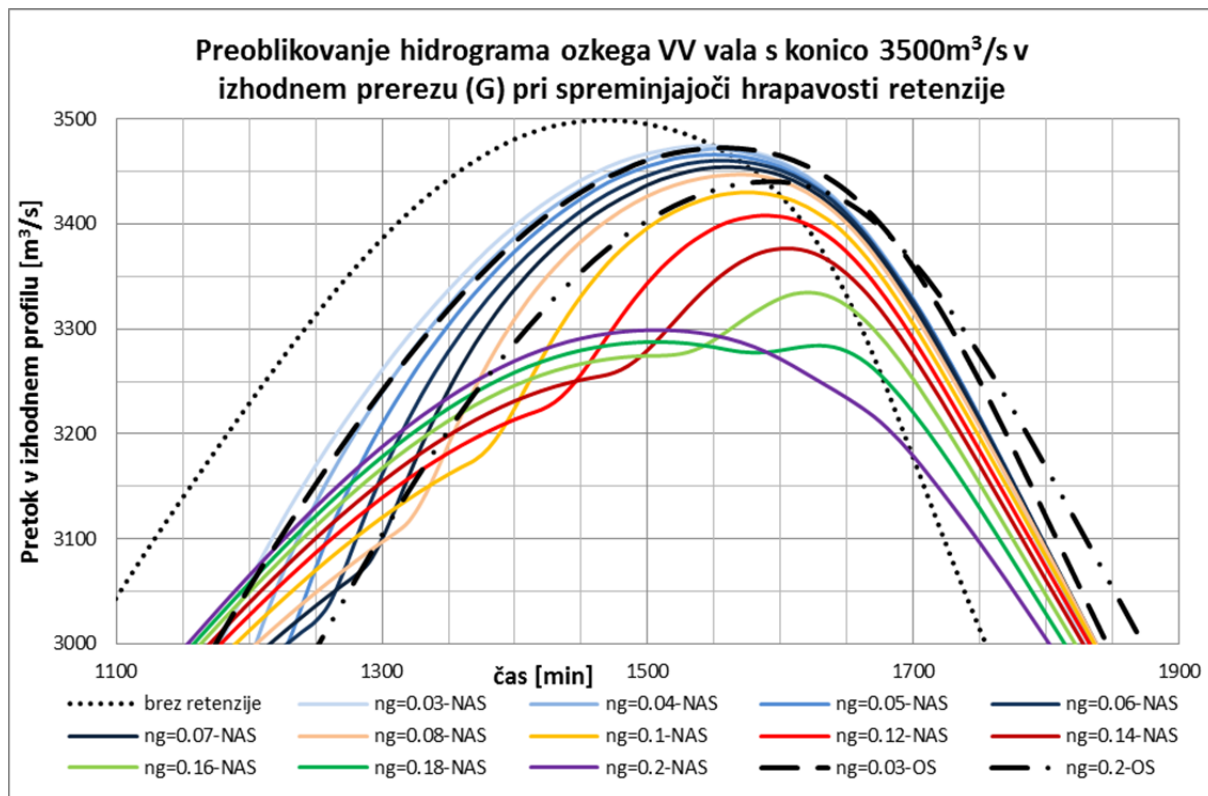


Slika 45: Primerjava pretokov v kontrolnem prerezu v zgornjem delu retenzije (R_{zg}) za največjo in najmanjšo vrednost hrapavosti retenzije za primera s predelno steno oz. brez nje (ozek VV val s konico $3500\text{m}^3/\text{s}$).

Figure 45: A comparison of the discharges in the control section in the upper part of the retention area (R_{zg}) for a maximum and minimum value of the retention area roughness for variants with and without partition walls (a narrow HW wave with the peak discharge of $3500\text{m}^3/\text{s}$).

Vzrok za večjo količino vodne mase, ki se odlije v retenzijo vzdolž odprtine, je v tem, da je del retenzije dolvodno od odprtine v primeru predelne stene suh, zaradi česar lahko voda odteka hitreje. Če predelne steni ni, torej se odlivanje pojavlja vzdolž celotne retenzije, pa vodna masa, ki se odlije dolvodno, vpliva na odtočne razmere gorvodno.

Kljub manjšim skupnim količinam vodne mase na retenziji pri varianti modela s predelno steno, ki preprečuje komunikacijo med strugo in retenzijo, je zadrževalna sposobnost retenzije večja, kar se odraža v večjem znižanju konice v izhodnem profilu modela. Na sliki 46 je prikazano preoblikovanje ozkega VV vala s konico $3500\text{m}^3/\text{s}$ v izhodnem prerezu (G) pri povečevanju hrapavosti retenzije, za varianto s predelno steno. Prav tako sta, za primerjavo, vrisani tudi krivulji hidrograma za varianto brez predelne stene, in sicer za najmanjšo in največjo vrednost hidravlične hrapavosti retenzije.



Slika 46: Preoblikovanje hidrograma ozkega VV vala s konico 3500m³/s v izhodnem prerezu (G) pri spreminjajoči hrapavosti retenzije.

Figure 46: A hydrograph transformation of a narrow HW wave with a peak discharge of 3500 m³/s in the outlet section (G) at varied roughness of the retention area.

Iz slike je razvidno tudi, da se s povečevanjem zadrževalne sposobnosti podaljšuje razlika časa med nastopom konice VV vala v vhodnem in izhodnem prerezu. Rezultati pri ozkem VV valu s konico 3500m³/s, ki je uporabljen kot reprezentativen VV val za srednje in visoke VV valove (tj. VV valovi, pri katerih konica izrazito presega pretočno sposobnost struge), potrjujejo, da je z omejitvijo komunikacije vode med strugo in retenzijo možno vplivati na zadrževalno sposobnost in tako kljub manjšim količinam vodne mase na retenziji doseči ugodnejši vpliv na znižanje konice dolvodno in povečanje zadrževalnega časa.

Na slika 47 je za ozki VV val s konico 3500 m³/s prikazano spreminjanje potovalnega časa in znižanja konice VV vala glede na hrapavost retenzije. Za obe varianti modela (tj. s predelno steno oziroma brez nje). Za referenčno stanje je za obe varianti modela vzeta čas in znižanje konice pri osnovnem modelu s hrapavostjo retenzije ng=0,03. Kot je razvidno iz slike, je pri nižjih vrednostih hrapavosti znižanje pri obeh variantah modela zelo podobno. Z večanjem hidravlične hrapavosti pa ob prekinitvi komunikacije vode med strugo in retenzijo odtočne razmere čez retenzijo izraziteje vplivajo na zadrževalno sposobnost retenzije. Medtem ko je znižanje konice pri osnovnem primeru (brez predelne stene) ob povečanju hrapavosti retenzije do cca. 120 % glede na referenčni primer, je znižanje konice pri varianti s predelno steno tudi do cca. 650 %. Znižanje konice, gledano v odstotkih glede na referenčni primer, je sicer veliko pri vseh VV valovih, vendar pa je treba poudariti, da so znižanja glede na samo konico relativno majhna in se zmanjšujejo z večanjem volumna VV vala nad pretočno sposobnostjo struge. Preglednica 2 podaja absolutne vrednosti znižanja konice in tudi relativno znižanje glede na konico vhodnega hidrograma v odstotkih.

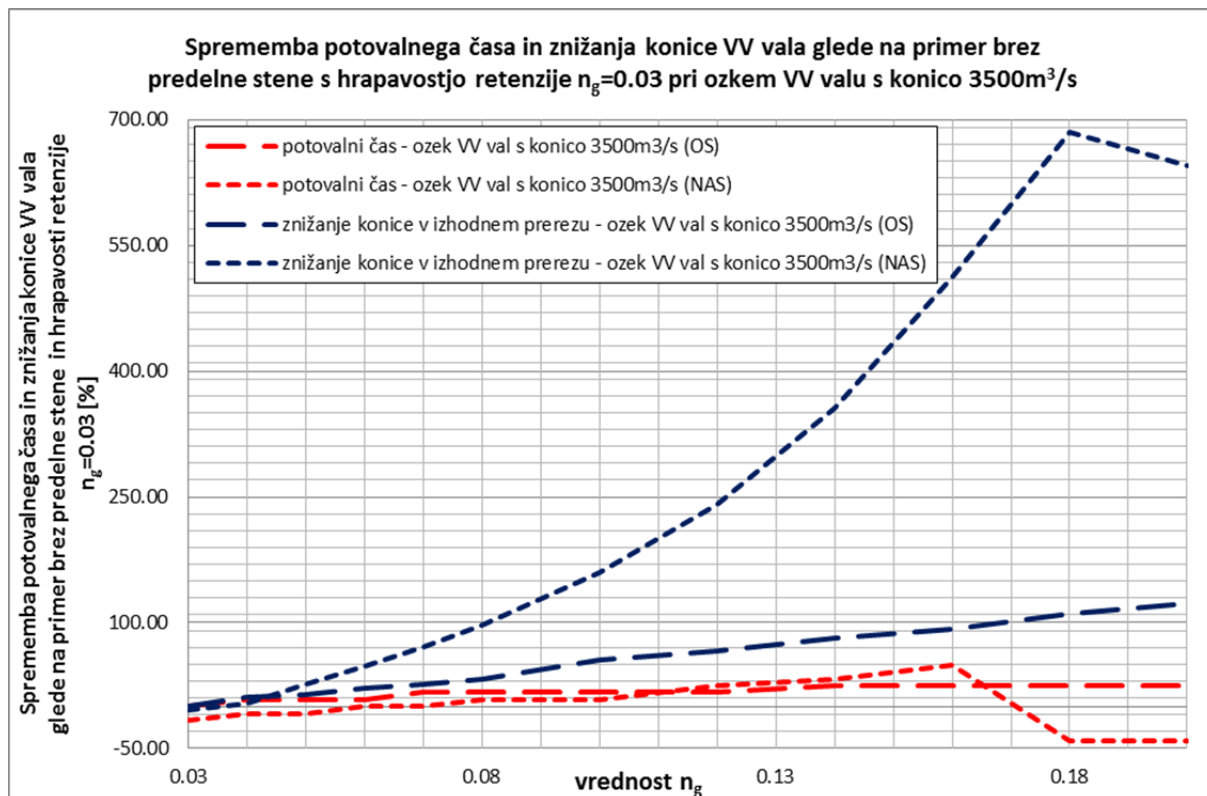
Preglednica 2: Znižanje konice za posamezne VV valove v izhodnem prerezu – primerjava je podana v absolutnih vrednostih, v odstotkih glede na konico vhodnega hidrograma (*) in glede na znižanje konice pri hidravlični hrapavosti retenzije $n_g = 0,03$ ().**

Table 2: A peak attenuation for each HW wave in the outlet section – a comparison is given in the absolute values, in the percentage according to the peak discharge of the inlet hydrograph (*) and according to the peak attenuation for the hydraulic roughness of the retention area $n_g = 0.03$ ().**

		znižanje konice, ko se n_g spreminja od 0,03 do 0,2			
		[m ³ /s]	[%] (max) (*)	[%] (max) (**)	opomba
ozek VV Q2500 m ³ /s	OS	42 → 29	1,4	-33	večja hrapavost, manjše zmanjšanje
	NAS	17 → 7	0,6	-58	večja hrapavost, manjše zmanjšanje
širok VV Q2500 m ³ /s	OS	10 → 26 → 22	0,9	110	obrat trenda zniževanja konice pri $n_g=0,08$
	NAS	14 → 5	0,5	40	večja hrapavost, manjše zmanjšanje
ozek VV Q3000 m ³ /s	OS	20 → 78	2,6	286	večja hrapavost, večje zmanjšanje
	NAS	24 → 126 → 83	4,2	530	obrat trenda zniževanja konice pri $n_g=0,09$
širok VV Q3000 m ³ /s	OS	5 → 17	0,6	242	večja hrapavost, večje zmanjšanje
	NAS	5 → 79 → 73	2,6	1480	obrat trenda zniževanja konice pri $n_g=0,18$
ozek VV Q3500 m ³ /s	OS	27 → 60	2,0	117	večja hrapavost, večje zmanjšanje
	NAS	26 → 212 → 201	7,1	685	obrat trenda zniževanja konice pri $n_g=0,18$
širok VV Q3500 m ³ /s	OS	7 → 13	0,4	89	večja hrapavost, večje zmanjšanje
	NAS	6 → 36	1,2	414	večja hrapavost, večje zmanjšanje
ozek VV Q4000 m ³ /s	OS	39 → 60	2,0	53	večja hrapavost, večje zmanjšanje
	NAS	35 → 140	4,7	258	večja hrapavost, večje zmanjšanje
širok VV Q4000 m ³ /s	OS	10 → 14	0,5	38	večja hrapavost, večje zmanjšanje
	NAS	9 → 29	1,0	190	večja hrapavost, večje zmanjšanje
*	primerjava zmanjšanja glede na konice VV vala za primer brez retenzije				
**	primerjava glede na primer OS variante modela, z najmanjšo vrednostjo hrapavosti n_g retenzije ($n_g=0,03$)				
OS – brez predelne stene; NAS – s predelno steno					

Podoben trend je opazen tudi pri potovalnem času konice čez obravnavani odsek. Pri nižjih hrapavostih retenzije se sicer nekoliko bolj ugoden vpliv doseže pri varianti, pri kateri komunikacija ni omejena, pri višjih pa je nekoliko bolj ugoden vpliv pri varianti s predelno steno. Kot je razvidno iz slike 47, se tako pri manjših kot tudi pri večjih vrednostih hrapavosti potovalni čas ne spreminja tako izrazito kot znižanje konice.

Na sliki 47 je pri varianti s predelno steno viden lom obeh krivulj pri večjih vrednostih hrapavosti, ko se vpliv povečane hrapavosti odraža negativno. Torej se prične znižanje konice manjšati, potovalni čas pa se izrazito zmanjša. Gre za negativen vpliv prevelike hrapavosti retenzije, ki onemogoča odlivanje dovolj velike količine vodne mase v retenzijo, kar bi sicer ob odtočnih razmerah na retenziji ugodno vplivalo na znižanje konice. Vzrok za to dogajanje je razviden iz slike 48, kjer je prikazana pahljača hidrogramov za ozek VV val s konico 3000 m³/s v izhodnem prerezu G (slika 37).

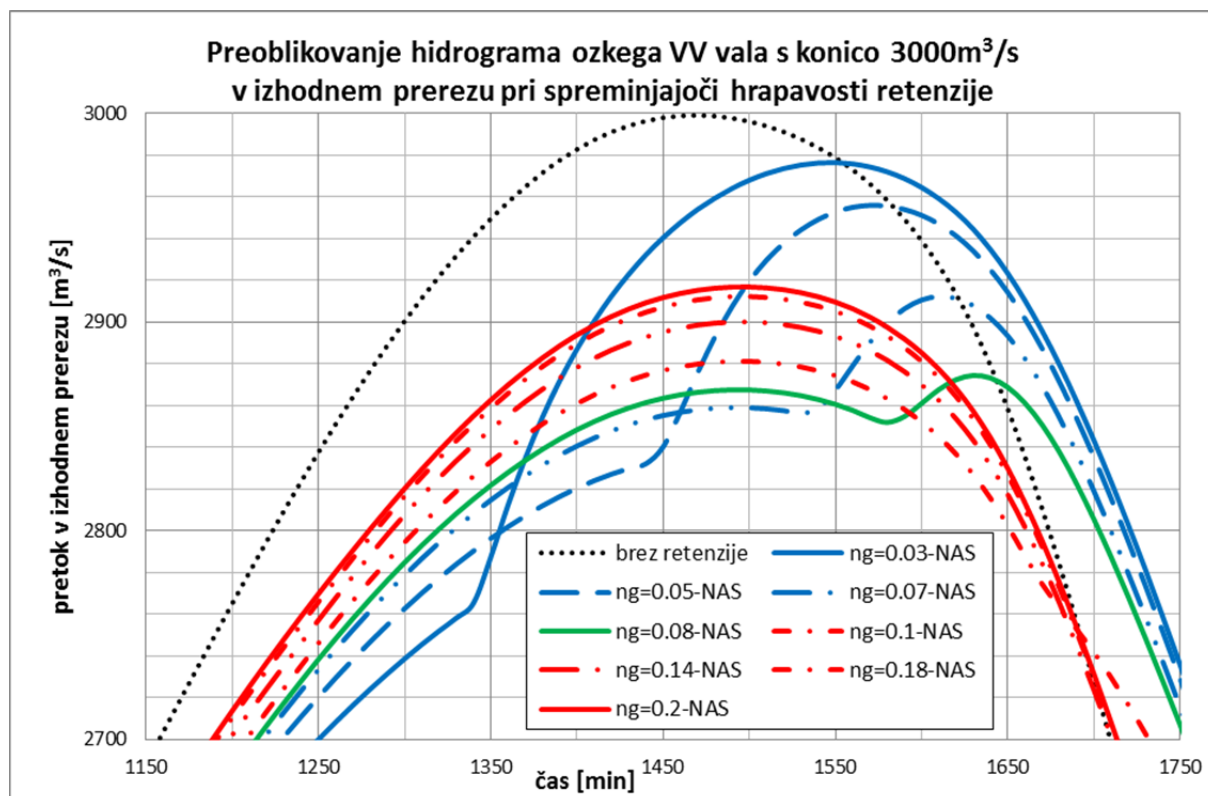


Slika 47: Sprememba potovalnega časa in znižanje konice VV vala glede na primer brez predelne stene (hrapavost retenzije $n_g = 0,03$, ozek VV vala s konico $3500 \text{ m}^3/\text{s}$).

Figure 47: Changing of the propagation time and attenuation of the HW wave peak according to variant without the partition walls (the retention area roughness $n_g = 0.03$, a HW wave with the peak discharge $3500 \text{ m}^3/\text{s}$).

Kot omenjeno, je znižanje konice največje v primeru, ko je razmerje med količino odlite vode na retenzijo in hitrostmi vodnega toka oz. odtočnih razmer preko retenzije najugodnejše. Konica se vzdolž odprtine, preko katere je možen odliv na retenzijo, znižuje. Takšen hidrogram se nato ohranja praktično nespremenjen oz. je le časovno zamaknjen do mesta, kjer prihaja do vračanja vode nazaj v strugo, tj. pri odprtini na spodnjem delu retenzije. Od sovpadanja VV vala po strugi in vodnega toka po retenziji ter vračanja vodne mase nazaj v strugo vodotoka, pa je odvisna oblika hidrograma v izhodnem prerezu. Pri nižji hrapavosti je potovanje konice po retenziji dovolj hitro, glede na hitrost VV vala po strugi (na sliki 48, $0,03 \leq n_g \leq 0,07$), da vodna masa po retenziji delno ujame konico po strugi, zaradi česar prihaja do dodatnega zvišanja hidrograma po strugi, tj. v izhodnem prerezu. Z večanjem hrapavosti retenzije ta voda vse bolj zamuja in vračanje vodne mase v strugo je manj intenzivno ter se prične v kasnejši fazi hidrograma VV vala, ki potuje po strugi vodotoka (slika 48).

Pri večji hrapavosti retenzije vodostaji na njej naraščajo hitreje, zaradi česar se upočasni razlivanje v retenzijo. Pri določeni vrednosti hrapavosti retenzije (za VV val na sliki 48 je ta vrednost $n_g=0,08$) sta količina in hitrost vodne mase, ki se prelije in potuje po retenziji, še dovolj veliki, da vodna masa ob vračanju v strugo še vedno vpliva na maksimalno vrednost pretoka konice. Na hidrogramu za primer hrapavosti retenzije $n_g=0,08$ je razvidno, da je tok po retenziji tako počasen, da pride val po retenziji do lokacije vračanja v strugo, potem ko je skozi ta odsek že prešla konica vala po strugi. Ker pa sta volumen vodne mase, ki se iz retenzije vrača v strugo, in intenziteta vračanja dovolj velika, pride do drugega vrha hidrograma, ki je v tem primeru višji od prejšnjega.



Slika 48: Preoblikovanje hidrograma ozkega VV vala s konico 3000 m³/s v izhodnem prerezu (R_{sp}) pri spreminjajoči hrapavosti retenzije.

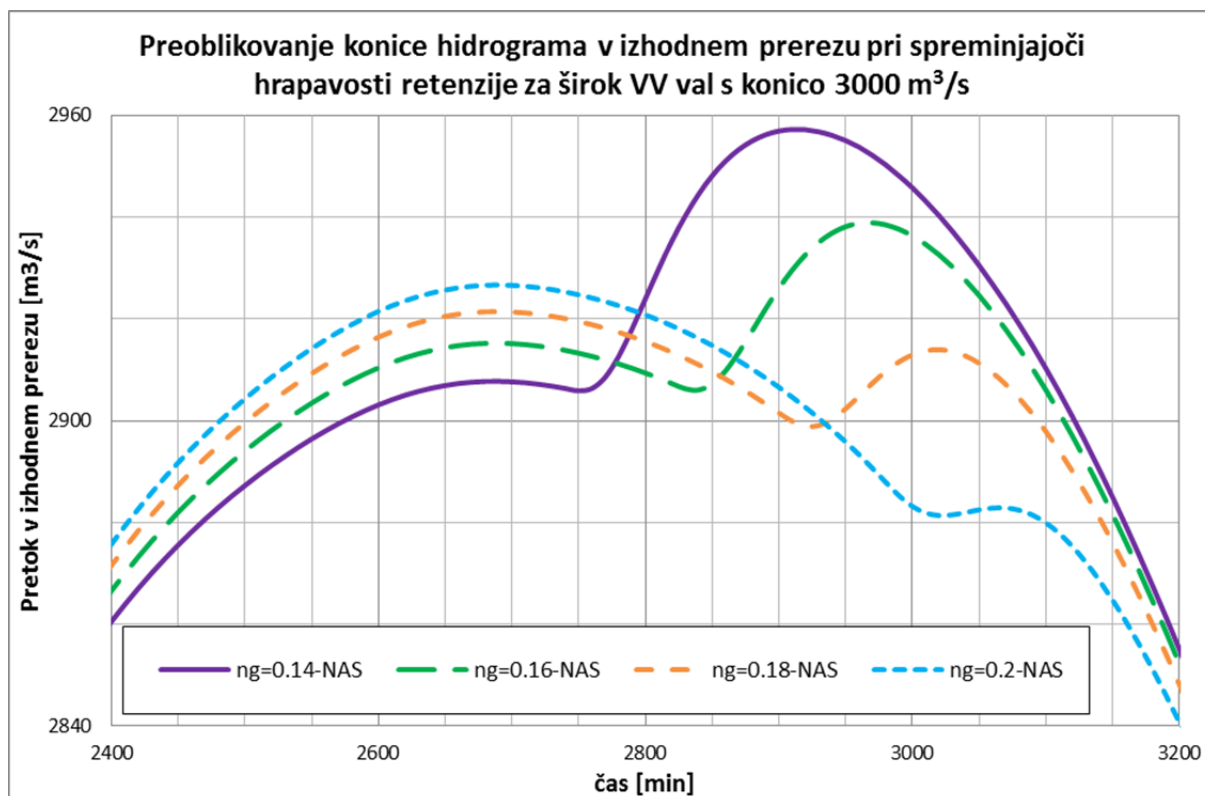
Figure 48: A hydrograph transformation of a narrow HW wave with the peak discharge of 3000 m³/s in the outlet section (R_{sp}) for varied roughness of the retention area.

Pri še večji hrapavosti retenzije (na grafu $n_g \geq 0,1$) se odlivanje na zgornji odprtini dodatno zmanjša, zaradi česar se VV val na tem odseku zniža manj in tudi prevlada v izhodnem profilu. Vodna masa, ki odteka čez retenzijo, vse bolj zamuja za VV valom po strugi, zato voda, ki se vrne iz retenzije v strugo, povzroči le še "trebuh" v padajoči fazi hidrograma.

Pojav dvojnega vrha na hidrogramu pri varianti brez predelne stene ni mogoč, saj se voda prične vračati v strugo takoj, ko je razlika med energijo prereza v strugi in energijskim nivojem na retenziji na strani retenzije. Zaradi zvezne komunikacije vodne mase med strugo in retenzijo v izhodnem prerezu torej ne pride do dveh vrhov.

V prilogah od B.1 do B.8 je za vse VV valove prikazano preoblikovanje hidrograma v izhodnem prerezu (G) pri različni hidravlični hrapavosti retenzije. Za primerjavo sta podani tudi krivulji izhodnega hidrograma za varianto brez predelne stene, in sicer za primer najmanjše in največje vrednosti hrapavosti.

Potovalni čas kaže zelo podobno dinamiko kot znižanje konice. Iz rezultatov analize vpliva hrapavosti retenzije na razlivanje je razvidno, da se potovalni čas izrazito skrajša v fazi, ko je prispevek vodne mase na zvišanje konice premajhen in se pojavi v kasnejši fazi padajoče veje hidrograma ter je tako potovalni čas odraz potovalnega časa konice po strugi. Medtem ko se pri mejnih vrednostih hidravlične hrapavosti n_g , pri katerih se pojavita dva vrhova hidrograma, konica lahko zniža tudi še v primeru, ko je za konico izhodnega hidrograma prevladajoč hidrogram, ki potuje po strugi, pa se potovalni čas že izrazito skrajša. Dogajanje ob lomu krivulj za varianto s predelno steno (slika 47) je opisno s pomočjo slike 49.



Slika 49: Preoblikovanje hidrograma širokega VV vala s konico $3000 m^3/s$ v izhodnem prerezu (R_{sp}) pri spreminjajoči se hrapavosti retenzije.

Figure 49: A hydrograph transformation of a wide HW wave with the peak discharge of $3000 m^3/s$ in the outlet section (R_{sp}) for varied roughness of the retention area.

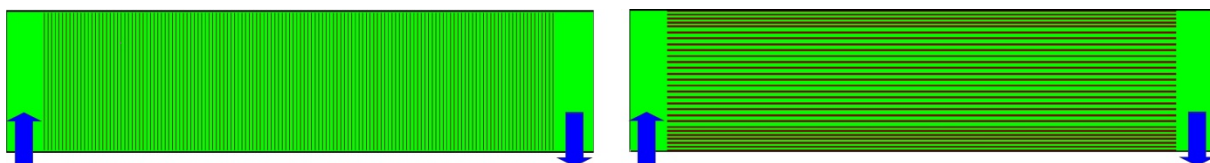
Iz slike 49 je razvidno, da se pri povečanju hidravlične hrapavosti od $n_g=0,14$ na $n_g=0,16$ konica zmanjša, potovalni čas konice pa podaljša. Iz obeh hidrogramov (hidrograma za $n_g=0,14$ in $n_g=0,16$) je razvidno, da na pojav konice vpliva vodna masa, ki se iz retenzije vrača v strugo. Z dodatnim povečanjem hidravlične hrapavosti od $n_g=0,16$ na $n_g=0,18$ pa je tok po retenziji počasnejši, zato pride val po retenziji do lokacije vračanja po tem, ko je skozi ta profil že prešla konica vala po strugi. Vodna masa in hitrost vodnega toka po retenziji sta dovolj velika, da pride do druge konice, a premajhna, da bi bil drugi vrh višji od prvega. Torej pri konici izhodnega hidrograma prevlada hidrogram VV vala, ki potuje po strugi. Ob tem je iz grafa razvidno, da se konica, glede na primer s hrapavostjo retenzije $n_g=0,16$, zniža, potovalni čas pa zaradi prevladujočega hidrograma po strugi izrazito skrajša. S povečanjem hidravlične hrapavosti od $n_g=0,18$ na $n_g=0,2$ se odlivanje še zmanjša, zaradi česar se tudi konica, glede na primer hrapavosti retenzije $n_g=0,18$, zviša. Potovalni čas ostane enak, je pa iz grafa razviden še "trebuh", ki nastane na padajoči veji izhodnega hidrograma in je posledica vračanja vodne mase iz retenzije, ki "zamuja" glede na potovanje konice vzdolž preko struge.

4.2.4 Vpliv lokalno povečane hrapavosti na retenziji na odtočne razmere in preoblikovanje hidrograma

Na podlagi zgornjih poglavij je mogoče ugotoviti, da je ugoden vpliv odtočnih razmer čez retenzijo mogoče doseči z odlivanjem in zadrževanjem dovolj velikih količin vodne mase na retenziji. Ker se zadrževalna funkcija retenzije in možnost sprejetja sekundarne vodne mase delno izključujeta, je največje znižanje konice in podaljšanje potovalnega časa doseženo pri takšni hidravlični hrapavosti retenzije, pri kateri je razmerje med količino odlite vodne mase

in hitrostmi vodnega toka čez retenzijo najugodnejše. Pri izračunih, katerih rezultati so bili prikazani v prejšnjih poglavjih, se je hrapavost retenzije spreminjala enako po celotni retenziji.

Da bi na eni strani s hrapavostjo ugodno vplivali na količino prelite vodne mase na retenzijo, na drugi pa poskušali povečati zadrževalni čas, se je v drugem sklopu izračunov analiziral vpliv različnih variant razporeditve in različnih odstotek površine retenzije s povečano hrapavostjo.

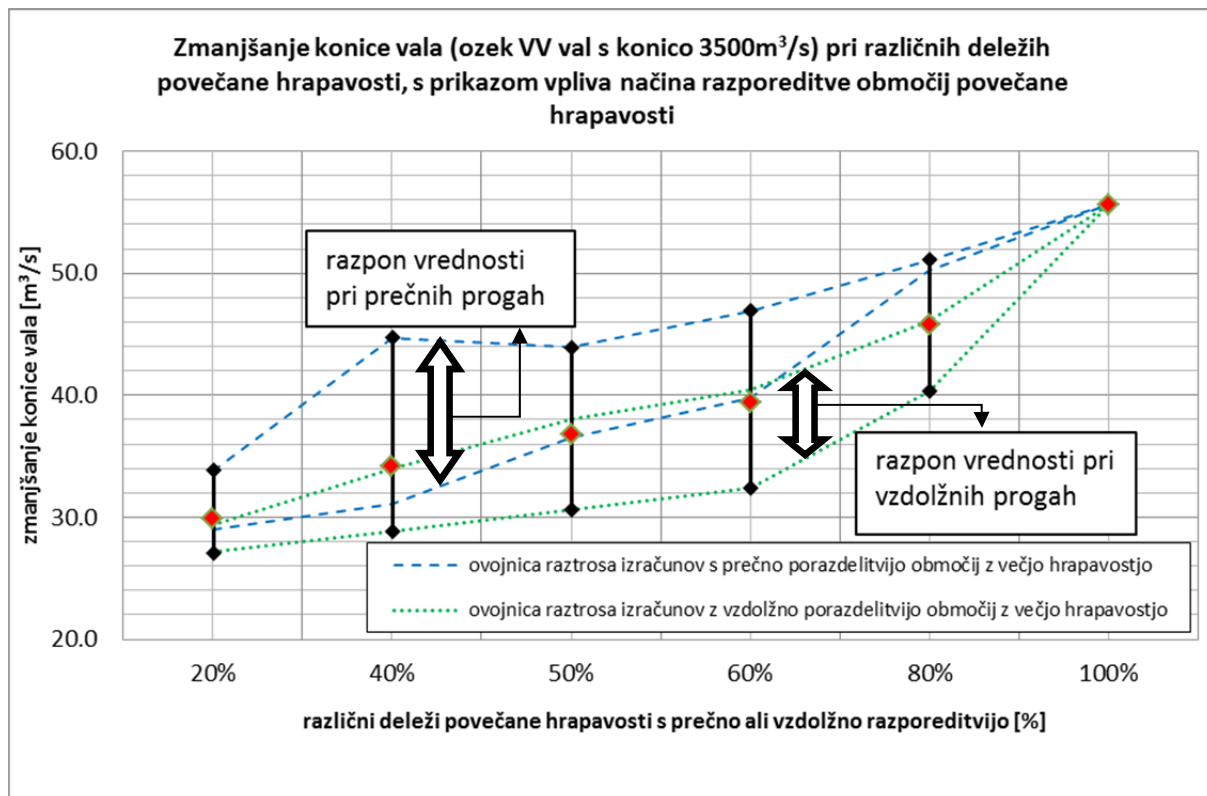


Slika 50: Primer različne razporeditve območij s povečano hrapavostjo za primer s 40% deležem območij s povečano hrapavostjo (zelena $n_g = 0,03$, siva $n_g = 0,1$), (levo – prečni pasovi z večjo vrednostjo koeficienta hrapavosti, desno – vzdolžni pasovi z večjo vrednostjo koeficienta hrapavosti).

Figure 50: An example of different distribution of areas with increased roughness for example with 40% of areas with increased roughness (green $n_g = 0.03$, grey $n_g = 0.1$), (left - transversal strips with higher value of the roughness coefficient, right - longitudinal strips with higher value of the roughness coefficient).

Preverjen je bil vpliv različne prečne in vzdolžne razporeditve območij s povečano hrapavostjo in sicer pri 20-, 40-, 50-, 60-, 80- in 100-odstotnem deležu površine s povečano hrapavostjo. Prav tako se je pri 50-odstotnem deležu preveril še vpliv razporeditve povečane hrapavosti v obliki šahovnice. Da bi dosegli čim večji odliv vodne mase in hkrati povečali zadrževalni čas, je bila analiza izvedena za območje s predelno steno in lokalno povečano hrapavostjo le na transportnem delu retenzije – torej ne na odseku obeh odprtih, kjer naj bolj gladek teren čim bolj olajša tok v retenzijo in vračanje vode v strugo.

Hidravlična analiza pokaže, da ima pri neenakomerni porazdelitvi hidravlične hrapavosti retenzije, dejanska razporeditev pomemben vpliv na odtočne razmere in posledično na preoblikovanje VV vala v izhodnem profilu. Iz slike 51 so razvidni razponi absolutnega znižanja konice ozkega VV vala s konico $3500 \text{ m}^3/\text{s}$ pri različni vzdolžni in prečni razporeditvi območij s povečano hrapavostjo.

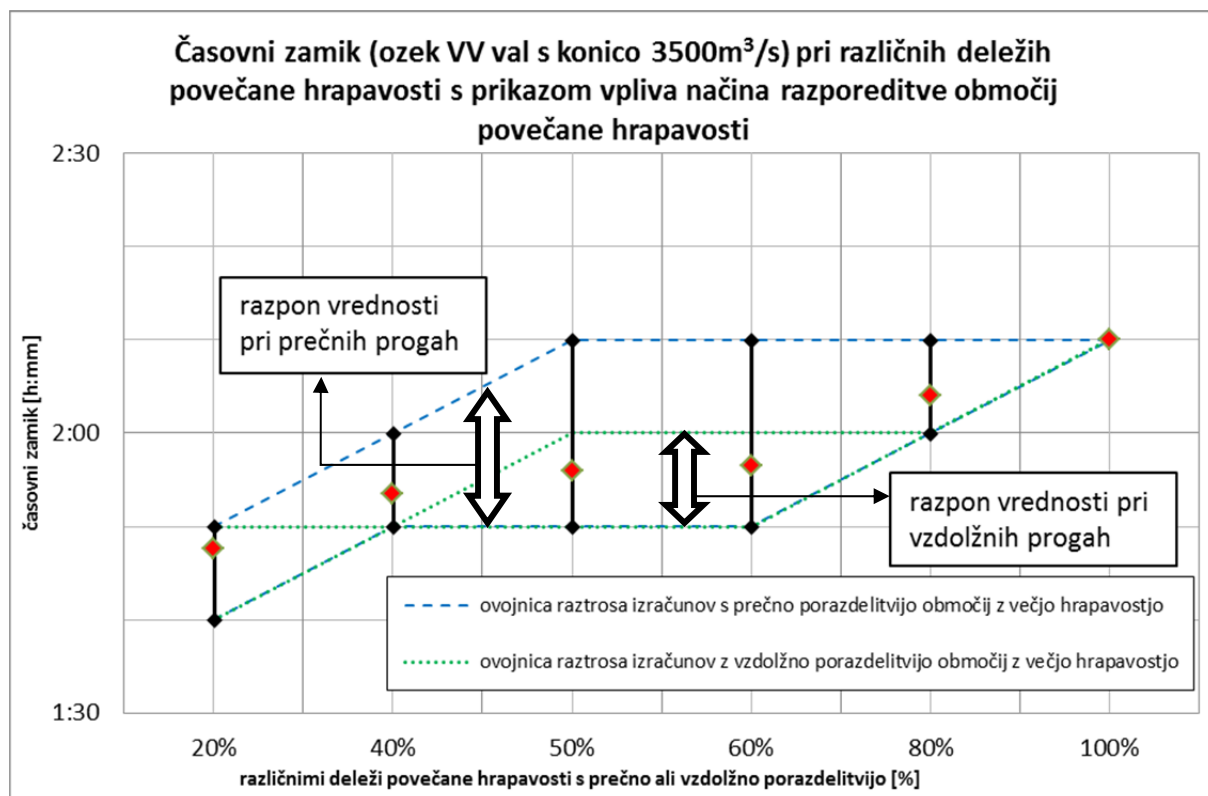


Slika 51: Znižanje konice vala (ozek VV val s konico 3500 m³/s) pri različnih deležih površin s povečano hrapavostjo in pri različni razporeditvi območij s povečano hrapavostjo.

Figure 51: The peak attenuation (a narrow HW wave with the peak discharge of 3500 m³/s) for different proportion of areas with increased roughness and with varied distribution forms of the areas with increased roughness.

Razpon absolutnih vrednosti znižanja konic pri različni razporeditvi je velik, med tem ko so relativne razlike, glede na vrednost konice VV vala, razmeroma majhne. Najugodnejši vpliv je mogoče doseči pri prečno usmerjenih progah z višjo hidravlično hrapavostjo, ki so enakomerno razporejene preko celotnega dela retenzije. Kot je tudi razvidno iz slike 51, je praktično celotna množica vrednosti znižanja konice pri prečni razporeditvi območij s povečano hrapavostjo (ovojnica raztrosa izračunov s prečno porazdelitvijo območij z večjo hrapavostjo) nad množico vrednosti znižanja konice pri vzdolžni razporeditvi. Izračuni kažejo, da je z lokalno povečano hrapavostjo mogoče doseči celo ugodnejši vpliv na znižanje konice, kot v primeru, kjer bi bila za celotno območje uporabljena povprečna vrednost hrapavosti, porazdeljena enakomerno na celotnem območju.

Z večanjem volumna VV vala nad pretočno sposobnostjo struge se, enako kot pri enaki vrednosti hrapavosti za celotno območje, vpliv razporeditve in deleža površin s povečano hrapavostjo na znižanje konice zmanjšuje. Ne glede na odstotek površine s povečano hrapavostjo in vrsto razporeditve je vpliv majhen.



Slika 52: Časovni zamik pri različnih deležih površin s povečano hrapavostjo in pri različni razporeditvi območij s povečano hrapavostjo.

Figure 52: Translation time for the different proportion of areas with increased roughness and with varied distribution of areas with increased roughness.

Kot prikazuje slika 52, se podoben vpliv kaže tudi pri spremembah potovalnega časa konice VV vala preko obravnavanega območja (potovalni čas konice med kontrolnim prerezemom A in G). Večje podaljšanje potovalnega časa se pojavi pri prečno usmerjenih progah s povečano vrednostjo hrapavosti. V prilogah od D.1 do D.6 je za VV valove s konicami 3000 m³/s, 3500 m³/s in 4000 m³/s grafično prikazan razpon vrednosti znižanja konice vala v izhodnem prerezu in dolžina potovalnega časa pri različnih deležih povečane hrapavosti in pri različni razporeditvi območij povečane hrapavosti.

4.2.5 Ugotovitve hidravličnega modeliranja na območju s poenostavljeno geometrijo

V prvem sklopu izračunov je bil z modeliranjem območja s preprosto geometrijo retenzije za ozko in široko obliko VV valov s konicami 2500 m³/s, 3000 m³/s, 3500 m³/s in 4000 m³/s preverjen vpliv spreminjajoče se hrapavosti retenzije v razponu realnih vrednosti koeficienta hrapavosti n_g za poplavna območja ($0,03 \leq n_g \leq 0,2$). Pri tem je bil vpliv preverjen tako za varianti območja modeliranja s predelno steno oziroma brez nje. S predelno steno je bila pri variantni različici omejena komunikacija med strugo in retenzijo na zgornji in spodnji del retenzije, s čimer se je poskušalo povečati zadrževalno sposobnost retenzije. Za varianto s predelno steno se je poleg spreminjajoče se hrapavosti po celotni retenziji analiziral tudi vpliv lokalno povečane hrapavosti. Pri tem so bile upoštevane različne variante razporeditve in različen odstotek površine retenzije s povečano hrapavostjo. Pri vseh scenarijih, ki so bili obravnavani za območje s predelno steno, so bile uporabljene konstantne dimenzije komunikacijskih odprtih (tj. dolžina in višina prelivnega roba iz struge).

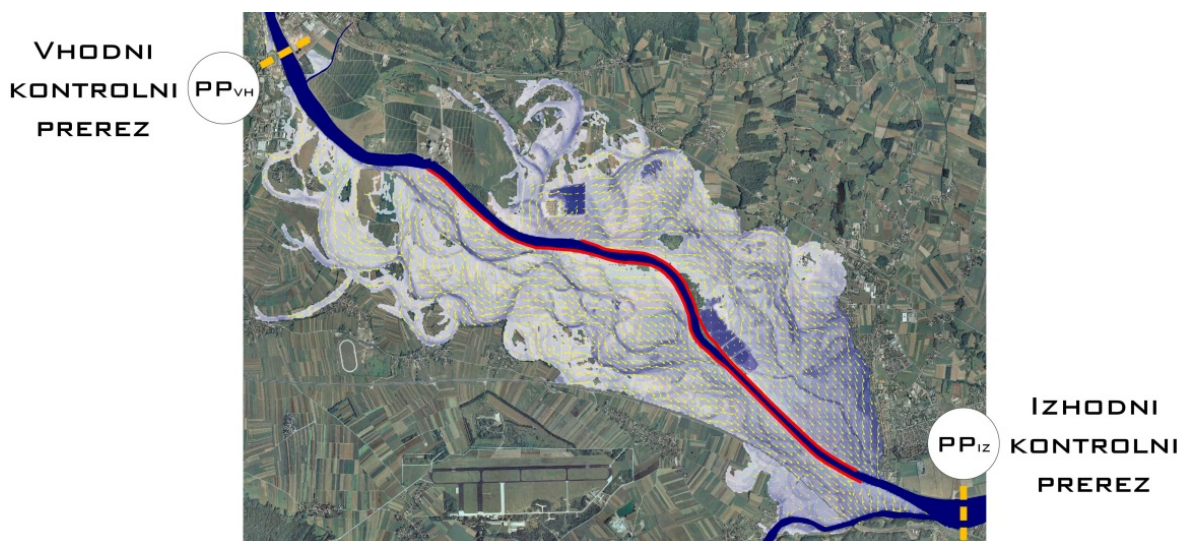
Glavne ugotovitve izračunov in analiz so naslednje:

- Poenostavljena geometrija retenzije je omogočila analizirati dejanski vpliv hrapavosti na potovanje VV valov. Predvsem topografske lastnosti retenzije namreč lahko bistveno spremenijo tokovno sliko in vplivajo na odtočne razmere čez retenzijo.
- Povečana hrapavost retenzije ugodno vpliva na zniževanje konice VV vala in podaljševanje potovalnega časa, vendar pa so vrednosti, gledano v odstotkih glede na konico VV vala, razmeroma majhne.
- Pri ožjih in bolj koničastih VV valovih je vpliv povečanja hrapavosti bolj ugoden.
- Ugoden vpliv povečevanja hrapavosti se pojavi predvsem pri VV valovih z manjšim volumnom nad pretočno sposobnostjo struge.
- S povečano hrapavostjo retenzije se zmanjšujejo količine vode, prelite na retenzijo, kljub temu pa se efektivni retenzijski volumen, ki ugodno vpliva na znižanje konice v izhodnem prerezu, povečuje.
- Kljub manjši količini vode, ki pri večji hrapavosti retenzije doteka v retenzijo, se vodostaji, predvsem zaradi nižjih hitrosti toka, zvišajo, posledično pa to lahko vpliva na večji obseg poplavljenosti. Pri modeliranju območja s poenostavljeno geometrijo je bila retenzija ograjena z vertikalno steno, zato večji obseg poplavljanja ni bil možen, povečal pa se je dvig vodostajev v retenziji, kar je povratno vplivalo na komunikacijo med strugo in retenzijo.
- Z višanjem konic VV valov in večanjem njihovih volumnov nad pretočno sposobnostjo struge se relativni vpliv retenzije zmanjšuje.
- Z ureditvijo lokalne komunikacije vodne mase med strugo in retenzijo, tj. z gorvodnim iztokom na retenzijo in dolvodnim vračanjem iz nje s predelno steno, se zmanjšajo količine vodne mase v inudaciji, hkrati pa je mogoče doseči ugodnejši vpliv na znižanje konice VV vala in potovalni čas VV vala.
- Pri varianti s predelno steno je zaradi različnih hitrosti potovanja VV vala po strugi in po retenziji ter zaradi onemogočene komunikacije med strugo in retenzijo vzdolž osrednjega dela retenzije mogoč pojav dvojnega vrha na hidrogramu v dolvodnem izhodnem prerezu.
- Pri neenakomerni hrapavosti retenzije ima razporeditev območij s povečano hrapavostjo retenzije pomemben vpliv na odtočne razmere v retenziji in posledično na preoblikovanje VV vala v izhodnem profilu.
- Z lokalno povečano hrapavostjo (prečni, vzdolžni pasovi) je moč doseči različno ugoden vpliv, pri čemer se kot najbolj ugodni pokažejo prečni pasovi, enakomerno razporejeni čez celotno retenzijo.
- Glede na primer s povprečno hrapavostjo čez celotni transportni odsek daje uporaba razpršene povečane hrapavosti po celotnem območju zelo majhen vpliv. Torej lahko z lokalno povečano hrapavostjo, s čimer se seveda poveča povprečna hrapavost, doseže enak učinek, kot če bi po celotni površini povečali hrapavost, da bi dosegli enako povprečno hidravlično hrapavost.

Ugotovitve iz rezultatov hidravlične analize na območju modeliranja s poenostavljeno geometrijo so bile v drugi fazi preverjene še na realnem primeru – območju Krško-Brežiškega polja, ki predstavlja pomemben retenzijski prostor Save na tem odseku.

4.3 Vpliv spreminjanja hidravlične hrapavosti na Krško-Brežiškem polju

Analiza vpliva hidravlične hrapavosti na odtočne razmere na poplavnih površinah in posledično na preoblikovanje VV vala vzdolž toka na teoretičnem območju modeliranja s poenostavljeno geometrijo je omogočila spoznavanje delovanja mehanizma, ki pri naravnih vodotokih z obsežnimi retenzijskimi površinami ugodno vpliva na blažitev intenzitete VV valov v izhodnem dolvodnem prerezu. Ker pri naravnih vodotokih lahko na odtočne razmere vplivajo tudi številni drugi parametri in lastnosti območja, predvsem mikro in makro topografske značilnosti, je bila za območje Krško-Brežiškega polja preverjena veljavnost ugotovitev s teoretičnega območja še za izbrano naravno območje in predvsem tudi stopnja vpliva hidravlične hrapavosti. Območje Krško-Brežiškega polja se razteza med mestom Krško in državno mejo z Republiko Hrvaško. Pri hidravlični analizi se je obravnaval le del med Krškim in Brežicami, ki predstavlja pomemben retenzijski prostor na območju Spodnje Save in vpliva na njene odtočne razmere. Na tem območju so bile na nekaterih odsekih z antropogenimi posegi delno spremenjene odtočne razmere, vseeno pa gre večinoma za območja z naravno topografijo. Simulacije poplavnih dogodkov kažejo, da imajo tako antropogeni posegi kot tudi naravne topografske lastnosti območja pomembno vlogo pri polnjenju in praznjenju retenzije ter tudi pri odtočnih razmerah čez retenzijo. Predvsem pri nižjih pretokih vpliv topografije na odtočne razmere presega vpliv rabe prostora. Kot je bilo že navedeno pri opisu scenarijev opravljenih izračunov, se je v prvem sklopu izračunov vrednost koeficienta hrapavosti n_g spreminjala v razponu realnih vrednosti za poplavna območja ($0,03 \leq n_g \leq 0,2$). Pri tem se je v posamezni simulaciji upoštevala enaka vrednost koeficienta hrapavosti n_g za celotno retenzijsko območje. V izračunih so bili upoštevani ozka in široka varianta hidrogramov visokovodnih dogodkov s povratnimi dobami 10 let (konica $2560 \text{ m}^3/\text{s}$), 50 let (konica $3365 \text{ m}^3/\text{s}$) in 100 let (konica $3750 \text{ m}^3/\text{s}$), skupaj torej 6 hidrogramov.



Slika 53: Prikaz lokacij kontrolnih prerezov na območju Krško- Brežiškega polja, v katerih so v nadaljevanju podani hidrogrami.

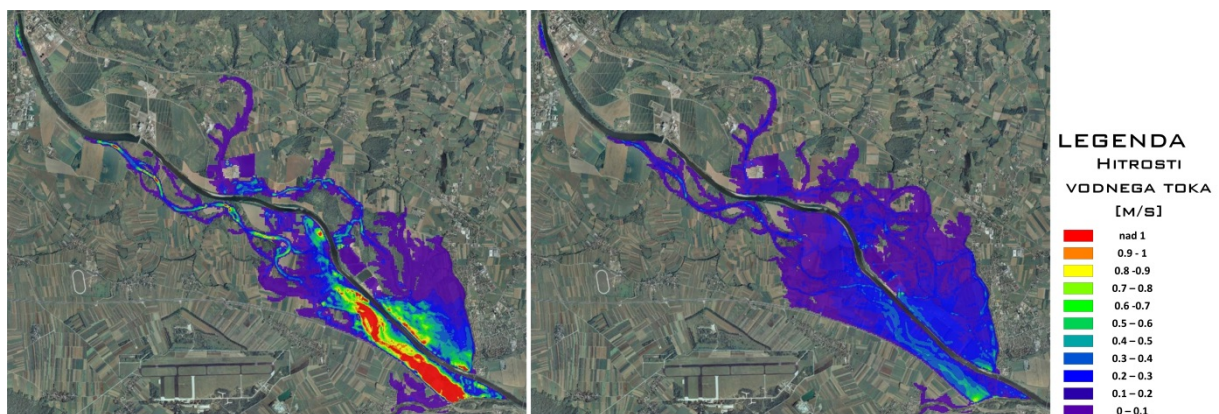
Figure 53: Locations of control sections in which hydrographs are given hereinafter.

V drugem sklopu izračunov se je za vse zgoraj naštetih VV valove z različnimi scenariji preveril še vpliv trenda povečevanja deleža gozdnih površin oz. obratno, trend redčenja gozdnih površin na račun povečevanja deleža kmetijskih površin. Kot izhodišče za primerjavo je bilo vzeto obstoječe stanje, pri čemer so bila območja razdeljena glede na rabo prostora po

parcelah, hrapavost za kmetijske površine je bila v postopku umerjanja določena na $n_g=0,04$, za gozdne površine pa $n_g=0,125$. V fazi preveritve vpliva trendov rabe prostora na odtočne razmere se je preverilo postopno zaraščanje do 100 odstotkov gozdnih površin in obratni trend, širjenje kmetijskih površin prav tako do 100 odstotkov. Enako kot pri rezultatih za območje s poenostavljeno geometrijo oznaka OS označuje varianto brez predlenih sten in NAS varianto s predelnima stenama.

4.3.1 Vpliv spreminjanja hrapavosti na zadrževalno sposobnost poplavnih površin, preoblikovanje VV vala, konico VV vala in njen potovalni čas

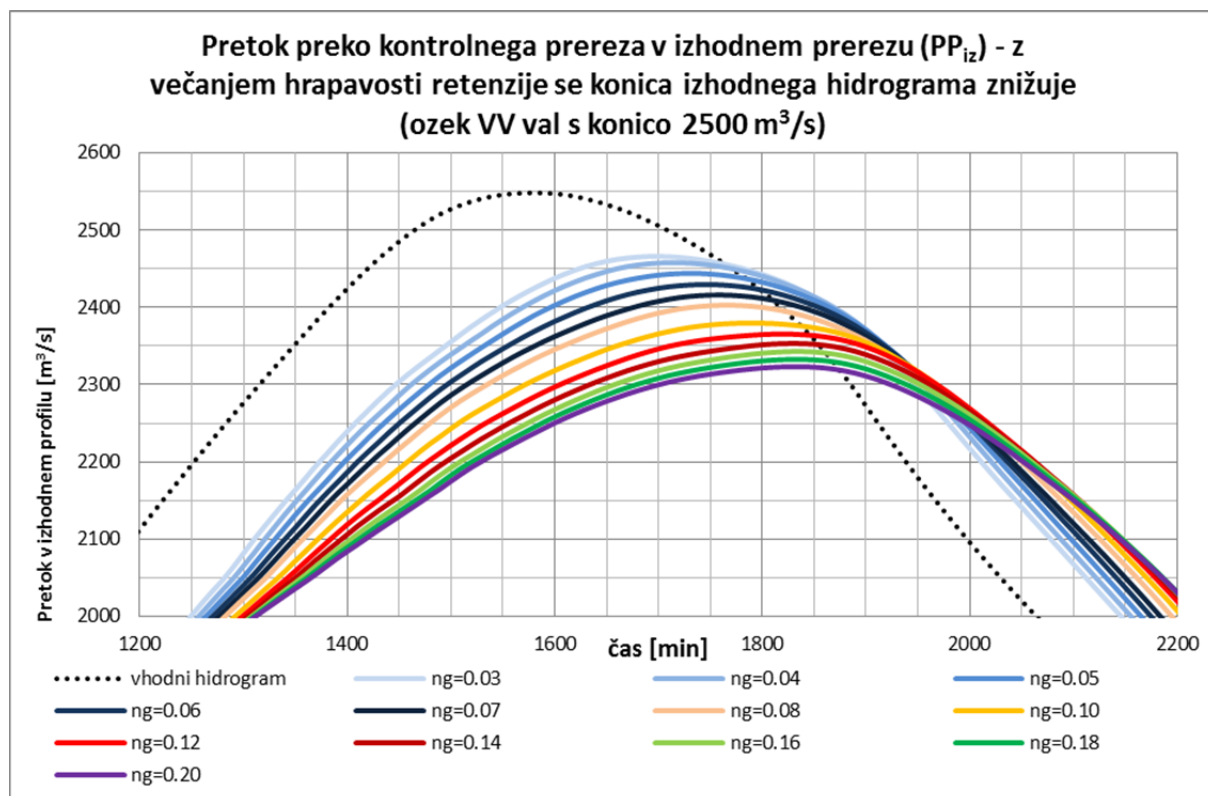
Hidravlična analiza odtočnih razmer na območju Krško-Brežiškem polju kaže, da ima hrapavost retenzije enak vpliv na hitrosti vodnega toka in na vodostaje na retenziji, kot se je pokazal pri območju s poenostavljeno geometrijo. Pri večji hrapavosti retenzije so tako, kljub manjšim količinam vode na retenziji in nižjim hitrostim vodnega toka, vodostaji višji. Pojavljanje višjih vodostajev, kot posledica večje hrapavosti retenzije, je razvidno tudi iz slike 54, kjer je poleg porazdelitve lokalnih hitrosti za ozek VV val s konico $2560 \text{ m}^3/\text{s}$ razviden tudi obseg poplavljenosti - pri večji hrapavosti retenzije se zvišujejo vodostaji, zaradi česar se posledično povečuje obseg poplavljenosti. Zaradi spremenjenega hitrostnega polja se pri spremenjeni hrapavosti delno spremeni tudi prostorska razporeditev poplavljenih območij. Ozek VV val s konico $2560 \text{ m}^3/\text{s}$ ima razmeroma majhen volumen nad pretokom, pri katerem se začne poplavljanje, zato sam volumen retenzije še ni najpomembnejši faktor oblikovanja vodnih tokov v retenziji.



Slika 54: Primerjava maksimalnih hitrosti vodnega toka pri ozkem VV valu s konico $2560 \text{ m}^3/\text{s}$ in različni hrapavosti retenzije (levo – $n_g = 0,03$, desno – $n_g = 0,14$).

Figure 54: A comparison of maximum water stream velocities for a narrow HW wave with the peak discharge of $2560 \text{ m}^3/\text{s}$ and different roughness on the retention area (left – $n_g = 0.03$; right – $n_g = 0.14$).

Čeprav je predvsem pri nižjih VV valovih (tj. v tem delu $Q_{10}=2560 \text{ m}^3/\text{s}$) polnjenje zaradi topografskih značilnosti obravnavanega območja omejeno na spodnji in srednji del retenzije, zaradi česar prihaja večinoma le do razlivanja vodne mase, ne oblikujejo pa se vzporedni tokovi večjih količin vodne mase, ima retenzija ugoden vpliv na znižanje konice in na povečanje potovalnega časa. Slika 55 prikazuje zniževanje konice hidrograma v izhodnem prerezu (PP_{iz}) zaradi povečanja hidravlične hrapavosti v retenziji za ozek VV val s konico $2560 \text{ m}^3/\text{s}$.



Slika 55: Zniževanje konice hidrograma v izhodnem prerezu (PP_{iz}) s povečanjem hidravlične hrapavosti v retenziji (ozek VV val s konico $2560 \text{ m}^3/\text{s}$).

Figure 55: A hydrograph peak attenuation in the outlet section (PP_{iz}) with an increase of hydraulic roughness on the retention areas (a narrow HW wave with the peak discharge of $2560 \text{ m}^3/\text{s}$).

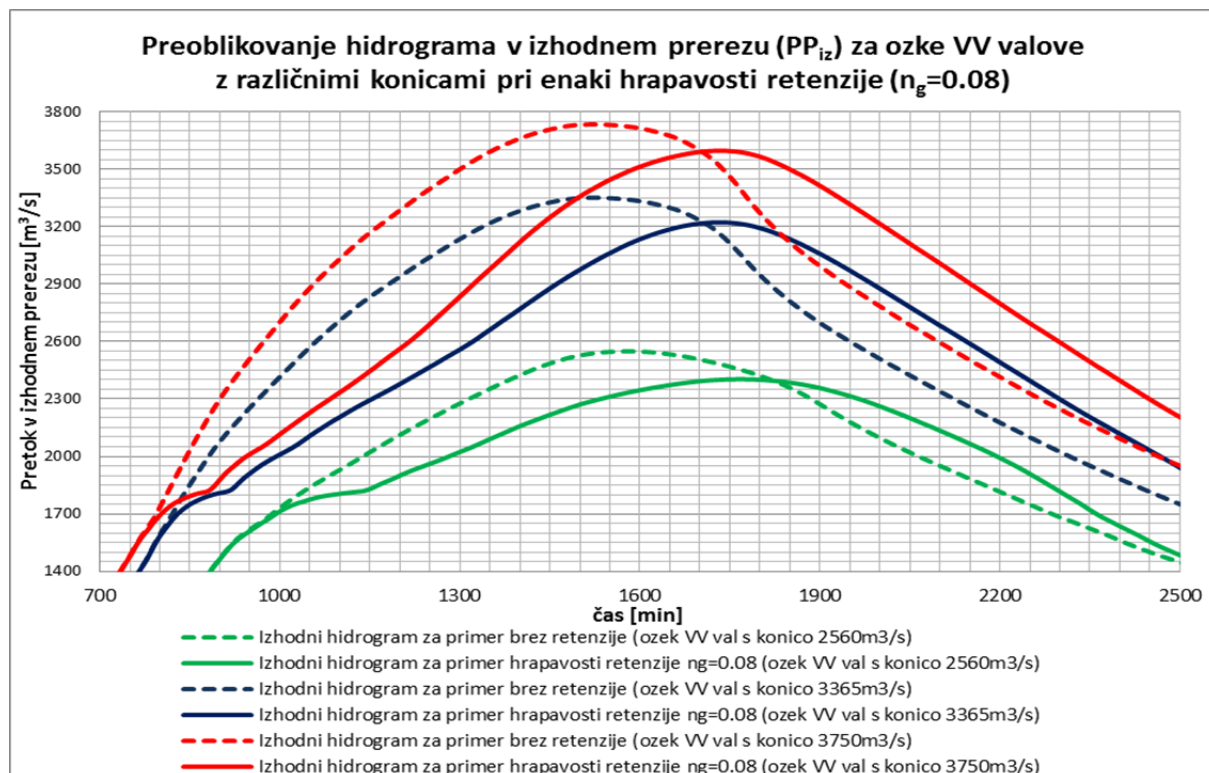
Pri širokem VV valu z enako konico, kot jo ima VV val na sliki 55, tj. $2560 \text{ m}^3/\text{s}$, se s povečanjem hrapavosti zaradi volumna VV vala nad pretočno sposobnostjo struge izhodni hidrogram preoblikuje nekoliko drugače. Pri povečanju hidravlične hrapavosti retenzije v razponu od $n_g=0,03$ do $n_g=0,05$ se namreč konica hidrograma v izhodnem prerezu (PP_{iz}) znižuje, od $n_g=0,06$ do $n_g=0,08$ pa se ponovno pojavlja zvišanje konice. Pri hrapavosti večji od $n_g=0,08$ se ponovno pojavi trend zniževanja konice pri večanju hrapavosti retenzije. V prvem intervalu povečevanja hrapavosti (od $n_g=0,03$ do $n_g=0,05$) je zniževanje konice v izhodnem prerezu (PP_{iz}) posledica upočasnjevanja toka vode po retenziji. Pri razponu hrapavosti od $n_g=0,06$ do $n_g=0,08$ se razmerje med količino vode, odlite v retenzijo, in zamikom potovanja vala po retenziji negativno odraža v zvišanju konice. Pri višji hrapavosti retenzije pa zadrževanje vodne mase zaradi nizkih hitrosti vode pretehta nad količino odlite količine vode in se začne konica v izhodnem prerezu (PP_{iz}) ponovno zniževati (opomba v preglednici ***). Grafični prikaz preoblikovanja hidrograma v izhodnem prerezu (PP_{iz}) je podan v prilogi E.2. Potovalni čas se v celem naraščajočem spektru hrapavosti povečuje, in sicer do 75 odstotkov časa pri najmanjši upoštevani hrapavosti retenzije ($n_g=0,03$). V preglednici 3 so na lokaciji izhodnega prereza (PP_{iz}) za posamezne VV valove podane absolutne vrednosti znižanja konice, v odstotkih pa podane vrednosti znižanja konice glede na konico vhodnega hidrograma in glede na znižanje konice pri hidravlično najbolj gladki retenziji ($n_g=0,03$).

Preglednica 3: Znižanje konice za posamezne VV valove v izhodnem prerezu – primerjava je podana v absolutnih vrednostih, v odstotkih glede na konico vhodnega hidrograma (*) in glede na znižanje konice pri hrapavosti retenzije $n_g = 0,03$ (**).

Table 3: A peak attenuation for all the HW waves in the outlet section – a comparison is given in the absolute values, in the percentage according to the peak discharge of the inlet hydrograph (*) and according to the peak attenuation for the hydraulic roughness of the retention area $n_g = 0.03$ (**).

	znižanje konice, ko se n_g spreminja od 0,03 do 0,2			
	[m ³ /s]	[%] (max) (*)	[%] (max) (**)	opomba
ozek VV Q2560 m ³ /s	94 → 237	9,2	152	večja hrapavost, večje znižanje konice
širok VV Q2560 m ³ /s	44 → 60 → 52 → 82	3,2	86	***
ozek VV Q3365 m ³ /s	97 → 262	7,8	171	večja hrapavost, večje znižanje konice
širok VV Q3365 m ³ /s	22 → 71	2,1	218	večja hrapavost, večje znižanje konice
ozek VV Q3750 m ³ /s	102 → 289	7,7	184	večja hrapavost, večje znižanje konice
širok VV Q3750 m ³ /s	17 → 87	2,3	405	večja hrapavost, večje znižanje konice
*	primerjava glede na primer brez retenzije			
**	primerjava glede na primer OS variante modela, z najmanjšo vrednostjo hrapavosti n_g retenzije ($n_g=0,03$)			
***	opis v tekstu			

Tokovna slika kaže, da se pri višjih VV valovih (Q_{50} in Q_{100}) retenzija v večjem obsegu aktivira tudi v zgornjem delu, odlita vodna masa pa odteka čez retenzijo z vzporednimi tokovi. Pri odtekanju vodne mase čez retenzijo se pojavlja enak vpliv povečane hrapavosti retenzije kot pri ozkem VV valu s konico 2560 m³/s.



Slika 56: Preoblikovanje hidrograma v izhodnem prerezu (PP_{iz}) za ozke VV valove z različnimi konicami pri enaki hrapavosti retenzije ($n_g = 0,08$).

Figure 56: A hydrograph transformation in the outlet section (PP_{iz}) for a narrow HW waves with different values of the peak discharge at constant roughness ($n_g = 0.08$).

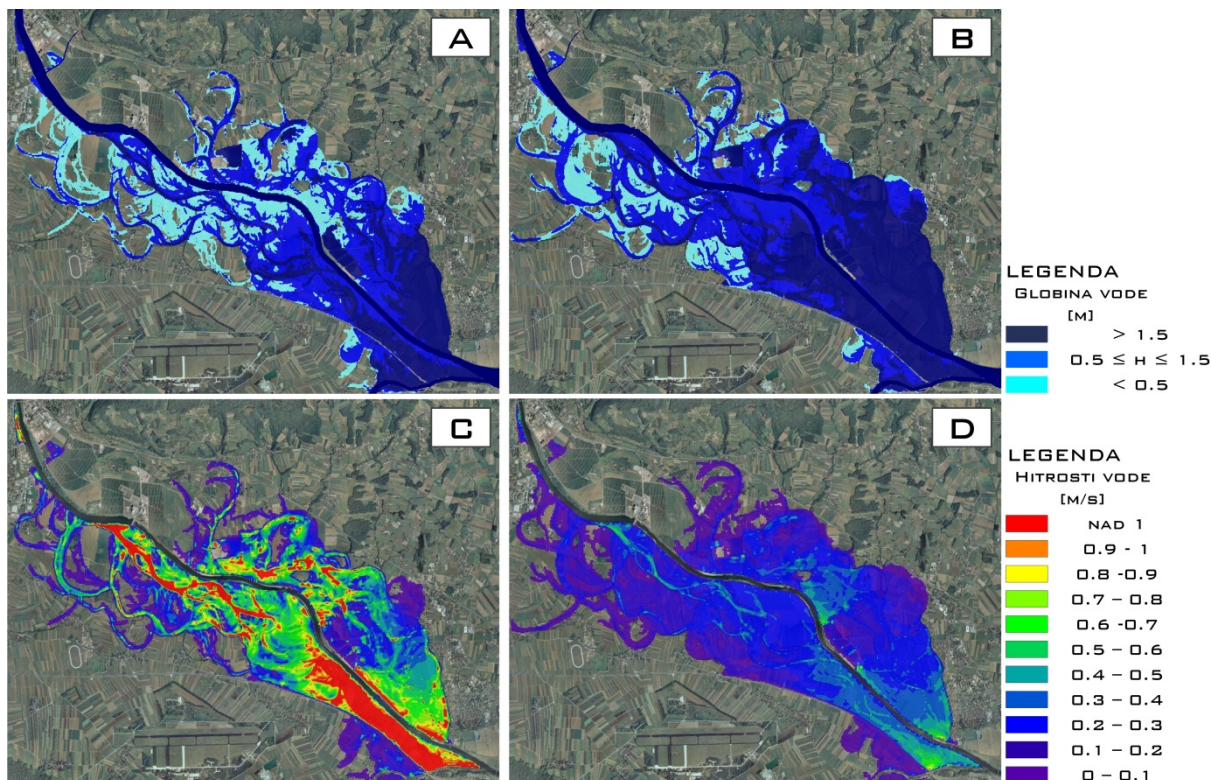
Z večanjem hidravlične hrapavosti se zmanjšujejo hitrosti vodnega toka, zaradi česar voda po retenziji odteka počasneje, gladine vode pa so tako zaradi nižjih hitrosti vode, kot tudi zaradi zajeznega vpliva gladin vode dolvodno, višje. Posledično se odtok vodne mase na retenzijo zmanjšuje, povečuje pa se zadrževalna sposobnost retenzije, zaradi česar se povečuje potovalni čas konice, pretok konice v izhodnem prerezu (PP_{iz}) pa se zmanjšuje. Kot je razvidno iz preglednice 3, za ozko varianto VV valov pa tudi iz slike 56 je znižanje konice v absolutnih vrednostih za posamezno varianto VV vala (ozka oz. široka varianta) pri vseh treh povratnih dobah zelo podobno, vendar pa se relativno znižanje konice z večanjem VV vala zmanjšuje.

S povečevanjem hrapavosti retenzije se spreminjajo odtočne razmere v retenziji, prihaja do zniževanja hitrosti vodnega toka, višjih vodostajev in delno spremenjene prostorske razporeditve poplavljenih območij. Ker se zaradi sprememb hidravličnih parametrov neposredno spreminja bilanca površin s poplavno nevarnostjo, je v naslednjem poglavju opisan vpliv povečanja hidravlične hrapavosti na poplavno nevarnost na obravnavanem območju.

V prilogah od E.1 do E.6 je za vse obravnavane VV valove prikazano preoblikovanje hidrogramov VV valov v izhodnem prerezu pri različni hrapavosti retenzije. V prilogah od F.1 do F.4 so za vse VV valove pri različni hrapavosti retenzije tabelarično prikazane vrednosti znižanja konice in gladine v izhodnem prerezu, potovalnega časa, površine poplavljenega območja, povprečne vrednosti hitrosti in globin. Za VV val Q_{100} pa so podane tudi velikosti poplavljenih površin v celoti in po posameznih razredih po 1. kriteriju Pravilnika in velikost območja poplavljenih površin s hitrostmi vodnega toka nad 1 m/s.

4.3.2 Vpliv spreminjanja hidravlične hrapavosti na poplavno nevarnost

Pri obravnavanju poplavne nevarnosti je treba upoštevati tako kriterij obsega poplavnih voda kot tudi kriterij intenzitete poplavnih dogodkov. Spreminjanje hidravlične hrapavosti retenzije se odraža pri obeh kriterijih. Povečanje hrapavosti retenzije vpliva na povečanje trenjskih izgub, zaradi česar se hitrosti vodnega toka zmanjšajo, vodostaji pa zvišajo. Na ravninskih območjih višji vodostaji vplivajo predvsem na povečanje dosega poplavnih voda, pri območjih z izrazito topografsko spremembo (brežine, protipoplavni nasipi itd.) pa na globine vode v retenziji. Globine vodnega toka lahko interpretiramo kot merilo za obsežnost dogodka. Kot merilo za intenziteto dogodka pa lahko upoštevamo hitrosti vodnega toka, ki so prav tako neposredno odvisne od hrapavosti ostenja. V nadaljevanju je podan vpliv hidravlične hrapavosti retenzije na poplavno nevarnost, ki je bil obravnavan na dva načina. Za vse računske primere so bile obravnavane površine poplavljenih območij in povprečne globine, za VV valova s 100-letno povratno dobo pa tudi razvrstitev poplavljenega območja po razredih Pravilnika za izdelavo KPN. Ker naj bi se z vplivom retenzijske površine znižala konica VV valov v izhodnem prerezu, posledično pa tudi povečevala poplavna varnost dolvodnih območij, se je preveril vpliv hidravlične hrapavosti retenzije na vodostaje v izhodnem prerezu obravnavanega območja (PP_{iz}).



Slika 57: Primerjava razredov poplavne nevarnosti po 1. kriteriju Pravilnika (zgoraj) in polja hitrosti (spodaj), kot podatek za 2. kriterij, za različno hrapavost retenzije (levo – $n_g = 0,03$; desno – $n_g = 0,14$). Ozek VV val Q_{100} s konico $3750 \text{ m}^3/\text{s}$.

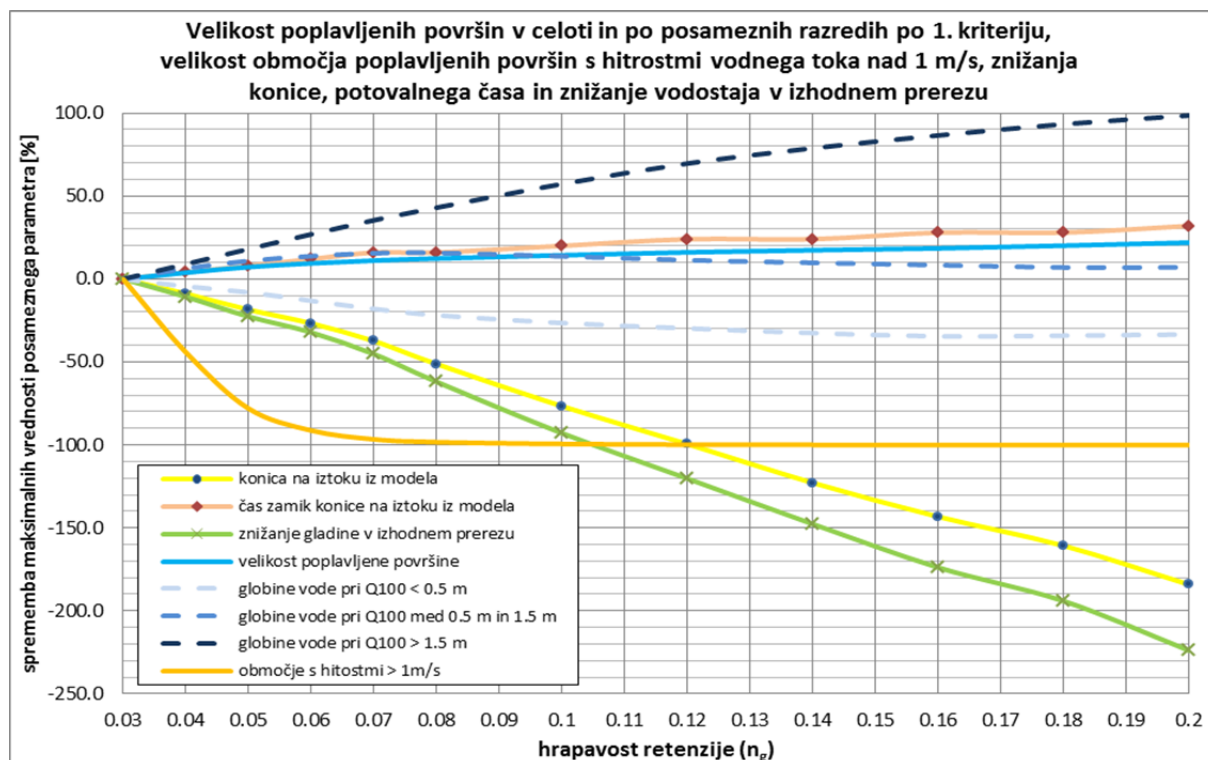
Figure 57: A comparison of flood hazard classes for the 1. criterion of the rules on methodology for determination of hazard areas (MOP, 2007) (above) and field of velocities (below), as the information for the 2. Criterion, for the different roughness of the retention area (left – $n_g = 0,03$; right – $n_g=0,14$) (a narrow HW wave Q_{100} with the peak discharge of $3750 \text{ m}^3/\text{s}$).

Iz zgornje matrike slik (slika 57) je za ozek VV val s konico $3750 \text{ m}^3/\text{s}$ razvidno, da se površina poplavljenih območij z večanjem hrapavosti povečuje, spreminja pa se tudi obseg oz. prostorska razporeditev poplavljenih območij. Medtem ko nekaterih območij (npr. slepi rokavi) voda zaradi velike hrapavosti ne doseže, pa je obseg poplavljenosti večji na območjih glavnih vodnih poti. Območje poplavljenosti se pri izbranem razponu hidravlične hrapavosti za ozek VV val s konico $3750 \text{ m}^3/\text{s}$ poveča do cca. 22 odstotkov. S pomočjo barvne skale razredov globin vode na retenziji je prikazano tudi povečanje območij z globinami vode, večjimi od 1,5 m, kar po Pravilniku (MOP, 2007) predstavlja veliko nevarnost. Delež takšnih območij se tako pri ozkem kot tudi pri širokem VV valu Q_{100} poveča za cca. 100 odstotkov, glede na primer, kjer je hrapavost retenzije $n_g=0,03$. Odstotek površin z globinami med 0,5 m in 1,5 m ostaja praktično nespremenjen, odstotek območij z globinami vode, manjšimi od 0,5 m, pa se celo zmanjša. Zmanjševanje površin z globinami vode manjšimi od 0,5 m na račun povečevanja površin z večjimi globinami se kaže kot vpliv lastnosti topografije območja.

Pri nizki hrapavosti retenzije ($n_g=0,03$) pa se nasprotno pojavljajo velike hitrosti vodnega toka po retenziji. Kot je razvidno iz primera C in D na sliki 57 se hitrostno polje s povečanjem hidravlične hrapavosti bistveno spremeni. Pri obeh VV valovih Q_{100} se pri hidravlični hrapavosti retenzije $n_g=0,03$ na cca. 13 odstotkov poplavljenih površin pojavljajo hitrosti vodnega toka, ki so večje od 1 m/s. S povečanjem hidravlične hrapavosti iz $n_g=0,03$ na $n_g=0,06$ pa je odstotek površin s hitrostmi vodnega toka nad 1 m/s manjši od 1 odstotka. Slika 58 prikazuje odvisnost velikosti poplavljenih površin v celoti in po posameznih razredih po 1.

kriteriju Pravilnika, velikost območja poplavljenih površin s hitrostmi vodnega toka nad 1 m/s, ter tudi znižanja konice, potovalnega časa in znižanje vodostaja v izhodnem prerezu (PP_{iz}). Primerjava je izdelana za primer hrapavosti retenzije $n_g=0,03$.

V prilogah od H.1 do H.12 je za vse obravnavane VV valove grafično prikazano spreminjanje obsega poplavljenosti, polja globin in polja hitrosti pri hrapavosti retenzije $n_g=0,03$, $n_g=0,08$ in $n_g=0,14$.



Slika 58: Odvisnost velikosti poplavljenih površin v celoti in po posameznih razredih po 1. kriteriju Pravilnika, velikosti območja poplavljenih površin s hitrostmi vodnega toka nad 1 m/s, znižanja konice vala, potovalnega časa in znižanje vodostaja v izhodnem prerezu (PP_{iz}) od hrapavosti retenzije (ozek VV val Q_{100} s konico $3750 \text{ m}^3/\text{s}$).

Figure 58: A dependence of the extent of flooded areas in total and in each class according to the 1. criterion of the rules on methodology for determination of hazard areas (MOP, 2007), the extent of the flooded areas with the stream velocities above 1 m/s, the peak attenuation, the propagation time and a decrease of water surface elevation in the outlet section (PP_{iz}) of roughness of the retention area (a narrow HW wave Q_{100} with the peak discharge of $3750 \text{ m}^3/\text{s}$).

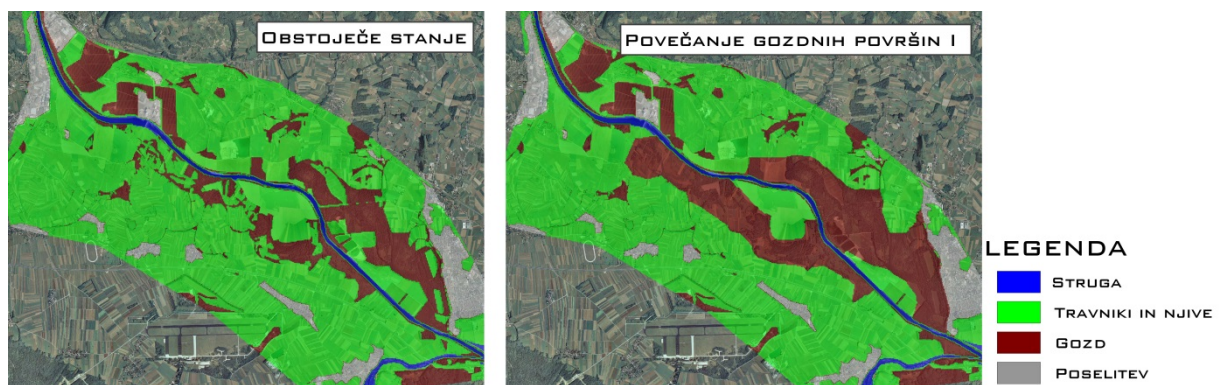
Analizirano je bilo tudi spreminjanje vodostaja v izhodnem prerezu (PP_{iz}) kot merilo izboljšanja poplavne varnosti na območjih dolvodno. Znižanje vodostaja v izhodnem prerezu je neposredno povezano z znižanjem konice v tem prerezu in tudi od same oblike kontrolnega prereza. Na obravnavanem območju je izhodni prerez lociran med protipoplavnimi nasipi na območju term Čatež. Ker gre torej za prerez z izrazito topografsko spremembo na obeh robovih (zgrajeni protipoplavni nasipi), je znižanje vodostaja kot posledice nižje konice VV vala bolj izrazito, kot bi bilo v primeru kontrolnega prereza, ki bi segal čez ravninska poplavna območja. Kljub temu pa so absolutne vrednosti znižanja vodostaja razmeroma majhne. Absolutne vrednosti znižanja konice so pri vseh treh ozkih VV valovih praktično enake in se gibljejo med 100 in $260 \text{ m}^3/\text{s}$. Zaradi oblike izhodnega prereza (izrazita topografska sprememba na obeh robovih) je približno enako tudi znižanje vodostaja v izhodnem prerezu in je pri najugodnejšem primeru reda velikosti 20 cm. Če znižanje

vodostajev v izhodnem prerezu primerjamo z dvigom vodostajev v retenziji, kjer je bila povečana hrapavost, ugotovimo, da je znižanje vodostajev v izhodnem prerezu majhno. Dvig vodostajev v retenziji je v primerjavi z znižanjem vodostajev v izhodnem prerezu namreč za faktor 3- do 4-krat večji (tj. od 60 do 80 cm). Enaka dinamika je opazna tudi pri širokih VV valovih, vendar pa je pri teh VV valovih zaradi dolžine trajanja tako znižanje konice izhodnega hidrograma zaradi povečanja hrapavosti retenzije kot tudi posledično znižanje vodostaja v izhodnem prerezu zelo majhno, cca. 5 cm.

V prilogah od F.1 do F.4 so za vse VV valove pri različni hrapavosti retenzije tabelarično podane velikosti površin poplavljenih območij, povprečne vrednosti hitrosti in globin. Za VV val Q_{100} so podane tudi velikosti poplavljenih površin v celoti in po posameznih razredih po 1. kriteriju Pravilnika, velikost območja poplavljenih površin s hitrostmi vodnega toka nad 1 m/s.

4.3.3 Vpliv povečanja oziroma zmanjšanja deleža kmetijskih površin na zadrževalno sposobnost poplavnih površin, preoblikovanje VV vala, konico VV vala in njen potovalni čas

V drugem sklopu izračunov se je preveril vpliv spreminjanja obstoječega razmerja med gozdom in kmetijskimi površinami. Praktično celotno območje, ki je poplavljen pri VV valovih, upoštevanih v hidravlični analizi, je namreč namenjeno kmetijskim in z gozdom poraslim površinam. V analizi je bil preverjen vpliv trenda postopnega zaraščanja površin z gozdom (vse do 100-odstotnega deleža gozdnih površin) in trend širjenja kmetijskih površin (tj. odstranjevanje lesne zarasti), prav tako do 100-odstotnega deleža.



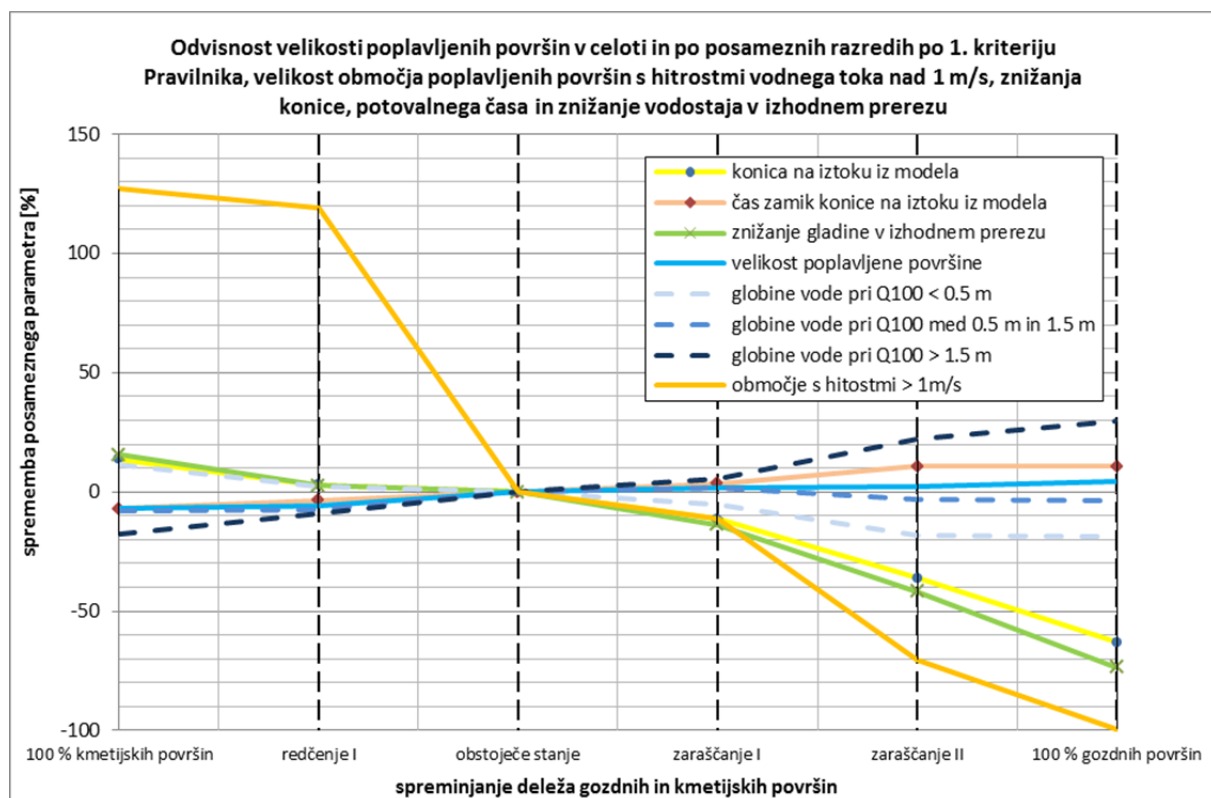
Slika 59: Prikaz primera postopnega zaraščanja kmetijskih površin in s tem povečanja hrapavosti retenzije, kot je bilo upoštevano v izračunih.

Figure 59: An example of a gradual overgrowing on agricultural areas and an increasing of roughness of the retention area, as it was considered in the calculations.

Pri analizi vpliva lokalno povečane hrapavosti na območju modeliranja s preprosto geometrijo je bilo ugotovljeno, da se vpliv lokalno povečane hrapavosti spreminja tako pri različni prečni in vzdolžni razporeditvi, kot tudi z odstotkom deleža celotne površine, na kateri je hrapavost povečana. Pokaže se, da se z lokalno povečano hrapavostjo doseže podoben vpliv na znižanje konice kot v primeru, kjer bi bila za celotno območje uporabljena povprečna vrednost hrapavosti. Glede na to, da analiziran proces zaraščanja oz. redčenja za primer iz prakse ni bil formiran v pravilne (prečne ali vzdolžne) oblike, temveč je bil izveden glede na trenutno razporeditev gozdnih in kmetijskih površin, se je glede na parcelne meje spreminjala povprečna hrapavost retenzije. Pri scenarijih povečevanja deleža gozdnih površin so bila

najprej spremenjena manjša območja znotraj obstoječih gozdnih površin, razdrobljeno območje gozdnih površin pa se je združilo v strnjena območja. Slika 59 prikazuje primer zaraščanja kmetijskih površin z gozdom.

Analiza povečanja oz. manjšanja deleža gozdnih površin glede na obstoječe stanje kaže enak trend, kot je bil opazen pri povečevanju hrapavosti po celotnem območju. Kadar se z zaraščanjem povečuje delež gozdnih površin, za katerega je bila v postopku umerjanja določena večja hrapavost, se s tem povečuje povprečna hrapavost retenzije, hitrosti vodnega toka se zmanjšujejo, posledično pa se povečuje zadrževalna sposobnost retenzije. Večja zadrževalna sposobnost se odraža v znižanju konice v izhodnem profilu in daljšem potovalnem času konice. Prav tako se zaradi višjih vodostajev v retenziji poveča obseg poplavljenosti.

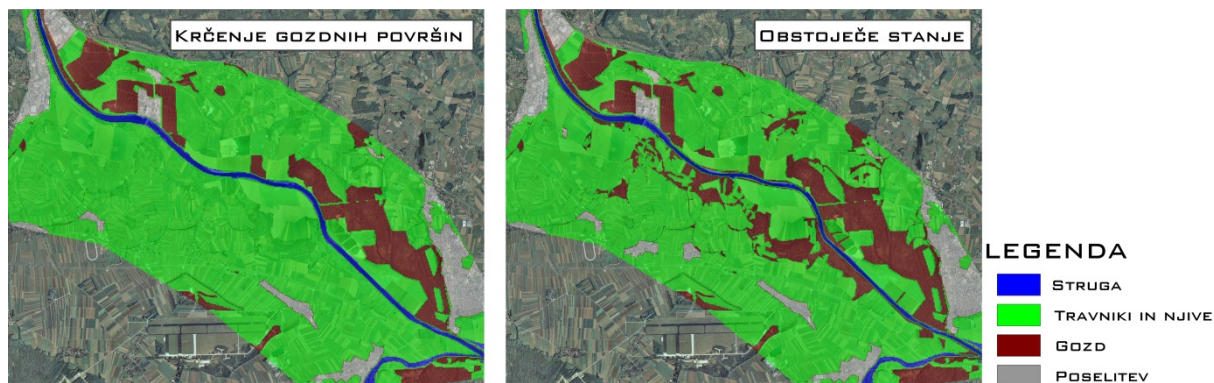


Slika 60: Odvisnost velikosti poplavljenih površin v celoti in po posameznih razredih po 1. kriteriju Pravilnika, velikosti območja poplavljenih površin s hitrostmi vodnega toka nad 1 m/s, znižanja konice vala, potovalnega časa in znižanje vodostaja v izhodnem prerezu (PP_{iz}) glede na spreminjanje deleža kmetijskih in gozdnih površin (ozek VV val Q_{100} s konico $3750 \text{ m}^3/\text{s}$).

Figure 60: A dependence of the extent of flooded areas in total and in each classes according to the 1. criterion of the rules on methodology for determination of hazard areas (MOP, 2007), the extent of the flooded areas with the stream velocities above 1 m/s, the peak attenuation, the propagation time and a decrease of water surface elevation in the outlet section (PP_{iz}) of changing the proportion of the agricultural and forest areas (a narrow HW wave Q_{100} with the peak discharge of $3750 \text{ m}^3/\text{s}$).

Kot je razvidno iz slike 60, se s povečevanjem deleža gozdnih površin in s tem višanjem hidravlične hrapavosti povečuje zadrževalna sposobnost retenzije, zaradi česar se zniža konica v izhodnem profilu, potovalni čas konice pa se podaljša. Zaradi višjih vodostajev v retenziji se obseg poplavljenosti glede na obstoječe stanje poveča. Tudi površine razredov KPN za 1. kriterij se spreminjajo enako, in sicer se s povečanjem deleža gozdnih površin skupna površina območij z globinami nad 1,5 m povečuje. Odstotek površin z globinami med 0,5 m

in 1,5 m ostaja praktično nespremenjen, odstotek območij z globlinami vode manjšimi od 0,5 m pa se celo zmanjša. Enako kot v primeru spreminjanja konstantne hrapavosti po celotnem območju, gre zmanjševanje površin z globlinami vode manjšimi od 0,5 m na račun povečevanja površin z večjimi globlinami pripisati topografskim lastnostim območja. S povečanjem gozdnih površin, s čimer se poveča povprečna hrapavost retenzije, se zmanjšujejo tudi hitrosti vodnega toka.



Slika 61: Primer postopnega povečevanja deleža kmetijskih površin in posledičnega zmanjšanja hrapavosti retenzije, kot je bilo upoštevano v izračunih.

Figure 61: An example of gradual increase of the proportion of the agricultural areas and the consecutive decrease of the roughness of the retention area, as it was considered in the calculations.

Preglednica 4 podaja vpliv zaraščanja oz. redčenja na posamezne parametre glede na obstoječe stanje rabe prostora za ozek VV val s konico 3750 m³/s.

Preglednica 4: Spreminjanje analiziranih parametrov v procesu povečevanja oz. zmanjševanja deleža kmetijskih površin glede na obstoječe stanje (ozek VV val Q_{100} s konico 3750 m³/s).

Table 4: Changing of analyzed parameters in process of increasing or decreasing of the extent of agricultural areas proportion according to current state (narrow HW wave Q_{100} with the peak discharge 3750 m³/s).

	ozek VV val $Q_{100}=3750\text{m}^3/\text{s}$					
	100 % kmetijskih površin	redčenje I	obstoječe stanje	zaraščanje I	zaraščanje II	100 % gozdnih površin
znižanje konice	- 13,7 %	- 2,9 %	128 m³/s	+ 11,3 %	+ 36,1 %	+ 63,0 %
potovalni čas konice	- 7,1 %	- 3,6 %	280 min	+ 3,6 %	+ 10,7 %	+ 10,7 %
znižanje gladine v izhodnem prerezu	+ 15,5 %	+ 2,7 %	0,11 m	- 13,6 %	- 41,8 %	- 73,6 %
velikost poplavljene površine	- 6,8 %	- 5,7 %	19,1 m²	+ 1,6 %	+ 2,2 %	+ 4,5 %
globine vode < 0,5 m	+ 11,2 %	+ 2,5 %	4,5 m²	- 5,0 %	- 18,1 %	- 18,9 %
globine vode med 0,5 m in 1,5 m	- 7,7 %	- 7,5 %	7,8 m²	+ 1,9 %	- 3,3 %	- 3,9 %
globine vode > 1,5 m	- 17,9 %	- 9,1 %	6,8 m²	+ 5,7 %	+ 22,1 %	+ 29,7 %
območje s hitrostmi > 1 m/s	+ 127,0 %	+ 118,9 %	0,6 m²	- 11,3 %	- 70,3 %	- 99,3 %
povprečna globina vode na retenziji	- 12,8 %	- 6,7 %	1,5 m	+ 4,0 %	+ 14,0 %	+ 19,6 %
povprečne hitrosti vode na retenziji	+ 16,9 %	+ 9,6 %	0,4 m/s	- 8,8 %	- 27,3 %	- 38,5 %

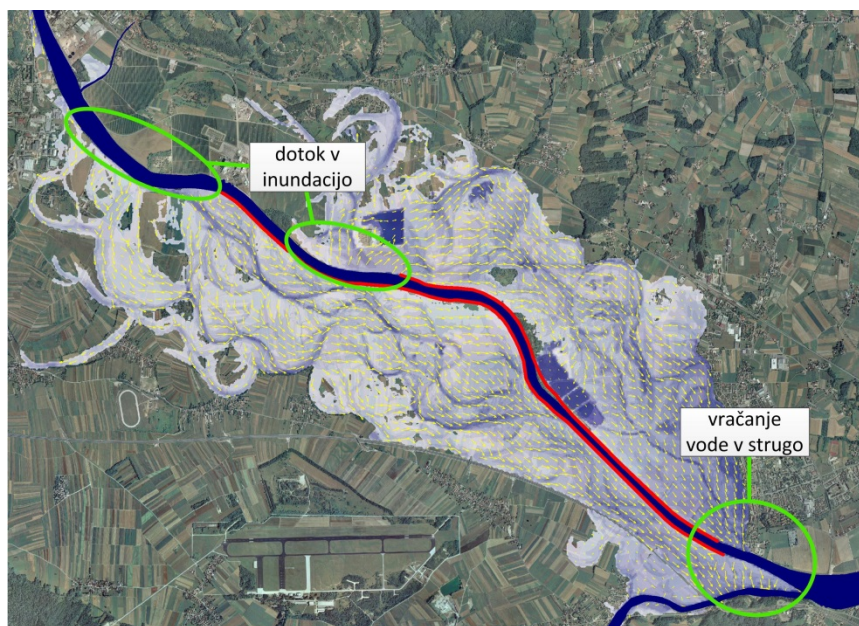
Obratno kot pri večanju gozdnih površin se s povečanjem kmetijskih površin oz. površin z manjšo hrapavostjo zvišuje konica, potovalni čas pa se skrajšuje. Kot je razvidno iz

preglednice 4 in slike 60, se nasprotno kot pri zaraščanju odzivajo tudi ostali analizirani parametri. Z večanjem volumna VV vala nad pretočno sposobnostjo struge se, enako kot pri primeru z enako vrednostjo hrapavosti za celotno območje, relativni vpliv zaraščanja oz. redčenja zmanjšuje.

V prilogah od G.1 do G.3 so za različna razmerja med gozdnimi in kmetijskimi površinami za vse VV valove tabelarično podane velikosti površin poplavljenih območij, povprečne vrednosti hitrosti in globin. Za VV val Q_{100} pa so podane tudi velikosti poplavljenih površin po posameznih razredih po 1. kriteriju Pravilnika in velikost območja poplavljenih površin s hitrostmi vodnega toka nad 1 m/s.

4.3.4 Vpliv spreminjajoče se hrapavosti na potovanje VV valov za primer lokalno določenega območja dotoka vode v retenzijo in vračanja v strugo

Tudi pri modeliranju Krško-Brežiškega polja se je analiziral primer, kjer je bila komunikacija med strugo Save in poplavnimi površinami omejena le na dva krajša odseka na gorvodnem in dolvodnem delu retenzije. Na ta način se je zmanjšala količina vodne mase, ki se prelije v retenzijo, prav tako pa so se s predelnima stenama prekinile poti vodnega toka vzdolž stika struge in retenzije, ki se pojavljajo zaradi topografije poplavnih območij in čez katere se voda dodatno odliha ali pa vrača v strugo Save. Poleg zmanjšanja količin vodne mase na inudacijo se je na ta način podaljšala pot vzporednih tokov, ki se pri obstoječem stanju sicer vračajo v strugo že v srednjem delu obravnavanega odseka.



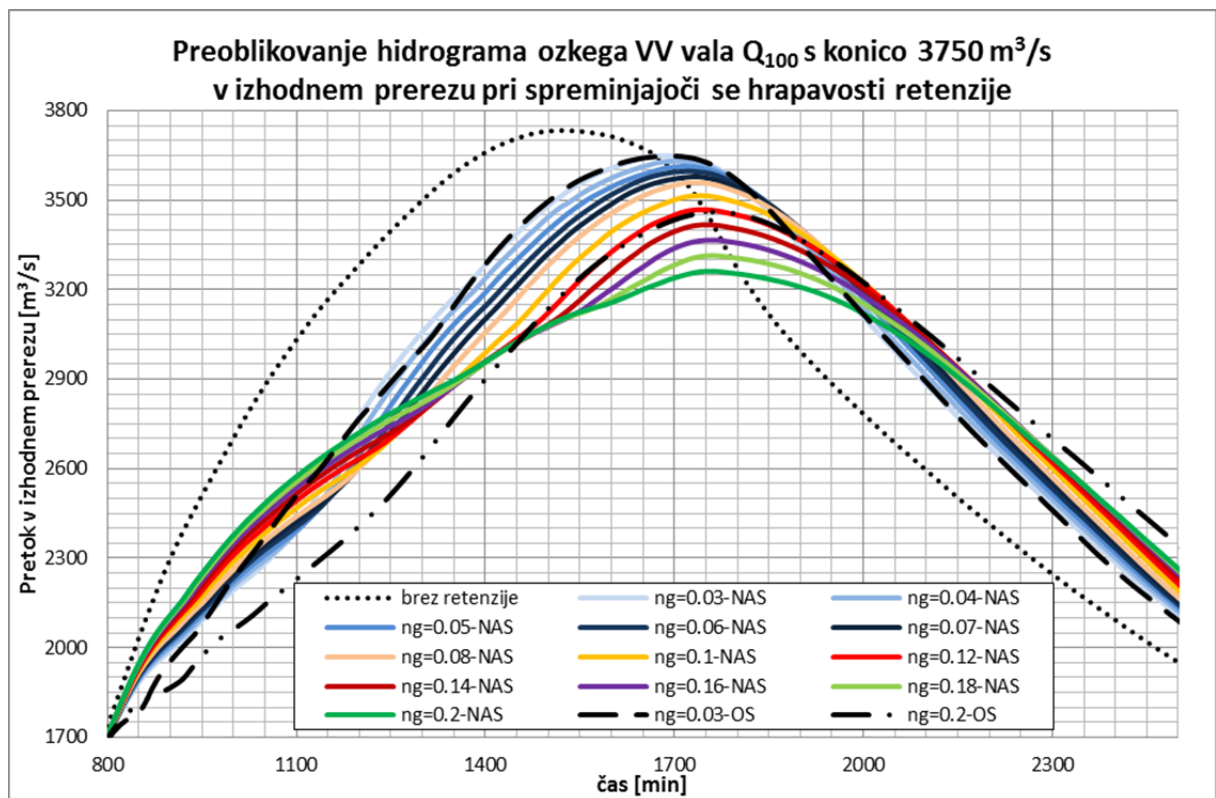
Slika 62: Območja komunikacije vode med strugo in retenzijo ter glavne vodne poti v retenziji (ozek VV val Q_{100} pri primeru z vzdolžnima predelnima stenama (rdeče linije) med strugo in retenzijo).

Figure 62: The communication areas of water between the channel and retention area and main streams in the retention area (narrow HW wave Q_{100} for the variant with the partition walls (red lines) between channel and retention area).

Tudi pri primeru s predelnima stenama so bili izračuni opravljeni za enakih 6 VV valov, kot pri primeru brez predelnih sten, tj. ozki in široki VV valovi s konicami Q_{10} ($Q_{\max}=2560 \text{ m}^3/\text{s}$), Q_{50} ($Q_{\max}=3365 \text{ m}^3/\text{s}$), Q_{100} ($Q_{\max}=3750 \text{ m}^3/\text{s}$). Prav tako je bil upoštevan enak razpon

spreminjanja vrednosti koeficienta hrapavosti n_g retenzije ($0,03 \leq n_g \leq 0,2$), preverjen pa bil tudi vpliv povečanja oz. zmanjševanja gozdnih površin na retenziji.

Pri odlivanju vodne mase v retenzijo je iz izračunov opazen enak vpliv hidravlične hrapavosti, kot se kaže tudi pri že opisanih primerih. Pri nižji hrapavosti sicer dobimo večji odliv na retenzijo, vendar pa se zaradi hitrejšega vodnega toka po retenziji pojavi sovpadanje dinamike valov po strugi in retenziji, in posledično intenzivnejše vračanje vode v strugo. Znižanje konice pred profilom vračanja vode iz retenzije je največje pri najmanjši hidravlični hrapavosti. Kljub temu prihaja, zaradi hitrega toka vode v retenziji, do hitrejšega odtoka vodne mase v dolvodni del retenzije in posledično zvišanja gladin vode v spodnjem delu retenzije ter posledično hitrejšega vračanja vode nazaj v strugo. Hitrejše odtekanje vodne mase in vračanje vode v strugo vodotoka povzroča izraziti dvig konice v izhodnem prerezu. Z večanjem hidravlične hrapavosti se sicer zmanjšuje količina v retenzijo prelite vodne mase, vendar pa se pojavlja daljši zadrževalni čas na retenziji in kasnejše ter manj izrazito vračanje vode nazaj v strugo. Posledično se konica v izhodnem profilu zmanjšuje, potovalni čas pa povečuje. Slika 63 prikazuje preoblikovanje hidrograma ozkega VV vala Q_{100} s konico $3750 \text{ m}^3/\text{s}$ v izhodnem prerezu pri spreminjajoči hrapavosti retenzije. Za primerjavo sta podana tudi izhodna hidrograma za varianto brez predelnih sten pri najmanjši ter največji hrapavosti retenzije.

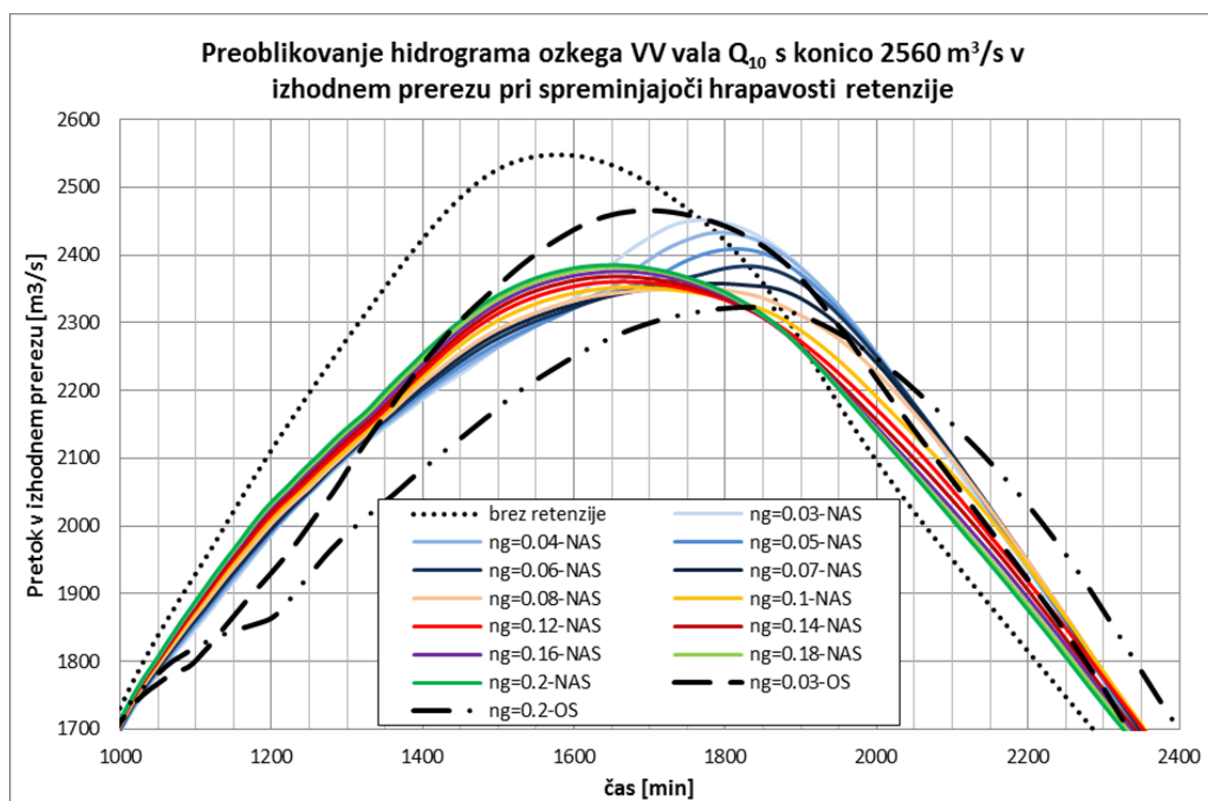


Slika 63: Preoblikovanje hidrograma ozkega VV vala Q_{100} s konico $3750 \text{ m}^3/\text{s}$ v izhodnem prerezu pri spreminjajoči se hrapavosti retenzije. Za primerjavo sta podana tudi izhodna hidrograma za primer brez predelnih sten pri najmanjši ter največji hrapavosti retenzije.

Figure 63: A hydrograph transformation of a narrow HW wave Q_{100} with the peak discharge of $3750 \text{ m}^3/\text{s}$ in the outlet section at varied roughness of the retention areas. The outlet hydrographs for variant without the partition walls at the maximum and minimum values of the roughness are added for comparison.

Pri VV valu Q_{10} s konico $2560 \text{ m}^3/\text{s}$, kjer se prelije le vršni del vala, je opazen enak pojav, kot pri modeliranju območja s poenostavljeno geometrijo s predelno steno (slika 64). Ker je razlivanje omejeno na odsek na gorvodnem delu retenzije, se ob veliki hrapavosti zmanjšujejo hitrosti vode, dvignejo se vodostaji na retenziji, kar onemogoča zadostno odlivanje v vršnem delu VV vala. Zato se konica na odseku odlivanja zniža nekoliko manj, potovalni čas pa je predvsem odvisen od časa potovanja konice po strugi. Iz slike 64 je razvidno preoblikovanje hidrograma v izhodnem profilu za ozki VV val s konico $2560 \text{ m}^3/\text{s}$ ob povečevanju hidravlične hrapavosti retenzije. Prav tako je razviden preskok, ko je zaradi hrapavosti onemogočen dovolj velik odliv vodne mase na retenzijo in se trend spreminjanja konice obrne – konica se povečuje z večanjem hrapavosti retenzije. Pri opravljenih izračunih se najbolj ugoden vpliv na znižanje konice in povečanje potovalnega časa pokaže pri hrapavosti retenzije, pri kateri je razmerje med količino odlite vode in hitrostmi vodnega toka čez retenzijo najugodnejše ($n_g=0,6 - 0,8$). Pri tem se najugodnejši hrapavosti retenzije za znižanje konice ali pa za najdaljši potovalni čas razlikujeta.

Na sliki 64 sta prikazani tudi krivulji izhodnega hidrograma pri največji in najmanjši hrapavosti retenzije pri varianti brez VV nasipa. Razvidno je, da je pri varianti brez nasipa pri majhni hrapavosti ($n_g=0,03$), ugodnejša varianta s predelnimi stenami, pri veliki hrapavosti, pa se, zaradi negativnega vpliva hrapavosti retenzije pri omejenem območju razlivanja, konica bolj zniža pri varianti brez predelnih sten. Enako se pokaže tudi pri potovalnem času.



Slika 64: Preoblikovanje hidrograma ozkega VV vala Q_{10} s konico $2560 \text{ m}^3/\text{s}$ v izhodnem prerezu (PP_{iz}) pri spreminjajoči se hrapavosti retenzije.

Figure 64: A hydrograph transformation of a narrow HW wave Q_{10} with the peak discharge of $2560 \text{ m}^3/\text{s}$ in the outlet section (PP_{iz}) at varied roughness of the retention areas.

Iz časovnega intervala med 1000 in 1200 minutami je na sliki 64 je razvidno tudi večje odlivanje vodne mase v naraščajočem delu hidrograma pri varianti brez predelnih sten.

S primerjavo rezultatov med variantama s predelnima stenama oziroma brez njiju lahko ugotovimo, da je pri VV valovih s krajšim trajanjem in nizko konico s postavitvijo predelnih sten mogoče pri nižjih hrapavosti doseči ugodnejši vpliv tako na znižanje konice VV vala v izhodnem prerezu kot tudi na potovalni čas. Ko se pri hrapavosti retenzije, ki pri varianti s predelnima stenama onemogoča zadosten odliv vodne mase v retenzijo, trend spreminjanja vrednosti konice in potovalnega časa obrne, pa je ugodnejša varianta brez predelnih sten. Pri višjih VV valovih je s povečevanjem hidravlične hrapavosti v celotnem razponu upoštevanih vrednosti pri varianti s predelnima stenama mogoče doseči večje znižanje konice, potovalni čas pa je pri obeh variantah zelo podoben. Znižanje konice pri varianti s predelnima stenama je do cca. 50 odstotkov večje kot pri varianti brez predelnih sten.

Preglednica 5 podaja absolutne vrednosti znižanja konice v izhodnem prerezu (PP_{iz}) za obe varianti, tj. s predelnima stenama oziroma brez njiju. Poleg absolutnih vrednosti je podana tudi primerjava glede na konico vhodnega hidrograma in glede na znižanje konice pri varianti brez predelnih sten in s hidravlično najbolj gladko retenzijo ($n_g=0,03$).

Preglednica 5: Znižanje konice za posamezne VV valove v izhodnem prerezu – primerjava je podana v absolutnih vrednostih, v odstotkih glede na konico vhodnega hidrograma (*) in v odstotkih glede na znižanje konice pri hrapavosti retenzije $n_g=0,03$ ().**

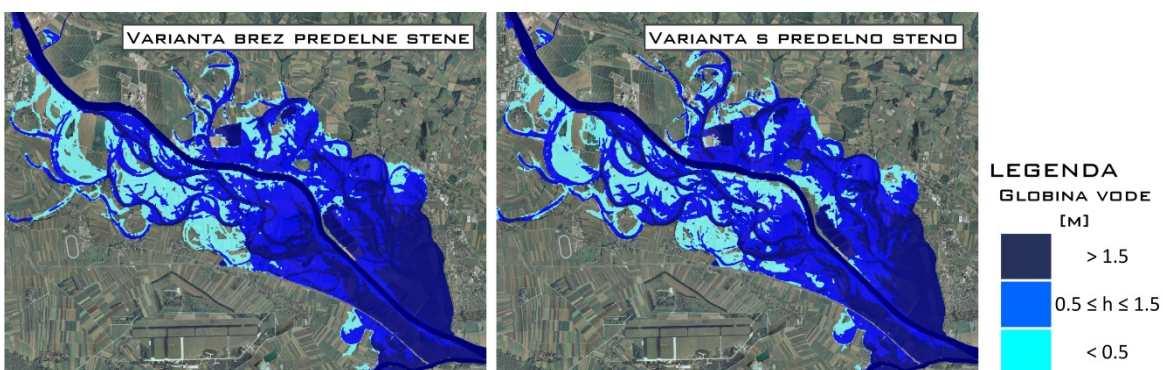
Table 5: A peak attenuation for all the HW waves in the outlet section – a comparison is given in the absolute values, in the percentage according to the peak discharge of the inlet hydrograph (*) and according to the peak attenuation for the hydraulic roughness of the retention area $n_g = 0.03$ ().**

	varianta s/brez pred. stene	znižanje konice			
		[m ³ /s]	[%] (max) (*)	[%] (max) (**)	opomba
ozek VV Q2560 m ³ /s	OS	94 → 237	9,2	152	večja hrapavost, večje znižanje konice
	NAS	108 → 209 → 175	8,2	122	
širok VV Q2560 m ³ /s	OS	44 → 60 → 52 → 82	3,2	86	*** opomba v poglavju 4.3.1
	NAS	29 → 119	4,7	171	večja hrapavost, večje znižanje konice
ozek VV Q3365 m ³ /s	OS	97 → 262	7,8	171	večja hrapavost, večje znižanje konice
	NAS	107 → 411	12,2	325	večja hrapavost, večje znižanje konice
širok VV Q3365 m ³ /s	OS	22 → 71	2,1	218	večja hrapavost, večje znižanje konice
	NAS	25 → 116	3,4	416	večja hrapavost, večje znižanje konice
ozek VV Q3750 m ³ /s	OS	102 → 289	7,7	184	večja hrapavost, večje znižanje konice
	NAS	101 → 488	13	380	večja hrapavost, večje znižanje konice
širok VV Q3750 m ³ /s	OS	17 → 87	2,3	405	večja hrapavost, večje znižanje konice
	NAS	22 → 116	3,1	577	večja hrapavost, večje znižanje konice
*	<i>primerjava glede na primer brez retenzije</i>				
**	<i>primerjava glede na primer OS variante modela, z najmanjšo vrednostjo hrapavosti n_g retenzije ($n_g=0,03$)</i>				
***	<i>opis v tekstu</i>				
OS – brez predelnih sten; NAS – s predelnima stenama					

Poleg primerjave vpliva povečane hrapavosti na retenziji na znižanje konice v izhodnem prerezu in potovalnega časa konice VV valov za obe varianti komunikacije med strugo in retenzijo je bila izvedena tudi analiza vpliva na poplavno nevarnost. Enako kot za obstoječe stanje je bila tudi za varianto s predelnima stenama pri vseh računskih primerih izdelana analiza sprememb velikosti površine poplavljenih območij in povprečnih globin, za VV valova s 100-letno povratno dobo pa tudi razvrstitev poplavljenega območja po razredih KPN

za 1. kriterij. Prav tako se je preveril vpliv hidravlične hrapavosti retenzije na vodostaje v izhodnem prerezu obravnavanega območja (PP_{iz}). Vodostaji v kontrolnem prerezu so sicer neposredno povezani s pretokom, izvedena pa je bila analiza, kaj predstavlja znižanje pretoka konice na vodostaj v istem prerezu.

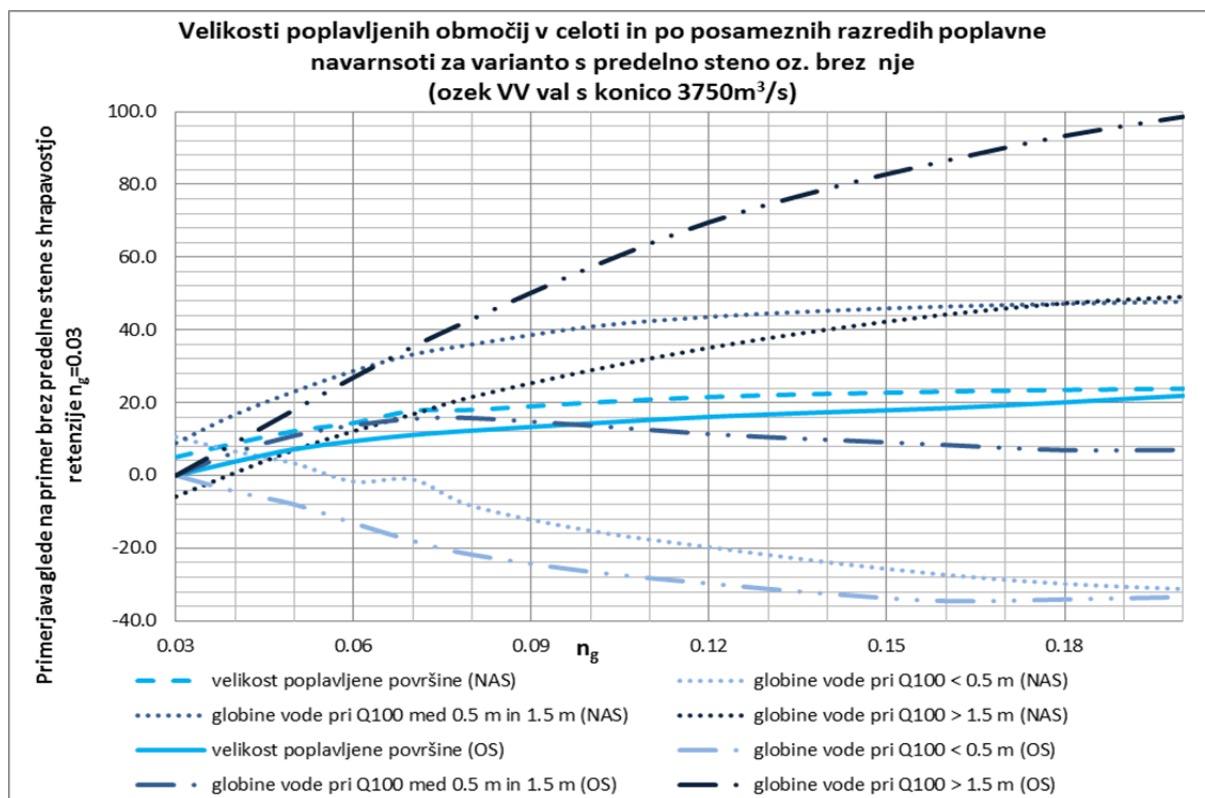
Analiza pokaže, da se enako kot v primeru brez predelnih sten površina poplavljenih območij z naraščajočo hrapavostjo povečuje. Edina izjema je VV val Q_{10} , pri katerem se odlije le vršni del vala. Delno je s predelnima stenama odlivanje zmanjšano že z omejitvijo območja komunikacije med strugo in retenzijo, dodatno pa se pojavi še negativen vpliv prevelike hrapavosti retenzije, ki onemogoča odlivanje dovolj velikih količin vodne mase v retenzijo, da bi odtočne razmere po retenziji lahko ugodno vplivale na znižanje konice. Ta pojav se pojavi le pri nižjih VV valovih, pri katerih se odlije le vrhnji, položnejši del vala. Kot se je pokazalo že pri modeliranju območja s poenostavljeno geometrijo, se količine prelite vode na odsekih, kjer komunikacija poteka pri obeh variantah modela, razlikujejo, kar je posledica vodostajev in hitrosti vodnega toka v strugi vodotoka na odseku predelnih sten. Dinamika razlivanja v retenzijo je v primeru s predelnima stenama nekoliko drugačna. Ker se na odseku predelnih sten vodna masa ne more odlivati v retenzijo, se na tem odseku pojavijo višji vodostaji, kar pa vpliva tudi na potek gladin gorvodno. Zaradi višjih gladin gorvodno se na odseku, kjer je odliv možen, odlijejo večje količine vodne mase. S primerjavo obsega poplavljenih območij za enak VV val in pri enaki hrapavosti retenzije je mogoče ugotoviti, da se zaradi različne dinamike razlivanja pojavi različna razporeditev poplavljenih območij. Na območju odlivanja v zgornjem delu retenzije je pri primeru s predelnima stenama zaradi večjih količin odlite vodne mase poplavljen večje območje. Kljub lokalno večjemu odlivu v retenzijo pri primeru s predelnima stenama je skupna količina vodne mase v retenziji manjša, kar je mogoče ugotoviti s primerjavo površin z različno globino vode. Na sliki 65 je prikazano območje poplavljenosti pri ozkem VV valu s konico $3750 \text{ m}^3/\text{s}$ za obe varianti komunikacije (tj. s predelnima stenama/brez njiju) pri enaki hrapavosti retenzije. Razvidna je različna razporeditev poplavljenih območij. Kljub večjemu skupnemu obsegu poplavljenih območij pri varianti s predelnima stenama je območje z globlinami vode večjimi od 1,5 m večje pri varianti brez predelnih sten.



Slika 65: Prikaz obsega poplavljenosti in porazdelitev razredov poplavne nevarnosti za 1. kriterij za VV val s konico $3750 \text{ m}^3/\text{s}$, pri enaki hrapavosti retenzije, za primera s predelnima stenama oz. brez njiju (levo – brez predelnih sten; desno – s predelnima stenama).

Figure 65: The extent of the flooded area and flood hazard classes for the 1. criterion for HW wave with the peak discharge of $3750 \text{ m}^3/\text{s}$ at equal roughness of the retention area for variants with or without the partition walls (left – without the partition walls; right – with the partition walls).

Primerjava velikosti poplavljenih območij v celoti in po posameznih razredih je razvidna tudi iz preglednice 6 in slike 66. Primerjava je izdelana glede na primer brez predelnih sten s hrapavostjo retenzije $n_g=0,03$.

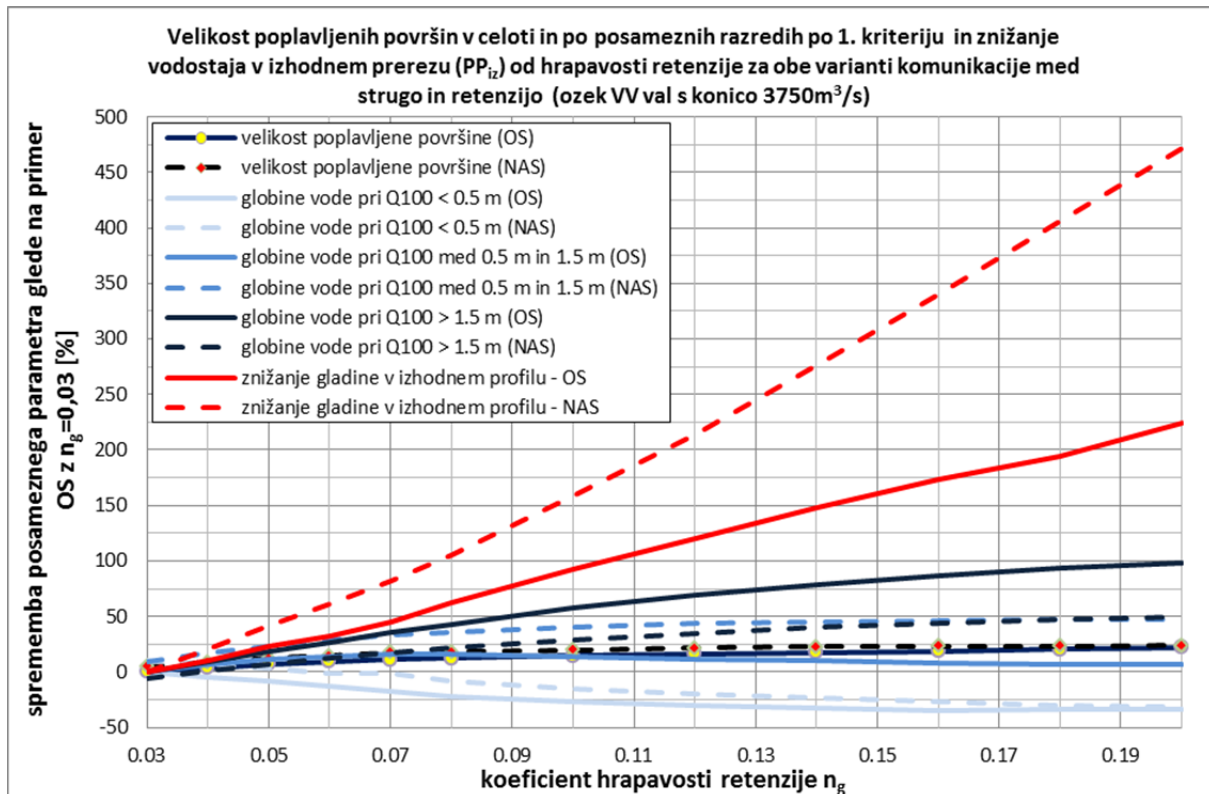


Slika 66: Primerjava velikosti poplavljenih območij v celoti in po posameznih razredih poplavne nevarnosti za primera s predelnima stenama oz. brez njiju (ozek VV val s konico 3750 m³/s).

Figure 66: A comparison of the extent of flooded areas in total and in each class of the flood hazard for variants with and without the partition walls (a narrow HW wave with the peak discharge of 3750 m³/s).

Kljub večji poplavljenosti pri varianti s predelnima stenama, se pri enaki hrapavosti retenzije pojavljajo nižje hitrosti vodnega toka, pri obeh VV valovih Q_{100} pa je tudi manjše območje s hitrostmi vodnega toka nad 1 m/s. Enako kot pri varianti brez predelnih sten se s povečanjem hidravlične hrapavosti iz $n_g=0,03$ na $n_g=0,06$ odstotek površin s hitrostmi vodnega toka nad 1 m/s zmanjša pod 1 %.

Pri območju brez predelnih sten je bilo ugotovljeno, da je kljub obliki izhodnega prereza (izrazita topografska sprememba na obeh robovih), znižanje vodostaja v tem prerezu (PP_{iz}) razmeroma majhno. Razmeroma majhno znižanje vodostajev v izhodnem prerezu je posledica relativno majhnih znižanj konice glede na vhodni hidrogram. Ker so pri varianti s predelnima stenama dosežena večja znižanja konice v izhodnem prerezu, so ob nastopu konice nižji tudi vodostaji v tem prerezu. Pri nekaterih vrednostih koeficienta hrapavosti so znižanja konice za skoraj faktor 2 večja pri varianti brez predelnih sten, so tudi znižanja vodostaja v izhodnem prerezu temu primerno večja. Predvsem pri višjih VV valovih in večji hrapavosti retenzije, kjer rezultati variante s predelnima stenama bolj odstopajo od rezultatov variante brez predelnih sten, so vodostaji v izhodnem prerezu tudi do 20 cm nižji. Na sliki 67 je prikazano spreminjanje velikosti površin po razredih KPN za prvi kriterij Pravilnika, velikosti celotne poplavljenosti površine in znižanja vodostaja v izhodnem prerezu (PP_{iz}) pri spreminjanju hrapavosti za obe varianti komunikacije vodne mase med strugo in retenzijo. Primerjava je izdelana za ozek VV val Q_{100} s konico 3750 m³/s in sicer glede na varianto brez predelnih sten in hrapavostjo retenzije $n_g=0,03$.



Slika 67: Odvisnost velikosti poplavljenih površin v celoti in po posameznih razredih po 1. kriteriju Pravidnika in znižanje vodostaja v izhodnem prerezu (PP_{iz}) od hrapavosti retenzije za oba primera komunikacije med strugo in retenzijo (ozek VV val Q_{100} s konico $3750\text{m}^3/\text{s}$).

Figure 67: A dependence of the extent of flooded areas in total and in each class according to the 1. criterion of the rules on methodology for determination of hazard areas (MOP, 2007) and a decrease of the water surface elevation in the outlet section (PP_{iz}) on roughness of the retention area (a narrow HW wave Q_{100} with the peak discharge of $3750\text{m}^3/\text{s}$).

Iz slike je razvidno, da je pri varianti s predelnima stenama območje poplavljenosti pri enaki hrapavosti retenzije večje kot pri varianti brez predelnih sten. Večje območje poplavljenosti se pojavlja predvsem zaradi večjega odlivanja v zgornjem delu retenzije, kjer je retenzija širša, zaradi česar se voda razlije po večjem območju. V spodnjem delu obravnavanega območja, kjer je desna retenzija omejena s cestnim telesom AC Ljubljana–Zagreb, leva pa s teraso Brežic, se območje poplavljenosti z višanjem vodostaja ne povečuje bistveno, se pa izraziteje spreminja razmerje površin po posameznih razredih 1. kriterija (tj. globin) za določanje KRPN. Višanje vodostajev zaradi večje hrapavosti ali večjih vodnih mas v retenziji se pri območjih, omejenih s topografskimi spremembami (nasipi, terase itd.), namreč odraža z večjimi globinami vode. To je razvidno tudi iz slike 67. Pri varianti brez predelnih sten vodostaji na retenziji hitreje naraščajo, kar se odraža tudi pri povečanju površin z globinami vode na retenziji nad 1,5 m. Pri varianti s predelnima stenama, kjer je odlivanje omejeno, z večanjem hrapavosti pa se še dodatno zmanjšuje, vodostaji v retenziji naraščajo počasneje. Pri majhni hrapavosti retenzije so velikosti površin z globinami vode na retenziji nad 1,5 m pri obeh variantah komunikacije primerljive. Pri večjih hrapavostih retenzije pa se zaradi počasnejšega naraščanja vodostajev pri varianti s predelnima stenama tudi površine z globinami vode na retenziji nad 1,5 m bistveno manjše. Slika 67 prikazuje tudi znižanje vodostajev v izhodnem prerezu. Kot je bilo razvidno pri znižanju konice v izhodnem prerezu, se tudi pri znižanju vodostaja, ki je neposredno povezan s pretokom konice, pokaže ugodnejši vpliv variante s predelnima stenama.

Preglednica 6: Spreminjanje analiziranih parametrov v procesu povečevanja in zmanjševanja deleža kmetijskih površin za primerja s predelnima stenama oziroma brez njiju (ozek VV val Q_{100} s konico 3750 m^3/s). Primerjava je izdelana glede na obstoječe stanje razmerja med gozdnimi in kmetijskimi površinami pri primeru brez predelnih sten.

Table 6: A change of the analyzed parameters in the process of increase or decrease of the proportion of agricultural areas according to the current state for variants with and without the partition walls (a narrow HW wave Q_{100} with the peak discharge of 3750 m^3/s). A comparison is given according to the current proportion of the forest and agricultural areas in variant without the partition walls.

		ozek VV val $Q_{100}=3750m^3/s$					
		100 % kmetijskih površin	redčenje I	obstoječe stanje	zaraščanje I	zaraščanje II	100 % gozdnih površin
znižanje konice	OS	- 13,7 %	- 2,9 %	128 m^3/s	+ 11,3 %	+ 36,1 %	+ 63,0 %
	NAS	- 7,5 %	+ 6,7 %	-17,7 %	+ 34,6 %	+ 77,5 %	+ 129,0 %
potovalni čas konice	OS	- 7,1 %	- 3,6 %	280 min	+ 3,6 %	+ 10,7 %	+ 10,7 %
	NAS	- 7,1 %	- 3,6 %	0,0 %	+ 3,6 %	7,1 %	+ 10,7 %
znižanje gladine v izhodnem prerezu	OS	+ 15,5 %	+ 2,7 %	0,11 m	- 13,6 %	- 41,8 %	- 73,6 %
	NAS	+ 8,2 %	- 8,2 %	- 20,9 %	- 40,9 %	- 90,9 %	- 151,8 %
velikost poplavljenih površin	OS	- 6,8 %	- 5,7 %	19,1 m^2	+ 1,6 %	+ 2,2 %	+ 4,5 %
	NAS	- 2,3 %	- 0,7 %	+ 3,2 %	+ 4,8 %	+ 5,3 %	+ 9,3 %
globine vode < 0,5 m	OS	+ 11,2 %	+ 2,5 %	4,5 m^2	- 5,0 %	- 18,1 %	- 18,9 %
	NAS	+ 24,1 %	+ 19,8 %	+ 6,9 %	- 1,8 %	- 6,1 %	- 7,6 %
globine vode med 0,5 m in 1,5 m	OS	- 7,7 %	- 7,5 %	7,8 m^2	+ 1,9 %	- 3,3 %	- 3,9 %
	NAS	+ 1,3 %	+ 2,0 %	+ 13,7 %	+ 17,1 %	+ 19,0 %	+ 24,8 %
globine vode > 1,5 m	OS	- 17,9 %	- 9,1 %	6,8 m^2	+ 5,7 %	+ 22,1 %	+ 29,7 %
	NAS	- 24,1 %	- 17,4 %	- 11,4 %	- 5,0 %	- 2,9 %	+ 2,9 %
območje s hitrostmi > 1 m/s	OS	+ 127,0 %	+ 118,9 %	0,6 m^2	- 11,3 %	- 70,3 %	- 99,3 %
	NAS	+ 76,1 %	+ 50,0 %	- 43,8 %	- 58,9 %	- 87,1 %	- 99,8 %
povprečna globina vode na retenziji	OS	- 12,8 %	- 6,7 %	1,5 m	+ 4,0 %	+ 14,0 %	+ 19,6 %
	NAS	- 18,2 %	- 13,4 %	- 7,1 %	- 2,4 %	- 1,0 %	+ 2,9 %
povprečna hitrost vode na retenziji	OS	+ 16,9 %	+ 9,6 %	0,4 m/s	- 8,8 %	- 27,3 %	- 38,5 %
	NAS	+ 9,8 %	+ 4,2 %	- 4,3 %	- 12,0 %	- 31,2 %	- 44,8 %

Kot se je pokazalo že pri analizi vpliva povečanja oziroma zmanjšanja deleža gozdnih površin za varianto brez predelnih sten, se spremembe odražajo glede na povprečno hrapavost retenzije. Ugotovitve vpliva povečanja oziroma zmanjšanja deleža gozdnih površin so torej skladne z ugotovitvami, dobljenimi pri spreminjanju hrapavosti po celotni retenziji. Iz rezultatov je mogoče ugotoviti, da bi se s povečanjem deleža gozdnih površin pojavil ugoden vpliv na povečanje zadrževalne sposobnosti in posledično na znižanje konice v izhodnem prerezu ter tudi na povečanje potovalnega časa konice VV vala. Preglednica 6 za ozek VV val s konico 3750 m^3/s prikazuje, da je mogoče za indikatorje vpliva hrapavosti retenzije v izhodnem prerezu pri varianti s predelnima stenama tudi pri procesu povečanja oz. zmanjšanja deleža gozdnih površin doseči ugodnejši vpliv. Medtem ko je potovalni čas pri obeh variantah komunikacije med strugo in retenzijo praktično enak, je znižanje konice v izhodnem prerezu pri varianti s predelnima stenama pri enakem razmerju gozdnih in kmetijskih površin tudi za faktor 2 večje kot pri varianti brez predelnih sten.

Območje poplavljenosti je v primeru predelnih sten sicer večje, kljub temu pa so povprečne globine in hitrosti vode manjše. To kaže na vpliv lastnosti topografije terena na zgornjem delu desne retenzije, kjer se v primeru predelnih sten v inudacijo preljuje večja količina vodne mase. Zaradi širše retenzije in poteka starih rečnih rokavov Save, ki se še vedno kažejo v topografiji retenzije, se voda širše razlije. Kot pa je razvidno iz rezultatov, je skupna količina vodne mase v inudaciji pri varianti s predelnima stenama manjša, zaradi česar je območje z globinami vode nad 1,5 m manjše, prav tako pa je bistveno manjše tudi območje s hitrostmi vodnega toka nad 1 m/s.

V prilogah od E.1 do E.6 je za vse obravnavane VV valove prikazano tudi preoblikovanje hidrogramov VV valov v izhodnem prerezu pri različni hrapavosti retenzije. V prilogah od F.1 do F.4 so za vse VV valove pri različni hrapavosti retenzije tabelarično prikazane vrednosti znižanja konice in gladine v izhodnem prerezu, ter spremembe potovalnega časa, površine poplavljenega območja, povprečne vrednosti hitrosti in globin. Za VV val Q_{100} pa so podane tudi velikosti poplavljenih površin v celoti in po posameznih razredih po 1. kriteriju Pravilnika, ter velikost območja poplavljenih površin s hitrostmi vodnega toka nad 1 m/s (za 2. kriterij Pravilnika).

V prilogah od H.1 do H.12 je za vse obravnavane VV valove grafično prikazano spreminjanje obsega poplavljenosti, polja globin in polja hitrosti pri hrapavosti retenzije $n_g=0,03$, $n_g=0,08$ in $n_g=0,14$. Prikazano je za obe varianti, s predelnima stenama in brez njiju.

4.3.5 Ugotovitve hidravličnega modeliranja na območju Krško-Brežiškega polja

Ugotovitve, dobljene s simuliranjem različnih scenarijev na območju s poenostavljeno geometrijo, so bile v drugem sklopu izračunov preverjene in ovrednotene še na praktičnem primeru. Z opravljenimi analizami na odseku Save na Krško-Brežiškem polju od NE Krško do Brežic je bilo doseženo natančnejše poznavanje vpliva spreminjajoče hrapavosti retenzije na potovanje VV valov pri naravnih vodotokih. Pridobljeno znanje lahko poda pomembne informacije za ohranitev oziroma izboljšanje retenzijske sposobnosti obravnavanega območja v naslednjem dolgoročnem obdobju obratovanja HE Brežice.

Za Krško-Brežiško polje so bile opravljene simulacije visokovodnih dogodkov s povratnimi dobami 10 let, 50 let in 100 let. Za vse tri povratne dobe je bila upoštevana ozka in široka oblika VV vala. Z izbranimi VV valovi je bil pokrit spekter poplavnih valov, pri katerih ima retenzija pomembnejši vpliv na odtočne razmere in na preoblikovanje VV valov. Enako kot pri modeliranju s poenostavljeno geometrijo je bil v prvi fazi izračunov raziskan vpliv spreminjajoče se hrapavosti retenzije v razponu realnih vrednosti koeficienta hrapavosti n_g za poplavna območja ($0,03 \leq n_g \leq 0,2$). V drugi fazi izračunov pa je bil preverjen tudi vpliv spreminjanja obstoječega razmerja velikosti gozdnih in kmetijskih površin, razviden iz dejanske rabe prostora (oz. parcel).

Ker se je pri modeliranju območja s poenostavljeno geometrijo omejitev območij komunikacije vodne mase med strugo in retenzijo pokazal kot ukrep, s katerim je mogoče povečati zadrževalno sposobnost retenzijskih površin, se je tudi na primeru Krško-Brežiškega polja analiziral primer, kjer je bila komunikacija med strugo Save in retenzijo omejena le na dva krajša odseka na gorvodnem in dolvodnem delu retenzije.

Glavne ugotovitve iz izračunov in analiz modeliranja Krško-Brežiškega polja so naslednje:

- Predvsem pri nižjih VV valovih, kjer se v retenzijo preljuje le vršni del vala topografske lastnosti obrežnega dela vodotoka in poplavnih površin močno vplivajo na proces polnjenja retenzije in oblikovanje vzporednih vodnih tokov.
- Povečana hrapavost retenzije ugodno vpliva na zniževanje konice VV vala in podaljševanje potovalnega časa. Kljub temu se lahko pri nižjih VV valovih z večjo dolžino trajanja pojavi tudi negativni vpliv prevelike hrapavosti, ki skrajšuje potovalni čas in povišuje konico v izhodnem prerezu.
- Absolutne vrednosti znižanja konice so pri vseh treh povratnih dobah in enaki varianti VV vala (ozka oz. široka varianta) zelo podobne, vendar se relativno znižanje konice z višanjem konice VV vala in dolžino trajanja hidrograma vala, ko je presežena pretočna sposobnost osnovne struge vodotoka, zmanjšuje.
- Pri ožjih in bolj koničastih VV valovih je vpliv povečanja hrapavosti bolj ugoden. Z višanjem konic VV valov in njihovih volumnov nad pretočno sposobnostjo struge se relativni vpliv retenzije zmanjšuje.
- Povečana hrapavost retenzije vpliva na zmanjšanje hitrosti vodnega toka v retenziji in zmanjša količine vodne mase odlite v retenzijo. Kljub manjšim količinam vodne mase se gladine (vodostaji) vode v retenziji zvišujejo. Spremenjeno hitrostno polje in polje globin na retenziji posledično vpliva na obseg in prostorsko razporeditev poplavljenih območij.
- S povečanjem hrapavosti retenzije se povečuje obseg poplavljenosti. Pri tem se delež območij z globinami nad 1,5 m povečuje. Odstotek površin z globinami med 0,5 m in 1,5 m ostaja praktično nespremenjen, odstotek območij z globinami vode manjšimi od 0,5 m pa se celo zmanjša. Na povečanje deleža območij z globinami nad 1,5 m in zmanjševanje deleža površin z globinami vode manjšimi od 0,5 m vplivajo tudi topografske lastnosti območja.
- Pri povečanju oziroma zmanjšanju deleža gozdnih površin se spremembe odražajo tudi glede na povprečno hrapavost retenzije. Ugotovitve o vplivu povečanja oziroma zmanjšanja deleža gozdnih površin so torej skladne z ugotovitvami, dobljenimi pri spreminjanju hrapavosti po celotni retenziji.
- Z omejitvijo komunikacije med strugo Save in retenzijo na dva krajša odseka na gorvodnem in dolvodnem delu retenzije je mogoče doseči ugodnejši vpliv na znižanje konice v dolvodnem, izhodnem prerezu, potovalni časi pa so podobni kot pri varianti brez predelnih sten.
- Enako kot pri območju s poenostavljeno geometrijo se tudi pri Krško-Brežiškem polju pokaže možnost nastopa dvojnega vrha na hidrogramu v izhodnem prerezu, ki je posledica različnih hitrosti potovanja VV vala po strugi in po retenziji, in prekinjene komunikacije med strugo in retenzijo vzdolž osrednjega dela retenzije.
- Pri enakem VV valu in pri enaki hrapavosti retenzije je pri varianti s predelnima stenama zaradi različne dinamike razlivanja različna razporeditev poplavljenih območij. Zaradi topografskih značilnosti obravnavanega območja se spremenjena dinamika razlivanja odraža tudi s povečanim obsegom poplavljenih območij.
- Pri varianti s predelnima stenama, kjer je odlivanje omejeno, z večanjem hrapavosti pa se še dodatno zmanjšuje, vodostaji v retenziji naraščajo počasneje. Pri majhni hrapavosti retenzije so velikosti površin z globinami vode na retenziji nad 1,5 m pri obeh variantah komunikacije primerljive. Pri večjih hrapavostih retenzije pa so zaradi počasnejšega naraščanja vodostajev pri varianti s predelnima stenama površine z globinami vode na retenziji nad 1,5 m bistveno manjše.

- Pri obeh variantah komunikacije med strugo in retenzijo se z večanjem hrapavosti retenzije, območja s hitrostmi nad 1 m/s zelo hitro zmanjšujejo. Zaradi manjših količin vodne mase v retenziji so površine v primeru s predelnima stenama pri enakem VV valu in pri enaki hrapavosti retenzije bistveno manjše.
- Znižanje vodostaja v dolvodnem, izhodnem prerezu kot indikator vpliva hidravlične hrapavosti retenzije na poplavno varnost dolvodnih območij je neposredno povezano z znižanjem konice v tem prerezu in tudi same oblike kontrolnega prereza. Večje znižanje vodostaja v izhodnem prerezu se pojavlja pri večji hrapavosti retenzije in pri varianti s predelnima stenama.
- Predvsem pri varianti brez predelnih sten so dvigi vodostajev v retenziji zaradi povečane hrapavosti razmeroma veliki glede na znižanje vodostaja v izhodnem prerezu.

Ugotovitve iz modeliranja Krško-Brežiškega polja potrjujejo trend vpliva spreminjajoče se hrapavosti retenzije na potovanje visokovodnih valov, kot je bil opisan že pri modeliranju območja s preprosto geometrijo. V nadaljevanju so podane še skupne ugotovitve in skladnost le-teh s postavljenimi trditvami ob pričetku izdelave magistrskega dela.

4.4 Skupne ugotovitve in potrditev hipoteze

V predhodnih poglavjih so že bili ločeno podani rezultati in ugotovitve, ki so bili dobljeni na podlagi hidravlične analize vpliva hrapavosti poplavnih površin na potovanje VV valov čez obravnavana območja. Pri modeliranju območja s poenostavljeno geometrijo je bil v analizi izločen vpliv topografije obrežnega dela vodotoka in poplavnih površin, ki pri naravnih vodotokih lahko poleg rabe prostora pomembno vpliva tako na komunikacijo vodne mase med strugo in retenzijo, kot tudi na odtočne razmere čez poplavne površine in posledično na retenzijsko sposobnost retenzije. Z izločitvijo vpliva topografije je bilo tako mogoče analizirati in ovrednotiti vpliv rabe prostora, ki je bila v modelu zajeta s koeficientom hidravlične hrapavosti, na potovanje VV valov. Ker bi se lahko pri modeliranju območja s poenostavljeno geometrijo vpliv hrapavosti retenzije izkazal kot precenjen oz. podcenjen glede na dejanski vpliv hidravlične hrapavosti retenzije na potovanje VV valov pri naravnih vodotokih, so se ugotovitve in stopnja vpliva hidravlične hrapavosti v drugem sklopu analiz preverile še na odseku Save med Krškim in Brežicami. Sinteza analiz rezultatov in ugotovitev modeliranja na obeh testnih območjih potrjuje hipoteze, ki so bile postavljene pred pričetkom izdelave magistrskega dela.

Cilj dela je bil preveriti naslednji trditvi:

- Z modeliranjem poplavnih tokov z 2D modelom je možno natančneje kot z 1D modelom analizirati in ovrednotiti vpliv spreminjanja hidravlične hrapavosti zaradi sprememb v rabi prostora oziroma sprememb zarasti na odtočne razmere po retenziji.
- Z ustreznno rabo prostora je možno vplivati na pretočno sposobnost poplavnih površin in tako vsaj ohranjati zadrževalno sposobnost retenzije, ter na preoblikovanje, znižanje konic in potovalne čase VV valov.

Najpomembnejši vpliv na komunikacijo vode med strugo in poplavnimi površinami, na odtočne razmere v retenziji in posledično tudi na potovanje VV valov imajo topografske lastnosti obrežnega dela vodotoka in poplavnih površin ter raba prostora. Vplivajo na količino v retenzijo odlite vodne mase, predvsem pa tudi na oblikovanje vodnih tokov in potovanje vodne mase po poplavnih površinah. Pri VV valovih se količine vodne mase v retenziji s

časom spreminjajo, posledično se spreminjajo tudi vodostaji v retenziji in obseg poplavnih površin. Predvsem v fazi polnjenja retenzije se zaradi mikro in makro elementov topografije terena oblikujejo prečni in povratni vodni tokovi. Prav tako se pri višjih VV dogodkih v naraščajoči fazi vala, pri nižjih VV valovih pa v celotni dolžini trajanja dogodka, pojavlja stanje, ko retenzija ni povsem preplavljena in tako ni kot celoten pretočni prerez vključena v prevajanje poplavne vodne mase, zaradi česar se na retenziji pojavljajo območja majhne globine vode in izraziti dvodimenzionalni vodni tokovi. Raba prostora vpliva na upor vodnemu toku in posledično na energijske izgube vzdolž toka vode. Zaradi različne hrapavosti retenzije kot posledice rabe prostora in z njo povezanimi energijskimi izgubami se znotraj retenzije pojavljajo različne hitrosti vodnega toka. Hitrostno polje, s katerim so neposredno povezani tudi vodostaji v retenziji, prav tako delno vpliva na potek vodnih tokov in na prostorsko razporeditev poplavljenih območij. Zaradi vseh navedenih vzrokov je mogoče trditi, da je za pravilno zajetje in simuliranja širjenja ter potovanja VV valov po retenziji z numeričnim modelom nujno potreben vsaj dvodimenzionalen model. To potrjuje tudi praksa, saj se danes pri modeliranju poplavljanja odprtih vodotokov, določanju poplavne nevarnosti, analizi vpliva načrtovanih posegov v vodni in obvodni prostor ter drugih prostorskih analizah uporabljajo v vse večjem obsegu dvodimenzionalni modeli. Naš Pravidnik pa še dopušča uporabo 1D modeliranja.

Jedro magistrskega dela predstavlja hidravlična analiza vpliva rabe prostora, pri čemer je bila sprememba rabe prostora zajeta s spreminjanjem lokalnih koeficientov hidravlične hrapavosti n_g . Analizirane so bile odtočne razmere v retenziji in posledično vpliva na potovanje in preoblikovanje VV valov na območjih, kjer imajo retenzijske površine pomembnejši vpliv. Predhodna poglavja podajajo rezultate in ugotovitve, ki potrjujejo drugo trditev, da spreminjanje hrapavosti retenzije vpliva na mehanizem komunikacije vodne mase med strugo vodotoka in retenzijskimi površinami, na odtočne razmere v inundaciji in posledično na preoblikovanje VV valov, kar se odraža v potovalnem času konice čez obravnavana območja in na znižanju konice VV valov v izhodnem prerezu. Tako ugotovitve modeliranja območja s poenostavljeno geometrijo kot tudi ugotovitve, dobljene za Krško-Brežiško polje, kažejo enak trend vpliva spreminjajoče hrapavosti, ki kaže, da je s povečano hrapavostjo retenzije mogoče ugodno vplivati na znižanje konice VV valov in podaljševanje potovalnega časa. Absolutne vrednosti znižanja konice se s povečevanjem hrapavosti retenzije, predvsem pri ožjih VV valovih, povečujejo, vendar so relativne vrednosti glede na absolutno vrednost konice vhodnega hidrograma razmeroma majhne. Z višanjem konic VV valov in dolžino trajanja VV vala, ko je presežena pretočna sposobnost osnovne struge vodotoka, se relativni vpliv retenzije zmanjšuje. Z znižanjem konice v izhodnem prerezu se znižuje tudi vodostaj, s čimer se zmanjšuje poplavna nevarnost območij dolvodno. Kako izrazito znižanje konice vpliva na znižanje vodostajev dolvodno, je odvisno tudi od oblike pretočnega prereza struge in obvodnega prostora.

V retenziji povečana hrapavost retenzije zmanjšuje hitrosti vodnega toka, zaradi nižjih hitrosti vodnih tokov hitreje naraščajo vodostaji, posledično pa se zmanjšujejo količine vodne mase, ki se odlivajo v inundacijo. Kljub manjšim količinam vodne mase pa povprečne globine vode v retenziji naraščajo, zaradi česar se povečuje obseg poplavljenosti, spreminja pa se tudi prostorska razporeditev različnih globin vode v poplavljenih območjih. Na območju Krško-Brežiškega polja je bilo za VV val s 100-letno povratno dobo preverjeno tudi spreminjanje deleža površin glede na razrede kriterijev za določanje Kart razredov poplavne nevarnosti (KRPN). S povečevanjem hrapavosti retenzije se po 1. kriteriju delež območij z globinami nad 1,5 m povečuje, odstotek površin z globinami med 0,5 m in 1,5 m ostaja praktično nespremenjen, odstotek območij z globinami vode manjšimi od 0,5 m pa se zmanjša. Pri

spreminjanju deležev površin, ki se uvrščajo v posamezne razrede, pomembno vlogo igra topografija poplavnih površin. Medtem ko je dinamika spreminjanja površin po posameznih razredih razmeroma počasna, se s povečanjem hrapavosti izrazito hitro pod 1 odstotek zmanjša delež površin s hitrostmi vode pod 1 m/s, ki jih je treba po Pravilniku obravnavati še po 2. kriteriju.

Na obeh območjih modeliranja je bila preverjena tudi varianta, kjer je bila komunikacija med strugo in poplavnimi površinami omejena le na dva krajša odseka na gorvodnem in dolvodnem delu retenzije. Z omejitvijo komunikacije se zmanjša količina vodne mase, ki se prelije v retenzijo, s predelno steno pa se prekine tudi komunikacija vodnega toka vzdolž stika struge in retenzije. Poleg zmanjšanja dotekajočih količin vodne mase na inudacijo se je na ta način podaljšala pot vzporednih tokov, ki se pri varianti brez predelne stene delno vračajo v strugo že v srednjem delu obravnavanega odseka. Analiza na obeh območjih modeliranja kaže, da je mogoče doseči ugodnejši vpliv na znižanje konice v izhodnem prerezu, potovalni časi pa ostajajo podobni kot pri varianti brez predelne stene. Na območju Krško-Brežiškega polja se kljub manjši skupni količini dotekajoče vodne mase v retenzijo zaradi topografskih značilnosti poplavnih območij zgornjega dela retenzije skupna površina poplavljenih območij pri varianti s predelnima stenama poveča. Pri primerjavi površin po posameznih razredih 1. kriterija na območju Krško-Brežiškega polja se pokaže, da so pri majhni hrapavosti retenzije velikosti površin z globinami vode na retenziji nad 1,5 m pri obeh variantah komunikacije primerljive. Pri večjih hrapavostih retenzije pa so zaradi počasnejšega naraščanja vodostajev pri varianti s predelnima stenama, na retenziji površine z globinami vode nad 1,5 m bistveno manjše.

V primeru omejene komunikacije med strugo in retenzijo povečanje hrapavosti pri nižjih VV valovih, pri katerih se odlije le vrhnji, položnejši del vala, vpliva negativno. Zaradi predelne stene je odlivanje namreč zmanjšano že z omejitvijo območja komunikacije med strugo in retenzijo, dodatno pa se pojavi še negativen vpliv prevelike hrapavosti retenzije, ki onemogoča odlivanje dovolj velikih količin vodne mase v retenzijo, da bi odtočne razmere čez retenzijo lahko ugodno vplivale na znižanje konice.

Pri nižjih VV valovih se na obeh testnih območjih pri večji hrapavosti retenzije za varianto s predelno steno pojavlja možnost nastopa dvojnega vrha na hidrogramu v izhodnem prerezu. Dvojni vrh je posledica večjih razlik v hitrostih potovanja VV vala po strugi in po retenziji ter prekinjene komunikacije med strugo in retenzijo vzdolž osrednjega dela retenzije. Pojav bi se lahko kot zelo neugoden pokazal v fazi ukrepanja ob visokovodnih dogodkih, saj bi se dinamika pretokov VV vala v dolvodnih območjih spremenila glede na dinamiko VV vala v gorvodnih območjih. Za prehodom konice VV vala, ki potuje po strugi, bi se pojavilo novo povečanje pretoka in posledično zviševanje vodostajev zaradi praznjenja retenzije.

Pri modeliranju območja s poenostavljeno geometrijo je bil preverjen tudi vpliv lokalno povečane hrapavosti retenzije na količino prelite vodne mase v retenzijo, povečanje zadrževalnega časa in znižanje konice v izhodnem prerezu obravnavanega območja. Vpliv se je analiziral pri različnih variantah razporeditve in pri različnem odstotku površine retenzije s povečano hrapavostjo. Ugotovljeno je bilo, da je pri enakem odstotku površin z lokalno povečano hrapavostjo v različni obliki prečnih in vzdolžnih pasov mogoče doseči različno ugoden vpliv, pri čemer se prečni pasovi, enakomerno razporejeni čez celotno retenzijo, pokažejo kot najbolj ugodni, vzdolžni pasovi povečane hrapavosti pa imajo razmeroma majhen vpliv. Na ta način je potrjena 2. hipoteza, da je mogoče vsaj ohranjati ugodne učinke retenzije, s primerno porazdelitvijo povečane hidravlične hrapavosti (rabe prostora) pa tudi

izboljšati na način, ki ga pokažejo opravljene raziskave. Z izračuni je namreč dokazano, da je lahko z lokalno povečano hrapavostjo, s čimer se sicer poveča tudi povprečna hrapavost retenzije, dosežen enak učinek na znižanje konice, kot bi bil dosežen v primeru enake povprečne hrapavosti po celotni površini. Enake ugotovitve so bile ugotovljene tudi pri simuliranju postopnega spreminjanja obstoječega razmerja rabe prostora med gozdnimi in kmetijskimi površinami. Na praktičnem primeru Krško-Brežiškega polja, kjer pa ni šlo za pravilne oblike območij s povečano hrapavostjo, temveč se je upoštevala spremenjena raba po katastrskih parcelah. Tudi tu se je pokazalo, da je vpliv pri določenem razmerju med gozdnimi in kmetijskimi površinami enak kot pri enaki povprečni hrapavosti po celotni retenziji.

5.0 ZAKLJUČEK

Obvodni prostor in poplavne površine, predvsem na ravninskih območjih, predstavljajo velik razvojni potencial, hkrati pa obsežnejša poplavna območja s svojo zadrževalno sposobnostjo pomembno vplivajo na odtočni režim in poplavno varnost dolvodnih območij. Zaradi navzkrižnih interesov pri prostorskem načrtovanju, umeščanju objektov v prostor oziroma določanju daljnoročne namembnosti rabe in varovanja značilnosti prostora oziroma okolja je premišljena strategija razvoja prostora in posegov v vode zelo pomembna.

Trajnostna strategija razvoja prostora bi morala nedvomno vsebovati tudi celovito in sistematično analizo in obvladovanje poplavne nevarnosti ogroženih območij, upoštevanje tako gradbene kot negradbene ukrepe. Z gradbenimi zaščitnimi ukrepi, kot so visokovodni nasipi, regulacije, obtočni kanali itd., se vpliva na preusmerjanje in spreminjanje dinamike visokovodnih dogodkov ter na preprečitev neposredne poplavne škode. Negradbeni ukrepi za preventivo in zaščito pred škodljivim delovanjem voda pa so vezani predvsem na pripravo predpisov, usmeritev in načrtov prostorskega načrtovanja in na vzpostavitev sistemov napovedovanja, zgodnjega obveščanja in sistemov podpore odločanja v času dogodkov. Z negradbenimi ukrepi se v manjši meri vpliva na samo nevarnost, pomembnejše pa na zmanjšanje ranljivosti, predvsem pa se želi vzpostaviti sistem celovitega in trajnega obvladovanja poplavne nevarnosti in tveganja. Učinkovito in celovito načrtovanje rabe prostora na področju obvladovanja poplavne nevarnosti zahteva tudi ohranjanje, izboljšanje ali celo ponovno vzpostavitev interakcije med strugo in poplavnimi površinami ter tako z izkoriščanjem retenzijske sposobnosti poplavnih površin vplivati na zmanjševanje poplavne nevarnosti dolvodnih območij. Na zadrževalno sposobnost poplavnih območij pomembno vplivajo že same topografske značilnosti, delno pa je nanjo mogoče vplivati tudi s primerno rabo prostora, ki lahko obsega tudi različne kmetijske in rekreacijske dejavnosti.

Z obsežnim hidravličnim modeliranjem je bila opravljena analiza vpliva rabe poplavnih površin na potovanje VV valov čez obravnavano območje. Z izbranimi indikatorji, kot so potovalni čas konice VV skozi obravnavan odsek, znižanje konice VV vala v izhodnem prerezu, obseg površin poplavljenih območij, hitrosti in globine vode v retenziji itd., je bil natančneje prikazan mehanizem, ki pri naravnih vodotokih z obsežnimi retenzijskimi površinami ugodno vpliva na blažitev intenzitete VV valov. Na retenzijsko sposobnost poplavnih površin poleg velikosti retenzije v primerjavi z volumnom visokovodnega vala nad pretočno sposobnostjo struge vplivajo številni dejavniki, med katerimi prevladujejo topografske lastnosti obrežnega dela vodotoka in poplavnih površin, raba prostora, višina in gostota vegetacije itd. Cilj dela je bil analizirati vpliv rabe prostora, ki neposredno, v obliki upora vodnemu toku, vpliva na energijske izgube vzdolž toka vode. Pri hidravličnih modelih so linijske trenjske izgube zajete s koeficientom hrapavosti n_g . Pri hidravlični analizi, izvedeni v sklopu magistrskega dela, vrednosti koeficienta hrapavosti n_g niso bile definirane le s trenutno vrsto rabe prostora, temveč so bile upoštevane vrednosti koeficientov v celotnem razponu realnih vrednosti za poplavna območja, ki se uporabljajo v praksi.

Hidravlična analiza je bila razdeljena na dva večja sklopa. V prvem sklopu so bili za nabor VV valov, pri katerih je vpliv retenzije na preoblikovanje znaten, izvedeni izračuni in analize poplavljanja na teoretičnem območju, z izbrano poenostavljeno geometrijo. Namen modeliranja območja s poenostavljeno geometrijo je bil izločiti vpliv topografije na potek procesa komunikacije vode med strugo in retenzijo ter na odtočne razmere čez retenzijo. Predvsem pri topografsko bolj kompleksni topografiji obrežnega dela vodotoka in poplavnih površin ima topografija lahko pomembnejši vpliv od rabe prostora, saj pomembno oblikuje

potek, smeri in jakost vodnih tokov. Ugotovitve, ki so izhajale iz analize rezultatov na teoretičnem območju modeliranja, so bile nato preverjene še na območju Krško-Brežiškega polja, kjer pomembno vlogo pri odtočnih razmerah igrajo tudi drugi dejavniki, zaradi česar je težje pripisati spremembe tokovnih razmer samo spreminjanju enega parametra (rabe prostora, opisane s koeficientom hrapavosti).

V prvi fazi analize se je na obeh testnih območjih koeficiente hrapavosti izbiralo v obsegu vrednosti koeficienta hrapavosti n_g , ki so bile v razponu realnih oziroma v številni strokovni literaturi priporočljivih vrednosti koeficienta hrapavosti n_g za poplavna območja. Na teoretičnem območju modeliranja je bil v drugi fazi preverjen še vpliv geometrijsko sistematično postavljenih območij s spremenljivo lokalno hrapavostjo. Na območju odlivanja vodne mase v retenzijo se je z nižjo hrapavostjo skušalo doseči večji odliv, na transportnem delu pa z lokalno povečano hrapavostjo povečati zadrževalno sposobnost. Pri tem je bil z različnim deležem površin s povečano hrapavostjo preverjen vpliv številnih variacij prečnih in vzdolžnih prog, šahovnic in posamičnih območij s povečano hrapavostjo vzdolž toka vode, izmenjujoče razporejenih po obeh straneh retenzije. Na območju Krško-Brežiškega polja pa za analize v drugi fazi lokalno povečana hrapavost ni bila oblikovana v pravilne oblike kot pri modeliranju območja s poenostavljeno geometrijo, temveč so se s postopkom umerjanja najprej za obstoječo rabo prostora določile vrednosti koeficientov hrapavosti n_g po dejanskih parcelah. Ker je praktično celotno območje, ki je poplavljeno pri obravnavanih VV valovih, prekrito s kmetijskimi in z gozdom poraslimi površinami, se je nato preveril vpliv procesa povečevanja oz. zmanjševanja deleža posamezne rabe prostora. Pri obeh območjih modeliranja se je preverila še varianta, kjer je bila komunikacija med strugo in retenzijo omejena le na dva krajša odseka na gorvodnem in dolvodnem delu retenzije. Ker je bil glavni cilj preveriti vpliv hrapavosti retenzije, je bila kljub številnim možnostim na posameznem testnem območju preverjena le po ena varianta geometrijskih izmer komunikacije med strugo in retenzijo. Namen omejitev komunikacije med strugo in retenzijo je bil preveriti, ali je možno s prekinitvijo povezave med strugo in retenzijo povečati vpliv odtočnih razmer na inundaciji na zadrževalno sposobnost in tako povečati ugoden vpliv retenzijskega prostora na preoblikovanje VV valov. Vpliv geometrije dotočne in iztočne geometrije je tako predmet nadaljnjih raziskav.

Analiza je potrdila, da je s povečano hrapavostjo retenzije mogoče ugodno vplivati na znižanje konice VV valov in podaljševanje potovalnega časa ter s tem na poplavno varnost dolvodnih območij. Podaljšanje potovalnega časa konice čez obravnavane vrste retenzije pomeni za dolvodna območja podaljšanje razpoložljivega časa za pripravo ukrepov in zaščite za omilitev negativnih posledic visokovodnih dogodkov, znižanje konice pa tudi zmanjšanje intenzitete visokovodnega dogodka. Hkrati je z analizami prikazano, da se absolutne vrednosti znižanja konice s povečevanjem hrapavosti retenzije sicer povečujejo, vendar so relativne vrednosti znižanja glede na veliko absolutno vrednost konice vhodnega hidrograma (za Savo) razmeroma majhne. Tako absolutne kot tudi relativne vrednosti znižanja konice se zmanjšuje z višanjem konic VV valov in dolžino trajanja VV vala, ko je presežena pretočna sposobnost osnovne struge vodotoka.

Povečana hrapavost torej ugodno vpliva na poplavno varnost dolvodnih območij, vendar je treba upoštevati, da se ob tem spreminjajo tudi razmere v retenziji. V njej se povečana hrapavost retenzije odraža z zmanjšanjem hitrosti vodnega toka in povišanjem vodostajev, kar povečuje obseg in stopnjo poplavne nevarnosti, spreminja pa se tudi prostorska razporeditev poplavljenih območij. Na območju Krško-Brežiškega polja, kjer je bilo za VV val s 100-letno povratno dobo preverjeno spreminjanje deleža površin, uvrščenih glede na razrede kriterijev

za določanje KRPN, se pokaže, da se s povečanjem hrapavosti retenzije delež območij z globinami nad 1,5 m (velika nevarnost po 1. kriteriju KRPN) povečuje, odstotek površin z globinami med 0,5 m in 1,5 m (srednja nevarnost po 1. kriteriju KRPN) ostaja praktično nespremenjen, odstotek območij z globinami vode manjšimi od 0,5 m (majhna nevarnost po 1. kriteriju KRPN) pa se zmanjša. Seveda je treba upoštevati, da pri spreminjanju deležev površin, ki se uvrščajo v posamezne razrede, pomembno vlogo igra topografija poplavnih površin. Pozitiven vpliv povečane hrapavosti retenzije se kaže pri določanju stopnje nevarnosti po 2. kriteriju, saj se s povečanjem hrapavosti izrazito hitro, pod 1 odstotek zmanjša delež površin s hitrostmi vode nad 1 m/s. Vedeti je treba, da je na ravninskih odsekih vodotokov, kjer se pojavlja poplavljanje, navadno prevladujoč 1. kriterij. Kot negativni pojav povečanje hrapavosti vpliva tudi pri širši obliki VV valov, pri katerih se v retenzijo odlije le vršni, položnejši del vala. Velika hrapavost retenzije povzroča hitro naraščanje vodostajev v retenziji glede na naraščanje vodostaja v strugi, zaradi česar ni odlivanja dovolj velikih količin vodne mase v retenzijo, da bi odtočne razmere po retenziji ugodno vplivale na znižanje konice dolvodno.

Hidravlična analiza za varianti z omejeno komunikacijo med strugo in poplavnimi površinami, ki obsega le dva krajša odseka na gorvodnem in dolvodnem delu retenzije, kaže, da je mogoče kljub zmanjšanju skupne količine dotekajoče vodne mase v retenzijo doseči ugodnejši vpliv na znižanje konice v izhodnem prerezu, pri tem pa potovalni časi ostajajo podobni kot pri varianti brez predelne stene. Velikost poplavljenih območij je pri varianti z omejeno komunikacijo odvisna predvsem od topografije na območjih odlivanja vodne mase iz struge. Na območju Krško-Brežiškega polja se namreč kljub manjši skupni količini vodne mase v retenziji zaradi topografskih značilnosti poplavnih območij zgornjega dela retenzije (širša retenzija) skupna površina poplavljenih območij pri varianti s predelnima stenama poveča. Pri primerjavi površin po posameznih razredih 1. kriterija se na območju Krško-Brežiškega polja pokaže, da so pri majhni hrapavosti retenzije velikosti površin z globinami vode na retenziji nad 1,5 m pri obeh variantah komunikacije primerljive. Pri večjih hrapavostih retenzije pa se pri varianti z omejeno komunikacijo v inudacijo odlijejo manjše količine vodne mase, zaradi česar vodostaji naraščajo počasneje, enako so tudi velikosti površin z globinami vode na retenziji nad 1,5 m bistveno manjše. Neugoden vpliv omejene komunikacije se pri nižjih VV valovih lahko pojavi zaradi možnega nastopa dvojnega vrha na hidrogramu v izhodnem prerezu, ki nastane zaradi večjih razlik v hitrostih potovanja VV vala po strugi in po retenziji, ter prekinjene komunikacije med strugo in retenzijo vzdolž osrednjega dela retenzije. Poudariti je treba, da je bila analizirana le ena varianta razmerja dolžine območja razlivanja glede na dolžino poplavnega prostora, ena varianta nadmorske višine prelivnega roba v strugi ipd. Z modifikacijami posameznih dimenzij oziroma celo z morebitno vključitvijo objektov s hidromehansko opremo za regulacijo odlivanja vodne mase v retenzijo oz. vračanje nazaj v strugo pa bi bilo mogoče doseči še ugodnejši vpliv. Analiza takšnih modifikacij ni bila predmet tega magistrskega dela, rezultati obravnavane variante pa kažejo možno področje nadaljnjih raziskav.

Analiza različnih porazdelitev lokalno povečane hrapavosti retenzije pokaže, da je pri enakem odstotku deleža z večjo hrapavostjo mogoče doseči različno ugoden vpliv. Vzdolžni pasovi s povečano hrapavostjo imajo razmeroma majhen vpliv v primerjavi z razporeditvijo na prečne pasove, enakomerno razporejene čez celotno retenzijo. Pri različni formaciji prečnih pasov se pokaže, da je z lokalno povečano hrapavostjo vpliv retenzije na znižanje konice podoben, kot je v primeru enake povprečne hrapavosti po celotni površini. Da je retenzijska sposobnost v večini primerov odvisna od povprečne hrapavosti retenzije, je bilo ugotovljeno tudi pri analizi postopnega spreminjanja obstoječega razmerja med gozdnimi in kmetijskimi površinami.

Čeprav ni šlo za pravilne oblike porazdelitev območij s povečano hrapavostjo, saj se je predvidela enaka raba na posamezni parceli, se je pokazalo, da je vpliv pri izbranem razmerju med gozdnimi in kmetijskimi površinami podoben kot pri enaki povprečni hrapavosti po celotni retenziji. Ta ugotovitev je pomembna za primere v praksi, ko je treba zagotoviti primerno rabo prostora, da se (na daljši rok) zagotavljajo lastnosti odtočnega režima – npr. funkcije Krško-Brežiškega polja za ohranjanje odtočnega režima na državni meji.

Na podlagi hidravlične analize, opravljene v sklopu magistrskega dela, je prikazano, kakšne vplive in trende ima spreminjanje (kmetijske) rabe prostora in da ima hrapavost retenzijske površine pomembno vlogo pri potovanju in preoblikovanju VV valov. Na ohranjanje oz. izboljšanje zadrževalne funkcije retenzije, ki je neposredno povezana z rabo prostora, vpliva mehanizem komunikacije med strugo in poplavnimi površinami ter odtočne razmere na retenziji. Pri tem je treba upoštevati, da ima hrapavost retenzije različno ugoden vpliv pri različnih VV valovih. Hrapavost retenzije namenoma ni bila definirana z vrsto vegetacije, ki so primerne za povečanje upora vodnemu toku, saj takšna raziskava sodi bolj na kmetijsko/gozdarsko področje. Upor, ki ga vodnemu toku povzročajo posamezne vrste vegetacije, se lahko namreč bistveno spreminja glede na globino in hitrost vodnega toka. Prav tako se, predvsem na kmetijskih zemljiščih, razmere bistveno spreminjajo v različnih vegetacijskih obdobjih. Sezonski vpliv zarasti, odpornost posameznih vrst na sile vodnega toka ipd. prav tako odpirajo nove raziskovalne izzive.

Kljub povečanju retenzijske sposobnosti s povečanjem hrapavosti retenzije, s čimer se izboljšajo razmere na dolvodnih območjih, je treba upoštevati, da se posledično lahko pojavi negativen vpliv na poplavno nevarnost znotraj retenzije. Zato je treba pred implementacijo posegov za zmanjšanje poplavne nevarnosti dolvodnih območij natančneje določiti srednje in daljnoročne namembnosti posameznih območij na retenziji, nato pa te lastnosti ohranjati. Prav tako je treba opraviti celovito presojo vplivov spremenjenih odtočnih razmer na dejavnosti, infrastrukturo, poselitev itd., ki se trenutno na območju vpliva v retenziji nahajajo, oziroma preveriti vpliv oz. podati pogoje za gradnjo, izvajanje dejavnosti itd., ki se v prostoru načrtujejo. Rezultati raziskav pomenijo pomembne strokovne podlage za pripravo konkretnih rešitev oziroma smernic, ki jih bo mogoče upoštevati pri prostorskem razvoju obravnavanega območja, saj omogočajo tako za primere, kjer se zahteva ohranjanje zadrževalne sposobnosti, kot tudi tam, kjer se načrtuje povečanje zadrževalnega učinka, iskanje primernih rešitev za doseg ciljev, ki bodo določeni v strategiji prostorskega razvoja poplavnih območij.

6.0 POVZETEK

Tako v Sloveniji kot tudi drugod po svetu poplave sodijo med naravne nesreče, ki letno povzročijo največ gmotne škode in prizadenejo veliko število prebivalstva. Poplave so od nekdanj prisoten pojav v obvodnem prostoru, vendar ta prostor zaradi ugodnih geografskih lastnosti predstavlja tudi velik razvojni potencial. Zato se pri prostorskem razvoju pojavljajo vse večji pritiski po koriščenju ravninskih območij ob vodotokih za različne gospodarske, športne in rekreacijske dejavnosti, gradnjo stanovanjskih sosesk itd. Z visoko vrednimi posegi in izvajanjem dejavnosti, občutljivih na škodljivo delovanje voda na poplavnih površinah, se povečuje pričakovana poplavna škoda na teh območjih. Za zmanjšanje poplavne nevarnosti se kot omilitveni ukrep pogosto načrtujejo gradbeni posegi (visokovodni nasipi itd.), s katerimi se spreminja odtočni režim, pri tem pa se poplavno nevarnost preusmerja na druga območja. S protipoplavnimi ureditvami se spremeni tudi zadrževalna sposobnost poplavnih površin, ki ob visokovodnih dogodkih pomembno vpliva na znižanje konice, podaljševanje potovalnega časa visokovodnega vala (v nadaljevanju: VV vala) in posledično na poplavno varnost dolvodnih območij. Trajnostno in uravnoteženo načrtovanje rabe prostora, usklajeno z gospodarskimi, okoljevarstvenimi in socialnimi interesi, mora zato vsebovati tudi obvladovanje poplavne nevarnosti z ohranjanjem oz. izboljšanjem retenzijske sposobnosti poplavnih območij.

Zadrževalna sposobnost ravninskih poplavnih območij je odvisna predvsem od velikosti in topografije poplavnih površin, topografije obrežnega dela vodotoka, delno je nanjo mogoče vplivati tudi z rabo prostora. Topografija obrežnega dela vodotoka in poplavnih površin vplivata tudi na pretok, pri katerem se prične poplavljanje, količino vodne mase, odlite v retenzijski prostor, oblikovanje vzporednih vodnih tokov čez retenzijo in na obseg poplavljenosti. Raba prostora vpliva predvsem na porazdelitev hitrosti, globine in smeri vodnega toka ter posledično na zadrževalno sposobnost retenzijskega prostora. Za analizo vpliva rabe prostora na zadrževalno sposobnost so pomembni predvsem namembnost površin (kmetijske površine, gozdovi itd.), prisotnost, višina in gostota vegetacije v posameznih vegetacijskih obdobjih ter drugi dejavniki, ki vplivajo na upor vodnemu toku in posledično na odtočne razmere.

S hidravlično analizo je preverjen vpliv rabe prostora retenzijskih površin (upoštevane s koeficientom hrapavosti) na odtočne razmere na retenziji in potovanje VV valov čez obravnavano območje. Pri tem je bil z izbranimi indikatorji (konica VV vala v izhodnem prerezu, potovalni čas itd.) preverjen vpliv spreminjajoče se hrapavosti na razmere na dolvodnih območjih. Z indikatorji, kot so površina poplavljenih območij, hitrosti in globine vode v retenziji itd., so bile analizirane razmere na obravnavanih retenzijskih območjih. Vrednosti koeficienta hrapavosti niso bile neposredno vezane na vrste vegetacije, saj se lahko upor posamezne vrste spreminja tako z globino in hitrostjo vode kot tudi čez vegetacijska obdobja, temveč se je uporabila efektivna, hidravlična hrapavost.

Hidravlična analiza je bila izvedena v dveh sklopih. V prvem sklopu se je izvajala analiza na teoretičnem območju s poenostavljeno geometrijo. Ta omogoča omejitev vpliva topografskih značilnosti obrežnega dela vodotoka in retenzije na komunikacijo vode med strugo in

retenzijo ter na odtočne razmere na poplavljenih območjih. Ugotovitve z območja modeliranja s poenostavljeno geometrijo so bile v drugem sklopu preverjene še na območju Krško-Brežiškega polja, ki predstavlja pomemben retenzijski prostor na odseku Save med Krškim in državno mejo z Republiko Hrvaško.

Na obeh območjih modeliranja so bili v prvem delu izvedeni izračuni razpona realnih vrednosti koeficienta hrapavosti n_g za poplavna območja, povzeti iz literature oz. lastnih raziskav. V drugem delu izračunov na območju modeliranja s poenostavljeno geometrijo je bil preverjen vpliv lokalno povečane hrapavosti, pri čemer se je sistematično spreminjala tako prostorska razporeditev kot tudi delež površin s povečano hrapavostjo. V drugem sklopu izračunov na območju Krško-Brežiškega polja je bil po določitvi koeficientov hrapavosti na retenziji za obstoječo rabo prostora preverjen vpliv spreminjanja obstoječega razmerja kmetijskih in gozdnih površin. Tako na teoretičnem območju modeliranja kot tudi na območju Krško-Brežiškega polja je bila izvedena tudi analiza vpliva spreminjajoče se hrapavosti retenzije na potovanje VV valov za primer vmesne stene vzdolž retenzije med strugo in poplavnimi površinami. Ta omejuje razlivanje vodne mase v retenzijski prostor in vračanje nazaj v strugo. Na ta način je bilo analizirano, ali se kljub manjšemu dotekanju vodne mase v retenzijo s steno dosega enake zadrževalne sposobnosti retenzijskega prostora.

Rezultati hidravlične analize so pokazali, kako je s spreminjajočo hrapavostjo retenzijskih površin mogoče vplivati na komunikacijo vodne mase med strugo in retenzijo ter na odtočne razmere čez poplavljenе površine. S povečanjem hidravlične hrapavosti retenzijskih površin se na njih znižujejo hitrosti vodnega toka in zvišujejo vodostaji, posledično pa se zmanjšujejo tudi v retenzijo odlite količine vodne mase. Z znižanjem hitrosti vodnega toka na retenzijskih površinah se povečuje njihova zadrževalna sposobnost, ki ugodno vpliva na odtočne razmere ter tako znižuje konico VV vala in podaljšuje potovalni čas. Kljub temu ima lahko povečana hrapavost retenzijskega prostora tudi negativen vpliv pri nižjih VV valovih, pri katerih se v retenzijo odlije le vršni, položnejši del vala. Pri nižjih VV valovih se namreč pri večji hrapavosti retenzijskega prostora vanj ne odliha dovolj velika vodna masa, da bi odtočne razmere čez retenzijo lahko ugodno vplivale na znižanje njegove konice. Prav tako se relativne vrednosti znižanja konice zmanjšujejo z višanjem konic VV valov in njegovo dolžino trajanja nad pretočno sposobnostjo osnovne struge vodotoka.

S povečanjem hrapavosti retenzijskih površin se razmere spreminjajo tudi na njih. Kljub manjšim dotokom v retenzijo pri večji hrapavosti se vodostaji na poplavljenih površinah zvišujejo. Spremenjeno hitrostno polje in polje globin na retenziji posledično vpliva na povečanje obsega poplavljenih površin, stopnjo poplavne nevarnosti in tudi na prostorsko razporeditev poplavljenih območij.

Analize pokažejo pozitiven vpliv tako na razmere dolvodno kot tudi na razmere v retenziji, ki ju je mogoče doseči z omejitvijo komunikacije med strugo in retenzijskimi površinami. Izračuni na obeh območjih modeliranja pokažejo, da se z omejitvijo komunikacije vode med strugo in retenzijskimi površinami na dva krajša odseka na gorvodnem in dolvodnem odseku

zmanjšujejo količine vodne mase v retenziji, kljub temu pa je vpliv odtočnih razmer čez njo ugodnejši. Negativen vpliv povečanja hrapavosti retenzijskih površin se pojavi ponovno le pri nižjih poplavnih valovih. Zaradi predelne stene je odlivanje zmanjšano z omejitvijo območja komunikacije med strugo in retenzijskim prostorom, dodatno pa se zmanjša še zaradi njegove prevelike hrapavosti. Ta onemogoča odlivanje dovolj velikih količin vodne mase v retenzijo, da bi odtočne razmere čez njo lahko ugodno vplivale na znižanje konice VV vala.

Izračuni vpliva lokalnih območij s povečano hrapavostjo, oblikovanih v različne porazdelitve, pokažejo, da je pri enakem deležu površin s povečano hrapavostjo mogoče doseči različno ugoden vpliv. Pri prečnih pasovih s povečano hrapavostjo je vpliv bolj ugoden kot pri vzdolžnih pasovih. Pri prečnih pasovih je vpliv pri izbranem razmerju podoben kot pri enaki povprečni hrapavosti po celotni retenziji. Enake ugotovitve kažejo tudi rezultati na praktičnem primeru Krško-Brežiškega polja pri spreminjanju razmerja med gozdnimi in kmetijskimi površinami.

Rezultati kažejo vpliv rabe prostora na potovanje in preoblikovanje hidrograma poplavnih valov, komunikacijo med strugo in poplavnimi površinami ter na odtočne razmere na retenziji in območjih dolvodno. Pomembni so za strategijo razvoja oz. ohranjanja lastnosti prostora in načrtovanja posegov v obvodni prostor. Pri posegih, ki bi lahko imeli čezmejni vpliv, pa rezultati analiz omogočajo ugotavljanje vpliva rabe prostora na dolvodni (mejni, merodajni) prerez.

7.0 SUMMARY

In Slovenia as well as in the rest of the world floods are among the most common natural disasters that cause most of damage and affect a large number of the population every year. Floods have always been present in the riparian areas. However, due to their favorable geographical features these areas present a great development potential. Therefore, there is an increasing demand for exploitation of lowland areas along streams for various purposes (i. e. economic, sports and recreational activities, construction of residential neighborhoods, etc.) in the field of spatial development. However, interventions of high value as well as activities sensitive to high water carried out on floodplains areas increase the expected flood damage. To reduce the risk in these areas, infrastructure facilities, such as embankments, etc., are being planned as mitigation measures. Such measures can change the runoff regime and divert the hazard of flooding to other areas. Moreover, construction of levees changes the retention capacity of floodplains areas, which can have a significant impact on the peak attenuation and propagation time extension of flood waves and consequently on the flood safety of the downstream areas. Therefore, sustainable land-use planning in line with economic, environmental and social interests should – among other things – include the management of flood risk by preserving or improving retention capacity of existing flood plains.

The retention capacity of floodplain areas depends largely on the size and topography of floodplains as well as topography of their riparian areas. However, the land use is another element that has influence on the retention capacity. The topography of the riparian and floodplains areas influences the discharge capacity of the river channel, amount of water volume spilled on the floodplains, formation of parallel water flows through the retention area as well as the extent of the flooding. The land use, on the other hand, influences the velocity and depth distribution, direction of water flow and consequently the retention capacity. To analyze the impact of land use on the retention capacity several factors need to be taken into account, such as the land use itself (agricultural land, forests, etc.), presence, height and density of vegetation in each vegetation period and all other factors that can have an effect on the resistance to the water stream and consequently the runoff regime.

The hydraulic analysis has been used to determine the influence of land use in the retention area (presented by roughness coefficients) on the runoff regime and propagation time of flood waves over the studied area. In the analysis selected indicators (e.g. peak of the flood wave in the outlet section, propagation time, etc.) were used to test the influence of changing roughness on the downstream areas. Indicators, such as the extent of the flooded area, velocities and depth of water on the inundation etc. were used to analyze the conditions on the present retention areas. The values of the roughness coefficient have not been directly linked to the type of vegetation, because the resistance of different vegetation types can vary by the water depth and velocity and also by different vegetation periods. Therefore, only effective hydraulic roughness was used.

The hydraulic analysis was carried out in two parts. The first part includes analysis of the theoretical area with simplified geometry in order to limit the impact of topographical

characteristics of the riparian and retention areas on the communication of water between the river channel and the retention area and also on the runoff regime. The findings from this area were tested during the second part of the hydraulic analysis on the plain Krško-Brežiško polje. This plain is an important retention area next to the Sava River, between the town of Krško and the state border with the Republic of Croatia.

In the first phase calculations were carried out on both of the modeling areas in order to determine the range of possible values of the roughness coefficients n_g for flood plains found in the literature or obtained from own researches. In the second phase of the analysis of the simplified modeling area the impact of locally increased roughness was analyzed with systematical variation of the roughness distribution and percentage of areas with increased roughness. Furthermore, after the definition of the roughness coefficients on the retention areas for the current state, the impact of the ratio between the size of agricultural and woodland areas was analyzed on the modeling area of the plain Krško-Brežiško polje. Thus, an analysis of the impact of varying roughness of the retention areas on the flood wave propagation was carried out on the theoretical modeling area as well as on the above-mentioned plain. This was done for the case with modeling of the partition wall along the retention, between river channel and floodplains, to prevent the spilling of water mass on the retention area and back into the river channel.

The results of the hydraulic analysis have showed the effects of varying roughness on the communication of water masses between the river channel and retention area as well as on the runoff regime. Increasing the hydraulic roughness, the velocities of the water flow decreases while the water levels on the retention areas increase, what leads to a smaller amount of the overflowed water from the river channel to the retention areas. Reducing the velocities of the water flow to the retention area, its retention capacity increases. An increased retention capacity has a positive impact on the runoff regime, increasing the peak attenuation and propagation time. Nevertheless, the increased roughness of the flood plains can have a negative impact in an instance of lower flood waves. In such an instance only the upper peak of the flood wave is spilled to the retention area, reducing the amount of water that spilled into it. As a consequence, there is no positive impact on the peak attenuation. Moreover, the relative peak attenuation values decrease with increasing peak and length of the flood wave above bank-full discharge of the stream.

An increase in the roughness changes the runoff regime on the retention area. Despite a smaller inflow to the retention area, the water surface elevation in the retention area increases. Changes in the water velocity and depth fields on the retention area influence the extent of the flooded area, level of flood hazard as well as spatial distribution of the flooded areas.

The analyses show a positive impact of limiting the communication of water between the channel and retention area on the downstream runoff regime as well as on the runoff regime on the retention area. Calculations for both modeling areas show that limiting the communication of water between the channel and retention area on two shorter sections in the upstream and downstream section, the quantity of water mass on the retention area decreases.

However, this has a positive impact on the runoff regime. A negative impact of the increased roughness of the retention area, on the other hand, appears once again in the presence of lower flood waves due to two effects. Firstly, the partition wall reduces the water spilling between the channel and retention area, what is a consequence of a spatially limited communication between the two of them. Secondly, the increased roughness of the retention area limits the water flow onto it, decreasing the positive impact of the runoff regime on the flood wave attenuation.

The analysis of the influence of variously distributed areas with increased roughness shows that with the same proportion of areas with increased roughness, various positive effects can be achieved. In the presence of traversal strips with increased roughness, the effect is more positive than in the presence of longitudinal strips. When traversal strips are present, the impact of the selected proportion is similar as in the presence of the same average roughness over the entire retention area. The same findings have also been observed on the practical case of the plain Krško-Brežiško polje, where the proportion between forest and agricultural areas was changed.

The results show influence of the land use on the propagation and transformation of flood wave hydrograph, on communication between the channel and floodplains and on runoff regime on retention and downstream areas. This is especially important for the development strategy, environmental preservation and land use planning of the riparian areas. Moreover, when land use interventions with a possible cross-border impact are planned, these results can be useful for assessment of the downstream (border, relevant) section.

VIRI IN LITERATURA

Abbott, M.B., McCowan, A. and Warren, I.R., 1981. Numerical Modelling of Free-Surface Flows that are two-dimensional in Plan. Transport Models for Inland and Coastal Water. Symposium on Predictive Ability. ZDA, New York, Academic Press: 222-283.

Andersen, B. G., Rutherford, I.D., Western, A.W. 2006. An analysis of the influence of riparian vegetation on the propagation of flood waves. Environmental Modelling & Software 21, 9: 1290-1296.

Aronica, G., Tucciarelli, T., Nasello, C. 1998. 2D Multilevel Model for Flood Wave Propagation in Flood in Affected Areas. Journal of Water Resources Planning and Management 124, 4: 210-217.

Brilly, M., Mikoš, M., Šraj, M. 1999. Osnove hidrologije, Univerzitetni učbenik. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 309 str.

Brilly, M., Šraj, M. 2005. Vodne ujme: varstvo pred poplavami, erozijo in plazovi. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 186 str.

Bullock, C. and Acreman, M., 2003. The Role of Wetlands in the Hydrological Cycle. Hydrology and Earth System Sciences 7, 3: 358-389.

Burdziej, J., 2003. GIS and 3-Dimensional Digital Terrain Modeling. Geo-Information System course. Poland, Torun, Nicholas Copernicus university: 15 str.

Chan-Ji, L., Chang-Ling, L., Yeu-Zen, L. 2000. Experiments on Flood-Wave Propagation in Compound Channel. Journal of Hydraulic Engineering 126, 7: 492-501.

Chanson, H. 1999. The Hydraulics of Open Channel Flow. London, Hodder Headline: 650 str.

Chanson, H. 2009. Development of the Bélanger Equation and Backwater Equation by Jean-Baptiste Bélanger (1828). Journal of Hydraulic Engineering 135: 159–163.

Chow, V. T. 1959. Open channel hydraulics. New York, McGraw-Hill, Inc.: 680 str.

De Doncker, L., Troch, P., Verhoeven, R., Bal, K., Meire, P., Quintelier, J. 2009. Determination of the Manning roughness coefficient influenced by vegetation in the river Aa and Biebrza river. Environmental Fluid Mechanics 9: 549-567.

DHD modeliranje, projektiranje in meritve v hidrotehniko.
<http://www.dhd.si> (21. 1. 2013)

DHI, 2012. MIKE 11 – a Modelling System for Rivers and Channels. User Guide. Hørsholm, Danish hydraulic institute: 544.

DHI, 2012b. MIKE 21 flow model – Hydrodynamic Module. Scientific Documentation. Hørsholm, Danish hydraulic institute: 122 str.

DHI, 2012c. MIKE FLOOD, 1D-2D Modeling. User Manual. Hørsholm, Danish hydraulic institute: 160 str.

Direktiva 2007/60/ES evropskega parlamenta in sveta o oceni in obvladovanju poplavne ogroženosti (krajše: Poplavna direktiva). 2007. Bruselj, Evropski parlament in svet evropske unije.

Državna topografska karta, merila 1:50.000. 2010. Ljubljana, Geodetska uprava Republike Slovenije (Javne informacije Slovenije).

Geodetski posnetek prečnih profilov reke Save v odseku od meje s Hrvaško do Krškega. 2007. Ljubljana, Geodetski biro Iztok Slatinšek s.p.

Hall, J. W., Tarantola, S., Bates, P., and Horritt, M. 2005. Distributed Sensitivity Analysis of Flood Inundation Model Calibration. *Journal of Hydraulic Engineering* 131, 2: 117-126.

Helmio, T., 2002. Unsteady 1D flow model of compound channel with vegetated floodplains. *Journal of Hydrology* 269, 1-2: 89-99.

Hidravlična modelna preiskava jezu na Savi za NE Krško v merilu 1:35. 1976. Ljubljana, Vodogradbeni laboratorij.

Hill, C. J. 2010. The role of floodplains on the propagation of land management signals in the Vale of York. Durham, Durham University: 274 str.

Hočevar, M. 2009. Tehnične meritve. Študijsko gradivo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, 48 str.

Hubbard, M., E., On the accuracy of one-dimensional models of steady converging/diverging open channel flows. *International journal for numerical methods in fluids* 35: 785-808.

Huthoff, F., 2007. Modeling Hydraulic Resistance of Floodplain Vegetation. Lelystad, Netherlands, University of Twente: 171 str.

Hydraulik naturnaher Fließgewässer, Teil 2. 2002. Karlsruhe, Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg: 213 str.

Jecl, R., Kramer, J., Podlogar, G. 2010. Uporaba akustičnega Dopplerjevega merilnika pretokov (ADMP) za analizo lebdečih plavin v rekah. 21. Mišičev vodarski dan: 174-181.

Kolbezen, M., Pristov, J. 1998. Površinski vodotoki in vodna bilanca Slovenije. Ljubljana, Ministrstvo za okolje in prostor, Hidrometeorološki zavod Slovenije: 98 str.

Leopardi, A., Oliveri, E., Greco, M. 2002. 2D Modeling of Floods to Map Risk-Prone Areas. *Journal of water resources planning and management* 128, 3: 168-178.

Leopold, L. B. 1994. Flood hydrology and the floodplain. *Journal of Contemporary Water Research and Education* 94-95: 11-14.

Mapping the Zone – Improving Flood Map Accuracy. 2009. ZDA, The National Research Council. National Academic Press: 136 str.

Mays L. W. (Editor in Chief) in drugi. 1999. Hydraulic design handbook. New York, McGraw-Hill: 1024 str.

Medsebojni vplivi infrastrukturnih in energetskih ureditev na spodnji Savi v času izrednih hidroloških dogodkov, Določitev sintetičnih poplavnih valov dolgih povratnih dob. 2005. Ljubljana, Inženiring za vode.

Mertens, W. 2006. Hydraulisch-sedimentologische Berechnungsverfahren naturnah gestalteter Fließgewässer – Berechnungsverfahren für die Ingenieurpraxis. Hennef, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall: 59 str.

Mlačnik, J., Rodič, P., Novak, G., Vošnjak, S., Steinman, F., Rak, G., Šantl, S., Müller, M., Ciuha, D. 2011. Izvedba hibridnih hidravličnih modelov za območje spodnje vode HE Krško, območje HE Brežice in območje HE Mokrice, Hibridni hidravlični model območja HE Brežice, končno poročilo. Ljubljana, Inštitut za hidravlične raziskave: 57 str.

Mlačnik, J., Rodič, P., Novak, G., Vošnjak, S., Steinman, F., Rak, G., Šantl, S., Müller, M., Ciuha, D. 2012. Izvedba hibridnih hidravličnih modelov za območje spodnje vode HE Krško, območje HE Brežice in območje HE Mokrice, Hibridni hidravlični model območja HE Mokrice, končno poročilo. Ljubljana, Inštitut za hidravlične raziskave: 54 str.

Müller, M., 2009. Vpliv zarasti na visokovodne razmere pri 2D hidravličnem modeliranju. Diplomsko naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 95 str.

Müller, M., 2012. Matematično modeliranje – modeliranje s programom OpenFOAM. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 30 str.

Nisbet, T., 2004. Interactions between floodplain woodland and the freshwater environment. Forest Research annual report and accounts 2004-2005: 32-39.

Penca, B., Korošec, I., Lešnik, Z., Lovrinčević, S., Štrekelj, S., Lamovšek, M. 1999. Zavarovanje pred nevarnostjo naravnih in drugih nesreč. Ujma 13: 295-298.

Posnetek stanja terena s tehnologijo LIDAR (Snemano 14. do 16. januarja 2007). 2007. Flycom d.o.o., Žirovnica.

Površinski vodotoki in vodna bilanca Slovenije. 1998. Ljubljana, Ministrstvo za okolje in prostor, Hidrometeorološki zavod Republike Slovenije: 30 str.

Pravilnik o metodologiji za določanje območij, ogroženih zaradi poplav in z njimi povezane erozije celinskih voda in morja ter o načinu razvrščanja zemljišč v razrede ogroženosti, Ur. list RS št. 60/2007: 3216.

Prešeren, T. 2005. Hidravlično modeliranje obratovanja hidroenergetskega objekta. Diplomsko naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 93 str.

Rajar, R. 1980. Hidravlika nestalnega toka. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 279 str.

Rak, G., Gosar, L., Steinman, F. 2006. Z LIDAR tehnologijo zajeta topografija v hidravličnih analizah vodotokov. 17. Mišičev vodarski dan: 108-114.

Rak, G., Steinman, F., Gosar, L. 2008a. Kartiranje poplavno ogroženih območij v skladu z novo zakonodajo v Sloveniji. Geografski informacijski sistemi v Sloveniji 2007-2008: 107-116.

Rak, G., Steinman, F., Gosar, L. 2008b. Pomen nizkih pragov ob visokih vodah. Ujma 22: 31-36.

Rak, G., Müller, M., Steinman, F., Šantl, S., Novak, G. 2010. Hydraulic modeling of future hydro power plants on lower Sava, ICOLD Symposium. Avstrija, Graz, Verlag der Technischen Universität Graz: 133-138.

Rak, G., Müller, M., Šantl, S., Steinman, F. 2013. Uporaba hibridnih hidravličnih modelov pri načrtovanju HE na Spodnji Savi. Acta hydrotechnica 2012.

Renzel, R. 2007. A 2D multi-resolution urban flood propagation model using N-S equations. Netherland, Enschede, International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation: 45 str.

Rodi, W. 1993. Turbulence models and their application in hydraulics : a state-of-the-art - 3rd ed. Netherlands, Rotterdam, A. A. Balkema, cop.: 104 str.

Sanyal, J., Lu, X.X. 2004. Application of Remote Sensing in Flood Management with Special reference to Monsoon. Natural Hazards 33: 283-301.

Sholtes, J. S., 2009. Hydraulic analysis of stream restoration and flood wave propagation. Master degree. Chapel Hill, University of North Carolina: 111 str.

Sholtes, J. S., Doyle, M.W. 2011. Effect of Channel Restoration on Flood Wave Attenuation. Journal of Hydraulic Engineering 137, 2: 196-208.

Steinman, F., Banovec, P., Kozelj, K., Rak, G. 2009. Sonaravno varovanje brežin pri večjih hidrodinamičnih obremenitvah. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 46 str.

Steinman, F., Rak, G., Papež, J., Prešeren, T., Kozelj, D., 2010. Gospodarjenje s povirji in hudourniki. Študijsko gradivo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 185 str.

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

Steinman, F., Rak, G., Müller, M., Šantl, S., 2012. Strokovna dokumentacija k Okoljskemu poročilu s področja voda za oceno vpliva gradnje in obratovanja HE Brežice in HE Mokrice

na odtočni režim reke Save v mejnem profilu z Republiko Hrvaško. Poročilo. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 30 str.

Šantl, S., Novak, G., Rak, G., Steinman, F. 2010. Hybrid hydraulic modeling approach in the process of hydropower plant design. International Symposium on hydraulic Physical Modelling and Field Investigation. Kitajska, Nanjing: 54-61.

Šumrada, R. 2005. Strukture podatkov in prostorske analize. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 284 str.

Thomas, H., Nisbet, T. R., 2007. An assessment of the impact of floodplain woodland. Water and Environmental Journal 21, 2: 114-126.

Trček, R. 2003. Ocenjevanje poplavne škode. Magistrska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 130 str.

UL FGG, december 2012, Hidravlična analiza odtočnih razmer na območju gradbene jame HE Brežice v posameznih fazah izgradnje. Poročilo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 41 str.

Uredba o uvedbi in uporabi enotne klasifikacije vrst objektov in o določitvi objektov državnega pomena. UL RS št. 33/2003: 1359.

USGS, Science for changing world, 2013. Lidar for Science and Resource Management, Experimental Advanced Airborne Research Lidar (EAARL).
<http://ngom.usgs.gov/dsp/tech/eaarl/index.php> (13. 2. 2013)

Verjetnostna analiza spremenjenih vrednosti visokih vod Save za v.p. Radeče, Dopolnitev 2. 2011. Ljubljana, Inštitut za vode RS.

Water Level Sensors, Hydro Services WL2100D Submersible (Wet) Transducer. 2013. Envco Environmental Equipment Suppliers.
<http://www.envcoglobal.com/catalog/product/digital-level-sensors/hydro-services-wl2100d-submersible-wet-transducer.html> (13. 2. 2013)

Weisgerber, A., Gutierrez-Andres, J., Wilson, G., Marias, F., Karanxha, A., Clarke, R., Millington, R. 2010. Physical-computational modelling comparison in Ireland. International Symposium on hydraulic Physical Modelling and Field Investigation. Kitajska, Nanjing: 192-198.

Wetlands, land use change and Flood Management. 2002. English Nature, The Environment Agency, the Department for Environment, Food and Rural Affairs and the Forestry Commission: 23 str.
<http://archive.defra.gov.uk/environment/flooding/documents/manage/jointstment.pdf>
(3. 4. 2013)

Williams, L., Harisson, S., O'Hagan, A.M. 2012. The Use of Wetlands for Flood Attenuation. Report for An Taisce. Ireland, Cork, University College Cork, Aquatic Services Unit: 118 str.

Willems P., Christiaens, K., Vaes, G., Popa, D., Timbe, L., Berlamont J., Feyen J. 2001. Methodology for river flood modelling by the quasi two-dimensional approach, World Water and Environmental Resources (EWRI) Congress. New York, American society of civil engineers: 1-9.

Wikibooks, 2013. Seafloor Spreading. High School Earth Science.
(http://en.wikibooks.org/wiki/High_School_Earth_Science/Seafloor_Spreading (13. 2. 2013))

PRILOGE

PRILOGA A

Primer preoblikovanja hidrograma vzdolž retenzije, kot posledica različne hrapavosti retenzije za 3 primere:

- Za ozek VV s konico 2500 m³/s, kjer povečanje hrapavosti neugodno vpliva na znižanje konice in na podaljševanje potovalnega časa.
- Za širok VV s konico 2500 m³/s, kjer povečanje hrapavosti nad določeno vrednostjo neugodno vpliva na znižanje konice in na podaljševanje potovalnega časa.
- ozek VV s konico 3000 m³/s, kjer povečanje hrapavosti nad ugodno vpliva na znižanje konice in na podaljševanje potovalnega časa.

PRILOGA B.1

Preoblikovanje hidrograma ozkega VV vala s konico 3000 m³/s v izhodnem prerezu (G) pri spreminjajoči hrapavosti retenzije za varianto s predelno steno oz. brez nje.

PRILOGA B.2

Preoblikovanje hidrograma širokega VV vala s konico 3000 m³/s v izhodnem prerezu (G) pri spreminjajoči hrapavosti retenzije za varianto s predelno steno oz. brez nje.

PRILOGA B.3

Preoblikovanje hidrograma ozkega VV vala s konico 3000 m³/s v izhodnem prerezu (G) pri spreminjajoči hrapavosti retenzije za varianto s predelno steno oz. brez nje.

PRILOGA B.4

Preoblikovanje hidrograma širokega VV vala s konico 3000 m³/s v izhodnem prerezu (G) pri spreminjajoči hrapavosti retenzije za varianto s predelno steno oz. brez nje.

PRILOGA B.5

Preoblikovanje hidrograma ozkega VV vala s konico 3500 m³/s v izhodnem prerezu (G) pri spreminjajoči hrapavosti retenzije za varianto s predelno steno oz. brez nje.

PRILOGA B.6

Preoblikovanje hidrograma širokega VV vala s konico 3500 m³/s v izhodnem prerezu (G) pri spreminjajoči hrapavosti retenzije za varianto s predelno steno oz. brez nje.

PRILOGA B.7

Preoblikovanje hidrograma ozkega VV vala s konico 4000 m³/s v izhodnem prerezu (G) pri spreminjajoči hrapavosti retenzije za varianto s predelno steno oz. brez nje.

PRILOGA B.8

Preoblikovanje hidrograma širokega VV vala s konico $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ v izhodnem prerezu (G) pri spreminjajoči hrapavosti retenzije za varianto s predelno steno oz. brez nje.

PRILOGA C.1

Tabelarični prikaz vrednosti znižanja konice v izhodnem prerezu, potovalnega časa, maksimalnih pretokov v kontrolnih prerezih na retenziji (R_{zg} in R_{sp}), povprečnih vrednosti hitrosti in globin za različne vrednosti hrapavosti retenzije (ozek in širok VV val s konico $2500 \text{ m}^3/\text{s}$) za varianto s predelno steno oz. brez nje.

PRILOGA C.2

Tabelarični prikaz vrednosti znižanja konice v izhodnem prerezu, potovalnega časa, maksimalnih pretokov v kontrolnih prerezih na retenziji (R_{zg} in R_{sp}), povprečnih vrednosti hitrosti in globin za različno hrapavost retenzije (ozek in širok VV val s konico $3000 \text{ m}^3/\text{s}$) za varianto s predelno steno oz. brez nje.

PRILOGA C.3

Tabelarični prikaz vrednosti znižanja konice v izhodnem prerezu, potovalnega časa, maksimalnih pretokov v kontrolnih prerezih na retenziji (R_{zg} in R_{sp}), povprečnih vrednosti hitrosti in globin za različno hrapavost retenzije (ozek in širok VV val s konico $3500 \text{ m}^3/\text{s}$) za varianto s predelno steno oz. brez nje.

PRILOGA C.4

Tabelarični prikaz vrednosti znižanja konice v izhodnem prerezu, potovalnega časa, maksimalnih pretokov v kontrolnih prerezih na retenziji (R_{zg} in R_{sp}), povprečnih vrednosti hitrosti in globin za različno hrapavost retenzije (ozek in širok VV val s konico $4000 \text{ m}^3/\text{s}$) za varianto s predelno steno oz. brez nje.

PRILOGA D.1

Znižanje konice vala in dolžina potovalnega časa za ozek VV s konico $3000 \text{ m}^3/\text{s}$ pri različnih deležih povečane hrapavosti s prikazom vpliva načina razporeditve območij povečane hrapavosti.

PRILOGA D.2

Znižanje konice vala in dolžina potovalnega časa za širok VV s konico $3000 \text{ m}^3/\text{s}$ pri različnih deležih povečane hrapavosti s prikazom vpliva načina razporeditve območij povečane hrapavosti.

PRILOGA D.3

Znižanje konice vala in dolžina potovalnega časa za ozek VV s konico $3500 \text{ m}^3/\text{s}$ pri različnih deležih povečane hrapavosti s prikazom vpliva načina razporeditve območij povečane hrapavosti.

PRILOGA D.4

Znižanje konice vala in dolžina potovalnega časa za širok VV s konico 3500 m³/s pri različnih deležih povečane hrapavosti s prikazom vpliva načina razporeditve območij povečane hrapavosti.

PRILOGA D.5

Znižanje konice vala in dolžina potovalnega časa za ozek VV s konico 4000 m³/s pri različnih deležih povečane hrapavosti s prikazom vpliva načina razporeditve območij povečane hrapavosti.

PRILOGA D.6

Znižanje konice vala in dolžina potovalnega časa za širok VV s konico 4000 m³/s pri različnih deležih povečane hrapavosti s prikazom vpliva načina razporeditve območij povečane hrapavosti.

PRILOGA E.1

Preoblikovanje hidrograma ozkega VV vala Q₁₀ s konico 2560 m³/s v izhodnem prerezu (G) pri spreminjajoči hrapavosti retenzije za varianto s predelnima stenama oz. brez njiju.

PRILOGA E.2

Preoblikovanje hidrograma širokega VV vala Q₁₀ s konico 2560 m³/s v izhodnem prerezu (G) pri spreminjajoči hrapavosti retenzije za varianto s predelnima stenama oz. brez njiju.

PRILOGA E.3

Preoblikovanje hidrograma ozkega VV vala Q₅₀ s konico 3365 m³/s v izhodnem prerezu (G) pri spreminjajoči hrapavosti retenzije za varianto s predelnima stenama oz. brez njiju.

PRILOGA E.4

Preoblikovanje hidrograma širokega VV vala Q₅₀ s konico 3365 m³/s v izhodnem prerezu (G) pri spreminjajoči hrapavosti retenzije za varianto s predelnima stenama oz. brez njiju.

PRILOGA E.5

Preoblikovanje hidrograma ozkega VV vala Q₁₀₀ s konico 3750 m³/s v izhodnem prerezu (G) pri spreminjajoči hrapavosti retenzije za varianto s predelnima stenama oz. brez njiju.

PRILOGA E.6

Preoblikovanje hidrograma širokega VV vala Q₁₀₀ s konico 3750 m³/s v izhodnem prerezu (G) pri spreminjajoči hrapavosti retenzije za varianto s predelnima stenama oz. brez njiju.

PRILOGA F.1

Tabelarični prikaz vrednosti znižanja konice in gladine v izhodnem prerezu, potovalnega časa, površine poplavljenega območja, povprečnih vrednosti hitrosti in globin za različne vrednosti hrapavosti retenzije (ozek in širok VV val Q_{10} s konico $2560 \text{ m}^3/\text{s}$) za varianto s predelnima stenama oz. brez njiju.

PRILOGA F.2

Tabelarični prikaz vrednosti znižanja konice in gladine v izhodnem prerezu, potovalnega časa, površine poplavljenega območja, povprečnih vrednosti hitrosti in globin za različne vrednosti hrapavosti retenzije (ozek in širok VV val Q_{50} s konico $3365 \text{ m}^3/\text{s}$) za varianto s predelnima stenama oz. brez njiju.

PRILOGA F.3

Tabelarični prikaz vrednosti znižanja konice in gladine v izhodnem prerezu, potovalnega časa, velikosti poplavljenih površin v celoti in po posameznih razredih po 1. kriteriju Pravilnika, velikost območja poplavljenih površin s hitrostmi vodnega toka nad 1 m/s , povprečnih vrednosti hitrosti in globin za različne vrednosti hrapavosti retenzije (ozek VV val Q_{100} s konico $3750 \text{ m}^3/\text{s}$) za varianto s predelnima stenama oz. brez njiju.

PRILOGA F.41

Tabelarični prikaz vrednosti znižanja konice in gladine v izhodnem prerezu, potovalnega časa, velikosti poplavljenih površin v celoti in po posameznih razredih po 1. kriteriju Pravilnika, velikost območja poplavljenih površin s hitrostmi vodnega toka nad 1 m/s , povprečnih vrednosti hitrosti in globin za različne vrednosti hrapavosti retenzije (širok VV val Q_{100} s konico $3750 \text{ m}^3/\text{s}$) za varianto s predelnima stenama oz. brez njiju.

PRILOGA G.1

Tabelarični prikaz vrednosti znižanja konice in gladine v izhodnem prerezu, potovalnega časa, površine poplavljenega območja, povprečnih vrednosti hitrosti in globin za različna razmerja med gozdnimi in kmetijskimi površinami (ozek in širok VV val Q_{10} s konico $2560 \text{ m}^3/\text{s}$) za varianto s predelnima stenama oz. brez njiju.

PRILOGA G.22

Tabelarični prikaz vrednosti znižanja konice in gladine v izhodnem prerezu, potovalnega časa, površine poplavljenega območja, povprečnih vrednosti hitrosti in globin za različna razmerja med gozdnimi in kmetijskimi površinami (ozek in širok VV val Q_{50} s konico $3365 \text{ m}^3/\text{s}$) za varianto s predelnima stenama oz. brez njiju.

PRILOGA G.3

Tabelarični prikaz vrednosti znižanja konice in gladine v izhodnem prerezu, potovalnega časa, velikosti poplavljenih površin v celoti in po posameznih razredih po 1. kriteriju Pravilnika, velikost območja poplavljenih površin s hitrostmi vodnega toka nad 1 m/s , povprečnih vrednosti hitrosti in globin za različna razmerja med gozdnimi in kmetijskimi površinami

(ozek in širok VV val Q_{100} s konico $3750 \text{ m}^3/\text{s}$) za varianto s predelnima stenama oz. brez njiju.

PRILOGA H.1

Obseg poplavljenosti, polje globin in polje hitrosti za ozek VV val Q_{10} s konico $2560 \text{ m}^3/\text{s}$ pri hrapavosti retenzije $n_g=0,03$, $n_g=0,08$ in $n_g=0,14$ za varianto brez predelnih sten.

PRILOGA H.2

Obseg poplavljenosti, polje globin in polje hitrosti za ozek VV val Q_{10} s konico $2560 \text{ m}^3/\text{s}$ pri hrapavosti retenzije $n_g=0,03$, $n_g=0,08$ in $n_g=0,14$ za varianto s predelnima stenama.

PRILOGA H.3

Obseg poplavljenosti, polje globin in polje hitrosti za širok VV val Q_{10} s konico $2560 \text{ m}^3/\text{s}$ pri hrapavosti retenzije $n_g=0,03$, $n_g=0,08$ in $n_g=0,14$ za varianto brez predelnih sten.

PRILOGA H.4

Obseg poplavljenosti, polje globin in polje hitrosti za širok VV val Q_{10} s konico $2560 \text{ m}^3/\text{s}$ pri hrapavosti retenzije $n_g=0,03$, $n_g=0,08$ in $n_g=0,14$ za varianto s predelnima stenama.

PRILOGA H.5

Obseg poplavljenosti, polje globin in polje hitrosti za ozek VV val Q_{50} s konico $3365 \text{ m}^3/\text{s}$ pri hrapavosti retenzije $n_g=0,03$, $n_g=0,08$ in $n_g=0,14$ za varianto brez predelnih sten.

PRILOGA H.6

Obseg poplavljenosti, polje globin in polje hitrosti za ozek VV val Q_{50} s konico $3365 \text{ m}^3/\text{s}$ pri hrapavosti retenzije $n_g=0,03$, $n_g=0,08$ in $n_g=0,14$ za varianto s predelnima stenama.

PRILOGA H.7

Obseg poplavljenosti, polje globin in polje hitrosti za širok VV val Q_{50} s konico $3365 \text{ m}^3/\text{s}$ pri hrapavosti retenzije $n_g=0,03$, $n_g=0,08$ in $n_g=0,14$ za varianto brez predelnih sten.

PRILOGA H.8

Obseg poplavljenosti, polje globin in polje hitrosti za širok VV val Q_{50} s konico $3365 \text{ m}^3/\text{s}$ pri hrapavosti retenzije $n_g=0,03$, $n_g=0,08$ in $n_g=0,14$ za varianto s predelnima stenama.

PRILOGA H.9

Obseg poplavljenosti, polje globin in polje hitrosti za ozek VV val Q_{100} s konico $3750 \text{ m}^3/\text{s}$ pri hrapavosti retenzije $n_g=0,03$, $n_g=0,08$ in $n_g=0,14$ za varianto brez predelnih sten.

PRILOGA H.10

Obseg poplavljenosti, polje globin in polje hitrosti za ozek VV val Q_{100} s konico $3750 \text{ m}^3/\text{s}$ pri hrapavosti retenzije $n_g=0,03$, $n_g=0,08$ in $n_g=0,14$ za varianto s predelnima stenama.

PRILOGA H.11

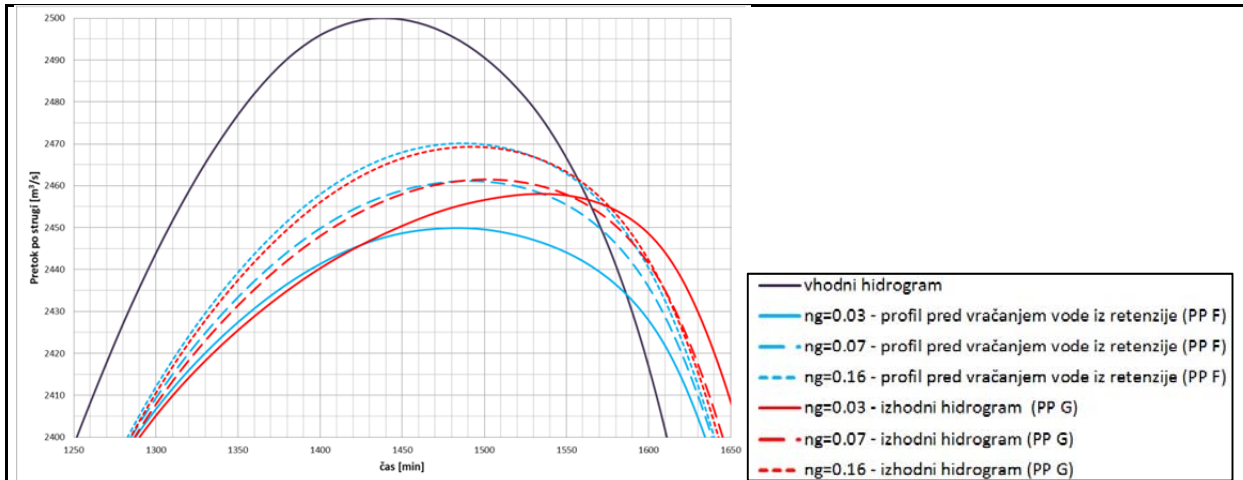
Obseg poplavljenosti, polje globin in polje hitrosti za širok VV val Q_{100} s konico $3750 \text{ m}^3/\text{s}$ pri hrapavosti retenzije $n_g=0,03$, $n_g=0,08$ in $n_g=0,14$ za varianto brez predelnih sten.

PRILOGA H.12

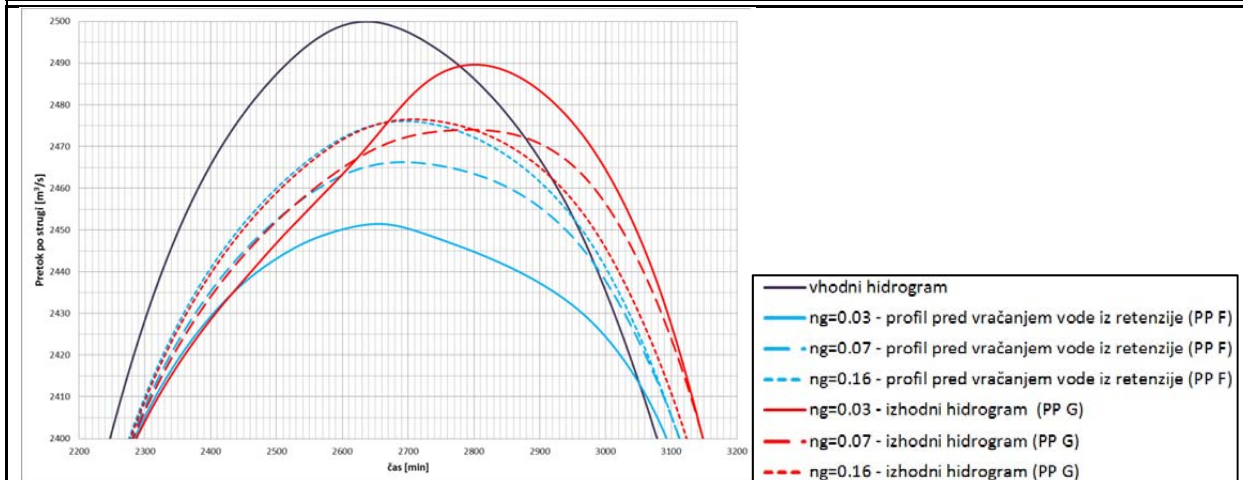
Obseg poplavljenosti, polje globin in polje hitrosti za širok VV val Q_{100} s konico $3750 \text{ m}^3/\text{s}$ pri hrapavosti retenzije $n_g=0,03$, $n_g=0,08$ in $n_g=0,14$ za varianto s predelnima stenama.

PRILOGA A

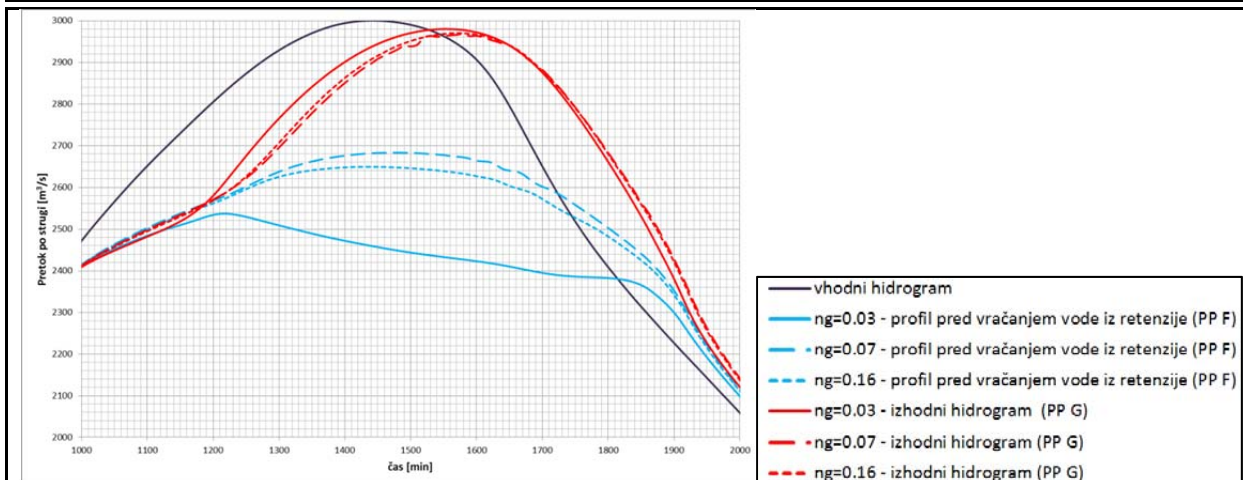
OBMOČJE S POENOSTAVLJENO GEOMETRIJO BREZ PREDELNE STENE



Preoblikovanja hidrograma vzdolž retenzije, kot posledica različne hrapavosti retenzije za primer, kjer povečanje hrapavosti neugodno vpliva na znižanje konice in na podaljševanje potovalnega časa (ozek VV val s konico 2500 m³/s).



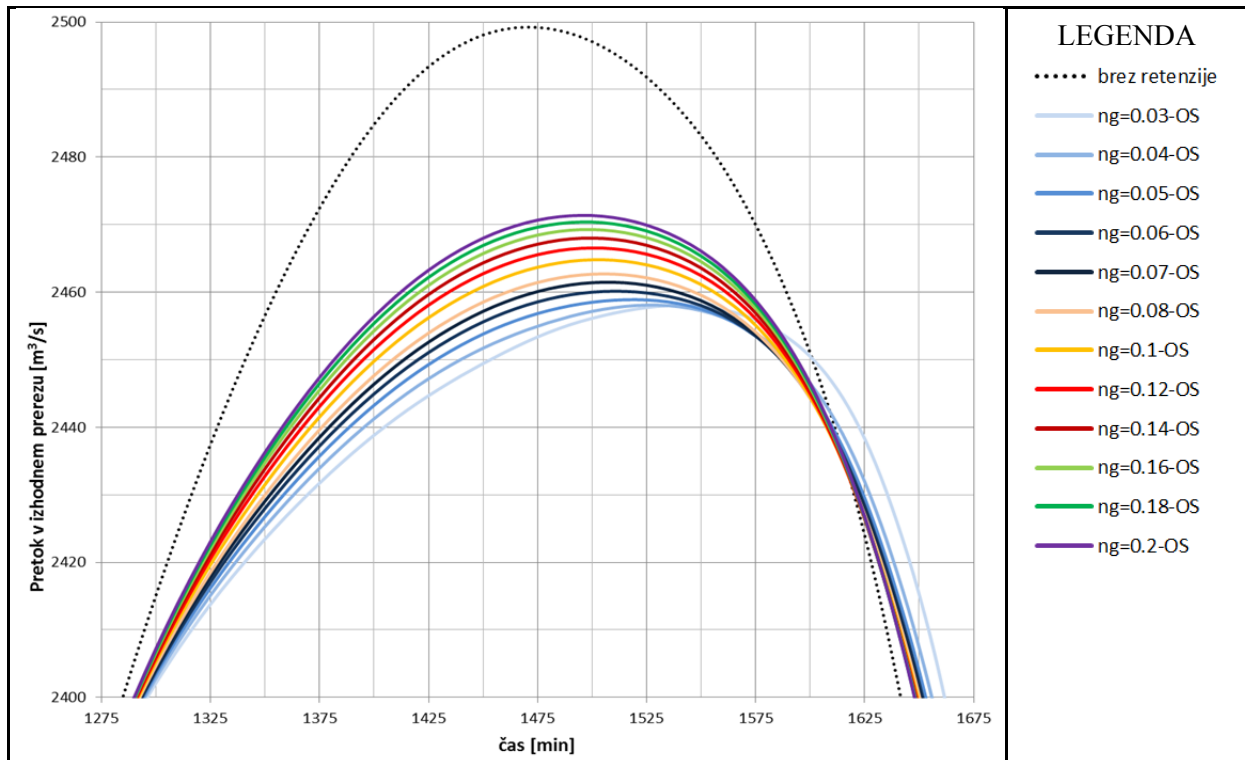
Preoblikovanja hidrograma vzdolž retenzije, kot posledica različne hrapavosti retenzije za primer, kjer povečanje hrapavosti nad določeno vrednostjo neugodno vpliva na znižanje konice in na podaljševanje potovalnega časa (širok VV val s konico 2500 m³/s).



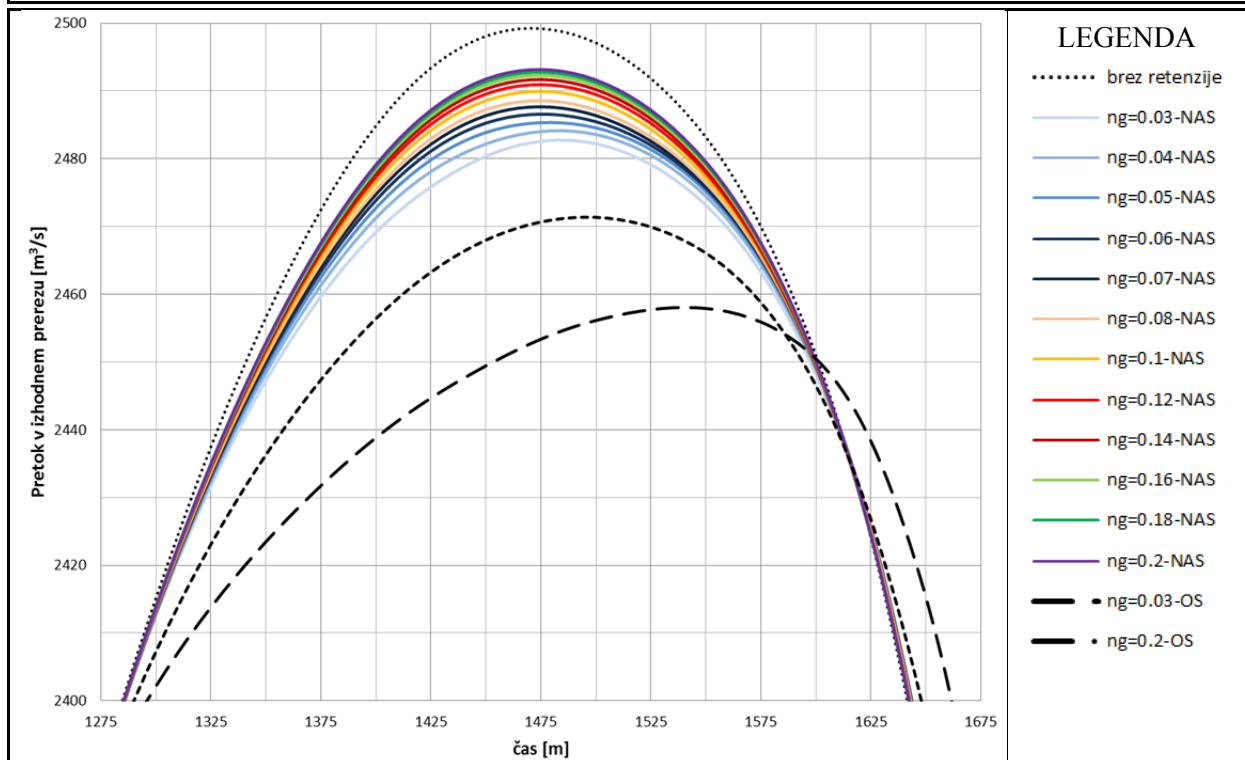
Preoblikovanja hidrograma vzdolž retenzije, kot posledica različne hrapavosti retenzije za primer, kjer povečanje hrapavosti ugodno vpliva na znižanje konice in na podaljševanje potovalnega časa (ozek VV val s konico 3000 m³/s).

PRILOGA B.1

OBMOČJE S POENOSTAVLJENO GEOMETRIJO S PREDELNO STENO OZIROMA BREZ NJE
(OS – brez predelne stene; NAS – s predelno steno)



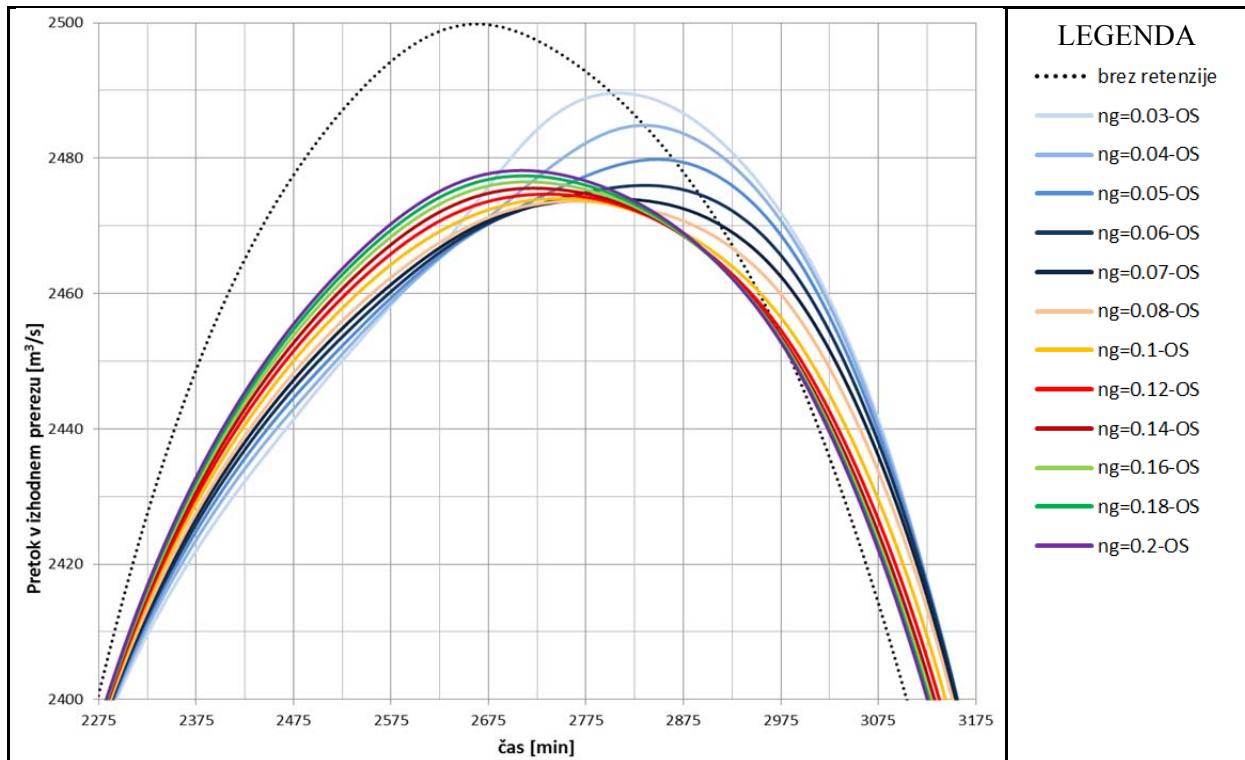
Preoblikovanje hidrograma ozkega VV vala s konico $2500 \text{ m}^3/\text{s}$ v izhodnem prerezu (G) pri spreminjajoči hrapavosti retenzije za varianto brez predelne stene.



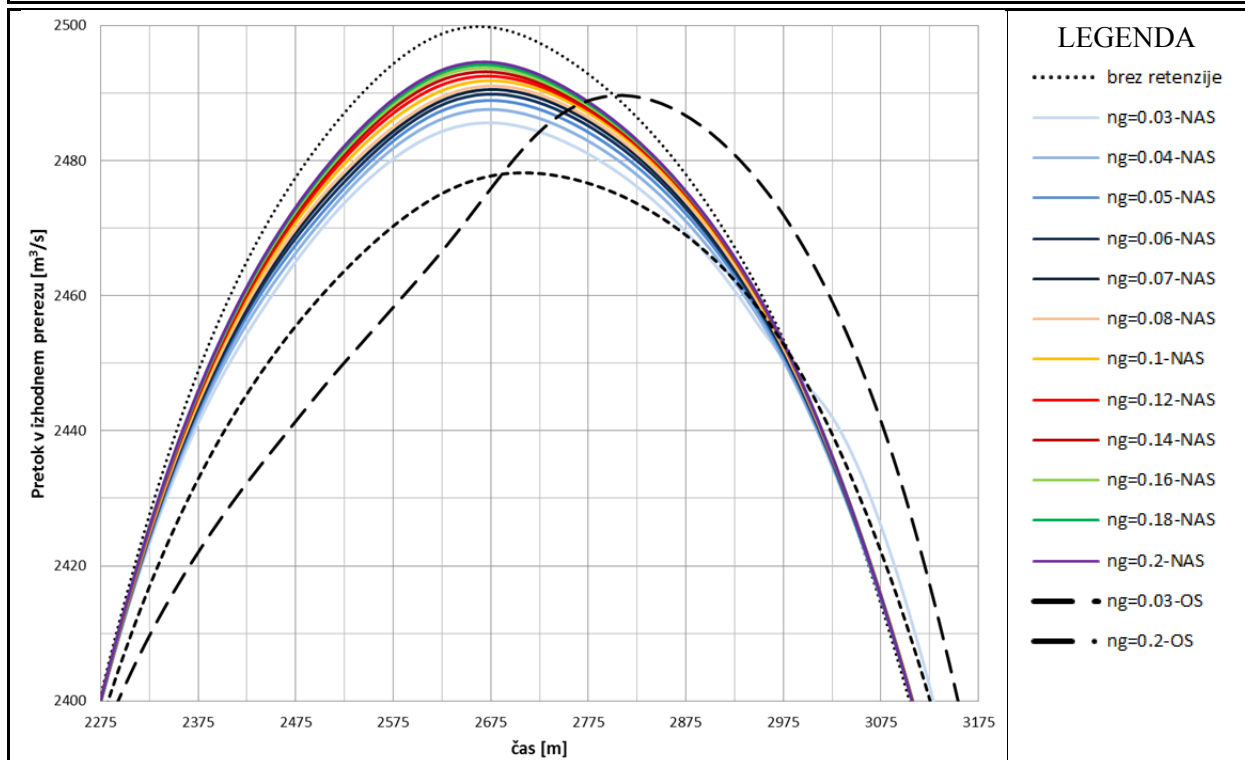
Preoblikovanje hidrograma ozkega VV vala s konico $2500 \text{ m}^3/\text{s}$ v izhodnem prerezu (G) pri spreminjajoči hrapavosti retenzije za varianto s predelno steno oziroma brez nje.

PRILOGA B.2

OBMOČJE S POENOSTAVLJENO GEOMETRIJO S PREDELNO STENO OZIROMA BREZ NJE
(OS – brez predelne stene; NAS – s predelno steno)



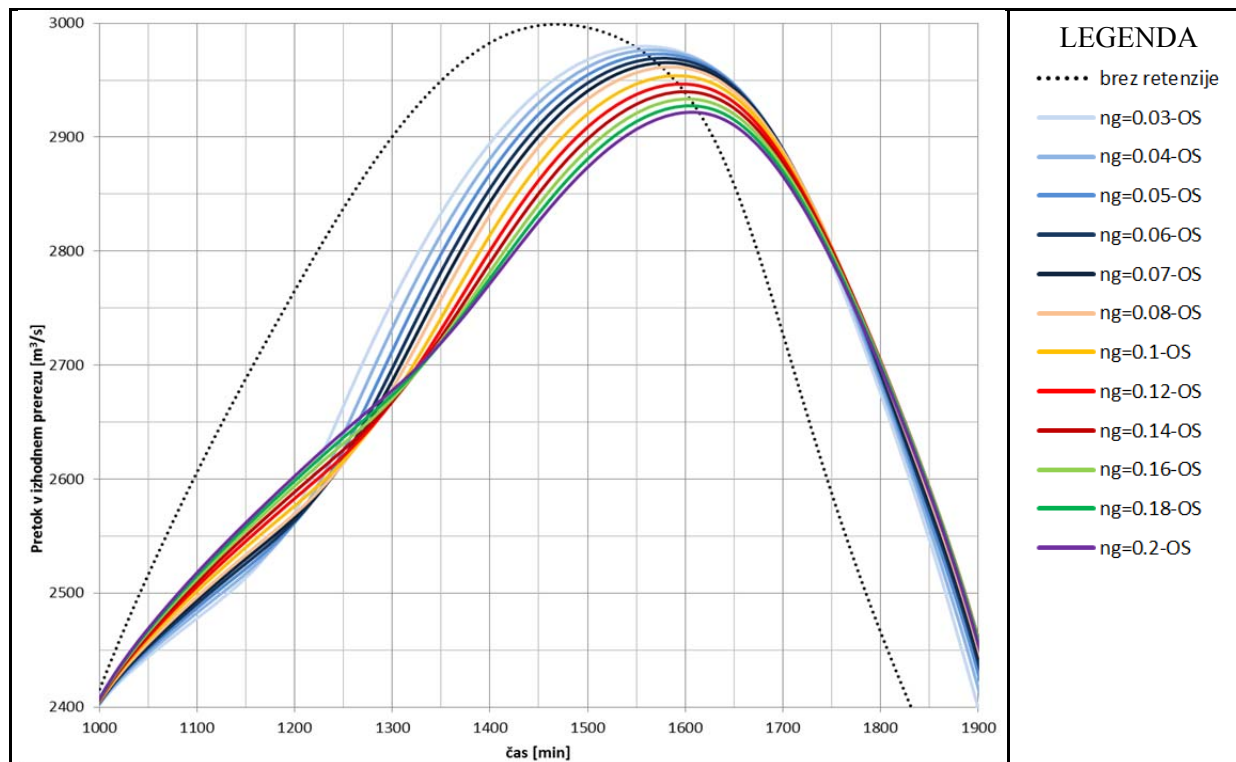
Preoblikovanje hidrograma širokega VV vala s konico $2500 \text{ m}^3/\text{s}$ v izhodnem prerezu (G) pri spreminjajoči hrapavosti retenzije za varianto brez predelne stene.



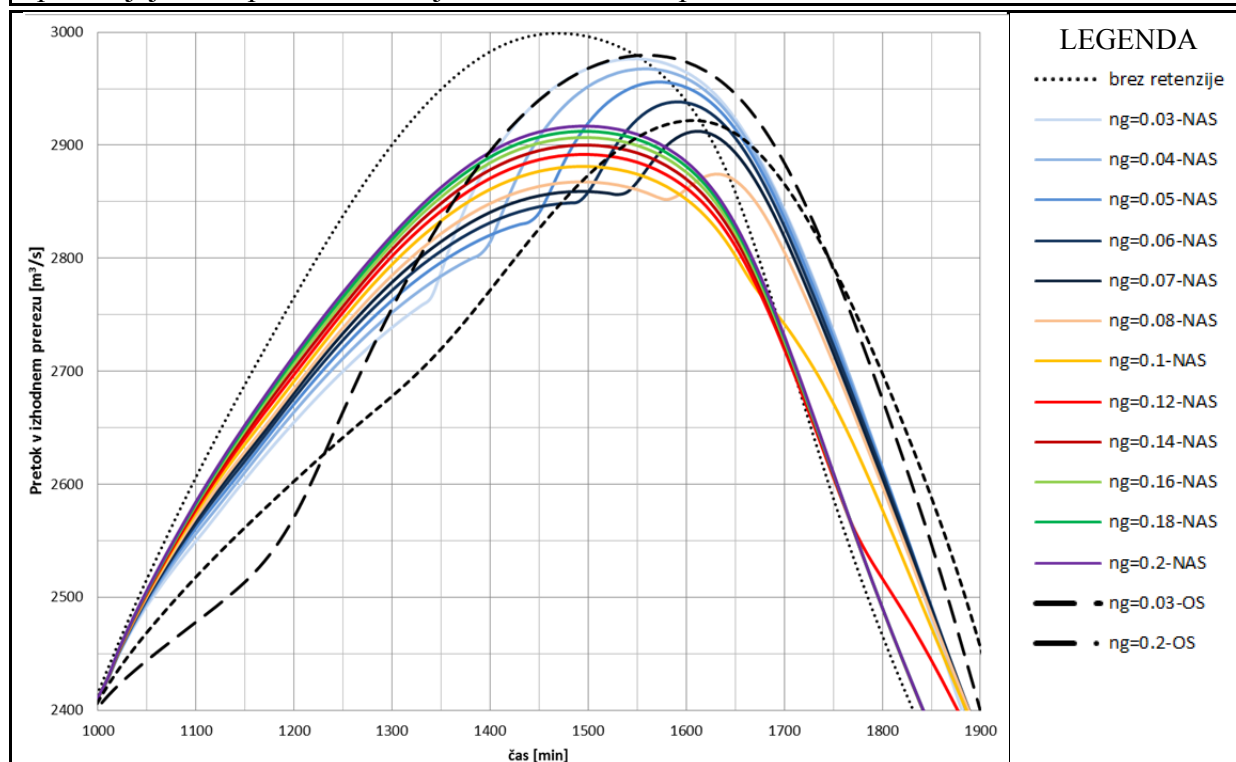
Preoblikovanje hidrograma širokega VV vala s konico $2500 \text{ m}^3/\text{s}$ v izhodnem prerezu (G) pri spreminjajoči hrapavosti retenzije za varianto s predelno steno oziroma brez nje.

PRILOGA B.3

OBMOČJE S POENOSTAVLJENO GEOMETRIJO S PREDELNO STENO OZIROMA BREZ NJE
(OS – brez predelne stene; NAS – s predelno steno)



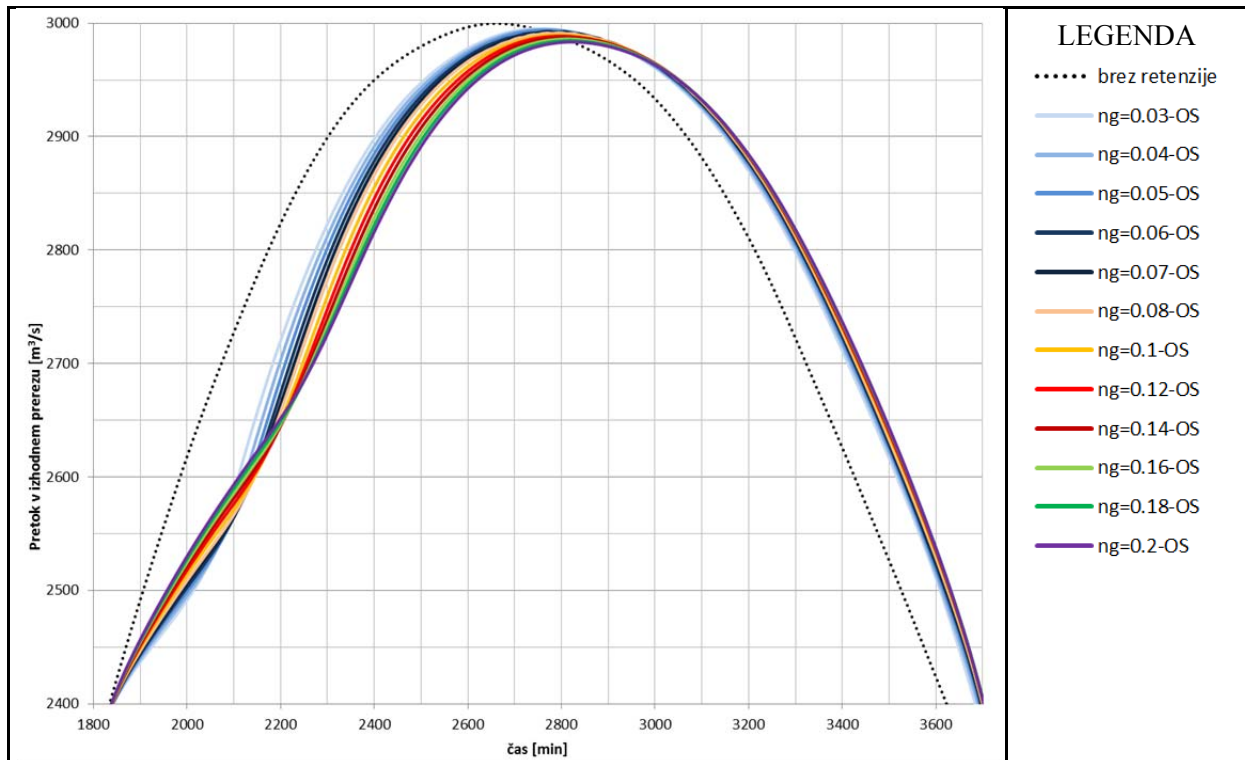
Preoblikovanje hidrograma ozkega VV vala s konico 3000 m³/s v izhodnem prerezu (G) pri spreminjajoči hrapavosti retenzije za varianto brez predelne stene.



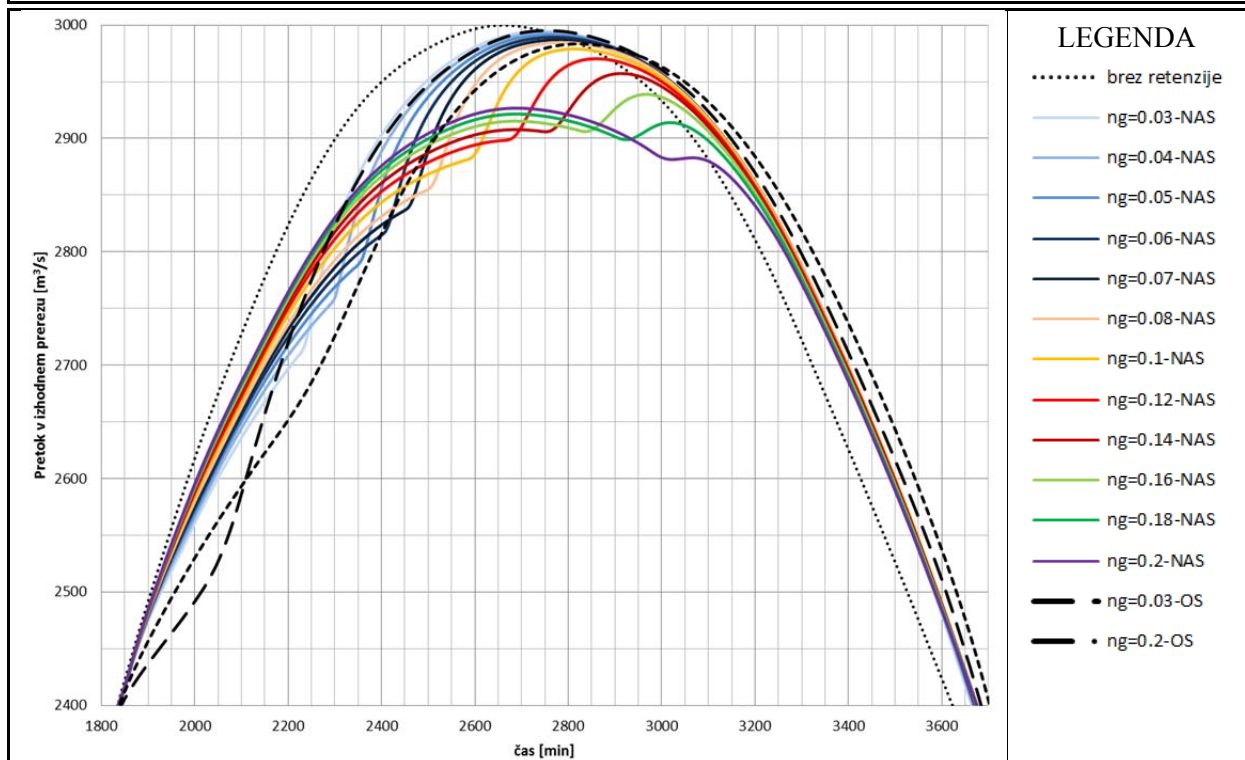
Preoblikovanje hidrograma ozkega VV vala s konico 3000 m³/s v izhodnem prerezu (G) pri spreminjajoči hrapavosti retenzije za varianto s predelno steno oziroma brez nje.

PRILOGA B.4

OBMOČJE S POENOSTAVLJENO GEOMETRIJO S PREDELNO STENO OZIROMA BREZ NJE
(OS – brez predelne stene; NAS – s predelno steno)



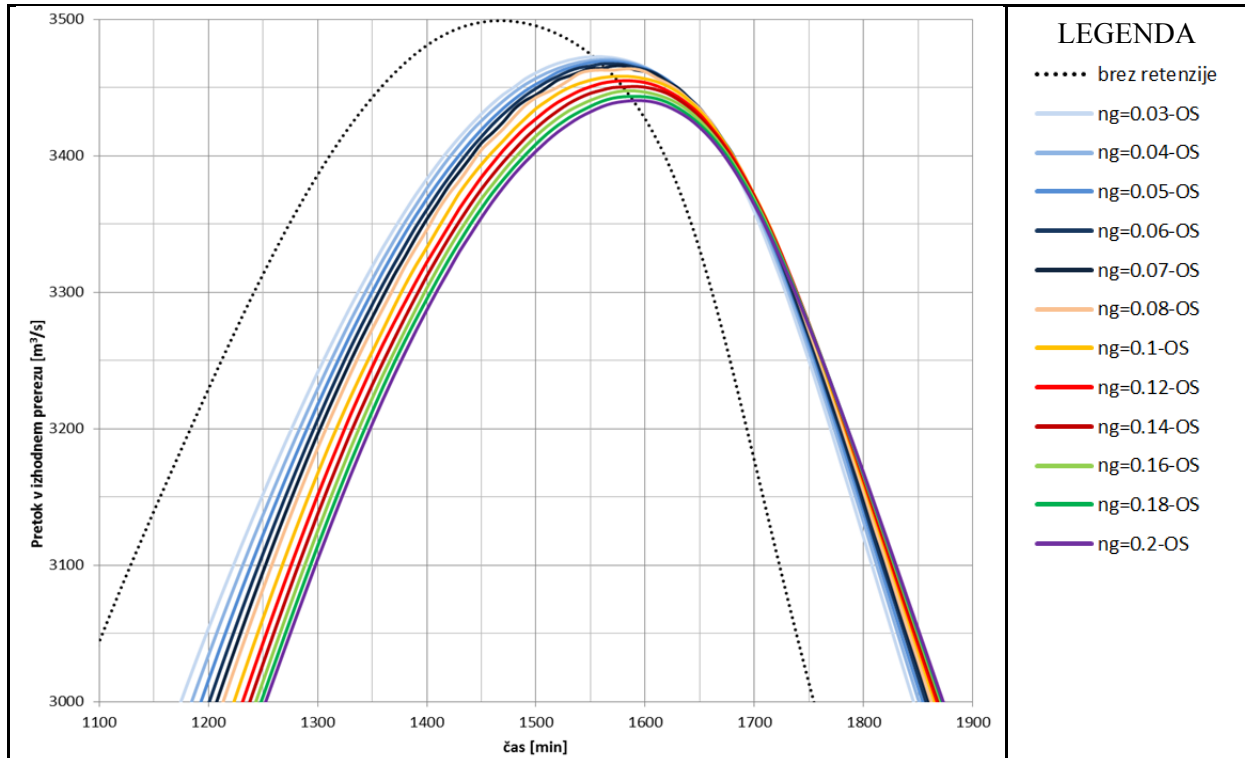
Preoblikovanje hidrograma širokega VV vala s konico $3000 \text{ m}^3/\text{s}$ v izhodnem prerezu (G) pri spreminjajoči hrapavosti retenzije za varianto brez predelne stene.



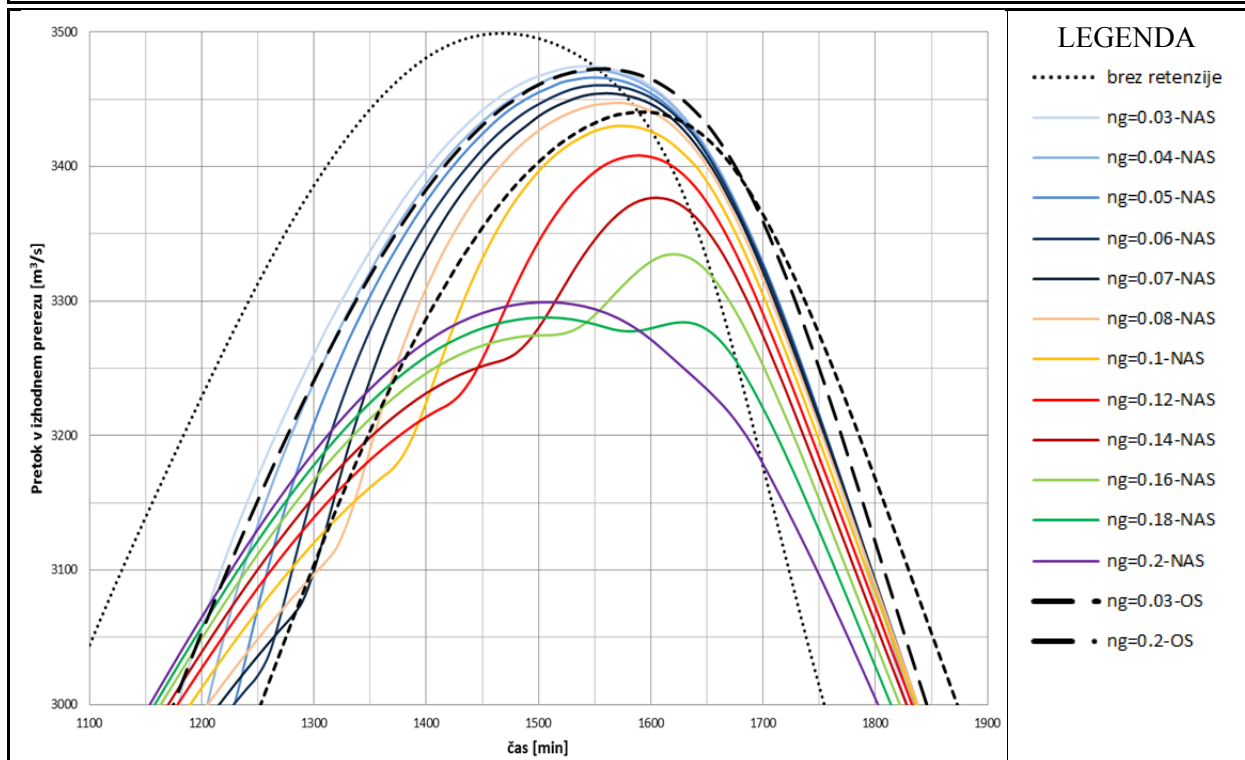
Preoblikovanje hidrograma širokega VV vala s konico $3000 \text{ m}^3/\text{s}$ v izhodnem prerezu (G) pri spreminjajoči hrapavosti retenzije za varianto s predelno steno oziroma brez nje.

PRILOGA B.5

OBMOČJE S POENOSTAVLJENO GEOMETRIJO S PREDELNO STENO OZIROMA BREZ NJE
(OS – brez predelne stene; NAS – s predelno steno)



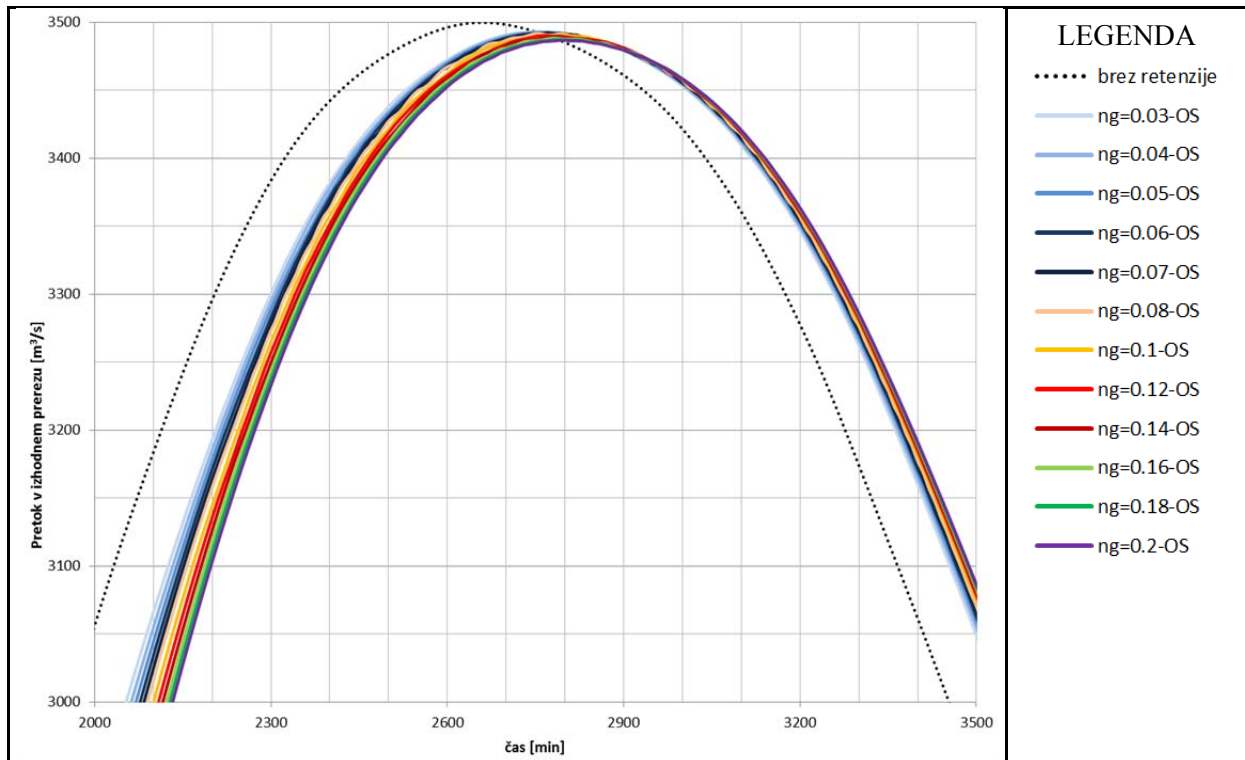
Preoblikovanje hidrograma ozkega VV vala s konico $3500 \text{ m}^3/\text{s}$ v izhodnem prerezu (G) pri spreminjajoči hrapavosti retenzije za varianto brez predelne stene.



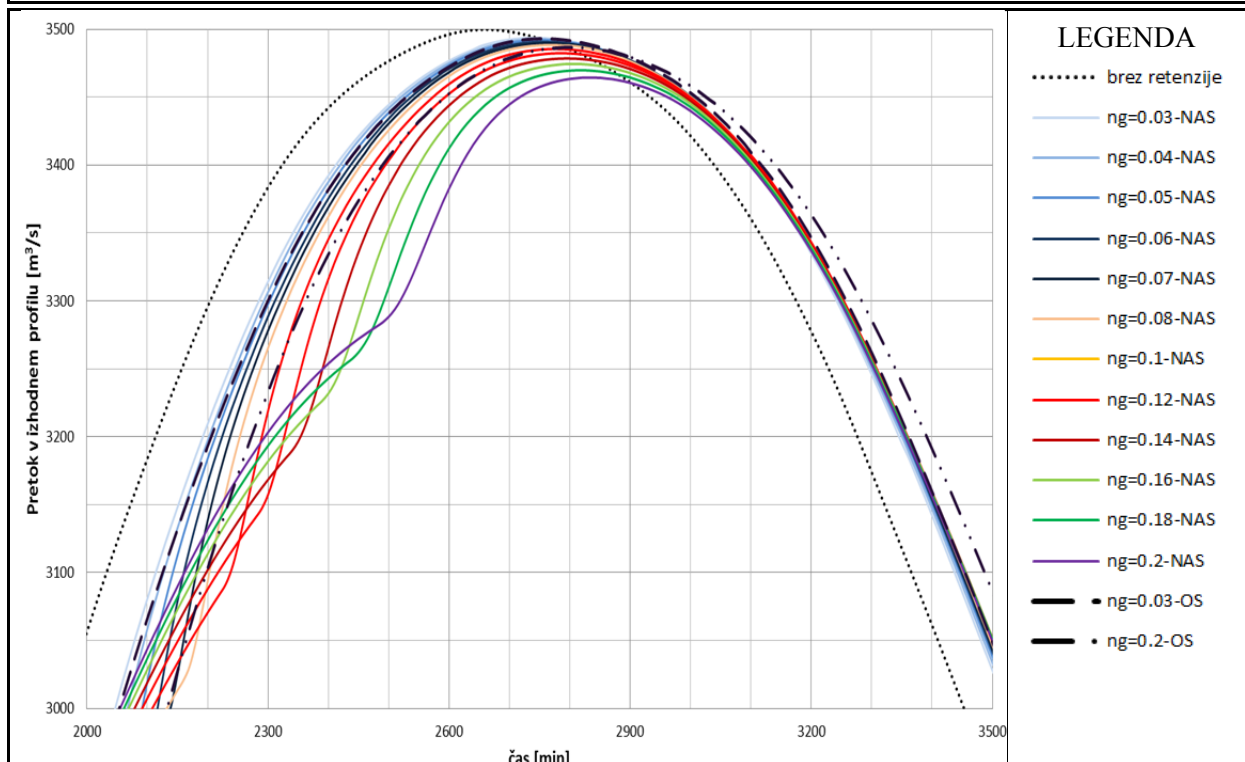
Preoblikovanje hidrograma ozkega VV vala s konico $3500 \text{ m}^3/\text{s}$ v izhodnem prerezu (G) pri spreminjajoči hrapavosti retenzije za varianto s predelno steno oziroma brez nje.

PRILOGA B.6

OBMOČJE S POENOSTAVLJENO GEOMETRIJO S PREDELNO STENO OZIROMA BREZ NJE
(OS – brez predelne stene; NAS – s predelno steno)



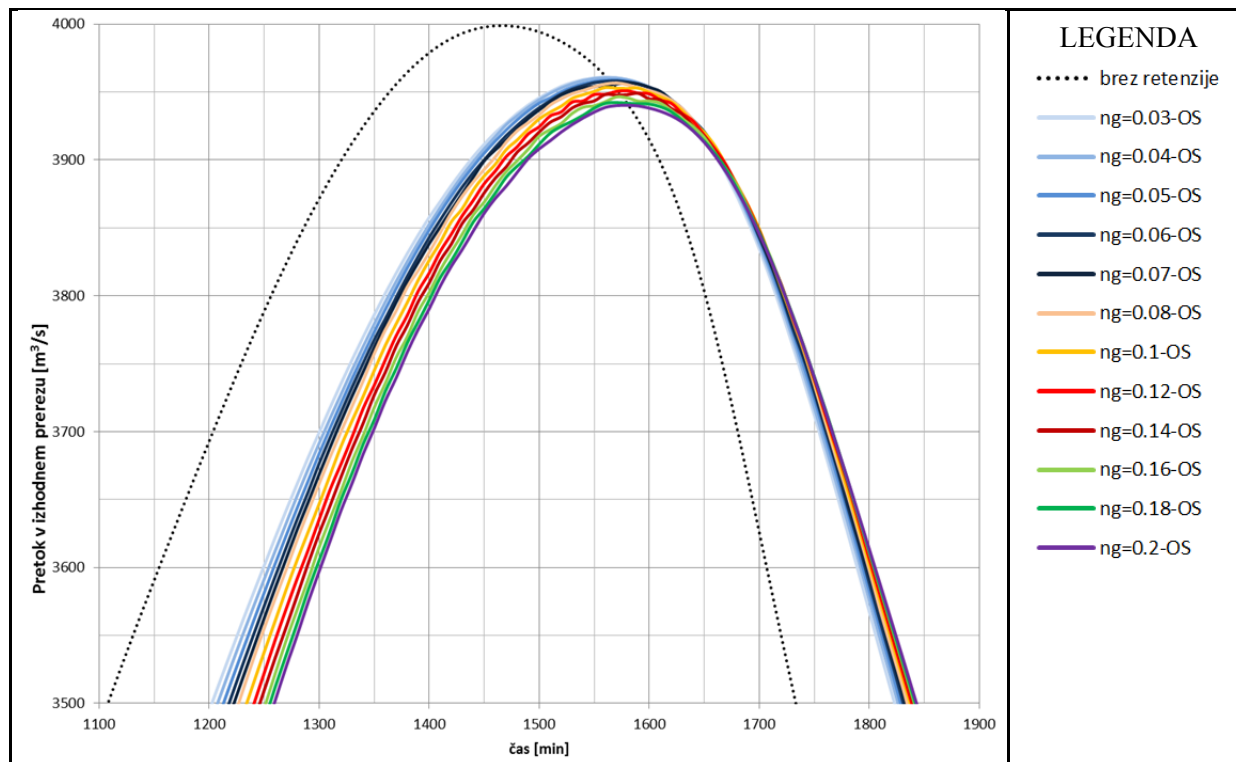
Preoblikovanje hidrograma širokega VV vala s konico $3500 \text{ m}^3/\text{s}$ v izhodnem prerezu (G) pri spreminjajoči hrapavosti retenzije za varianto brez predelne stene.



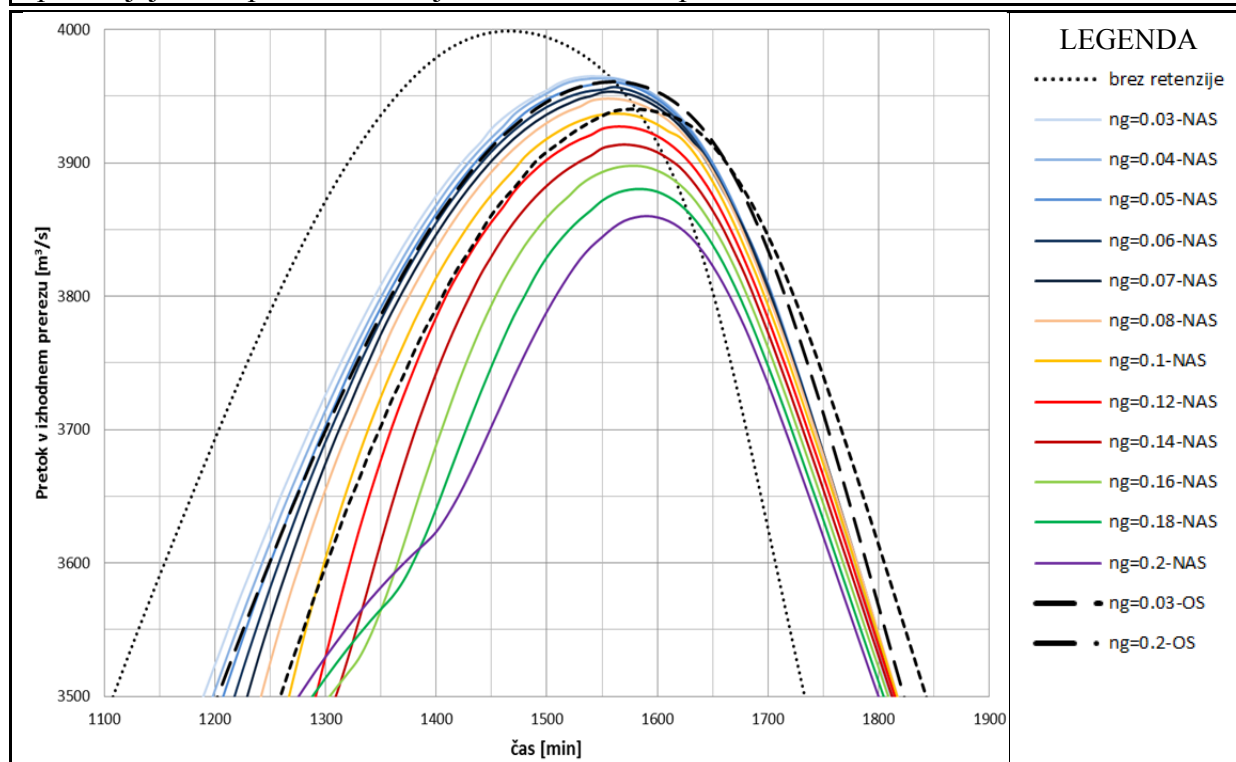
Preoblikovanje hidrograma širokega VV vala s konico $3500 \text{ m}^3/\text{s}$ v izhodnem prerezu (G) pri spreminjajoči hrapavosti retenzije za varianto s predelno steno oziroma brez nje.

PRILOGA B.7

OBMOČJE S POENOSTAVLJENO GEOMETRIJO S PREDELNO STENO OZIROMA BREZ NJE
(OS – brez predelne stene; NAS – s predelno steno)



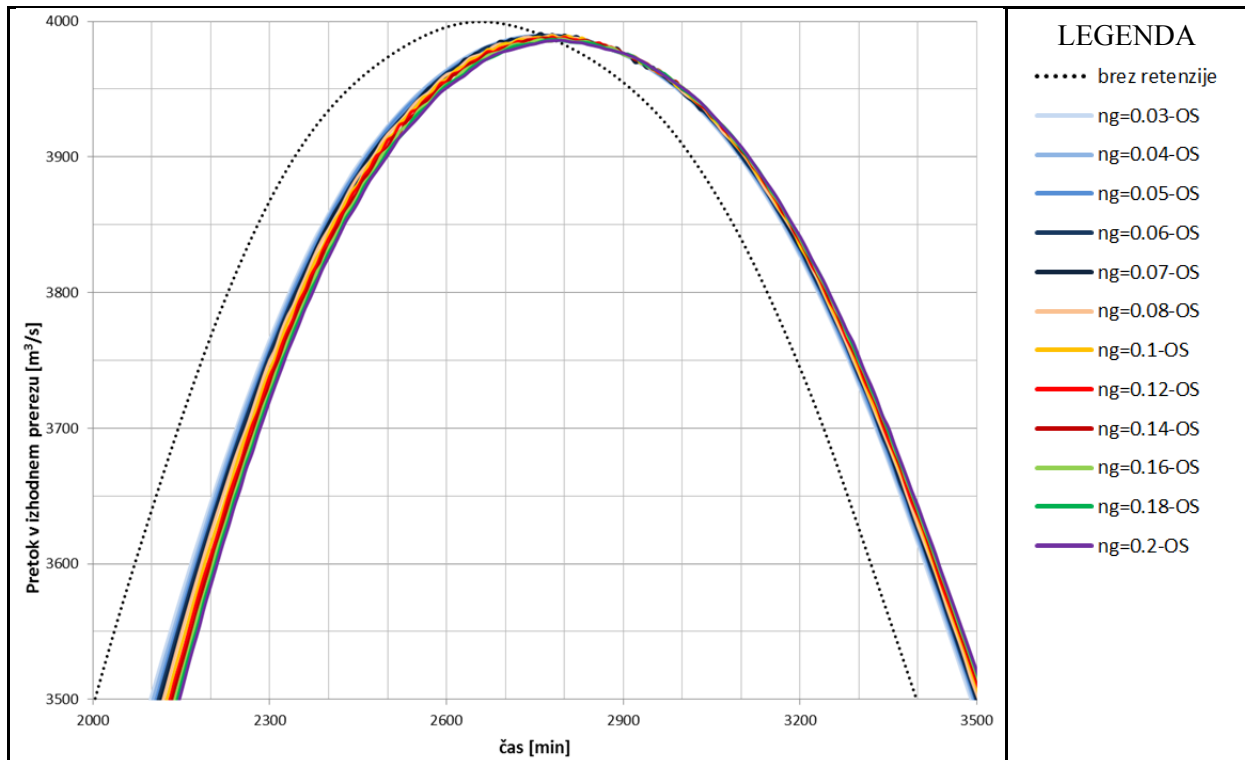
Preoblikovanje hidrograma ozkega VV vala s konico $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ v izhodnem prerezu (G) pri spreminjajoči hrapavosti retenzije za varianto brez predelne stene.



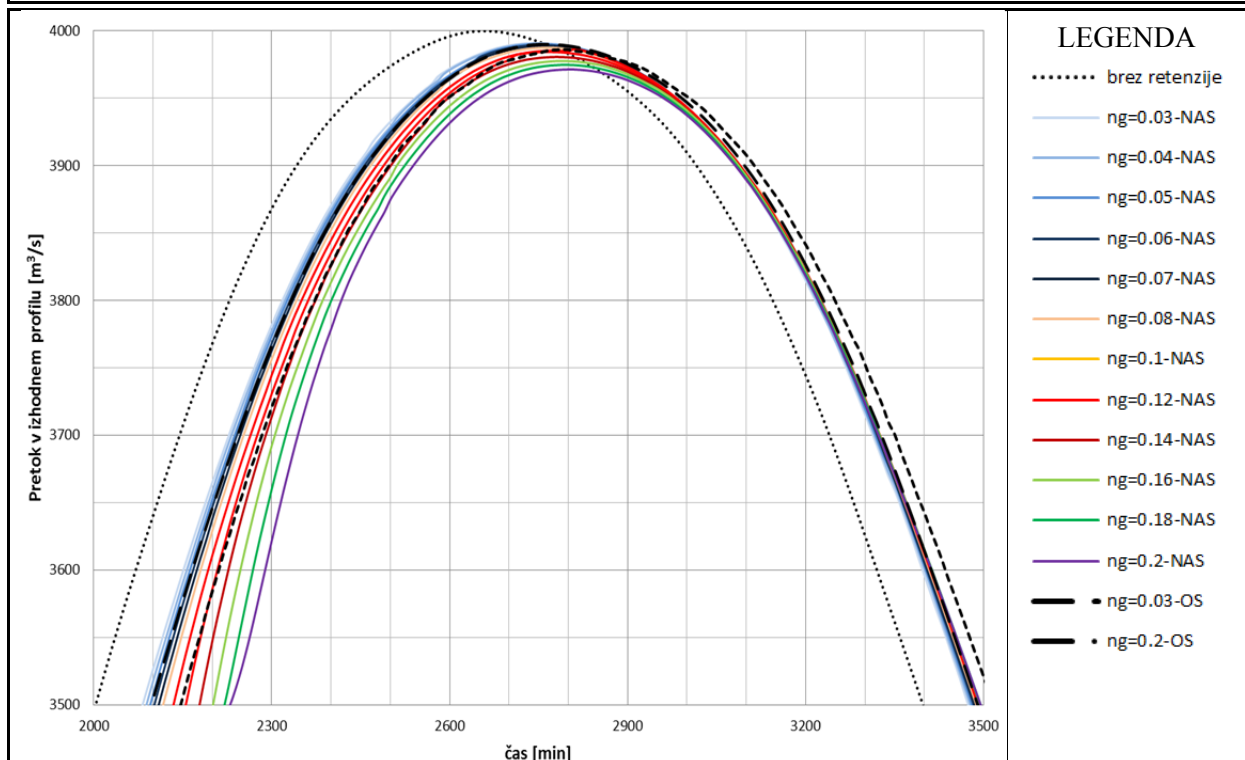
Preoblikovanje hidrograma ozkega VV vala s konico $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ v izhodnem prerezu (G) pri spreminjajoči hrapavosti retenzije za varianto s predelno steno oziroma brez nje.

PRILOGA B.8

OBMOČJE S POENOSTAVLJENO GEOMETRIJO S PREDELNO STENO OZIROMA BREZ NJE
(OS – brez predelne stene; NAS – s predelno steno)



Preoblikovanje hidrograma širokega VV vala s konico $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ v izhodnem prerezu (G) pri spreminjajoči hrapavosti retenzije za varianto brez predelne stene.



Preoblikovanje hidrograma širokega VV vala s konico $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ v izhodnem prerezu (G) pri spreminjajoči hrapavosti retenzije za varianto s predelno steno oziroma brez nje.

PRILOGA C.1

OBMOČJE S POENOSTAVLJENO GEOMETRIJO S PREDELNO STENO OZIROMA BREZ NJE (*OS* – brez predelne stene; *NAS* – s predelno steno)

		ozek VV val s konico 2500 m ³ /s											
		$n_g=0,03$	$n_g=0,04$	$n_g=0,05$	$n_g=0,06$	$n_g=0,07$	$n_g=0,08$	$n_g=0,10$	$n_g=0,12$	$n_g=0,14$	$n_g=0,16$	$n_g=0,18$	$n_g=0,2$
znižanje konice [m ³ /s]	OS	42	42	41	40	39	37	35	33	32	31	30	29
	NAS	17	16	15	13	12	11	10	9	8	8	7	7
potovalni čas konice [min]	OS	100	90	80	70	70	70	60	60	60	60	60	60
	NAS	40	40	40	30	30	30	30	30	30	30	30	30
pretok v kontrolnem prerezu R_{zg} [m ³ /s]	OS	10,1	8,6	7,5	6,7	6,0	5,4	4,5	3,8	3,3	2,9	2,5	2,2
	NAS	13,3	11,2	9,6	8,4	7,4	6,6	5,4	4,5	3,9	3,4	2,9	2,6
pretok v kontrolnem prerezu R_{sp} [m ³ /s]	OS	25,0	14,4	10,1	7,9	6,5	5,5	4,2	3,3	2,8	2,3	2,0	1,8
	NAS	9,4	6,0	3,9	2,8	2,0	1,5	0,9	0,6	0,1	0,1	0,1	0,1
povprečna globina vode [m]	OS	0,13	0,13	0,13	0,12	0,12	0,12	0,12	0,11	0,11	0,11	0,10	0,10
	NAS	0,09	0,09	0,09	0,09	0,08	0,08	0,07	0,07	0,06	0,05	0,05	0,04
povprečna hitrost vode [m]	OS	0,25	0,19	0,15	0,13	0,11	0,09	0,07	0,06	0,05	0,04	0,04	0,03
	NAS	0,20	0,15	0,12	0,10	0,08	0,07	0,05	0,04	0,03	0,02	0,02	0,02

		širok VV val s konico 2500 m ³ /s											
		$n_g=0,03$	$n_g=0,04$	$n_g=0,05$	$n_g=0,06$	$n_g=0,07$	$n_g=0,08$	$n_g=0,10$	$n_g=0,12$	$n_g=0,14$	$n_g=0,16$	$n_g=0,18$	$n_g=0,2$
znižanje konice [m ³ /s]	OS	10	15	20	24	26	26	26	25	24	23	23	22
	NAS	14	12	11	10	9	9	8	8	7	6	6	5
potovalni čas konice [min]	OS	200	220	230	170	130	120	100	90	80	80	80	200
	NAS	110	120	130	140	150	150	180	230	280	340	60	60
pretok v kontrolnem prerezu R_{zg} [m ³ /s]	OS	9,0	8,0	7,2	6,5	5,9	5,1	4,4	3,9	3,5	3,1	2,8	9,0
	NAS	13,5	11,4	9,8	8,7	7,7	7,0	5,9	5,0	4,4	3,9	3,5	3,2
pretok v kontrolnem prerezu R_{sp} [m ³ /s]	OS	35,8	28,2	22,6	18,2	14,8	10,2	7,5	5,8	4,6	3,9	3,4	35,8
	NAS	13,3	10,8	8,7	7,0	5,7	4,6	3,1	2,2	1,6	1,2	0,9	0,7
povprečna globina vode [m]	OS	0,16	0,17	0,17	0,17	0,17	0,16	0,16	0,16	0,15	0,15	0,15	0,16
	NAS	0,10	0,10	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,10	0,10	0,09	0,09	0,09
povprečna hitrost vode [m]	OS	0,22	0,18	0,15	0,13	0,11	0,09	0,07	0,06	0,05	0,05	0,04	0,22
	NAS	0,21	0,16	0,14	0,12	0,10	0,09	0,07	0,06	0,05	0,04	0,03	0,03

PRILOGA C.2

OBMOČJE S POENOSTAVLJENO GEOMETRIJO S PREDELNO STENO OZIROMA BREZ NJE (*OS* – brez predelne stene; *NAS* – s predelno steno)

		ozek VV val s konico 3000 m ³ /s											
		$n_g=0,03$	$n_g=0,04$	$n_g=0,05$	$n_g=0,06$	$n_g=0,07$	$n_g=0,08$	$n_g=0,10$	$n_g=0,12$	$n_g=0,14$	$n_g=0,16$	$n_g=0,18$	$n_g=0,2$
znižanje konice [m ³ /s]	OS	20	23	27	31	35	38	46	53	60	66	73	78
	NAS	23	32	44	62	88	126	119	108	100	93	88	83
potovalni čas konice [min]	OS	120	130	130	140	140	150	150	160	160	160	160	170
	NAS	110	120	130	150	170	190	50	60	60	60	60	60
pretok v kontrolnem prerezu R_{zg} [m ³ /s]	OS	120	113	107	101	96	91	82	75	69	63	59	54
	NAS	191	173	157	145	134	125	110	98	89	81	74	69
pretok v kontrolnem prerezu R_{sp} [m ³ /s]	OS	550	459	390	338	297	263	214	178	152	132	115	102
	NAS	195	178	164	150	138	127	107	88	74	62	52	44
povprečna globina vode [m]	OS	0,70	0,74	0,78	0,81	0,83	0,85	0,87	0,89	0,90	0,91	0,92	0,92
	NAS	0,53	0,57	0,60	0,62	0,64	0,65	0,66	0,68	0,69	0,70	0,70	0,69
povprečna hitrost vode [m]	OS	0,66	0,54	0,46	0,40	0,35	0,32	0,26	0,22	0,20	0,17	0,16	0,14
	NAS	0,57	0,47	0,40	0,35	0,31	0,28	0,23	0,20	0,17	0,16	0,14	0,13

		širok VV val s konico 3000 m ³ /s											
		$n_g=0,03$	$n_g=0,04$	$n_g=0,05$	$n_g=0,06$	$n_g=0,07$	$n_g=0,08$	$n_g=0,10$	$n_g=0,12$	$n_g=0,14$	$n_g=0,16$	$n_g=0,18$	$n_g=0,2$
znižanje konice [m ³ /s]	OS	5	5	6	7	8	8	10	11	13	14	15	17
	NAS	5	7	9	11	13	15	21	30	43	62	79	73
potovalni čas konice [min]	OS	120	130	140	150	160	170	170	170	180	180	190	190
	NAS	110	120	130	140	150	150	180	230	280	340	60	60
pretok v kontrolnem prerezu R_{zg} [m ³ /s]	OS	120	114	108	102	97	93	84	77	71	66	62	58
	NAS	193	175	160	147	136	127	111	99	90	82	75	70
pretok v kontrolnem prerezu R_{sp} [m ³ /s]	OS	567	477	409	359	318	286	235	199	172	151	135	122
	NAS	193	175	160	147	137	127	112	99	90	82	75	68
povprečna globina vode [m]	OS	0,71	0,76	0,79	0,83	0,85	0,88	0,91	0,93	0,95	0,97	0,98	0,99
	NAS	0,54	0,58	0,61	0,64	0,66	0,68	0,71	0,73	0,75	0,76	0,77	0,77
povprečna hitrost vode [m]	OS	0,66	0,54	0,46	0,41	0,36	0,32	0,27	0,23	0,20	0,18	0,16	0,15
	NAS	0,57	0,46	0,39	0,34	0,30	0,27	0,23	0,20	0,17	0,15	0,14	0,13

PRILOGA C.3

OBMOČJE S POENOSTAVLJENO GEOMETRIJO S PREDELNO STENO OZIROMA BREZ NJE (*OS* – brez predelne stene; *NAS* – s predelno steno)

		ozek VV val s konico 3500 m ³ /s											
		<i>n_g</i> =0,03	<i>n_g</i> =0,04	<i>n_g</i> =0,05	<i>n_g</i> =0,06	<i>n_g</i> =0,07	<i>n_g</i> =0,08	<i>n_g</i> =0,10	<i>n_g</i> =0,12	<i>n_g</i> =0,14	<i>n_g</i> =0,16	<i>n_g</i> =0,18	<i>n_g</i> =0,2
znižanje konice [m ³ /s]	OS	27	30	31	33	34	36	42	45	49	52	57	60
	NAS	26	28	34	40	46	53	70	92	123	165	212	201
potovalni čas konice [min]	OS	120	130	130	130	140	140	140	140	150	150	150	150
	NAS	100	110	110	120	120	130	130	150	160	180	70	70
pretok v kontrolnem prerezu <i>R_{zg}</i> [m ³ /s]	OS	250	243	234	225	217	208	194	180	168	158	148	140
	NAS	422	393	367	345	324	305	273	246	226	208	194	181
pretok v kontrolnem prerezu <i>R_{sp}</i> [m ³ /s]	OS	1080	944	836	748	676	616	520	448	392	347	310	280
	NAS	424	398	375	355	337	318	286	259	235	213	191	171
povprečna globina vode [m]	OS	1,22	1,29	1,35	1,40	1,44	1,48	1,53	1,57	1,60	1,63	1,65	1,67
	NAS	0,95	1,02	1,08	1,13	1,17	1,20	1,25	1,29	1,31	1,33	1,33	1,33
povprečna hitrost vode [m]	OS	0,83	0,70	0,61	0,54	0,48	0,44	0,37	0,32	0,28	0,25	0,22	0,20
	NAS	0,75	0,62	0,53	0,47	0,42	0,38	0,32	0,28	0,25	0,22	0,20	0,19

		širok VV val s konico 3500 m ³ /s											
		<i>n_g</i> =0,03	<i>n_g</i> =0,04	<i>n_g</i> =0,05	<i>n_g</i> =0,06	<i>n_g</i> =0,07	<i>n_g</i> =0,08	<i>n_g</i> =0,10	<i>n_g</i> =0,12	<i>n_g</i> =0,14	<i>n_g</i> =0,16	<i>n_g</i> =0,18	<i>n_g</i> =0,2
znižanje konice [m ³ /s]	OS	7	7	8	8	8	8	10	10	11	12	13	13
	NAS	6	7	8	9	10	12	15	18	22	26	30	36
potovalni čas konice [min]	OS	130	130	130	140	140	140	150	160	160	170	170	170
	NAS	110	120	120	130	130	140	150	150	170	180	190	200
pretok v kontrolnem prerezu <i>R_{zg}</i> [m ³ /s]	OS	250	243	235	226	217	209	195	182	171	160	151	142
	NAS	424	395	369	347	327	308	277	251	230	212	197	183
pretok v kontrolnem prerezu <i>R_{sp}</i> [m ³ /s]	OS	1101	964	857	770	697	635	540	469	412	367	329	298
	NAS	423	394	370	347	327	308	277	252	231	213	197	184
povprečna globina vode [m]	OS	1,24	1,31	1,37	1,42	1,47	1,50	1,56	1,61	1,64	1,67	1,70	1,72
	NAS	0,96	1,04	1,10	1,15	1,19	1,23	1,29	1,33	1,37	1,40	1,42	1,44
povprečna hitrost vode [m]	OS	0,83	0,70	0,61	0,54	0,48	0,44	0,37	0,32	0,28	0,25	0,23	0,21
	NAS	0,74	0,61	0,52	0,46	0,41	0,38	0,32	0,28	0,25	0,22	0,20	0,18

PRILOGA C.4

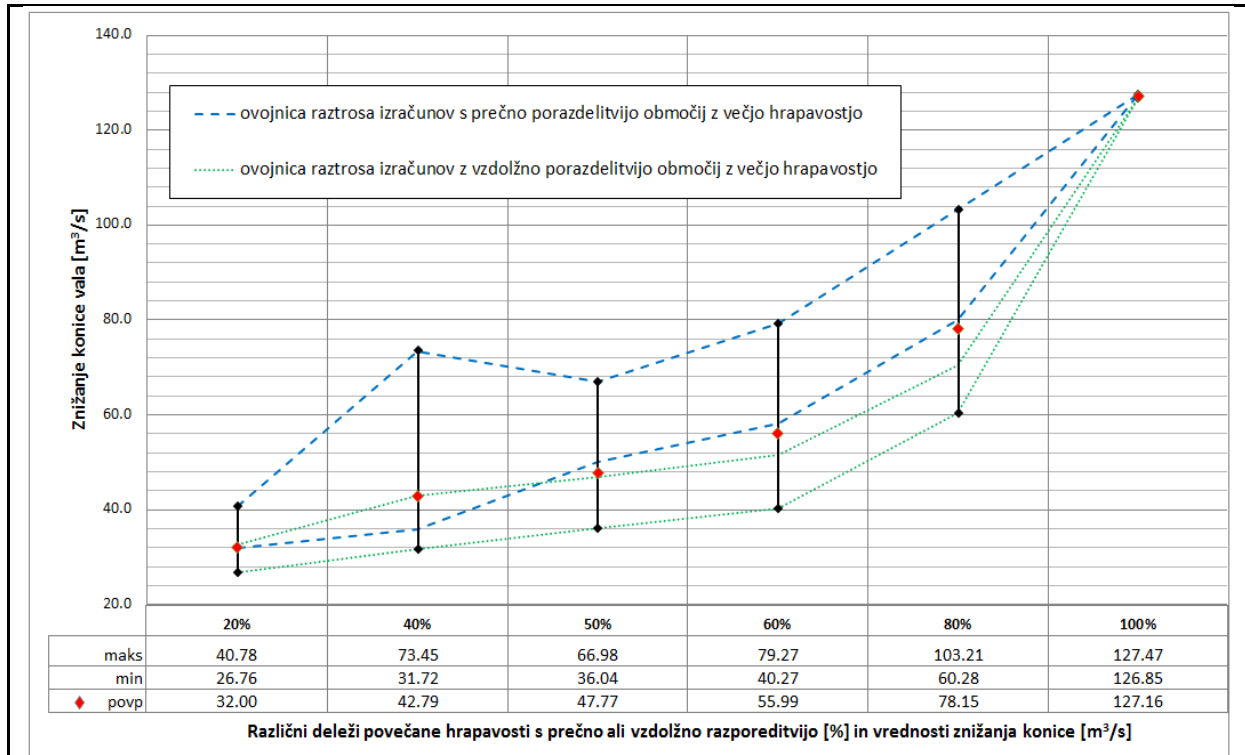
OBMOČJE S POENOSTAVLJENO GEOMETRIJO S PREDELNO STENO OZIROMA BREZ NJE (*OS* – brez predelne stene; *NAS* – s predelno steno)

		ozek VV val s konico 4000 m ³ /s											
		$n_g=0,03$	$n_g=0,04$	$n_g=0,05$	$n_g=0,06$	$n_g=0,07$	$n_g=0,08$	$n_g=0,10$	$n_g=0,12$	$n_g=0,14$	$n_g=0,16$	$n_g=0,18$	$n_g=0,2$
znižanje konice [m ³ /s]	OS	39	39	41	42	43	43	47	49	51	54	58	60
	NAS	35	37	39	43	47	52	63	73	86	102	120	140
potovalni čas konice [min]	OS	120	120	130	130	140	130	140	150	150	150	160	160
	NAS	100	110	120	120	120	120	120	130	130	140	140	150
pretok v kontrolnem prerezu R_{zg} [m ³ /s]	OS	387	378	366	354	342	331	310	291	275	261	245	232
	NAS	671	631	594	561	533	508	462	423	390	362	336	315
pretok v kontrolnem prerezu R_{sp} [m ³ /s]	OS	1566	1400	1264	1154	1061	977	841	735	652	586	532	485
	NAS	671	636	605	577	552	527	482	444	410	381	354	329
povprečna globina vode [m]	OS	1,76	1,85	1,92	1,98	2,04	2,08	2,15	2,21	2,25	2,29	2,32	2,35
	NAS	1,40	1,49	1,56	1,63	1,68	1,73	1,81	1,87	1,91	1,95	1,97	1,99
povprečna hitrost vode [m]	OS	0,93	0,79	0,69	0,61	0,56	0,51	0,43	0,38	0,33	0,30	0,27	0,25
	NAS	0,87	0,72	0,62	0,54	0,49	0,45	0,39	0,34	0,30	0,27	0,25	0,23

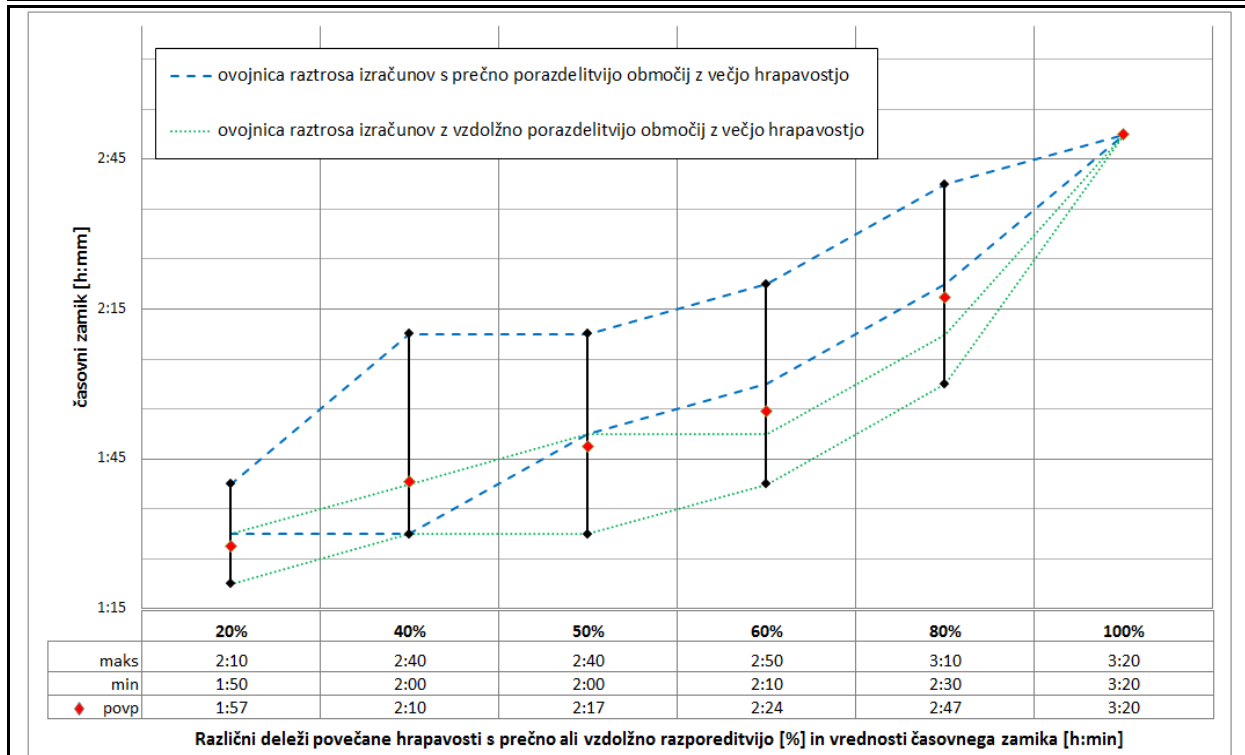
		širok VV val s konico 4000 m ³ /s											
		$n_g=0,03$	$n_g=0,04$	$n_g=0,05$	$n_g=0,06$	$n_g=0,07$	$n_g=0,08$	$n_g=0,10$	$n_g=0,12$	$n_g=0,14$	$n_g=0,16$	$n_g=0,18$	$n_g=0,2$
znižanje konice [m ³ /s]	OS	10	10	11	10	9	10	11	12	12	13	13	14
	NAS	9	10	10	11	12	13	14	16	20	23	25	29
potovalni čas konice [min]	OS	130	130	140	140	140	140	150	150	160	160	160	160
	NAS	120	120	120	120	130	130	180	140	150	160	160	170
pretok v kontrolnem prerezu R_{zg} [m ³ /s]	OS	387	378	367	355	343	333	312	294	276	262	249	237
	NAS	675	635	598	565	537	512	466	428	395	367	342	321
pretok v kontrolnem prerezu R_{sp} [m ³ /s]	OS	1593	1429	1293	1177	1084	999	866	757	673	607	551	504
	NAS	673	634	597	564	537	512	467	428	395	368	343	322
povprečna globina vode [m]	OS	1,78	1,88	1,95	2,01	2,07	2,11	2,19	2,25	2,30	2,34	2,37	2,40
	NAS	1,42	1,51	1,58	1,65	1,71	1,76	1,84	1,91	1,96	2,01	2,05	2,08
povprečna hitrost vode [m]	OS	0,93	0,79	0,69	0,62	0,56	0,51	0,43	0,38	0,34	0,30	0,27	0,25
	NAS	0,86	0,71	0,61	0,54	0,48	0,44	0,38	0,33	0,30	0,27	0,24	0,23

PRILOGA D.1

OBMOČJE S POENOSTAVLJENO GEOMETRIJO S PREDELNO STENO



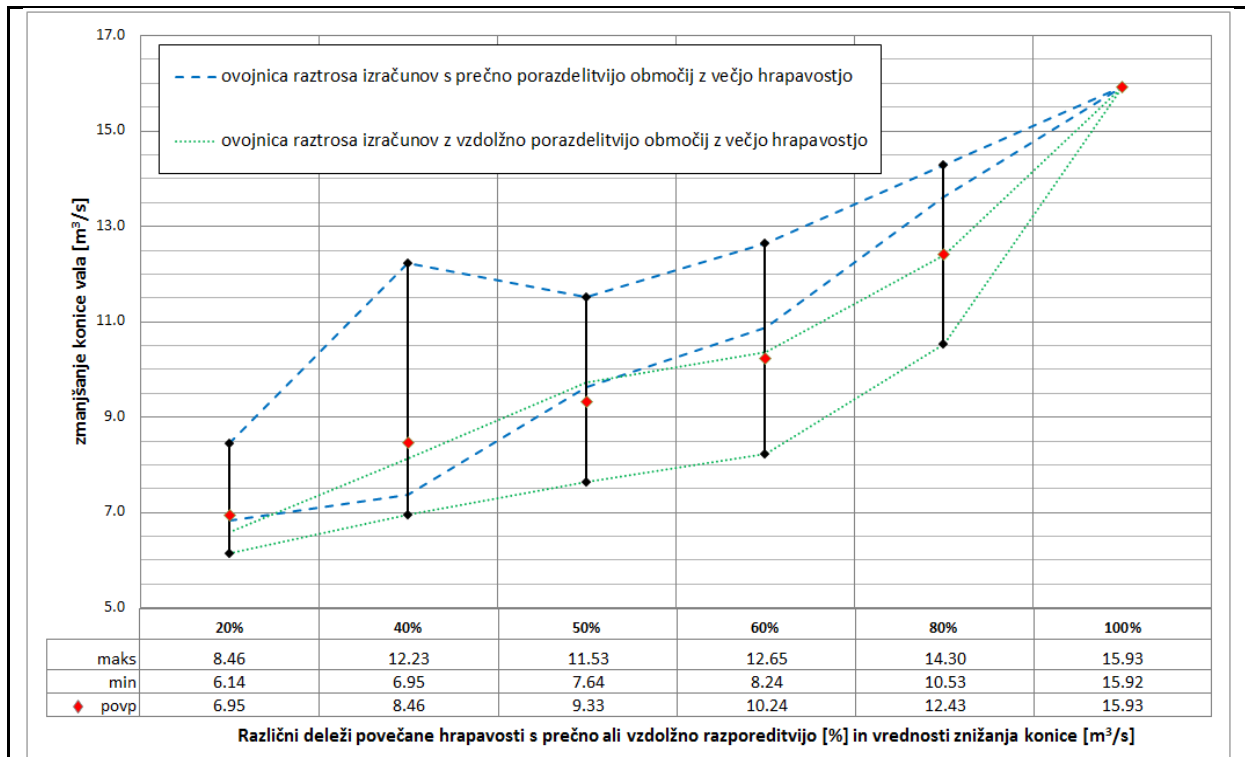
Znižanje konice vala za ozek VV s konico 3000 m³/s pri različnih deležih povečane hrapavosti s prikazom vpliva načina razporeditve območij povečane hrapavosti.



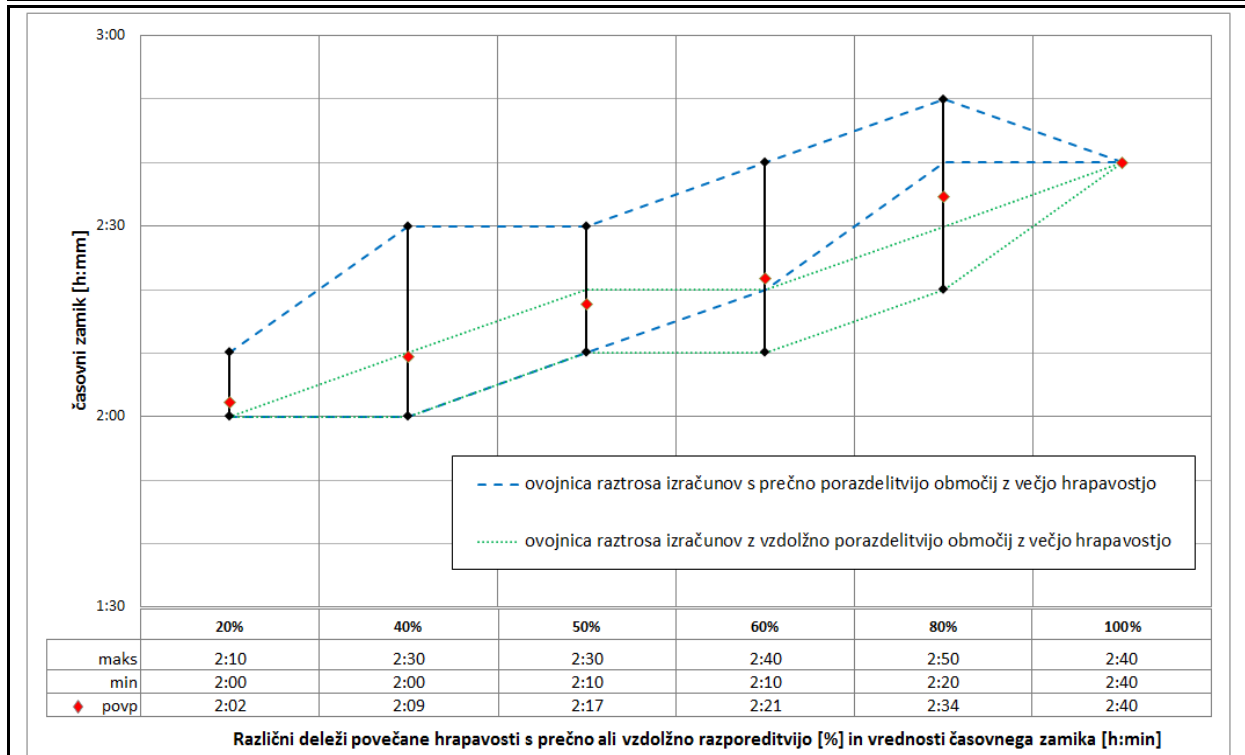
Dolžina potovalnega časa za ozek VV s konico 3000 m³/s pri različnih deležih povečane hrapavosti s prikazom vpliva načina razporeditve območij povečane hrapavosti.

PRILOGA D.2

OBMOČJE S POENOSTAVLJENO GEOMETRIJO S PREDELNO STENO



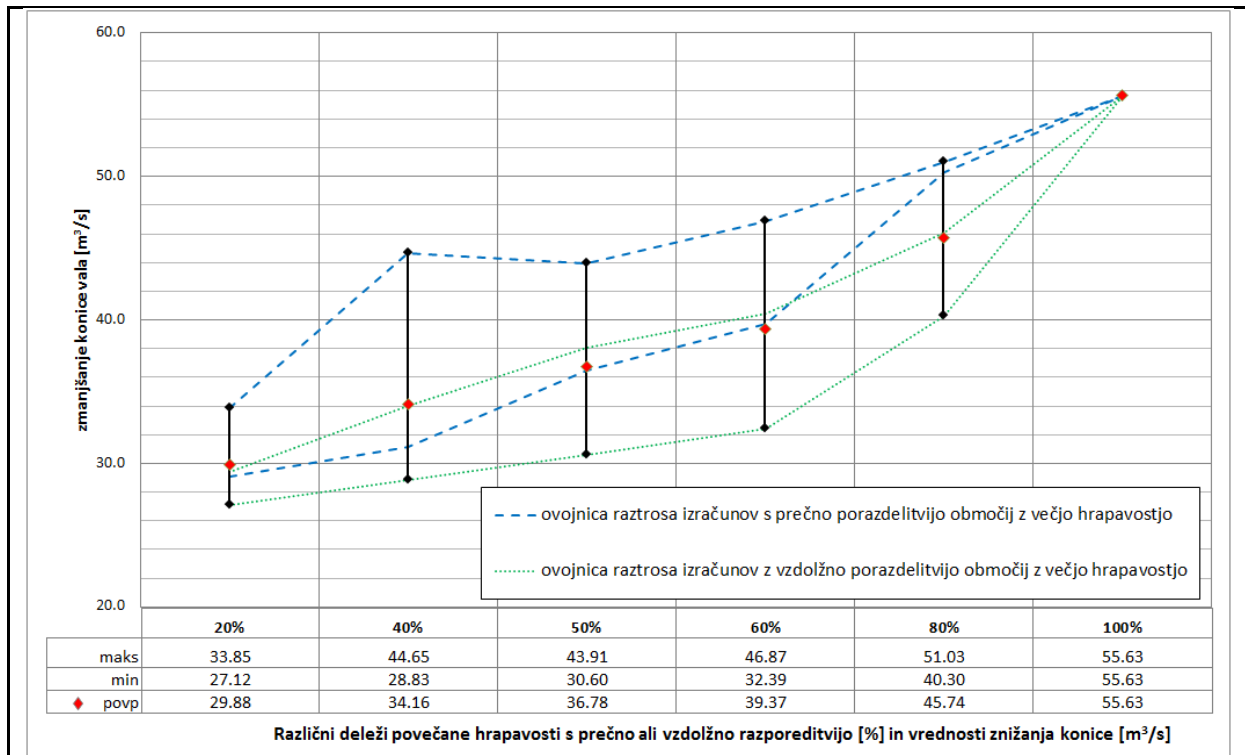
Znižanje konice vala za širok VV s konico 3000 m³/s pri različnih deležih povečane hrapavosti s prikazom vpliva načina razporeditve območij povečane hrapavosti.



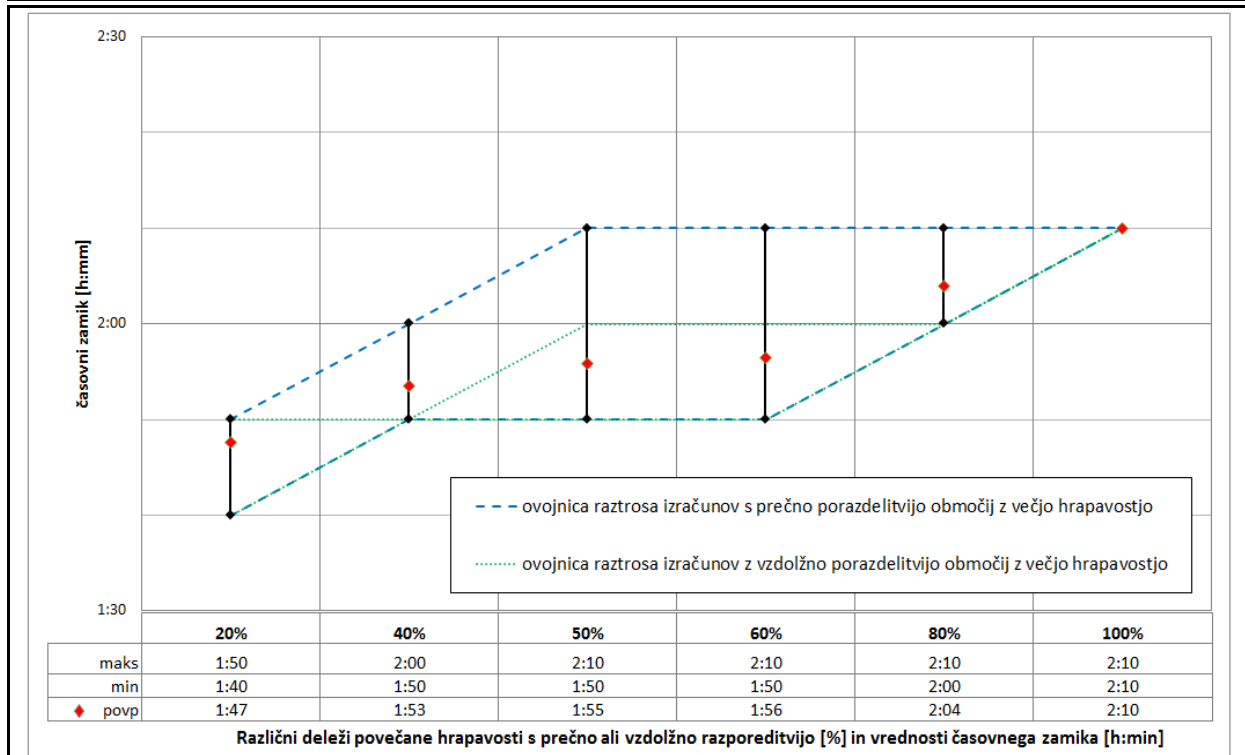
Dolžina potovalnega časa za širok VV s konico 3000 m³/s pri različnih deležih povečane hrapavosti s prikazom vpliva načina razporeditve območij povečane hrapavosti.

PRILOGA D.3

OBMOČJE S POENOSTAVLJENO GEOMETRIJO S PREDELNO STENO



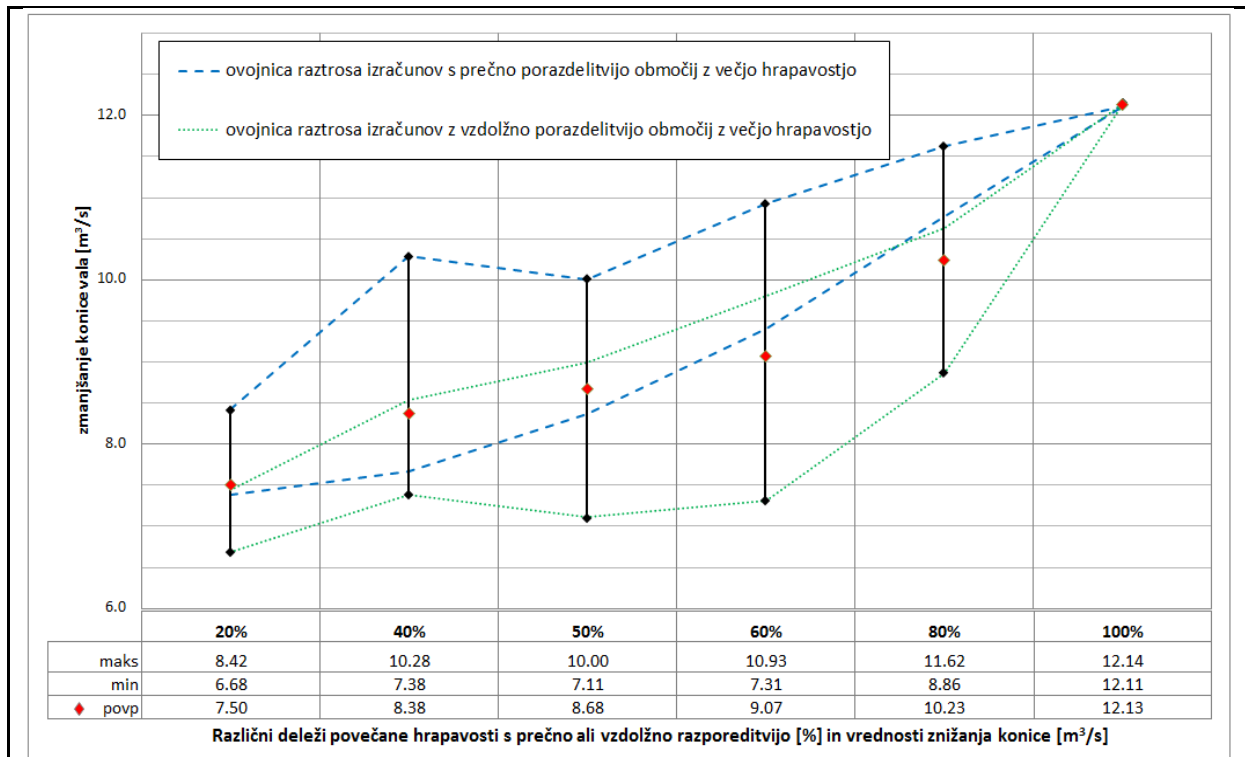
Znižanje konice vaha za ozek VV s konico 3500 m³/s pri različnih deležih povečane hrapavosti s prikazom vpliva načina razporeditve območij povečane hrapavosti.



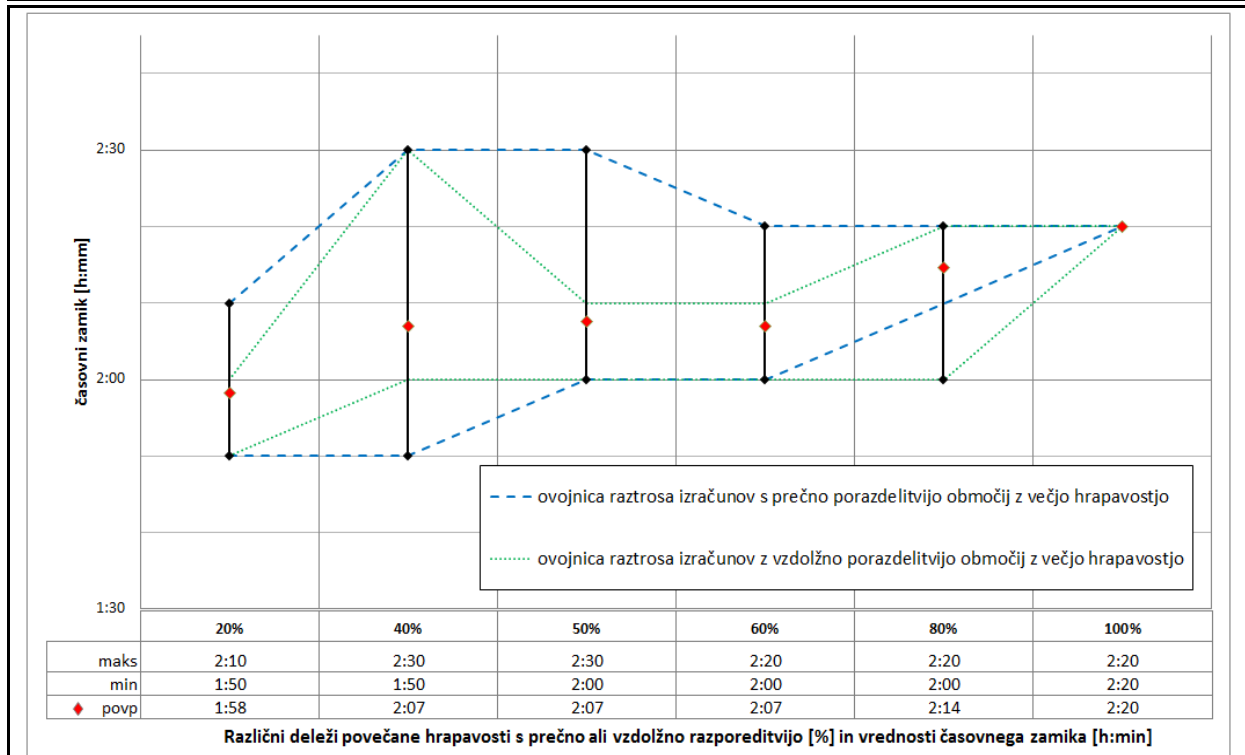
Dolžina potovalnega časa za ozek VV s konico 3500 m³/s pri različnih deležih povečane hrapavosti s prikazom vpliva načina razporeditve območij povečane hrapavosti.

PRILOGA D.4

OBMOČJE S POENOSTAVLJENO GEOMETRIJO S PREDELNO STENO



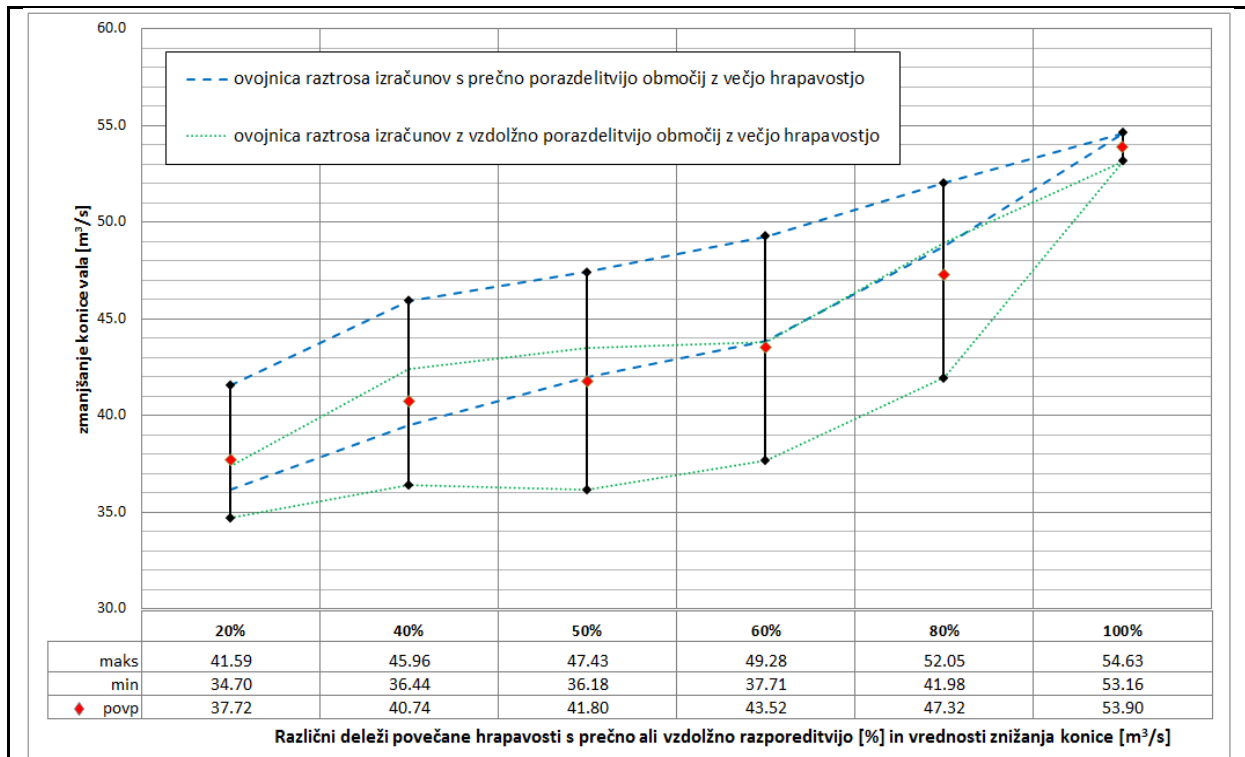
Znižanje konice vala za širok VV s konico 3500 m³/s pri različnih deležih povečane hrapavosti s prikazom vpliva načina razporeditve območij povečane hrapavosti.



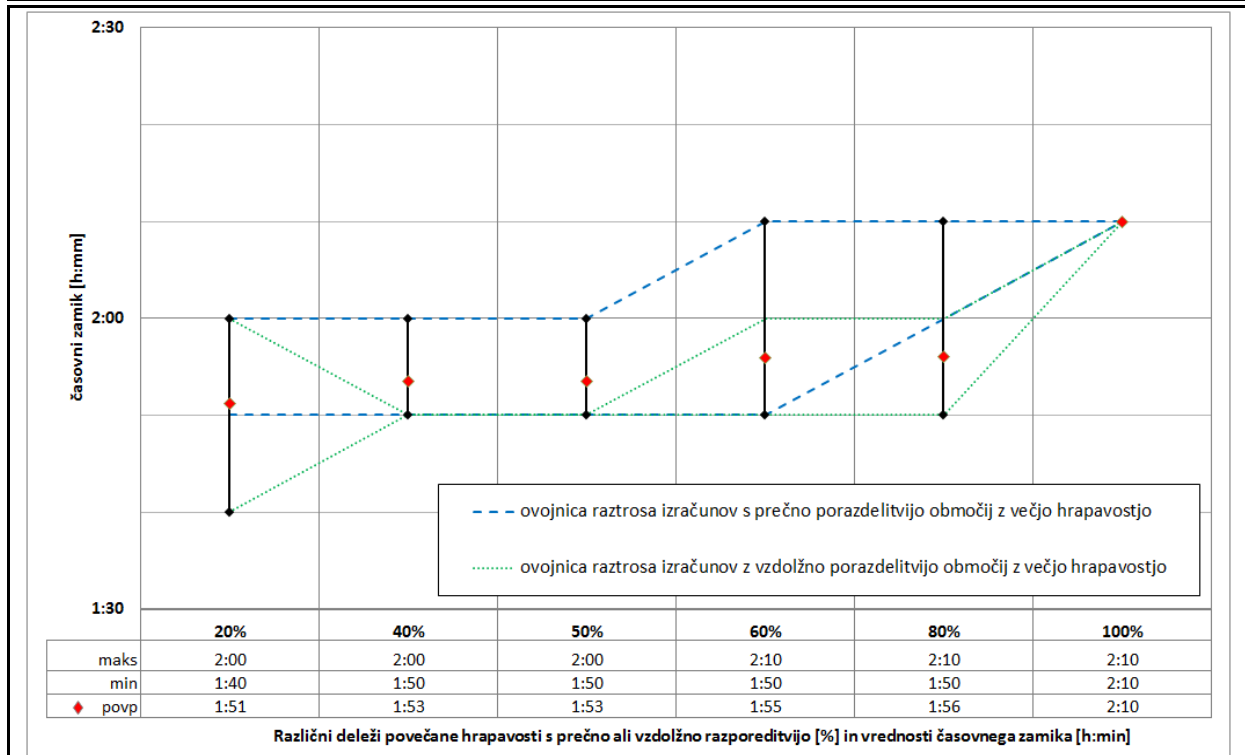
Dolžina potovalnega časa za širok VV s konico 3500 m³/s pri različnih deležih povečane hrapavosti s prikazom vpliva načina razporeditve območij povečane hrapavosti.

PRILOGA D.5

OBMOČJE S POENOSTAVLJENO GEOMETRIJO S PREDELNO STENO



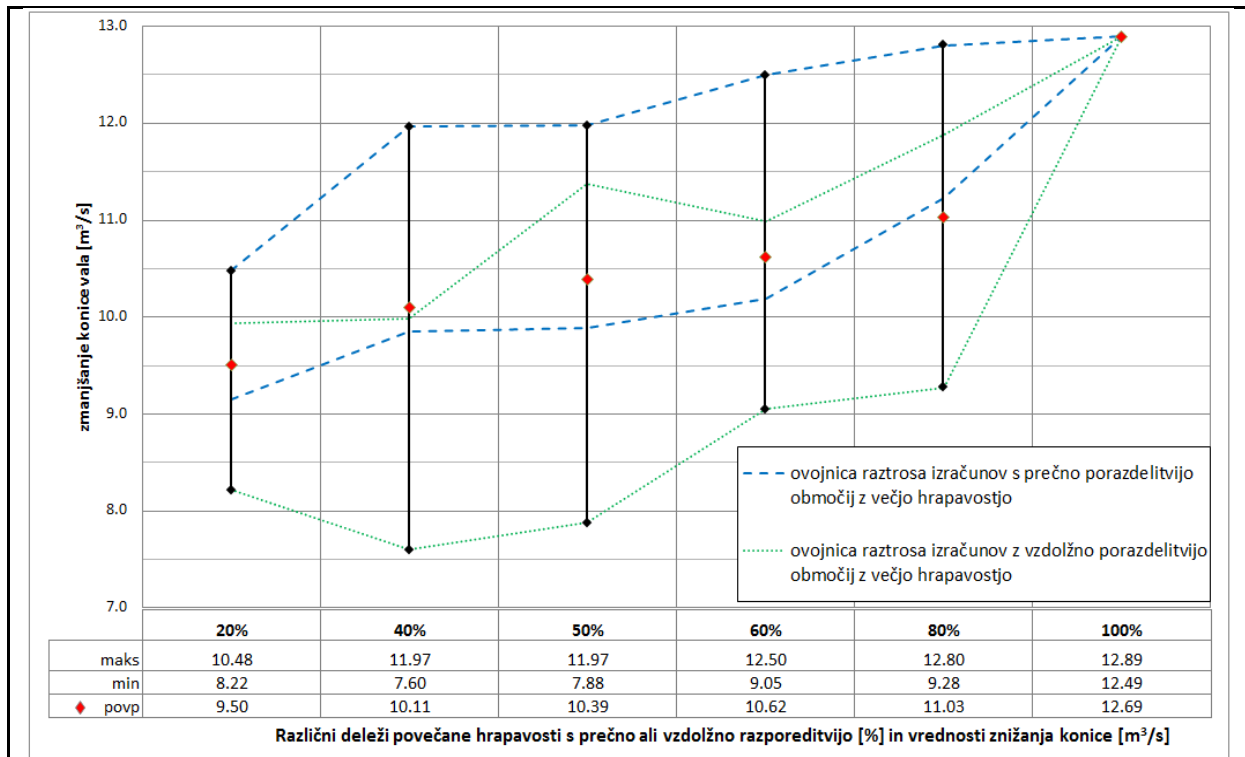
Znižanje konice vata za ozek VV s konico 4000 m³/s pri različnih deležih povečane hrapavosti s prikazom vpliva načina razporeditve območij povečane hrapavosti.



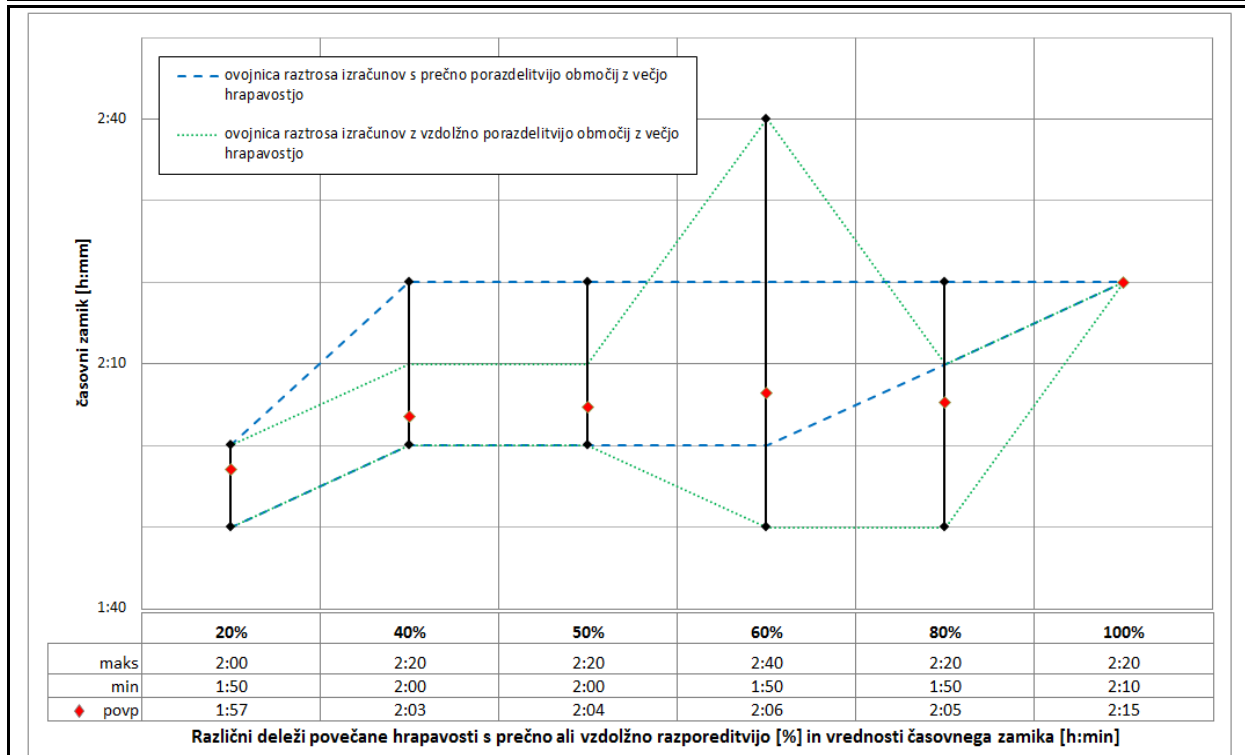
Dolžina potovalnega časa za ozek VV s konico 4000 m³/s pri različnih deležih povečane hrapavosti s prikazom vpliva načina razporeditve območij povečane hrapavosti.

PRILOGA D.6

OBMOČJE S POENOSTAVLJENO GEOMETRIJO S PREDELNO STENO



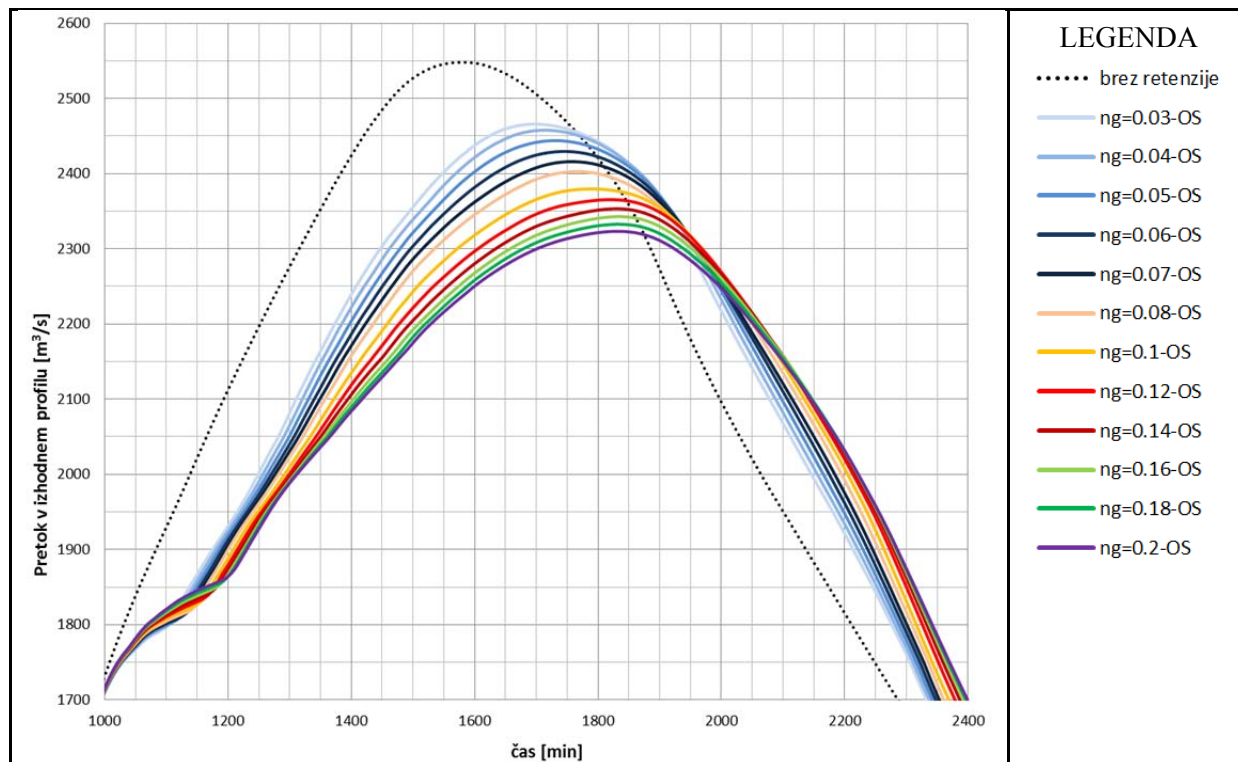
Znižanje konice vala za širok VV s konico 4000 m³/s pri različnih deležih povečane hrapavosti s prikazom vpliva načina razporeditve območij povečane hrapavosti.



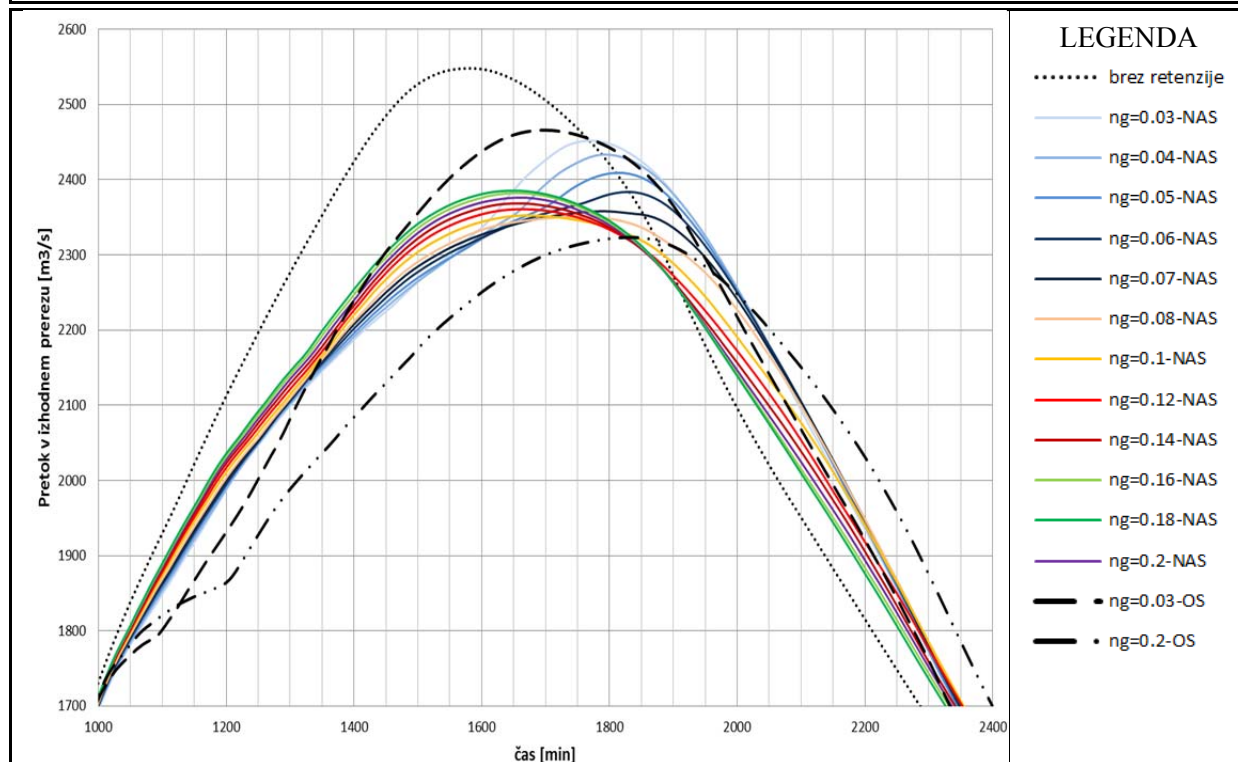
Dolžina potovalnega časa za širok VV s konico 4000 m³/s pri različnih deležih povečane hrapavosti s prikazom vpliva načina razporeditve območij povečane hrapavosti.

PRILOGA E.1

OBMOČJE KRŠKO-BREŽIŠKEGA POLJA S PREDELNIMA STENAMA OZIROMA BREZ NJIJU
(OS – brez predelnih sten; NAS – s predelnima stenama)



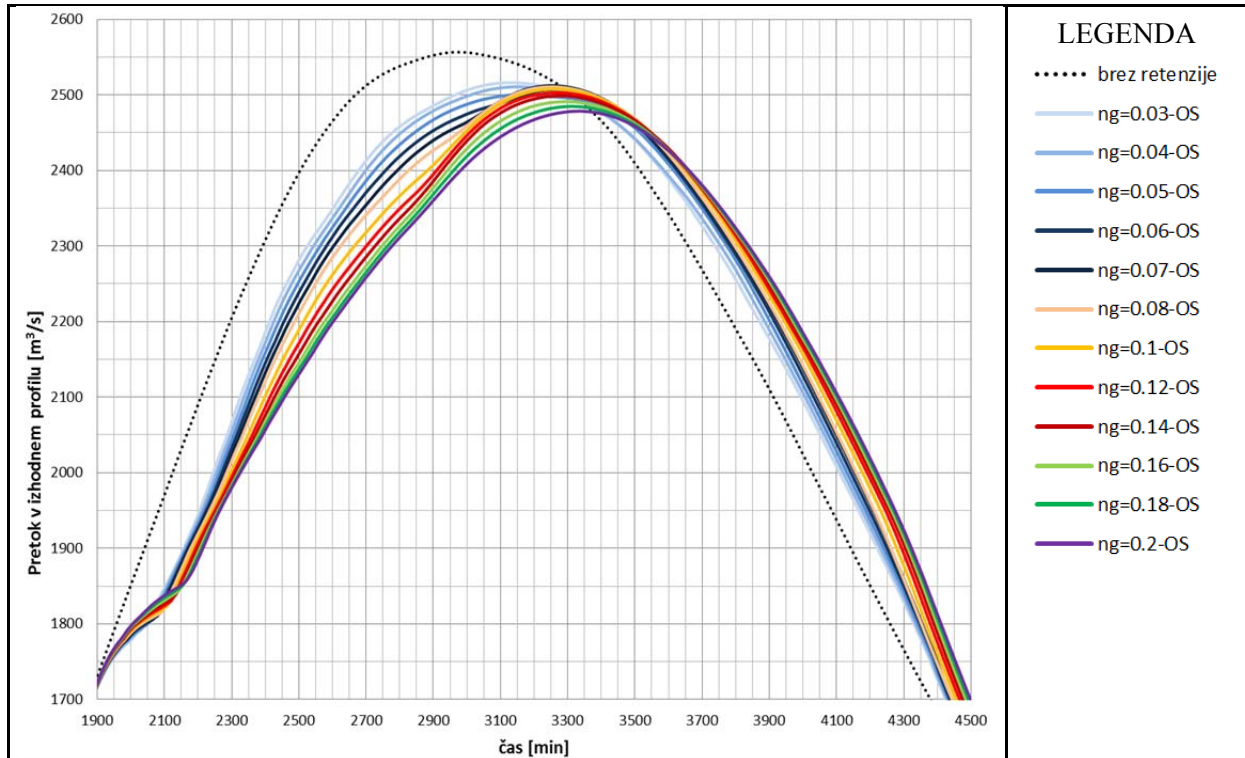
Preoblikovanje hidrograma ozkega VV vala Q_{10} s konico $2560 \text{ m}^3/\text{s}$ v izhodnem prerezu pri spreminjajoči hrapavosti retenzije za varianto brez predelnih sten.



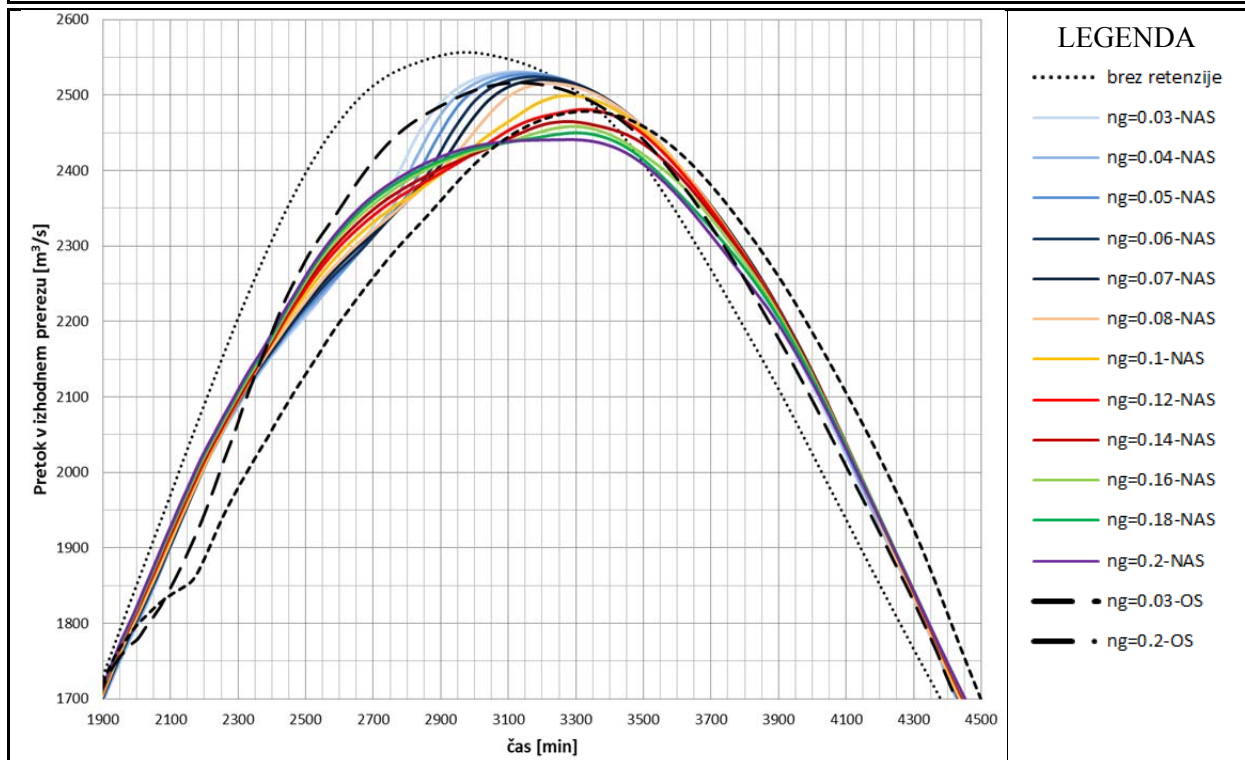
Preoblikovanje hidrograma ozkega VV vala Q_{10} s konico $2560 \text{ m}^3/\text{s}$ v izhodnem prerezu pri spreminjajoči hrapavosti retenzije za varianto s predelnima stenama oziroma brez njiju.

PRILOGA E.2

OBMOČJE KRŠKO-BREŽIŠKEGA POLJA S PREDELNIMA STENAMA OZIROMA BREZ NJIJU
(OS – brez predelnih sten; NAS – s predelnima stenama)



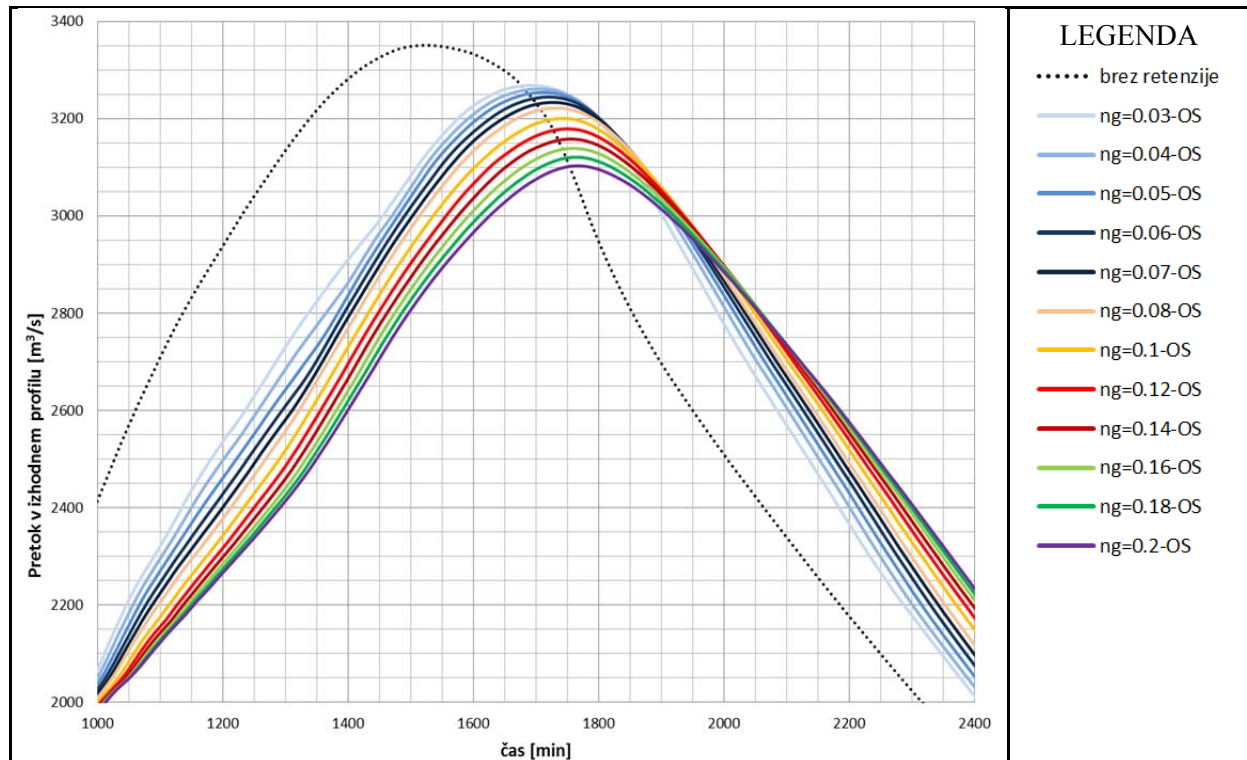
Preoblikovanje hidrograma širokega VV vala Q_{10} s konico $2560 \text{ m}^3/\text{s}$ v izhodnem prerezu pri spreminjajoči hrapavosti retenzije za varianto brez predelnih sten.



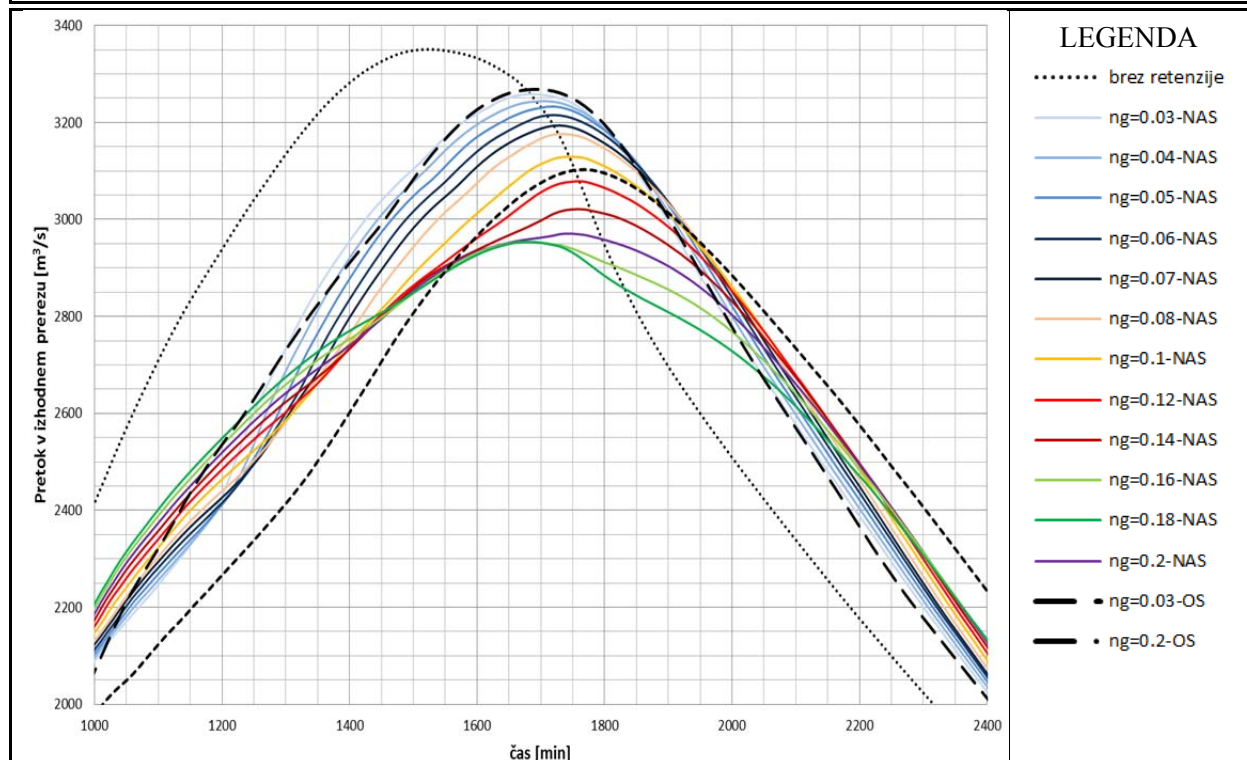
Preoblikovanje hidrograma širokega VV vala Q_{10} s konico $2560 \text{ m}^3/\text{s}$ v izhodnem prerezu pri spreminjajoči hrapavosti retenzije za varianto s predelnima stenama oziroma brez njiju.

PRILOGA E.3

OBMOČJE KRŠKO-BREŽIŠKEGA POLJA S PREDELNIMA STENAMA OZIROMA BREZ NJIJU
(OS – brez predelnih sten; NAS – s predelnima stenama)



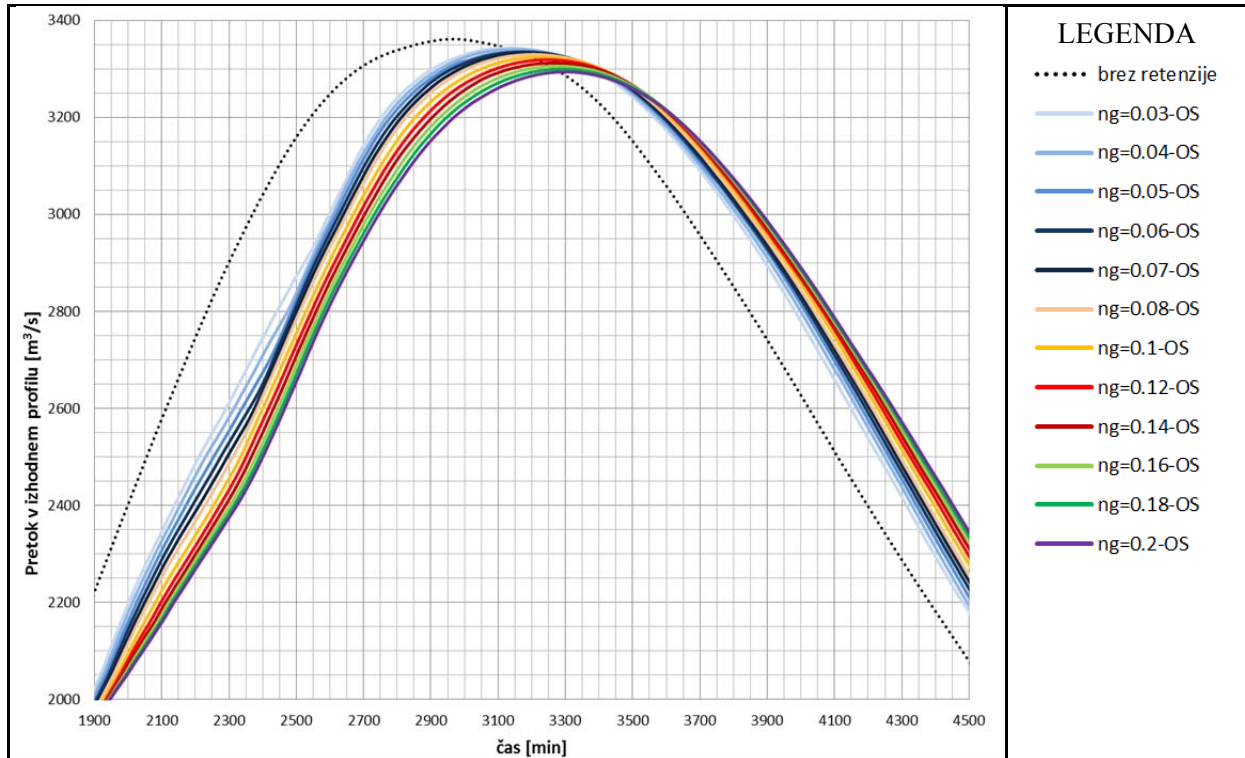
Preoblikovanje hidrograma ozkega VV vala Q_{50} s konico $3365 \text{ m}^3/\text{s}$ v izhodnem prerezu pri spreminjajoči hrapavosti retenzije za varianto brez predelnih sten.



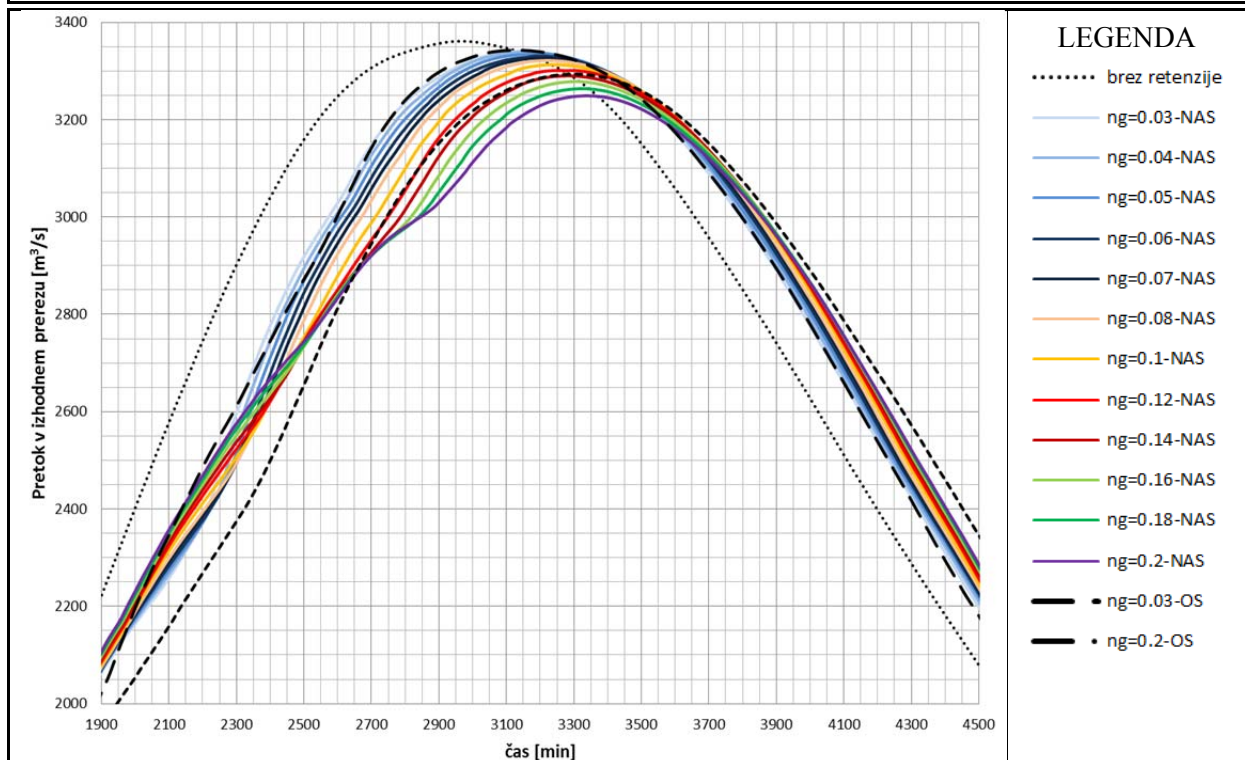
Preoblikovanje hidrograma ozkega VV vala Q_{50} s konico $3365 \text{ m}^3/\text{s}$ v izhodnem prerezu pri spreminjajoči hrapavosti retenzije za varianto s predelnima stenama oziroma brez njiju.

PRILOGA E.4

OBMOČJE KRŠKO-BREŽIŠKEGA POLJA S PREDELNIMA STENAMA OZIROMA BREZ NJIJU
(OS – brez predelnih sten; NAS – s predelnima stenama)



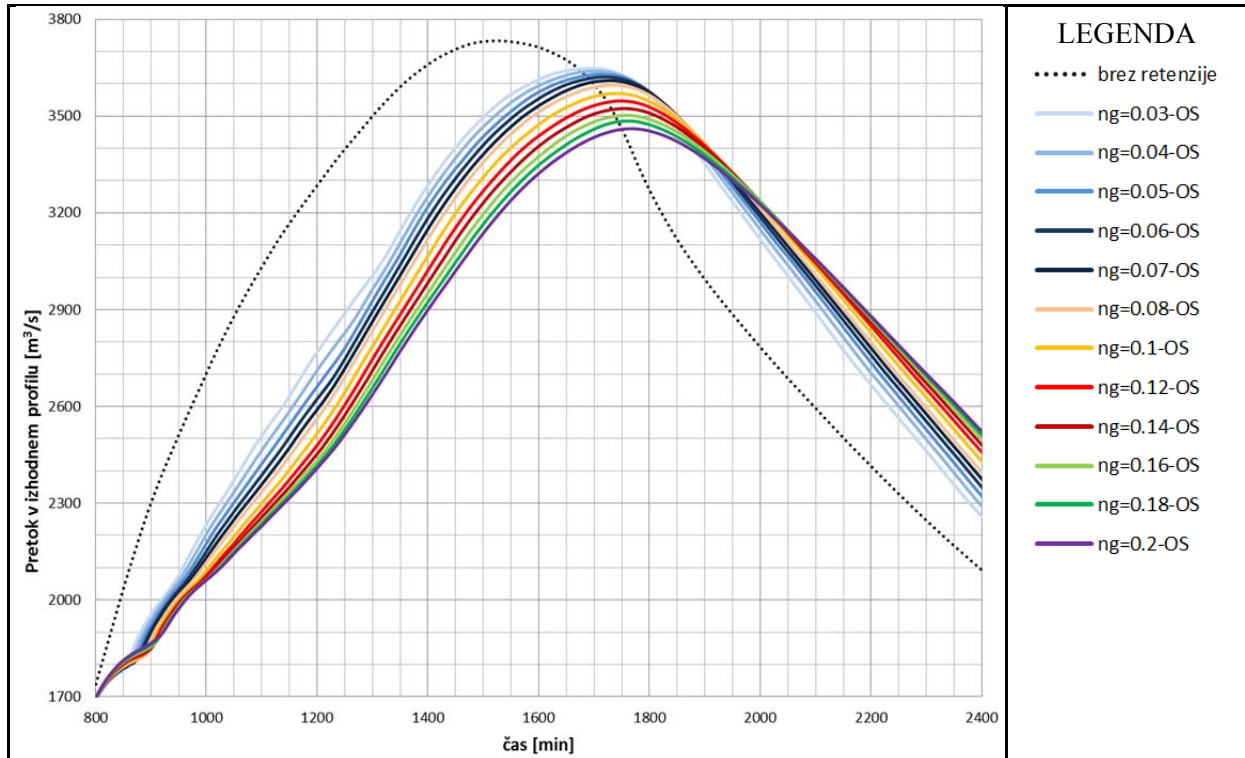
Preoblikovanje hidrograma širokega VV vala Q_{50} s konico $3365 \text{ m}^3/\text{s}$ v izhodnem prerezu pri spreminjajoči hrapavosti retenzije za varianto brez predelnih sten.



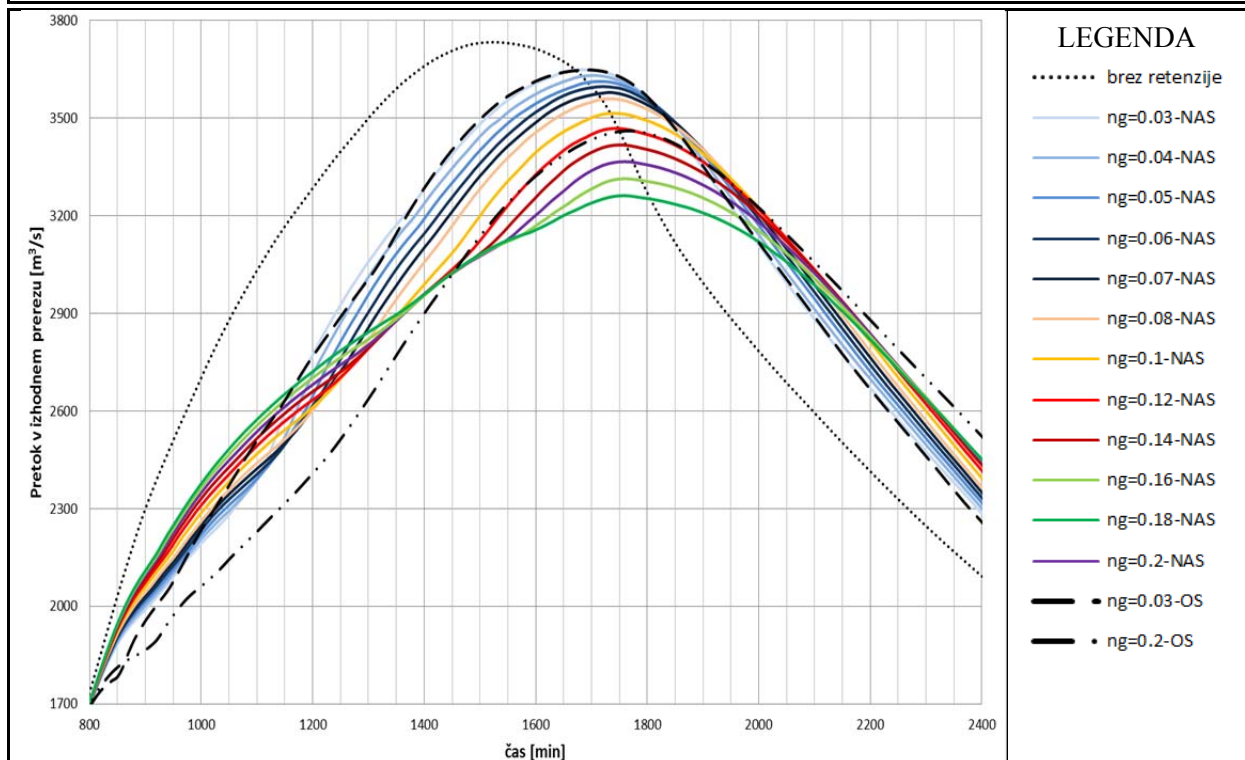
Preoblikovanje hidrograma širokega VV vala Q_{50} s konico $3365 \text{ m}^3/\text{s}$ v izhodnem prerezu pri spreminjajoči hrapavosti retenzije za varianto s predelnima stenama oziroma brez njiju.

PRILOGA E.5

OBMOČJE KRŠKO-BREŽIŠKEGA POLJA S PREDELNIMA STENAMA OZIROMA BREZ NJIJU
(OS – brez predelnih sten; NAS – s predelnima stenama)



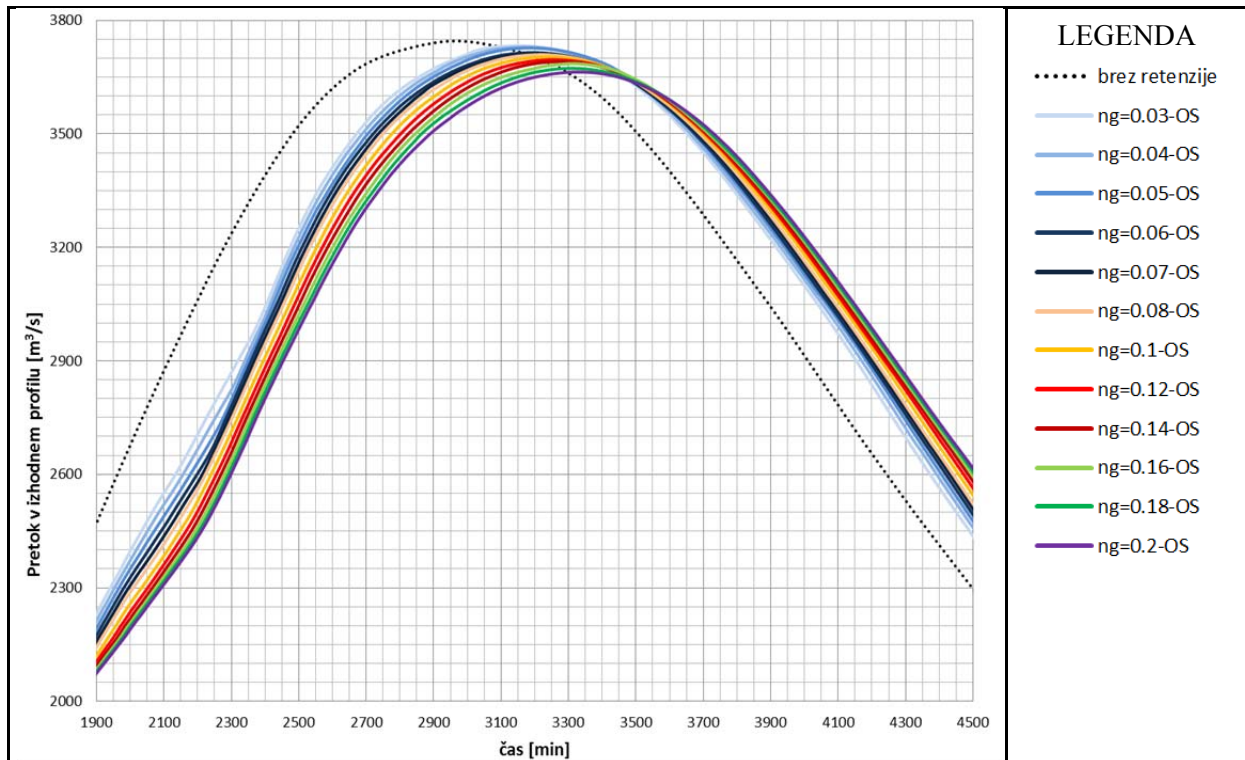
Preoblikovanje hidrograma ozkega VV vala Q_{100} s konico $3750 \text{ m}^3/\text{s}$ v izhodnem prerezu pri spreminjajoči hrapavosti retenzije za varianto brez predelnih sten.



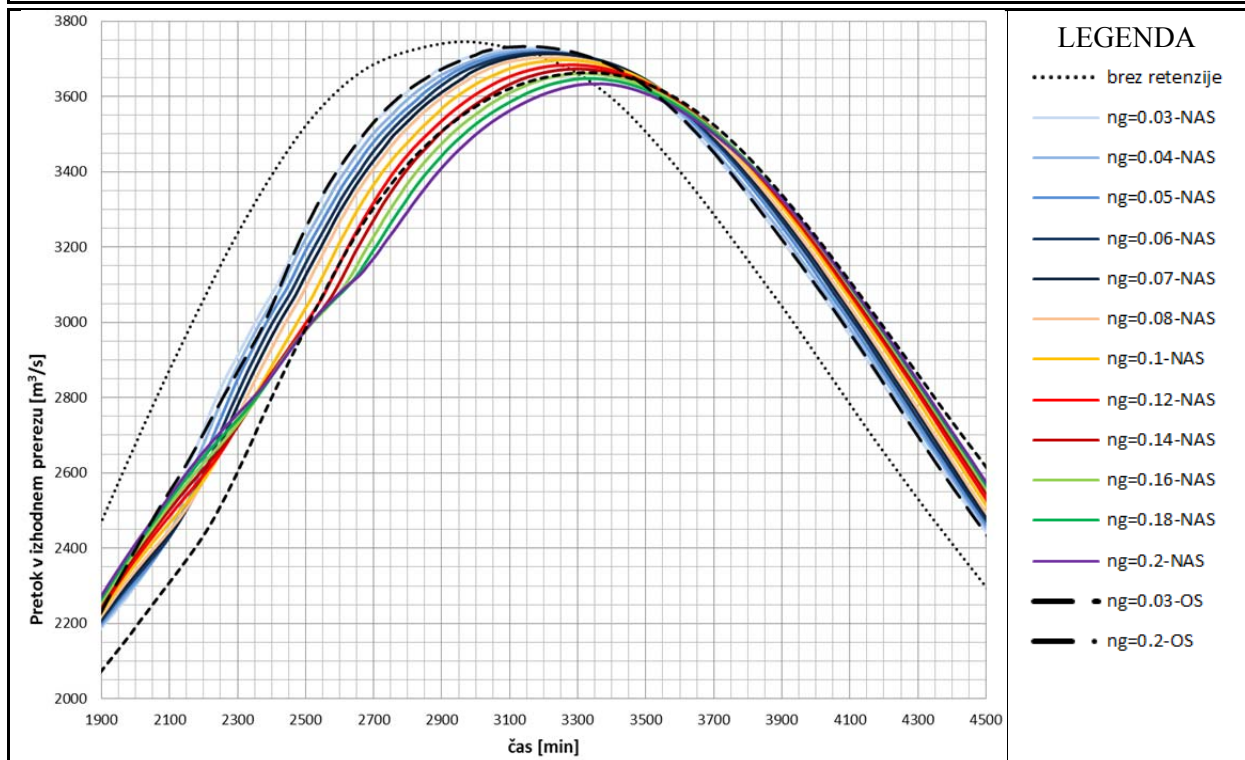
Preoblikovanje hidrograma ozkega VV vala Q_{100} s konico $3750 \text{ m}^3/\text{s}$ v izhodnem prerezu pri spreminjajoči hrapavosti retenzije za varianto s predelnima stenama oziroma brez njiju.

PRILOGA E.6

OBMOČJE KRŠKO-BREŽIŠKEGA POLJA S PREDELNIMA STENAMA OZIROMA BREZ NJIJU
(OS – brez predelnih sten; NAS – s predelnima stenama)



Preoblikovanje hidrograma širokega VV vala Q_{100} s konico $3750 \text{ m}^3/\text{s}$ v izhodnem prerezu pri spreminjajoči hrapavosti retenzije za varianto brez predelnih sten.



Preoblikovanje hidrograma širokega VV vala Q_{100} s konico $3750 \text{ m}^3/\text{s}$ v izhodnem prerezu pri spreminjajoči hrapavosti retenzije za varianto s predelnima stenama oziroma brez njiju.

PRILOGA F.1

OBMOČJE KRŠKO-BREŽIŠKEGA POLJA S PREDELNIMA STENAMA OZIROMA BREZ NJIJU (*OS* – brez predelnih sten; *NAS* – s predelnima stenama)

		ozek VV val Q_{10} s konico 2560 m ³ /s											
		$n_g=0,03$	$n_g=0,04$	$n_g=0,05$	$n_g=0,06$	$n_g=0,07$	$n_g=0,08$	$n_g=0,10$	$n_g=0,12$	$n_g=0,14$	$n_g=0,16$	$n_g=0,18$	$n_g=0,2$
znižanje konice [m ³ /s]	OS	94	102	116	131	144	157	180	195	207	217	227	237
	NAS	108	127	151	176	202	209	207	199	191	184	178	175
potovalni čas konice [min]	OS	260	270	290	310	320	330	350	380	390	390	390	380
	NAS	330	350	370	390	350	310	230	220	220	220	210	210
vodostaj v izhodnem prerezu [m.n.v.]	OS	144,92	144,91	144,89	144,87	144,85	144,83	144,80	144,78	144,76	144,75	144,74	144,72
	NAS	144,90	144,88	144,84	144,81	144,77	144,76	144,76	144,77	144,79	144,80	144,80	144,81
površina poplavljenosti [km ²]	OS	8,1	8,3	8,5	8,9	9,1	9,3	9,8	10,1	10,4	10,5	10,7	10,7
	NAS	9,1	9,3	9,5	9,6	9,6	9,6	9,6	9,5	9,3	9,2	8,9	8,7
povprečna globina vode [m]	OS	0,88	0,95	1,02	1,09	1,15	1,20	1,27	1,33	1,37	1,41	1,44	1,46
	NAS	0,94	0,96	0,96	0,97	0,97	0,97	0,96	0,95	0,93	0,92	0,90	0,88
povprečna hitrost vode [m]	OS	0,39	0,34	0,31	0,28	0,26	0,24	0,21	0,19	0,17	0,16	0,15	0,14
	NAS	0,35	0,30	0,27	0,24	0,21	0,20	0,16	0,14	0,12	0,11	0,10	0,09

		širok VV val Q_{10} s konico 2560 m ³ /s											
		$n_g=0,03$	$n_g=0,04$	$n_g=0,05$	$n_g=0,06$	$n_g=0,07$	$n_g=0,08$	$n_g=0,10$	$n_g=0,12$	$n_g=0,14$	$n_g=0,16$	$n_g=0,18$	$n_g=0,2$
znižanje konice [m ³ /s]	OS	44	49	60	52	48	49	52	57	61	69	75	82
	NAS	29	30	32	36	40	45	60	79	95	102	110	119
potovalni čas konice [min]	OS	260	270	290	390	370	370	380	390	400	420	430	450
	NAS	240	260	280	300	320	340	400	440	400	410	420	400
vodostaj v izhodnem prerezu [m.n.v.]	OS	144,99	144,98	144,97	144,98	144,98	144,98	144,98	144,97	144,96	144,95	144,95	144,94
	NAS	145,01	145,01	145,00	145,00	144,99	144,99	144,97	144,94	144,92	144,91	144,90	144,89
površina poplavljenosti [km ²]	OS	8,4	8,7	9,1	9,5	9,8	10,1	10,6	10,9	11,1	11,3	11,5	11,7
	NAS	9,4	9,6	9,8	10,0	10,1	10,2	10,3	10,4	10,4	10,5	10,5	10,4
povprečna globina vode [m]	OS	0,99	1,07	1,14	1,21	1,26	1,32	1,41	1,48	1,53	1,58	1,62	1,66
	NAS	0,96	0,99	1,01	1,03	1,04	1,06	1,07	1,08	1,08	1,08	1,08	1,07
povprečna hitrost vode [m]	OS	0,37	0,33	0,30	0,28	0,26	0,24	0,21	0,19	0,18	0,16	0,15	0,14
	NAS	0,33	0,29	0,26	0,23	0,21	0,19	0,16	0,14	0,13	0,11	0,10	0,09

PRILOGA F.2

OBMOČJE KRŠKO-BREŽIŠKEGA POLJA S PREDELNIMA STENAMA OZIROMA BREZ NJIJU (*OS* – brez predelnih sten; *NAS* – s predelnima stenama)

		ozek VV val Q_{50} s konico 3365 m ³ /s											
		$n_g=0,03$	$n_g=0,04$	$n_g=0,05$	$n_g=0,06$	$n_g=0,07$	$n_g=0,08$	$n_g=0,10$	$n_g=0,12$	$n_g=0,14$	$n_g=0,16$	$n_g=0,18$	$n_g=0,2$
znižanje konice [m ³ /s]	OS	97	104	111	121	132	143	165	186	207	226	244	262
	NAS	107	121	132	150	171	189	236	286	344	394	411	411
potovalni čas konice [min]	OS	250	260	270	280	290	290	300	310	320	320	320	330
	NAS	250	260	280	280	290	290	300	320	320	300	240	240
vodostaj v izhodnem prerezu [m.n.v.]	OS	145,88	145,87	145,86	145,85	145,84	145,83	145,80	145,78	145,76	145,74	145,72	145,70
	NAS	145,87	145,85	145,84	145,82	145,80	145,78	145,73	145,67	145,60	145,55	145,53	145,53
površina poplavljenosti [km ²]	OS	14,5	15,0	15,4	15,7	16,0	16,2	16,6	16,9	17,2	17,4	17,5	17,6
	NAS	15,0	15,5	16,1	16,9	17,0	17,3	17,8	18,2	18,5	18,6	18,7	18,8
povprečna globina vode [m]	OS	1,14	1,23	1,30	1,37	1,43	1,49	1,58	1,66	1,72	1,78	1,82	1,86
	NAS	1,09	1,14	1,19	1,23	1,26	1,30	1,34	1,37	1,39	1,40	1,41	1,41
povprečna hitrost vode [m]	OS	0,51	0,45	0,41	0,37	0,34	0,32	0,28	0,25	0,22	0,20	0,19	0,17
	NAS	0,48	0,42	0,38	0,34	0,31	0,28	0,24	0,21	0,19	0,17	0,16	0,14

		širok VV val Q_{50} s konico 3365 m ³ /s											
		$n_g=0,03$	$n_g=0,04$	$n_g=0,05$	$n_g=0,06$	$n_g=0,07$	$n_g=0,08$	$n_g=0,10$	$n_g=0,12$	$n_g=0,14$	$n_g=0,16$	$n_g=0,18$	$n_g=0,2$
znižanje konice [m ³ /s]	OS	22	25	29	31	33	36	41	46	53	60	66	71
	NAS	25	26	30	34	38	44	52	64	75	86	101	116
potovalni čas konice [min]	OS	260	270	290	300	310	330	350	370	390	400	410	420
	NAS	260	280	330	310	320	340	360	420	400	420	440	460
vodostaj v izhodnem prerezu [m.n.v.]	OS	145,95	145,95	145,95	145,95	145,94	145,94	145,94	145,93	145,92	145,92	145,91	145,90
	NAS	145,95	145,95	145,95	145,94	145,94	145,93	145,92	145,91	145,90	145,89	145,87	145,86
površina poplavljenosti [km ²]	OS	14,6	15,2	15,7	16,0	16,3	16,5	17,0	17,5	17,8	18,1	18,3	18,5
	NAS	15,2	16,0	16,5	17,0	17,5	18,1	18,5	19,0	19,3	19,5	19,6	19,7
povprečna globina vode [m]	OS	1,16	1,25	1,33	1,40	1,47	1,53	1,63	1,72	1,80	1,87	1,92	1,97
	NAS	1,11	1,17	1,22	1,27	1,31	1,35	1,40	1,45	1,48	1,51	1,54	1,56
povprečna hitrost vode [m]	OS	0,49	0,45	0,40	0,37	0,34	0,32	0,28	0,25	0,22	0,20	0,19	0,17
	NAS	0,47	0,41	0,37	0,33	0,30	0,28	0,24	0,21	0,19	0,17	0,16	0,14

PRILOGA F.3

OBMOČJE KRŠKO-BREŽIŠKEGA POLJA S PREDELNIMA STENAMA OZIROMA BREZ NJIJU (*OS* – brez predelnih sten; *NAS* – s predelnima stenama)

		ozek VV val Q_{100} s konico 3750 m ³ /s											
		$n_g=0,03$	$n_g=0,04$	$n_g=0,05$	$n_g=0,06$	$n_g=0,07$	$n_g=0,08$	$n_g=0,10$	$n_g=0,12$	$n_g=0,14$	$n_g=0,16$	$n_g=0,18$	$n_g=0,2$
znižanje konice [m ³ /s]	OS	102	111	121	129	140	154	180	203	227	248	265	289
	NAS	101	119	137	153	171	191	235	282	332	384	436	488
potovalni čas konice [min]	OS	250	260	270	280	290	290	300	310	310	320	320	330
	NAS	250	260	280	280	290	290	300	300	310	320	320	320
vodostaj v izhodnem prerezu [m.n.v.]	OS	146,27	146,26	146,25	146,24	146,23	146,21	146,19	146,16	146,14	146,12	146,10	146,08
	NAS	146,27	146,25	146,23	146,21	146,20	146,18	146,13	146,09	146,03	145,98	145,92	145,87
povprečna globina vode [m]	OS	1,20	1,29	1,37	1,45	1,51	1,57	1,67	1,75	1,82	1,88	1,93	1,96
	NAS	1,14	1,21	1,27	1,32	1,36	1,41	1,47	1,52	1,55	1,58	1,60	1,61
povprečna hitrost vode [m]	OS	0,54	0,48	0,44	0,40	0,37	0,34	0,29	0,26	0,24	0,21	0,20	0,18
	NAS	0,52	0,45	0,41	0,37	0,34	0,31	0,27	0,24	0,21	0,19	0,17	0,16
površina poplavljenosti [km ²]	OS	17,1	17,8	18,4	18,7	19,0	19,2	19,6	19,9	20,1	20,3	20,6	20,9
	NAS	18,0	18,6	19,2	19,6	20,2	20,2	20,5	20,8	21,0	21,1	21,1	21,2
globine vode < 0,5 m [km ²]	OS	5,3	5,0	4,8	4,6	4,3	4,1	3,9	3,7	3,6	3,5	3,5	3,5
	NAS	5,8	5,6	5,4	5,2	5,2	4,8	4,5	4,2	4,0	3,8	3,7	3,6
globine vode med 0,5 m in 1,5 m [km ²]	OS	6,7	7,2	7,5	7,7	7,8	7,8	7,7	7,5	7,4	7,3	7,2	7,2
	NAS	7,3	7,9	8,3	8,7	9,0	9,2	9,5	9,7	9,8	9,9	9,9	9,9
globine vode > 1,5 m [km ²]	OS	5,1	5,6	6,0	6,5	6,9	7,3	8,0	8,7	9,1	9,5	9,9	10,1
	NAS	4,8	5,1	5,5	5,7	6,0	6,2	6,6	6,9	7,2	7,4	7,5	7,6
območje s hitrostmi > 1 m/s [km ²]	OS	2,2	1,3	0,5	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	NAS	2,1	1,0	0,4	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

PRILOGA F.4

OBMOČJE KRŠKO-BREŽIŠKEGA POLJA S PREDELNIMA STENAMA OZIROMA BREZ NJIJU (*OS* – brez predelnih sten; *NAS* – s predelnima stenama)

		širok VV val Q_{100} s konico 3750 m ³ /s											
		$n_g=0,03$	$n_g=0,04$	$n_g=0,05$	$n_g=0,06$	$n_g=0,07$	$n_g=0,08$	$n_g=0,10$	$n_g=0,12$	$n_g=0,14$	$n_g=0,16$	$n_g=0,18$	$n_g=0,2$
znižanje konice [m ³ /s]	OS	17	21	23	35	38	41	47	54	59	64	77	87
	NAS	22	27	30	34	36	46	53	66	77	89	102	116
potovalni čas konice [min]	OS	270	290	310	310	330	340	360	380	390	430	430	450
	NAS	270	270	300	320	340	340	380	400	420	440	450	490
vodostaj v izhodnem prerezu [m.n.v.]	OS	146,35	146,35	146,34	146,33	146,33	146,33	146,32	146,31	146,31	146,30	146,29	146,28
	NAS	146,34	146,34	146,34	146,33	146,33	146,32	146,31	146,30	146,29	146,28	146,26	146,25
povprečna globina vode [m]	OS	1,22	1,32	1,40	1,48	1,55	1,61	1,72	1,82	1,90	1,96	2,02	2,06
	NAS	1,16	1,23	1,30	1,35	1,41	1,45	1,53	1,59	1,65	1,69	1,73	1,76
povprečna hitrost vode [m]	OS	0,53	0,48	0,43	0,39	0,36	0,34	0,29	0,26	0,24	0,22	0,20	0,19
	NAS	0,50	0,44	0,40	0,36	0,33	0,30	0,26	0,23	0,21	0,19	0,17	0,16
površina poplavljenosti [km ²]	OS	17,4	18,1	18,6	19,0	19,3	19,5	20,0	20,4	20,7	21,3	21,8	22,4
	NAS	18,1	19,0	19,5	19,9	20,3	20,5	20,9	21,1	21,3	21,5	21,6	21,7
globine vode < 0,5 m [km ²]	OS	5,3	5,1	4,8	4,5	4,3	4,1	3,9	3,7	3,5	3,6	3,7	3,8
	NAS	5,7	5,7	5,4	5,2	5,0	4,7	4,3	4,0	3,7	3,5	3,3	3,2
globine vode med 0,5 m in 1,5 m [km ²]	OS	6,7	7,2	7,4	7,7	7,8	7,7	7,5	7,4	7,4	7,3	7,4	7,4
	NAS	7,4	7,9	8,3	8,7	8,9	9,1	9,4	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5
globine vode > 1,5 m [km ²]	OS	5,3	5,8	6,4	6,8	7,3	7,8	8,6	9,3	9,8	10,3	10,7	11,2
	NAS	5,0	5,4	5,8	6,1	6,4	6,6	7,2	7,7	8,1	8,5	8,8	9,1
območje s hitrostmi > 1 m/s [km ²]	OS	2,2	1,2	0,4	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	NAS	2,0	0,9	0,4	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

PRILOGA G.1

OBMOČJE KRŠKO-BREŽIŠKEGA POLJA S PREDELNIMA STENAMA OZIROMA BREZ NJIJU
(OS – brez predelnih sten; NAS – s predelnima stenama)

		ozek VV val $Q_{10}=2560 \text{ m}^3/\text{s}$					
		100 % kmetijskih površin	redčenje I	obstoječe stanje	zaraščanje I	zaraščanje II	100 % gozdnih površin
znižanje konice [m^3/s]	OS	102	115	157	150	184	197
	NAS	127	155	198	213	200	197
potovalni čas konice [min]	OS	270	290	330	310	340	380
	NAS	350	370	360	360	220	220
vodostaj v izhodnem prerezu [m.n.v.]	OS	144,91	144,89	144,86	144,84	144,80	144,78
	NAS	144,88	144,84	144,78	144,76	144,77	144,78
površina poplavljenosti [km^2]	OS	8,3	8,6	9,0	9,2	9,8	10,2
	NAS	9,3	9,7	9,5	9,7	9,4	9,4
povprečna globina vode [m]	OS	0,95	1,01	1,08	1,12	1,25	1,34
	NAS	0,96	1,01	1,01	1,02	0,95	0,94
povprečna hitrost vode [m]	OS	0,34	0,32	0,28	0,26	0,20	0,19
	NAS	0,30	0,28	0,23	0,21	0,16	0,14

		širok VV val $Q_{10}=2560 \text{ m}^3/\text{s}$					
		100 % kmetijskih površin	redčenje I	obstoječe stanje	zaraščanje I	zaraščanje II	100 % gozdnih površin
znižanje konice [m^3/s]	OS	49	59	68	70	58	59
	NAS	30	41	57	61	75	85
potovalni čas konice [min]	OS	270	290	420	430	400	390
	NAS	260	290	300	400	440	450
vodostaj v izhodnem prerezu [m.n.v.]	OS	144,98	144,97	144,96	144,95	144,97	144,97
	NAS	145,01	144,99	144,97	144,96	144,95	144,93
površina poplavljenosti [km^2]	OS	8,7	9,0	9,7	10,1	10,7	11,0
	NAS	9,6	10,0	10,1	10,3	10,2	10,4
povprečna globina vode [m]	OS	1,07	1,15	1,22	1,27	1,40	1,49
	NAS	0,99	1,06	1,09	1,11	1,06	1,08
povprečna hitrost vode [m]	OS	0,33	0,31	0,28	0,26	0,20	0,19
	NAS	0,29	0,27	0,22	0,20	0,16	0,14

PRILOGA G.2

OBMOČJE KRŠKO-BREŽIŠKEGA POLJA S PREDELNIMA STENAMA OZIROMA BREZ NJIJU
(OS – brez predelnih sten; NAS – s predelnima stenama)

		ozek VV val $Q_{50}=3365 \text{ m}^3/\text{s}$					
		100 % kmetijskih površin	redčenje I	obstoječe stanje	zaraščanje I	zaraščanje II	100 % gozdnih površin
znižanje konice [m^3/s]	OS	104	117	125	140	175	192
	NAS	121	133	156	186	256	301
potovalni čas konice [min]	OS	260	270	290	290	310	310
	NAS	260	270	280	290	310	320
vodostaj v izhodnem prerezu [m.n.v.]	OS	145,87	145,85	145,85	145,83	145,79	145,77
	NAS	145,85	145,84	145,81	145,78	145,70	145,65
površina poplavljenosti [km^2]	OS	15,0	15,3	16,1	16,5	16,7	17,0
	NAS	15,5	15,9	17,2	17,7	17,7	18,3
povprečna globina vode [m]	OS	1,23	1,32	1,41	1,46	1,60	1,68
	NAS	1,14	1,22	1,29	1,35	1,34	1,38
povprečna hitrost vode [m]	OS	0,45	0,42	0,38	0,34	0,27	0,24
	NAS	0,42	0,40	0,35	0,32	0,24	0,21

		širok VV val $Q_{50}=3365 \text{ m}^3/\text{s}$					
		100 % kmetijskih površin	redčenje I	obstoječe stanje	zaraščanje I	zaraščanje II	100 % gozdnih površin
znižanje konice [m^3/s]	OS	25	27	30	35	42	48
	NAS	26	30	35	40	48	66
potovalni čas konice [min]	OS	270	290	300	320	350	370
	NAS	280	290	330	340	370	390
vodostaj v izhodnem prerezu [m.n.v.]	OS	145,95	145,95	145,95	145,94	145,93	145,93
	NAS	145,95	145,95	145,94	145,94	145,93	145,91
površina poplavljenosti [km^2]	OS	15,2	15,5	16,5	16,9	17,2	17,6
	NAS	16,0	16,2	17,5	18,1	18,2	19,1
povprečna globina vode [m]	OS	1,25	1,35	1,44	1,50	1,65	1,74
	NAS	1,17	1,25	1,33	1,40	1,40	1,46
povprečna hitrost vode [m]	OS	0,45	0,42	0,37	0,34	0,27	0,24
	NAS	0,41	0,39	0,35	0,31	0,24	0,20

PRILOGA G.3

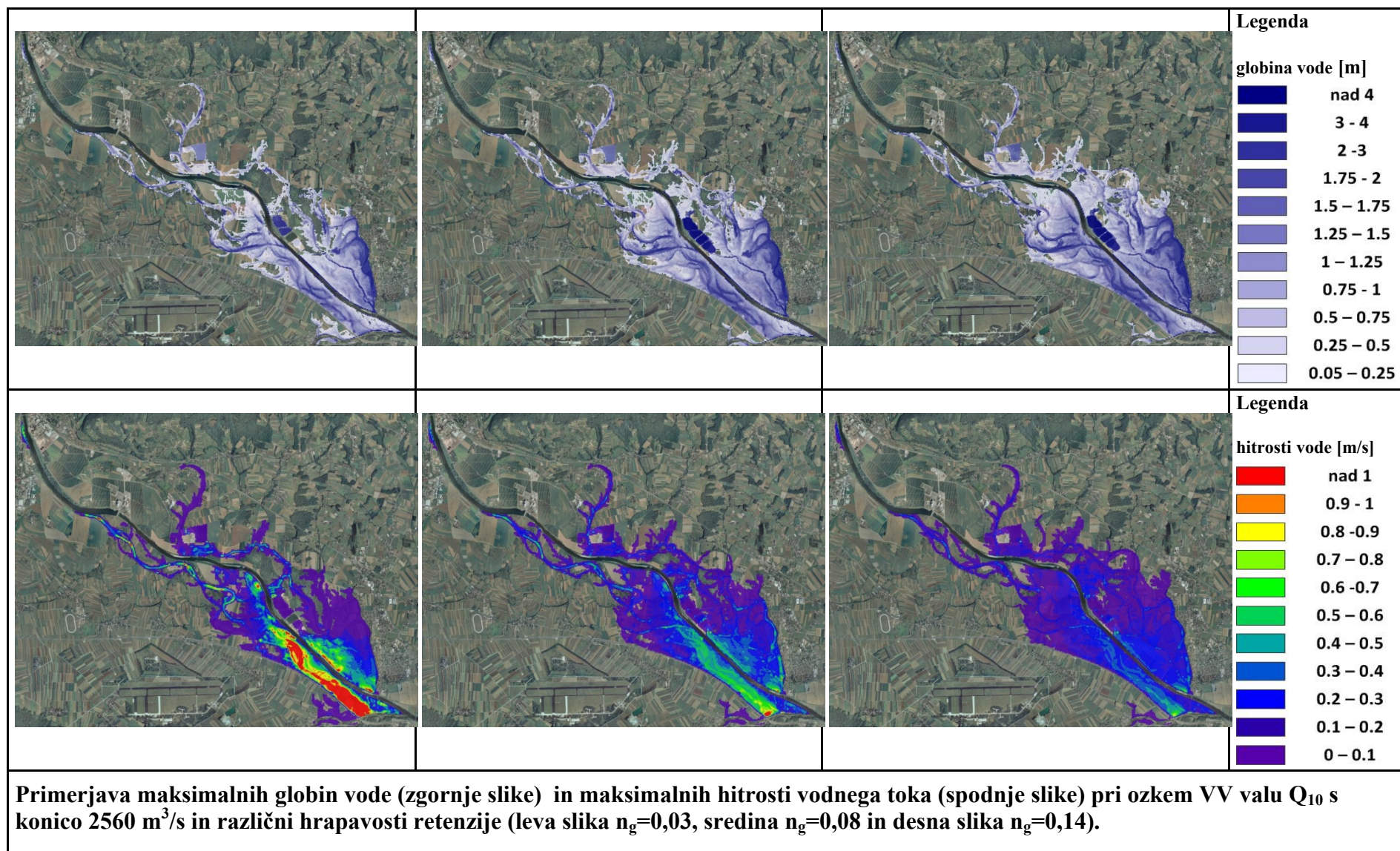
OBMOČJE KRŠKO-BREŽIŠKEGA POLJA S PREDELNIMA STENAMA OZIROMA BREZ NJIJU
(OS – brez predelnih sten; NAS – s predelnima stenama)

		ozek VV val $Q_{100}=3750 \text{ m}^3/\text{s}$					
		100 % kmetijskih površin	redčenje I	obstoječe stanje	zaraščanje I	zaraščanje II	100 % gozdnih površin
znižanje konice [m^3/s]	OS	111	125	128	143	175	209
	NAS	119	137	151	173	228	294
potovalni čas konice [min]	OS	260	270	280	290	310	310
	NAS	260	270	280	290	300	310
vodostaj v izhodnem prerezu [m.n.v.]	OS	146,26	146,24	146,24	146,22	146,19	146,16
	NAS	146,25	146,23	146,22	146,19	146,14	146,07
povprečna globina vode [m]	OS	1,29	1,38	1,48	1,54	1,69	1,77
	NAS	1,21	1,28	1,38	1,45	1,47	1,53
povprečna hitrost vode [m]	OS	0,48	0,45	0,41	0,38	0,30	0,25
	NAS	0,45	0,43	0,40	0,36	0,28	0,23
površina poplavljenosti [km^2]	OS	17,8	18,0	19,1	19,4	19,5	19,9
	NAS	18,6	18,9	19,7	20,0	20,1	20,8
globine vode < 0,5 m [km^2]	OS	5,0	4,6	4,5	4,3	3,7	3,7
	NAS	5,6	5,4	4,8	4,4	4,3	4,2
globine vode med 0,5 m in 1,5 m [km^2]	OS	7,2	7,2	7,8	7,9	7,5	7,5
	NAS	7,9	7,9	8,8	9,1	9,2	9,7
globine vode > 1,5 m [km^2]	OS	5,6	6,2	6,8	7,2	8,3	8,8
	NAS	5,1	5,6	6,0	6,4	6,6	7,0
območje s hitrostmi > 1 m/s [km^2]	OS	1,3	1,2	0,6	0,5	0,2	0,0
	NAS	1,0	0,8	0,3	0,2	0,1	0,0

		širok VV val $Q_{100}=3750 \text{ m}^3/\text{s}$					
		100 % kmetijskih površin	redčenje I	obstoječe stanje	zaraščanje I	zaraščanje II	100 % gozdnih površin
znižanje konice [m^3/s]	OS	21	23	35	26	40	50
	NAS	27	31	32	33	43	69
potovalni čas konice [min]	OS	290	300	310	330	350	390
	NAS	270	290	320	340	380	410
vodostaj v izhodnem prerezu [m.n.v.]	OS	146,35	146,34	146,33	146,34	146,33	146,32
	NAS	146,34	146,33	146,33	146,33	146,32	146,30
povprečna globina vode [m]	OS	1,32	1,41	1,51	1,58	1,74	1,84
	NAS	1,23	1,31	1,41	1,49	1,52	1,61
povprečna hitrost vode [m]	OS	0,48	0,45	0,41	0,37	0,30	0,25
	NAS	0,44	0,42	0,39	0,36	0,28	0,23
površina poplavljenosti [km^2]	OS	18,1	18,3	19,3	19,6	19,8	20,5
	NAS	19,0	19,3	20,0	20,2	20,3	21,2
globine vode < 0,5 m [km^2]	OS	5,1	4,6	4,5	4,3	3,7	3,7
	NAS	5,7	5,5	4,8	4,3	4,1	3,9
globine vode med 0,5 m in 1,5 m [km^2]	OS	7,2	7,2	7,7	7,8	7,3	7,4
	NAS	7,9	7,9	8,8	9,0	9,0	9,5
globine vode > 1,5 m [km^2]	OS	5,8	6,5	7,1	7,5	8,8	9,4
	NAS	5,4	5,9	6,4	6,9	7,2	7,8
območje s hitrostmi > 1 m/s [km^2]	OS	1,2	1,2	0,5	0,5	0,2	0,0
	NAS	0,9	0,8	0,3	0,2	0,1	0,0

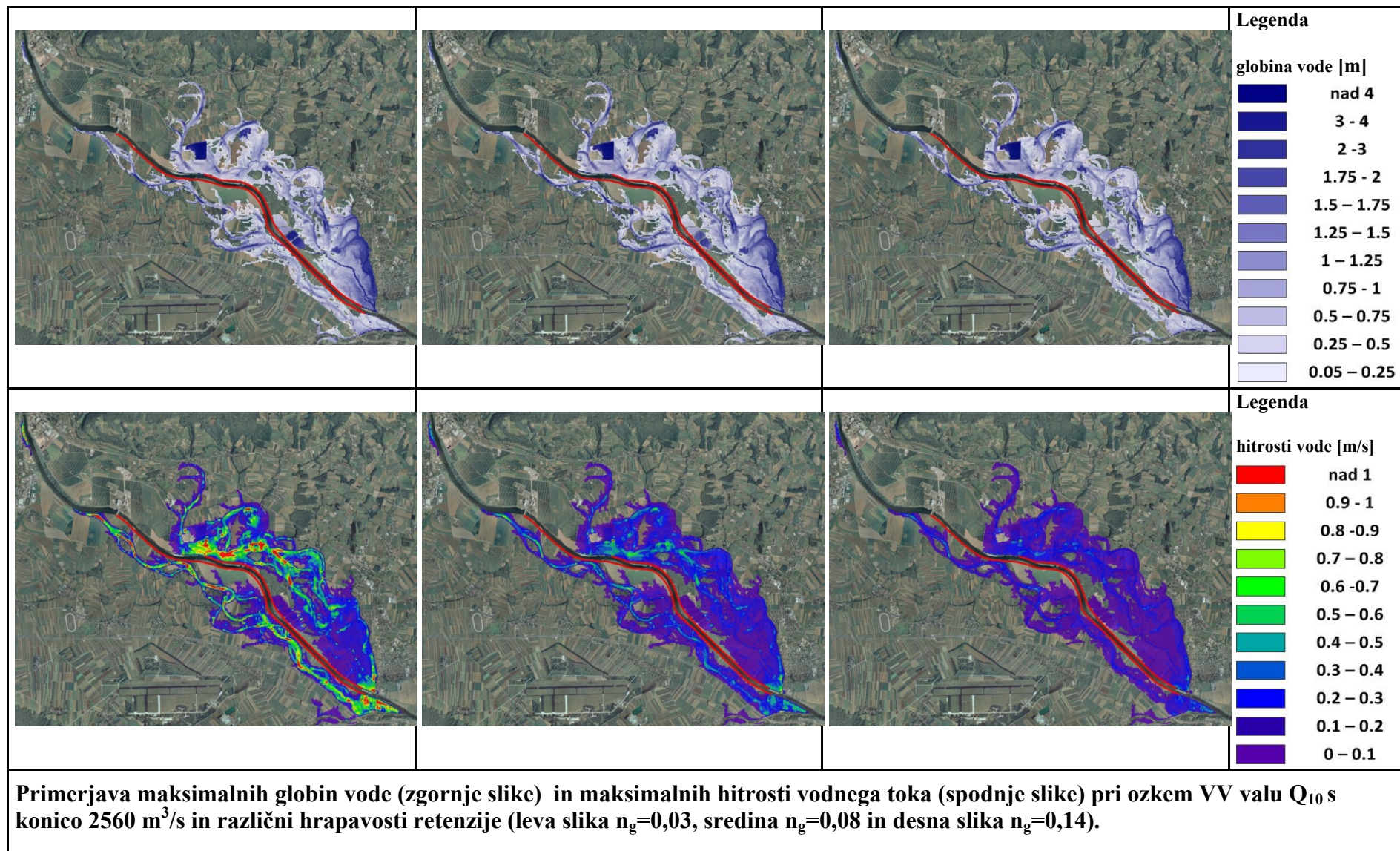
PRILOGA H.1

OBMOČJE KRŠKO-BREŽIŠKEGA POLJA BREZ PREDELNIH STEN



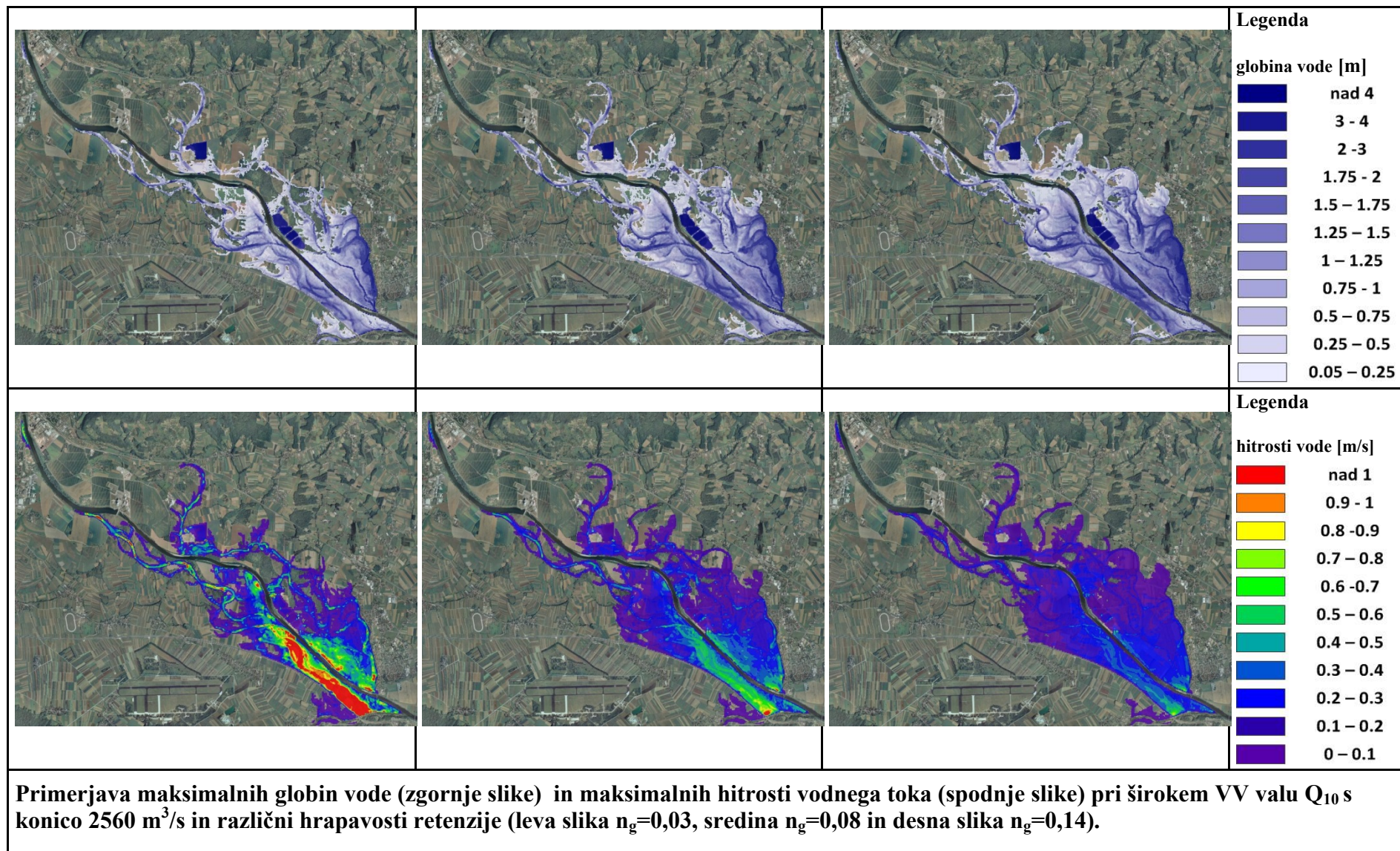
PRILOGA H.2

OBMOČJE KRŠKO-BREŽIŠKEGA POLJA S PREDELNIMA STENAMA



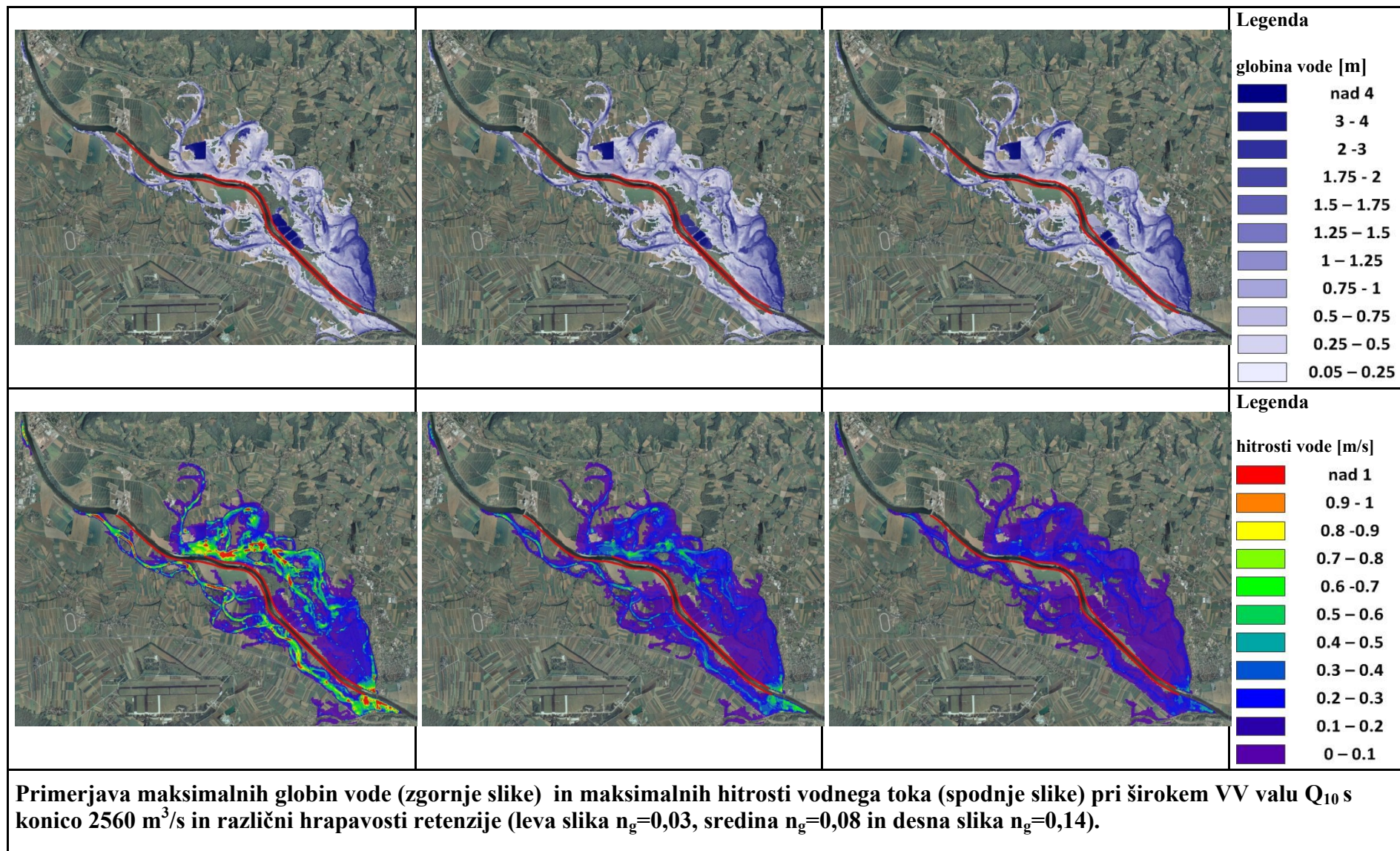
PRILOGA H.3

OBMOČJE KRŠKO-BREŽIŠKEGA POLJA BREZ PREDELNIH STEN



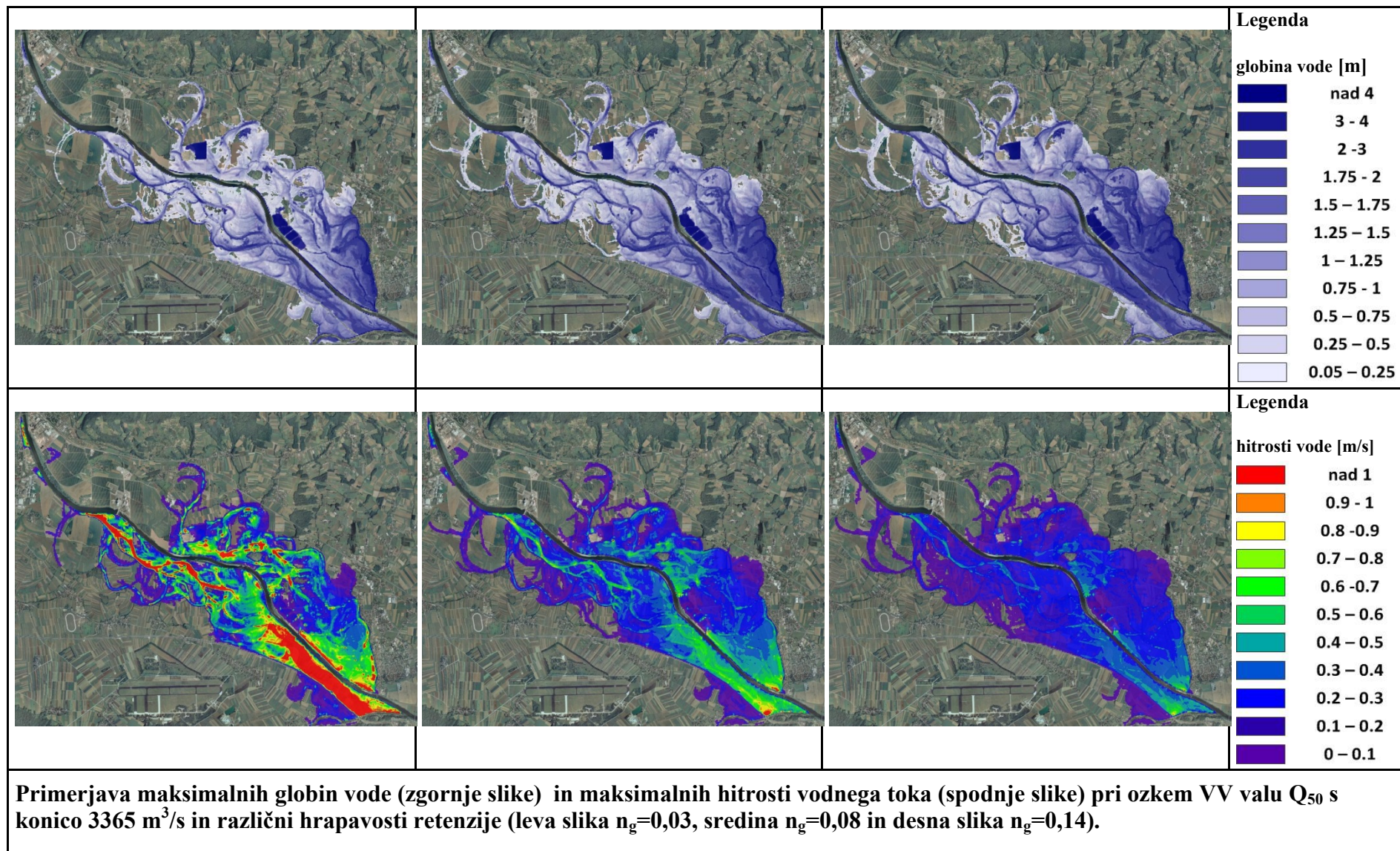
PRILOGA H.4

OBMOČJE KRŠKO-BREŽIŠKEGA POLJA S PREDELNIMA STENAMA



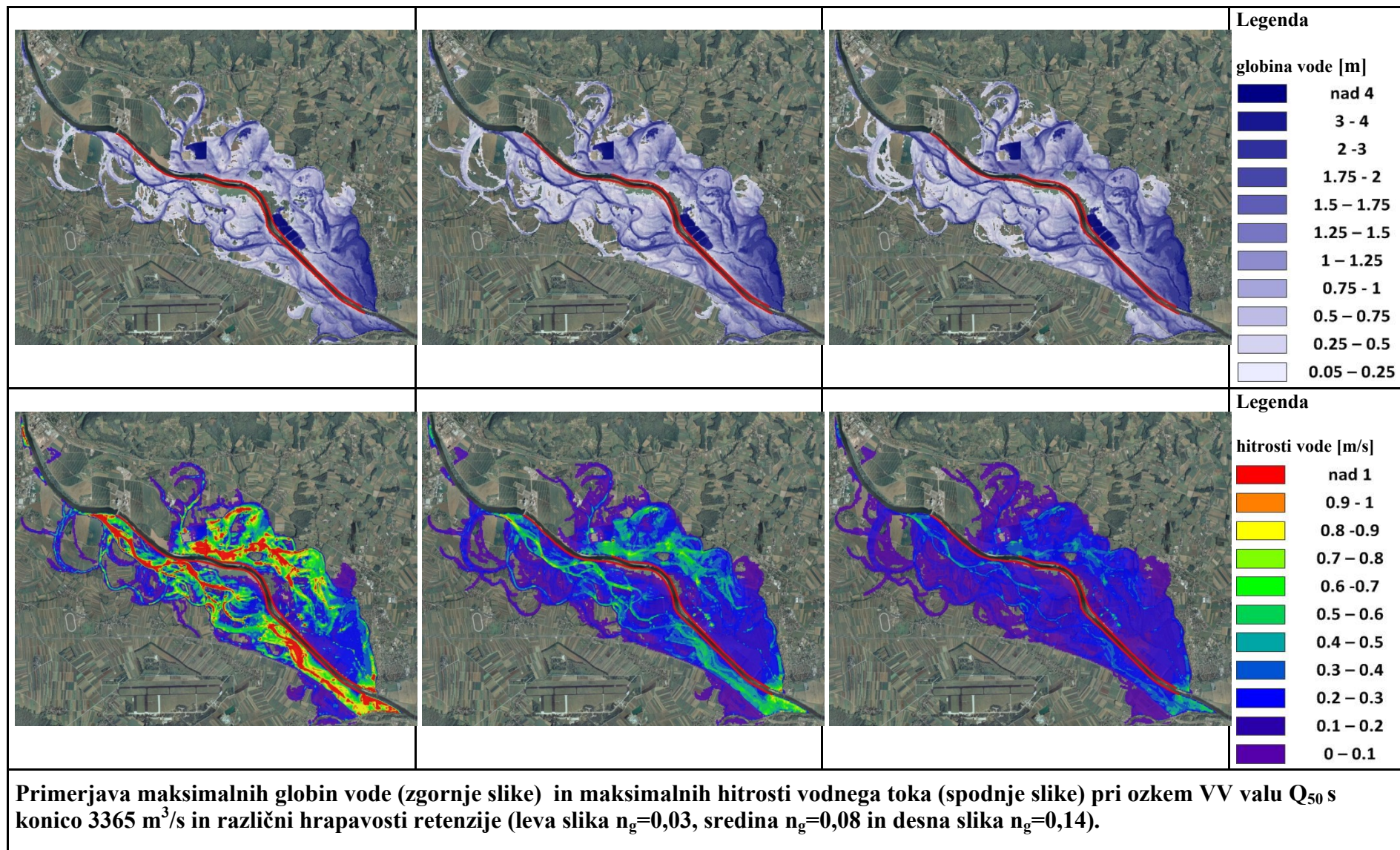
PRILOGA H.5

OBMOČJE KRŠKO-BREŽIŠKEGA POLJA BREZ PREDELNIH STEN



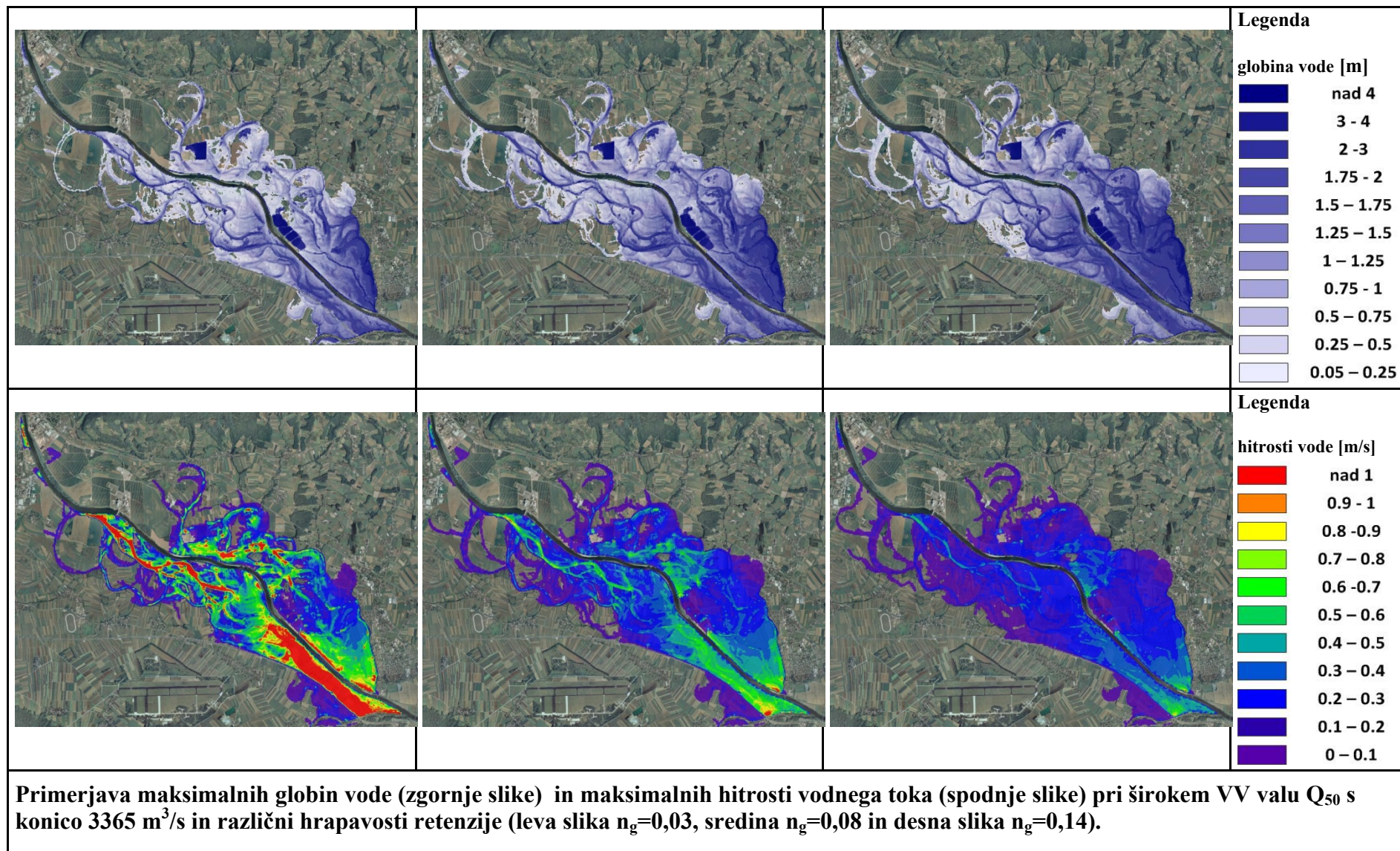
PRILOGA H.6

OBMOČJE KRŠKO-BREŽIŠKEGA POLJA S PREDELNIMA STENAMA



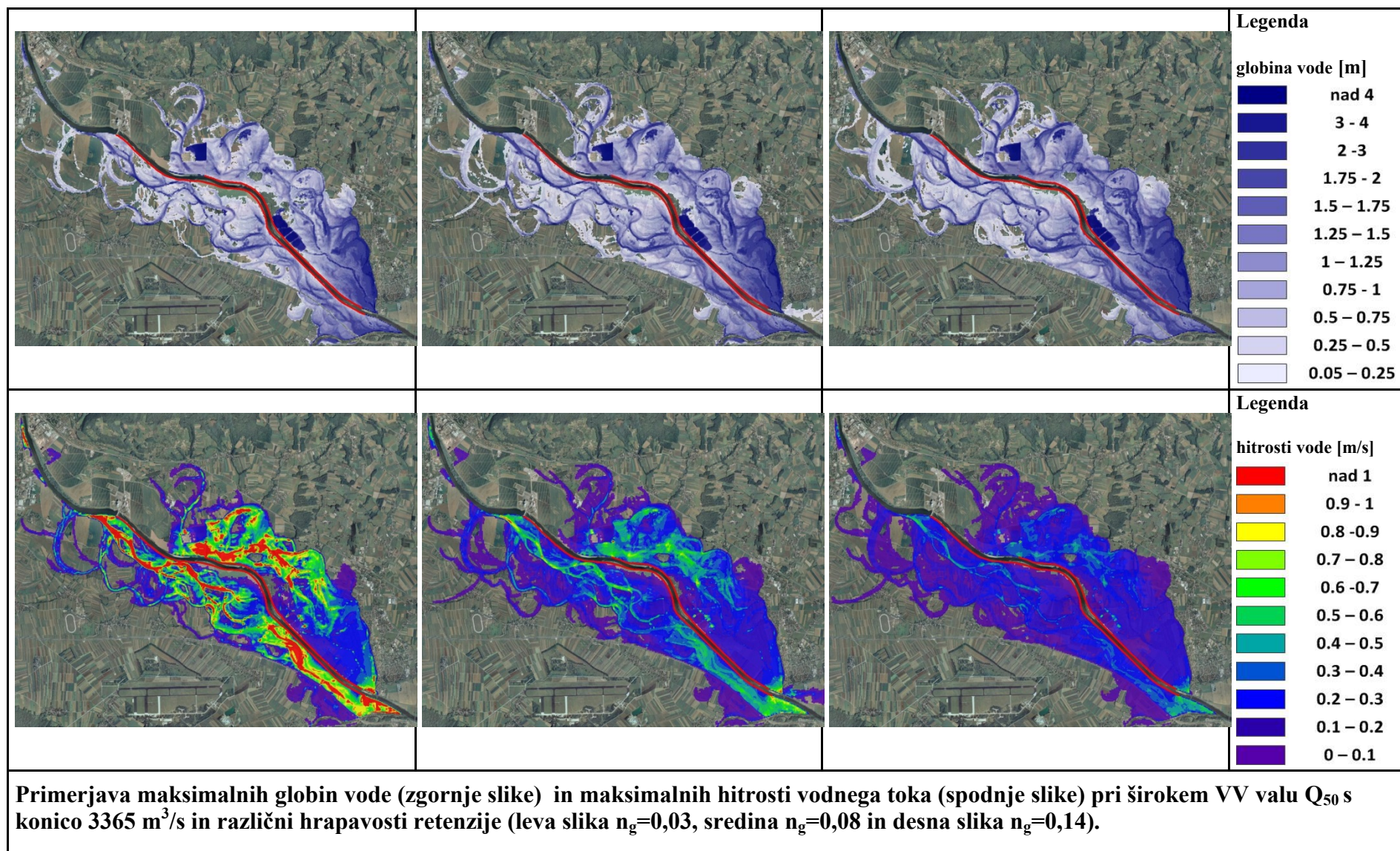
PRILOGA H.7

OBMOČJE KRŠKO-BREŽIŠKEGA POLJA BREZ PREDELNIH STEN



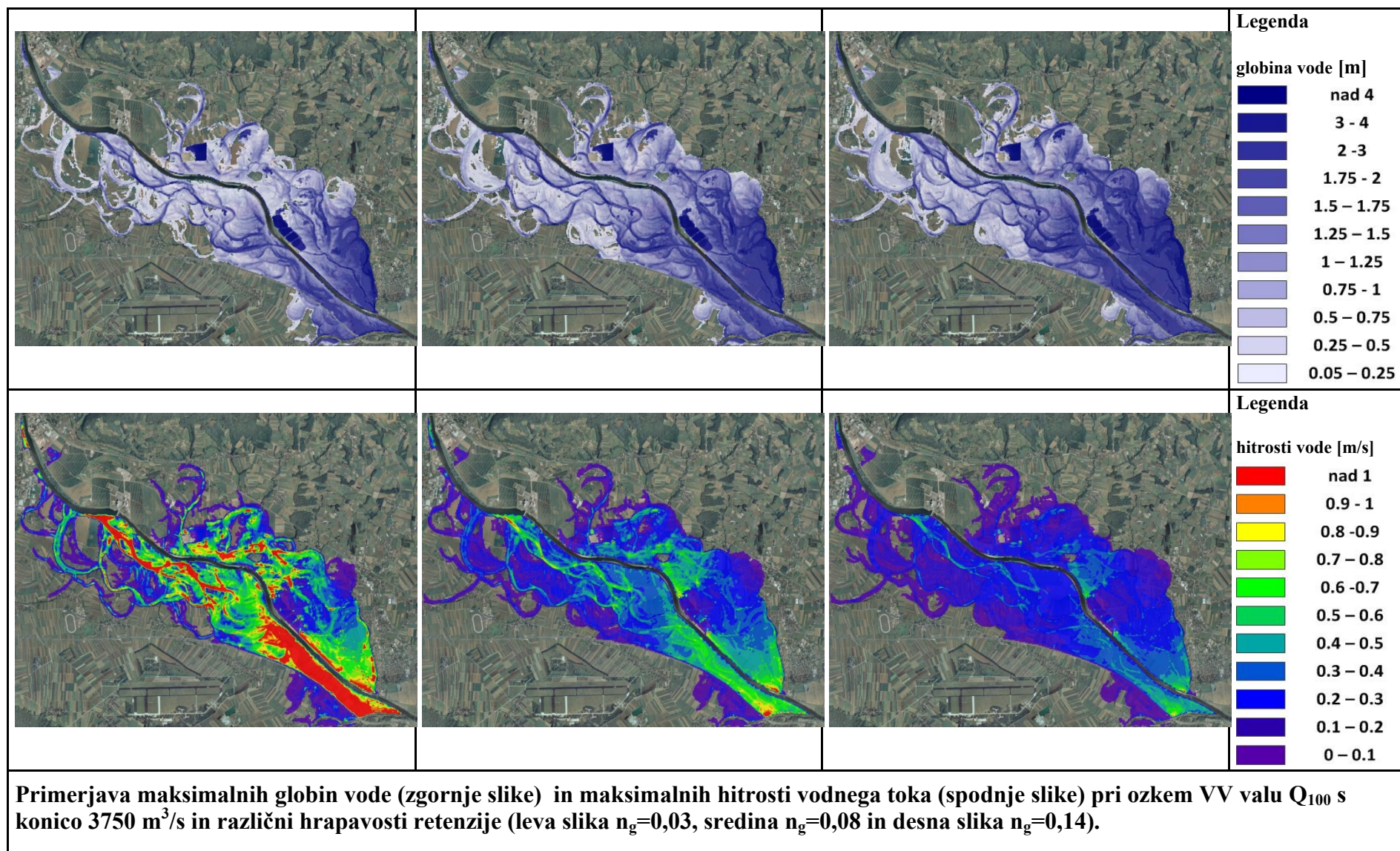
PRILOGA H.8

OBMOČJE KRŠKO-BREŽIŠKEGA POLJA S PREDELNIMA STENAMA

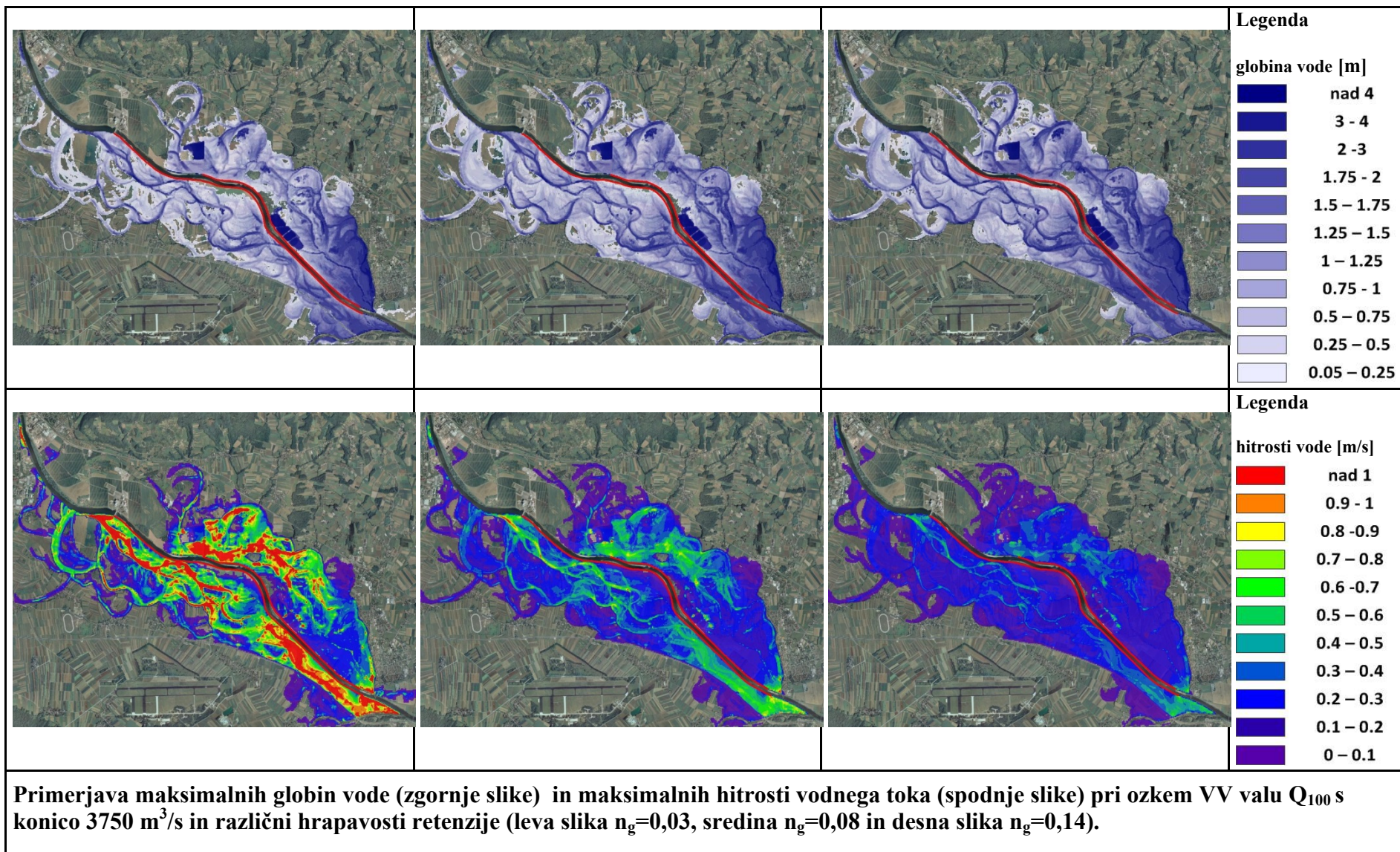


PRILOGA H.9

OBMOČJE KRŠKO-BREŽIŠKEGA POLJA BREZ PREDELNIH STEN

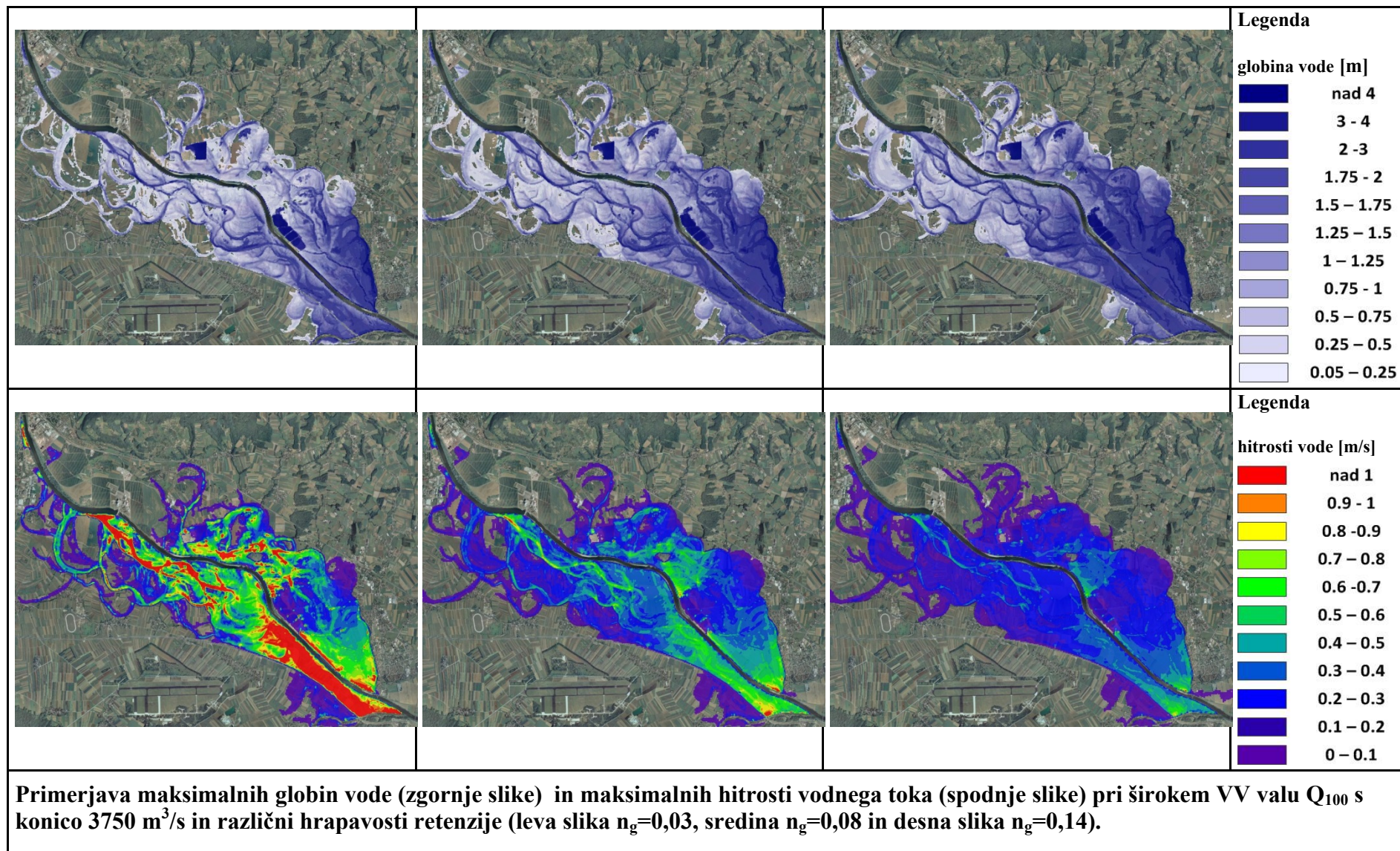


PRILOGA H.10
OBMOČJE KRŠKO-BREŽIŠKEGA POLJA S PREDELNIMA STENAMA



PRILOGA H.11

OBMOČJE KRŠKO-BREŽIŠKEGA POLJA BREZ PREDELNIH STEN



PRILOGA H.12

OBMOČJE KRŠKO-BREŽIŠKEGA POLJA S PREDELNIMA STENAMA

