

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*



MAGISTRSKO DELO

MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM DRUGE STOPNJE VODARSTVO IN OKOLJSKO INŽENIRSTVO

Ljubljana, 2024

Univerza
v Ljubljani

*Fakulteta za
gradbeništvo in
geodezijo*



Kandidat/-ka:

Magistrsko delo št.:

Master thesis No.:

Mentor/-ica:

Predsednik komisije:



Somentor/-ica:

Član komisije:

Ljubljana, _____

POPRAVKI – ERRATA

Stran z napako	Vrstica z napako	Namesto	Naj bo
----------------	------------------	---------	--------

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorju izr. prof. dr. Gašper Raku za vse nasvete, potrpežljivost, dostopnost in pomoč pri izdelavi naloge.

Zahvaljujem se tudi podjetju HSE-Invest d.o.o. za predane podatke, mentorstvo in strokovno pomoč.

Največja zahvala pa gre družini in vsem prijateljem, ki ste me podpirali v času študija.

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	556.166:626.25(497.4)(043.3)
Avtor:	Igor Mlakar, dipl. inž. ok. grad. (UN)
Mentor:	izr. Prof. dr. Gašper Rak, univ. dipl. inž. vod. In kom. inž.
Naslov:	Analiza in vrednotenje posledic ekstremnih in izrednih dogodkih za vplivno območje zadrževalnika Pod Sušo
Tip dokumenta:	magistrsko delo
Obseg in oprema:	136 str., 18 pregl., 72 sl., 27 pril., 36 vir.
Ključne besede:	Poplave, visokovodni zadrževalniki, obratovanje zadrževalnika, 2D hidravlično modeliranje, ocena škode

Izvleček

Predvideni visokovodni zadrževalnik Pod Sušo nad Železniki je bil dimenzioniran na hidrološko študijo iz leta 2010. Leta 2021 izdana hidrološka študija izkazuje višje vrednosti pretokov konic visokovodnih valov nad Q_{100} . V magistrski nalogi smo preverili obratovanje zadrževalnika z upoštevanjem nove hidrologije. V nalogi najprej podamo hidrološka in obratovalna izhodišča. Predstavljen je izdelan 1D model, ki omogoča modeliranje obratovanja pri visokovodnih dogodkih. Modelirali smo dogodke od Q_{200} do Q_{500} . Preverili smo tudi obratovanje pri dogodkih nad Q_{100} z uporabo drugačnega pristopa, ki namesto konstante kote gladine vode v akumulaciji predvideva konstanten iztok vode iz akumulacije. Vrednost iztoka je odvisna od povratne dobe dogodka in časa, ob katerem tekom obratovanja ugotovimo, da visoke vode presegajo 100-letno povratno dobo. Ocena posledic posameznega načina obratovanja pri različnih povratnih dobah visokovodnih dogodkov je bila modelirana z uporabo izdelanega 2D hidravličnega modela, ki obsega odsek Sore med pregrado zadrževalnika Pod Sušo in naseljem Studeno, dolvodno od Železnikov. V modelu je zajeto celotno mesto Železnike. Preverili smo tudi posledice v primeru porušitve pregrade. Iz rezultatov hidravličnega modela smo na podlagi globin poplavnih vod in rabe tal ocenili škodo za posamezen obravnavan scenarij. Ugotovljeno je bilo, da je mogoče z obratovanjem zadrževalnika, ki kot rezultat izhaja iz raziskav, izdelanih v sklopu magistrske naloge, doseči bolj ugoden vpliv na poplavne razmere dolvodno in zmanjšanje gmotne škode.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC:	556.166:626.25(497.4)(043.3)
Author:	Igor Mlakar, dipl. inž. ok. grad. (UN)
Supervisor:	Assoc. Prof. Gašper Rak, Ph.D.
Title:	Analysis and evaluation of the impact of extreme and extraordinary events on the affected area of the Pod Sušo reservoir
Document type:	Master Thesis – University studies
Scope and tools:	136 p., 18 tab., 72 fig., 27 ann., 36 ref.
Keywords:	floods, High-water retention reservoirs, operation of the retention reservoir, 2D hydraulic modelling, damage assessment

Abstract

The planned high-water retention reservoir Pod Sušo above Železniki was designed based on the hydrological study from 2010. The hydrological study released in 2021 indicates higher peak flow values above Q_{100} . In the master's thesis, we examined the operation of the reservoir, taking into account the new hydrology. The thesis initially presents hydrological and operational parameters. A simple 1D model is introduced, allowing for the modeling of dam operations during high-water events. We modeled events from Q_{200} to Q_{500} . We also checked the operation during events above Q_{100} using a different approach, which, instead of a constant water level in the reservoir, assumes a constant outflow of water from the reservoir. The outflow value depends on the return period of the event and the time during operation when we identify that high waters exceed the 100-year return period. The assessment of the consequences of each operational method for different return periods of high-water events was modeled using a developed 2D hydraulic model covering the area between the reservoir, the town of Železniki and the settlement of Studeno. We also examined the consequences in the event of a dam breach. Based on the results of the hydraulic model (flood water depth) and land use, we assessed the damage for each modeled scenario. It was found that operating the reservoir as proposed in the thesis, resulting from the research conducted, can have a more favorable impact on downstream flood conditions and reduce material damage.

KAZALO VSEBINE

POPRAVKI – ERRATA.....	I
ZAHVALA.....	II
BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK	III
BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT	IV
1 UVOD	1
1.1 Namen in cilj naloge.....	1
2 TEORETIČNE OSNOVE.....	3
2.1 Suhi zadrževalniki in pregrade	3
2.1.1 Klasifikacija pregrad.....	3
2.1.2 Zadrževalniki visokih vod.....	5
2.1.3 Zagotavljanje varnosti nasutih pregrad	7
2.1.4 Obratovanje v izrednih razmerah.....	10
2.2 Programsko orodje HEC-RAS.....	12
2.3 Programsko orodje ArcGIS Pro	15
2.4 Ocena škode poplavnega dogodka	16
2.4.1 Metoda za ocenjevanje škode IzVRS	16
2.4.2 Metoda za ocenjevanje škode EU JRC	17
2.4.3 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	19
3 OPIS OBRAVNAVANEGA OBMOČJA IN VHODNI PODATKI	21
3.1 Vhodni podatki.....	27
3.1.1 Hidrologija obravnavanega območja	27
3.1.2 Podatki o geodeziji.....	30
3.1.3 Delovanje zadrževalnika Pod Sušo	32
3.1.4 Opis izdelanega HEC-RAS modela.....	38
4 DELOVANJE ZADRŽEVALNIKA PRI VIŠJIH POVRATNIH DOBAH.....	50
4.1 Model za opis obratovanja zadrževalnika	51
4.1.1 Delovanje modela	52
4.1.2 Uporabljene poenostavitve in predlogi izboljšave	53
4.2 Identifikacija višjih povratnih dob med obratovanjem	54
4.2.1 Dinamika gladine vode v akumulaciji pri različnih visokovodnih dogodkih	56
4.2.2 Tabele za identifikacijo visokovodnih dogodkov	62
4.3 Pregled dinamike zadrževalnika pri Q_{200} do Q_{500}	66
4.4 Varianta obratovanja 1: Identifikacija in prilagoditev iztoka.....	72
4.5 Varianta obratovanja 2: nespremenjeno obratovanje do prelivanja pri obratovalni koti 81	81
4.6 Iztočni hidrogrami za nadaljnje hidravlične analize	87
4.7 Scenariji porušitve pregrade	91
5 REZULTATI HIDRAVLIČNEGA MODELA.....	98
5.1 Vhodni podatki v hidravlični model.....	98

5.1.1	Uporabljeni robni pogoji	101
5.2	Pregled rezultatov modela	103
5.2.1	Natančnost rezultatov hidravličnega modela	103
5.2.2	Območja pomembnega razlivanja poplavnih voda	104
5.2.3	Obseg poplavnih vod.....	105
5.3	Časovna dinamika dinamika poplavljanja pri različnih obratovalnih scenarijih.....	110
5.4	Ocena posledic posameznega obratovalnega dogodka	118
5.4.1	Grafične priloge k rezultatom hidravličnega modela	126
6	ZAKLJUČEK	129
	VIRI	133

Kazalo slik

Slika 1: Trije tipi nasutih zemeljskih pregrad	4
Slika 2: Delovanje zadrževalnika	6
Slika 3: Princip delovanja zadrževalnika	6
Slika 4: Princip podmrežne metode	13
Slika 5: Prikaz rezultatov 2D modela in podmrežne metode	14
Slika 6: Delovno okolje ArcGis Pro.....	16
Slika 7: Škodne funkcije za evropske stanovanjske objekte.	18
Slika 8: Škodne funkcije za evropske kmetijske površine.	18
Slika 9: Oznaka na legendah kart poplavne nevarnosti.....	20
Slika 10: Železniki in struga Selške Sore.	21
Slika 11: Poplavljanje Selške Sore skozi mestno jedro Železnikov leta 2007.	23
Slika 12: Poplavljanje mestnega jedra Železnikov leta 2007.....	24
Slika 13: Posledice poplav v Železnikih	24
Slika 14: Protipoplavni nasip na desnem bregu med pritokoma Plenshak in Prednja Smoleva	26
Slika 15: Urejen izliv hudournika na območju in urejena struga pred Železniki	26
Slika 16: Visokovodni val Q_{100} in Q_{500} po hidrologiji iz 2010 in 2021	28
Slika 17: 3D model terena, kjer so bili upoštevani podatki LIDAR, batimetrija struge in kataster stavb	31
Slika 18: Zveza med volumnom zadržane vode in koto v akumulaciji.....	32
Slika 19: Vizualizacija pregrade	33
Slika 20: Prerez pregrade	33
Slika 21: Delovanje pri Q_{100}	35
Slika 22: Pretočna krivulja temeljnega izpusta	36
Slika 23: Pretočne krivulje tablastih zapornic.....	37
Slika 24: Pretočne krivulje zaklopke.....	38
Slika 25: Shema hidravličnega modela	39
Slika 26: Prikaz detajla računske mreže hidravličnega modela	41
Slika 27: Primer rezultatov hidravličnega modela	42
Slika 28: 3D prikaz rezultatov modela.....	43
Slika 29: Rezultati umerjanja/podolžni profil pri Q_{100}	47
Slika 30: Playje v strugi po poplavih leta 2007	48
Slika 31: Playje na mostni konstrukciji v Železnikih po poplavih leta 2007.....	49
Slika 32: Hidrogrami 500-letnih vod glede na čas trajanja padavin	55
Slika 33: Dinamika kote gladine v akumulaciji za različne povratne dobe pri obratovalnem pretoku $120 \text{ m}^3/\text{s}$	57

Slika 34: Dinamika kote gladine v akumulacije za različne povratne dobe pri obratovalnem pretoku 130 m ³ /s.....	59
Slika 35: : Dinamika kote gladine v akumulacije za različne povratne dobe pri obratovalnem pretoku 160 m ³ /s.....	60
Slika 36: Dinamika kote gladine v akumulacije za različne povratne dobe pri obratovalnem pretoku 180 m ³ /s.....	61
Slika 37: Gibanje gladine pri Q ₁₀₀ pri različnih projektnih iztokih	67
Slika 38: Gibanje gladine pri Q ₂₀₀ pri različnih projektnih iztokih	68
Slika 39: Gibanje gladine pri Q ₃₀₀ pri različnih projektnih iztokih	69
Slika 40: Gibanje gladine pri Q ₄₀₀ pri različnih projektnih iztokih	70
Slika 41: Gibanje gladine pri Q ₅₀₀ pri različnih projektnih iztokih	71
Slika 42: Dinamika gibanja gladine pri prilagojenih primerih obratovanja pri Q ₂₀₀	75
Slika 43: Dinamika gibanja gladine pri prilagojenih primerih obratovanja pri Q ₃₀₀	77
Slika 44: Dinamika gibanja gladine pri prilagojenih primerih obratovanja pri Q ₄₀₀	78
Slika 45: Dinamika gibanja gladine pri prilagojenih primerih obratovanja pri Q ₅₀₀	79
Slika 46: Varianta 2 obratovanja, Q ₂₀₀	83
Slika 47: Varianta 2 obratovanja, Q ₃₀₀	84
Slika 48: Varianta 2 obratovanja, Q ₄₀₀	85
Slika 49: Varianta 2 obratovanja, Q ₅₀₀	86
Slika 50: Iztočni hidrogrami za Q ₂₀₀	88
Slika 51: Iztočni hidrogrami za Q ₃₀₀	89
Slika 52: Iztočni hidrogrami za Q ₄₀₀	89
Slika 53: Iztočni hidrogrami za Q ₅₀₀	90
Slika 54: Izbrane lokacije za prikaz sploščitve porušitvenih poplavnih valov	92
Slika 55: Hidrogrami porušitev pregrade	93
Slika 56: Porušitveni primeri v profilu 10	94
Slika 57: Porušitveni primeri v profilu 15	95
Slika 58: Porušitveni primeri v iztočnem profilu	95
Slika 59: Propagacija vseh treh porušitvenih primerov	96
Slika 60: Vprašljiv obseg razlivanja za scenarije 2, 3,4 in obseg razlivanja pritokov.....	104
Slika 61: Najbolj kritična območja razlivanja v vseh scenarijih	105
Slika 62: Obseg poplavljanja pri Q ₅₀₀ na območju najbolj strnjeno naseljenem območju Železnikov	107
Slika 63: Primerjava obsega poplavljanja na območju najbolj strnjeno naseljenem območju Železnikov obseg Q ₂₀₀ in obseg Q ₅₀₀	108
Slika 64: Primerjava obsega poplavljanja na območju najbolj strnjeno naseljenem območju Železnikov (obseg Q ₅₀₀ in obseg P3	109
Slika 65: Prikaz gladinskih stanje v profilu P10 za primer P3 in Q ₅₀₀	110

Slika 66: Hidrogrami v vtočnem prerezu, prerezih P10 in P15 in iztočnem prerezu za scenarije 14, 15 in 17 z upoštevanjem pritokov Q_{100}	112
Slika 67: Hidrogrami v vtočnem prerezu, prerezih P10 in P15 in iztočnem prerezu za scenarije 14, 15 in 17 brez upoštevanja pritokov	113
Slika 68: Hidrogrami v vtočnem prerezu, prerezih P10 in P15 in iztočnem prerezu za scenarije 13, 14 in 15 pri Q_{400} z upoštevanjem pritokov	114
Slika 69: Hidrogrami v vtočnem prerezu, prerezih P10 in P15 in iztočnem prerezu za scenarije 13, 14 in 15 pri Q_{400} brez upoštevanja pritokov	114
Slika 70: Hidrogrami v vtočnem prerezu, prerezih P10 in P15 in iztočnem prerezu za scenarija 13 in 17 z upoštevanjem pritokov	115
Slika 71: Hidrogrami v vtočnem prerezu, prerezih P10 in P15 in iztočnem prerezu za scenarija 13 in 17 brez upoštevanja pritokov	116
Slika 72: Maksimalne dosežene globine v profilu 10 pri scenarijih 13, 14, 15 in 17	117

Kazalo tabel

Tabela 1: Hidrologija iz leta 2010 in 2021	27
Tabela 2: Ocenjene vrednosti pretokov konice visokovodnih dogodkov po hidrologiji iz leta 2021 ...	29
Tabela 3: Gladine vode v akumulaciji pri iztoku 120 m ³ /s.....	63
Tabela 4: Gladine vode v akumulaciji pri iztoku 130 m ³ /s.....	64
Tabela 5: Gladine vode v akumulaciji pri iztoku 140 m ³ /s.....	64
Tabela 6: Gladine vode v akumulaciji pri iztoku 160 m ³ /s.....	65
Tabela 7: Gladine vode v akumulaciji pri iztoku 180 m ³ /s.....	65
Tabela 8: Vrednosti pretoka ob reakciji pri Q ₂₀₀	76
Tabela 9: Vrednosti pretoka ob reakciji na ugotovljen Q ₃₀₀	77
Tabela 10: Vrednosti pretoka ob reakciji na ugotovljen Q ₄₀₀	79
Tabela 11: Vrednosti pretoka ob reakciji na ugotovljen Q ₅₀₀	80
Tabela 12: Pregled izračunanih scenarijev	99
Tabela 13: Uporabljeni robni pogoji pri izračunu scenarijev	101
Tabela 14: Faktorji škode glede na rabo tal in globino vode.....	120
Tabela 15: Ocena škode na kvadratni meter glede na globino vode	120
Tabela 16: Vrednosti obsega poplavljenih območij po posameznih kriterijih in ocena škode.....	121
Tabela 17: Število poplavljenih objektov pri posameznem scenariju	124
Tabela 18: Seznam prilog in opis k prilogam.....	127

»Stran je namenoma prazna«

1 UVOD

Poplave sodijo med najhujše naravne nesreče, ki pogosto močno prizadenejo tudi Slovenijo, kot je bilo žal vidno pri ujmi 4. avgusta 2023. Z namenom zmanjšanja škodljivega delovanja voda in vse pogostejšim ekstremnim poplavnim dogodkom se v Sloveniji povečuje gradnja protipoplavnih ureditev, med katere sodijo tudi zadrževalniki poplavnih vod. Eden takih zadrževalnikov se v času pisanja naloge gradi nad Železniki, ki so bili zgodovinsko podvrženi hudim hudourniškim poplavam s strani Selške Sore in pritokov, v zadnjih desetletjih kar osemkrat: leta 1979, 1990, 1992, 1993, 1995, 1998, 2007 in 2023. Poplave leta 2007 so bile ene hujših v zgodovini Slovenije, žal tudi s tremi smrtnimi žrtvami in ogromno materialno škodo, in kažejo na zahtevne hidravlične razmere na območju, ko Selška Sora, ki ima izrazito hudourniške lastnosti, lahko v roku nekaj ur naraste od pretoka $5 \text{ m}^3/\text{s}$ do preko $300 \text{ m}^3/\text{s}$, pri poplavljanju pa prihaja do erozijskih procesov, drobirskega toka in večjih količin plavja.

Leta 2013 sprejet državni prostorski načrt (v nadaljevanju DPN) končno pristopa k celoviti rešitvi problematike. Protipoplavne ureditve Železnikov poleg suhega zadrževalnika Pod Sušo, obsegadelno že izvedeno regulacija struge Selške Sore na odseku med sotočjem Selške Sore in Davče in med iztokom iz mesta Železniki in nekaterih hudournikov. Celovita zasnova predvideva zaščito Železnikov pred 100-letnimi vodami, na kar so bili objekti in struga tudi dimenzionirani. Glede na hudourniški režim Selške Sore in vpliv podnebnih sprememb na pogostost in intenziteto poplav, pa je potrebna še analiza delovanja zadrževalnika ob dogodkih, ki presegajo 100-letno povratno dobo, kar je predmet te naloge. Prav tako je analizirano stanje v primeru okvare opreme na pregradi, ki lahko povzroči delno ali popolno porušitev pregrade.

1.1 Namen in cilj naloge

Namen naloge je analiza obratovanja suhega zadrževalnika Pod Sušo pri povratnih dobah nad 100-letnimi, za kar bomo obravnavali vhodne podatke o hidrologiji, delovanju zadrževalnika, lastnostnih poplavnega območja in geodetske podatke predvidene regulirane struge in razlivnih površin.

Izvedene bodo analize obratovanja pri pretokih od Q_{200} do Q_{500} in sicer s trenutnim načrtom obratovanja in predlogi za izboljšanje načrta obratovanja. Analize bodo izvedene v sklopu naloge izdelanem enostavnem 1D modelu. Preverjeni bodo tudi porušitveni scenariji.

Vplivi posameznih obratovalnih scenarijev na območja dolvodno bodo analizirani s pomočjo polnega 2D matematičnega hidravličnega modela, ki bo vzpostavljen in umerjen v sklopu te naloge. Model bo zajemal celotno območje dolvodno od pregrade do zoženja doline pred naseljem Selca in bo omogočal realen prikaz poplavnih razmer. Posamezen obratovalni scenarij bo ovrednoten z izbrano metodologijo

za oceno škode poplavnega dogodka, kar bo omogočalo pregled škode pri vseh scenarijih in služilo kot podlaga za nadaljnje analize obratovanja zadrževalnika. Rezultati bodo predstavljali podlage za pripravo usmeritev za obratovanje v primeru, ko ugotovimo, da visokovodni dogodek presega Q_{100} .

2 TEORETIČNE OSNOVE

V poglavju so predstavljena teoretična izhodišča znanj, ki so bila vključena za izdelavo magistrske naloge. Predstavljene so delitve pregrad in zadrževalnikov ter njihovo delovanje v času ekstremnih in izrednih dogodkov. Predstavljeno je tudi delovanje programa za matematično hidravlično modeliranje HEC-RAS in delovanje programa za analizo, pripravo in prikaz prostorskih podatkov ArcGIS Pro. Prikazana je tudi izbrana metodologija napovedane ocene škode po visokovodnih dogodkih.

2.1 Suhi zadrževalniki in pregrade

Zadrževalnik Pod Sušo bo spadal med nasute velike pregrade, ki bo namenjena varstvu pred škodljivim delovanjem vodnega toka in bo deloval kot suhi zadrževalnik. V poglavju so predstavljene osnove nasutih pregrad, delovanje suhih zadrževalnikov in smernice za njihovo varnost in delovanje v času visokovodnih dogodkov.

2.1.1 Klasifikacija pregrad

Pregrada ali pregradni objekt je vsak umetno zgrajen objekt, vključno s pripadajočo opremo, ki zadržuje ali preusmerja vodo (IZS, 2012). V Sloveniji pregrade delimo skladno s Pravilnikom o tehničnem opazovanju velikih jezov na:

- **velike pregrade** – pregrade, katerih gradbena višina presega 15 metrov ali ki so višje od 10 metrov ali katerih prostornina presega 100.000 m³ ali katerih krona je daljša od 500 metrov ali pretok skozi pregrado presega 2000 m³,
- **ostale pregrade**.

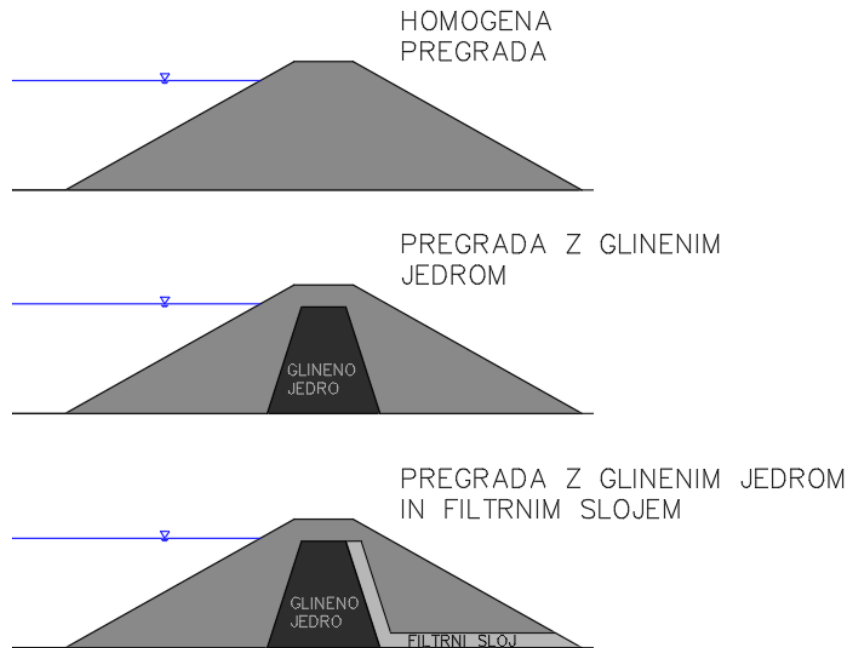
Po tipu pregrad ločimo tri glavne vrste pregrad:

- nasute pregrade,
- betonske pregrade,
- jalovinske pregrade.

Pregrada, obravnavana v nalogi, sodi pod nasute pregrade. Te so najstarejša in najpogostejša oblika pregrad in se delijo na spodaj naštetih tipe:

- homogene nasute pregrade,
- nasute pregrade z glinenim jedrom,
- nasute pregrade z glinenim jedrom in filtrnim slojem.

Spodnja slika 1 prikazuje zgoraj naštetе tipe pregrad.



Slika 1: Trije tipi nasutih zemeljskih pregrad

Nasute pregrade so zaradi svoje zasnove, uporabe in relativno večje razširjenosti v primerjavi z betonskimi pregradami pogostejše podvržene porušitvam, večinoma zaradi geoloških pogojev, notranje erozije ali prelivanja pregrade v času izjemno visokih vod. ICOLD (2019) porušitev pregrade definira kot:

- nenadzorovan izpust vode iz akumulacije pregrade.
- izguba statične stabilnosti pregrade ali njenih temeljnih tal.

Razlogi za porušitev nasutih zemeljskih pregrad so (ICOLD, 2019):

- notranja erozija v telesu pregrade ali temeljnih tleh,
- prelivanje vode preko krone pregrade,
- nezadostna kapaciteta ali napačna umestitev prelivnih polj,
- posedki pregrade ali njenih temeljnih tal,
- okvara hidromehanske opreme,
- nepravilno obratovanje s pregrado,
- posledice slabega vzdrževanja,
- erozija zaradi vegetacije in živali,
- poškodbe filtrov in tesnilnih zaves.

Splošna smernica je, da nasute pregrade voda nikoli ne sme nekontrolirano prelivati, saj je tveganje za porušitev pregrade v takšnem primeru preveliko.

Pregrade v Sloveniji glede na njihov namen delimo na (Humar, 2014):

- pregrade, namenjene za proizvodnjo električne energije,
- pregrade, namenjene za vodooskrbo,
- pregrade, namenjene za zaščito pred škodljivim delovanjem vodnega toka,
- pregrade, namenjene za turistično-rekreacijske dejavnosti,
- pregrade, namenjene zadrževanju naplavin in jalovine ,
- zgodovinske pregrade, prvotno namenjene za splavljanje lesa.

2.1.2 Zadrževalniki visokih vod

Zadrževalniki visokih vod so gradbeni ukrep, ki je namenjen preprečevanju oziroma manjšanju posledic poplav. Uporabljajo se lahko tudi za preskrbo s pitno in industrijsko vodo, namakanje, pridobivanje energije, redčenje odpadne vode, izboljšanje plovnosti rek, zadrževanja sedimentov itd. (Steinman in Banovec, 2008).

Zadrževalnike ločimo na dva tipa:

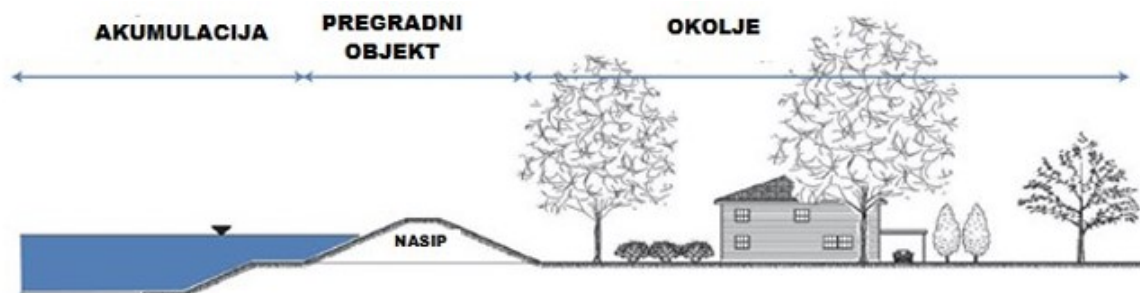
- **Zadrževalniki s stalno ojezeritvijo oz. mokri zadrževalniki:** za njih je značilno, da je akumulacija zadrževalnika vedno delno ali v celoti napolnjena z vodo.
- **Suhi zadrževalniki:** namenjeni so preprečitvi posledic poplav z zadrževanjem konice visokovodnega vala. V času običajnih hidroloških razmer je njihova akumulacija suha in namenjena ostalim rabam prostora oz. dejavnostim (npr. kmetijstvo).

V nalogi obravnavamo suhi zadrževalnik, zato se v nadaljevanju posvetimo temu tipu. Glede na nadzor odtoka ločimo:

- **visokovodne zadrževalnike**, ki nadzorujejo iztok s pomočjo hidromehanske opreme,
- **protipoplavne zadrževalnike**, ki imajo delno nenadzorovan iztok – temeljni izpust je vedno odprt. Dimenzioniran je tako, da konica iztoka ne presega pretočnosti struge vodotoka dolvodno.

Elementi suhega zadrževalnika, shematsko prikazani na sliki 2, so:

- **Pregrada ali nasip**, ki služi kot ovira vodi in omogoča zadrževanje.
- **Akumulacija zadrževalnika**, kjer se voda zadržuje. Glede na lokacijo zadrževalnika poznamo dve delitvi; nižinske akumulacije so omejene z nasipi na ravnini, akumulacije v strmejših dolinah pa so omejene z nasipi ali pa z bregovi doline.
- **Iztočni in vtočni objekt** regulirata vtok in iztok iz akumulacije. Če iztočni objekt nadzoruje količino iztoka, je visokovodni zadrževalnik, sicer je protipoplavni zadrževalnik/nasip. Vtok v akumulacijo je lahko kontroliran (zapornica, zasun) ali nekontroliran (bočni preliv, vtok vode naravnost v akumulacijo,...).

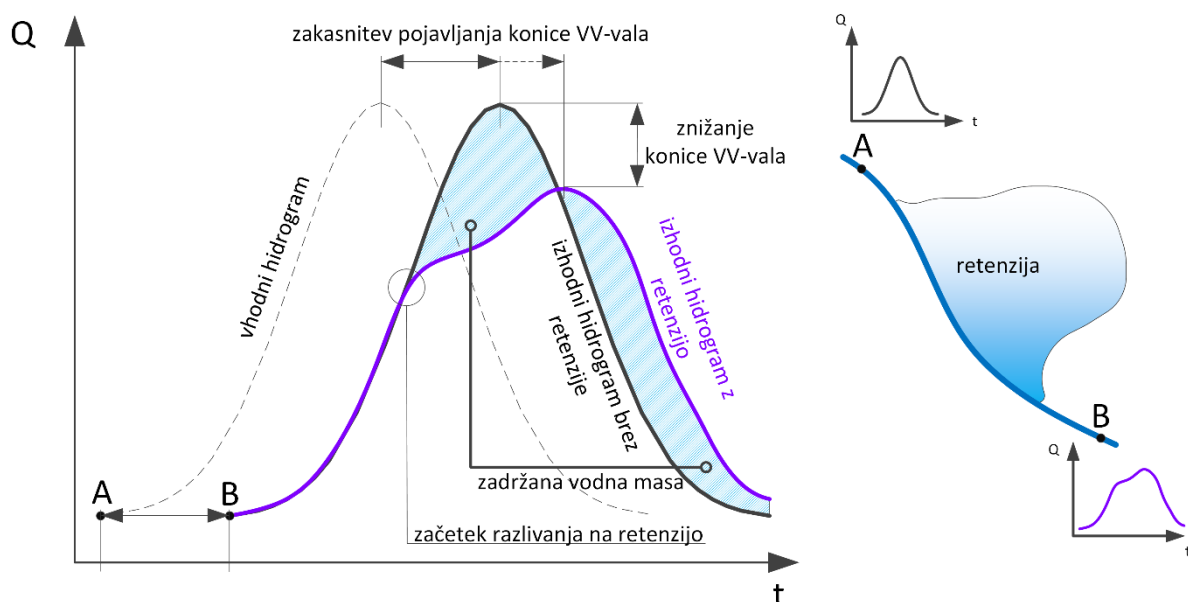


Slika 2: Delovanje zadrževalnika (prirejeno po Hemert in sod., 2013)

Brilly in Šraj (2005) navajata sledeče pogoje za dimenzioniranje visokovodnih zadrževalnikov:

- odnos med prostornino akumulacije in gladino vode v akumulaciji,
- odnos med površino vode in nivojem gladine vode v akumulaciji,
- odnos med iztokom vode iz akumulacije in med nivojem gladine vode v akumulaciji oziroma kapaciteta hidromehanske opreme.

Suhi zadrževalnikih visokih voda na račun podaljšanja trajanja visokovodnega dogodka omilijo njegovo konico. Običajno vpliva na volumen odtoka ni, vplivamo le na potek in višino visokovodnega vala. Zadrževanje vode se načeloma začne šele, ko je presežen kritični pretok, zaradi česar manj izraziti visokovodni vali niso zadržani. Vpliv pri ekstremno visokih poplavih je lahko praktično nič (Trobec, 2011). Slika 3 prikazuje vpliv zadrževalnika na hidrogram visokovodnega vala.



Slika 3: Princip delovanja zadrževalnika (Rak, 2013)

2.1.3 Zagotavljanje varnosti nasutih pregrad

Za področje pregrad v Sloveniji ni krovnega zakona ali standarda, ki bi jih urejal. Zato so zakoni, ki se nanašajo na pregrade, zelo razpršeni in nepopolni, specifični standardi za zagotavljanje varnosti pregrad in za njihovo obratovanje pa (še) ne obstajajo. Turk in sodelavci (2012) navajajo sledeče zakone v pregradnem inženirstvu:

- krovni zakon predstavlja Zakon o graditvi objektov (danes Gradbeni zakon), znotraj njega še posebej velja omeniti Pravilnik o mehanski odpornosti in stabilnosti objektov, ki vključuje tudi Evrokode,
- za tehnično opazovanje pregrad se uporablja Pravilnik o tehničnem opazovanju visokih jezov,
- za seizmično opazovanje se uporablja Pravilnik o opazovanju seizmičnosti na območju velike pregrade,
- z vidika projektiranja je pomemben tudi Zakon o vodah.

Zaradi pomanjkanja ustrezne zakonodaje IZS (2012) navaja naslednje smernice za zagotavljanje varnosti pregrad in vire nevarnosti za konstrukcijo pregrade. Sicer smernice primarno veljajo za energetske pregrade, a so uporabne tudi za večje pregrade zadrževalnikov:

- **Skrbno urejena in arhivirana dokumentacija** vseh faz projektiranja in gradnje pregrade oziroma zadrževalnika: projektna dokumentacija, dokumentacija izgradnje, dokumentacije prvega polnjenja, obratovalna dokumentacija, zapisi o vzdrževanju konstrukcije.
- **Projekt mora biti prilagojen lokaciji gradnje** – pravilne geomehanske karakteristike materiala s posebnim poudarkom na strižni trdnosti, stabilnostnih razmerah, propustnosti, konsolidaciji in analizah posedanja. Ker so nasute pregrade posebej ranljive na notranjo erozijo, je potrebno preiskati temeljno podlago za potencialne razpoke, kaverne, diskontinuitete in ostale nehomogenosti ter jih skrbno upoštevati pri projektiranju in jih sanirati.
- **Uporaba primernih materialov** – uporabiti je potrebno primerne materiale za telo pregrade in odstraniti neprimeren material. Nasute pregrade se gradi iz materiala, ki je na voljo v bližini gradbišča. Za zaščito brežin pregrade, filtrov in drenažnih sistemov pa je večkrat material potrebno pripeljati od drugod.
- **Možnost izvedbe pregrade** – potrebno je upoštevati nahajališča materialov za gradnjo, njihovo vlažnost, klimatske razmere v času gradnje. Projekt mora upoštevati zaščito ključnih elementov objekta v času izrednih razmer med gradnjo za zagotavljanje kakovosti objekta.
- **Stabilnost v času potresa** – mora biti analizirana in upoštevana. Upoštevati je treba možnost likvefakcije in preplavitve v času potresa.
- **Stabilnost objekta** – mora biti analizirana pri vseh možnih statičnih in dinamičnih obtežbah. Upoštevati je treba hitro polnjenje in praznjenje akumulacije.

- **Posedanje in razpoke** – potrebno je upoštevati možnost prečnih razpok, diferencialnih posedkov, hidravličnega loma. Na gorvodni in dolvodni strani pregrade mora biti primerna filterska cona.
- **Pronicanje vode skozi telo pregrade** – objekt mora zagotavljati čim manjše pronicanje vode skozi telo, temelje in boke pregrade. Pronicanje je potrebno upoštevati in izvesti primerne ukrepe – drenaže, tesnila, filtre.
- **Monolitizacija objekta** – v kolikor se objekt gradi v več conah, morajo te biti skupaj povezane v konstrukcijsko celoto.
- **Upoštevanje erozije** – gorvodni in dolvodni rob pregrade, temelji in boki pregrade morajo biti zaščiteni pred erozijskim delovanjem prelivanja, valovanja v akumulaciji in pred notranjo erozijo. Prelivi in temeljni izpust ob svojem delovanju ne smejo povzročati erozije.
- **Monitoring nujne opreme** – monitoring zapornic, ventilov itd. mora biti zanesljiv in reden. V primeru, da prihaja do dvomov, se mora podvojiti število merilnih mest za monitoring.
- **Trajnost konstrukcije** – projekt mora vsebovati navodila za zavarovanje materialov in konstrukcije pred propadanjem. Upošteva se korozija armature v betonu, preiskave materialov, itd.
- **Opazovanje objekta** – objekt se opazuje v času gradnje, obratovanja in mirovanja. Sistem mora biti skrbno načrtovan na način, ki v času viskovodnih dogodkov poda velikosti notranjih in zunanjih premikov konstrukcije.

IZS (2012) navaja naslednje smernice za zagotavljanje varnosti bazena/akumulacije zadrževalnika. Smernice lahko služijo kot izhodišče za določitev nekaterih izrednih scenarijev obratovanja:

- **Preračun kapacitete prevajanja voda** – potrebno je izračunati, koliko vode lahko posamezen element hidromehanske opreme prevede. Obratovalna navodila morajo vsebovati podrobna navodila za obratovanje prelivov in ostalih iztočnih odprtin. Vsi parametri navodil morajo biti testirani.
- **Upoštevanje zimskih razmer** – če zimske razmere ovirajo predvideno obratovanje, jih je v projektu obratovanja treba predvideti in upoštevati. Upoštevati je potrebno led in plavajoče dele v akumulaciji.
- **Stabilnost brežin akumulacije** – potrebno je preveriti stabilnost brežin v akumulaciji in pri tem upoštevati hitro in počasno praznjenje vode v akumulaciji. Ne sme priti do plazov ali zdrsov brežin v akumulaciji.
- **Usedanje sedimentov v bazenu** – potrebno je upoštevati možnost plavlja in posedanja plavin v bazenu, ki dolgoročno zmanjšajo razpoložljiv volumen. Potrebno je pripraviti program odstranjevanja/spiranja sedimentov. Pri potresnem računu je potrebno upoštevati možnost, da so v akumulaciji sedimenti. Potrebno je upoštevati mašenje iztočnih odprtin zaradi sedimentov.

IZS (2012) navaja naslednje smernice za vzdrževanje pregrad:

- **Postopki vzdrževanja** – morajo biti narejeni tako, da zagotavljajo redna popravila vseh delov objekta. Navodila vzdrževanja je potrebno stalno obnavljati in dopolnjevati. Redno je potrebno kontrolirati opremo, posedke, konstrukcijo. Potrebno je kontrolirati tudi sedimentacijo v bazenu in stabilnost brežin akumulacijskega prostora.
- **Inšpekcijski pregledi** – v prvih letih pregrade naj bi bili vsako leto, nato bolj redko. Po vsakem obratovanju zadrževalnika in po vsakem izrednem dogodku mora biti izvršena inšpekcija. Inšpektor mora biti kvalificiran, omogoči se mu dostop do vse dokumentacije projekta. Izvaja se tako formalne kot neformalne preglede.
- **Primerna merilna oprema** – na pregradi mora biti primerna merilna oprema, ki odčitava merjene parametre z zadostno frekvenco in omogoča njihovo analizo. Inšpekcija pregrade naj bo tako vizualna kot osnovana na meritvah inštrumentacije pregrade.
- **Odprava pomanjkljivosti in dokumentacija** – pri vzdrževanju/inšpekcijah ugotovljene pomanjkljivosti naj se razdeli v napake, ki jih je prioriteto potrebno odpraviti in med dela rednega vzdrževanja. Odpravljanje pomanjkljivosti in redno vzdrževanje mora biti dokumentirano, izvedena dela pa preverjena.

IZS (2012) navaja naslednje smernice za obratovanje pregrad v rednih in izrednih primerih:

- Za vsako pregrado morajo biti pripravljena **pisna navodila za obratovanje**. Navodila morajo pokrivati funkcijo pregrade in akumulacije. V primeru poplav morajo biti predvideni postopki, ki zagotavljajo varnost pregrade.
- Za napajanje zapornic in ostalih elementov pregrade mora biti zagotovljen **rezervni vir energije**.
- Potrebno je pripraviti analize **porušitve pregrade**, identificirati zgodnje znake potencialne porušitve in pripraviti načrt ukrepanja ob identifikaciji. Za vsak izreden dogodek je potrebno določiti karte poplavljenih območij in ugotoviti reakcijski čas, ki je potreben, da se prepreči porušitev pregrade. Če se ugotovi nevarnost porušitve, je prav tako potrebno določiti reakcijski čas, v katerem bi identificirali, ali bo šlo za delno ali popolno (hipno ali počasno) porušitev pregrade.
- Priprava **načrta zaščite in reševanja**, ki v primeru porušitve ali izrednih razmer predvideva načrt evakuacije prebivalstva. V času izrednih razmer se poveča frekvenca odčitavanja parametrov pregrade in meritev v akumulaciji. Osebe na pregradi mora biti primerno usposobljeno za reagiranje v času izrednih razmer. V času izrednih razmer mora biti pripravljen material za morebitno sanacijo pregrade.

2.1.4 Obratovanje v izrednih razmerah

Ločimo tri stanja obratovanja (Zaletelj, 2010):

- **čas izven delovanja zadrževalnika**, ko je akumulacija zadrževalnika suha, zemljišča zadrževalnika pa imajo svojo prvotno namensko rabo,
- **čas delovanja zadrževalnika med poplavo**, ki je definiran z obratovalnimi parametri zadrževalnika – projektni iztok iz akumulacije in najvišja dovoljena kota zadrževalnika, pri projektiranem visokovodnem stanju,
- **čas izrednega stanja**, ko povratna doba poplavnega dogodka preseže projektiranega ali so ogroženi elementi pregrade in njena varnost.

Čas izven delovanja zadrževalnika posebnih obratovalnih navodil načeloma za zadrževalnik ne predpisuje. Obratovanje med poplavo pa je predpisano skladno s obratovalnimi navodili, ki so del projekta zadrževalnika. Hemert in sod. (2013) za obratovalna navodila zadrževalnika tako v rednih in izrednih stanjih predvideva navodila, ki ob določeni višini vode v akumulaciji predpisujejo predviden iztok iz akumulacije. Hkrati se zavedajo, da zagotavljanje obratovalnih navodil za vse izredne in ekstremne scenarije ni vedno možno, zato v primeru takšnih razmer predlagajo, da se obratuje tako, da se zniža poplavna škoda oziroma da se ukrepa v skladu z lokalno in državno zakonodajo (Hemert in sod., 2013).

Obratovanje v času izrednih razmer lahko razdelimo na štiri faze, ki tvorijo kontinuiran proces:

- **Pripravljenost** na izredne razmere: ta faza vključuje analizo možnih izrednih scenarijev in pripravljene načrte ukrepanja. Poudarek je tudi na organizaciji, opremljanju in usposabljanju osebja, ki skrbi za pregrado in varnost dolvodno. Pod to fazo sodijo tudi inšpekcijski pregledi pregrade.
- **Odziv** na izredne razmere: faza vključuje aktivnosti, ki stečejo med nastopom izrednih razmer. Glavni korak je aktivacija oseb zaščite in reševanja za civilno prebivalstvo in pričetek evakuacije. Prav tako se aktivirajo ekipe, ki po potrebi izvajajo sanacijska dela na pregradi med dogodkom.
- **Okrevanje** po izrednih razmerah: v tej fazi se popravi vsa škoda, ki je bila storjena na pregradi, v akumulaciji in na dolvodnem območju. Izredne razmere se analizira, po potrebi se izboljša načrt obratovanja in zaščite in reševanja.
- **Preventiva** izrednih razmer: zadnji korak, ki sledi po okrevanju. Preventiva vključuje strukturne ukrepe (utrditev zadrževalnika, dodatni zadrževalniki in nasipi, regulacije struge) in nestrukturne ukrepe (omejitev graditve na ogroženih območjih, komuniciranje z javnostjo glede nevarnosti, zakonodaja,...).

Faza odziva je po Hemert in sod. (2013) razdeljena na naslednje korake:

1. meteorološka napoved pokaže možnost večjih padavin,
2. glede na napoved in hidrološke podatke razmere se pokaže možnost poplav,
3. glede na možnost poplav se izda opozorilo pred poplavami,
4. upravljalci pregrade se glede na opozorilo pred poplavami postavijo v stanje **preliminarnega odziva na dogodek**,
5. ko pride do dogodka, so upravljalci pregrade v stanju **polnega odziva**,
6. po dogodku sledijo ukrepi, ki omogočajo vrnitev v normalno stanje,
7. po vrnitvi v normalno stanje se izvede ukrepe okrevanja in preventive.

Glavni fazi za čim manjšo škodo visokovodnega dogodka predstavljata točki 4 in 5, ki sta v nadaljevanju podrobneje obdelani. Posebej pomemben je preliminaren odziv, ki kasneje omogoča normalno obratovanje.

Preliminaren odziv na dogodek vključuje naslednje korake:

- Aktivacija centra vodenja pregrade in aktivacija osebja. Preveri se, da je osebje pravilno opremljeno in da je omogočen dostop do vseh elementov zadrževalnika. Preveri se, da je dostop do zadrževalnika omogočen. O stanju pripravljenosti zadrževalnika se obvesti lokalne in državne oblasti in civilno prebivalstvo gorvodno in dolvodno od zadrževalnika. Začne se proces skrbnega beleženja in dokumentiranja dogodka.
- Sledi pregled zadrževalnika in akumulacije – preveri se delovanje hidromehanske opreme, stanje rezervnega pogona, stanje konstrukcije zadrževalnika in stanje akumulacije. Sledi preverba stanja cest in ostale infrastrukture v bližini zadrževalnika.
- Javnosti se zapre dostop do zadrževalnika. Ocenijo se stanje vse preostale opreme (vozila, gradbena mehanizacija, električna oprema), odstrani se morebitne naplavine ali potencialne škodljive elemente v akumulaciji ali na objektu. Redno se spremlja vse sisteme merjenja v akumulaciji in vremensko napoved.
- Posebna ekipa spremlja razmere na terenu, ko se bliža visokovodni dogodek – polnjenje akumulacije, stanje dotekle vode, morebitni vplivi na konstrukcijo ali akumulacijo.

Ko se izkaže, da je bila napoved visokovodnega dogodka pravilna, se vstopi v fazo **polnega odziva**:

- Skladno z obratovalnimi navodili se začne zadrževati doteklo vodo. Sledi obratovanje po navodilih.
- Poveča se obseg monitoringa in beleženja vseh meritev. Poveča se število ekip, ki preverjajo stanje na terenu.
- Poveča se obseg beleženja in komuniciranja z javnostjo.

- Ko se oceni, da je stanje preseglo normalno obratovanje, se sledi pripravljenim obratovalnim navodilom. Če teh ni, se skuša minimizirati škodo in preprečiti možnost porušitve pregrade.
- Če stanje ostaja izredno, se začne evakuacija osebja iz pregrade in evakuacija prebivalcev dolvodno. Kljub morebitni porušitvi, lahko pregrada obratuje in zadrži visokovodni val dovolj časa, da je omogočena varna evakuacija prebivalstva.

2.2 Programsko orodje HEC-RAS

HEC-RAS (River Analysis System) je programsko orodje, ki ga razvija Hydrologic Engineering Center (HEC, 2023). HEC ima na voljo tudi druga orodja, npr. za hidrološko modeliranje in določevanje povratnih dob visokovodnih dogodkov. HEC-RAS je namenjen modeliranju toka s prosto gladino. Do verzije 5.0 je program omogočal le 1D modeliranje, od leta 2016 naprej pa je na voljo tudi 1-2D in polno 2D modeliranje. Zadnje verzije omogočajo tudi modeliranje transporta sedimentov, modeliranje različnih oblik toka, oceno erozije in račun ostalih parametrov, npr. temperature vode.

HEC-RAS za 2D račun omogoča modeliranje z dvema setoma enačb:

- Po globini povprečene Saint-Venantove enačbe, ki opcijsko omogočajo modeliranje Coriolisove sile, turbulence in sile vetra. Zraven upošteva še dinamični enačbi.
- Poenostavljeno verzijo Saint-Venantovih enačb oz. »difuzni val«, ki zanemari člen vztrajnosti vode in ni primerna za zahtevnejše izračune.

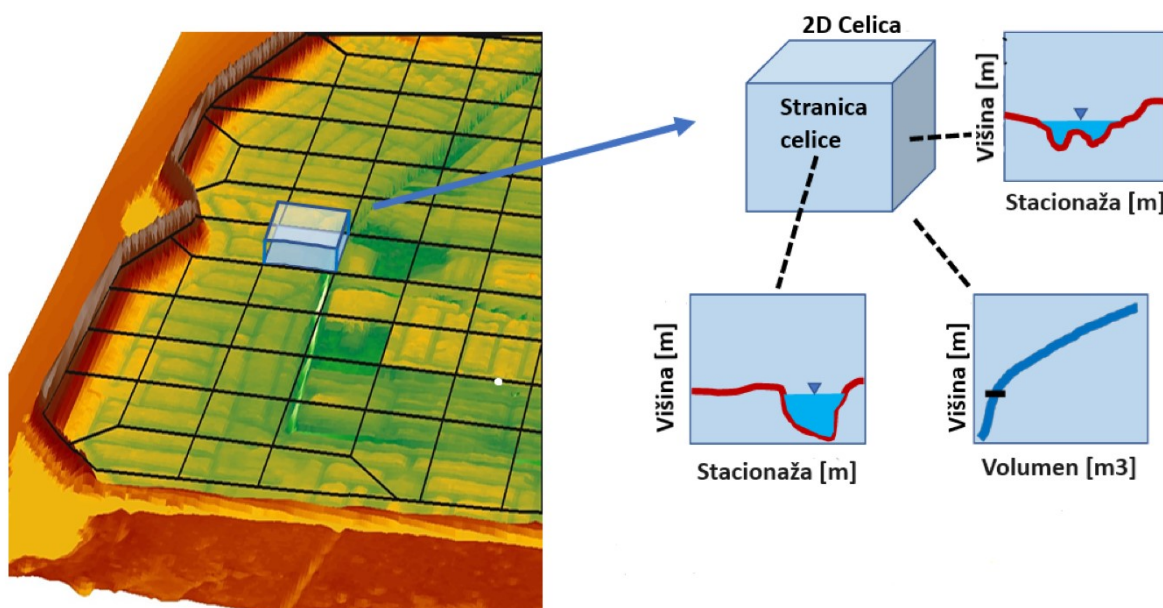
V nalogi smo uporabljali zgolj po globini povprečene Saint-Venantove enačbe (kot jih računa HEC-RAS), pri tem pa se moramo zavedati sledečih predpostavk in poenostavitev (Rajar, 1980):

- Tok v tlorisu je dvodimenzionalen; hitrostna komponenta v z-smeri je zanemarjena. Vertikalnega gibanja vode znotraj računske celice ni.
- Upošteva se globinsko povprečen tok – po celotnem vodnem stolpcu je za račun uporabljena le ena hitrost vode.
- Razporeditev tlaka po vodnem stolpcu je hidrostatska.
- Naklon dna naj bi bil za uporabo teh enačb majhen, da je velja, da je padec dna podoben tangensu in sinusa naklona dna.
- Notranjega trenja v tekočini ni.

Program enačbe nestalnega 2D toka rešuje z implicitno numerično metodo končnih volumnov. Pri tem je pomemben časovni korak, ki ga definira Courantovo število. Program omogoča prilagajanje časovnega koraka glede na maksimalno in minimalno courantovo število, kar omogoča hitrejši izračun. Ob pravem časovnem koraku 2D shema modela stabilno in avtomatično izračuna hitro močenje in sušenje celic, mirni, kritični in deroči tok, vodne skoke. Program omogoča več numeričnih računskih

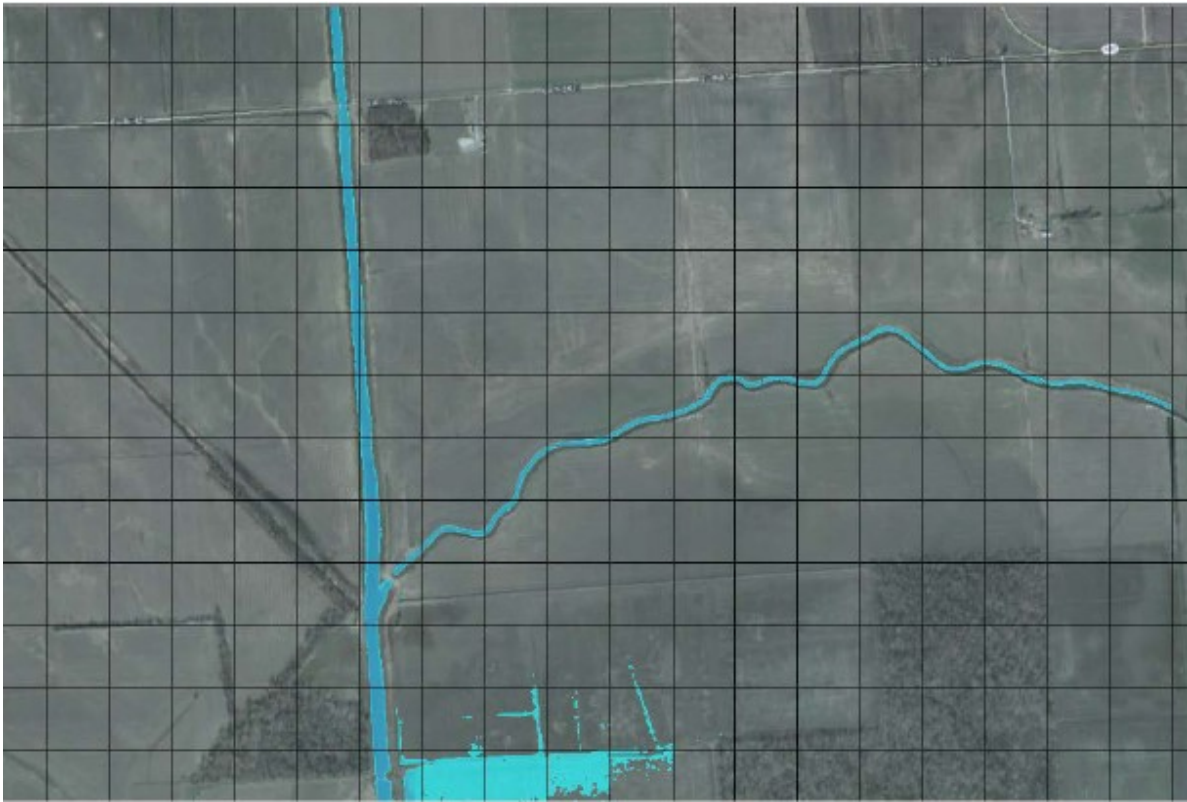
shem za reševanje enačb, ki pa dajejo med seboj primerljive rezultate. Optimalen izbor metode je odvisen od vsakega modeliranega scenarija. Program se sam ustavi, če rešitve ne konvergirajo ali če napaka preseže dovoljeno toleranco.

V primerjavi z ostalimi 2D modeli HEC-RAS za 2D račune uporablja t.i. »podmrežno metodo«, ki omogoča večje celice in večjo natančnost rezultatov. Teren, ki ga vsaka celica zajema, ostane realno upoštevan in ni poenostavljen. Vsaka stran celice na podlagi terena upošteva dejanski potek terena po robu celice. Za vsak rob je izračunana Vol-H krivulja, ki se kasneje uporablja pri dejanskem hidravličnem računu. Prav tako je osnova za prisotnost vode teren, ne računska celica. Posamezna računska celica zato ni nujno v celoti pod vodo, kot pri večini ostalih modelov (Brunner, 2023). Kljub temu je pri vzpostavitvi 2D računske mreže potrebne nekaj pozornosti – prevelike ali premajhne celice so lahko vir nestabilnosti. Prav tako mora rob celic zajeti vsako pomembno spremembo v modelu, da je ta upoštevana. Program omogoča prisilno vzpostavitev robov celic po poljubni liniji, ki jo lahko uporabnik izriše. Slika 4 prikazuje elemente 2D celice z upoštevanjem podmrežne metode.



Slika 4: Princip podmrežne metode (prirejeno po HEC, 2023)

Spodnja slika 5 prikazuje večje celice, ki pa niso v celoti mokre in realno prikazujejo omočenost struge, kljub poteku celic izven robov struge.



Slika 5: Prikaz rezultatov 2D modela in pod mrežne metode (HEC, 2016)

V nalogi smo uporabili polni 2D model. Ker je numeričnih orodij, ki omogočajo 2D modeliranje, na trgu precej, je HEC leta 2018 izvedel primerjavo z 18-imi ostalimi 2D modeli. Primerjava je bila narejena z modeliranjem 8 primerov, za katere so robni pogoji in geometrija natančno predpisani. HEC-RAS 2D modeli so po rezultatih zelo podobni ostalim rezultatom (HEC, 2018).

Del naloge, ki je iz vidika hidravličnega modeliranja najzahtevnejši, predstavljajo tudi primeri porušitve pregrade. V stroki se je tako 1D kot 2D modeliranje obratovanj pregrad in porušitev pregrad z uporabo HEC-RAS uveljavilo, npr. Urzica in sodelavci (2020) in Karim in sodelavci (2021) v 2D modelu določijo tako parametre porušitve pregrade in pripadajoč hidrogram kot tudi obseg in dinamiko porušitvenega vala. Boussekine in Djemili (2016) pa je za modeliranje uporabljala 1D model.

Prikaz rezultatov hidravličnega modela v HEC-RASu omogoča podaplikacija RAS Mapper, ki omogoča nadaljnje analize rezultatov in njihov izvoz. Trenutno je RAS Mapper edini prikazovalnik 2D rezultatov modela – uporabnik lahko za vnaprej določen časovni korak spremlja rezultate modela: hitrost in globina

vode, nadmorska višina vode, strižne sile ob dnu, produkt globine in hitrosti, tokovnice, Froudovo število...

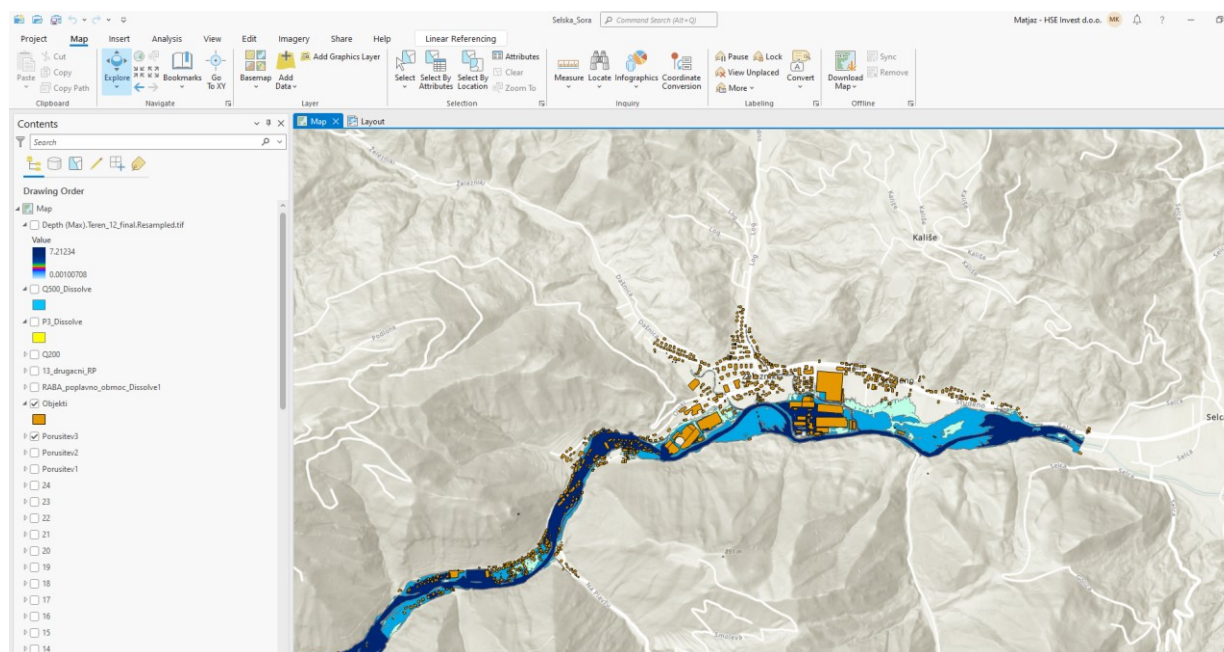
Glede na izris poljubne linije je možno vse našteje rezultate tudi opazovati, npr. izračun pretokov in volumnov, prečni prerez poteka gladine, porazdelitve hitrosti itd. Po poljubnem vzdolžnem prerezu pa dobimo globino vode.

RAS Mapper omogoča tudi urejanje podatkov terena. Zaradi pod mrežne metode je posebej pomembno, da so 3D podatki čim boljše kakovosti, da zagotavljajo kvaliteto rezultatov. Od verzije 6.0 naprej program omogoča enostavne modifikacije terena, kot je vnos struge, dodajanje nasipov, vnos hiš v model, dodajanje protipoplavnih nasipov itd. V orodju dodamo tudi Manningov koeficient trenja, lahko vnesemo prepuste, mostove, odvzemne objekte itd.

2.3 Programsko orodje ArcGIS Pro

Orodje ArcGIS Pro je GIS orodje (geografski informacijski sistem), tj. računalniški program, ki omogoča prikaz, obdelavo, analizo in manipulacijo z vsemi podatki, ki jih je možno prostorsko umestiti. GIS sistem je baza podatkov, narejena za obdelavo z prostorskimi podatki (Price, 2023). ArcGIS Pro razvija podjetje ESRI (Environmental Systems Research Institute). Orodje nadomešča prejšnjo verzijo ArcMap, ki je bila prav tako razvita s strani ESRI. Podjetje se že od leta 1969 ukvarja z geografskimi informacijskimi sistemi. Od leta 1981 prodajajo svoje GIS programe tudi na trgu.

Za namen magistrske naloge in hidravličnega modeliranja je orodje uporabno za pripravo vhodnih podatkov – lokacije obravnavanega območja, objektov na območju, izdelave terena območja in rabe tal na območju. Orodje je uporabno za prikaz vektorskih in rasterskih podatkov. V orodje je možno vnesti rezultate iz hidravličnega modela in jih nadaljnje analizirati ter jih primerjati z ostalimi razpoložljivimi podatki. Orodje je tudi uporabno za prikaz rezultatov in izdelavo kart. Slika 6 prikazuje delovno okolje ArcGIS Pro.



Slika 6: Delovno okolje ArcGIS Pro

2.4 Ocena škode poplavnega dogodka

Za oceno škode poplavnih dogodkov je na voljo več metod. Vnaprej napovedati škodo je zaradi kompleksnih in nepredvidljivih razmer pri ekstremnih visokovodnih dogodkov skoraj nemogoče. Pri škodi je potrebno upoštevati hidravlične razmere, rabo tal, naseljenost, industrijo, kulturno vrednost, človeška življenja itd. Oceno škode poplavnega dogodka, ki se je že zgodil, obravnava Uredba o metodologiji za ocenjevanje škode.

2.4.1 Metoda za ocenjevanje škode IzVRS

Pri oceni škode metoda Inštituta za vode Republike Slovenije zajema predmetno škodo in nepredmetno škodo (izguba življenj). Po metodi pride do **poplavnega tveganja** zaradi sovpadanja nevarnostnega potenciala (skupek vseh scenarijev nastopa nevarnega naravnega pojava na območju) in škodnega potenciala (skupek možnih škodnih izidov ob nastopu nevarnosti na območju) (IzvRS, 2018).

Nevarnostni potencial je izračun na podlagi hidravličnih modelov (globina vode, obseg vode, čas poplavljanja) in integralnih kart poplavne nevarnosti. **Škodni potencial** pa upošteva:

- centralni register prebivalstva,
- register poslovnih enot,
- poslovni register Slovenije,
- register nepremičnin kulturne dediščine,
- vodovarstvena območja,
- območja Natura 2000,
- register zavezancev IDE in SEVESO direktive,

- zbirni kataster gospodarske javne infrastrukture.

Pričakovana škoda se po metodi določi za dogodke s povratno dobo 10, 100 in 500 let na podlagi produkta globine vode, trajanja dogodka, obsega poplav in škodnega potenciala, ki je za vsako kategorijo podrobneje razdelan.

Gre za zelo kompleksno metodo, ki zahteva natančno obravnavo in poznavanje rabe tal in vseh objektov na območju.

2.4.2 Metoda za ocenjevanje škode EU JRC

Ocena škode s škodnimi funkcijami sloni na dokumentu, ki ga je izdal JRC (joint research comission) v okviru Evropske komisije (Huizinga in sodelavci, 2017). Gre za enostavnejšo metodo, ki za oceno škode potrebuje dva parametra:

- ocenjena vrednost zemljišča glede na rabo tal,
- škodna funkcija za posamezno rabo tal.

Znotraj metodologije so upoštevane sledeče rabe tal:

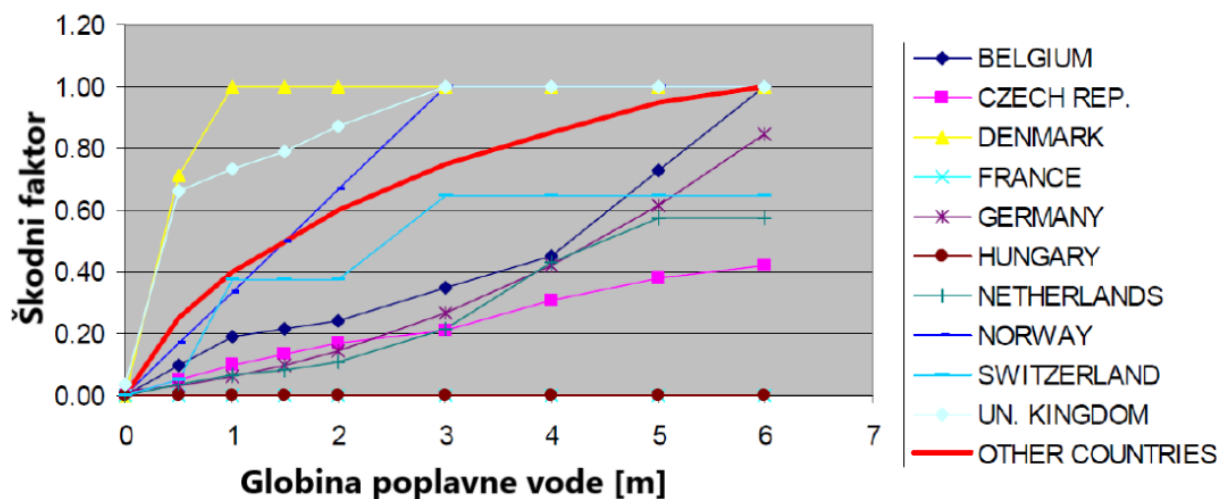
- stanovanjski objekti,
- trgovinski objekti,
- industrijski objekti,
- transport (ceste, parkirišča),
- infrastrukturni objekti,
- kmetijske površine.

Metodologija za vsako rabo tal določi maksimalno vrednost zemljišč. Maksimalna vrednost je določena za tiste države, za katere so na voljo podatki. Za Slovenijo niso, zato je potrebno uporabiti povprečno vrednost ali vrednost primerljivih evropskih držav. Škodne funkcije so ovrednotene tudi za ostale celine.

Drugi korak metodologije pa je uvedba škodnih funkcij – te podajajo odvisnost škode (za posamezno rabo tal) od globine poplavne vode na območju. Za uporabo metodologije torej potrebujemo razrede globin poplavnih vod in rabo tal s pripadajočo škodno funkcijo, ki ima ocenjeno maksimalno vrednost. Glede na karte globin poplavne vode na posamezni rabi tal in škodno funkcijo lahko z zmnožkom vseh izključujočih se razredov globin in rabe tal dobimo ocenjeno škodo za posamezno rabo tal. Skupna škoda je seštevek škode po vseh rabah tal.

Metoda je bila uporabljena v magistrski nalogi, saj gre za enostavnejšo metodo, ki ne zahteva zelo podrobnih vhodnih podatkov. Prav tako omogoča dobro primerjavo različnih poplavnih dogodkov, četudi ocena škode ni nujno povsem realna.

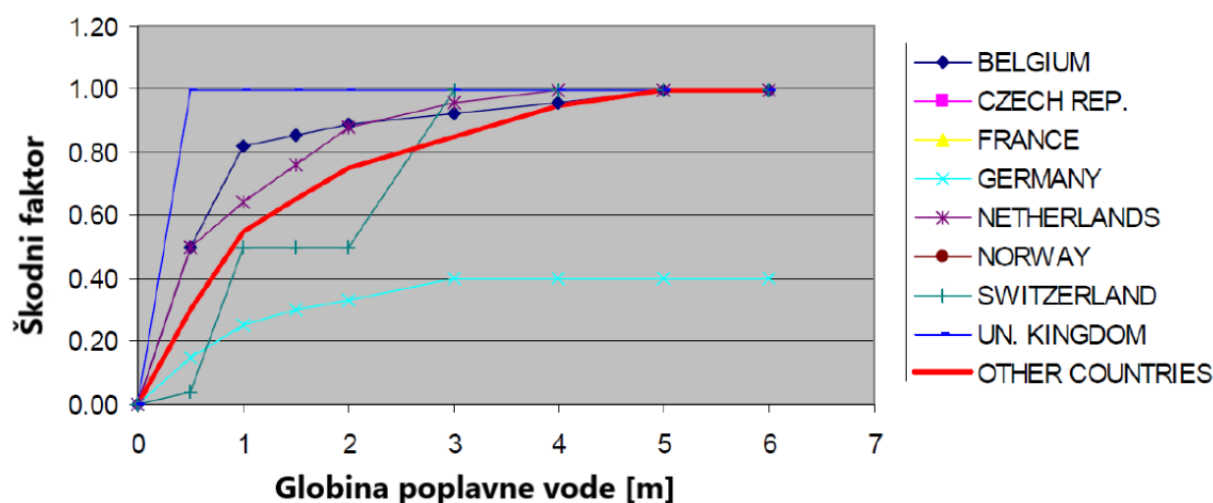
Spodnja slika 7 prikazuje škodne funkcije za različne evropske države za poplavljenе stanovanjske objekte.



Slika 7: Škodne funkcije za evropske stanovanjske objekte. Prirejeno po Huizinga in sod. (2017)

Iz zgornje slike lahko razberemo, da je za približno polovico evropskih držav škoda na hišnih objektih omejena na cca. 60 % njihove maksimalne vrednosti, tudi, če globina vode doseže 6 metrov. Za drugo polovico pa je po 2-3 metrih škoda že 100 %.

Spodnja slika 8 prikazuje škodne funkcije za kmetijske površine.



Slika 8: Škodne funkcije za evropske kmetijske površine. Prirejeno po Huizinga in sod. (2017)

Pri kmetijskih površinah opazimo, da 2-3 metre globoka poplavna voda v praktično vseh državah pomeni že 100 % dosežen škodni potencial zemljišča.

Faktor škode, ki ga podajata zgornja grafa, je treba zgolj zmnožiti z maksimalno vrednostjo zemljišč, ki jih tudi navaja dokument.

2.4.3 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

83. člen zakona o vodah zaradi zagotavljanja varstva pred škodljivim delovanjem vode zahteva določitev območij, ki so ogrožena s strani poplav, erozije in plazov. Po 83. členu je bil izdan 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 (Uradni list RS, št. 60/07). V nadaljevanju naloge se bomo na pravilnik sklicevali kot pravilnik (2007).

Pravilnik določa območja, ki so ogrožena zaradi poplav in z njimi povezane erozijske celinskih voda in morja. Podaja način določanja poplavnih in erozijskih območij, način razvrščanja zemljišč v razrede poplavne in erozijske ogroženosti in merila za določanje razredov poplavne in erozijske ogroženosti. Določa tudi način priprave poplavnih kart in kart erozijsko ogroženih območij in uvaja enotne oznake vsebin.

Za nalogo pomembnejši izrazi, ki jih pravilnik (2007) uporablja, so sledeči:

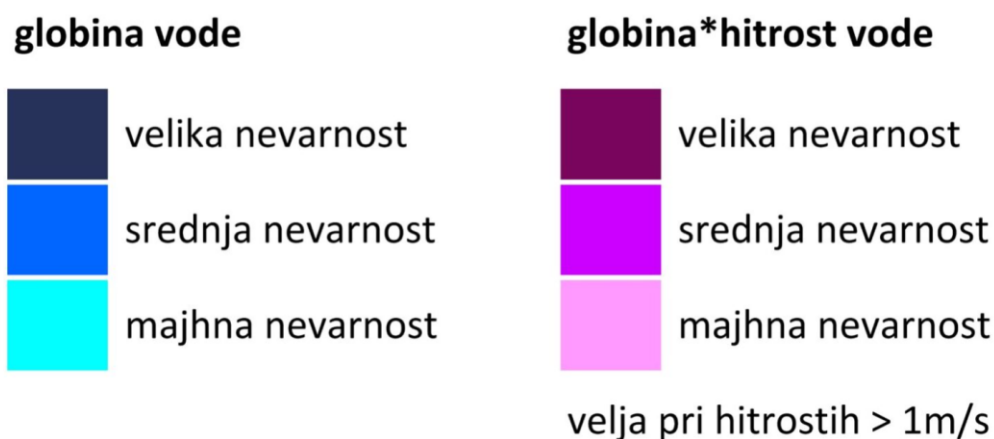
- **Poplava** je naravni pojav začasne preplavljenosti zemljišč, ki z vodo običajno niso preplavljena.
- **Erozija** je naravni pojav odplavljanja in odlaganja preperelega kamninskega materiala vodnih in priobalnih zemljišč celinskih voda in morja.
- **poplavna in erozijska ogroženost** je možnost škodnih posledic, predvsem za življenje in zdravje ljudi, okolje, gospodarske in negospodarske dejavnosti ter kulturno dediščino zaradi njihove izpostavljenosti poplavni in erozijski nevarnosti.
- **škodna posledica** je zmanjšanje psihofizičnih sposobnosti ljudi in zmanjšanje količine, kakovosti, tržne in uporabne vrednosti drugih elementov ogroženosti in je lahko izražena predvsem s številom žrtev in poškodovancev, višino okoljske škode, vrsto in številom gospodarskih subjektov ali obsegom in vrsto gospodarske škode (ki predstavlja vrednost poškodovanih gradenj in škodo zaradi izgubljenega dohodka) ter škodo na objektih kulturne dediščine.
- **območje poplavne in erozijske nevarnosti** je območje, na katerem je na podlagi analize geografskih in geoloških značilnosti prostora, hidroloških podatkov in značilnosti vodnega toka določena verjetnost nastanka naravnega pojava, lahko pa tudi njihova moč.
- **območje razreda poplavne in erozijske nevarnosti** je del območja poplavne in erozijske nevarnosti, določeno na podlagi meril, ki razvrščajo poplavno nevarnost glede na verjetnost nastanka in moč naravnega pojava.

Na kartah se prikazuje globine poplavnih voda pri pretoku Q_{100} , kjer pa je presežena hitrost 1 m/s, pa se prikazuje tudi produkt globine in hitrosti. Pri tem so definirani trije razredi:

- **Veliki razred globine oz. produkta globine in hitrosti**, kjer vrednost presega 1,5 metra oziroma $1,5 \text{ m}^2/\text{s}$.
- **Srednji razred globine oz. produkta globine in hitrosti**, kjer je vrednost med 0,5 in 1,5 metra oziroma med $0,5 \text{ m}^2/\text{s}$ in $1,5 \text{ m}^2/\text{s}$.
- **Mali razred globine oz. produkta globine in hitrosti**, kjer globina oz. produkt globine in hitrosti ne preseže 0,5 metra oziroma $0,5 \text{ m}^2/\text{s}$.

Spodnja slika 9 prikazuje legendo zgoraj omenjenih razredov:

Karte poplavne nevarnosti



Slika 9: Oznaka na legendah kart poplavne nevarnosti

Po uredbi se sloji poplavne nevarnosti iz zgornje slike in obsegi poplavnih vod Q_{10} , Q_{100} in Q_{500} naprej združujejo v razrede poplavne nevarnosti: razred majhne nevarnosti, razred srednje nevarnosti, razred velike nevarnosti in razred preostale nevarnosti. Ti rezultati se uporabljajo kot strokovne podlage za nadaljnje prostorske analize.

3 OPIS OBRAVNAVANEGA OBMOČJA IN VHODNI PODATKI

Železniki so občina in mesto na Gorenjskem, ki leži ob reki Selška Sora. Začetki poselitve segajo v 14. stoletje, ko se je na tem območju pričelo razvijati železarstvo. V letu 2021 je v občini živel 6680 prebivalcev, od tega cca 3000 v mestu Železniki (SURŠ, 2023). Selška Sora, katere staro ime je Sorica, izvira nad vasjo Sorica. Celotno prispevno območje meri cca 220 km², na njenem porečju do sotočja s Poljansko Soro pa prebiva okoli 16000 ljudi. Slika 10 prikazuje del Železnikov nad mestnim jedrom in strugo Selške Sore.



Slika 10: Železniki in struga Selške Sore. Vir: <https://krajil.eu/slovenija/zelezniki/slo>. (Pridobljeno 29. 12. 2023.)

Celotno porečje, predvsem pa mesto Železniki, so bili v preteklosti podvrženi pogostim in hudim poplavam. Klabus (2007) navaja sledeče razloge za pogoste poplave:

- orografska lega: južna predgorja Alp - doline in grape med grebeni Škofjeloškega hribovja in spodnjih bohinjskih Julijskih Alp;
- razgibanost reliefa: številne in globoke grape s strmimi pobočji, med katerimi so številni in ostri grebeni, velike višinske razlike, gosta in razvejana mreža vodotokov, relativno strme struge;
- geološka podlaga: pretežno neprepustna, zelo erodibilna in podvržena plazanju, velika razlomljenost in pogosto neugodna lega skladov;

- padavine: visoke letne povprečne padavine (1600 do 2000 mm), pogosta vremenska situacija (zlasti jeseni), ko se vlažne zračne mase iznad Sredozemlja ob južnih grebenih Alp dvigajo in adiabatsko ohlajajo, kar povzroči silovite in obilne nalive;
- vegetacija: območje je sicer več kot 60 % poraščeno z mešanimi gozdovi v dobrem stanju, ki pa jih je v zadnjih desetletjih večkrat prizadel žled. Posledica je veliko polomljenega drevja in panjev v strugah in na strmih pobočjih grap, ki zaradi nedostopnosti niso bili pospravljeni;
- naseljenost: mesto Železniki se nahaja v ozki dolini ob strugi in poplavnem območju Selške Sore, deloma pa tudi na vršajih njenih hudourniških pritokov Dašnice, Češnjice in Prednje Smoleve. Novejši deli mesta in tudi industrijsko obrtne cone, se v zadnjih desetletjih širijo na poplavnih območjih. Številne vasi in manjši zaselki se nahajajo na vršajih hudournikov: Zali Log, Podrošt, Davča, Rudno, Selce, Dolenja vas itd. Ob strugah, po poplavnih območjih ter preko vršajev poteka zelo veliko lokalnih in gozdnih cest ter regionalna cesta Škofja Loka – Železniki – Podbrdo.

Glede na zgornje dejavnike ni presenetljivo, da so se v zadnjih desetletjih pojavile številne poplave v Železnikih, ki so bile tudi povod za začetek gradnje suhega zadrževalnika Pod Sušo, ki bo povečal protipoplavno varnost dolvodno od sotočja Selške Sore z Davčo. Spodaj podajamo nekaj večjih poplavnih dogodkov Selške Sore v preteklih letih (Klabus, 2007):

- **Poplave 1. novembra 1990** so na območju Selške Sore in Davče presegle Q_{20} oziroma Q_{50} . Hujše so bile poškodovane struge Davče, Prednja in Zadnja Smoleva, Selška Sora pa je poplavlila del Železnikov. Škoda je bila ocenjena na najmanj 6 milijonov evrov. Po poplavah je sanacija potekala več let in je vključevala sanacijo izlivnega odseka Davče, sanacijo struge Selške Sore, Češnjice in Dašnice. V zaledju hudourniških pritokov je bilo zgrajenih nekaj zaplavnih objektov. Posledica poplav leta 1990 je bila večja erozija na celotnem območju.
- **Poplave septembra 1995** so najbolj prizadele porečje Selške Sore in Davče. Ocenjena povratna doba je med Q_{20} in Q_{50} . Mesto Železniki je bilo znova poplavljen, cesta Železniki – Petrovo Brdo pa hujše poškodovana. Davča je bila znova najhuje prizadeta – večje poškodbe struge, tudi na Selški Sori pa so bili večji nanosi sedimentov. Enajst dni po prvih poplavah so močni nalivi povzročili ocenjen Q_{50} na pritokih Prednje in Zadnje Smoleve. Skupna ocenjena škoda je cca 6 milijonov evrov. Sanacija po poplavah je vsebovala ponovno ureditev strug Selške Sore in Dašnice in izvedbo še več zaplavnih objektov in pragov v zaledju hudournikov.
- **Poplave oktobra in novembra 1998:** oktobra so na gorvodnem odseku Selške Sore ocenjene na Q_{50} , na odseku skozi Železnike pa kot Q_{20} . Mesto je bilo poplavljen, poplavljali so tudi vsi pritoki in povzročali škodo. Novembra so bile poplave ocenjene na Q_{10} do Q_{20} , znova so bili

poplavljeni Železniki. Ocena škode je znašala 1,5 milijona evrov. Po dogodkih leta 1998 je sledila najbolj celovita sanacija strug in hudournikov, ki pa ni vsebovala nobene večje zaplavne pregrade v hudourniškem zaledju.

- **Poplave 17. septembra 2007** so ene najhujših v zgodovini Slovenije. V kratkem času je na območju padlo do 250 mm padavin. Najbolj je bilo prizadeto povodje Selške Sore, kjer se ocene povratne dobe gibljejo med Q_{100} (Klabus, 2007), nad Q_{100} (ARSO, 2007) in do Q_{300} (Rusjan in Mikoš, 2009). V Železnikih so Selška Sora, Dašnica in Česnjica katastrofalno poplavljalje in zasule več kot dve tretjini mesta s sedimenti in plavjem. Celotno območje Davče je bilo huje poškodovano in erodirano. Smrtne žrtve so bile 3. Daljši odseki strug so bili uničeni, bilo je več plazov, nanosov materiala, zasutih objektov,... Ocene škode se gibljejo med 20 in 80 milijoni evrov. Slike 11, 12 in 13 prikazujejo poplave leta 2007.

Poplave so se v manjšem obsegu pojavile tudi oktobra 2023, a večje škode ni bilo.



Slika 11: Poplavljanje Selške Sore skozi mestno jedro Železnikov leta 2007. <https://www.poplavna-varnost.si/zelezniki/poplavna-ogrozenost/> (Pridobljeno 29. 12. 2023.)



Slika 12: Poplavljanje mestnega jedra Železnikov leta 2007. Vir: <https://odkriti.svet24.si/clanek/sveze/suse-poplave-tropske-noci-to-caka-slovenijo-ze-v-kratkem-825709> (Pridobljeno 29. 12. 2023.)



Slika 13: Posledice poplav v Železnikih. <https://www.dnevnik.si/1042476489> (Pridobljeno 29. 12. 2023.)

Po dogodku leta 2007 so se začeli ukrepi celovite zaščite Železnikov pred visokovodnimi dogodki. Leta 2013 je bil sprejet DPN, ki omogoča ureditve za varovanje Železnikov pred stoletnimi poplavami. Aktivnosti za izvedbo so od leta 2014 naprej v teku s strani MOP in DRSV. Te vsebujejo ureditev struge in zaledja hudournikov, struge Selške Sore skozi Železnike, protipoplavne nasipe in zidove ter gradnjo zadrževalnika Pod Sušo (IZVOR, 2012). Podrobneje ureditve lahko delimo na sledeče izvedene ukrepe:

- ureditev nivelete struge skozi Železnike, ki vsebuje poglobitev struge in nove talne pragove,
- utrditev profila struge s betonskim zavarovanjem in dobetoniranjem, višina zidu se izenači na obeh straneh struge Selške Sore,
- izgradnja dodatnega visokovodnega zidu na območju objekta Alples,
- znižanje in obnova Alplesovega jez, ki zagotavlja vodo za mHE pri tovarni Alples,
- Dermotov jez se poruši in zgradi znova tako, da ne bo imel negativnega vpliva na poplavno varnost,
- Dolenčev jez se utrdi, izboljša se pretočnost,
- izgradnja prodnih zadrževalnikov in protipoplavnih nasipov na poplavnih ravninah (slika 14),
- odstranitev ali rekonstrukcija nekaterih mostov, ki nižajo poplavno varnost,
- uredijo se manjši hudourniki – zaplavne pregrade, stabilizacija dna, ureditev iztočnega dela, povečanje prepustov itd. (slika 15).

V času pisanja magistrske naloge pa je v gradnji še:

- gradnja zadrževalnika Pod Sušo (glej poglavje 3.1.3).



Slika 14: Protipoplavni nasip na desnem bregu med pritokoma Plenšak in Prednja Smoleva



Slika 15: Urejen izliv hudournika na območju in urejena struga pred Železniki

3.1 Vhodni podatki

Za vse obravnave, ki so predmet magistrske naloge, so končni rezultati analize hidravličnih izračunov. Hidravlični model v orodju HEC-RAS je bil narejen na osnovi vhodnih podatkov geodezije in hidrologije, ki sta predstavljena v naslednjih podpoglavjih. Podan so tudi opis načrtovano obratovalnje zadrževalnika.

3.1.1 Hidrologija obravnavanega območja

Glavno temo magistrskega dela predstavlja obratovanje visokovodnega zadrževalnika pri povratnih dobah nad Q_{100} , zato hidrologija predstavljan bistven vhodni podatek.

Za območje Železnikov in Selške Sore sta bili izdelani dve hidrološki študiji. Prva, na podlagi katere je tudi zasnovan suhi zadrževalnik Pod Sušo, je bila narejena leta 2010 (IZVO-R, 2010). Leta 2021 pa je bila izdelana hidrološka študija celotnega porečja Selške Sore in Poljanske Sore (HEK, Doroteja Starec, 2021).

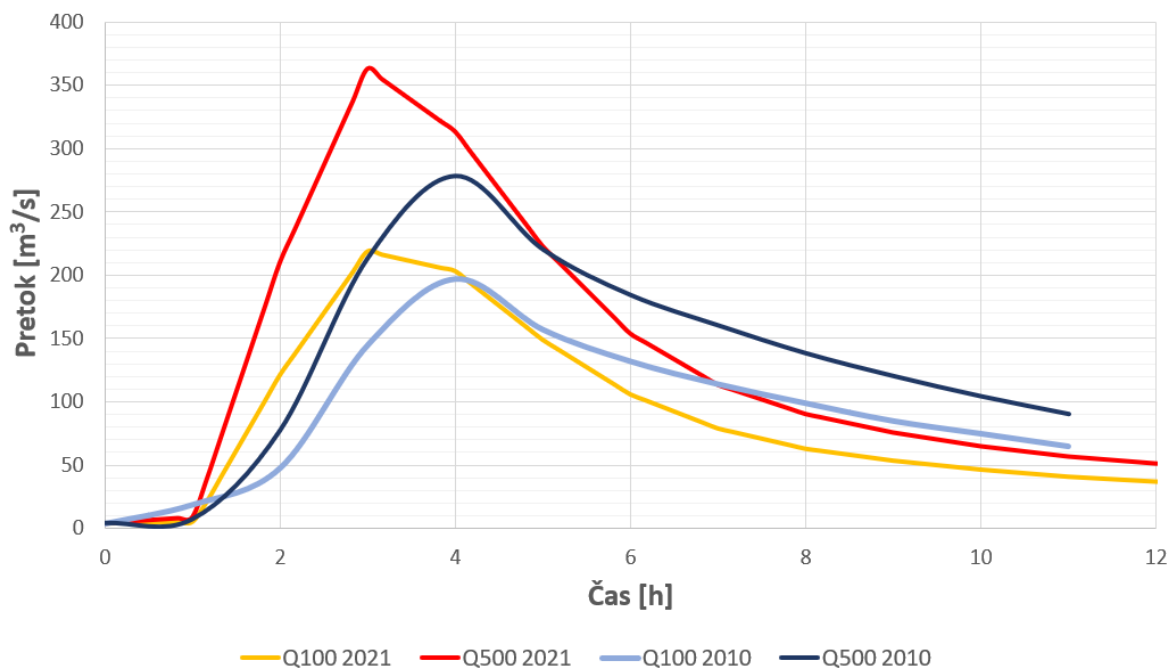
Med omenjenima hidrologijama prihaja, predvsem pri visokih vodah nad Q_{100} , **do velikih razlik, ki so se izkazale kot zelo problematične in imajo pomembno vlogo pri pripravi obratovalnega pravilnika zadrževalnika v primeru visokovodnih dogodkov nad Q_{100} .**

Spodnja tabela 1 prikazuje pretoke različnih povratnih dobobeh hidrologij za računski profil pregrade pod Suho.

Tabela 1: Hidrologija iz leta 2010 in 2021

Povratna doba	Leto izdelave študije	
	2010	2021
Q_{10} [m ³ /s]	97	85
Q_{100} [m ³ /s]	197	219
Q_{500} [m ³ /s]	278	363

Konica pretoka po novejši hidrološki študiji je pri pretoku Q_{100} večja za 11 %, pri Q_{500} pa za kar 31 %. Q_{500} po novejši študiji je za 43 m³/s večji od Q_{1000} po hidrologiji iz leta 2010. Spodnja slika 16 grafično prikazuje podatke visokovodnih valov po študiji iz leta 2010 in po študiji iz leta 2021.

Slika 16: Visokovodni val Q_{100} in Q_{500} po hidrologiji iz 2010 in 2021

Nova hidrologija izkazuje veliko bolj neugodne razmere, ne le zaradi veliko višjih vrednosti pretokov nad Q_{500} , pač pa tudi zaradi dejstva, da je konica dosežena zgolj ca. 2 uri po začetku naraščanja pretoka, medtem ko je po starejši hidrologiji le-ta dosežena po 3 urah.

Obe študiji podajata več hidrogramov, glede na trajanje visokovodnega dogodka pri posamezni povratni dobi. V sklopu magistrske naloge smo se omejili le na obliko hidrograma, ki ima konično vrednost enako izbrani merodajni vrednosti pretoka za pregradni profil v obeh študijah, sicer bi dobili prevelik nabor možnih dogodkov. Potrebno je opozoriti, da tu naredimo dokaj veliko poenostavitev, saj obravnavamo sintetično izdelane hidrograme in smo se omejili le na hidrograme, ki jih dobimo za en čas trajanja padavin in čas naraščanja pretoka. V realnih hidroloških (in kasneje obratovalnih) scenarijih so razmere lahko izrazito drugačne. Zelo verjetno pa smo na varni strani, saj upoštevamo izrazito strme hidrograme, z zelo kratkim časom zakasnitve, ki so bolj kritični s stališča obratovanja zadrževalnika. Krajši časi trajanja dogodkov imajo manjše pretoke, ki posledično pomenijo manjše zadržane volumne, daljši pa pomenijo nižji gradient naraščanja, kar je za obratovanje zadrževalnika bolj ugodno. Zgodovinski pregled poplavnih dogodkov v Železnikih sicer kaže, da se pogosteje pojavljajo izrazito strmi in kratki hidrogrami, kar je tudi prispevalo k odločitvi o izboru oblike hidrogramov.

Za nadaljnje obravnave in analize smo se v magistrski nalogi odločili, da za pregradni profil uporabimo podatke iz hidrološke študije iz leta 2021, iz sledečih razlogov:

- Podatki so novejši in zajemajo večji in daljši niz podatkov.
- Razlika med vrednostjo Q_{100} se med študijama ne razlikuje do te mere, da bi ta vplivala na delovanje pregrade pri Q_{100} , na kar je pregrada dimenzionirana (kot je to prikazano v naslednjih

- poglavjih). S stališča predvidenega obratovanja smo na varni strani, če upoštevamo 11 % povečanje Q_{100} .
- Natančno obratovanje pregrade pri višjih povratnih dobah v času pisanja magistrske naloge še ni podrobno definirano. Kot je prikazano v naslednjih poglavjih, se težave z obratovanjem pregrade pričnejo pri visokovodnih valovih, ki imajo konico nad cca $250 \text{ m}^3/\text{s}$, še večje pa ob pretokih s konico okoli $270 \text{ m}^3/\text{s}$ (ob upoštevanju oblike visokovodnega vala iz študije iz 2021, ki ima konico uro prej). Z upoštevanjem hidrologije iz leta 2010 bi z analizo Q_{500} (konica $278 \text{ m}^3/\text{s}$) verjetno prišli do zaključka, da je mogoče do te povratne dobe ugodno obratovati z vidika varnosti in kontroliranega poplavljanja Železnikov zaradi evakuacije odvečnih vod v akumulaciji.
 - Z upoštevanjem novejšje hidrologije zajamemo bistveno večji spekter dogajanja, ki je za delovanje pregrade bistveno bolj neugoden.

Iz grafa, priloženega novi hidrološki študiji, ki povezuje povratno dobo in konično vrednost pretoka, smo razbrali konice pri naslednjih povratnih dobah: Q_{100} , Q_{200} , Q_{300} , Q_{400} in Q_{500} . Vrednosti so prikazane v tabeli 2.

Tabela 2: Ocenjene vrednosti pretokov konice visokovodnih dogodkov po hidrologiji iz leta 2021

Povratna doba	Pretok konice VV vala
$Q_{100} [\text{m}^3/\text{s}]$	219
$Q_{200} [\text{m}^3/\text{s}]$	288
$Q_{300} [\text{m}^3/\text{s}]$	308
$Q_{400} [\text{m}^3/\text{s}]$	328
$Q_{500} [\text{m}^3/\text{s}]$	363

Zgoraj podane vrednosti so okvirne ocene za Q_{200} do Q_{400} , saj te v študiji niso bile iz vrednotene. Z vidika analize obratovanja pri teh dogodkih in pripadajočih hidravličnih razmer je bolj pomemben relativno enakomeren korak povečanja vrednosti konic pretokov, ki pomenijo vse bolj kritične razmere za obratovanje zadrževalnika. Izhodiščna oblika hidrograma in čas zakasnitve je za vse primere enak.

Ne glede na to, katera študija ima bolj »pravilne« vrednosti pretokov pri posameznih povratnih dobah, je pomembno, da se opiše delovanje pregrade do neke ekstremne absolutne vrednosti pretoka, do katere lahko s smotrnim delovanjem pregrade še blažimo uničujoče delovanje visokovodnih dogodkov. V okviru te naloge smo se omejili do pretoka Q_{500} po novi hidrološki študiji, tudi zaradi vpliva podnebnih sprememb in vse bolj ekstremnega vremenskega dogajanja.

3.1.2 Podatki o geodeziji

Podatke o geodeziji predstavljata dva sklopa podatkov – podatki o obvodnem prostoru in podatki o batimeriji struge. Podatke o obvodnem prostoru predstavljajo LIDAR podatki (prosto dostopni na spletnih straneh ARSO), podatki o strugi pa so bili pridobljeni iz IDP za ureditev Selške Sore (IZVOR, 2010). Gre za niz 288 prečnih profilov v projektiranem stanju, ki se začnejo na območju sotočja Selške Sore in Davče, končajo pa se pri pritoku Češnjice. Povprečna razdalja med profili je 20 metrov. Potrebno je poudariti, da gre tu za **načrtovano** stanje, za katerega je skozi Železnike projektirana prevodnost struge $180 - 190 \text{ m}^3/\text{s}$, kar je občutno več kot prejšnje stanje, ko voda prestopi bregove že pri okoli $110 \text{ m}^3/\text{s}$. Za območje dolvodno od sotočja in do izrazitega zoženja doline malo pred naseljem Selca je bilo pridobljenih še 15 starejših meritev struge. Za ta odsek ureditve niso več predvidene, zato so stare meritve zadostne za okvirno oceno dejanskega stanja struge tudi v projektiranem stanju.

Oba sklopa podatkov sta bila združena. Projektirani profili struge so bili preneseni v 1D model v orodju HEC-RAS, ki omogoča interpolacijo med posameznimi profili po osi struge, na ta način pa lahko korigiramo geometrijske nepravilnosti pri izdelavi 3D modela terena na rečnih krivinah. Iz zgoščenih profilov je v orodju možno narediti geolociran 3D model struge v rasterski obliki. Ta je bila v programskem orodju ArcGis Pro spremenjena v TIN (Triangulated irregular network) format.

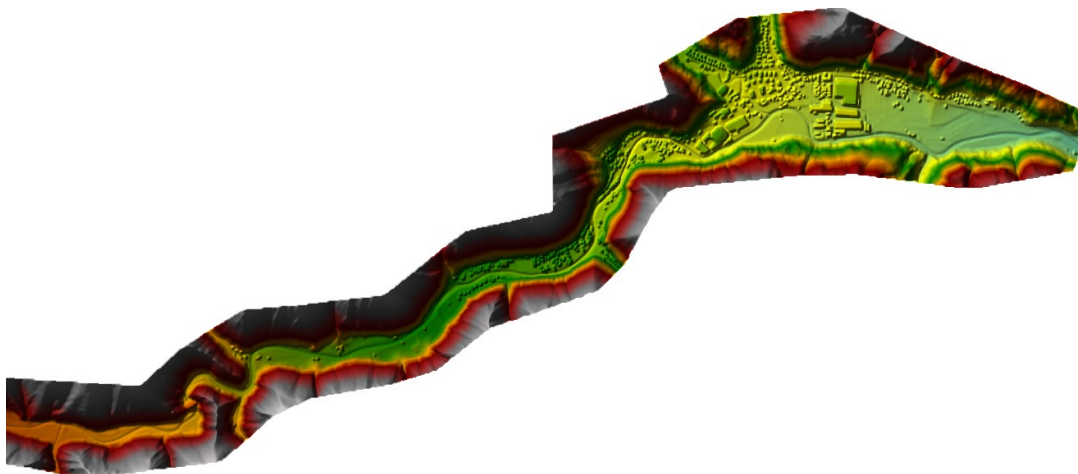
Podatki o obvodnem prostoru so bili pridobljeni iz spletne strani gis.arso.gov.si (2023) v OTR formatu, ki zajema celoten oblak točk, ki so bile pri LIDAR skeniranju identificirane kot tla. OTR format ima bistveno večje število točk in posledično bolj detajlen prikaz terena, kot že izdelan $1\text{m} \times 1\text{m}$ teren, ki je tudi na voljo. Za obravnavano območje je bil iz OTR formata izdelan TIN teren zajete struge in obvodnega območja.

Oba sklopa podatkov sta bila združena tako, da je projektiran 3D model struge zamenjal območje struge na TIN terenu iz LIDAR podatkov. V orodju ArcGis Pro so bile z orodjem »TIN Editor« ročno pobrisane vse napake, ki so se pri združevanju dveh nizov podatkov pojavile in se izkazovale nelogični potek terena, luknje in ostre špice. Tako je bil izdelan zvezen model struge v stanju, kakršno bo po koncu vseh gradbenih posegov.

Na območju so po IDP planirana nadvišanja nekaterih cest in izdelava dodatnih nasipov, ki so bila pravilno vnesena v končni teren z orodjem RAS-Mapper.

Iz spletne strani Geodetske uprave Republike Slovenije (GURS) (egp.gu.gov.si) so bili pridobljeni podatki katastra stavb v grafični obliki za stanje v letu 2022. Podatki so bili upoštevani pri generiranju končnega terena, ki je bil na lokacijah stavb dvignjen za 5 metrov. Na ta način so bili v model vneseni

objekti, ki imajo pomemben vpliv na tokovne razmere na poplavnih ravnicah v času visokih voda. Slika 17 prikazuje končno stanje terena, ki je bil upoštevan v izračunih.

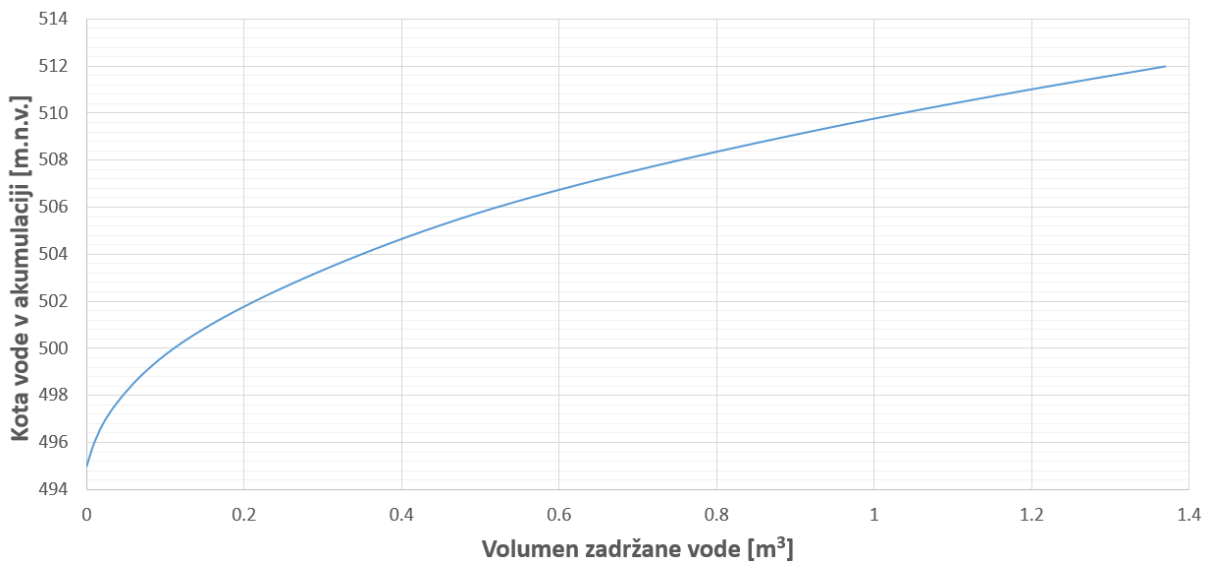


Slika 17: 3D model terena, kjer so bili upoštevani podatki LIDAR, batimetrija struge in kataster stavb

Teren je služil kot osnova za izdelavo hidravličnega modela obravnavanega odseka, ki je podrobneje opisan v poglavju 3.1.4.

3.1.2.1 Podatki o prostornini zadrževalnika

Poseben sklop podatkov, ki je pomemben za izračune delovanja zadrževalnika, predstavlja razpoložljiv volumen za zadrževanje vode za pregrado in odvisnost kote vode v akumulaciji pri znanem volumnu. Tako pri poplavnem dogodku lahko iz meritev kote vode v akumulaciji določimo, kakšen delež imamo še na voljo za zadrževanje. Spodaj prikazana krivulja na sliki 18 opisuje omenjeno zvezo (povzeto po IDP, IZVO-R, 2010).



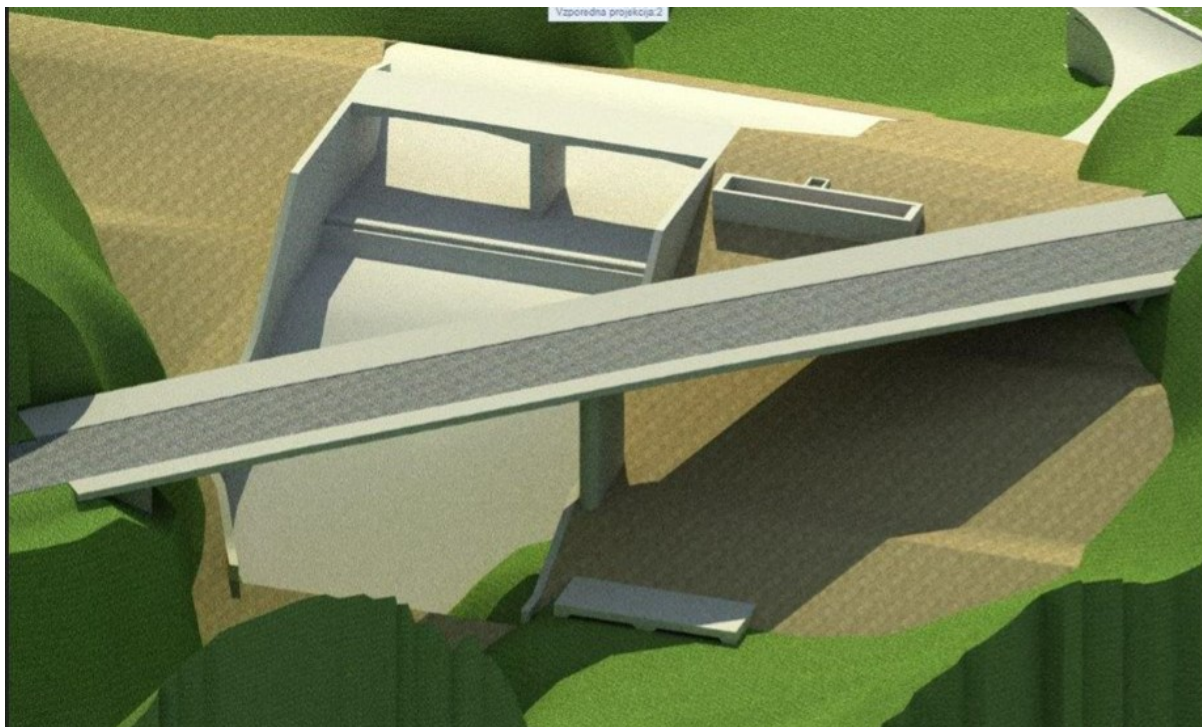
Slika 18: Zveza med volumnom zadržane vode in koto v akumulaciji

Pri koti 510 m.n.v. je volumen zadrževalnika enak 1,033 milijonov m³. Ker kota 510 m.n.v. skladno z načrtovanim obratovanjem ne smemo preseči, je to tudi koristen volumen zadrževalnika. Zaradi možne optimizacije delovanja pa smo krivuljo podaljšali še do kote 512 m.n.v. (pri koti 511 m.n.v. je volumen = 1,194 milijonov m³ in pri koti 512 m.n.v. V = 1,369 milijonov m³).

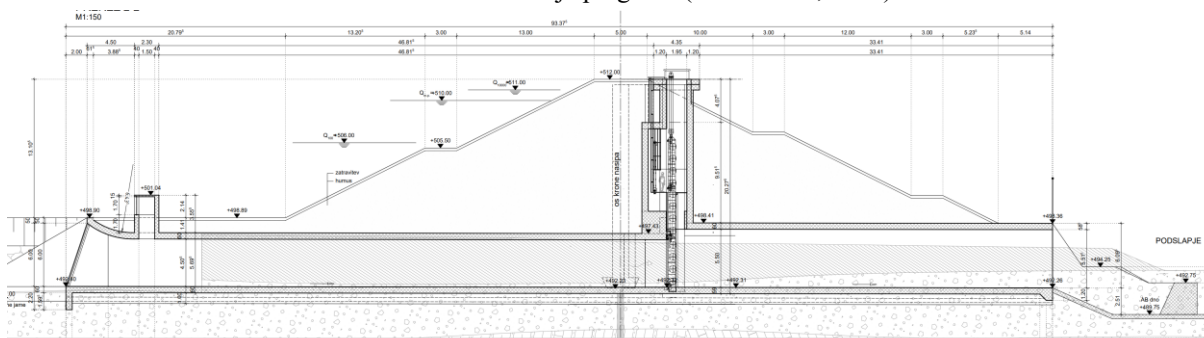
3.1.3 Delovanje zadrževalnika Pod Sušo

Zadrževalnik bo zgrajen kot nasuta pregrada v zoženju doline nekaj sto metrov nad pritokom Zadnje Smoleve, pred izrazitim rečnim meandrom. Na pregradi bo večji visokovodni preliv, ki ima koto praga na 506 m.n.v., dolžine 25 metrov. Na prelivu je predvidena zaklopka višine 4 metre. Pregrada ima temeljni izpust, ki sestoji iz dveh vzporednih cevi širine 5,5 metrov in višine 4,5 do 5,5 metrov. Predtalnim izpustom je groba rešetka, vsaka cev izpusta pa je regulirana s tablasto kotalno zapornico.

V sklopu izgradnje pregrade je predvidena tudi prestavitev obstoječe regionalne ceste Podrošt-Češnjica, ki zaradi delovanja zaklopke ne bo potekala po kroni pregrade, temveč po mostni konstrukciji, ki bo potekala tik pred pregrado, kot je prikazano na slikah 18 in 19. V akumulaciji sta predvidena dva bazena za zadrževanje proda, cesta pa bo potekala po bistveno višji trasi na levem bregu akumulacije. Sliki 19 in 20 prikazujeta izgled zadrževalnika.



Slika 19: Vizualizacija pregrade (HSE-Invest, 2022)



Slika 20: Prerez pregrade (HSE-Invest, 2022)

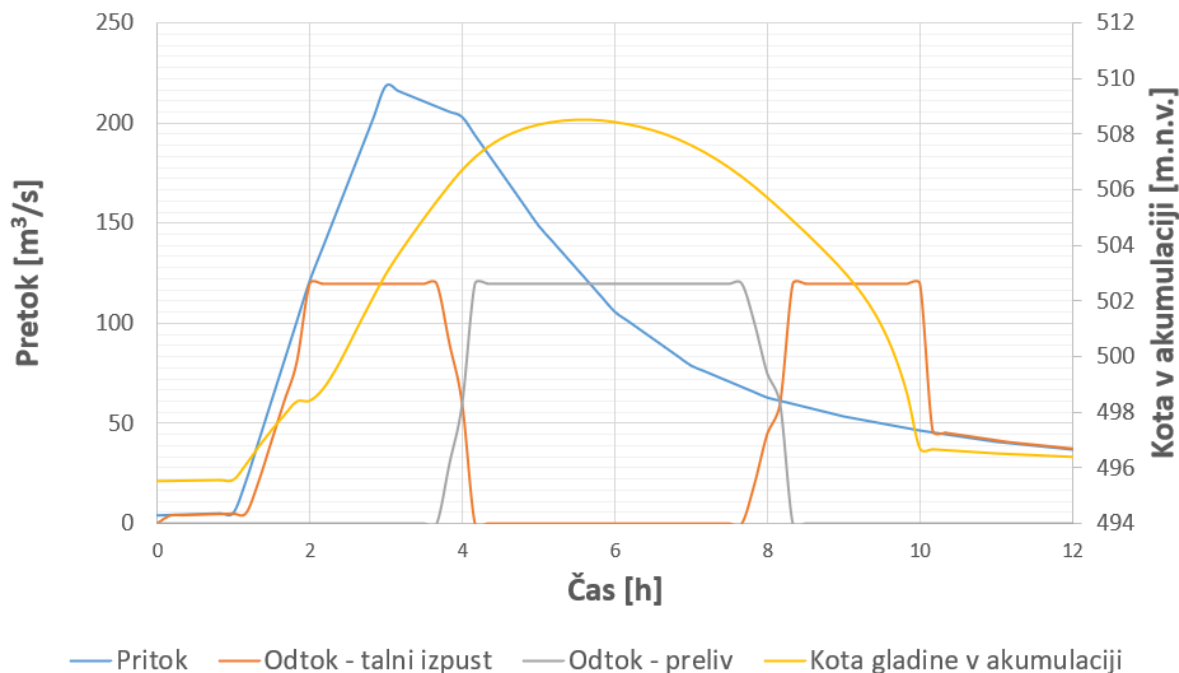
Na osnovi hidroloških in hidravličnih izračunov, izvedenih v okviru hidravličnega elaborata, projektnega pretoka za načrtovanje obrambnih ukrepov v Železnikih (IZVO-R, 2010) ter razpoložljive prostornine za zadrževanje dela visokovodnega vala (poglavje 3.1.2.1) so bila za dimenzioniranje pregrade in pregradnih objektov upoštevana naslednja izhodišča:

- Pretočna sposobnost talnega izpusta: talni izpust je dimenzioniran tako, da s prosto gladino prevaja projektni pretok ob minimalni zaježitvi Selške Sore gorvodno od pregradnega profila. Projektni pretok je $120 - 140 \text{ m}^3/\text{s}$ in je določen tako, da skupaj z vmesnimi dotoki dolvodno od zadrževalnika zagotavlja pri visokovodnih valovih ustrezen pretok, na katerega so dimenzionirani varovalni ukrepi v Železnikih ($180 - 190 \text{ m}^3/\text{s}$).
- Ob naraščanju pretoka nad pretoke iz prve alineje se začne polnjenje zadrževalnega prostora do maksimalne kote **510 m.n.v.**, ki naj bi bila dosežena pri valu s konico s povratno dobo 100 let. Pri valovih manjših od Q_{100} zadrževalnik zadrži vse pretoke nad $120 - 140 \text{ m}^3/\text{s}$.

- Pri valovih s povratno dobo nad 100 let bo obratovanje prilagojeno tako, da bo dosežen največji zadrževalni učinek, t.j., da bo konica vala dolvodno od zadrževalnika čim nižja, čeprav bo presegala pretok za dimenzioniranje zaščitnih ukrepov v Železnikih.
- Glede na prakso pri podobnih objektih krone pregrade ne sme preliti visoka voda s povratno dobo 10.000 let ($Q = 525 \text{ m}^3/\text{s}$ po stari hidrologiji), kar je projektni pretok za dimenzioniranje preliva čez pregrado ob predpostavki blokirane talnega izpusta. Nekontrolirano prelivanje visokih voda čez nasuto pregrado bi povzročilo porušitev le te. Kota gladine na pregradi je za 10.000 letno vodo **511 m.n.v.**, kar je 1 m pod krono pregrade na koti **512 m.n.v.**
- Za dogodke do Q_{10000} je torej izhodišče obratovanje do največ kote 510 m.n.v., za izreden dogodek Q_{10000} pa kota 511 m.n.v. Kote **512 ne smemo nikoli doseči**, saj bi to pomenilo prelivanje čez nasuto pregrado, kar pomeni porušitev pregrade.
- Obratovalni režim bo potrebno pri vsaki veliki vodi določiti vnaprej glede na pričakovano velikost konice in dolžino trajanja visokovodnega vala ter ocenjeno velikost vmesnih dotokov med pregrado zadrževalnika in Železniki.

Pri prevajanju vod skozi pregrado sodelujeta talni izpust in preliv. Sprva sodeluje le talni izpust, ki je ob visokovodnem dogodku reguliran s tablastima kotalnima zapornicama tako, da prevaja $120 \text{ m}^3/\text{s}$. Ob tem gladina vode narašča. Ko gladina doseže koto 506 m.n.v., se izvede manever hkratnega zapiranja talnega izpusta (zaradi abrazije betona) in začetka prelivanja čez visokovodni preliv pregrade. Manever se izvede tako, da pretok ostane konstanten.

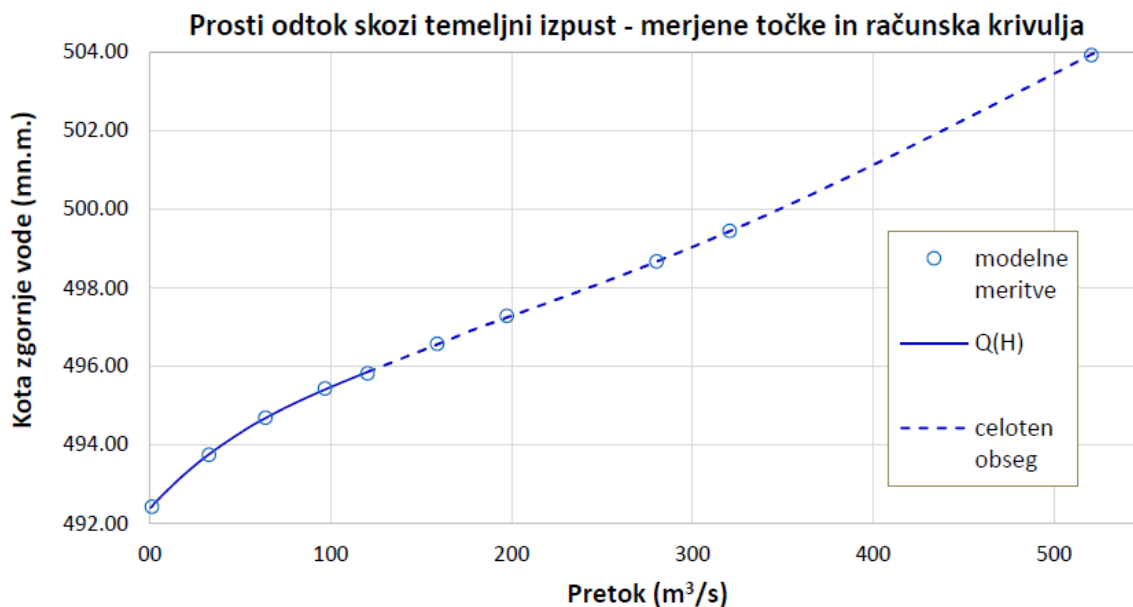
V primeru Q_{100} iztok nikoli ne preseže $120 \text{ m}^3/\text{s}$. Spodnja slika 21 prikazuje dinamiko dogajanja v zadrževalniku ob Q_{100} , skladno z zgoraj opisanim obratovanjem.



Slika 21: Delovanje pri Q_{100}

Zgornja slika je bila narejena s pomočjo modela za opis delovanja zadrževalnika, ki je opisan v poglavju 4.1.

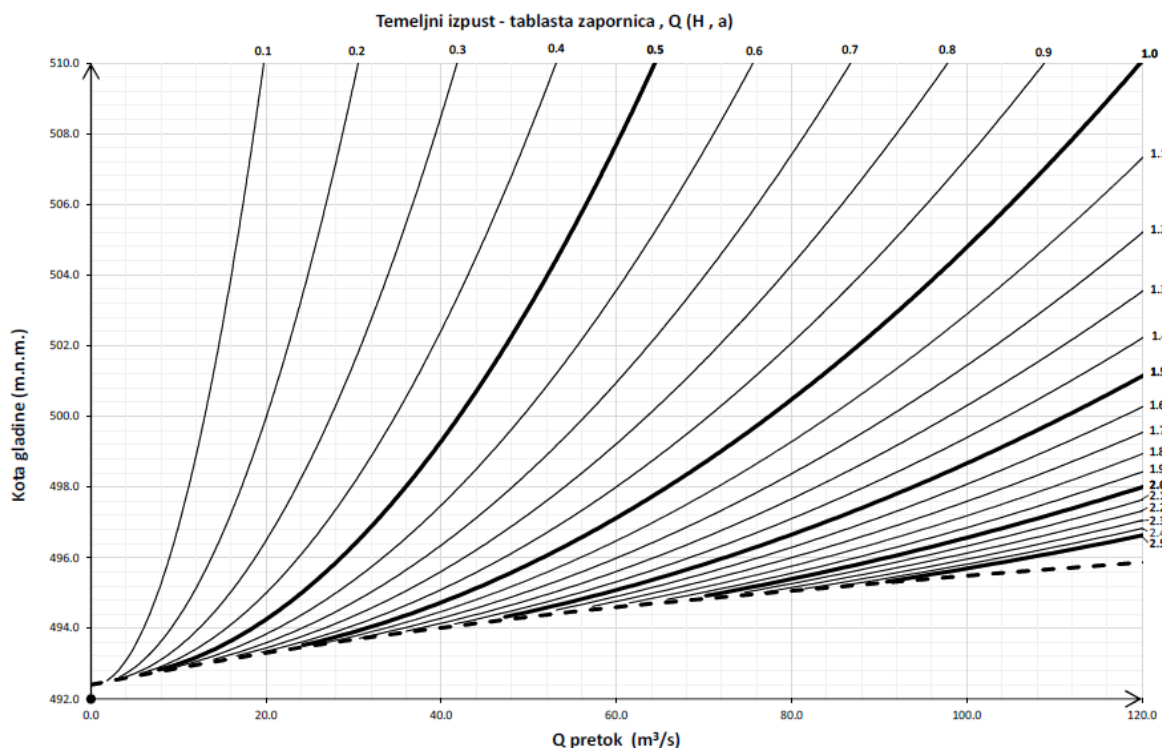
Leta 2022 je bil izdelan fizični model pregrade (Hidroinštitut, 2022) z namenom potrditve delovanja zadrževalnika in izdelave pretočnih krivulj talnega izpusta in preliva z zaklopko. Dodatno so bile preverjene tudi rešetke na vtoku v talni izpust in morebiten vpliv njihove zamašitve. Preverjeno je bilo tudi delovanje podslapja. Za magistrsko nalogo so najbolj pomembne pretočne krivulje talnega izpusta in preliva z zaklopko, saj pri obravnavanju visokovodnih dogodkov moramo vedeti, koliko vode smo lahko v vsakem trenutku zmožni preliti oziroma spustiti skozi pregrado, z varnostnega vidika pa nas zanimajo možnosti hitre evakuacije vode, da ne pride do nekontroliranega prelivanja pregrade in morebitne porušitve. Temeljni izpust ima koto dna vtoka na višini 492 m.n.v. in je dimenzioniran na prevajanje praktično vseh pričakovanih in ekstremnih pretokov. Spodnja slika 22 prikazuje pretočno krivuljo.



Slika 22: Pretočna krivulja temeljnega izpusta (Hidroinštitut, 2022)

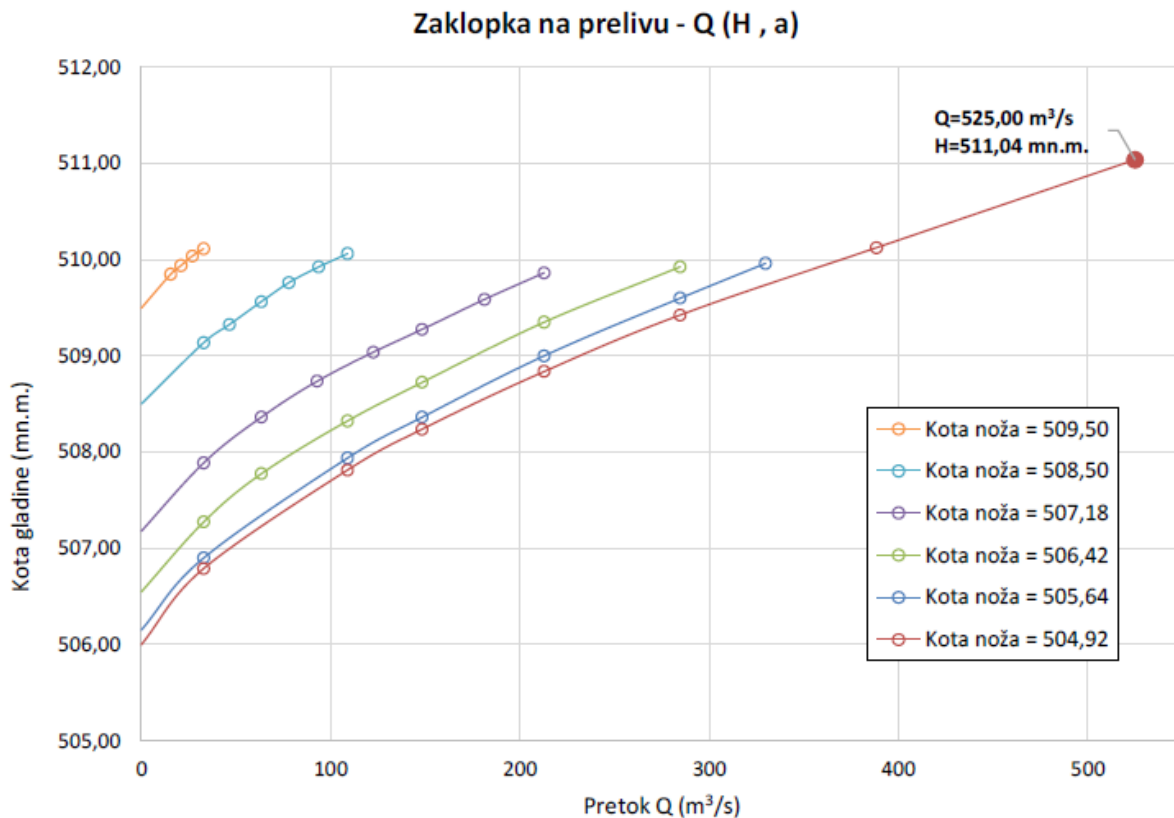
Ob popolnoma odprtem temeljnem izpustu se poplavni dogodki praktično ne spremenijo ali zadržijo, saj bi brez težav odtekli skozi izpust. Hipotetičen dogodek s pretokom $525 m^3/s$ pregrada lahko v celoti prevede skozi temeljni izpust. Temeljni izpust torej nudi veliko varnostno rezervo v primeru ekstremnih pritokov. Po navodilih naj bi sicer temeljni izpust prevajal pretoke le do **$120 m^3/s$** , vse večje pretoke pa bi prevajali preko zaklopke ob popolnoma zaprtem talnem izpustu.

Poročilo (Hidroinštitut, 2022) dodaja še pretočne krivulje za različne primere priprtja tablastih zapornic v temeljnem izpustu in za različne stopnje odprtja, z intervali po 0,1 meter. Kasneje bomo sicer obravnavali obratovanje pregrade pri visokovodnih dogodkih in bomo predpisali, kakšen pretok naj se prevaja skozi pregrado, a pri tem ne bomo predpisali podrobnega obratovanja s samimi zapornicami (ali zaklopko na prelivu), saj je to naloga operaterja in strokovnjakov za hidromehansko opremo. Bomo pa za vsak predpisan pretok preverili, ali je glede na koto vode v akumulaciji ta dosegljiv in ali ga talni izpust lahko prevaja. Spodnja slika 23 podaja pretočne krivulje tablastih zapornic temeljnega izpusta na vsakih 0,1 metra odprtja zapornic.



Slika 23: Pretočne krivulje tablastih zapornic (Hidroinštitut, 2022)

Poročilo (Hidroinštitut, 2022) podaja tudi pretočne krivulje zaklopke na prelivu pregrade Pod Sušo, glede na obratovanje zaklopke (torej glede na koto noža zaklopke). Kot omenjeno, se vsi pretoki nad $120 \text{ m}^3/\text{s}$ prevajajo čez preliv pregrade. V obratovanju pregrade ob naraščanju pretokov se v enem koraku zapre temeljni izpust in hkrati zaklopka spusti v popolnoma spuščeno lego, kar zagotavlja kontinuiteto pretoka. Ob nadaljnjem naraščanju pretokov se vse pretoke čez pregrado regulira s primernim obratovanjem zaklopke. Spodnja slika 24 podaja pretočne krivulje zaklopke na prelivu ob različnih kotah noža zaklopke.



Slika 24: Pretočne krivulje zaklopke (Hidroinštitut, 2022)

Pretočna sposobnost, sploh ob popolnoma spuščnem nožu, je velika. Preliv lahko prevaja cca 380 m³/s ob ohranjanju maksimalne dovoljene kote 510 m.n.v., na koti 511 m.n.v. pa lahko prelivamo do 525 m³/s (kar je dovoljeno le v primeru dogodkov nad Q_{10000} po hidrologiji iz 2010). Kot je bilo že omenjeno pri temeljnem izpustu, bomo pri kasnejših primerih obratovanj za predpisane prelite količine vode preverili izvedljivost glede na pretočno krivuljo, potrebne kote noža za prevajanje zelenega pretoka pa v sklopu te naloge ne bomo podrobneje obravnavali.

3.1.4 Opis izdelanega HEC-RAS modela

Za ovrednotenje vplivov obratovanja pregrade na hidravlične razmere v Železnikih in oceno obsega poplavnih vod Q_{100} do Q_{500} ter vse nadaljnje analize v sklopu naloge je bilo potrebno izdelati matematični hidravlični model, ki bi omogočal izračune vseh poplavnih dogodkov in morebitnih porušitev.

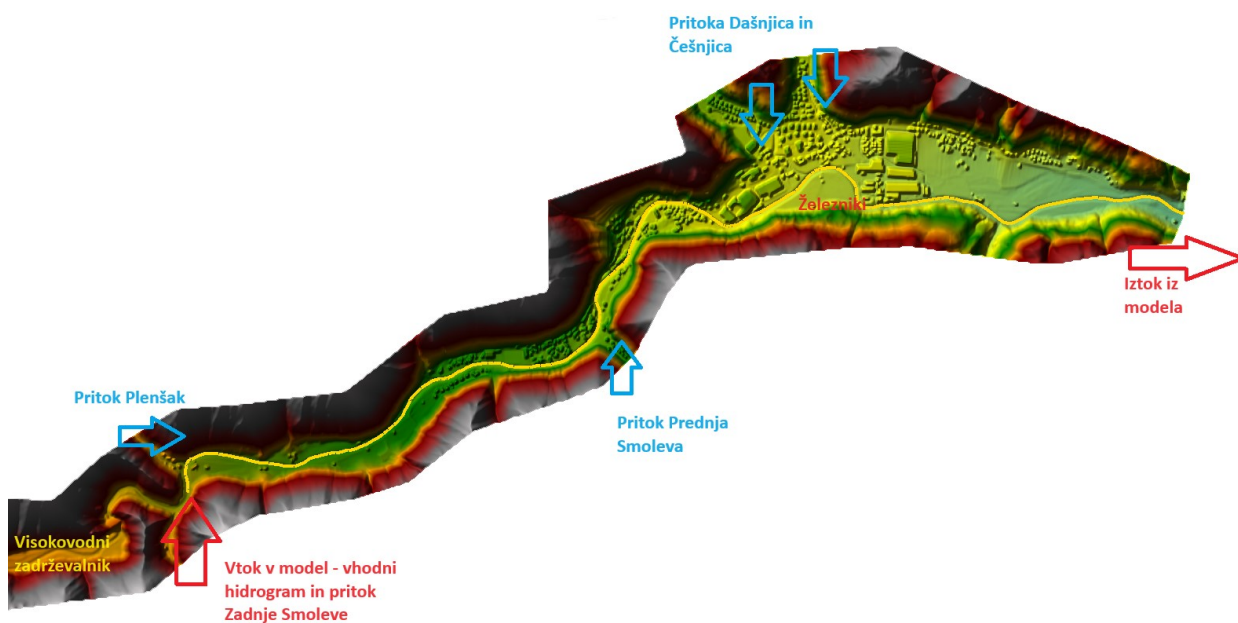
Izdelan je bil polno 2D model v programskem orodju HEC-RAS 6.3.1. Osnovo za model so predstavljali trije nizi podatkov:

- Geodetski podatki opisani v poglavju 3.1.2., ki opisujejo poplavne ravnice, stanovanjske objekte in strugo v projektiranem stanju, združeni v celovit 3D model terena. Podatkom je bil dodan še sloj rabe tal,

- Podatki o obratovalnih scenarijih pregrade pri različnih poplavnih dogodkih, ki so bili vhodni podatek za model v obliki vtočnega hidrograma (obravnavano v kasnejših poglavjih),
- Podatki za umerjanje modela, ki izhajajo iz idejnega projekta za ureditev Selške Sore za zagotavljanje poplavne varnosti (IZVO-R, 2012). Podatek je v resnici zgolj eden in sicer izračunan potek gladine Q_{100} v načrtovanem stanju, z urejeno strugo in zgrajeno pregrado.

3.1.4.1 Obseg hidravličnega modela

Spodnja slika 25 prikazuje shemo hidravličnega modela.



Slika 25: Shema hidravličnega modela

Zgornji rob modela je takoj za pritokom Zadnje Smoleve, 500 metrov dolvodno od iztoka iz pregrade. Izbrana lokacija omogoča enostavnejše modeliranje pritoka Zadnje Smoleve. Sicer ne pride do modeliranja vpliva sotočja, kar pa nima velikega vpliva na same rezultate zaradi enostavne oblike sotočja in manjšega doprinosa k skupnemu pretoku.

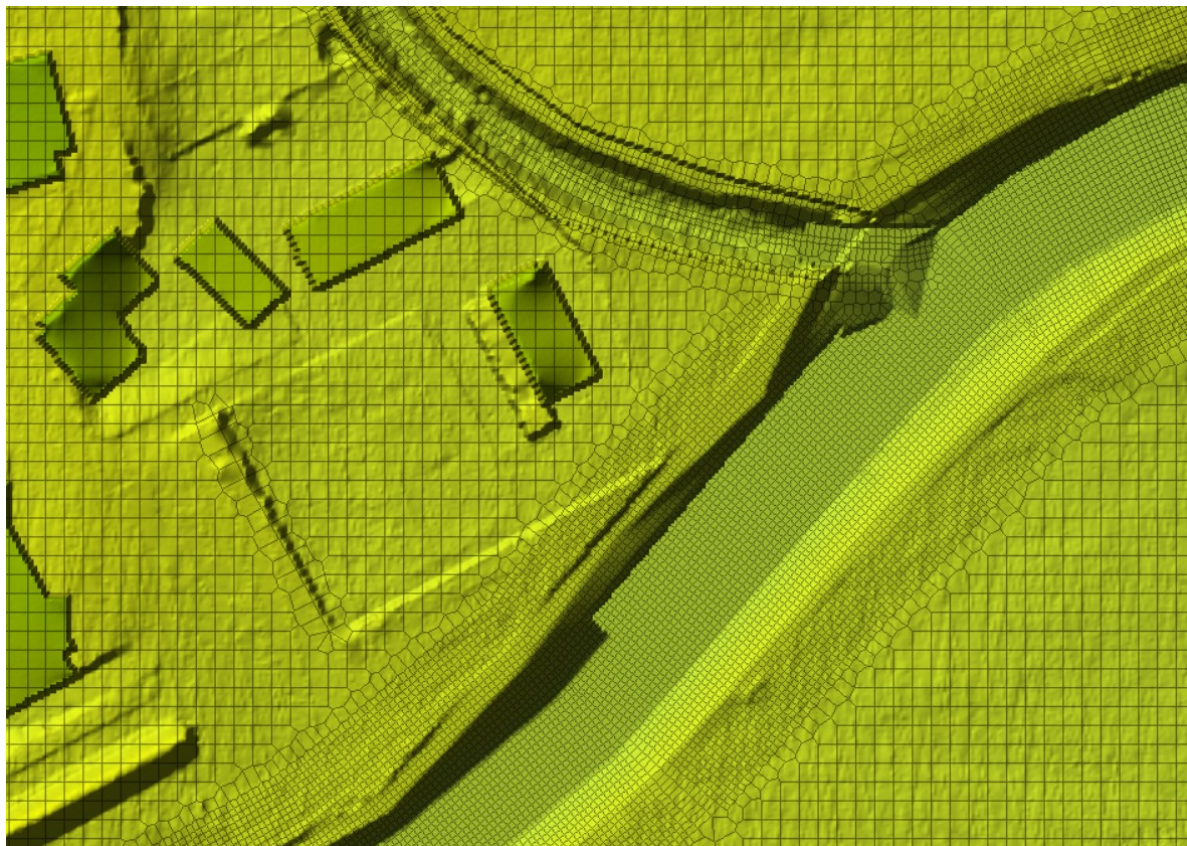
V dokaj kanjonski morfologiji terena se iztočni hidrogram iz pregrade do začetka modela praktično nespremeni. S takšno lokacijo začetka modela torej dobimo zanemarljivo višje gladine, kot bi jih z modeliranjem celotnega odseka. S tem smo tudi na varni strani, saj kvečjemu precenimo doseg poplavnih vod. Kot omenjeno pa je preoblikovanje hidrograma vzdolž tako ozke doline zanemarljivo. Vsi robni pogoji (vtok iz pregrade in pritoki) so modelirani kot znan vhodni hidrogram, iztok iz modela pa je modeliran kot znan padec energijske črte, sovpadajoč s padcem terena v strugi. Tako voda stabilno izteka iz modela.

Dolžina struge, ki je modelirana v modelu, znaša 6440 metrov. Osnovna velikost celice znaša 3m x 3m, v strugi in na pritokih pa je bila velikost znižana na 1m x 1m. Potrebno je sicer poudariti, da HEC-RAS

2D uporablja tako imenovano pod mrežno metodo, kjer za vsako stranico posamezne računske celice izračuna pripadajočo pretočno krivuljo, gladina vode pa se po posamezni celici tudi spreminja glede na pripadajoč teren pod celico. Tako načeloma pridobimo realne izračune tudi z večjimi celicami. Vendarle pa smo se odločili za manjše celice, saj pri bolj zahtevnih izračunih (npr. pri izračunih porušitve pregrad) prihaja do zelo velikih in hipnih sprememb pretoka v strugi in izven struge, kar najboljše zajamemo z majhnimi celicami. Hkrati velikokrat pride do razlivanja vode med hišami, kjer tudi potrebujemo manjše celice za natančnejši opis tokovnih razmer. Celice v strugi Selške Sore in v pritokih so bile usmerjene v smeri toka za večjo stabilnost modela. Prelomi celic na vzdolž topografskih detajlov terena, ki pomembno vpliva na tokovne razmere so bili izvedeni s pomočjo orodja »breakline«, ki usmeri robove celic po željenih lokalnih prelomih terena,. Skupno je imel model 452.919 celic in 72 »breakline« elementov.

Modelirani so bili štirje pritoki in sicer Plenšak, Prednja Smoleva, Dašnjica in Češnjica. Izmerjenih podatkov o njihovi strugi nam ni uspelo pridobiti, zato smo strugo, razvidno iz terena (pridobljeno iz LIDAR podatkov) poglobili toliko, da prevaja večino pretoka pri Q_{100} posameznega pritoka. Na obstoječih kartah poplavne nevarnosti (ARSO Atlas okolja, oktober 2023) smo preverili izračunani obseg poplav pritokov pri Q_{100} . Ugotovljeno je bilo, da je ujemanje ustrezno in zadosti natančno za potrebe analiz delovanja zadrževalnika, zato geometrije strug pritokov nismo dodatno urejali.

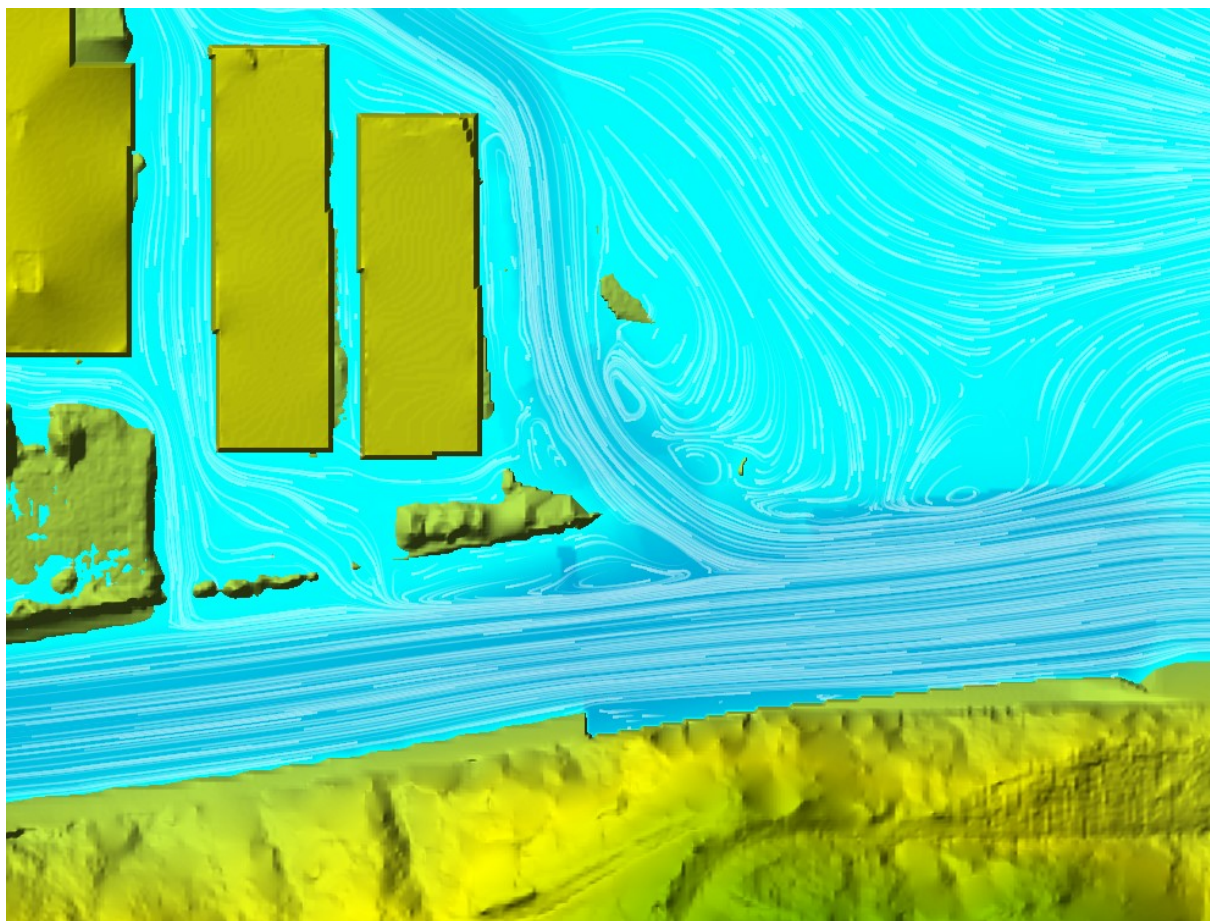
Slika 26 prikazuje detajl računske mreže hidravličnega modela.



Slika 26: Prikaz detajla računske mreže hidravličnega modela

Slika prikazuje 2D računsko mrežo na območju sotočja med Selško Soro in Dašnjico. Računska mreža je zgoščena na območju glavne struge in na območju pritoka ter usmerjena v smeri toka. Vidi se vnesene objekte, podroben LIDAR teren in »breakline« elementi. Opazimo, da je struga Dašnjice poglobljena, iztok pa je umetno usmerjen v smer toka Selške Sore in se konča s »klančino«. Ti dve modifikaciji smo uporabili za večjo stabilnost modela in minimiziranje napake na območju sotočja.

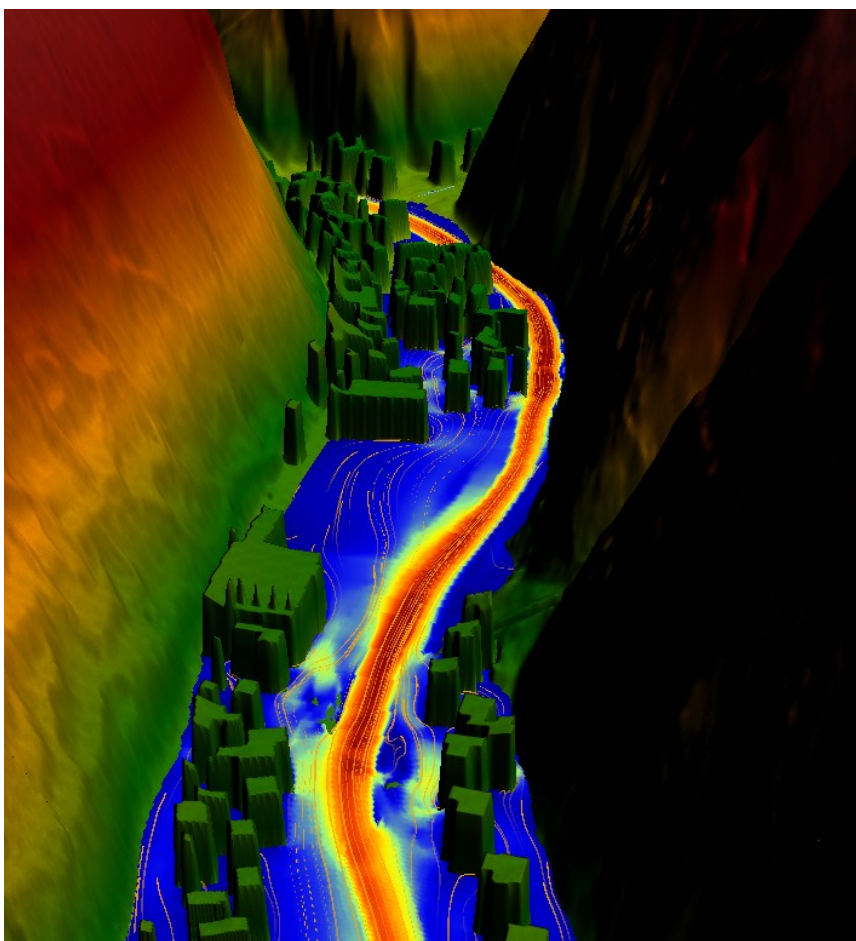
Spodnja slika 27 prikazuje rezultate modela na sotočju med Češnjico in Selško Soro za dogodek 500-letnih poplavnih vod.



Slika 27: Primer rezultatov hidravličnega modela

Iz slike 26 je razvidna večja hitrost in količina pretoka v strugi Selške Sore in v strugi Češnjice. Vidimo tudi vnesene objekte in tokovne razmere poplavne vode, ki teče med njimi. Iz tokovnic je videti tudi vrtinčenje in primere povratnega toka, ki se pojavljajo ob visokih hitrostih poplavnih vod.

Spodnja slika 28 prikazuje primer 3D prikaza, ki ga omogoča orodje HEC-RAS.



Slika 28: 3D prikaz rezultatov modela

Slika 27 prikazuje porazdelitev hitrosti v primeru kasneje izračunane porušitve pregrade. Prikazan je zelo kanjonski odsek dolvodno od sotočja s Prednjo Smolevo. Gre za 3D prikaz, ki za 3 krat popači z-os. Razvidne so porazdelitve hitrosti, ki so višje v strugi, in tokovnice (oranžna barva).

3.1.4.2 Stabilnost hidravličnega modela

Posebna skrb je bila usmerjena v stabilnost modela in minimiziranje numerične napake, ki jo program naredi. Ta korak je moral biti nujno izveden pred samim umerjanjem modela, sicer bi lahko umerjali na »napake« in rezultati ne bi bili pravilni, nekaterih izračunov, ki so z vidika hidravlike zahtevnejši (zelo visoki pretoki, porušitve pregrade) pa ne bi uspeli modelirati in ovrednotiti. Velikost napake je znana, uporabnik programa si lahko ustvari grafični sloj, ki prikazuje celice, ki so imele napako večjo od tolerance (v modelu je to 1cm) in samo velikost napake. Nestabilnosti in napake so bile iskane pri preračunu dogodka Q_{500} . Zaradi hitrega naraščanja pretokov in kompleksne topografije terena je bilo potrebno uporabiti po globini povprečene Navier-Stokesove enačbe v HEC-RASu (»SWE«) namesto poenostavljenega seta enačb (»diffusion wave«).

Razlogi za pojave nestabilnosti in napak so bili naslednji:

- Po obeh hidroloških študijah prihaja pri poplavnih dogodkih do izjemno hitrega in velikega naraščanja pretokov. Srednji letni pretok v strugi Selške Sore znaša zgolj cca. $4 \text{ m}^3/\text{s}$, v primeru Q_{500} pa se pretok v dveh urah poveča do $363 \text{ m}^3/\text{s}$. Model mora biti stabilen tako pri nizkih pretokih kot pri velikih, pri tako hitrem naraščanju gladine pa lahko hitro pride do napak in nestabilnosti. Pri kasnejših računih porušitve pretoki narastejo tudi nad $700 \text{ m}^3/\text{s}$, spremembe pa so še hitrejše. Nestabilnosti se odražajo kot »špice« in nesmiselno valovanje vode, gledano po vzdolžni osi.
- V strugi so na več mestih jezovi in pragovi, ki imajo zelo hipne spremembe geometrije struge, kar se v HEC-RAS izračunu odraža kot večja napaka ali nestabilnost na območju teh objektov.
- Na lokaciji sotočij Selške Sore s pritoki je prihajalo do večjih napak predvsem ob večjih pretokih. Razlog je bil predvsem v pomanjkanju podatkov o dejanski geometriji sotočja, zato so se pritoki pri večjih pretokih iz višje kote praktično prosto prelivali v glavno strugo, kar vnaša napake v izračun.
- Voda se pri večjih pretokih na več mestih razlije izven struge in se kasneje iz višje kote prosto preliva nazaj v strugo, posledično pa na mestu prelivanja nastane večja napaka.
- Ob strugi in ob nekaterih stanovanjskih objektih so manjši protipoplavni nasipi in lomi v terenu, ki so zaradi neugodno razporejenih celic povzročali večje numerične napake. Precej takšnih nasipov in ograj je bilo pretankih, da bi jih celice pravilno zajele po njihovem vrhu, zato se je voda nepravilno razlivala preko takšnih nasipov.
- Pri visokih pretokih se pojavijo velike hitrosti, ki zaradi majhnih celic pri neustreznih večjih računskih časovnih korakih lahko povzročijo, da hitrost potovanja motnje »prehiti« računski čas, kar se odraža kot visok vertikalni stolp vode, ki potuje dolvodno po modelu.

Vse zgoraj omenjene nestabilnosti so bile odpravljene, napake pa omejene do te mere, da njihova vrednost ne presega 0,2 metra. Preverjeno je bilo tudi, da se napake ne širijo temveč so lokalno omejene na eno ali na nekaj celic.

Za odpravljanje napak in stabilizacijo so bili izvedeni naslednji ukrepi:

- Izbran je bil ustrezno majhen časovni korak, ki za kasnejše preračune poplavnih dogodkov, obratovalnih primerov in porušitev pregrad znaša 0,1 sekunde. Le tako je velikost napake omejena na vrednosti pod 0,2 metra, samih celic s takšno napako pa je zelo malo. Takšen časovni korak je ustrezen tudi z vidika stabilnosti modela. Nihanje gladine ali »špic« v podolžnem profilu ni. Model je stabilen tudi pri časovnem koraku 0,2 sekunde, a se pojavlja več celic z napako, vrednost napake pa doseže tudi 0,3 cm. Potrebno je poudariti, da se celice z napako ne pojavljajo v sami strugi, temveč na poplavnih ravninah. Maksimalno število računskih iteracij je bilo iz 20 povečano na maksimalnih 40.

- Vsi pragovi in jezovi v strugi so bili modelirani kot daljša drča. Tako je namesto hipnega padca nivelete struge ta padec postopen na dolžini cca 15 metrov. S takšnim ukrepom se izgubi lokalna natančnost modela na lokaciji praga ali jezua, toda menimo, da manjša napaka v izračunu izboljša sliko dogajanja na širšem območju, kar je tudi namen modela.
- Lokacije, kjer se voda iz poplavnih ravnih zliva nazaj v strugo, so bile tudi modificirane po enakem principu kot v zgornji alineji. Vertikalni padec je zamenjan z blažjim padcem v terenu, kar sicer izkrivi lokalno sliko, a izboljša opis tokovnih razmer na širšem območju. Enako je bilo storjeno za več manjših lokacij v poplavnih ravninah, kjer zaradi izrazito vertikalnega poteka terena sicer prihaja do napak.
- Nekateri nasipi in ograje, ki so bili preveč tanki, da bi jih lahko zajeli s celicami, so bili rahlo odebeljeni, da jih voda pravilno obteka.
- Struga pritokov je bila modificirana pri sotočju. Iztok je bil povezan tako, da je v smeri toka Selške Sore, v sami strugi pritoka pa je bil povečan padec na način, da je dno struge pritoka na sotočju na koti dna struge Selške Sore.

Z zgoraj navedenimi spremembami je bila dosežena stabilnost modela. Uradna priporočila za HEC-RAS (USACE, 2023) navajajo, da je za celovit pregled stabilnosti modela in čim bolj pravilne izračune potrebno preveriti še spremembe v rezultatih in v stabilnosti modela z različnimi vrednostmi faktorja »theta«. Načeloma uporaba tega faktorja zniža stabilnost a poveča točnost rezultatov, toda večinoma se izkaže, da so spremembe v točnosti rezultatov minimalne in niso vredne slabše stabilnosti modela (USACE, 2023).

Osnovna vrednost, na kateri smo preverili stabilnost, znaša 1, najnižja vrednost pa je enaka 0,6. Model je deloval stabilno do vrednosti theta 0,8. Pod to vrednostjo pa je model postal nestabilen in ni rezultati niso konvergirali. Preverjene so bile razlike med rezultati za Q_{500} s faktorjem theta 1 in faktorjem theta 0,8. Razlik v obsegu poplavnih vod ni bilo, razlike velikosti cca 20 cm pa so se pojavljale na odsekih, kjer so bili pragovi in jezovi modelirani z drčami. Pri tako visokih pritokih pride na teh lokacijah do vodnega skoka, kjer je z upoštevanjem faktorja theta deroči tok za 20 cm nižji, takoj za vodnim skokom pa je mirni tok lokalno 20 cm višji. Ker pa smo jezove in prage zamenjali z drčami, smo se lokalno tako ali tako že odmaknili od realnega stanja in ne bi bilo smiselno le zaradi teh odsekov uporabljati nižji faktor theta. Zato smo se odločili, da bodo vsi bodoči izračuni z modelom izvedeni s faktorjem theta = 1,0.

3.1.4.3 Umerjanje hidravličnega modela

Stabilen model smo nato umerili. Na razpolago smo imeli le **projektiran potek gladine Q_{100} v projektiranem stanju** (IZVO-R, 2012). Glede na to, da je geometrija modela narejena iz prečnih profilov projektiranega stanja, je tak pristop pravilen. Na tem mestu je pomembno omeniti, da model **ne upošteva mostov** v strugi Selške Sore. Podatkov o premostitvah namreč nismo imeli. Model tudi dosega boljšo stabilnost, če mostov ni. Tako zopet dobimo boljšo stabilnost na širšem območju in pregled dogajanja, a lokalno lahko izgubimo poplave zaradi zajeze pri mostu pri višjih povratnih dobah, npr. od Q_{200} naprej.

Preverjeno je bilo, kakšen je vpliv upoštevanja mostnih opornikov (velikost je bila ocenjena glede na terenski ogled) v strugi na lokaciji vseh mostov pri pretokih do $180 \text{ m}^3/\text{s}$ (pri tem ni bilo upoštevano morebitno plavje na sami mostni odprtini, ki bi pretočnost dodatno zmanjšalo in povečalo zajezo). Izkazalo se je, da se zajeza za mostnimi oporniki lokalno širi gorvodno cca 50 metrov, torej slika tokovnih razmer na širšem območju ustrezno zajeta v simulacijah. Vsekakor pa bi se v nadaljnjih fazah projekta ali morebitnih nadgradnjah modela moralo upoštevati mostove, kot so ti načrtovani v končnem stanju po ureditvi struge in izgradnji pregrade ter znova preveriti račune za večje pretoke.

S tem, ko mostovi niso upoštevani, pa bo kasneje pri analizi obratovanj v primeru Q_{200} , Q_{300} , Q_{400} in Q_{500} učinek višjih vod bolj neposredno viden in lažje opredeljiv, saj ne bo prišlo do različnih velikosti zajezeb pri različnih mostovih pri različnih pretokih.

Model je bil umerjen z uporabo enakih vrednosti pretoka Selške Sore in pritokov, kot so bili ti uporabljeni v originalnem projektu (IZVO-R, 2012). V projektu iz 2012 je bil uporabljen kombiniran 1-2D model, ki je bil 1D v strugi in 2D na poplavnih ravninah. Manningov koeficient trenja v strugi je znašal 0,045.

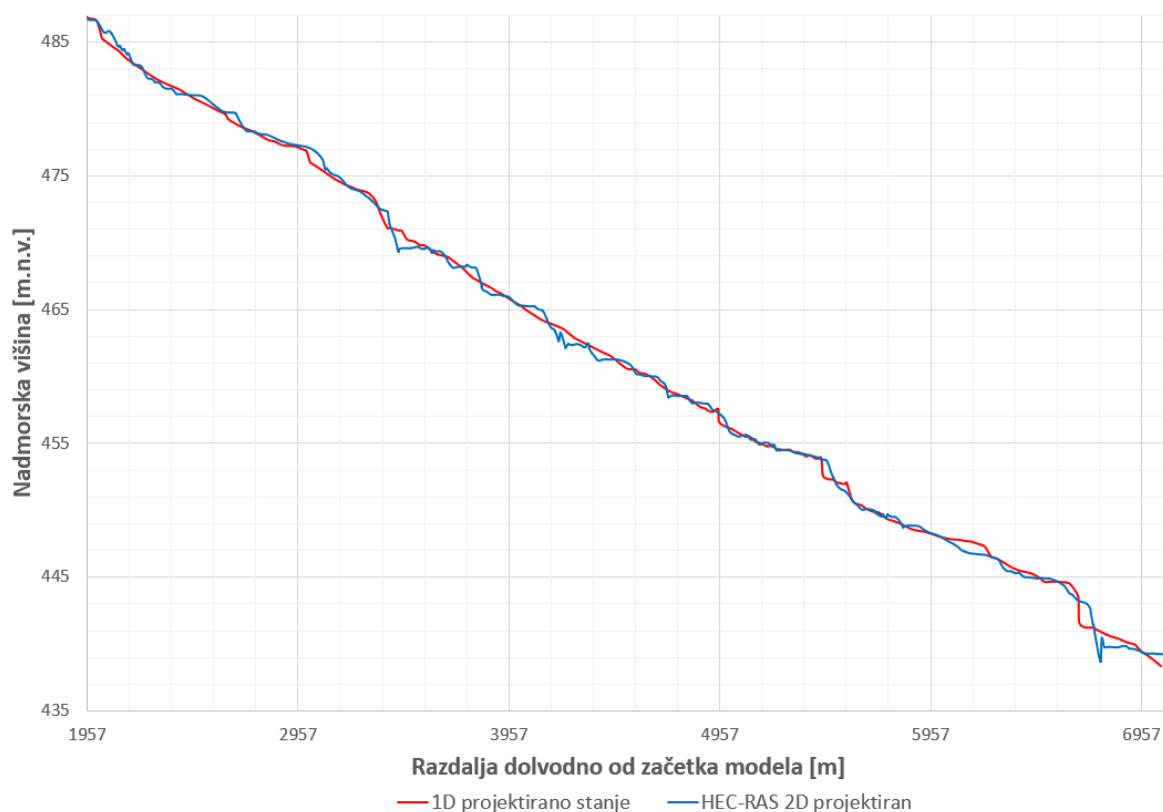
Ti podatki so služili le za umerjanje struge. Izven struge, na poplavnih ravninah, podatki za umerjanje niso bili na voljo. Manningovi koeficienti trenja so bili zato določeni na podlagi rabe tal, pridobljenih iz spletne strani Ministrstva za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano: rkg.gov.si (2023). Za vsak tip rabe tal smo na podlagi uradnih priporočil za HEC-RAS (USACE, 2023) določili Manningov koeficient trenja.

Pri umerjanju našega 2D modela se je hitro izkazalo, da zaradi razlik v pristopu (naš model je polni 2D s povprečno 20 celicami prečno čez strugo in upošteva po globini povprečene Saint-Venantove enačbe, mostov ni) enovit koeficient trenja ni mogoč. Območje struge Selške Sore je bilo zato razdeljeno na 26 podobmočij, glede na bližino mostov, širino struge, zavijanje struge in material v

dnu struge. Vsakemu podobmočju je bil med večimi iteracijami umerjanja pripisan takšen Manningov koeficient trenja, da je bilo ujemanje rezultatov na širšem območju čim boljše. Vrednosti so v razponu med 0,02 in 0,06. Nižje ali višje vrednosti bi bile že nerealne, zato smo se na mestih, kjer je kljub zelo mejnim vrednostim Manningovega koeficienta trenja še vedno prihajalo do večjih sprememb, morali sprijazniti z odstopanji.

Do odstopanj prihaja predvsem na lokacijah pragov in jezov, kjer so ta pravzaprav pričakovana. Na splošno smo z 2D modelom ujeli projektirano gladino 1D modela do 20 cm natančno, z izjemo lokacij pragov in jezov. Izjema je le cca 200 metrski odsek v bližini iztoka Češnjice, kjer je gladina 1D modela za cca 60 cm višja.

Spodnja slika 29 prikazuje rezultate umerjanja oziroma primerjavo rezultatov Q_{100} obeh modelov.



Slika 29: Rezultati umerjanja/podolžni profil pri Q_{100}

Iz slike je razvidno, da je podolžni potek gladine v našem 2D modelu bolj »nazobčan« in manj gladek. To je posledica majhnih celic, ki imajo vsaka svojo gladino v 2D modelu in posledica interpolirane gladine med dvema profiloma v 1D modelu, kar dodatno gladi gladino in prispeva h kontrastu med rezultati. Sama os Selške Sore verjetno tudi ni identično izbrana, kar lahko prinese nekaj odstopanj. Smatramo pa, da je bil model ustrezno umerjen in pravilno izkazuje gladinska stanja pri obravnavanih scenarijih.

Ponovno omenimo, da mostovi niso upoštevani. Pri visokovodnih dogodkih, sploh v izrazito hudourniških Železnikih, se je zgodovinsko pojavljalo ogromno plavja in blata v toku. To tudi ni modelirano. Spodnja slika 30 prikazuje večje količina plavja, ki so ostale v strugi blizu cerkve v Železnikih po poplavih leta 2007, slika 31 pa plavje, ki je delno mašilo mostno odprtino.



Slika 30: Plavje v strugi po poplavih leta 2007 (Klabus, 2007)



Slika 31: Plavje na mostni konstrukciji v Železnikih po poplavah leta 2007. <https://siol.net/novice/slovenija/moc-vode-kaj-so-povzrocile-najhujse-poplave-v-zadnjih-25-letih-foto-video-417594>

Hidravlični model takšnega plavja in ostalih tokov, ki se lahko pojavijo ob hudourniških dogodkih, ne predvideva in ne more računati. Prav tako obravnava možnih scenarijev z zmanjšano pretočno sposobnostjo mostnih odprtin ni bila predmet analiz in presejala predviden obseg analiz naloge. Eanko velja tudi analizo plazov, ki se lahko zgodijo, večjih nanosov proda, ostalih erozijskih dogodkov, itd.

Vsi zgoraj opisani dogodki so izjemni primeri obratovanja/visokovodnih razmer, ki zahtevajo svoje posebne analize in niso upoštevani pri rezultatih te naloge. Pri natančnosti modela in rezultatov se je potrebno zavedati, da nas taki izjemni dogodki lahko presenetijo in bistveno spremenijo hidravlične razmere, njihovo modeliranje pa je zaradi nepredvidljive narave takih dogodkov izven obsega te naloge.

4 DELOVANJE ZADRŽEVALNIKA PRI VIŠJIH POVRATNIH DOBAH

Zadrževalnik je dimenzioniran za zadrževanje 100-letne poplavne vode, pri čimer naj bi bila akumulacija popolnoma zapolnjena. Podroben opis zadrževalnika in pripadajoče hidromehanske opreme je prikazan v poglavju 3.1.3, kjer je podan tudi graf, ki prikazuje dinamiko polnitve in praznitve akumulacije, koto akumulacije ter dotok in iztok iz akumulacije ob 100-letni vodi. Ugotovljeno je bilo, da tudi z upoštevanjem novejša hidrologije z 11 % višjo konično vrednostjo pretoka, delovanje zadrževalnika ni spremenjeno.

Osrednji cilj magistrske naloge je podati navodila za obratovanje pri dogodkih z višjo povratno dobo, ki jih zadrževalnik ne more zadržati v celoti, kar pomeni, da bo zadrževalnik moral obratovati tako, da je zagotovljena varnost pregrade pred nekontroliranim prelivanjem vode kot tudi minimiziranje škodljivega delovanja vode dolvodno proti Železnikom.

Za dosego predloga obratovalnih navodil v skladu z zgornjima dvema kriterijema smo se oprli na vhodne podatke, podane v poglavju 3.1. Na tem mestu zberimo še enkrat vse poenostavitve in pomembnejše odločitve pri vhodnih podatkih, ki bi v morebitnih nadaljnjih fazah morale biti upoštevane pri dopolnjevanju obratovalnih navodil:

- Upošteva se hidrologija, izdelana v letu 2021, ki ima bistveno večje vrednosti pretokov nad Q_{100} in hitrejša naraščanja visokovodnih valov. Hidrologija je podala le Q_{100} in Q_{500} , zato smo ocenili vrednosti Q_{200} , Q_{300} in Q_{400} .
- Uporabili smo le eno obliko in čas trajanja za vhodne poplavne valove Q_{200} , Q_{300} , Q_{400} in Q_{500} .
- Uporabljeni hidravlični model opisuje le načrtovano stanje.
- Uporabljeni hidravlični model ne upošteva mostov. Sami vplivi neprevodnosti struge zaradi mostov ali zamašitve mostnih odprtih torej niso upoštevane. Prav tako ni upoštevano morebitno plavje, sedimenti, plazovi itd., kar se pri tako ekstremnih dogodkih pogosto zgodi in vpliva na hidravlične razmere.

Za izdelavo obratovalnih navodil so bili upoštevani sledeči koraki, ki so podrobnejše opisani v naslednjih pod-poglavjih:

- Izdelan je bil enostaven model v programskem orodju MS Excel, ki podaja odvisnost gladine v zadrževalniku od časa in od obratovalnega primera.
- Na podlagi znanih hidrogramov poplavnih vod, dovoljenih volumnov zadržane vode/dosežene kote vode v akumulaciji, kapacitet hidromehanske opreme in projektiranega iztoka iz pregrade so podane kote vode v akumulaciji ob visokovodnih dogodkih Q_{200} , Q_{300} , Q_{400} in Q_{500} ob posameznih vrednostih iztoka skozi pregrado in posameznih časovnih korakih.

- Ob predpostavki, da ob določenih časih identificiramo, da bo poplavni dogodek presegel Q_{100} , sta podana dva različna načina ukrepanja. Prvi je povečanje osnovnega iztoka skozi pregrado (osnovni pretok je $120 \text{ m}^3/\text{s}$, dodatno pa smo preverili tudi razmere, če bi bil ta večji in sicer $140 \text{ m}^3/\text{s}$), da bo maksimalna dosežena kota tekom poplavnega vala enaka 510 m.n.v (dodatno smo preverili tudi, če bi dopustili zvišanje do 511 m.n.v.).

Pri prvem načinu sta podana dva skrajna časa identifikacije dogodka in sicer po prvih 45 minutah naraščanja vtoka ter ob konici vtoka. Smatramo, da smo zajeli celoten možen spekter časov ukrepanja oz. identifikacije, torej ujamemo možni »ovojnici« iztočnih diagramov in dolvodnega obsega poplav.

Pri drugem načinu pa čas identifikacije dogodka ni bistven, saj ohranjamo osnovni iztok $120 \text{ m}^3/\text{s}$ (in dodatno še $140 \text{ m}^3/\text{s}$), ko pa je dosežena kota 510 m.n.v. (in dodatno preverjeno še 511 m.n.v.) pa prelivamo doteklo vodo tako, da se kota ohranja na izbrani maksimalnikoti. Gre za bolj verjetno obratovanje, saj pri prvem pristopu »tvegamo«, da bomo s preventivnim večanjem pretoka sicer poplavili Železnike, a manj, kot bi jih ob nenadnem spuščanju skozi pregrado, če bi se to zgodilo. Visokovodni val bi se lahko dokaj hitro umiril, zato je treba predlagati natančen in zanesljiv sistem meritev padavin na porečju in sodelovanje z ARSO, da se lahko odločimo za pravi scenarij.

- Za vse predpisane iztoke skozi/čez pregrado je bilo preverjeno, da hidromehanska oprema to omogoča.
- Iztočni hidrogrami in hidrogami poplavnih vod so bili kot gorvodni robni pogoj vneseni v model v HEC-RAS, iz katerega smo ovrednotili povzročeno škodo in izbrali najboljše primere obratovanja.

4.1 Model za opis obratovanja zadrževalnika

Izdelan je bil enostaven model v programskem orodju MS Excel, ki podaja medsebojno odvisnost sledečih parametrov: vtok poplavnih vod, volumen zadržane poplavne vode, iztok iz pregrade preko preliva in preko talnega izpusta, volumen odtekle vode in kota vode v akumulaciji, podano na časovni korak 10 minut. Kjer prihaja do spremembe med posameznima časovnima korakoma, npr. sprememba na 5 minut, so bile vrednosti linearno interpolirane za manjši časovni korak.

Namen modela je definirati in optimizirati delovanje zadrževalnika pri visokovodnih valovih nad 100-letno povratno dobo. Za takšne primere je predvideno, da se poveča iztok iz akumulacije nad projektirani iztok tako, da se zadrži čim več poplavnih vod in hkrati ohranja varnost zadrževalnika pred nekontroliranim prelivanjem vode. Analiza je izvedena s modelom v programskem okolju MS Excel in izdelanega polnega 2D hidravličnega modela.

Glavni produkt modela MS Excel so izhodni hidrogrami pretoka iz zadrževalnika in spremljanje kote akumulacije pri posameznih obratovalnih primerih. V spodnjih alinejah so podani viri posameznih podatkov, uporabljenih v modelu:

- Vhodni hidrogrami Q_{100} do Q_{500} so upoštevani po hidrologiji iz leta 2021.
- Kota akumulacije pri količini zadržane vode je določena na podlagi enačbe, pridobljene iz zveze h-V v poglavju 3.1.2.1. Enačba je bila pridobljena iz funkcije »trendna črta« v excelu in verificirana na dejanskih podatkih. Odstopanja niso večja kot 5 centimetrov
- Osnovna obratovalna parametra pregrade (dopustne kote gladine v akumulaciji in osnovne iztok iz akumulacije) sta podana v poglavju 3.1.3.

4.1.1 Delovanje modela

Delovanje modela je naslednje:

- Na podlagi hidrograma vtoka poplavnega vala je izračunan dotekel volumen v časovnem koraku.
- Za časovni korak je predpisan iztok skozi talni izpust in iztok čez preliv.
- Na podlagi iztoka iz akumulacije je izračunan iztekel volumen v časovnem koraku.
- ob upoštevanju doteklega in iztekelega volumna v akumulacijo je izračunana kota vode v akumulaciji. Ta je zelene barve v primeru kote pod 510, rumene med koto 510-511 in rdeče nad koto 511, da opozori uporabnika na prekoračitev obratovalnih omejitev.
- Za naslednji časovni korak se vse ponovi. Gladina kote v akumulaciji iz prejšnjega časovnega koraka narekuje vrednost talnega izpusta in iztoka čez preliv; ko je kota nad 506 m.n.v., se talni izpust zapre in začne se prelivanje vode čez zaklopko.
- Osnovno delovanje je takšno, da do vrednosti vtoka, ki ga v sklopu naloge imenujemo **obratovalni pretok** in v osnovi znaša $120 \text{ m}^3/\text{s}$, zadrževalnik ne zadržuje vode. Ko ta preseže $120 \text{ m}^3/\text{s}$, zadrževalnik spušča ven le obratovalni pretok, viške pa zadrži in polni akumulacijo. Če se vrednost gladine v akumulaciji približa omejitvam, je potrebno ročno povečati iztok in preveriti, če je to skladno s pretočnimi krivuljami hidromehanske opreme. **Obratovalna kota** pa znaša **510 m.n.v.**, to je kota, na katero smo pri dogodkih do Q_{10000} omejeni. Dodatno smo za primere preverili vpliv obratovalnega pretoka $140 \text{ m}^3/\text{s}$ in vpliv obratovalne kote 511 m.n.v. pri visokovodnih dogodkih. Dokler je kota akumulacije nad 500 m.n.v. (poskusno določeno za potrebe delovanja modela), bo akumulacija izpuščala ven obratovalni pretok tudi, če bo vrednost dotoka bistveno manjša. Ko pa kota akumulacije upade pod 500 m.n.v., akumulacija izpušča toliko, kot priteče vanjo. Takrat so visokovodni dogodki že končani.

Model ima časovni korak 10 minut. Dejanske spremembe iztoka iz pregrade oziroma obratovanja pregrade so podane v naslednjem časovnem koraku,– torej, če se po 6 časovnih korakih odločimo

povečati iztok iz pregrade, se ta iztok poveča v 7. časovnem koraku. Takšno obnašanje pričakujemo tudi v realnem primeru obratovanja, ko bo med visokovodnim dogodkom operater pregrade sprejemal odločitve za obratovanje. Te odločitve bodo verjetno sprejete na podlagi meritev padavin, pritokov in kote akumulacije ter na podlagi meteoroloških podatkov (npr. radarske slike padavin), sprejetje odločitve pa bo gotovo terjalo nekaj časa za premislek in samo odločitev. Hkrati bo nekaj časa trajala tudi sama manipulacija hidromehanskih objektov. Z takšnim »časom zakasnitve« reakcije pa smo tudi na varni strani pri samem obratovanju.

4.1.2 Uporabljene poenostavitve in predlogi izboljšave

V model so bile vpeljane naslednje poenostavitve za hitrejšo preračune obratovanja:

- Podan je le **skupni** iztok iz zadrževalnika, in ne dejanski iztok skozi talni izpust in preko preliva. Natančno podajanje obeh iztokov bi namreč terjalo zahtevnejši model s finejšo časovno resolucijo, ki bi imel vgrajene pretočne krivulje talnega izpusta pri različnih zaprtjih in pretočne krivulje zaklopke na visokovodnem prelivu pri različnih kotah noža. Takšen pristop bi zahteval zahtevno modeliranje, ki presega predviden obseg magistrske naloge. Za vsako predpisano vrednost iztoka nad koto 506 m.n.v. je bilo ročno preverjeno, ali je preliv to zmožen prevajati. Za vse kasneje obravnavane primere se je izkazalo, da je prelivna sposobnost dovolj velika. Preveritev je bila izvedena tudi za talni izpust, kjer se je tudi izkazalo, da je le-ta sposoben prevajati ciljne pretoke. Za oba elementa pregrade s hidromehansko opremo se je izkazalo, da imata dovolj veliko pretočno sposobnost, da lahko posamezen element sam prevajala pretoke do Q_{500} .
- Kot že omenjeno, so bili upoštevani le hidrogrami za 2 urno trajanje naraščanja visokovodnega vala, kot so podani v upoštevanih hidroloških izhodiščih.
- Za obratovalne primere, ko kota vode doseže 510 oziroma dodatno preverjenih 511 m.n.v., je potrebno ročno vstaviti pogoj, ki ohranja to gladino v akumulaciji, dokler ta ne začne upadati.

Kljub poenostavitvam menimo, da so rezultati pridobljeni iz modela dovolj točni in natančni za podajanje izhodišč pri obratovanju pri visokovodnih dogodkih, saj so tudi obratovalni primeri razmeroma enostavni; v naslednjih poglavjih bomo preverili dva načina odzivanja na visokovodne dogodke. Prvi predvideva zgodnjo identifikacijo visokovodnega vala in primerno zvišanje obratovalnega pretoka. Drugi pa predvideva, da ob dosegu obratovalne kote to koto ohranjamo, viške vode pa prelivamo z namenom ohranjanja dotične kote. Oba primera sta razmeroma enostavno opisljiva.

Model je za nadaljnje faze priprave obratovalnih navodil možno izboljšati v naslednjih smereh:

- V model bi bilo potrebno vključiti dejanske podatke, ki se bodo merili na terenu v času visokovodnega dogodka, kot so kota akumulacije v realnem času, meritve padavin na porečju in predviden pritok, meritve vrednosti pretokov Davče in Selške Sore, podatki iz radarske slike padavin in meritve iztoka iz akumulacije. Meritve iztoka iz akumulacije bi morali meriti na mestu prelivanja (na zaklopki in skozi izpust) kot tudi dolvodno od samih objektov, kot preveritev in indikator dogajanja dolvodno.
- V model bi bilo potrebno vključiti meritve dogajanja na dolvodnih pritokih. Če so vrednosti pritokov nizke in ne kaže na njihovo naraščanje, lahko prelivamo več vode in ohranjamo poplavno varnost Železnikov. Če so zelo vodnati, pa moramo zadržati več, če je to mogoče. Prav tako je smiselno upoštevati pregled dogajanja na širšem območju porečja.
- V model je potrebno vključiti delovanje talnega izpusta in zapornic kot tudi preliva in zaklopke, s pripadajočimi pretočnimi krivuljami in morebitnimi dodatnimi obratovalnimi pogoji. Tako bo možno dodatno preveriti obremenitve elementov v posameznih obratovalnih primerih in dodatno upoštevati morebitne vplive manipulacij s hidromehansko opremo na iztočni diagram dolvodno od pregrade.
- Sprememba iztočnega diagrama zaradi načina odvajanja vodne mase skozi talni izpust, prelivanja ali kombinacije obojega še ni upoštevana. Potrebno bi bilo preveriti, če vpliv obstaja in ga smiselno upoštevati pri kasnejših izračunih v hidravličnem modelu.

4.2 Identifikacija višjih povratnih dob med obratovanjem

Identifikacija padavinskega in sledečega visokovodnega dogodka, ki bi prekoračil predvideno kapaciteto zadrževalnika med samim padavinskim dogodkom, je zelo zahtevna in z vidika varnosti, tako za pregrado kot za protipoplavno varnost Železnikov, izredno pomembna.

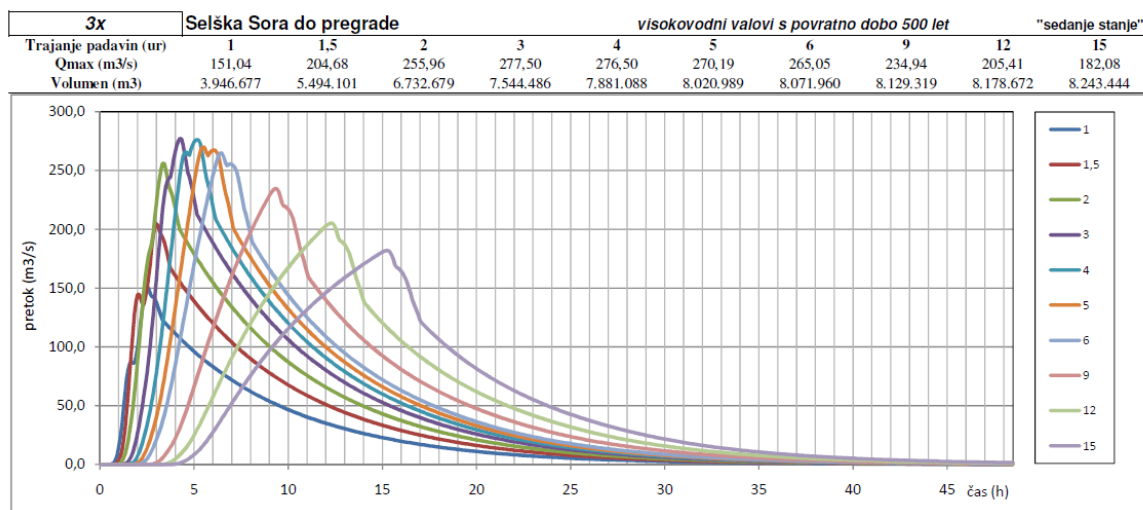
Poglavitni problem predstavlja oblika hidrogramov visokovodnih valov, ki so v vseh razpoložljivih hidroloških študijah in zabeleženih zgodovinskih padavinskih dogodkih izredno strmi in konico dosežejo 2 - 3 ure po začetku naraščanja pretoka. Zaradi strmega gradienta naraščanja pretoka je pomembno, da izredno stanje čim prej odkrijemo, v nasprotnem primeru bi bilo potrebno preko pregrade spuščati velike pretoke, da preprečimo nekontrolirano prelivanje pregrade in zagotavljamo njeno varnost.

Pri identifikaciji v realnem scenariju moramo upoštevati sledeče parametre:

- Obliko dejanskega visokovodnega vala. Pri tem se lahko opremo na izdelane hidrološke študije in pretekle zabeležene visokovodne dogodke. Ni nujno, da bodo npr. 500-letne vode imele izrazito strm hidrogram naraščanja. Lahko se pojavi tudi bolj položen hidrogram, ki počasneje

doseže konico. Takšen primer je iz vidika obratovanja bolj ugoden, saj omogoča več časa za identifikacijo in pripravo obratovanja.

- Trajanje visokovodnega dogodka (glede na čas nastopa konice visokovodnega vala in na trajanje padavin). Med obratovanjem zadrževalnika moramo upoštevati različna trajanja dogodkov. Dogodek, ki traja eno uro, ima seveda bistveno bolj strm gradient naraščajoče veje hidrograma pretoka kot 6-urni dogodek, a bistveno manjši volumen. V prvi uri pričakovano pretok veliko bolj naraste. Zato bi lahko dogodek npr. 100-letne povratne dobe trajal 1 ali 2 uri in imel izredno strmo naraščanje pretoka, upravljalci pa bi takšen dogodek napačno identificirali kot začetek daljšega 500-letnega dogodka in bi povečali iztok iz pregrade, v omejenem obsegu poplavalili Železnike in ugotovili, da se je dogodek že končal in povečanje iztoka ni bilo potrebno. Lahko pa se zgodi nasprotno, tj., da se pričakovani krajši 100-letni dogodek izkaže za začetek daljšega npr. 500-letnega dogodka, z obratovanjem ukrepamo prepozno in moramo hitro izpuščati velike količine vode za zagotavljanje varnosti same pregrade.
- Na spodnji sliki 32 so za ilustracijo podani hidrogrami z različnim trajanjem padavin, kot so določeni v hidrološki študiji iz leta 2010 (IZVO-R, 2010). Z daljšanjem trajanja padavin gradient naraščanja pretoka dokaj hitro upada, pri krajših padavinskih dogodkih pa je gradient ekstremno visok, skoraj vertikalni.



Slika 32: Hidrogrami 500-letnih vod glede na čas trajanja padavin (IZVO-R, 2010)

- Zaradi hipotetičnih dogodkov, opisanih v zgornji alineji, je pri identifikaciji potrebno sodelovanje z meteorološko in hidrološko službo. V sodelovanju z njima se je med padavinskim dogodkom potrebno opredeliti do časa trajanja dogodka, predvsem na podlagi radarske slike padavin in širše meteorološke napovedi.
- Merilni sistemi na prispevnem območju in v sami akumulaciji bodo ključni vhodni podatki, kjer so pomembni predvsem meritve količine padavin, pretokov Davče in Selške Sore, in kote vode

v akumulaciji. Meritve kote vode v akumulaciji so za varnost pregrade bistvene in je posledično najbolj pomemben indikator dejanskega vtoka visokovodnega vala. Zato je pomembno, da so meritve gladine vode v akumulaciji kar se da natančne in zanesljive, za kar bo potrebno merilna mesta postaviti tako, da ne bodo pod vplivom valovanja ali ostalih hidrodinamičnih pojavov, zaščitena pred plavjem in ostalimi motnjami.

Skladno s opisanim v zgornjih alinejah bi bilo za optimalnejše obratovanje pregrade in določanje parametrov visokovodnega vala potrebno narediti temeljite raziskave vpliva različnih primerov količin in porazdelitev padavin na vtočni visokovodni val. Iz merjene časovne in prostorske porazdelitve padavin na porečju in podatkov radarske slike padavin bi določili najbolj primerno obliko viskovodnega vala (funkcija časa trajanja padavin in časa do nastopa konice visokovodnega vala). Obliko hidrograma bi nato ekstrapolirali na konične vrednosti različnih povratnih dob ter takšne hidrograme v realnem času uporabili v modelu za določitev povratne dobe dogodka in kapacitete zadrževalnika. Kvalitetne merite padavin in hidrološke analize bi zagotavljal celovit in varen pristop.

V sklopu magistrske naloge smo se **omejili na obliko in čas trajanja visokovodnih valov, kot so bili izbrani v poglavju 3.1.1.** Za to smo se odločili zaradi omejitve obsega kot tudi zaradi pomanjkanja dejanskih podatkov o merilnem sistemu v akumulaciji, ki v času pisanja naloge še ni natančno določen in izveden. Zato razpolagamo le s podatki o obliki visokovodnega vala, koti vode v akumulaciji in iztokom iz akumulacije. Dodatno identifikacija trajanja visokovodnega dogodka ni glavni predmet te naloge, a predstavlja enega ključnih podatkov za obratovanje zadrževalnika pri visokovodnih dogodkih.

Izbrana oblika valov je vseeno dokaj kritična, saj, kot omenjeno, krajša trajanja padavin in visokovodnih dogodkov pomenijo manjši volumen vode v akumulaciji (zelo ugodno), daljši dogodki pa pomenijo nižje gradiente naraščanja in zato večjo predvidljivost dotekajočega visokovodnega vala. Pri daljšem trajanju ekstremnega dogodka je možno tudi vključiti večji nabor meritev in strokovnjakov za določitev optimalnega delovanja.

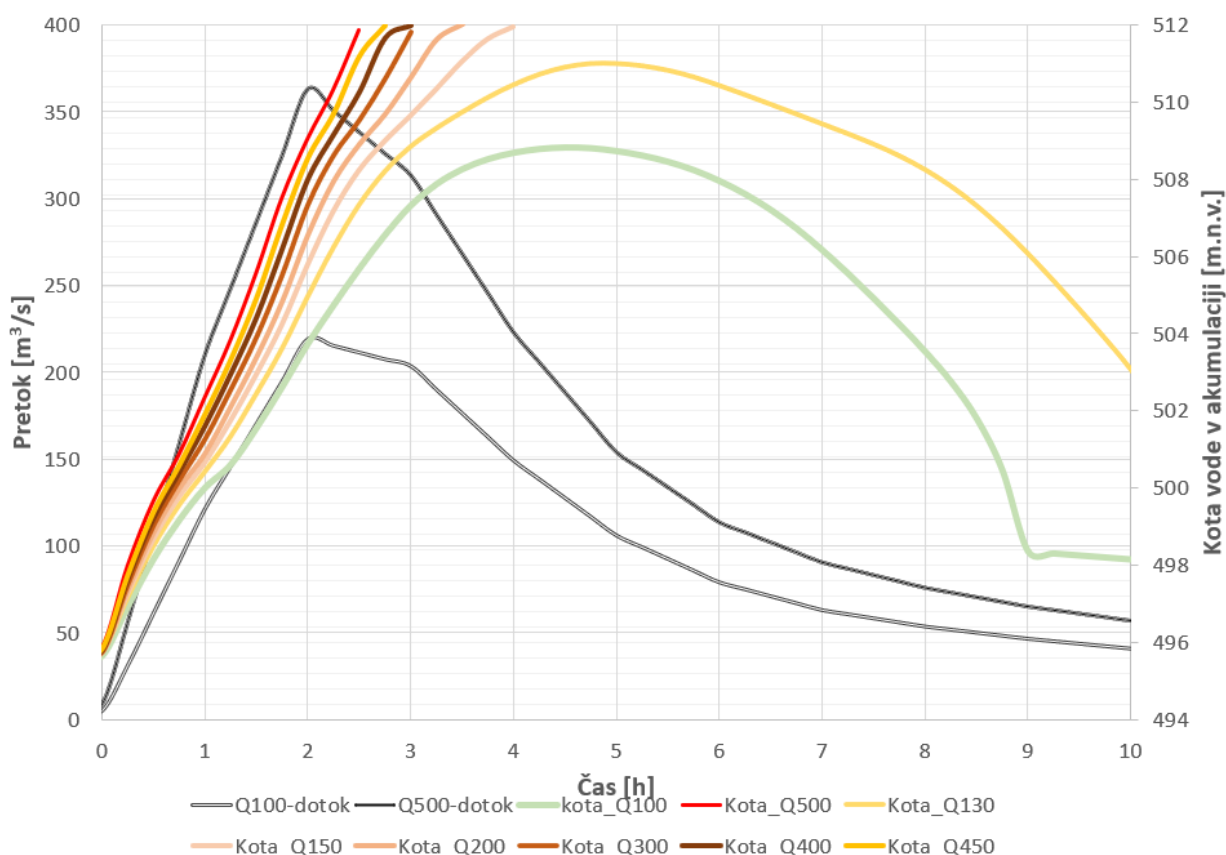
4.2.1 Dinamika gladine vode v akumulaciji pri različnih visokovodnih dogodkih

Glavni parameter, na podlagi katerega ocenjujemo povratno dobo visokovodnega dogodka (ali morebitno preseganje kapacitete zadrževalnika), predstavlja kota vode v akumulaciji. Ta je odvisna od vtoka v akumulacijo in iztoka iz nje. Iztok je odvisen od obratovanja pregrade. Pri iztoku iz pregrade za potrebe identifikacije visokovodnega dogodka smo uvedli dodatno poenostavitev – za vse primere imamo konstanten, obratovalen pretok, skladno s poglavjem 4.1. Ker pa lahko med visokovodnim dogodkom pričakujemo variabilen iztok in različne vrednosti le-tega, smo dodali več različnih

konstantnih vrednosti obratovalnega pretoka, od 120 do 180 m³/s, ki bi deloma lahko tudi zajele to dinamiko.

Uporabili smo naslednje povratne dobe: Q₁₀₀, Q₁₃₀, Q₁₅₀, Q₂₀₀, Q₃₀₀, Q₄₀₀, Q₄₅₀ in Q₅₀₀. Dogodka Q₁₃₀ in Q₁₅₀ sta dodana predvsem kot primera dogajanja pri rahlo preseženi kapaciteti zadrževalnika in služita kot kontrast dogodkom od Q₃₀₀ naprej, ki so za zadrževalnik zaradi večjega volumna zelo neugodni. Vrednosti obratovalnih pretokov smo uporabili kot 120, 130, 140, 160 in 180 m³/s. Pretoki do 140 m³/s so vrednosti, ki jih lahko še pričakujemo pri normalnem obratovanju, če so vrednosti pretokov v pritokih dolvodno do pregrade dovolj majhni (opozorimo: v obratovalnih navodilih in zasnovi pregrade je obratovalni iztok predviden kot 120 m³/s, do vrednosti 140 m³/s smo se opredelili le v magistrski nalogi, za potrebe analize delovanja pri visokovodnih dogodkih). Pretoka 160 in 180 m³/s sta podana kot primera večjih pretokov, ki omogočita varno obratovanje pri višjih povratnih dobah.

Spodnja slika 33 prikazuje kote gladin vode v akumulaciji za povratne dobe Q₁₀₀ (zelena barva), Q₁₃₀ (rumena barva), Q₁₅₀ (kožnata barva), Q₂₀₀ (oranžna barva), Q₃₀₀ (svetlo rjava), Q₄₀₀ (temno rjava), Q₄₅₀ (oker barva) in Q₅₀₀ (rdeča barva) ob obratovalnem iztoku 120 m³/s. Višje povratne dobe zmeraj prej presežejo gladino 510 m.n.v. V ozadju sta prikazana še hidrograma Q₁₀₀ in Q₅₀₀.



Slika 33: Dinamika kote gladine v akumulaciji za različne povratne dobe pri obratovalnem pretoku 120 m³/s

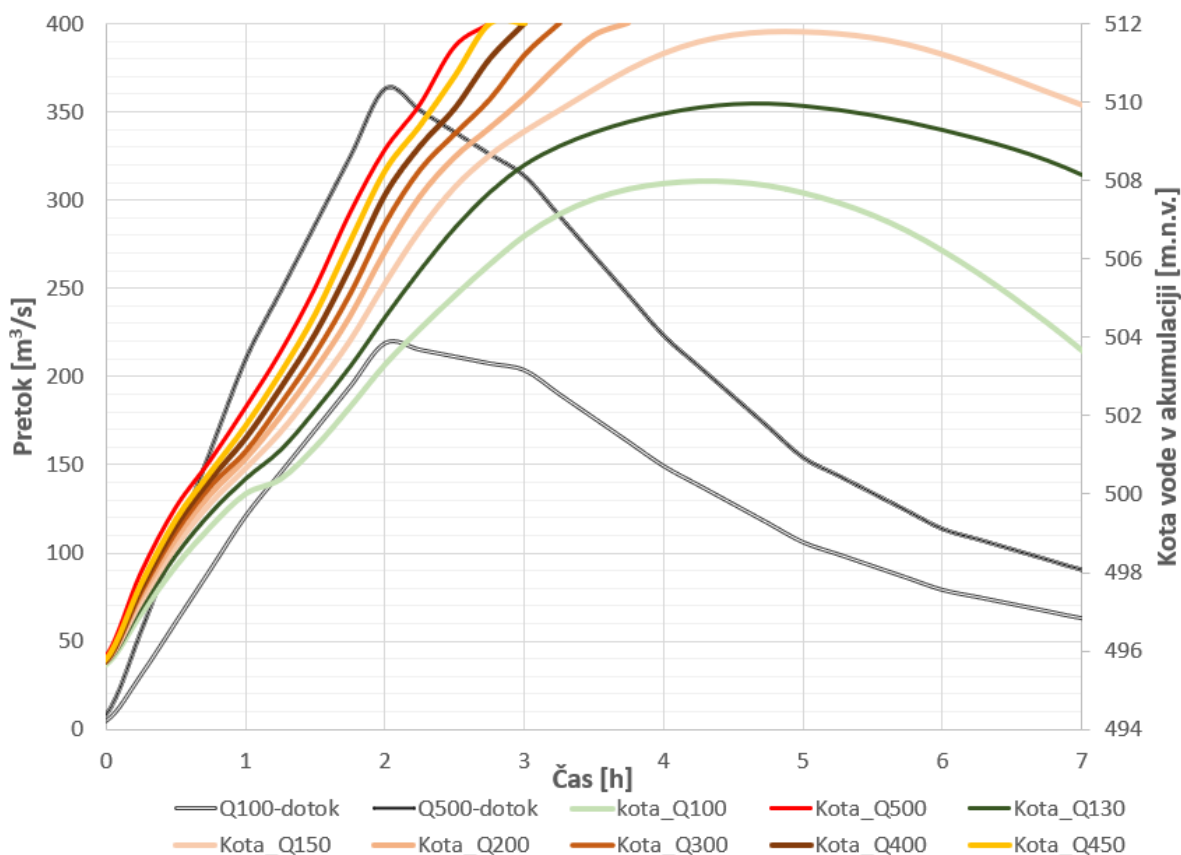
Iz slike je razvidno, da pri obratovalnem pretoku $120 \text{ m}^3/\text{s}$ pregrada le pri Q_{100} lahko obratuje po načrtu. Poudarimo, da gre tu le za prikaz gladinskih stanj, če **ne bi** ukrepali in povečali iztoka pri dogodkih nad Q_{100} .

Že pri povratni dobi Q_{130} (konična vrednost cca $250 \text{ m}^3/\text{s}$) je kota akumulacije 510 m.n.v. presežena (maksimalna dosežena vrednost je točno 511 m.n.v.). Polnjenje akumulacije pri višjih povratnih dobah je izredno hitro, npr. pri Q_{500} je kljub iztoku $120 \text{ m}^3/\text{s}$ akumulacija na koti 510 m.n.v. po zgolj dveh urah in 15 minutah po začetku naraščanja pretoka.

Dinamika Q_{500} je še bolj neugodna. Če je kota 510 m.n.v. dosežena po 2 urah in 15 minutah, je kota 512 m.n.v. dosežena po cca. 2 urah in 35 minutah, torej v le 20 minutah gladina naraste od 510 do 512 m.n.v., pri tem pa se pojavi prelivanje pregrade (če ne ukrepamo in spustimo zapornice). Razlika v delovanju med Q_{100} in Q_{500} je torej zelo velika, zaradi hitrega naraščanja pretoka in velikih razlik v volumnu visokovodnih valov. Pri vseh povratnih dobah nad Q_{200} je zamik med konico visokovodnega vala in med preseženo koto 510 m.n.v. manjši od ene ure, za primere nad Q_{300} celo manjši od pol ure.

V nadaljevanju so za primerjavo prikazani grafi še za primere obratovalnih pretokov 130, 140, 160 in $180 \text{ m}^3/\text{s}$. Ponovno poudarimo, da je po zasnovi projekta mišljen iztok $120\text{-}140 \text{ m}^3/\text{s}$; višji pretoki so le za analizo delovanja pri visokovodnih dogodkih in za prikaz hitrega poljenja akumulacije pri dogodkih nad Q_{300} .

Spodnja slika 34 prikazuje kote gladin vode v akumulaciji za povratne dobe Q_{100} (zelena barva), Q_{130} (rumena barva), Q_{150} (kožnata barva), Q_{200} (oranžna barva), Q_{300} (svetlo rjava), Q_{400} (temno rjava), Q_{450} (oker barva) in Q_{500} (rdeča barva) ob obratovalnem iztoku $130 \text{ m}^3/\text{s}$. Višje povratne dobe zmeraj prej presežejo gladino 510 m.n.v. V ozadju sta prikazana še hidrograma Q_{100} in Q_{500} .

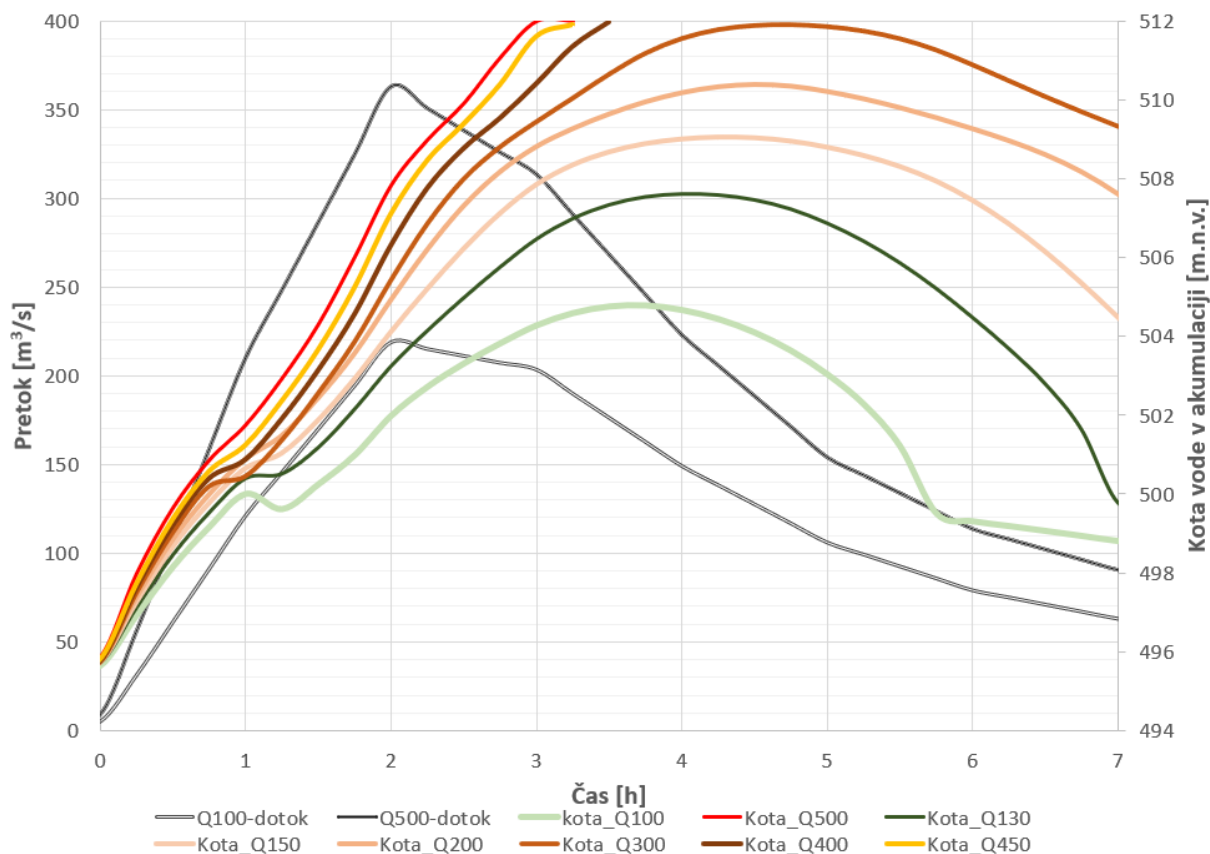


Slika 34: Dinamika kote gladine v akumulaciji za različne povratne dobe pri obratovalnem pretoku $130 \text{ m}^3/\text{s}$

Iztok $130 \text{ m}^3/\text{s}$ je le cca. 10% večji in pomeni nemoteno prevajanje dogodka Q_{130} (konica cca $250 \text{ m}^3/\text{s}$). Za ostale dogodke povečanje iztoka iz pregrade za $10 \text{ m}^3/\text{s}$ pričakovano nima velikega vpliva. Q_{150} doseže koto 510 m.n.v. cca. 20 minut kasneje, pri Q_{500} pa je časovni zamik v primerjavi s prejšnjim primerom le cca 10 minut.

Ugotovljeno je bilo, da pri iztoku $140 \text{ m}^3/\text{s}$ dobimo skoraj enake rezultate kot pri iztoku $130 \text{ m}^3/\text{s}$, zato grafično ni prikazan. Ker projekt podaja vrednost obratovalnega pretoka 120 do $140 \text{ m}^3/\text{s}$, lahko, v primeru da ne ukrepamo, zaključimo, da je razlika med iztokom $120 \text{ m}^3/\text{s}$ in med $140 \text{ m}^3/\text{s}$ z vidika pripravljenosti na visokovodne dogodke nad Q_{100} majhna.

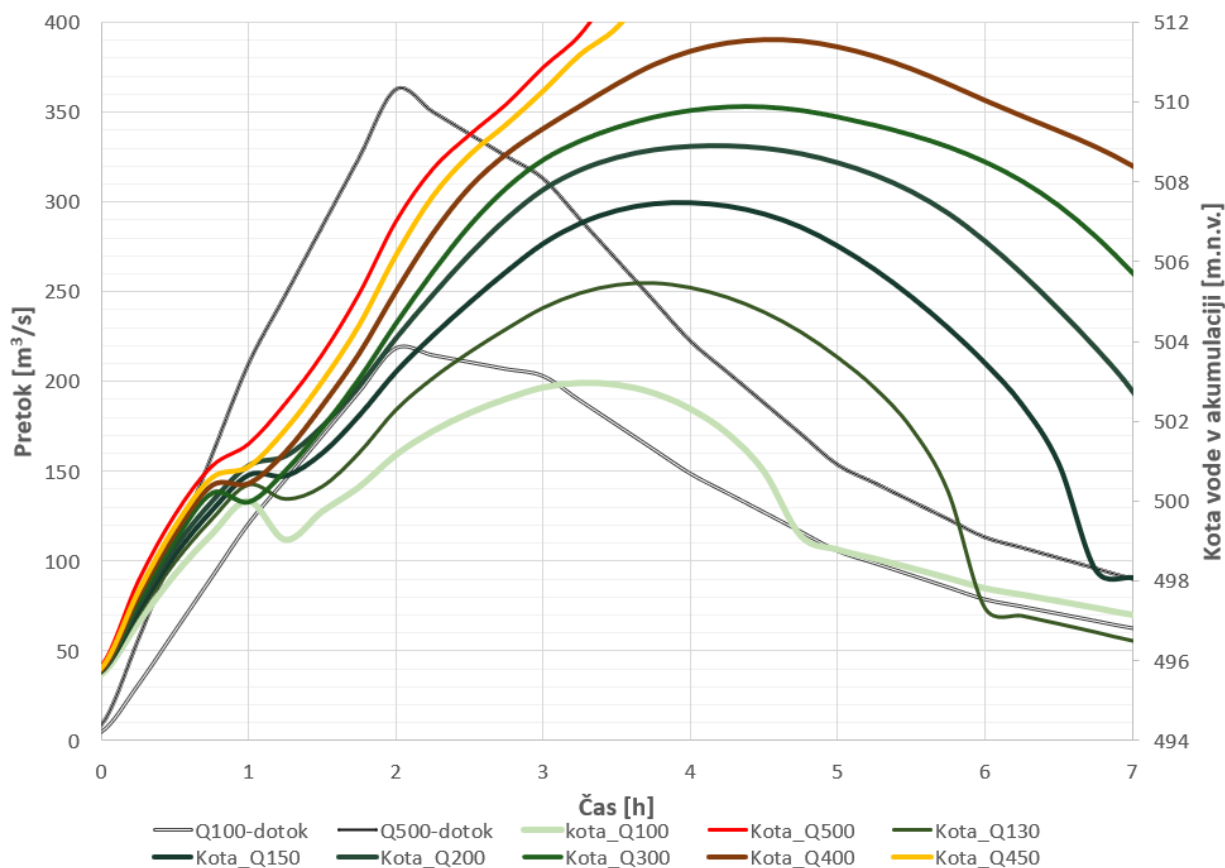
Spodnja slika 35 prikazuje kote gladin vode v akumulaciji za povratne dobe Q_{100} (zelena barva), Q_{130} (rumena barva), Q_{150} (kožnata barva), Q_{200} (oranžna barva), Q_{300} (svetlo rjava), Q_{400} (temno rjava), Q_{450} (oker barva) in Q_{500} (rdeča barva) ob obratovalnem iztoku $160 \text{ m}^3/\text{s}$. Višje povratne dobe vedno prej presežejo gladino 510 m.n.v. V ozadju sta prikazana še hidrograma Q_{100} in Q_{500} .



Slika 35: : Dinamika kote gladine v akumulaciji za različne povratne dobe pri obratovalnem pretoku $160 \text{ m}^3/\text{s}$

Če bi bil obratovalni pretok enak $160 \text{ m}^3/\text{s}$, bi lahko prevajali Q_{150} in, če bi bila dopustna kota na pregradi 511 m.n.v., tudi Q_{200} . Pri dogodkih nad Q_{300} pa še vedno ni izrazitega vpliva na njihovo dinamiko. V primerjavi s pretokom $120 \text{ m}^3/\text{s}$ je zamik presežene kote 510 m.n.v. pri Q_{500} le 30 minut več. Pretok Q_{300} sicer ne preseže kote 512 m.n.v., a je preblizu (max. dosežena kota je 511.89), da bi bilo takšno obratovanje dopustno.

Spodnja slika 36 prikazuje kote gladin vode v akumulaciji za povratne dobe Q_{100} (svetlo zelena), Q_{130} (zelena), Q_{150} (temno zelena), Q_{200} (temno zelena), Q_{300} (zelena), Q_{400} (temno rjava), Q_{450} (oker barva) in Q_{500} (rdeča barva) ob obratovalnem iztoku $180 \text{ m}^3/\text{s}$. Višje povratne dobe zmeraj prej presežejo gladino 510 m.n.v. V ozadju sta prikazana še hidrograma Q_{100} in Q_{500} .



Slika 36: Dinamika kote gladine v akumulaciji za različne povratne dobe pri obratovalnem pretoku $180 \text{ m}^3/\text{s}$

Pri iztoku $180 \text{ m}^3/\text{s}$, ki sicer daleč presega mišljene vrednosti iztoka iz pregrade, lahko prevajamo tudi Q_{300} , ki ima konični pretok okoli $310 \text{ m}^3/\text{s}$, a ob previsokih maksimalnih kotah. Dogodek Q_{400} je podoben, saj se koto za cca 30 cm približa 512 m.n.v., a je ne preseže. Vseeno je zaradi varnosti to zelo tvegano. Projektni iztok vrednosti $180 \text{ m}^3/\text{s}$ sicer ni smiseln za normalne obratovalne primere, saj bi zaradi vseh pritokov (Zgornja in Spodnja Smoleva, Plenšak, Dašnjica, Češnjica) pretok vode v strugi Selške Sore skozi Železnike presegel $180\text{-}190 \text{ m}^3/\text{s}$ in bi prišlo do poplavljanja. Gre torej za hipotetični primer, katerega obratovanje bi bilo ugodno le v primeru, ko bi zagotovo napovedali, da bo dogodek podajal pretoke okoli Q_{300} .

4.2.2 Tabele za identifikacijo visokovodnih dogodkov

Za zgoraj opisane obratovalne pretoke je bila v tem poglavju preverjena dinamika gibanja kote vode v akumulaciji za visokovodne valove različnih povratnih dob, **brez** sprememb v načinu obratovanja. Iz te dinamike je narejena tabela, ki prikazuje višino gladine ob različnih povratnih dobah ob različnih obratovalnih iztokih ob določenih časih trajanja visokovodnega vala. Za posamezni obratovalni pretok je tudi navedeno, ali bo za določeno povratno dobo zadosten, da kota akumulacije ne preseže višine **510** m.n.v. Dodatno je preverjeno tudi za **511** m.n.v. Opozoriti velja, da je v obratovalnih navodilih in v zasnovi maksimalna kota za dogodke do Q_{10000} enaka 510 m.n.v. Koto 511 m.n.v. preverjamo zgolj v sklopu magistrske naloge za potrebe analize delovanja pri visokovodnih dogodkih.

Dosežene maksimalne gladine nad 511 m.n.v. smo razdelili na dve kategoriji – od **511 do 512** m.n.v. in dosežene kote **nad 512** m.n.v. Kota gladine med 511 m.n.v. in 512 m.n.v. je sicer z vidika varnosti nedopustna, a načeloma ne bi smela privedi do porušitve ali nekontroliranega prelivanja. Kote nad 512 m.n.v. pa pomenijo prelivanje in nekontrolirano stanje, zato je med primeroma dodana ločnica.

Spodnje tabele podajajo vrednosti gladine v akumulaciji za različne povratne dobe ob različnih (konstantnih) iztokih iz akumulacije. Vrednosti so podane na 15 minut in za 2 uri, ki predstavljata čas od začetka naraščanja hidrograma vtoka pa vse do samega vrha vala, po katerem pride do upada vtoka, zato bi v tej točki že iz podatkov merilnih mest lahko ocenili povratno dobo dogodka oziroma ocenili, ali preseže kapaciteto zadrževalnika ali ne.

Gladine služijo za identifikacijo dogodkov, ki presegajo Q_{100} . Npr. v spodnji tabeli (iztok $120 \text{ m}^3/\text{s}$) po 60 minutah dotekanja dogodka Q_{100} pričakujemo koto v akumulaciji 500 m.n.v. Če je ta kota enaka 502,34 m.n.v. to pomeni, da gre za dogodek Q_{500} - ali krajši dogodek višje povratne dobe. A glede na le 2-urno trajanje naraščanja pretoka, težko pričakujemo krajše čase hidrogramov pri ekstremnih povratnih dobah, daljša trajanja oziroma naraščanja hidrograma do konice pa niso kritična z vidika varnosti in zahtevnosti obratovanja. Vsekakor bo v praksi nujno sodelovanje z več meteorološkimi in hidrološkimi službami za sprejemanje odločitev o nadaljnjem obratovanju zadrževalnika.

Za potrebe magistrske naloge in za podaje prvih predlogov obratovanja pri dogodkih nad Q_{100} so spodnje tabele zadostne, saj drugih podatkov v tej fazi nimamo in jih ne moremo pridobiti.

Kljub temu je potrebno opozoriti na potencialno pomanjkljivost pri izračunu spodnjih tabel. Vrednost iztoka (projektni iztok) je konstantna oziroma skladno s poglavjem 4.1 narašča do neke konstantne vrednosti iztoka. V realnem scenariju se lahko zgodi, da iz več razlogov prihaja do sprememb iztoka že prej, kar bi bilo v nadaljnjih fazah potrebno upoštevati oziroma bi v dejanskem scenariju te iztoke sproti beležili in vnašali v nadgrajeni model. Toda prvo uro, zelo verjetno prvih 90 minut pričakujemo

ustaljeno obratovanje, za kar so spodnje tabele primerne, če je dejanska realna oblika hidrograma viskovodnih vod podobna uporabljenemu hidrogramu iz modela.

Tabela 3 podaja odvisnost višine vode v akumulaciji od časa od pričetka visokovodnega vala in od povratne dobe visokovodnega dogodka ob projektnem iztoku $120 \text{ m}^3/\text{s}$.

Tabela 3: Gladine vode v akumulaciji pri iztoku $120 \text{ m}^3/\text{s}$

Višina vode v akumulaciji								
Čas po pričetku naraščanja [min]	Povratna doba [m.n.v.]							
	Q100	Q130	Q150	Q200	Q300	Q400	Q450	Q500
	Iztok $120 \text{ m}^3/\text{s}$							
15	496.94	497.13	497.26	497.38	497.50	497.62	497.73	497.98
30	498.17	498.46	498.66	498.85	499.03	499.20	499.37	499.65
45	499.18	499.54	499.77	499.99	500.20	500.40	500.58	500.86
60	500.01	500.40	500.66	500.90	501.27	501.60	501.91	502.34
85	500.61	501.32	501.74	502.11	502.55	502.95	503.32	503.82
90	501.56	502.42	502.93	503.39	503.91	504.42	504.92	505.56
105	502.62	503.60	504.23	504.84	505.53	506.20	506.84	507.50
120 = konica pretoka	503.74	504.95	505.78	506.56	507.34	508.01	508.56	509.03

Končna kota brez ukrepanja:
pod 510
510-511
511-512
512+

Pri projektnem iztoku $120 \text{ m}^3/\text{s}$ torej lahko brez modifikacij obratovanja obratujemo le pri dogodku Q_{100} , pri dogodku Q_{130} pa že presežemo koto 510 m.n.v. Za vse ostale povratne dobe je obratovanje povsem neprimerno; za Q_{150} bo maksimalna kota akumulacije med 511 in 512, za vse ostale dogodke pa bomo presegli maksimalno koto 512, torej bi brez intervencije prišlo do nekontroliranega prelivanja pregrade.

Spodnja tabela 4 podaja gladine v akumulaciji pri iztoku iz nje 130 m³/s.

Tabela 4: Gladine vode v akumulaciji pri iztoku 130 m³/s

Višina vode v akumulaciji [m.n.v.]								
Čas po pričetku naraščanja [min]	Povratna doba							
	Q100	Q130	Q150	Q200	Q300	Q400	Q450	Q500
	Iztok 130 m ³ /s							
15	496.94	497.13	497.26	497.38	497.50	497.62	497.50	497.98
30	498.17	498.46	498.66	498.85	499.03	499.20	499.03	499.65
45	499.18	499.54	499.77	499.99	500.20	500.40	500.20	500.86
60	500.01	500.40	500.66	500.89	501.08	501.43	501.08	502.20
85	500.38	501.13	501.58	501.96	502.29	502.71	502.29	503.61
90	501.21	502.15	502.69	503.16	503.59	504.10	503.59	505.25
105	502.23	503.27	503.91	504.52	505.11	505.80	505.11	507.16
120 = konica pretoka	503.31	504.53	505.36	506.16	506.90	507.64	506.90	508.78

Končna kota brez ukrepanja:
pod 510
510-511
511-512
512+

Spodnja tabela 5 podaja gladine v akumulaciji pri iztoku iz nje 140 m³/s.

Tabela 5: Gladine vode v akumulaciji pri iztoku 140 m³/s

Višina vode v akumulaciji [m.n.v.]								
Čas po pričetku naraščanja [min]	Povratna doba							
	Q100	Q130	Q150	Q200	Q300	Q400	Q450	Q500
	Iztok 140 m ³ /s							
15	496.94	497.13	497.26	497.38	497.50	497.62	497.73	497.98
30	498.17	498.46	498.66	498.85	499.03	499.20	499.37	499.65
45	499.18	499.54	499.77	499.99	500.20	500.40	500.58	500.86
60	500.01	500.40	500.66	500.89	500.89	501.26	501.59	502.06
85	500.15	500.94	501.41	501.81	502.01	502.46	502.87	503.39
90	500.82	501.86	502.44	502.93	503.26	503.79	504.30	504.94
105	501.79	502.92	503.59	504.20	504.69	505.38	506.06	506.80
120 = konica pretoka	502.85	504.11	504.95	505.76	506.43	507.23	507.91	508.50

Končna kota brez ukrepanja:
pod 510
510-511
511-512
512+

Spodnja tabela 6 podaja gladine v akumulaciji pri iztoku iz nje 160 m³/s.

Tabela 6: Gladine vode v akumulaciji pri iztoku 160 m³/s

Višina vode v akumulaciji [m.n.v.]								
Čas po pričetku naraščanja [min]	Povratna doba							
	Q100	Q130	Q150	Q200	Q300	Q400	Q450	Q500
	Iztok 160 m ³ /s							
15	496.94	497.13	497.26	497.38	497.50	497.62	497.73	497.98
30	498.17	498.46	498.66	498.85	499.03	499.20	499.37	499.65
45	499.18	499.54	499.77	499.99	500.20	500.40	500.58	500.86
60	500.01	500.40	500.66	500.89	500.46	500.87	501.25	501.76
85	499.63	500.52	501.04	501.48	501.37	501.90	502.37	502.94
90	500.25	501.19	501.88	502.44	502.55	503.13	503.66	504.31
105	501.00	502.16	502.92	503.57	503.85	504.55	505.24	506.02
120 = konica pretoka	501.99	503.25	504.11	504.93	505.41	506.29	507.11	507.83

Končna kota brez ukrepanja:
pod 510
510-511
511-512
512+

Spodnja tabela 7 podaja gladine v akumulaciji pri iztoku iz nje 180 m³/s.

Tabela 7: Gladine vode v akumulaciji pri iztoku 180 m³/s.

Višina vode v akumulaciji [m.n.v.]								
Čas po pričetku naraščanja [min]	Povratna doba							
	Q100	Q130	Q150	Q200	Q300	Q400	Q450	Q500
	Iztok 180 m ³ /s							
15	496.94	497.13	497.26	497.38	497.50	497.62	497.73	497.98
30	498.17	498.46	498.66	498.85	499.03	499.20	499.37	499.65
45	499.18	499.54	499.77	499.99	500.20	500.40	500.58	500.86
60	500.01	500.40	500.66	500.89	499.98	500.45	500.86	501.43
85	499.04	500.05	500.63	501.13	500.77	501.24	501.79	502.44
90	499.75	500.36	501.21	501.88	501.84	502.40	503.00	503.67
105	500.36	501.20	502.15	502.89	503.07	503.71	504.40	505.19
120 = konica pretoka	501.16	502.27	503.25	504.09	504.46	505.27	506.15	507.01

Končna kota brez ukrepanja:
pod 510
510-511
511-512
512+

Na podlagi zgornjih tabel je med dogodkom mogoča odločitev, ali moramo povečati iztok ali ne. Ni dovolj, da spremljamo zgolj višino gladine v akumulaciji v posameznem časovnem koraku. Spremljanje tudi trenda naraščanja gladine v akumulaciji je bolj reprezentativno in podaja vrednosti v nizu, ne zgolj

točkovno. Npr. pri iztoku $120 \text{ m}^3/\text{s}$ nam pri dogodku Q_{100} gladina med 30. minuto in 60. minuto naraste za 1,84 metra, pri Q_{300} za 2,24 metra, pri Q_{500} pa za kar 2,69 metra.

Dogajanje med 60 minutami po začetku naraščanja in 90 minutami je verjetno najbolj reprezentativno za identifikacijo dogodka, ki bi se lahko pojavil. Prvič zato, ker je do takrat na podlagi meritev in radarske slike padavin že možno okvirno oceniti trajanje padavin in obliko pripadajočega visokovodnega dogodka. Drugič pa zato, ker so takrat razlike v gladini akumulacije za različne povratne dobe največje. Po 85 minutah je razlika med gladino Q_{100} in Q_{500} enaka 3,21 metra. Pri taki razliki in pri nadaljnjem padanju večjih količin dežja torej vemo, da bo zadrževalnik prelit in da moramo spuščati precej večje količine vode dolvodno.

Dlje, kot traja zanesljiva identifikacija dogodka, večje količine vode bomo morali spuščati iz akumulacije in kontrolirano poplavljeni Železniki. Zato je pomembno, da je napoved visokovodnega vala znana čim prej. A če ta ni primerna, se lahko zgodi, da kontrolirano poplavljammo območje dolvodno, čeprav to ne bi bilo potrebno.

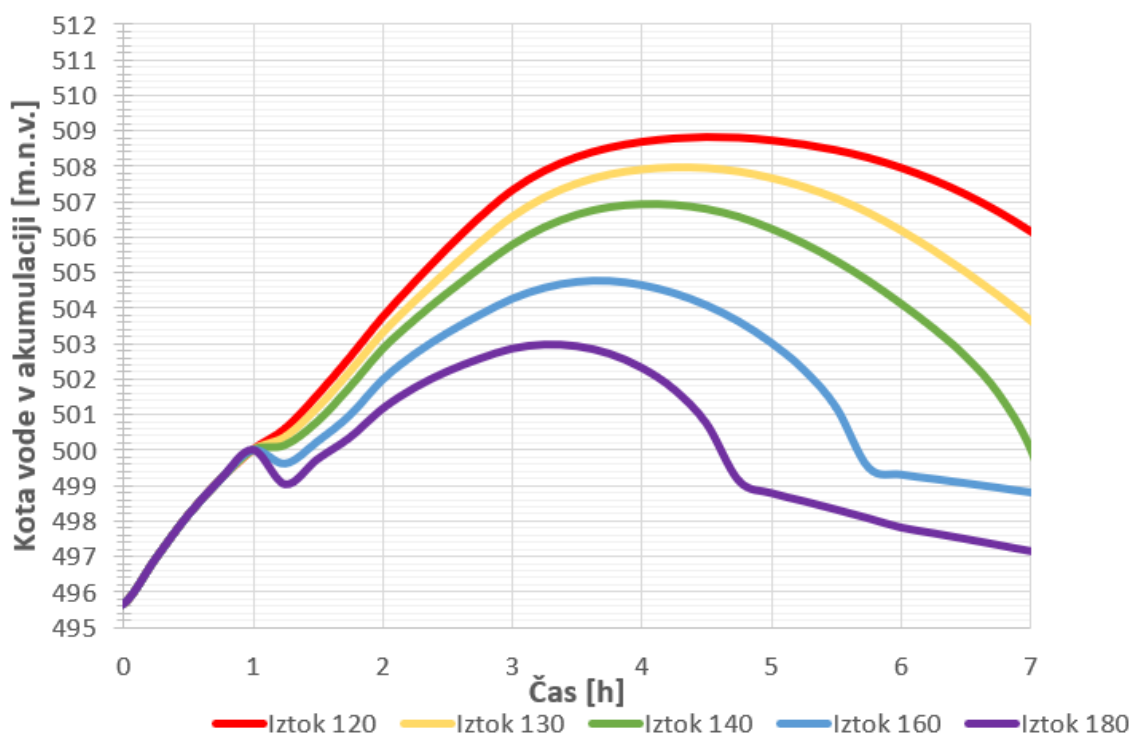
Iskanje optimalne točke med dovolj zgodnjo odločitvijo o povečanju odtoka in o zakasnitvi odločitve zaradi varnosti je zato izjemno zahtevno. V kasnejših poglavjih bodo izvedeni in prikazani hidravlični izračuni primerjave obsega poplav ob zelo zgodnji in zelo pozni identifikaciji visokovodnega dogodka in ob naslednjem kontroliranem povečanju iztoka iz pregrade. Ti računi lahko služijo kot osnova za sprejemanje odločitev oziroma »tveganj« povezanih z obratovanjem pregrade.

4.3 Pregled dinamike zadrževalnika pri Q_{200} do Q_{500}

V poglavju 4.2 so prikazani grafi in tabele, ki prikazujejo, da je do dogodkov okoli Q_{200} še možno obratovati razmeroma normalno, dogodek Q_{300} bi s projektnim iztokom $180 \text{ m}^3/\text{s}$ lahko prevedli le, če bi zanesljivo vnaprej vedeli, da prihaja in z zavedanjem, da bo Selška Sora dolvodno prestopila bregove. Ob nastopu dogodka Q_{400} ali Q_{500} bi kljub povečanju iztoka skozi pregrado prišlo do nekontroliranega preplavanja pregrade. V tem poglavju si bomo zato podrobneje ogledali obratovanje pri teh povratnih dobah, z namenom boljše ilustracije resnosti in nevarnosti takšnih dogodkov.

Grafi iz poglavja 4.2.1 prikazujejo fiksni projektni iztok in dinamiko gladine pri več različnih povratnih dobah. Če podatke grafov preuredimo, lahko prikažemo dinamiko pri **eni povratni dobi in različnih projektnih iztokih**. Tako bolje prikažemo dinamiko visokovodnega dogodka in vpliv večanja projektnega iztoka nanjo.

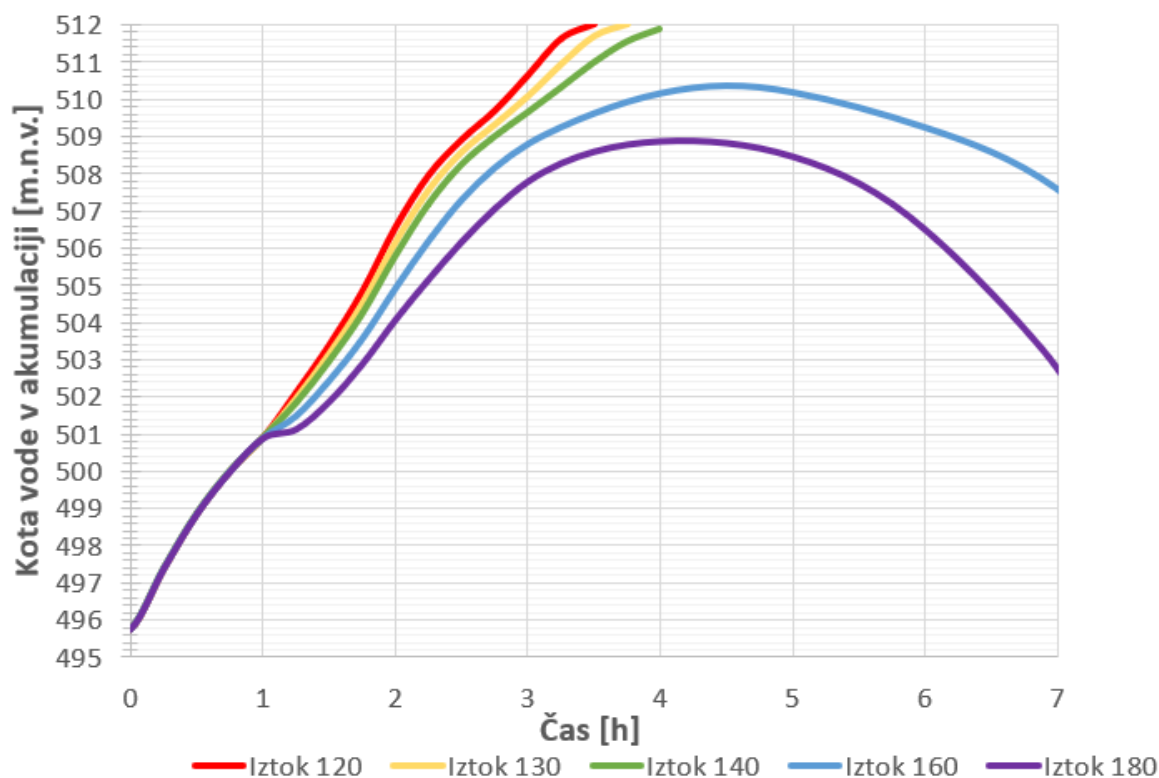
Spodnja slika 37 prikazuje dinamiko gibanja gladin vode v akumulaciji za Q_{100} pri projektnih pretokih 120 (rdeča), 130 (rumena), 140 (zelena), 160 (modra) in 180 m^3/s (vijolična).



Slika 37: Gibanje gladine pri Q_{100} pri različnih projektnih iztokih

Projektni iztok 180 m^3/s prikazuje spodnja linija, 120 m^3/s pa najvišja linija, saj pri nižjih iztokih logično gladina naraste do višjih kot zaradi počasnejšega praznjenja. Pri dogodku Q_{100} , za katerega so dimenzije zadrževalnika zadostne, so vsi projektni iztoki primerni, torej zadostijo pogoju, da kota vode v akumulaciji ne preseže 510 m.n.v. Razvidno je tudi, da je delovanje z iztokom 160 m^3/s nepotrebno, saj kota ne preseže 503 m.n.v., kar znaša manj kot 30 % volumna zadrževalnika.

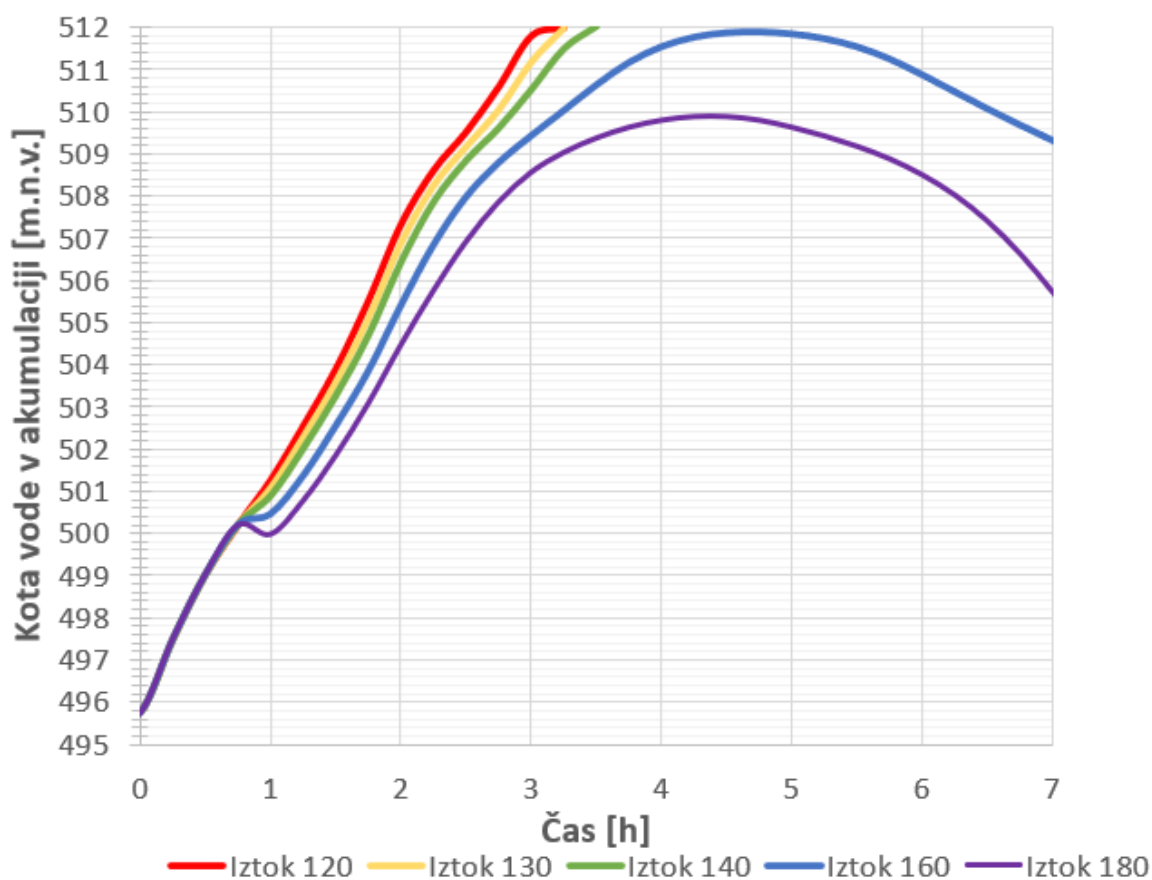
Spodnja slika 38 prikazuje dinamiko gibanja gladin vode v akumulaciji za Q_{200} pri projektnih 120 (rdeča), 130 (rumena), 140 (zelena), 160 (modra) in 180 m^3/s (vijolična).



Slika 38:Gibanje gladine pri Q_{200} pri različnih projektnih iztokih

Če smo pri pretokih Q_{100} in Q_{150} vsaj s projektnim iztokom 160 m^3/s uspeli doseči največ koto 510 m.n.v., je pri Q_{200} viden zgolj vpliv iztokov 160 in 180 m^3/s na samo dinamiko gibanja gladine. Gladinska stanja pri projektnih iztokih 120 – 140 m^3/s niso bistveno drugačna, pri iztoku 160 m^3/s bi dosegli koto 511 m.n.v, pri 180 m^3/s pa imamo še cel meter varnosti do omejitve, saj dosežemo koto 509 m.n.v. Med Q_{100} in Q_{200} so torej z vidika obratovanja pregrade bistvene razlike, ki se bodo zgolj še povečevale pri pretokih višjih povratnih dob.

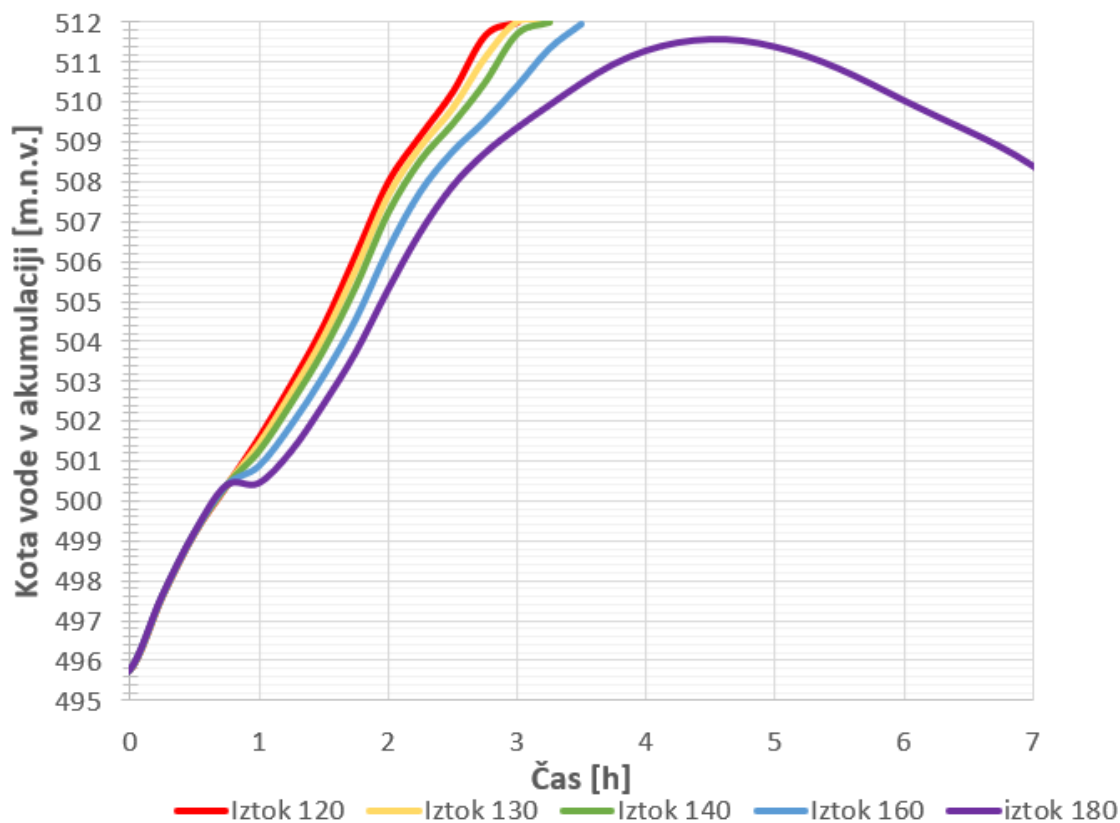
Spodnja slika 39 prikazuje dinamiko gibanja gladin vode v akumulaciji za Q_{300} pri projektnih pretokih 120 (rdeča), 130 (rumena), 140 (zelena), 160 (modra) in 180 m^3/s (vijolična).



Slika 39: Gibanje gladine pri Q_{300} pri različnih projektnih iztokih

Dogodek Q_{300} je, kot omenjeno, mogoče prevajati s projektnim iztokom 180 m^3/s le v primeru, da bi vnaprej zagotovo vedeli, da bo nastopil dogodek Q_{300} , saj dosežemo točno koto 510 m.n.v. Pri iztoku 160 m^3/s pa se v akumulaciji vzpostavi gladina, ki je nekaj centimetrov pod koto 512 m.n.v., kar je zaradi varnosti in obratovalnih navodil nesprejemljivo. Razlika pri vseh ostalih projektnih iztokih je minimalna.

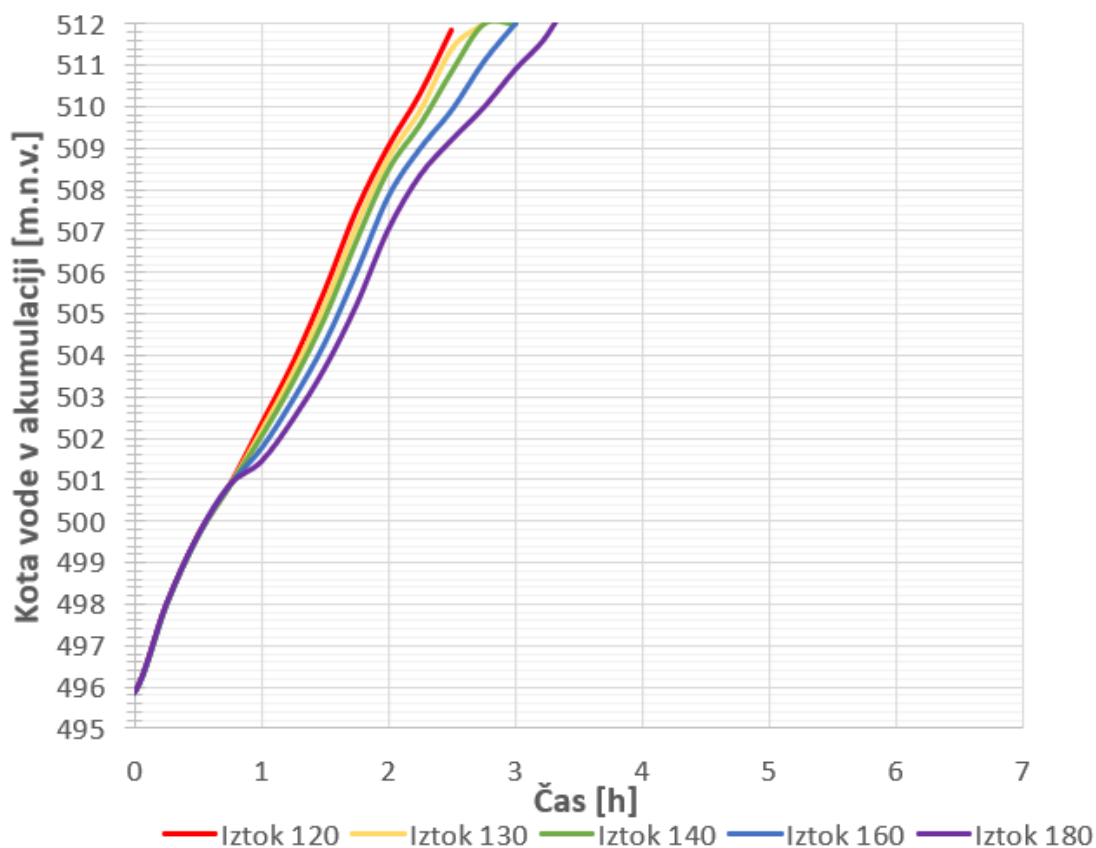
Spodnja slika 40 prikazuje dinamiko gibanja gladin vode v akumulaciji za Q_{400} pri projektnih pretokih 120 (rdeča), 130 (rumena), 140 (zelena), 160 (modra) in 180 m^3/s (vijolična).



Slika 40: Gibanje gladine pri Q_{400} pri različnih projektnih iztokih

V primeru Q_{400} noben projektni pretok, ki bi iztekal iz akumulacije ni zadosten, da bi preprečili prelivanja pregrade brez povečanja iztoka na vrednosti nad 180 m^3/s . Izjema je le iztok 180 m^3/s , kjer pa kota krepko preseže 511 m.n.v. in se na pol metra približa koti 512 m.n.v. Razlika med iztokoma 120 in 160 m^3/s je le v tem, da pri slednjem cca uro kasneje presežemo maksimalno dovoljeno koto.

Spodnja slika 41 prikazuje dinamiko gibanja gladin vode v akumulaciji za Q_{500} pri projektnih pretokih 120 (rdeča), 130 (rumena), 140 (zelena), 160 (modra) in 180 m^3/s (vijolična).



Slika 41: Gibanje gladine pri Q_{500} pri različnih projektnih iztokih

V primeru Q_{500} je razlika med največjim in najmanjšim obravnavanim iztokom zgolj v tem, da največji iztok le pol ure kasneje preseže dovoljeno koto. Hitrost naraščanja gladine in velikosti pretokov pri Q_{500} so ekstremne in narekujejo potrebo po močno spremenjenem obratovalnem režimu zadrževalnika. Zgornja slika je eden najpomembnejših rezultatov tega poglavja, in služi kot kontrast obratovanju pri Q_{100} in kot izhodišče za iskanje obratovalnih navodil pri visokovodnih dogodkih, ki bodo kljub težkim razmeram maksimalno izkoristila razpoložljiv volumen zadrževalnika za blaženje posledic pri prevajanju visokovodnih valov višjih povratnih dob.

Rezultati vseh zgoraj obravnavanih scenarijev prikazujejo resnost obratovanja pri dogodkih nad Q_{100} . Hitrost naraščanja gladine in minimalni vplivi med iztoki 120 in 180 m^3/s od pretoka Q_{300} naprej so za obratovanje pregrade izrazito neugodni, saj ni veliko časa za ustrezno pripravo in ukrepanje.

Na tem mestu se vrnimo v poglavje 3.1.2 in na razliko med obema hidrološkima študijama. Po stari hidrologiji iz leta 2010, na katero je pregrada projektirana, je Q_{500} približno enak Q_{200} iz hidrologije iz leta 2021. Zaključimo lahko, da načrtovana izvedba pregrade ob upoštevanju pretokov nove hidrologije

ne zagotavlja zelene poplavne varnosti dolvodnih območij, kot je bilo to predvideno v času načrtovanja zadrževalnika. To dejstvo je še posebej neugodno ob upoštevanju klimatskih sprememb in povečevanju pogostosti in intenzitete poplavnih dogodkov.

4.4 Varianta obratovanja 1: Identifikacija in prilagoditev iztoka

Tabele, podane v poglavju 4.2.2, služijo kot izhodišče za zgodnjo identifikacijo visokovodnega dogodka. Ko je ta **identificiran**, pa je potrebno ukrepati (v tem poglavju: **reakcija**) z večanjem iztoka iz akumulacije, da ne presežemo dovoljenih kot gladine akumulacije in preprečimo nekontrolirano prelivanje pregrade in morebitno porušitev le-te. Skladno s vsemi predpostavkami in poenostavitvami iz prejšnjih poglavij obravnavamo le eno obliko visokovodnega vala in med visokovodnim dogodkom ne spreminjamo njegove oblike ali povratne dobe.

Obseg povečanja pretoka iz akumulacije in posledičnega kontroliranega poplavljanja dolvodnega območja je odvisen od naslednjih dejavnikov:

- čas identifikacije dogodka: čim prej identificiramo potrebo po ukrepanju, več časa imamo za prelivanje potrebnega volumna, kar pomeni manjši pretok dolvodno,
- projektni iztok iz pregrade: večji kot je pretok iz pregrade, manjše povečanje iztoka potrebujemo,
- omejitev kote na pregradi: če povišamo maksimalno dovoljeno koto (kar v zasnovi pregrade ni predvideno) na 511 m.n.v., imamo večji razpoložljiv volumen zadrževalnika, kar zmanjša potrebe po povečanju pretoka na iztoku iz pregrade.

Kot omenjeno, je glavni rezultat tega poglavja vrednost povečanega pretoka iz akumulacije, ki zagotavlja varnost pregrade in hkrati čim nižji obseg poplav na dolvodnih območjih. Preverjanje vseh parametrov, navedenih v zgornjih alinejah, bi pomenilo preveliko število možnih scenarijev. Za nobeno kombinacijo časa identifikacije, kote na pregrade in osnovnega iztoka pa ne moremo trditi, da je najbolj »pravilna«, saj bodo dejanske razmere v času visokovodnega dogodka verjetno kaotične, odločitve o povečanju iztoka ne bo enostavno sprejeti.

Zato smo se omejili na račun skrajnih primerov, ki služijo kot svojevrstne »ovojnice« vseh možnih obratovanj oziroma vrednosti pretokov. Dejansko povečanje pretoka bi bilo zato verjetno nekje med »najboljšim« in »najslabšim« potrebnim povečanim pretokom.

Opozorimo, da to ni predvideno obratovanje zadrževalnika, temveč naš predlog oziroma varianta obratovanja zadrževalnika pri dogodkih nad Q_{100} .

Preverili smo naslednje primere:

A) Glede na čas identifikacije:

- Takoj, ko je to realno možno, v najboljšem primeru - cca 45 minut po začetku dogodka, ko se začne strmejše naraščanje gradienta gladine, kar smo upoštevali kot povečan iztok/ukrepanje **45 minut** po začetku naraščanja gladine v akumulaciji.
- Zadnji realen trenutek identifikacije je takoj po konici visokovodnega dogodka, ko bi iz meritev pretoka na Selški Sori in Davči ocenili vrednost konice, kar pomeni prilagoditev iztoka **120 minut** po začetku naraščanja gladine v akumulaciji.

B) Glede na velikost projektnega iztoka:

- Preverili smo vrednosti projektnega iztoka **120 m³/s** in **140 m³/s**. Večjih vrednosti nismo obravnavali, saj jih ne smatramo kot del regularnega obratovanja, ki je predpostavljeno pred identifikacijo dogodka nad Q_{100} .

C) Glede na dovoljeno koto akumulacije:

- Preverili smo potrebno velikost iztoka, če želimo doseči koto 510 m.n.v, 511 m.n.v. ali 512 m.n.v. Vemo sicer, da kote 512 m.n.v. ne bi smeli nikoli doseči. Vrednost pretoka za doseg posamezne kote so bile izračunane predvsem za to, da je moč oceniti dinamiko gibanja gladine v akumulaciji pri različnih pretokih. Kota 511 m.n.v. je v zasnovi pregrade dovoljena le za izredne dogodke nad Q_{10000} . V sklopu tega poglavja smo vseeno preverili, kako bi doseganje te kote vplivalo na dogajanje med visokovodnimi dogodki.

Na podlagi zgoraj opisanega so izračunani potrebni pretoki pri dogodkih Q_{200} , Q_{300} , Q_{400} in Q_{500} , na podlagi katerih so dosežene kote 510 m.n.v, 511 m.n.v. in 512 m.n.v. ob ukrepanju po 45 minutah in ob ukrepanju po 120 minutah.

Na varianto obratovanja 1 se bomo kasneje zaradi preglednosti sklivali kot varianta obratovanja 1 – konstantni pretok na iztoku, na grafih pa bo označena kot »var1«, nadaljnjo ločena na »hitro reakcijo« (ukrepanje tik ob začetku naraščanja pretoka) in kot »pozna reakcija« (ukrepanje na vrhu visokovodnega vala).

V tem poglavju bodo prikazani rezultati za obratovalni pretok 120 m³/s, za pretok 140 m³/s pa so potrebni pretoki podani tabelarično in kasneje kot izhodni hidrogrami iz pretoka. Glavni rezultat v tem

poglavju so grafično prikazani rezultati, ki prikazujejo dinamiko gibanja gladine vode v zadrževalniku; sam iztok in njegove posledice dolvodno pa so analizirani v kasnejših poglavjih.

Ponovno opozorimo, da gre za hipno (tekom 10 minut) povečanje obratovalnega pretoka na neko višjo vrednost, ki je tudi konstantna. Dodaten komentar je potreben tudi na identičnost potrebnega višanja pretoka pri reakciji ob 45 minutah po pričetku visokovodnega dogodka. Oblika obravnavanih visokovodnih valov je takšna, da do 45 minute vrednosti pretoka še ne narastejo nad $120 \text{ m}^3/\text{s}$, zato obratovanje z $140 \text{ m}^3/\text{s}$ še ni možno. **Posledično pri tako kratkem reakcijskem času (45 minut) obratovalni pretok nima vpliva.** Ob reakcijskem času 45 minut po začetku dogodka gre torej vedno za optimistični scenarij, ob reakcijskem času 120 minut pa za pesimistični scenarij, torej dejansko zajamemo robna primera ob takšnem načinu obratovanja pri posameznih visokovodnih dogodkih.

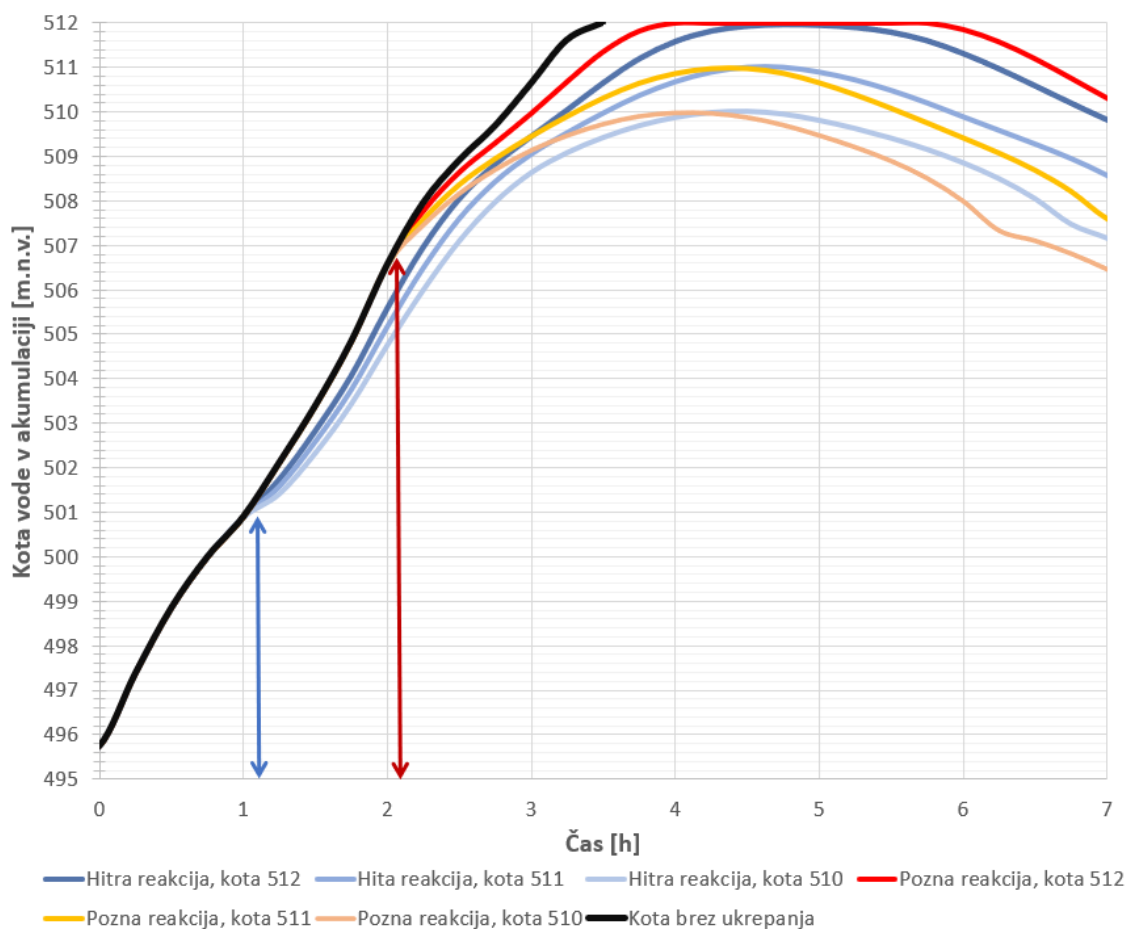
Grafični prikazi v tem poglavju imajo precej podatkovnih nizov. Za boljšo preglednost je podan naslednji opis:

- Črna barva prikazuje naraščanje gladine vode v akumulaciji zadrževalnika brez spremembe pretoka, torej pri projektnem iztoku $120 \text{ m}^3/\text{s}$.
- Svetlo modra in oranžna barva (najnižji liniji) prikazujeta gibanje gladine pri takšnem povečanju pretoka, da je najvišja dosežena kota enaka 510 m.n.v. Čas reakcije je 45 minut (modra) in 120 minut (oranžna).
- Modra in rumena barva (srednji liniji) prikazujeta gibanje gladine pri takšnem povečanju pretoka, da je najvišja dosežena kota enaka 511 m.n.v. Čas reakcije je 45 minut (modra) in 120 minut (rumena).
- Temno modra in rdeča barva prikazujeta gibanje gladine pri takšnem povečanju pretoka, da je najvišja dosežena kota ena 512 m.n.v. Čas reakcije je 45 minut (temno modra) in 120 minut (rdeča).
- Modra puščica označuje zgođen čas reakcije, rdeča puščica pa pozen čas reakcije.

Potrebni iztoki za dosego posamezne kote so podani pod grafom.

Trajanje vsakega iztoka je kot hidrogram prikazano kasneje (poglavje 4.6). Na tem mestu je potrebno vedeti, da gre v vseh primerih za vsaj **5-urno konstantno vrednost** povečanega pretoka, kar dolvodno od pregrade ustvari efektivno **stacionarne hidravlične razmere** (brez upoštevanja padanja in naraščanja pritokov).

Spodnja slika 42 prikazuje gibanje gladine pri Q_{200} pri identifikaciji dogodka po 45 minutah (modra puščica) in po 120 minutah (rdeča puščica) pri projektnem iztoku $120 \text{ m}^3/\text{s}$.



Slika 42: Dinamika gibanja gladine pri prilagojenih primerih obratovanja pri Q_{200}

Pri dogodku Q_{200} napram ostalim dogodkom čas hitrejšre reakcije navidezno kasni za 15 minut. To je posledica nižjega vtoka Q_{200} po 45 minutah, ki ne omogoča dejanskega povečanja iztoka ob 45. minuti, temveč šele po cca 60 minutah, ko so pretoki dovolj veliki. Zaradi tega je ob takojšnjem času reakcije tudi razlika med analiziranimi obratovalnima pretokoma, če je cilj doseg kote 512 m.n.v. Pri dosegu kote 512 m.n.v. (kar se sicer ne sme zgoditi) se le-ta ohranja dobri 2 uri, kar je na maksimalni koti nesprejemljivo, saj ni nobene varnostne rezerve.

Spodnja tabela 8 podaja vrednosti prilagojenih projektnih iztokov.

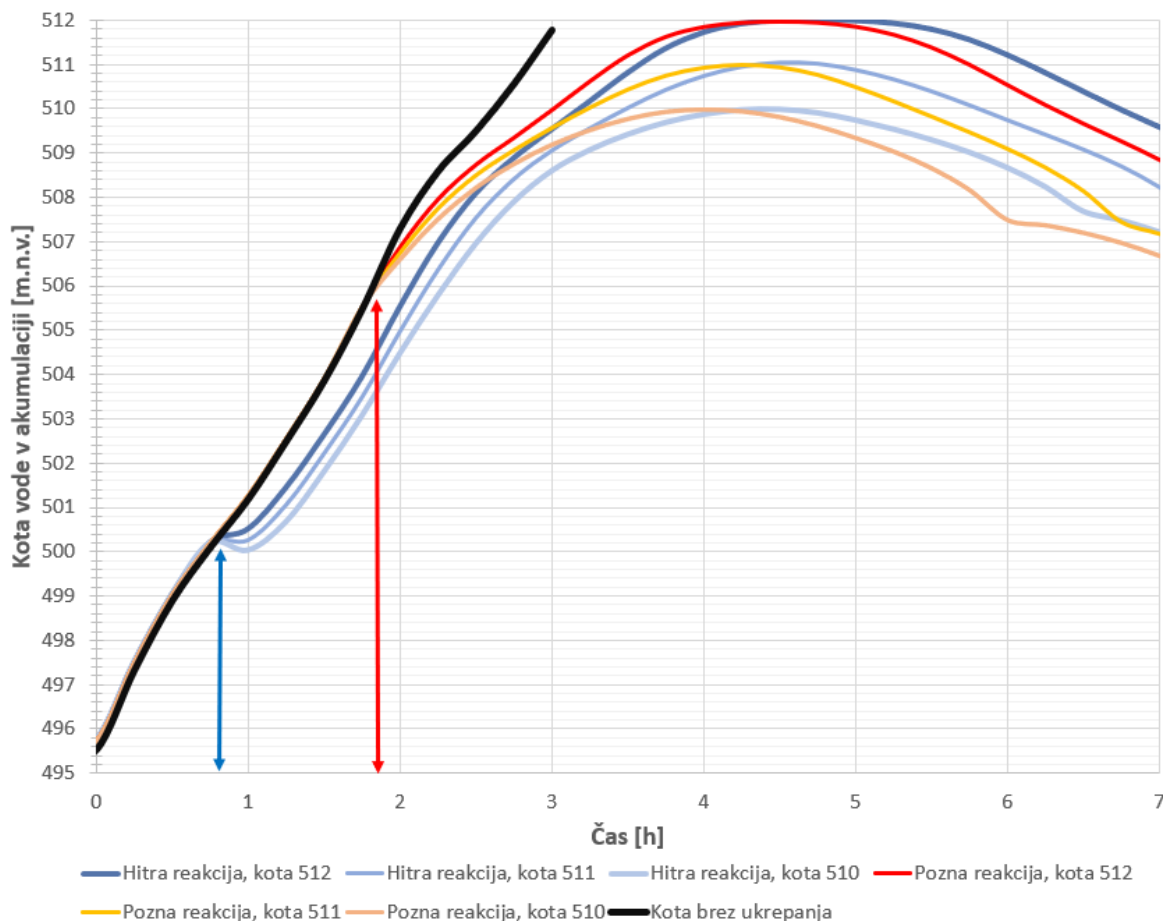
Tabela 8: Vrednosti pretoka ob reakciji pri Q_{200} .

Čas reakcije in max. Kota/osnovni iztok	Iztok 120 m ³ /s	Iztok 140 m ³ /s
45 minut po začetku, max. Kota 510	164 m ³ /s	164 m ³ /s
45 minut po začetku, max. Kota 511	154 m ³ /s	154 m ³ /s
45 minut po začetku, max. Kota 512	144 m ³ /s	140 m ³ /s
120 minut po začetku, max. Kota 510	184 m ³ /s	174 m ³ /s
120 minut po začetku, max. Kota 511	168 m ³ /s	165 m ³ /s
120 minut po začetku, max. Kota 512	145 m ³ /s	140 m ³ /s

Pri dogodku Q_{200} se kot največja omejitev pri kontroliranem prelivanju dolvodnega območja izkaže kota 510 m.n.v. Če bi lahko pri Q_{200} dosegli koto 511 m.n.v., je razlika med zgodnjo reakcijo in zapozneno reakcijo minimalna (iztok 154 m³/s in 168 m³/s oz. 165 m³/s). To je posledica relativno manjšega volumna Q_{200} , ki ga je možno skoraj v celoti zadržati z dodatnim volumenom med kotama 510 in 511 m.n.v.

Zgodnja identifikacija torej pomeni iztok 164 m³/s oziroma 154 m³/s, kar bi z nizkimi vrednostmi pritokov dolvodno lahko pomenilo minimalna razlivanja Selške Sore. Skrajno zakasnela identifikacija (obratovalni iztok 120 m³/s oz. 140 m³/s do vrha visokovodnega vala) pa bi zahtevala vrednosti iztoka 184 m³/s oz. 174 m³/s za koto 510 oziroma 168 m³/s oz. 165 m³/s za koto 511.

Spodnja slika 43 prikazuje gibanje gladine pri Q_{300} pri identifikaciji dogodka po 45 minutah (modra puščica) in po 120 minutah (rdeča puščica) pri projektnem iztoku $120 \text{ m}^3/\text{s}$.



Slika 43: Dinamika gibanja gladine pri prilagojenih primerih obratovanja pri Q_{300}

Spodnja tabela 9 podaja vrednosti prilagojenih projektnih iztokov.

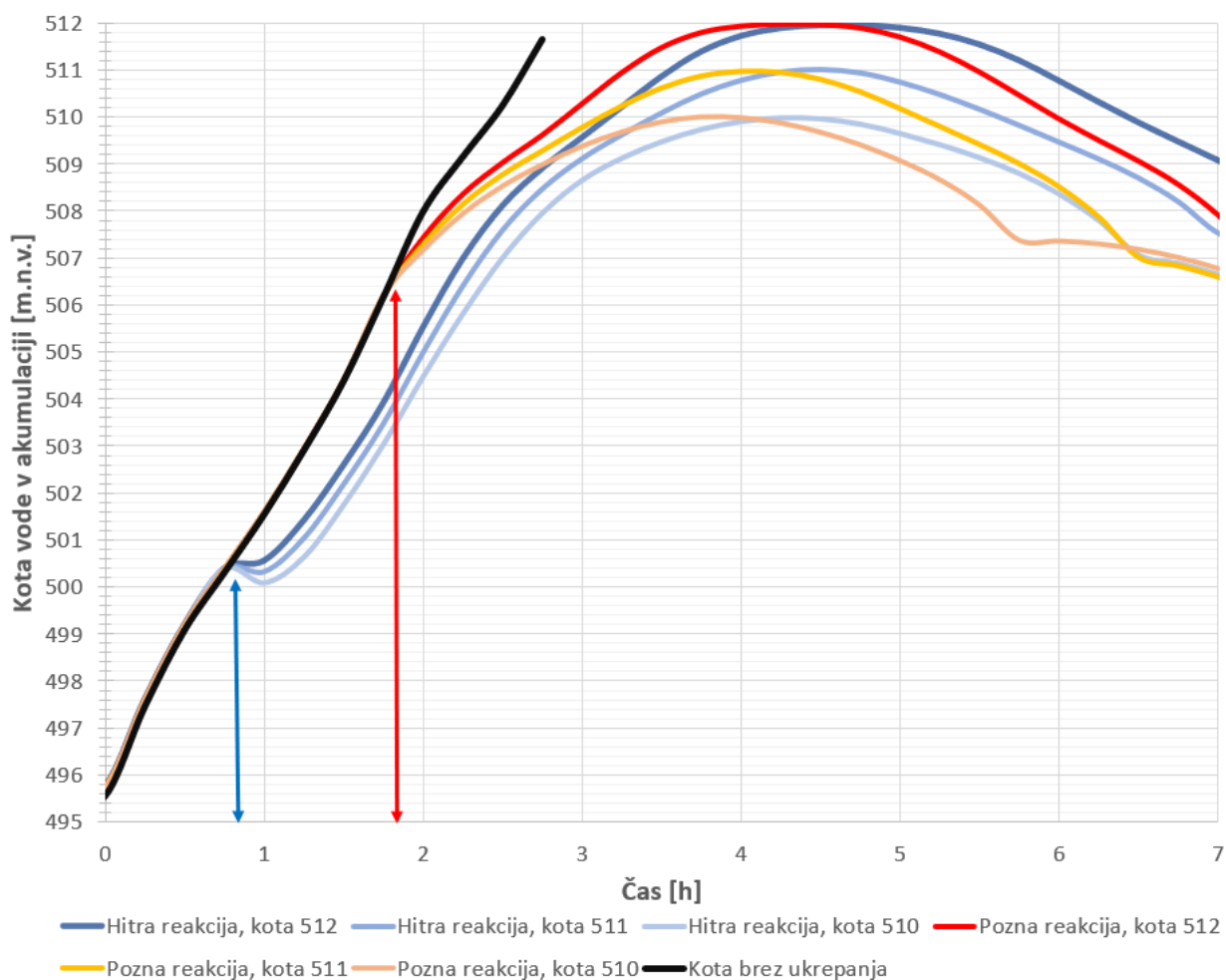
Tabela 9: Vrednosti pretoka ob reakciji na ugotovljen Q_{300}

Čas reakcije in max. kota/osnovni iztok	Iztok $120 \text{ m}^3/\text{s}$	Iztok $140 \text{ m}^3/\text{s}$
45 minut po začetku, max. kota 510	$178 \text{ m}^3/\text{s}$	$178 \text{ m}^3/\text{s}$
45 minut po začetku, max. kota 511	$168 \text{ m}^3/\text{s}$	$168 \text{ m}^3/\text{s}$
45 minut po začetku, max. kota 512	$158 \text{ m}^3/\text{s}$	$158 \text{ m}^3/\text{s}$
120 minut po začetku, max. kota 510	$202 \text{ m}^3/\text{s}$	$193 \text{ m}^3/\text{s}$
120 minut po začetku, max. kota 511	$187 \text{ m}^3/\text{s}$	$179 \text{ m}^3/\text{s}$
120 minut po začetku, max. kota 512	$172 \text{ m}^3/\text{s}$	$164 \text{ m}^3/\text{s}$

Podobno kot pri Q_{200} je razlika med iztokom pri zgodnji identifikaciji (omejitev kote 510 m.n.v.) in zakasnelo identifikacijo z omejitvijo kote 511 m.n.v. zelo majhna, pri projektnem iztoku $140 \text{ m}^3/\text{s}$ praktično zanemarljiva. Zakasnela identifikacija in maksimalna dovoljena kota 510 m.n.v. pa zahteva

precejšen iztok, $202 \text{ m}^3/\text{s}$, ki že brez dolvodnih pritokov povzroča razlivanje v Železnikih. Razlivanje dolvodno pri hipni reakciji in cca srednjih vrednostih dolvodnih pritokov (kar ni povsem realno) bi bilo minimalno oziroma tik na meji razlivanja.

Spodnja slika 44 prikazuje gibanje gladine pri Q_{400} pri identifikaciji dogodka po 45 minutah (modra puščica) in po 120 minutah (rdeča puščica) pri projektnem iztoku $120 \text{ m}^3/\text{s}$.



Slika 44: Dinamika gibanja gladine pri prilagojenih primerih obratovanja pri Q_{400}

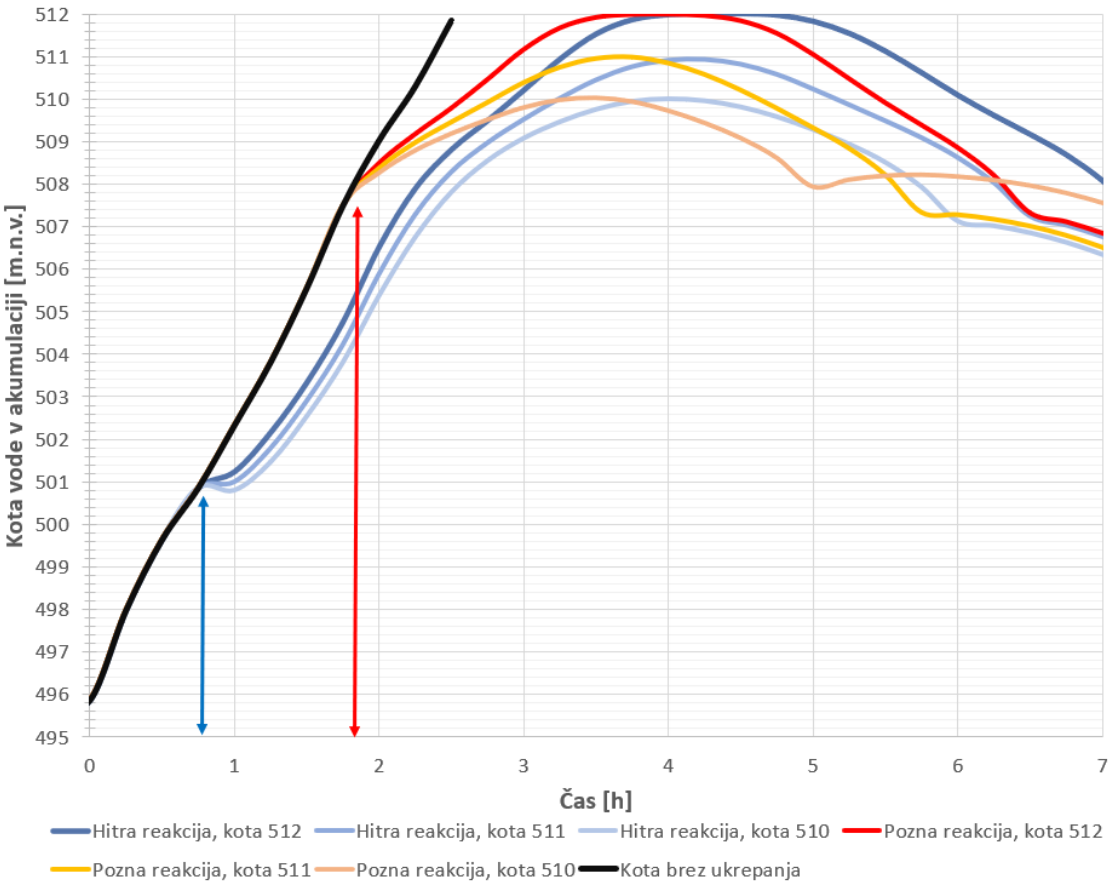
Spodnja tabela 10 podaja vrednosti prilagojenih projektnih iztokov.

Tabela 10: Vrednosti pretoka ob reakciji na ugotovljen Q_{400}

Čas reakcije in max. kota/osnovni iztok	Iztok 120 m ³ /s	Iztok 140 m ³ /s
45 minut po začetku, max. kota 510	195 m ³ /s	195 m ³ /s
45 minut po začetku, max. kota 511	185 m ³ /s	185 m ³ /s
45 minut po začetku, max. kota 512	175 m ³ /s	175 m ³ /s
120 minut po začetku, max. kota 510	227 m ³ /s	218 m ³ /s
120 minut po začetku, max. kota 511	211 m ³ /s	202 m ³ /s
120 minut po začetku, max. kota 512	195 m ³ /s	188 m ³ /s

Pri dogodku Q_{400} je situacija zopet podobna kot prej – pri zakasneli reakciji je vrednost prilagojenega iztoka precej manjša, če je dovoljeno doseči koto 511 m.n.v. (211 m³/s proti 227 m³/s pri iztoku 120 m³/s oziroma 218 m³/s proti 202 m³/s pri iztoku 140 m³/s). Razlivanju pa se v nobenem scenariju ni moč izogniti.

Spodnja slika 45 prikazuje gibanje gladine pri Q_{500} pri identifikaciji dogodka po 45 minutah (modra puščica) in po 120 minutah (rdeča puščica) pri projektnem iztoku 120 m³/s:



Slika 45: Dinamika gibanja gladine pri prilagojenih primerih obratovanja pri Q_{500}

Spodnja tabela 11 podaja vrednosti prilagojenih projektnih iztokov.

Tabela 11: Vrednosti pretoka ob reakciji na ugotovljen Q_{500}

Čas reakcije in max. kota/osnovni iztok	Iztok 120 m ³ /s	Iztok 140 m ³ /s
45 minut po začetku, max. kota 510	213 m ³ /s	213 m ³ /s
45 minut po začetku, max. kota 511	203 m ³ /s	203 m ³ /s
45 minut po začetku, max. kota 512	190 m ³ /s	190 m ³ /s
120 minut po začetku, max. kota 510	260 m ³ /s	250 m ³ /s
120 minut po začetku, max. kota 511	241 m ³ /s	231 m ³ /s
120 minut po začetku, max. kota 512	220 m ³ /s	210 m ³ /s

Dogodek Q_{500} je najbolj kritični obravnavani primer obratovanja. Najnižja vrednost iztoka znaša 203 m³/s ob najzgodnejši realni identifikaciji, ob zakasneli identifikaciji pa vrednost iztoka ne glede na vse preseže 230 m³/s, v najslabšem primeru dosežemo celo 260 m³/s. Vrednosti pretokov, podane v tabeli 11, trajajo vsaj 5 ur. Vrednost iztoka pri zakasneli reakciji 260 m³/s približno odgovarja konici Q_{150} , torej gre za cca 5 ur takšne konične vrednosti dolvodno – brez upoštevanja doprinosa dolvodnih pritokov. Tudi pri zgodnji reakciji so vrednosti pretokov nad 200 m³/s, kar z dolvodnimi pritoki tudi pomeni 5 ur trajajoč dogodek s pretekom, ki je enak konici. 100-letnega dogodka.

V modelu za generiranje robnih pogojev in obratovanje zadrževalnika je bil dogodek Q_{500} posebej analiziran za določitev minimalnih vrednosti iztoka, če bi vnaprej, že pred pričetkom naraščanja pretoka, zagotovo vedeli, da se bo zgodil takšen dogodek. To pomeni odvajanje vse vode, ki priteče v zadrževalnik do neke vrednosti konstantnega pretoka. Določeni sta bili sledeči vrednosti:

- Pri maksimalni dovoljeni koti 510 m.n.v. je minimalna vrednost iztoka iz akumulacije pri Q_{500} enaka 202 m³/s.
- Pri maksimalni dovoljeni koti 511 m.n.v. je minimalna vrednost iztoka iz akumulacije pri Q_{500} enaka 192 m³/s.

V primerjavi z najbolj optimističnim obratovalnim scenarijem identifikacije in reakcije gre torej za znižanje pretoka za le 10 m³/s oziroma 20 m³/s, kar je napram konični vrednosti in potrebni vrednosti obratovalnega iztoka relativno malo. Hidravlični vpliv oziroma vpliv na obseg poplavljanja dolvodno pa je v tej fazi neznan in bo preverjen v kasnejših poglavjih s hidravličnim izračunom.

Lahko zaključimo, da je način obratovanja s zgodnjo identifikacijo dogodka in povečanjem projektnega iztoka primeren način obratovanja. Ob zgodnji identifikaciji dogodka je povečana vrednost projektnega iztoka dokaj podobna primeru idealnega obratovanja ob dogodku, dinamika gibanje gladine do kote 510 m.n.v. oziroma 511 m.n.v. pa je na vseh prikazanih grafih relativno položna v času doseganja končne

kote. To pomeni, da imamo nekaj varnostne rezerve oziroma nismo ves čas popolnoma na robu dovoljenih obratovalnih kot. Tak način obratovanja ima prednost v tem, da je predvidljiv, saj vzpostavi stacionarno stanje toka dolvodno. Ob povečanem dotoku pa imamo (ob dobrem sistemu meritev v porečju) dovolj časa za reakcijo in dodatno povečanje iztoka.

Glede na izračunane količine iztoka je smiselno razmisliti o povečanju maksimalne dovoljene kote iz 510 m.n.v. na 511 m.n.v., kar pri zgodnji identifikaciji zniža vrednost iztoka za cca 10 m³/s, pri zakasneli identifikaciji pa za 15-20 m³/s. Po drugi strani pa smo pri takšnem obratovanju v relativno večji nevarnosti nekontroliranega prelivanja, zato je tudi ohranjanje kote 510 m.n.v. zaradi varnosti razumljiv pristop. Opazno je tudi, da bi hipotetičen dvig gladine akumulacije do kote 512 m.n.v. imel zelo pozitiven učinek na obratovanje pregrade. To je posledica morfologije terena na lokaciji pregrade, kjer z vsakim dodatnim metrom pridobimo bistveno več volumna zaradi širitve doline. Zato bi bilo morda smiselno premisliti o možnosti morebitnega povečanja volumna akumulacije.

4.5 Varianta obratovanja 2: nespremenjeno obratovanje do prelivanja pri obratovalni koti

Drugi način obratovanja deluje na bistveno drugačen način, kot predvideno obratovanje po varianti 1. Pri tem predlogu/varianti obratovanja pri visokovodnih dogodkih, ki presegajo kapaciteto zadrževalnika, je predpostavljeno normalno obratovanje zadrževalnika (s projektnim iztokom 120 m³/s oziroma 140 m³/s), ne glede na vtok v akumulacijo. Ko pa je dosežena kota 510 m.n.v., se ta kota ohranja. Kota se ohranja z manevriranjem zaklopke in kontroliranim prelivanjem dotekle vode. Torej, ko je dosežena kota 510 m.n.v., je iztok iz akumulacije enak vtoku v akumulacijo. V projektni dokumentaciji je ta način obratovanja trenutno predviden. Pri varianti obratovanja 1 gre torej za konstanten pretok na iztoku iz akumulacije, pri varianti obratovanja 2 pa za konstantno koto gladine. Dodatno smo preverili vpliv maksimalne dovoljene kote 511 m.n.v. na obliko iztočnega hidrograma.

Pri tej varianti obratovanja so pomembne pretočne krivulje zaklopke na prelivu, podane v poglavju 3.1.3. Na podlagi teh krivulj sta podana sledeča maksimalna pretoka:

- pri koti 510 m.n.v. je možno maksimalno prelivati 380 m³/s,
- pri koti 511 m.n.v. je možno maksimalno prelivati 525 m³/s.

Obe vrednosti pretokov sta večji od konične vrednosti Q_{500} , ki je v sklopu naloge največja obravnavana konica. Pri takšnem načinu obratovanja torej z vidika prevodnosti in varnosti ni zadržkov, koto 510 m.n.v. je možno ohranjati brez nekontroliranega višanja gladine.

Prednost takšnega načina obratovanja je v tem, da je neodvisen od podatkov meritev in ne terja nobene odločitve obratovalca med visokovodnim dogodkom. Torej ko je dosežena maksimalna dovoljena kota, se koto ohranja. Slabost je v večjem maksimalnem pretoku, ki je nenadoma dosežen. Dejansko se del

visokovodnega vala nespremenjen širi dolvodno in povzroči poplavljanje. Torej pri takšnem načinu obratovanja odrežemo le del volumna naraščajoče veje visokovodnega dogodka.

V sklopu naloge so bili obravnavani naslednji primeri:

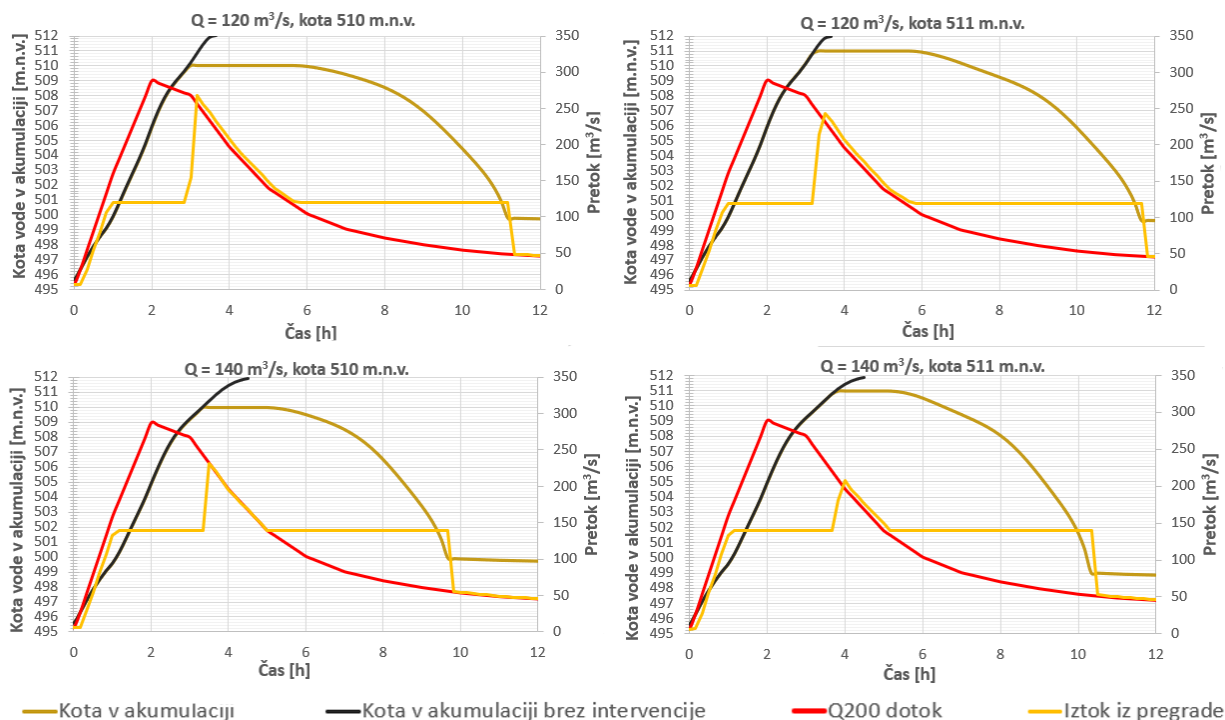
- dogodek Q_{200} , Q_{300} , Q_{400} in Q_{500} ,
- projektni iztok iz pregrade znaša $120 \text{ m}^3/\text{s}$ in $140 \text{ m}^3/\text{s}$,
- maksimalna dosežena koto znaša 510 m.n.v. in 511 m.n.v.

Potrebno je izpostaviti uporabljeno poenostavitev in sicer da je do trenutka začetka prelivanja iztok iz akumulacije konstanten. To je prikazano na spodnjih grafih.

Na varianto 2 obratovanja se bomo kasneje zaradi preglednosti sklicevali kot varianta obratovanja 2 – konstantna kota gladine akumulacije, na grafih pa bo označena tudi kot »var2« in »var2 – prelivanje«. Omeniti velja, da se »prelivanje« dogaja pri vseh obratovalnih primerih, saj se voda preliva preko zaklopke na prelivu pregrade. Z besedo »prelivanje« v kontekstu obratovalne variante 2 posebej poudarimo ohranjanje konstantne kote gladine in posledično prelivanje toliko vode, kot jo priteče v akumulacijo.

Spodnja slika 46 prikazuje vse štiri kombinacije pri dogodku Q_{200} :

- projektni iztok $120 \text{ m}^3/\text{s}$, ohranjamo koto 510 m.n.v.
- projektni iztok $140 \text{ m}^3/\text{s}$, ohranjamo koto 510 m.n.v.
- projektni iztok $120 \text{ m}^3/\text{s}$, ohranjamo koto 511 m.n.v.
- projektni iztok $140 \text{ m}^3/\text{s}$, ohranjamo koto 511 m.n.v.



Slika 46: Varianta 2 obratovanja, Q_{200}

Dosežene so naslednje konične vrednosti pretokov:

- iztok 120 m³/s, kota 510 m.n.v.: 267 m³/s;
- iztok 120 m³/s, kota 511 m.n.v.: 244 m³/s;
- iztok 140 m³/s, kota 510 m.n.v.: 232 m³/s;
- iztok 140 m³/s, kota 511 m.n.v.: 208 m³/s.

Pri Q_{200} povečan iztok/prelivanje traja do 3 ure.

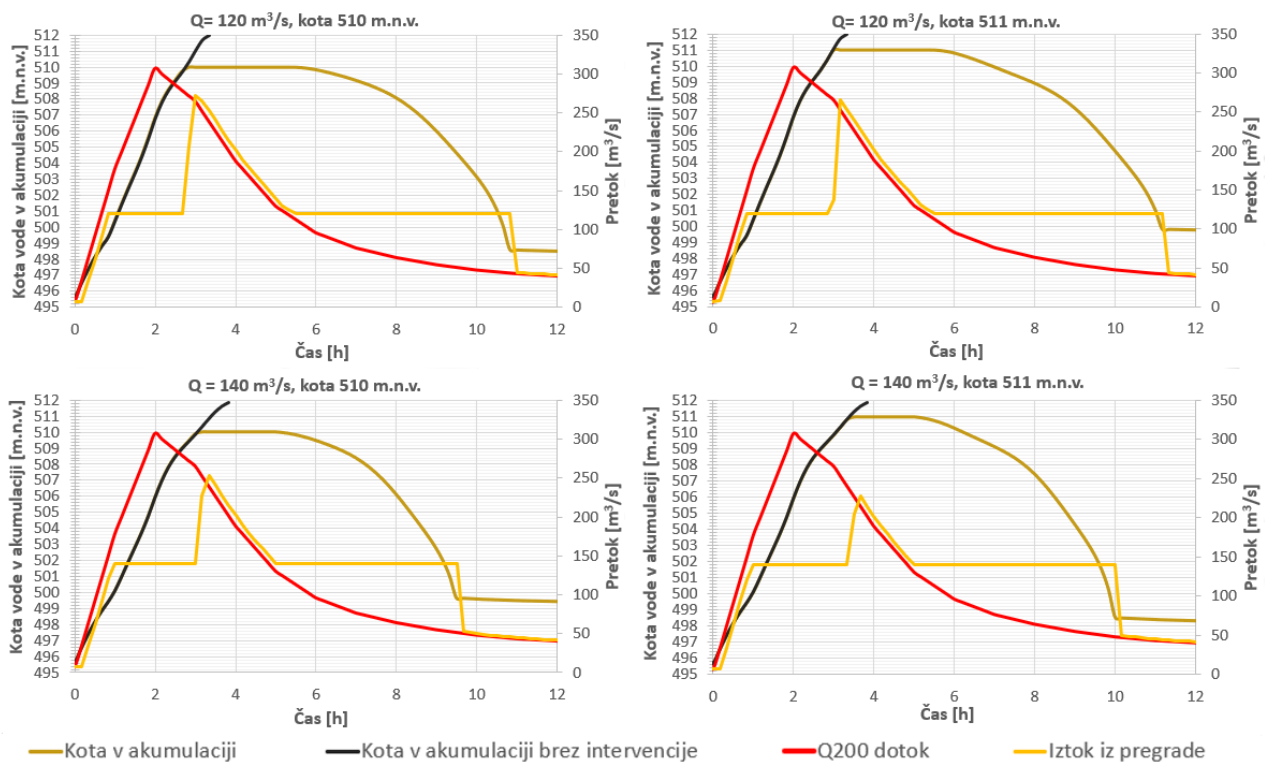
Pri dogodku Q_{200} , ki je po količini volumna bližje Q_{100} kot pa ostalim dogodkom, je dogajanje pri različnih pretokih in dovoljenih kotah zelo različno. To je posledica manjših pretokov, kot pri ostalih dogodkih. Razlika med maksimalnim iztokom 267 m³/s in najmanjšim iztokom 208 m³/s je v 1 metru višine vode v akumulaciji in 20 m³/s večjem iztoku. Pri večjem iztoku in višji koti odrežemo/zadržimo zelo velik poplavnega vala. V prejšnjem poglavju smo določili pretok 164 oz. 154 m³/s za ohranjanje varnosti pregrade glede na maksimalno dovoljeno koto akumulacije. Pretok 140 m³/s je dokaj blizu, zato ima v tem primeru obratovanje z večjim iztokom opazen vpliv.

V primeru Q_{200} opazimo tudi veliko razliko v tem, ali smo se za dogodek preventivno pripravili in povečali iztok iz 120 m³/s na 140 m³/s (razlika do 35 m³/s v konici).

Iz varnostnih razlogov in učinkovitosti lahko zaključimo, da je pri takšni varianti obratovanja/reakcije na visokovodne dogodke boljše povečati iztok, kot dopustiti višjo koto na pregradi.

Spodnja slika 47 prikazuje vse štiri kombinacije pri dogodku Q_{300} :

- projektni iztok $120 \text{ m}^3/\text{s}$, ohranjamo koto 510 m.n.v.
- projektni iztok $140 \text{ m}^3/\text{s}$, ohranjamo koto 510 m.n.v.
- projektni iztok $120 \text{ m}^3/\text{s}$, ohranjamo koto 511 m.n.v.
- projektni iztok $140 \text{ m}^3/\text{s}$, ohranjamo koto 511 m.n.v.



Slika 47: Varianta 2 obratovanja, Q_{300}

Dosežene so naslednje konične vrednosti pretokov:

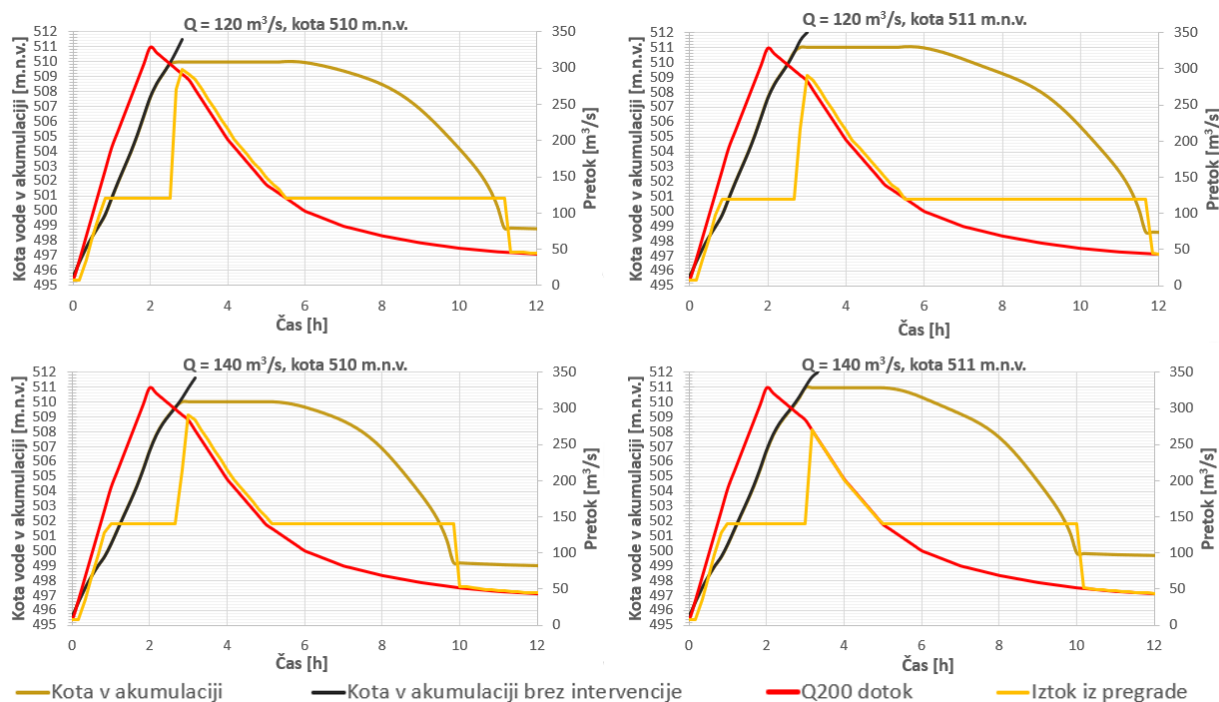
- iztok $120 \text{ m}^3/\text{s}$, koto 510 m.n.v.: $273 \text{ m}^3/\text{s}$;
- iztok $120 \text{ m}^3/\text{s}$, koto 511 m.n.v.: $266 \text{ m}^3/\text{s}$;
- iztok $140 \text{ m}^3/\text{s}$, koto 510 m.n.v.: $253 \text{ m}^3/\text{s}$;
- iztok $140 \text{ m}^3/\text{s}$, koto 511 m.n.v.: $227 \text{ m}^3/\text{s}$.

Pri Q_{300} povečan pretok/prelivanje traja do 3 ure.

Podobno kot pri Q_{200} , a v manjšem obsegu, se kažejo razlike med parametri obratovanja. V prejšnjem poglavju smo določili potreben pretok $178 \text{ m}^3/\text{s}$ oz. $168 \text{ m}^3/\text{s}$ za obratovanje pri Q_{300} . Razlika med obratovanjem s $120 \text{ m}^3/\text{s}$ in $140 \text{ m}^3/\text{s}$ se odraža v $20 \text{ m}^3/\text{s}$ večji konici. Idealen primer je znova iztok $140 \text{ m}^3/\text{s}$ in dosežena koto 511 m.n.v. pred pričetkom prelivanja pregrade, a lahko znova zaključimo, da z vidika varnosti in učinkovitosti največ dosežemo z večjim projektnim iztokom iz pregrade in ne z višjo koto akumulacije.

Spodnja slika 48 prikazuje vse štiri kombinacije pri dogodku Q_{400} :

- projektni iztok $120 \text{ m}^3/\text{s}$, ohranjamo koto 510 m.n.v.
- projektni iztok $140 \text{ m}^3/\text{s}$, ohranjamo koto 510 m.n.v.
- projektni iztok $120 \text{ m}^3/\text{s}$, ohranjamo koto 511 m.n.v.
- projektni iztok $140 \text{ m}^3/\text{s}$, ohranjamo koto 511 m.n.v.



Slika 48: Varianta 2 obratovanja, Q_{400}

Dosežene so naslednje konične vrednosti pretokov:

- iztok $120 \text{ m}^3/\text{s}$, koto 510 m.n.v.: $299 \text{ m}^3/\text{s}$;
- iztok $120 \text{ m}^3/\text{s}$, koto 511 m.n.v.: $291 \text{ m}^3/\text{s}$;
- iztok $140 \text{ m}^3/\text{s}$, koto 510 m.n.v.: $283 \text{ m}^3/\text{s}$;
- iztok $140 \text{ m}^3/\text{s}$, koto 511 m.n.v.: $270 \text{ m}^3/\text{s}$.

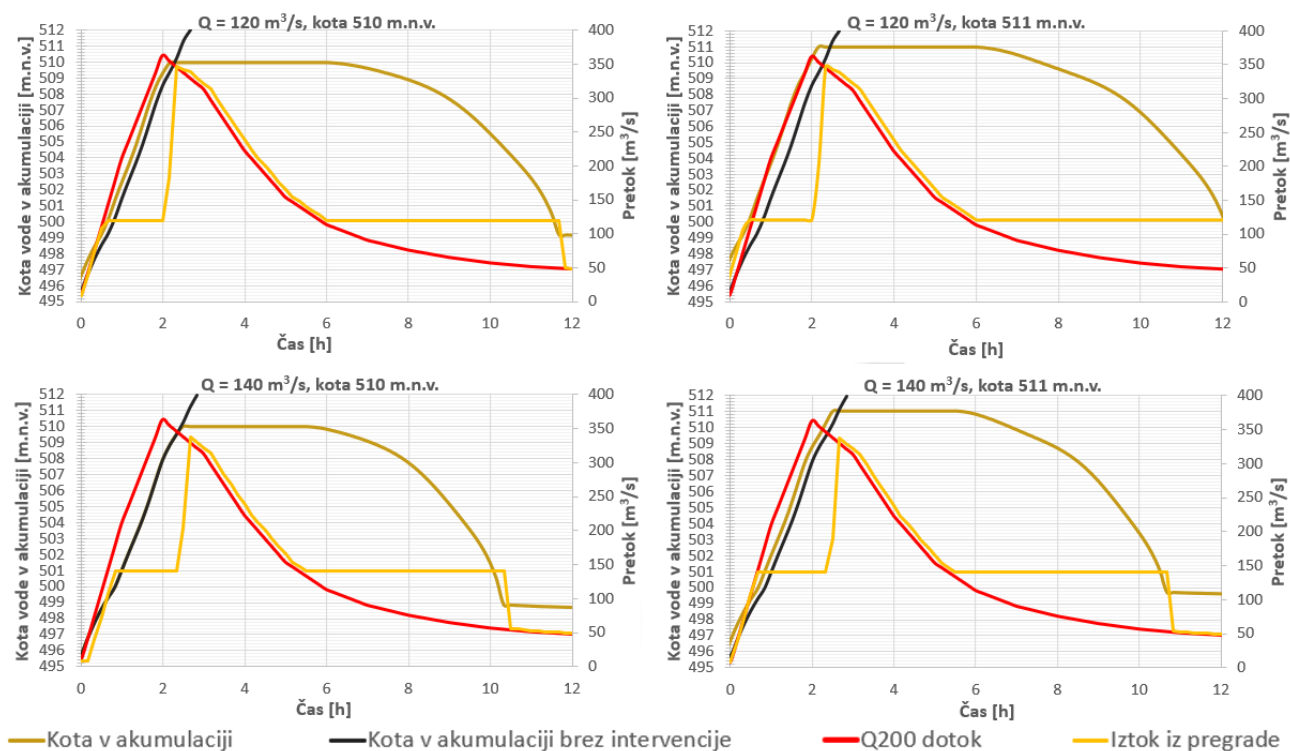
Pri Q_{400} povečan pretok/prelivanje traja do 3 ure.

V primerjavi s prejšnjima primeroma je med kombinacijami manjše razhajanje, do $29 \text{ m}^3/\text{s}$. Omeniti je potrebno 45 minutni zamik v začetku prelivanja med skrajnima primeroma. Pri iztoku $120 \text{ m}^3/\text{s}$ in koti 510 m.n.v. se prelivanje začne cca 45 minut po konici pretoka, prelivamo pa koničnih $299 \text{ m}^3/\text{s}$, kar je zelo blizu vrednosti Q_{300} .

Dodaten pokazatelj resnosti razmer pri Q_{400} prikazuje razlika med črno črto (kota v akumulaciji brez povečanja iztoka) in oker črto (kota v akumulaciji z ohranjanjem maksimalne kote). Ko dosežemo koto 510 ali 511 m.n.v., bi brez ukrepanja v obeh primerih dosegli koto 512 v manj kot 25 minutah. Pri iztoku $120 \text{ m}^3/\text{s}$ je potrebnih 25 minut med koto 510 in 512 in le cca 15 minut med 511 in 512. Ti podatki znova govorijo v prid ohranjanju kote 510 m.n.v. in preventivnem večanju obratovalnega iztoka, vsaj na $140 \text{ m}^3/\text{s}$. Kljub visokim koničnim vrednostim iztoka pa vseeno s takim režimom zadržimo celotno naraščajočo vejo Q_{400} .

Spodnja slika 49 prikazuje vse štiri kombinacije pri dogodku Q_{500} :

- projektni iztok $120 \text{ m}^3/\text{s}$, ohranjamo koto 510 m.n.v.
- projektni iztok $140 \text{ m}^3/\text{s}$, ohranjamo koto 510 m.n.v.
- projektni iztok $120 \text{ m}^3/\text{s}$, ohranjamo koto 511 m.n.v.
- projektni iztok $140 \text{ m}^3/\text{s}$, ohranjamo koto 511 m.n.v.



Slika 49: Varianta 2 obratovanja, Q_{500}

Dosežene so naslednje konične vrednosti pretokov:

- iztok $120 \text{ m}^3/\text{s}$, koto 510 m.n.v.: $346 \text{ m}^3/\text{s}$;
- iztok $120 \text{ m}^3/\text{s}$, koto 511 m.n.v.: $343 \text{ m}^3/\text{s}$;
- iztok $140 \text{ m}^3/\text{s}$, koto 510 m.n.v.: $338 \text{ m}^3/\text{s}$;
- iztok $140 \text{ m}^3/\text{s}$, koto 511 m.n.v.: $335 \text{ m}^3/\text{s}$.

Pri Q_{500} povečan pretok/prelivanje traja 4 ure.

Pri dogodku Q_{500} zaradi velikih volumnov in hitrega naraščanja pretoka velikost projektnega iztoka ali izbrana kota praktično nimata vpliva na konično vrednost iztoka ali na zakasnitev začetka povečanega pretoka. Z vidika vrednosti koničnega pretoka je varianta 2 (konica cca $340 \text{ m}^3/\text{s}$) bistveno slabša kot varianta 1 (najmanjši možni pretok $213 \text{ m}^3/\text{s}$ oziroma $203 \text{ m}^3/\text{s}$).

Zaradi omenjenih dejavnikov lahko za to varianto obratovanja zaključimo, da pri prelivanju čez pregrado nima smisla ohranjati koto 511 m.n.v., temveč ohranjamo koto 510 m.n.v. Pri dogodku Q_{500} je na nek način dosežena kapaciteta zadrževanja pregrade s takšnim obratovalnim režimom, saj moramo praktično takoj po konici visokovodnega vala začeti prelivati, konico zmanjšamo le za ca. $20 \text{ m}^3/\text{s}$. Prav tako velja opomniti, da je kapaciteta prelivanja preko zaklopke na koti 510 m.n.v. enaka $380 \text{ m}^3/\text{s}$. Pri dogodkih nad Q_{500} je edini način za bolj učinkovito obratovanje torej zgodnja identifikacija dogodka in kontrolirano izpuščanje večjih količin vode (prej opisana varianta 1).

4.6 Iztočni hidrogrami za nadaljnje hidravlične analize

V poglavjih 4.4. in 4.5 sta bila podana dva načina obratovanja zadrževalnika. Zaradi preglednosti in izračunov, ki sledijo, so v tem poglavju združeni iztočni hidrogrami za Q_{200} , Q_{300} , Q_{400} in Q_{500} , ki upoštevajo različna načina obratovanja (kasneje: var1 kot varianta obratovanja 1 – konstanten pretok in var2 kot varianta obratovanja 2 – konstantna gladina) in različne parametre – osnovni obratovalni iztok ($120 \text{ m}^3/\text{s}$ in $140 \text{ m}^3/\text{s}$) in maksimalno koto na pregradi (510 m.n.v. in 511 m.n.v.).

Pri analizi rezultatov oziroma velikosti konic iztoka za varianto obratovanja 1 in varianto obratovanja 2 pri visokovodnih dogodkih smo se opredelili predvsem do velikosti konice iztoka iz akumulacije. Pri varianti obratovanja 1 se je izkazalo, da je smiselno razmisliti o višji dovoljeni koti akumulacije na pregradi, pri varianti 2 pa nasprotno. Kot je razvidno iz spodnjih tabel, ima varianta 1 bistveno daljši čas povečanega iztoka, varianta 2 pa krajši čas z višjo konico. Kaj je bolj ugodno z vidika obsega poplavljenosti dolvodno, v tej fazi še ni jasno. Zato so v tem poglavju zbrani iztočni hidrogrami, ki bodo v kasnejših poglavjih vhodni podatek za hidravlično analizo obsega poplav pri posameznem načinu obratovanja.

Zaradi prevelikega obsega smo se v magistrski nalogi morali omejiti pri številu scenarijev, ki bodo analizirani. Zato smo vse scenarije/primere obratovanja za varianto 1, ki dosegajo koto 511 m.n.v. ali 512 m.n.v., za nadaljnje analize **opustili**. Poleg omejitev v obsegu naloge je razlog tudi v tem, da je v obstoječi zasnovi pregrade in njenega delovanja maksimalna dovoljena koto 510 m.n.v., 511 m.n.v. pa je le za izredne dogodke Q_{10000} ali več. V sklopu magistrske naloge pa ni naša naloga na novo definirati

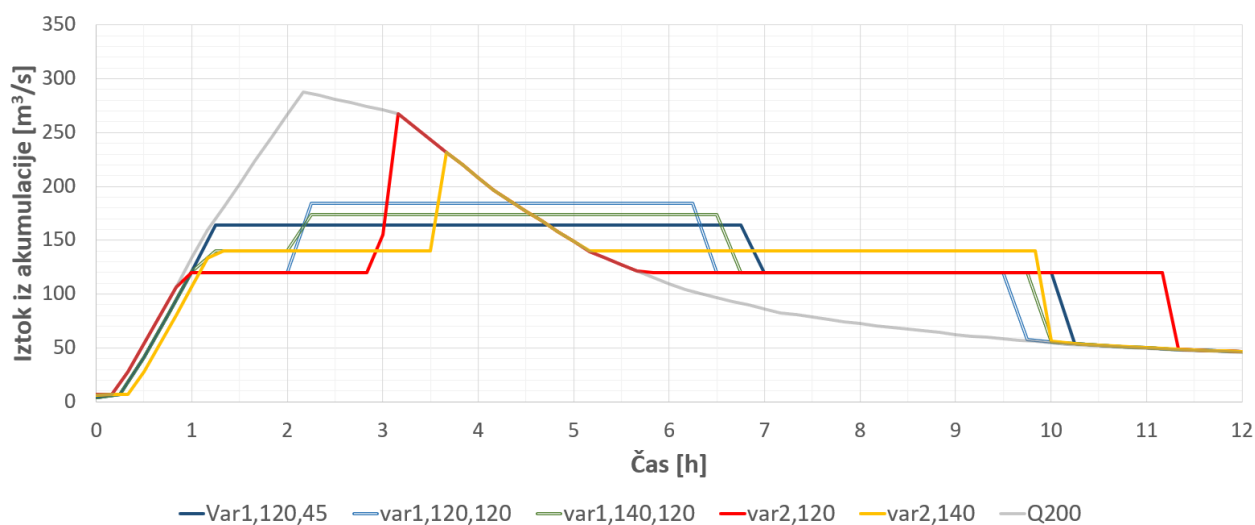
parametre pregrade, temveč v sklopu že določenih parametrov analizirati delovanje pregrade pri visokovodnih dogodkih.

Pri varianti 2 se je v prejšnjem poglavju izkazalo, da ohranjanje kote 511 m.n.v. in prelivanje odvečne vode zaradi varnosti in majhnega učinka na zmanjšanje konice iztoka ne prispeva bistveno k izboljšanju poplavne varnosti območij dolvodno. Zato te primere lahko opustimo.

Prikazani so naslednji iztočni hidrogrami za posamezen dogodek:

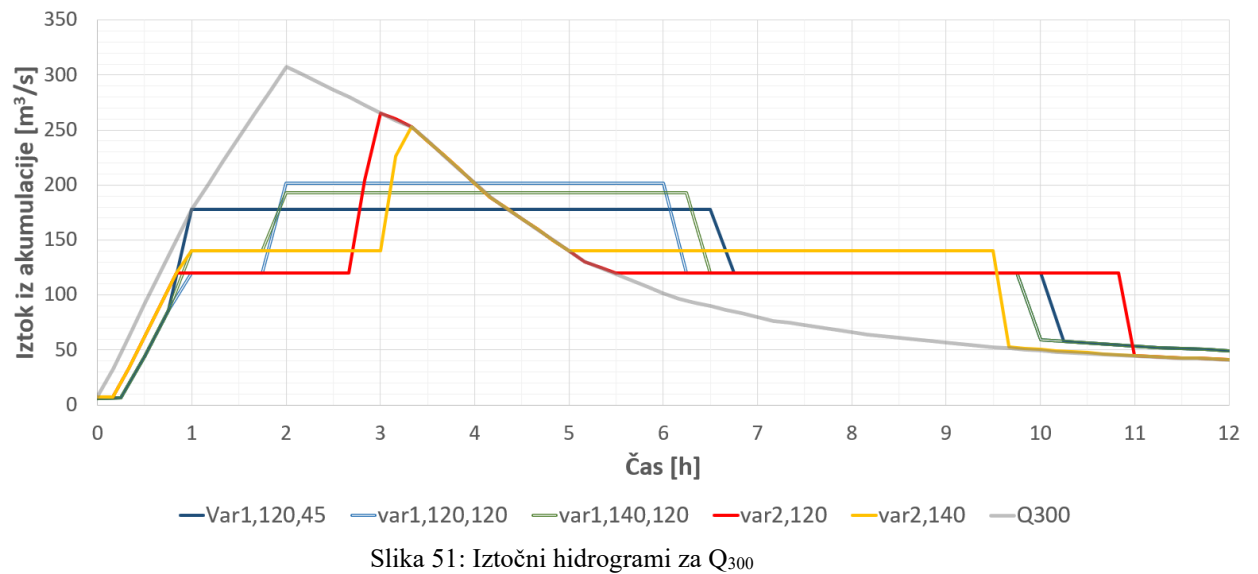
- Visokovodni val brez pregrade/zadrževanja,
- Takojšnja identifikacija dogodka (po 45 minutah) in povečanje iztoka (na legendi »var1,120,45«). Maksimalna dosežena kota na pregradi znaša 510 m.n.v.
- Zakasnela identifikacija dogodka (po 120 minutah) ob obratovalnem pretoku 120 m³/s in povečanje iztoka (na legendi »var1,120,120«). Maksimalna dosežena kota na pregradi znaša 510 m.n.v.
- Zakasnela identifikacija dogodka (po 120 minutah) ob obratovalnem pretoku 140 m³/s in povečanje iztoka (na legendi »var1,140,120«). Maksimalna dosežena kota na pregradi znaša 510 m.n.v.
- Nemoteno obratovanje s pretokom 120 m³/s in prelivanje dotekle vode, ko je dosežena kota akumulacije 510 m.n.v. (na legendi »var2,120«).
- Nemoteno obratovanje s pretokom 140 m³/s in prelivanje dotekle vode, ko je dosežena kota akumulacije 510 m.n.v. (na legendi »var2,140«).

Spodnja slika 50 prikazuje iztočne hidrograme za dogodek Q₂₀₀.

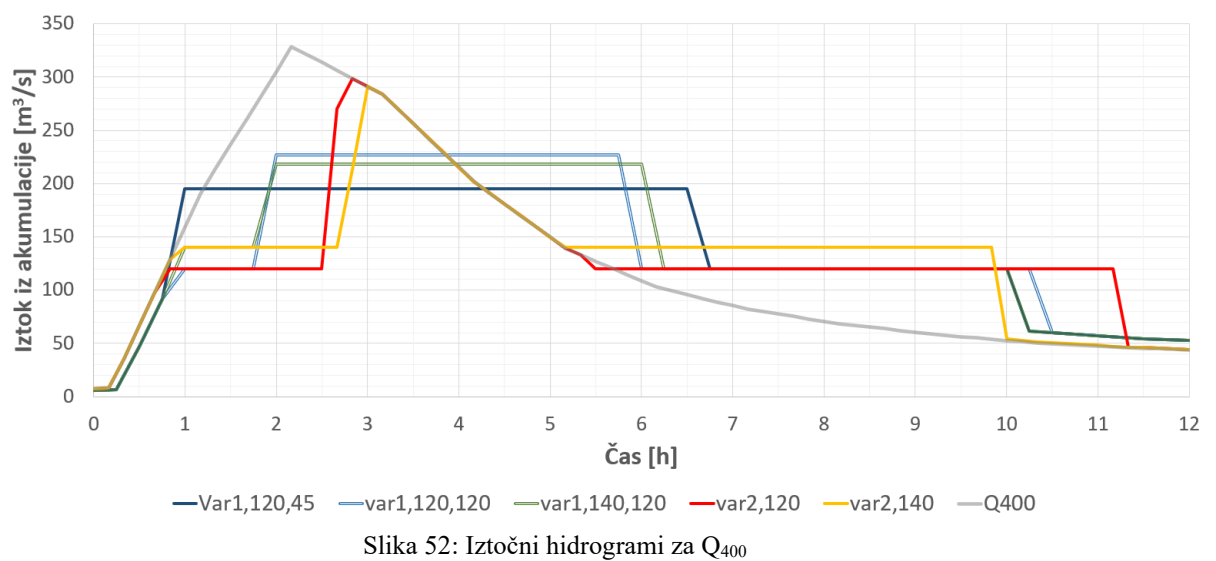


Slika 50: Iztočni hidrogrami za Q₂₀₀

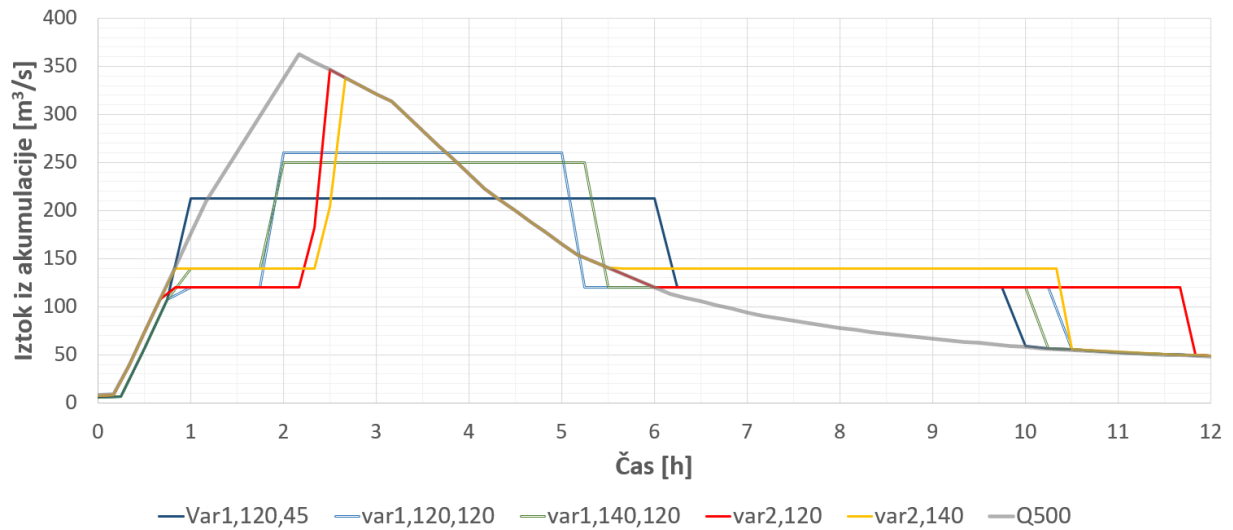
Spodnja slika 51 prikazuje iztočne hidrograme za dogodek Q_{300} .



Spodnja slika 52 prikazuje iztočne hidrograme za dogodek Q_{400} .



Spodnja slika 53 prikazuje iztočne hidrograme za dogodek Q_{500} .



Slika 53: Iztočni hidrogrami za Q_{500}

Za vse opisane dogodke so bili komentarji in vrednosti pretoka že podani. Združitev izhodnih hidrogramov obeh variant obratovanja pa nudi primerjavo med njima. Pozna reakcija na dogodek in povečanje konstantne vrednosti iztoka je z večanjem povratne dobe po obliki hidrograma vse bolj podobna varianti 2 obratovanja, kot pa zgodnji identifikaciji. Opazimo tudi cca 2-urno razliko med odločitvijo za povečanje pretoka ob zgodnji identifikaciji po varianti obratovanja 1 in začetkom prelivanja po obratovalni varianti 2, a ob tem opazimo tudi, kako zgodaj v visokovodnem dogodku se moramo odločiti za ta korak – vrednosti pretoka so takrat še nekje na cca tretjini konične vrednosti, torej gre za zahtevno in tvegano odločitev. V praktično vseh primerih dogodek traja maksimalno 12 ur. Po varianti obratovanja 1 je konec povišanih vod zaradi delovanja razdževalnika najprej pri Q_{500} , kar je posledica zelo hitrega naraščanja pretoka, kar za ohranjanje varnosti pregrade zahteva zelo velike iztoke, ki pa tudi pomenijo hitrejše praznjenje akumulacije.

Vsi podani hidrogrami bodo v kasnejših poglavjih vneseni v hidravlični model in analizirani.

4.7 Scenariji porušitve pregrade

Pri vseh obratovalnih primerih smo se z namenom ohranjanja varnosti pregrade omejili na koto 510 m.n.v. oziroma smo tudi preverili vpliv povečanja meje na koto 511 m.n.v. Potrebno pa je preveriti, kakšna je škoda v primeru porušitve pregrade, da imamo primerjavo med obratovalnimi primeri, visokovodnimi valovi brez zadrževanja in med poružitvami pregrade. To nam bo omogočilo boljši pregled nevarnosti in oceno preprečene škode, kar je oboje lahko parameter pri odločanju o obratovanju. Prav tako se je potrebno zavedati škode ob poružitvi pregrade ali delov hidromehanske opreme, kar je možno vodilo pri sprejemanju odločitev. Obravnavani primeri porušitve nudijo tudi primere, ko pride do odpovedi zaklopke ali talnega izpusta, kar je potrebno upoštevati pri obratovanju s to opremo.

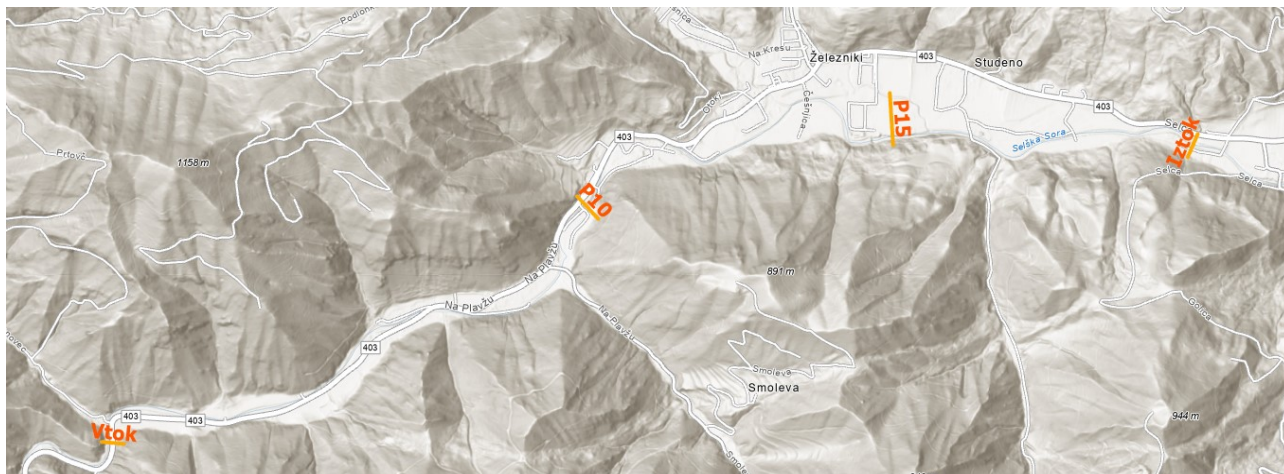
V primeru pregrade Pod Sušo so bili izračunani trije hidrogrami poplavnih dogodkov s strani študije FGG v sklopu idejnega projekta (IZVO-R, 2010). V okviru magistrske naloge smo v hidravličnem modelu izračunali vse tri:

- Poružitveni primer 1: nenadna poružitev oz. nenadzorovano odprtje zaklopke pri koti gladine 510 m.n.v.: scenarij predpostavlja, da se na pregradi vzdržuje koto 510 m.n.v., vtok v zadrževalnik in iztok iz zadrževalnika znašata oba 160 m³/s. V takšnem stanju se v eni minuti poruši zapornica na talnem izpustu, kar pomeni hipno delno poružitev pregrade.
- Poružitveni primer 2: nenadna poružitev zaklopke pri koti gladine 512 m.n.v.: scenarij predpostavlja blokado talnega izpusta že ob začetku visokovodnega dogodka in naraščanje gladine do kote 512 m.n.v. Do takrat je predpostavljeno, da je vtok v akumulacijo že minimalen, iztok pa znaša 130 m³/s. Ko kota doseže 512 m.n.v., je predpostavljena poružitev zaklopke oz. hipno odpiranje, kar pomeni delno poružitev pregrade.
- Poružitveni primer 3: postopna poružitev dela pregrade nad temeljnim izpustom zaradi prelitja krone pregrade: primer ima enake predpostavke kot poružitveni primer 2, le da tokrat pride do počasnega rušenja pregrade zaradi erozije/prelivanja pregrade. Do konice poružitve v tem primeru pride cca 20 minut po začetku rušenja.

V sklopu magistrske naloge smo vtočne hidrograme za vse 3 primere poružitev vnesli v model in jih simulirali. V tem poglavju je predstavljena propagacija poružitvenega vala, ko se ta širi dolvodno od začetka modela pa do iztoka modela. Obseg poplavljenih površin pa je prikazan v naslednjih poglavjih. V hidravličnem modelu smo upoštevali nizke vrednosti pritokov, saj se poružitve ob predpostavkah zgodijo proti koncu visokovodnega dogodka.

Za potrebe prikaza propagacije poplavnih valov in njihove sploščitve smo si izbrali štiri lokacije: vtočni profil, »profil 10«, »profil 15« in iztočni profil. Profil 10 je na koncu dolinskega dela gorvodno od mesta Železniki, profil 15 pa je takoj za poplavno ogroženim delom mesta Železniki. Iztočni profil je na koncu

modela, kjer se dolina zoži, zato se velika večina pretoka tu vrne v strugo. S takšnim izborom profilov zajamemo sploščitev poplavnega vala na območju modela. Spodnja slika 54 prikazuje lokacije izbranih prečnih profilov:

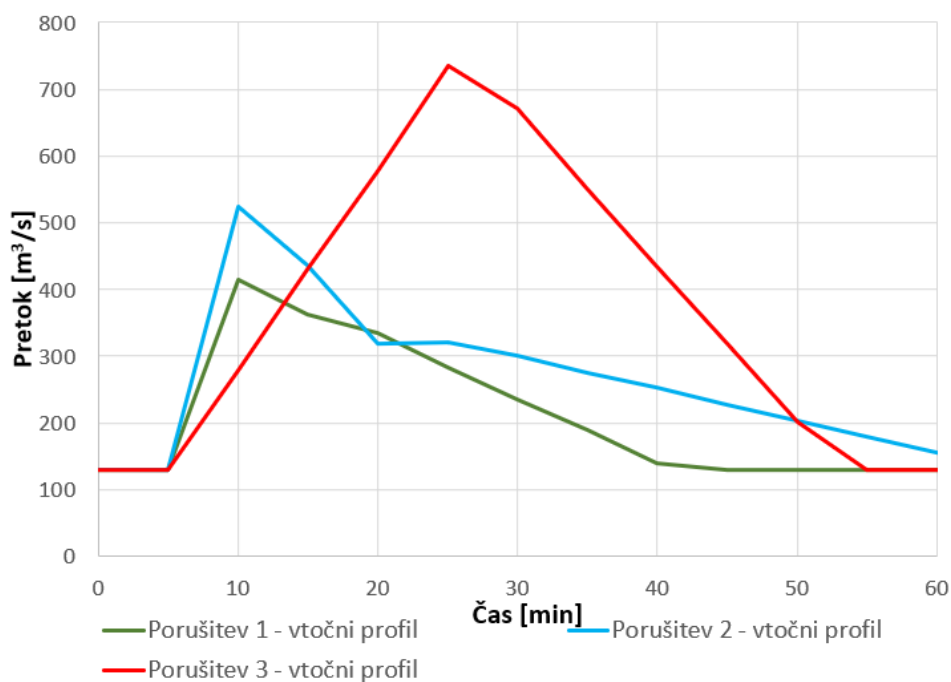


Slika 54: Izbrane lokacije za prikaz sploščitve porušitvenih poplavnih valov

Vsakega od profilov smo razdelili še na profil čez celotno poplavno območje in profil zgolj v strugi, z namenom prikaza deleža vode, ki dejansko poplavlja.

Hidravlični izračuni so bili zaradi velikih vrednosti pretoka in hitrih sprememb znova izvedeni s faktorjem theta (poglavje 3.1.4.) 1 in 0.8. Ker med rezultati izven območij pragov in jezov (ki pa so v model vneseni poenostavljeno in niso točni za lokalno dogajanje) ni bilo odstopanj, smo za rezultate uporabili faktor theta 1.0.

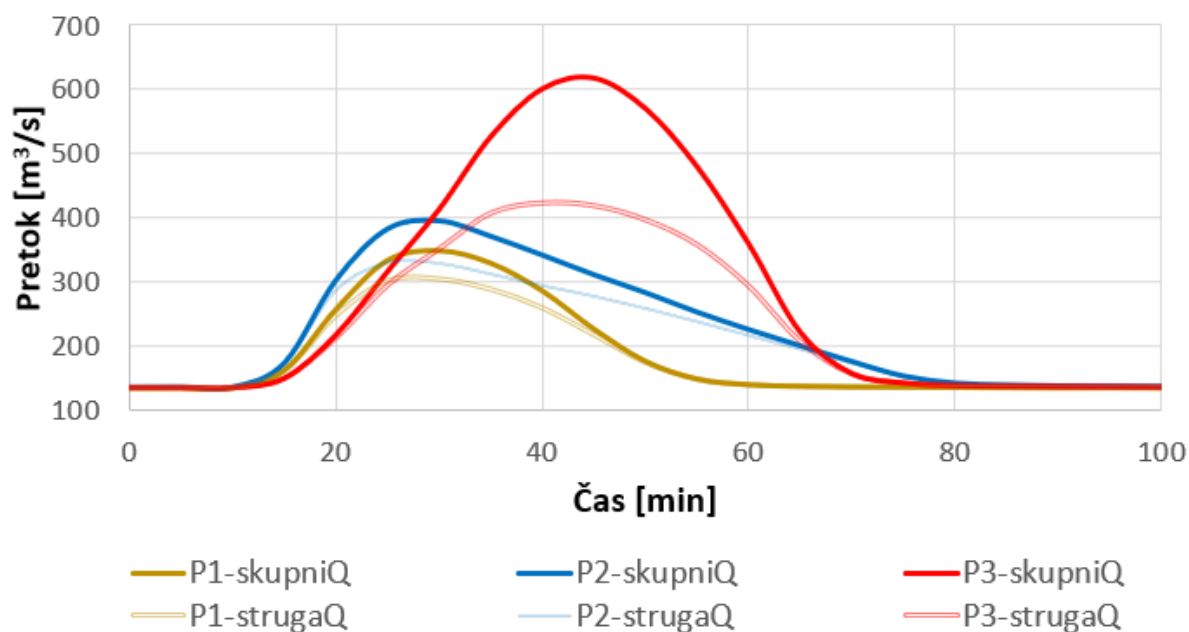
Spodnja slika 55 prikazuje vtočne hidrograme/hidrograme porušitev pregrade, kot jih podaja FGG (2010):



Slika 55: Hidrogrami porušitev pregrade

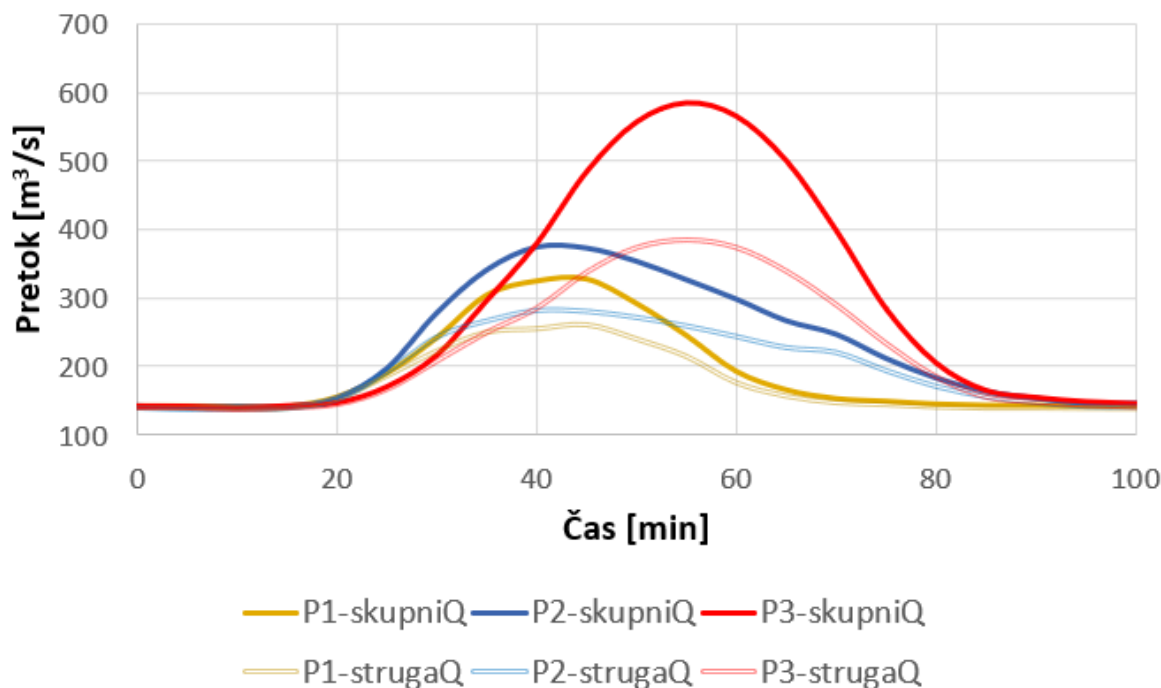
Pri hipnih porušitvah 1 in 2 opazimo zelo strmo naraščanje in konični vrednosti cca. 420 m³/s in 530 m³/s. Pri porušitvi celotne pregrade pa v dobrih 20 minutah pretok naraste do cca. 740 m³/s, kar je velikanska vrednost, ki je 2x večja od konice Q_{500} . Vsi trije primeri porušitev imajo večje konične vrednosti od obravnavanih dogodkov.

Spodnja slike 56 prikazuje pretok čez profil 10 ločeno za območje struge in celoten pretok. Rezultati so dobljeni iz hidravličnega modela.



Slika 56: Porušitveni primeri v profilu 10

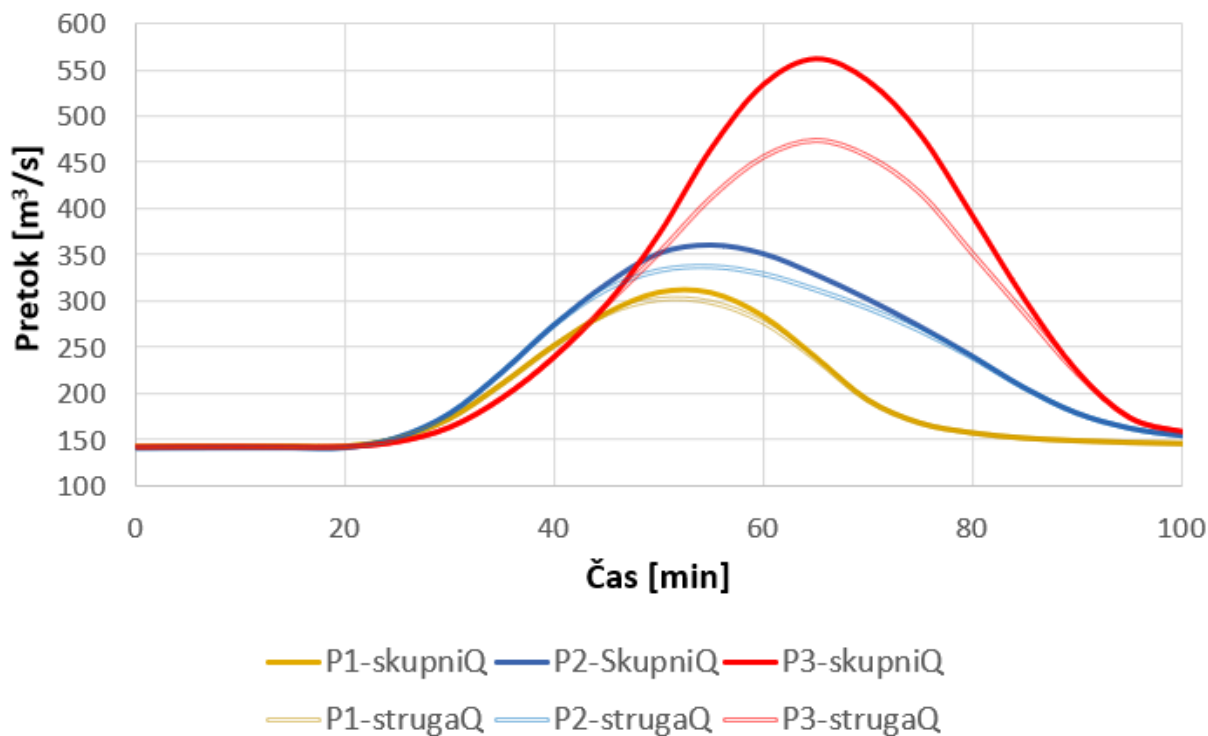
V primerjavi z vtočnim profilom so konice upadle za ca. $100 \text{ m}^3/\text{s}$, torej se je poplavni val sploščil. Razdalja med vtočnim profilom in profilom 10 znaša 2970 metrov po osi Selške Sore. Konične vrednosti pa vseeno ostajajo visoke. Takšna razdalja je za sploščitev porušitvenih valov sicer majhna, še posebej, če upoštevamo, da odsek med vtokom in profilom 10 poteka v celoti po dokaj ozki dolini. V tej dolini pa je precej hiš, ki so v vseh primerih porušitev zaradi svoje lege najbolj ogrožene. Spodnja slika 57 prikazuje pretok čez profil 15 in sicer ločeno za območje struge in celoten pretok.



Slika 57: Porušitveni primeri v profilu 15

Bistvenih sprememb v obliki porušitvenega vala ni. Konica se zmanjša za cca 20 m³/s. Majhna sploščitev je pričakovana, saj je razdalja med P10 in P15 zgolj 1900 metrov, med njima pa razen manjšega ovinka na južnem delu Železnikov ni izrazitih sprememb v strugi.

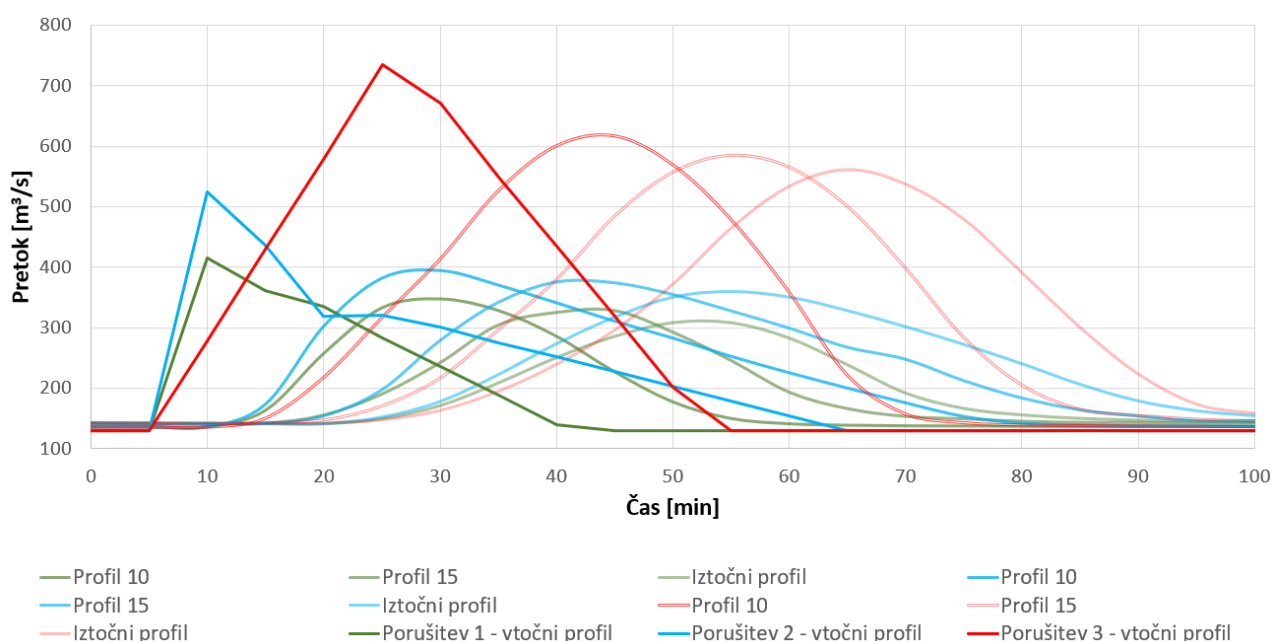
Spodnja slika 58 prikazuje pretok v iztočnem profilu modela.



Slika 58: Porušitveni primeri v iztočnem profilu

Spremembe napram prejšnjim profilom ostajajo majhne, saj na poti propagacije valov zopet ni večjih ovir, razdalja od P15 pa znaša približno 1500 metrov. Poleg tega se zaradi zožitve doline velik del vode vrne v območje struge. Na iztočnem profilu vsi trije primeri porušitev povzročajo velike pretoke: cca 300 m³/s pri porušitvi 1, 350 m³/s pri porušitvi 2 in 550 m³/s pri porušitvi 3. Opozorimo, da gre tu zgolj za vrednost pretoka, ki ga povzročijo porušitveni primeri, brez upoštevanja dolvodnih pritokov.

Spodnja slika 59 prikazuje vse tri porušitvene primere (skupni pretok čez profile) na istem grafu, na vseh štirih izbranih profilih:



Slika 59: Propagacija vseh treh porušitvenih primerov

Iz zgornjega grafa lahko opazimo, da se po začetni sploščitvi porušitvenega vala njegova oblika pri potovanju čez Železnike minimalno spreminja. Ocenimo lahko tudi hitrost gibanja konice motnje:

- Konica vsled porušitve 1 od vtočnega do iztočnega profila potuje 40 minut,
- Konica vsled porušitve 2 od vtočnega do iztočnega profila potuje v 42 minut,
- Konica vsled porušitve 3 od vtočnega do iztočnega profila potuje v 39 minut.

Vsi trije dogodki potujejo cca 40 minut, kar pomeni povprečno hitrost gibanja motnje cca 9,6 km/h oziroma 2,7 m/s. Vrednosti hitrosti v strugi so večje, tudi nad 7 m/s, v inundacijah pa manjše in redko presežejo 2 m/s. Rezultati se ujemajo s študijo FGG in kasneje narejeno hidravlično študijo porušitve zadrževalnika (HSE-Invest, 2022). Omenjena hidravlična študija porušitve zadrževalnika sicer opisuje območje dolvodno od Železnikov in do sotočja s Poljansko Soro. Na odseku med Železniki in Selcami (kjer se naš model konča) je ujemanje med obsegom poplav in hitrostmi dobro, kar služi kot validacija izračunanih porušitvenih primerov.

Obseg in ocena škode ob porušitvah so prikazani in analizirani v naslednjih poglavjih.

5 REZULTATI HIDRAVLIČNEGA MODELA

5.1 Vhodni podatki v hidravlični model

Hidrogrami, prikazani v poglavju 4.6, so bili vneseni v hidravlični model (opisan v poglavju 3.1.4). Namen izračuna v hidravličnem modelu je določitev obsega poplav pri posameznem scenariju. Iz obsega poplav sledi ocena škode, ki skupaj z obsegom poplav in zahtevnostjo obratovalnega primera služi kot izhodišče za določitev najbolj ugodnega obratovalnega režima zadrževalnika.

Analiziranih je bilo 24 dogodkov oziroma scenarijev, 6 za vsako povratno dobo (Q_{200} , Q_{300} , Q_{400} in Q_{500}). Vhodni hidrogrami so prikazani v poglavju 4.6. Spodnja tabela 12 je kazalo po izračunanih scenarijih, ki so oštevilčeni od 1 do 24. Trije porušitveni primeri so bili tudi modelirani in se imenujejo P1, P2 in P3.

Tabela 12: Pregled izračunanih scenarijev

Številka scenarija	Opis scenarija
P1	Porušitveni primer 1
P2	Porušitveni primer 2
P3	Porušitveni primer 3
1	Q_{200} brez zadrževanja.
2	Q_{200} , takojšnje ukrepanje po varianti obratovanja 1 in povečanje iztoka na $164 \text{ m}^3/\text{s}$, dosežena kota 510 m.n.v.
3	Q_{200} , ukrepanje na vrhu visokovodnega dogodka po varianti obratovanja 1, do takrat iztok $120 \text{ m}^3/\text{s}$. Iztok $184 \text{ m}^3/\text{s}$, dosežena kota 510 m.n.v.
4	Q_{200} , ukrepanje na vrhu visokovodnega dogodka po varianti obratovanja 1, do takrat iztok $140 \text{ m}^3/\text{s}$. Iztok m^3/s m^3/s , dosežena kota 510 m.n.v.
5	Q_{200} , ohranjanje kote 510 m.n.v. po varianti obratovanja 2, prej iztok $120 \text{ m}^3/\text{s}$. $Q_{\text{max}} = 268 \text{ m}^3/\text{s}$.
6	Q_{200} , ohranjanje kote 510 m.n.v. po varianti obratovanja 2, prej iztok $140 \text{ m}^3/\text{s}$. $Q_{\text{max}} = 231 \text{ m}^3/\text{s}$.
7	Q_{300} brez zadrževanja.
8	Q_{300} , takojšnje ukrepanje po varianti obratovanja 1 in povečanje iztoka na $178 \text{ m}^3/\text{s}$, dosežena kota 510 m.n.v.
9	Q_{300} , ukrepanje na vrhu visokovodnega dogodka po varianti obratovanja 1, do takrat iztok $120 \text{ m}^3/\text{s}$. Iztok $202 \text{ m}^3/\text{s}$, dosežena kota 510 m.n.v.
10	Q_{300} , ukrepanje na vrhu visokovodnega dogodka po varianti obratovanja 1, do takrat iztok $140 \text{ m}^3/\text{s}$. Iztok $193 \text{ m}^3/\text{s}$, dosežena kota 510 m.n.v.
11	Q_{300} , ohranjanje kote 510 m.n.v. po varianti obratovanja 2, prej iztok $120 \text{ m}^3/\text{s}$. $Q_{\text{max}} = 272 \text{ m}^3/\text{s}$.
12	Q_{300} , ohranjanje kote 510 m.n.v. po varianti obratovanja 2, prej iztok $140 \text{ m}^3/\text{s}$. $Q_{\text{max}} = 253 \text{ m}^3/\text{s}$.
13	Q_{400} brez zadrževanja.
14	Q_{400} , takojšnje ukrepanje po varianti obratovanja 1 in povečanje iztoka na $195 \text{ m}^3/\text{s}$, dosežena kota 510 m.n.v.
15	Q_{400} , ukrepanje na vrhu visokovodnega dogodka po varianti obratovanja 1, do takrat iztok $120 \text{ m}^3/\text{s}$. Iztok $227 \text{ m}^3/\text{s}$, dosežena kota 510 m.n.v.
16	Q_{400} , ukrepanje na vrhu visokovodnega dogodka po varianti obratovanja 1, do takrat iztok $140 \text{ m}^3/\text{s}$. Iztok $218 \text{ m}^3/\text{s}$, dosežena kota 510 m.n.v.

17	Q_{400} , ohranjanje kote 510 m.n.v. po varianti obratovanja 2, prej iztok 120 m ³ /s. $Q_{max} = 299$ m ³ /s.
18	Q_{400} , ohranjanje kote 510 m.n.v. po varianti obratovanja 2, prej iztok 140 m ³ /s. $Q_{max} = 291$ m ³ /s.
19	Q_{500} brez zadrževanja.
20	Q_{500} , takojšnje ukrepanje po varianti obratovanja 1 in povečanje iztoka na 213 m ³ /s, dosežena kota 510 m.n.v.
21	Q_{500} , ukrepanje na vrhu visokovodnega dogodka po varianti obratovanja 1, do takrat iztok 120 m ³ /s. Iztok 260 m ³ /s, dosežena kota 510 m.n.v.
22	Q_{500} , ukrepanje na vrhu visokovodnega dogodka po varianti obratovanja 1, do takrat iztok 140 m ³ /s. Iztok 250 m ³ /s, dosežena kota 510 m.n.v.
23	Q_{500} , ohranjanje kote 510 m.n.v. po varianti obratovanja 2, prej iztok 120 m ³ /s. $Q_{max} = 346$ m ³ /s.
24	Q_{500} , ohranjanje kote 510 m.n.v. po varianti obratovanja 2, prej iztok 140 m ³ /s. $Q_{max} = 338$ m ³ /s.

Kot je bilo že omenjeno v poglavju 4.6, smo z nadaljnjim hidravličnim izračunom obravnavali le primere/scenarije, kjer je bila maksimalna dosežena kota na pregradi enaka 510 m.n.v., saj ni bil cilj naloge na novo definirati obratovalne parametre pregrade, večje število scenarijev pa bi tudi že presevalo obseg naloge.

Zaradi krajšega računskega časa in iskanja predvsem maksimalnega obsega/škode pri obratovalnem primeru, smo simulacijski čas vseh scenarijev omejili na 7 ur, kjer je prva ura namenjena »ogrevanju« modela, torej je dejanski čas računanja visokovodnih valov in obratovanja enak 6 ur. Pri primeru visokovodnih dogodkov brez ukrepanja in scenarijih z obratovalno varianto 2 to zajame celotno naraščajočo in skoraj celotno padajočo vejo vtočnega hidrograma in potovanje pripadajočega poplavnega vala čez modelirano območje. Pri varianti 1 pa se dolvodno vzpostavijo praktično stacionarne razmere, ki so s takšnim simulacijskim časom zajete. Ni pa zajeto odtekanje vode iz obravnavanega območja po koncu visokovodnega dogodka, kar pa ni relevantno za oceno škode, saj takrat obseg poplavnih vod upada.

5.1.1 Uporabljeni robni pogoji

Za vse scenarije od št. 1 do št. 24 so bili uporabljeni isti robni pogoji, ki smo si jih izbrali kot 100-letno vrednost pretoka na posameznem pritoku. 100-letne pretoke smo izbrali kot največjo vrednost, ki jo pričakujemo, da se sočasno še lahko pojavi na vseh pritokih med scenarijem. Tako smo z izračuni na varni strani, isti robni pogoji pa omogočajo bolj neposredne primerjave med vsemi scenariji, ne glede na povratno dobo dogodka pri scenariju.

Pri 500-letnih vodah je sicer večja možnost za Q_{100} na pritokih kot pri 200-letnih vodah, zato predvidevamo, da so rezultati za nižje povratne dobe (200 in 300 let) precenjeni oziroma rahlo višji zaradi uporabljenih robnih pogojev.

Spodnja tabela 13 podaja konične vrednosti pretokov.

Tabela 13: Uporabljeni robni pogoji pri izračunu scenarijev

Pritok	Vrednost Q_{100} na pritoku [m ³ /s]
Zadnja Smoleva	20
Plenšak	12
Prednja Smoleva	15
Dašnjica	51
Češnjica	68

Dolvodni robni pogoj je padec dna struge na iztočnem profilu, ki narekuje odtekanje vode iz modela. Dolvodni robni pogoj modela je definiran dovolj daleč stran od naselja Železniki, da morebitno odstopanje nima vpliva na rezultate (vmes so namreč le razlivne površine na travnikih).

Pri modeliranju pritokov je bilo potrebno zagotoviti, da se obravnava kritične primere. Vtočni hidrogrami pritokov so bili v modelu zato upoštevani kot kvazi-stalen tok. To pomeni, da je bila konična vrednost Q_{100} vnesena kot konstantna vrednost pretoka. Razlogi za takšno modeliranje so sledeči:

- točni hidrogrami Q_{100} na pritokih niso znani,
- analiza koincidence konic med delovanjem zadrževalnika/visokimi vodami Selške Sore in med pritoki ni znana,
- s takšnim pristopom smo vedno na varni strani, za vsak časovni korak obratovanja dobimo dejansko najvišjo možno vrednost pretoka/gladine,

- ker rezultate analiziramo kot maksimalne profile globin oziroma globine in hitrosti, načeloma ne bi smelo priti do večjih razhajanj kot pri kritičnem sovpadanju konic Selške Sore ter obratovanja in konice pritoka.

Pri analizi rezultatov smo naknadno opazili, da uporabljen pristop morda ni bil najboljši, saj je seštevek vseh pritokov $166 \text{ m}^3/\text{s}$, kar je velika količina pretoka, ki je konstantno prisotna v modelu. Kritični odsek gorvodno od Dašnjice in Češnjice ima sicer le $47 \text{ m}^3/\text{s}$ pretoka s strani pritokov, a dodatnih konstantnih $119 \text{ m}^3/\text{s}$ od Dašnjice in Češnjice dolvodno pa bi lahko ustvarjalo zaježbo v strugi, ki bi se širila gorvodno.

Zato je bil izveden testni račun, ki je upošteval enako obliko hidrograma Q_{100} na pritokih, kot je na Selški Sori, a z rahlo daljšo konico, da se res zagotovi sovpadanje konic pretokov. Iz rezultatov modela je bilo določeno, kdaj naj nastopi konica pretoka na pritokih, da bo prišlo hkrati do največjega pretoka Selške Sore in vseh pritokov. Nato je bil izračun ponovno izveden za primer Q_{400} . Analiza rezultatov maksimalnih profilov za Q_{400} s kvazi-stalnimi pritoki in Q_{400} z sovpadanjem konic je pokazala **zanemarljivo majhne razlike** v površinah vseh obravnavanih slojev globine in produkta hitrosti in globine (glej poglavje 5.4) oziroma v obsegu in globinah poplavnih vod. Razlike niso presegale 0,1 ha.

Glavni rezultat hidravičnega modela sta maksimalni obseg poplav in pripadajoča ocena škode za posamezen obratovalni scenarij, zato je modeliranje s kvazi-stalnim tokom na pritokih primerno. Dinamika poplavnih vod dolvodno od sotočja z Dašnjico in Češnjico je za podrobne analize slabše modelirana zaradi večjega konstantnega pretoka v modelu. Takšen način modeliranja pa ne bi bil najbolj ustrezen, če bi nas zanimalo dogajanje dolvodno od območja modela, saj bi dodatnih konstantnih $166 \text{ m}^3/\text{s}$ popačilo dogajanje na širšem območju, npr. pri analizi vpliva obratovanja na poplavne razmere na območju Škofje Loke.

Za porušitvene primere P1 do P3 so bile upoštevane zelo nizke vrednosti pritokov, pod $5 \text{ m}^3/\text{s}$. Pri računu porušitev nas je zanimala zgolj porušitev pregrade in propagacija porušitvenega vala, zato so rezultati porušitev relativno podcenjeni glede na rezultate obratovalnih scenarijev in visokovodnih dogodkov.

5.2 Pregled rezultatov modela

V poglavju so podani komentarji in izbrani grafični prikazi rezultatov hidravličnega modela, ki služijo za boljšo predstavo dogajanja v posameznih scenarijih viskovodnih dogodkov in primerjave med njimi. V poglavju 5.4 so rezultati obsega poplav in površine posameznega kriterija globin podani tabelarično s pripadajočo oceno škode poplavnih vod. Rezultati posameznega scenarija so grafično podani v prilogah od 1 do 27.

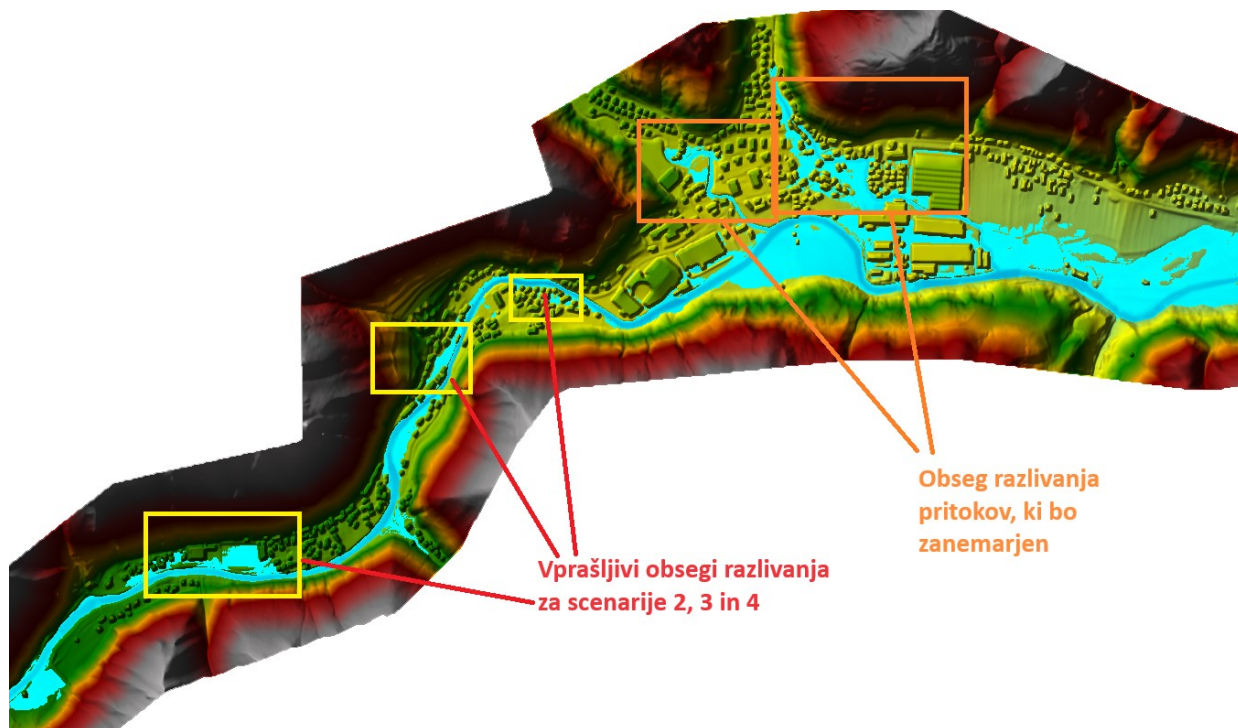
5.2.1 Natančnost rezultatov hidravličnega modela

Najmanjša vrednost pretoka in posledično najmanjši obseg poplav se pričakovano pojavi pri scenariju 2, kjer smo obravnavali zgodnjo identifikacijo dogodka in ukrepanje skladno z varianto obratovanja 1. Iztok iz pregrade znaša $164 \text{ m}^3/\text{s}$, z upoštevanjem Zadnje Smoleve in Plenšaka pa pretok v kanjonskem delu modela nad Železniki znaša $195 \text{ m}^3/\text{s}$, kar presega projektirano pretočnost struge, ki je $180 - 190 \text{ m}^3/\text{s}$. Že v najboljšem scenariju z najnižjim pretokom se pojavi razlivanje vode tako po travnikih kot tudi med objekti. Globine vode izven struge sicer ne presegajo 0,5 metra, večinoma se gibljejo okoli 30 cm.

Ob podrobnejši analizi razlivanja vode v naseljih pri hitri reakciji pri Q_{200} je bilo ugotovljeno, da se voda razliva preko lokalnih depresij v visokovodnem zidu, ki preprečuje razlivanje Selške Sore skozi Železnike. Ali gre dejansko za lokalno depresijo zidu ali napako v geodeziji/terenu, brez natančnih terenskih meritev ni možno določiti. Ker je globina poplavnih vod nizka, za pritoke pa je bila upoštevana relativno visoka vrednost (Q_{100}), je obseg poplavnih vod za temi zidovi zelo omejen. Ker razlivanje zaradi omejenih razlogov ni natančno definirano le pri varianti 1 obratovanja Q_{200} (scenariji 2, 3 in 4), gre za razmeroma zanemarljivo napako, ki pa jo je vseeno potrebno izpostaviti. Pri vseh ostalih scenarijih so pretoki toliko večji, da so viskovodni zidovi zanesljivo preplavljeni.

Razlivanje Dašnjice in Češnjice je precejšnje, a skladno z obsegom uradnih kart poplavne nevarnosti za pritoka, ki so objavljene na spletu (Atlas okolja, e-vode). Ker poplavljanje teh dveh pritokov nima vpliva na Selško Soro (velika večina pritoka ostane v strugi) in na samo obratovanje zadrževalnika, je obseg razlivnih površin teh dveh pritokov za nadaljnje analize zanemarjen.

Spodnja slika 60 prikazuje lokacije, kjer ni mogoče natančno definirati poplavljenih površin pri scenarijih 2, 3 in 4, kot tudi obseg razlivanja pritokov, ki bo za nadaljnje analize zanemarljen.



Slika 60: Vprašljiv obseg razlivanja za scenarije 2, 3,4 in obseg razlivanja pritokov

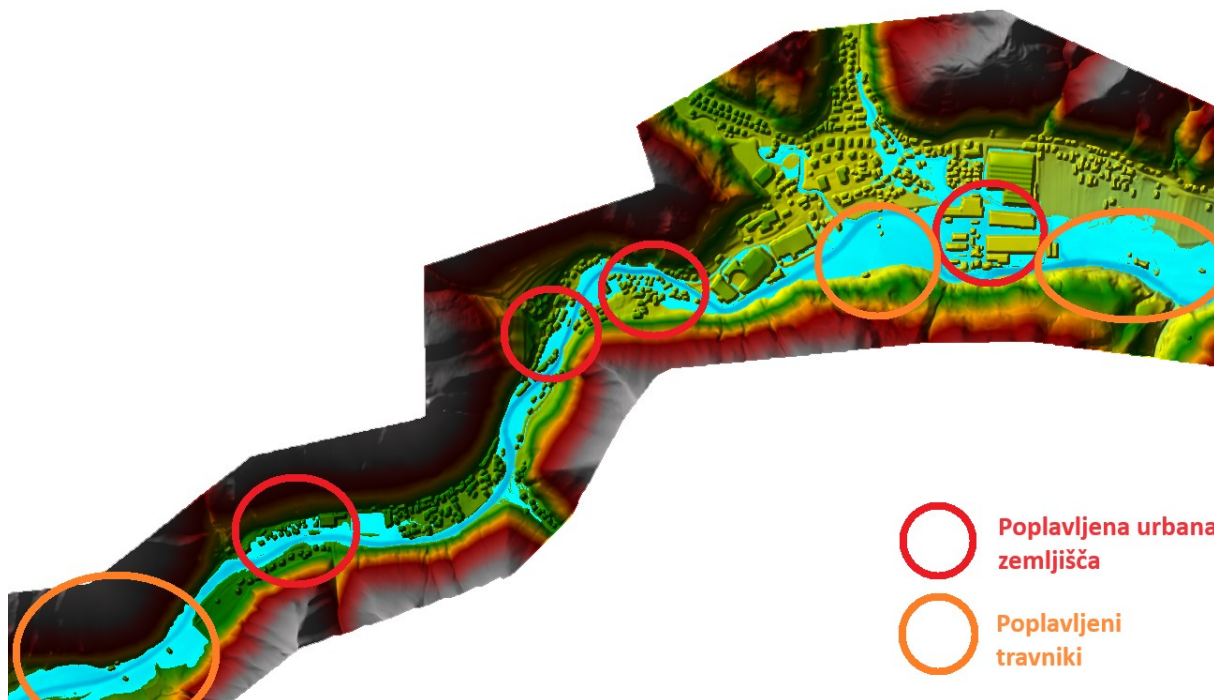
Pri ostalih območjih in obravnavanih scenarijih je razlivanje in poplavljanje ustrezno zajeto. Pri oceni rezultatov smo se oprli tudi na že izdelane študije porušitev in veljavne karte poplavne nevarnosti. Kot je bilo omenjeno že v prejšnjih poglavjih, je ujemanje z primerljivimi rezultati zelo dobro.

5.2.2 Območja pomembnega razlivanja poplavnih voda

Pri ostalih scenarijih prihaja do razlivanja na večjih območjih in tudi ustrezno zajeta v simulacijah hidravličnega modeliranja. V praktično vseh primerih so ogrožena ista območja in sicer:

- 4 urbanizirana območja in
- 3 območja namenjena kmetijski rabi.

Spodnja slika 61 za primer Q_{300} prikazuje območja z največjo poplavno nevarnostjo. Pri vseh scenarijih (z morebitno izjemo pri variantah 1 obratovanja pri Q_{200}) so ta območja poplavljen, pri obratovanju z varianto obratovanja 1 v manjšem, pri varianti obratovanja 2 ali neukrepanju pri obratovanju pa v večjem obsegu. Z večanjem povratne dobe se obseg poplav seveda povečuje, pri porušitvenih primerih pa je obseg poplav še večji.



Slika 61: Najbolj kritična območja razlivanja v vseh scenarijih

Za identificirana kritična urbana območja bi bilo v morebitnih naslednjih fazah projekta smiselno poiskati ukrepe protipoplavne zaščite, ki ne bi poslabšali stanja ob visokovodnih dogodkih dolvodno. Območja so namreč vsaj delno poplavljen tudi pri obratovalnih scenarijih višjih od Q_{300} . Vsekakor pa bi bilo v prihodnje smiselno v analize vključiti še mostne konstrukcije in morebitno zmanjšanje njihove pretočne sposobnosti zaradi nanosov plavja, kar bi povečalo lokalno natančnost rezultatov.

5.2.3 Obseg poplavnih vod

Sam obseg poplav se med visokovodnimi dogodki brez ukrepanja sicer pomembneje ne spreminja, saj morfologija terena ne omogoča obsežnejšega razlivanja. Izjema je le počasna celotna porušitev pregrade, ki povzroči poplavljanje praktično celotnega kanjonskega dela doline.

Pri obratovalnih scenarijih po varianti obratovanja 1 – konstanten pretok na iztoku - je razlivanje predvsem na kritičnih območjih, ki so podana v prejšnjem podpoglavju. Z večanjem povratne dobe dogodka in večanjem iztoka iz pregrade se povečujejo predvsem poplavljenе površine urbaniziranih delov, saj so zaradi konfiguracije terena poplavne ravnice s kmetijsko rabo zmeraj najprej poplavljenе v večjem delu svojega obsega. Z večanjem obsega poplav, se obseg torej večja predvsem znotraj urbanih območij. Nadaljnjo večanje obsega poplav pa je na račun večjih globin in rahlo večjega obsega vode na poplavljenih območjih.

Obratovalni scenariji po varianti obratovanja 2 – konstantna kota akumulacije – so po obsegu poplav zelo podobni obsegu poplavnih vod brez delovanja zadrževalnika. Razlog je v bistveno višjih pretokih ob konicah VV valov, ki so posledica obratovanja pri varianti 2.

V ozki dolini gorvodno od strnjene naselja Železnikov (kjer sta nogometno igrišče in muzej) voda hitro poplavi obvodni prostor, visokovodni nasip na desni strani pred samimi Železniki pa preusmeri poplavne vode nazaj v strugo. Do pritoka Prednje Smoleve je prisotno poplavljanje Železnikov na levem bregu, po pritoku pa je poplavljenno celotno naselje (vključno s pokopališčem, stavbami krajevne skupnosti in območjem župnijske cerkve). Ko se teren pri objektu podjetja Domel razširi, se poplavljanje na levem bregu pojavi okoli celotnega industrijskega dela. Poplavljanje je omejeno z višjim terenom, kjer je osnovna šola Železniki. Na desnem bregu so večje travniške površine, ki so v vseh obravnavanih scenarijih poplavljenne. Dolvodno od sotočja z Dašnjico je na levem bregu večja industrijska cona (podjetja Triis, Alples, Mebor,...), ki jo poplavi tako Češnjica kot Selška Sora. Dolvodno od sotočja s Češnjico pa je v modelu le še večje območje kmetijskih površin, ki so poplavljene pri vseh obravnavanih scenarijih.

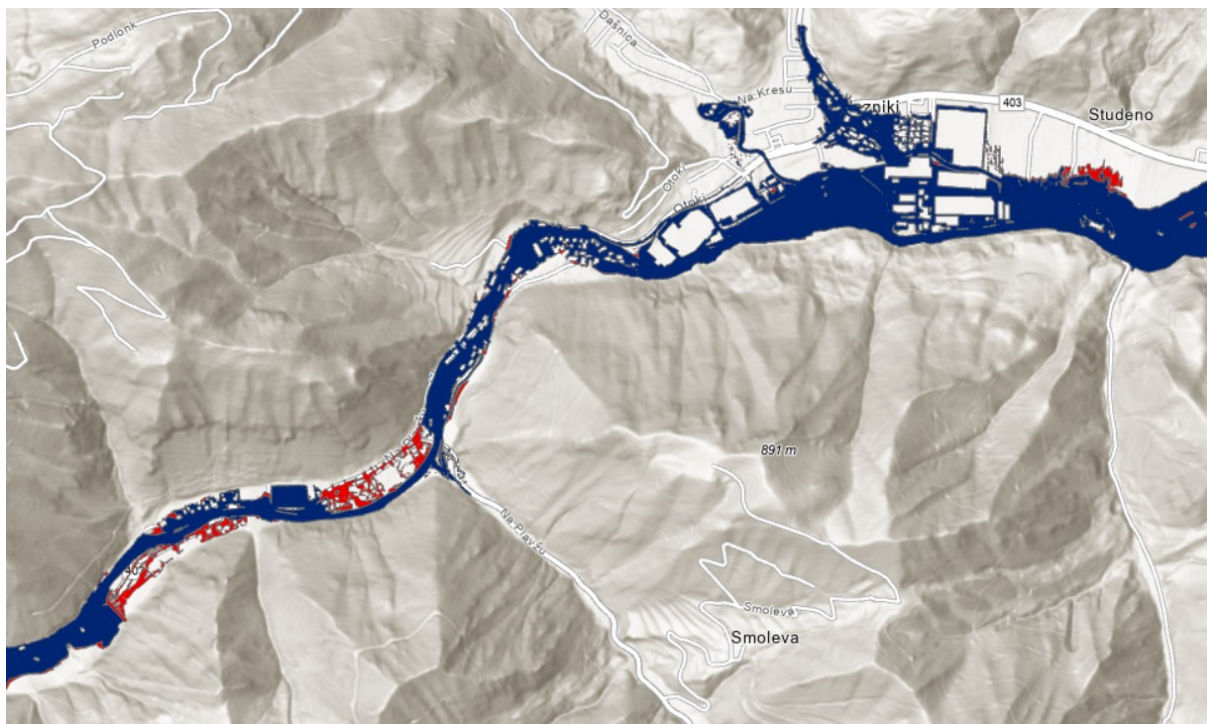
Opisano območje med protipoplavnim nasipom in sotočjem s Češnjico je največje poplavno območje obravnavanega odseka in obsega območje dolžine cca. 3500 metrov. Večina škode, ki nastane ob poplavah, je vezana na to območje. Ta območja so bila tudi najbolj prizadeta ob preteklih poplavah. Spodnja slika 62 prikazuje obseg poplav Q_{500} in nekatere stavbe na opisanem območju. Primerjava je bila zaradi preglednosti narejena v orodju ArcGis Pro.



Slika 62: Obseg poplavljanja pri Q_{500} na območju najbolj strnjeno naseljenem območju Železnikov

Zaradi opisane podobnosti v obsegu poplavnih vod pri izračunanih scenarijih je smiselno opazovati spremembe površine posameznega razreda poplavne nevarnosti glede na Pravilnik (2007), ki smo ga opisali v poglavju 2.4.3. Pravilnik se sicer uporablja pri vodah Q_{10} , Q_{100} in Q_{500} , a smo ga v nalogi uporabili za vse modelirane scenarije, saj je pravilnik najbližji zakon, na katerega se lahko pri analizi rezultatov lahko upremo. Rezultati te analize so prikazani in opisani v kasnejših poglavjih. Razlivanja pri Dašnjici in Češnjici, ki jih za kasnejšo oceno škode sicer zanemarimo, so razmeroma obsežna in po obsegu podobna za vse primere. Glede na Pravilnik (2007) gre pa za majhen razpred poplavne nevarnosti, torej nižji kot se pojavi ob poplavljanju Selške Sore.

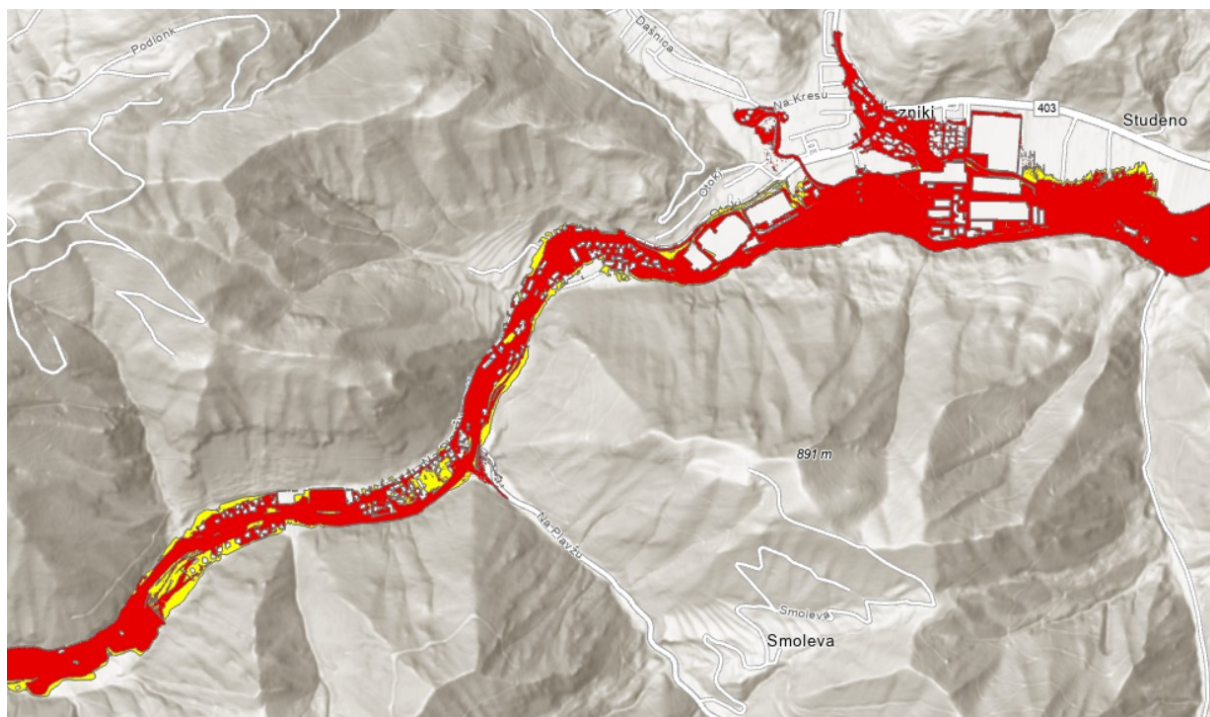
Spodnja slika 63 prikazuje razliko v obsegu med Q_{200} (modra barva) in Q_{500} (rdeča barva).



Slika 63: Primerjava obsega poplavljanja na območju najbolj strnjeno naseljenem območju Železnikov (obseg Q_{200} (modra barva) in obseg Q_{500} (rdeča barva)

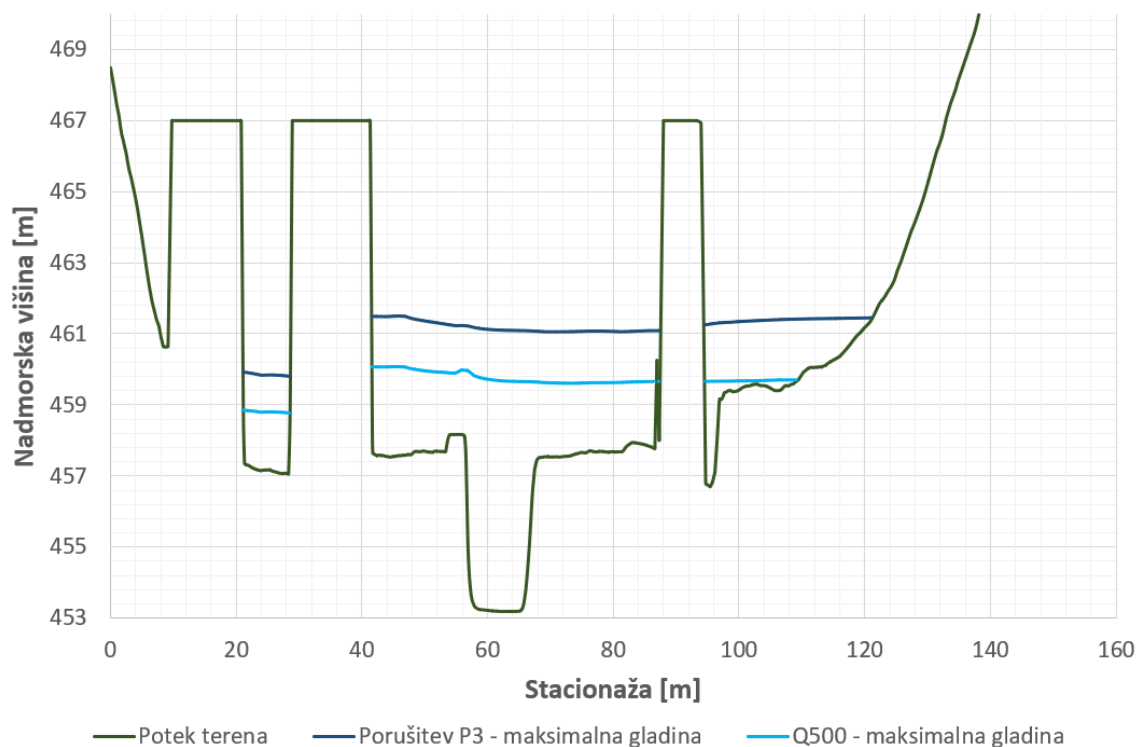
Večji obseg poplavljanja pri višjih povratnih dobah je predvsem na račun urbanih površin v kanjonskem delu, saj so ostala območja poplavljena tudi že pri nižjih pretokih. V kasnejših tabelah in priloženih grafičnih prikazih bo za posamezen primer podana površina posameznega razreda poplavne nevarnosti in sicer ločeno po 1. kriteriju (globina vode) in 2. kriteriju Pravilnika (2007) (produkt globine in hitrosti vodnega toka). Na ta način so nazorno prikazane posledice posameznega visokovodnega dogodka in obratovanja.

Spodnja slika 64 podaja še primerjavo med scenarijem porušitev (primer P3 –počasna porušitev pregrade, prikazano z rumeno barvo) in obsegom Q_{500} (rdeča barva). Primer P3 je v primerjavi z Q_{500} podcenjen, saj so bile pri primerih porušitev upoštevane minimalne vrednosti pritokov. Kljub temu rezultati izkazujejo večji obseg poplavljenosti. Kot je bilo že omenjeno, ima porušitveni primer P3 zaradi pretoka ob konici poplavnega vala nad $700 \text{ m}^3/\text{s}$ večji obseg in poplavi tudi rahlo dvignjene poplavne ravnice na robu doline.



Slika 64: Primerjava obsega poplavljanja na območju najbolj strnjeno naseljenem območju Železnikov (obseg Q_{500} (rdeča barva) in obseg P3 (rumena barva)

Obseg poplavljenosti pri primeru P3 zajame praktično celoten kanjonski del gorvodno od Železnikov, kar kaže na resnost posledic morebitne porušitve. Dosežene globine vode v obvodnem prostoru so v primeru P3 do 1,5 metra večje, kot globine vode pri Q_{500} . Spodnja slika 65 prikazuje globine vode na lokaciji profila P10 za VV val Q_{500} in primer P3 na gorvodnem urbaniziranem delu Železnikov, ki je zaradi zožanja doline in precejšnje gostote naselitev eden najbolj kritičnih odsekov.



Slika 65: Prikaz gladinskih stanje v profilu P10 za primer P3 (temno modra) in Q_{500} (svetlo modra)

5.3 Časovna dinamika dinamika poplavljanja pri različnih obratovalnih scenarijih

Poleg maksimalnega obsega poplavljanja so za analizo obratovanja in visokovodnih dogodkov pomembni tudi časovni poteki dogodkov. Ker je dogodkov za analizo veliko, smo se omejili na prikaz pri Q_{400} , ki ni tako ekstremen kot Q_{500} , a je hkrati bolj dinamičen kot Q_{200} . Pri vseh modeliranih povratnih dobah pa so si hidrogrami na vseh lokacijah po svoji obliki podobni. Potrebno je tudi omeniti, da je čas poplavljanja pri varianti obratovanja 2 (konstantna kota akumulacije) (2-3 uri) več ur krajši glede na varianto obratovanja 1 (konstantni pretok na iztoku) (4-5 ur), kar je razvidno iz časovnega poteka pretoka skozi izbrane kontrolne prereze v modelu.

Pri tem prikazu hidrogramov pretoka za različne scenarije moramo biti pozorni na način modeliranja pritokov. Ker smo te modelirali kot kvazi-stalen tok, smo dobili najbolj kritične maksimalne obsege poplavljanja. Preverili smo, da so rezultati podobni in primerljivi s primeri, v katerih bi upoštevali popolno koincidenco visokovodnih valov pritokov in Selške Sore (iztočne hidrograme iz zadrževalnika). Ker bi računanje popolne (točno sovpadanje konice iztoka iz pregrade in konice pretoka na pritoku) koincidence za vse obratovalne primere zahtevalo veliko računskega časa, smo ohranili pri rezultatih s kvazi-stalnim tokom Q_{100} na pritokih. Pri pregledu rezultatov časovne dinamike obravnavanih visokovodnih scenarijev takšen pristop delno popači rezultate, saj je za vsakim pritokom v modelu konstanten dotok, ki za svojo konstantno vrednost dvigne dejanske modelirane iztoke iz pregrade. Za

analizo vpliva upoštevanja pretokov pritokov sta v sklopu tega poglavja prikazana dva primera upoštevanja pritokov in sicer:

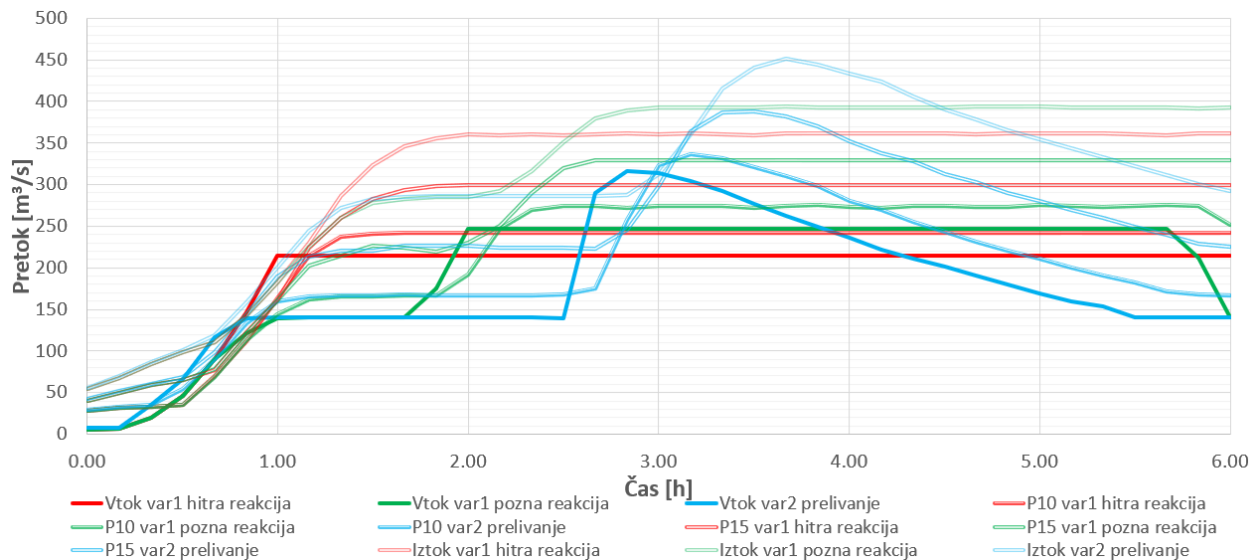
- prikaz z upoštevanjem pritokov kot kvazi-stalen tok, ki v vseh časovnih korakih dvignejo pretok za konstantno vrednost dolvodno od sotočja,
- prikaz, kjer so bile upoštevane minimalne vrednosti pritokov in na tan način izolirano opazujemo le odtočne razmere iztoka iz pregrade.

Realno dogajanje je nekje med obema prikazoma, saj sklepamo, da se med konico iztoka iz pregrade/visokovodnega dogodka zgodi tudi koničen pretok na pritokih. Tako imamo torej najbolj kritično ovojnico (konica pritokov je lahko kadarkoli) in najmanj kritično (pritokov ni).

V tem poglavju prikazujemo hidrogram pretoka mimo vtočnega prereza, prereza 10, 15 in iztočnega prereza (prikazani v poglavju 4.7) za scenarije 13 (Q_{400} brez zadrževanja), 14 (hitra reakcija po varianti obratovanja 1 pri Q_{400}), 15 (pozna reakcija po varianti obratovanja 1 pri Q_{400} , obratovalni pretok $120 \text{ m}^3/\text{s}$) in 17 (prelivanje na koti 510 m.n.v. po obratovalni varianti 2 pri Q_{400} , obratovalni pretok $120 \text{ m}^3/\text{s}$). Prikazanih je vseh 6 ur simulacije. Za tokratne prikaze smo izbrali le celoten pretok skozi profil in ne prikazujemo toka, omejenega na strugo. Vsak prikaz se podvoji in sicer enkrat z upoštevanjem pritokov in enkrat pa brez njih.

Ker je ob pričetku simulacije posameznega scenarija vrednost pritokov glede na nizek pretok Selške Sore velika, so rezultati z nizkimi pretoki pritokov za prvo uro simulacije nerealni. V tej fazi dogodka še ne prihaja do poplavljanja, zato vpliv ni bistven. Poleg tega je umetno odštevanje vrednosti pritokov zgolj približek, saj točen vpliv med vodami Selške Sore in pritoki ni znan.

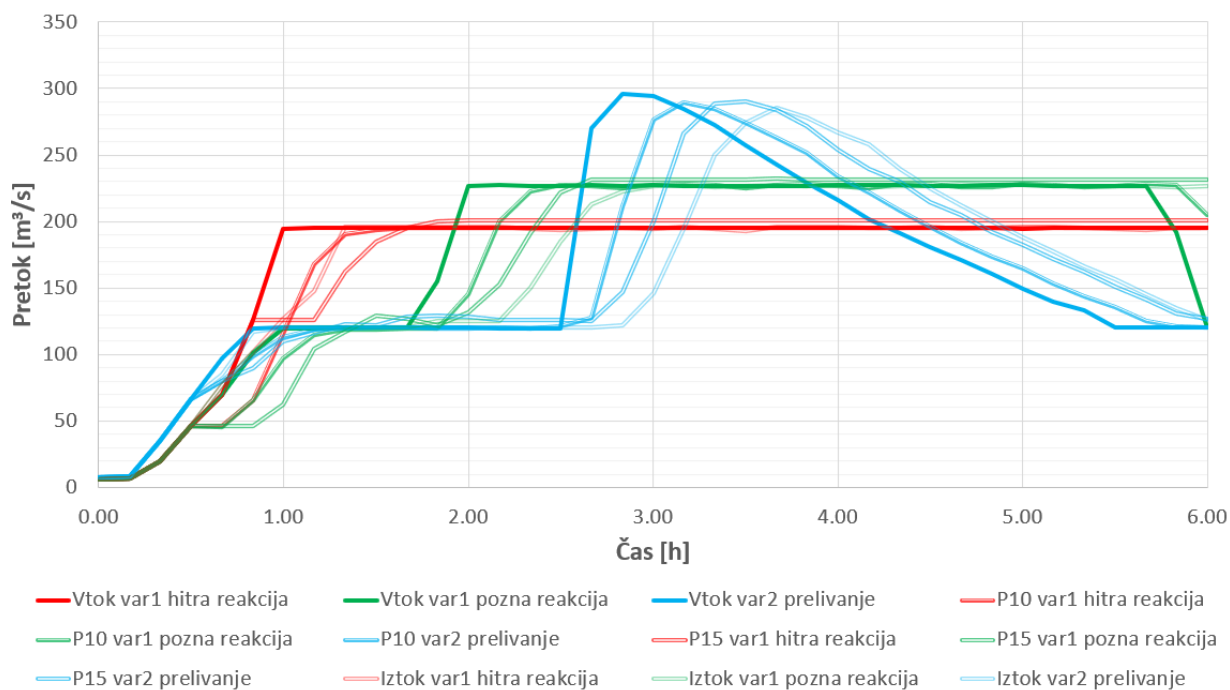
Spodnja slika 66 prikazuje hidrograme scenarijev 14 (hitra reakcija po varianti obratovanja 1), 15 (pozna reakcija po varianti obratovanja 1) in 17 (prelivanje po varianti obratovanja 2), z upoštevanjem Q_{100} na pritokih, torej najbolj kritična ovojnica:



Slika 66: Hidrogrami v vtočnem prerezu, prerezi P10 in P15 in iztočnem prerezu za scenarije 14, 15 in 17 z upoštevanjem pritokov Q_{100}

Razvidno je precejšnje večanje pretoka v dolvodni smeri, saj se skupni pretok zaradi pritokov poveča za $166 \text{ m}^3/\text{s}$. S takšnim upoštevanjem pritokov je razlika med pozno reakcijo in prelivanjem, ko doseže gladina vode v akumulaciji koto 510 m.n.v. z vsakim pritokom relativno manjša. Pomembno pa je poudariti, da je največji doprinos pritokov (Dašnjica in Češnjica, skupaj $119 \text{ m}^3/\text{s}$) že dolvodno od najbolj kritičnih in poseljenih območij ter pomeni večje pretoke predvsem na odseku, kjer so poplavljenе travniške površine. V kasnejših poglavjih ocene škode bo to tudi jasno razvidno.

Posledice načina delovanja zadrževalnika med visokovodnim dogodkom je bolj smiselno prikazati z oceno pretokov, če pritokov ne upoštevamo. Spodnja slika 67 prikazuje hidrograme scenarijev 14 (hitra reakcija po varianti obratovanja 1), 15 (pozna reakcija po varianti obratovanja 1) in 17 (prelivanje po varianti obratovanja 2), znižanimi za doprinos pritokov:

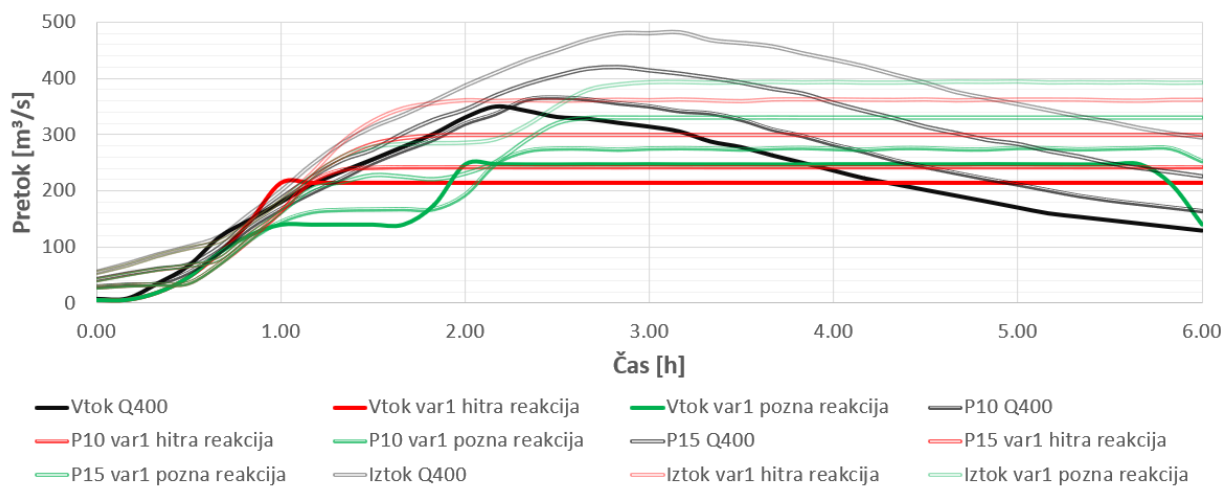


Slika 67: Hidrograme v vtočnem prerezu, prerezi P10 in P15 in iztočnem prerezu za scenarije 14, 15 in 17 brez upoštevanja pritokov

Ponovno opozorimo, da gre pri zgornji sliki zgolj za oceno stanja, ki pa je dovolj natančna za prikaz širjenja iztoka iz pregrade dolvodno proti Železnikom. Bolj jasno se vidi razlika med pretoki, ki jo ustvarimo z zgodnjo reakcijo na identificiran visokovodni dogodek. Opazna je tudi velika razlika med širjenjem iztoka pri varianti obratovanja 2 (prelivanje za ohranjanje kote 510 m.n.v.) in med iztokoma pri varianti obratovanja 1, kjer se izpušča konstanten pretok in se ne preoblikuje.

Pri zgornjih slikah zaradi preglednosti ni bil podan vtočni hidrogram Q_{400} , ki bi se brez ukrepanja na pregradi v takšni obliki širil tudi dolvodno skozi opazovane kontrolne profile. Zato podajamo še grafične primerjave med Q_{400} ter varianti obratovanja 1 in 2. Zaradi preglednosti so primerjave med variantama podane ločeno. Ponovno prikazujemo kritično ovojnico (pritoki v vsakem koraku upoštevani) in stanje brez upoštevanja pritokov.

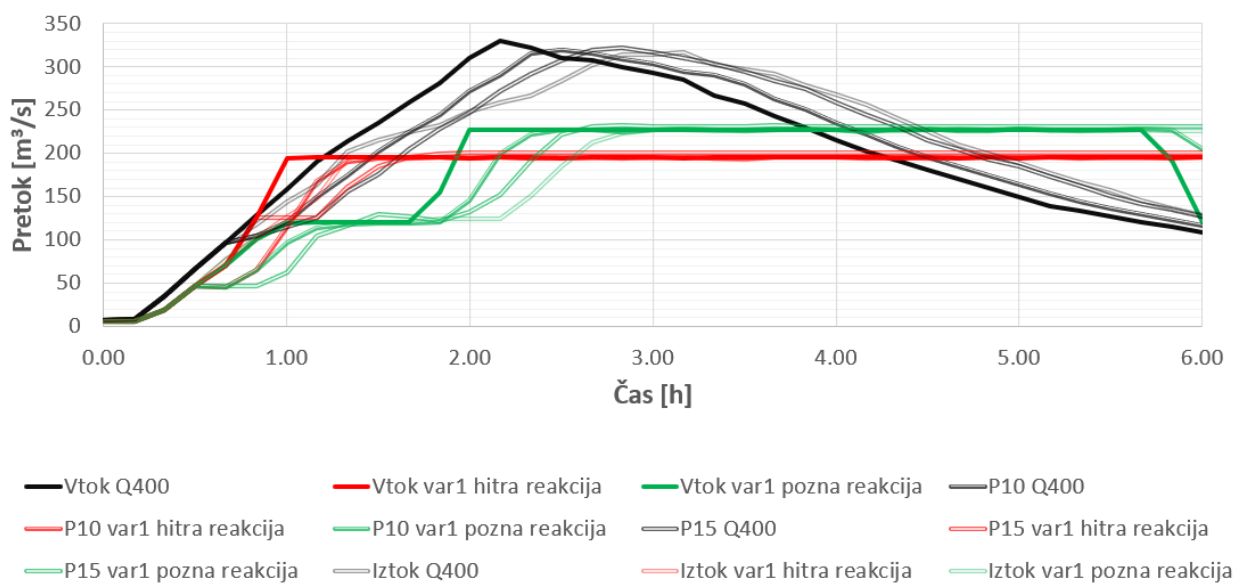
Spodnja slika 68 prikazuje hidrograme scenarijev 13 (Q_{400} brez zadrževanja), 14 (hitra reakcija po varianti obratovanja 1) in 15 (pozna reakcija po varianti obratovanja 2). Pri vseh scenarijih se upošteva Q_{100} na pritokih.



Slika 68: Hidrogrami v vtočnem prerezu, prerezi P10 in P15 in iztočnem prerezu za scenarije 13, 14 in 15 pri Q_{400} z upoštevanjem pritokov

Tudi na zgornji sliki je opazno večanje pretoka v dolvodni smeri. V vseh primerih obratovanje je razviden »odrezan« precejšen del konice Q_{400} .

Za večjo preglednost je na spodnji sliki 69 podan še primer brez upoštevanja pritokov.

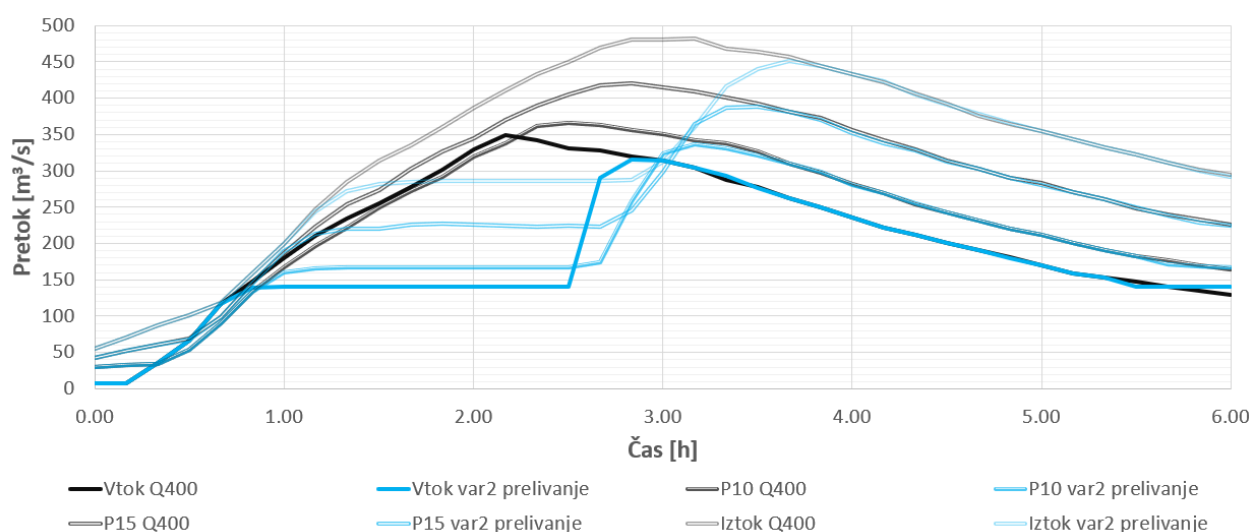


Slika 69: Hidrogrami v vtočnem prerezu, prerezi P10 in P15 in iztočnem prerezu za scenarije 13, 14 in 15 pri Q_{400} brez upoštevanja pritokov

Na zgornji sliki, ki podaja stanje brez upoštevanja pritokov z varianto1 obratovanja, je lažje oceniti učinek zadrževalnika. Celotna vodna masa, ki jo lahko ocenimo iz površine nad krivuljo pretoka po obratovalni varianti 1 (rdeča oz. zelena barva) in med krivuljo Q_{400} (črna barva), je namreč zadržana in ne prispeva k poplavljanju dolvodnih območij. Zadržimo tako precejšen del vodne mase v naraščujočem delu hidrograma Q_{400} kot tudi v padajočem delu hidrograma. Pri zapoznili reakciji po varianti 1 na Q_{400} bi 5 ur spuščali povečan pritok nad 120 oz. 140 m^3/s , pri zgodnji reakciji pa 5,5 do 6 ur (poglavje 4.6).

Na zgornjih slikah lahko opazimo tudi, da visokovodni dogodki sicer zelo hitro narastejo (konica v 2 urah), sledi pa relativno počasnejši upad. Tudi pri dogodku Q_{400} je torej čas, ko pretoki presegajo 120 m^3/s , več kot 4 ure, poplavni val pa se pri potovanju čez Železnike zelo malo preoblikuje. Z vidika trajanja poplavljanja pri varianti obratovanja 1, ki je bilo morda v prejšnjih poglavjih morebitna negativnost ali zadržek, je to ugodno, saj se čas visokih vod podaljša za 1 – 1,5 ur, konica pretoka pa se bistveno zmanjša.

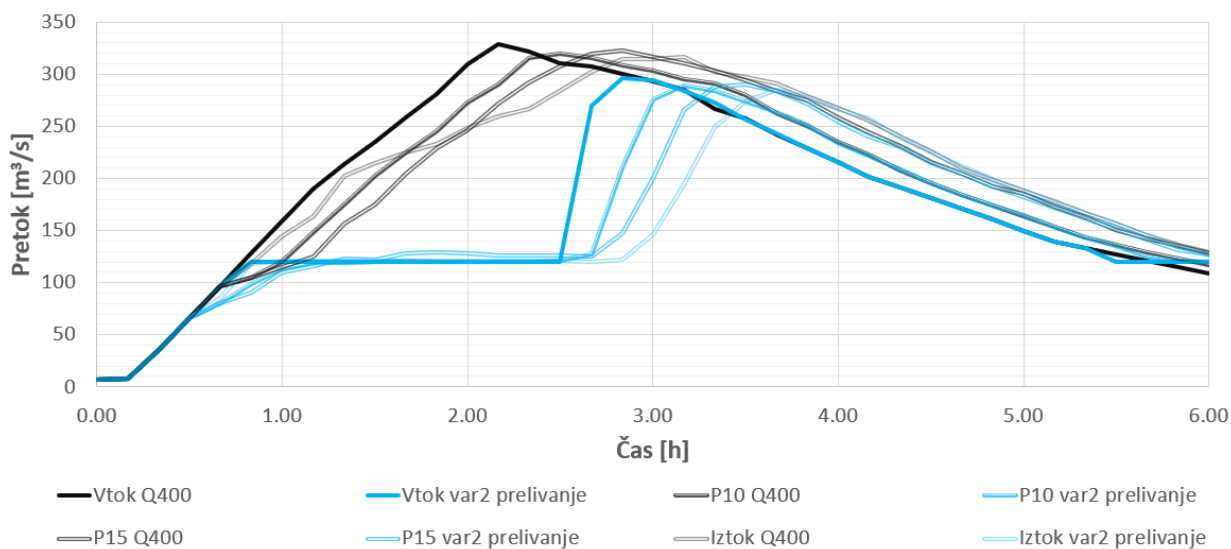
Najkrajši čas visokovodnih razmer, a višje pretoke, pa podaja varianta 2 obratovanja. Spodnja slika 70 prikazuje hidrograme scenarijev 13 (Q_{400} brez zadrževanja) in 17 (prelivanje na koti 510 m.n.v. po varianti obratovanja 2), z upoštevanjem pritokov.



Slika 70: Hidrogrami v vtočnem prerezu, prerezi P10 in P15 in iztočnem prerezu za scenarija 13 in 17 z upoštevanjem pritokov

Iz zgornje slike je razvidno, da obratovanje s prelivanjem na koti 510 m.n.v. (varianta 2) v vseh kontrolnih profilih zadrži konico visokovodnega dogodka, sledi pa ujemajoča padajoča veja visokovodnega dogodka. Ujemanje padajoče veje po začetku prelivanja zaradi koincidence s pritoki ni zagotovljeno, saj je le-to mogoče le v najmanj ugodnem scenariju (vsi pritoki vedno na Q_{100}) in v najbolj ugodnem scenariju, ko pritokov ne upoštevamo. V vmesnih primerih bi prihajalo do lokalnih znižanj, ko pritoki ne bi dosegali konice pretoka.

Spodnja slika 71 prikazuje hidrograme scenarijev 13 in 17, brez upoštevanja pritokov.



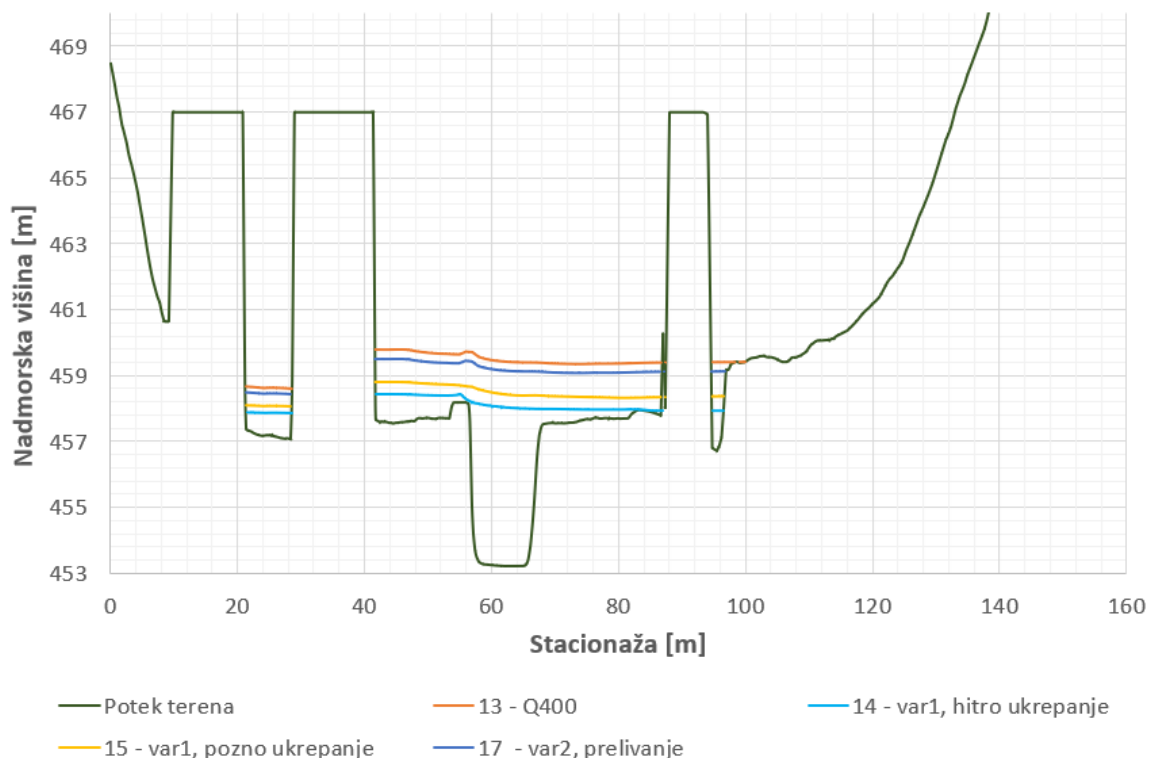
Slika 71: Hidrogrami v vtočnem prerezu, prerezi P10 in P15 in iztočnem prerezu za scenarija 13 in 17 brez upoštevanja pritokov

Iz zgornje slike, ki prikazuje primer brez upoštevanja pritokov, je bolj razviden zadržan volumen visokovodnega dogodka. Zadržana je celoten volumen vodne mase vnaraščajočem delu veje in prvi del v padajočem delu veje. Čas povečanih pretokov je cca 2-3 ure, kar je tudi čas prelivanja na koti 510 m.n.v. na pregradi.

V poglavju so bili prikazani iztočni hidrogrami za Q_{400} (v primeru zgodnje identifikacije, pozne identifikacije po obratovanju s $120 \text{ m}^3/\text{s}$ in v primeru prelivanja na koti 510 m.n.v. po projektnem iztoku $120 \text{ m}^3/\text{s}$). Dinamika preoblikovanja iztočnih hidrogramov iz pregrade za ostale povratne dobe in scenarije je zelo podobna, zato zaradi omejitve obsega naloge ni natančneje predstavljena. Ugotovljeno je bilo, da »daljše« trajanja dogodka z varianto obratovanja 1 napram visokovodnemu dogodku ni bistveno daljše, konica iztoka pa je manjša. Na to smo sicer lahko že sklepali, a smo s hidravličnim modeliranjem visokovodnih dogodkov in obratovalnih primerov lahko to tudi preverili. Obratovanje po varianti obratovanja 2, kjer upoštevamo prelivanje na koti pregrade, se izkazuje kot slabša rešitev, saj so velikosti pretokov bistveno večje in se hipno pojavijo z večjo spremembo pretoka, kot je pri varianti obratovanja 1.

Za nadaljnje analize bi bilo smiselno izvesti ločen račun z upoštevanjem koincidence pritokov, ki bi jih modelirali z njihovim dejanskim visokovodnimi valovi, ki v trenutnih razpoložljivih hidroloških izhodiščih niso na voljo. Tako bi dobili le en kritični hidrogram v kontrolnih profilih, ki bi združeval konice Selške Sore in pritokov. S trenutnim pristopom dobimo najvišji možni pretok, ki se lahko kadarkoli pojavi zaradi nastopa Q_{100} na pritokih. Ker pa analiza preoblikovanja visokovodnih in iztočnih hidrogramov ni glavni cilj naloge, izračuni koincidence konic pa bi trajal več mesecev in ker trenutni pristop daje prave maksimalne obsege poplav, se za dodatno modeliranje koincidence v tej fazi nismo odločili.

Kot omenjeno se profil P10 izkazuje kot eden najbolj kritičnih prerezov v celotnem modelu, saj je tam prerez celotne doline zelo ozek. Širina poplavne ravnice je le približno 150 metrov. Dolina je ozka le še 600 metrov dolvodno, tik pred razširitvijo doline, kjer pa dosežene gladine ob objektih niso tako velike. Spodnja slika 72 prikazuje še maksimalno doseženo globino v profilu P10 pri scenarijih 13, 14, 15 in 17.



Slika 72: Maksimalne dosežene globine v profilu 10 pri scenarijih 13, 14, 15 in 17

Tudi maksimalne dosežene gladine so za varianto 2 obratovanja neugodne – gladina je zelo blizu gladini Q_{400} , kjer ne upoštevamo zadrževanja. Gre torej za kritični profil, kjer je dolina ozka, tik ob strugi pa so stanovanjski objekti. Tudi ob zgodnji identifikaciji je tu gladina vode (z upoštevanjem Q_{100} Plenšaka, Zgornje in Spodnje Smoleve) takšna, da se objekt v celoti dlje časa nahaja znotraj vodnega toka z globino 80 cm, pri pozni reakciji pa je višina vode na lokaciji objekta že 1,2 metra. Pri varianti

obratovanja 2 pa višina vode tu doseže globine do kar 1,9 metra, a za krajši čas. Pri dogodku Q_{400} se na omenjenega objekta pojavijo globine vode do 2,2 metra. Opozorimo, da gre za primer, ko konica Q_{400} oziroma iztoka variante obratovanja 2 sovпада s Q_{100} vseh treh gorvodnih pritokov in da gre za najbolj kritični profil z vidika globine vode ob objektih.

5.4 Ocena posledic posameznega obratovalnega dogodka

Poleg obsega poplavljanja, ki se bistveno ne spreminja ter dinamike odtočnih razmer pri različnih scenarijih in visokovodnih dogodkih, je kot kriterij za ovrednotenje posameznega dogodka in obratovalnega scenarija tudi ocena škode. Za obravnavano območje je zelo primerna metodologija, predstavljena v poglavju 2.4.2, saj vključuje rabo tal in kriterije globin vode. Glede na ozko poplavno območje smo že ugotovili, da se z večanjem pretoka pomembnejše preminjajo globine poplavne vode kot njihov obseg. Rezultati bodo služili predvsem kot **primerjava med posameznimi obratovalnimi scenariji** in ne kot realna ocena škode, saj za tržne vrednosti zemljišč in objektov v Železnikih nimamo podatkov. Takšna analiza pa je vseeno zelo zgovorna glede posledic posameznega scenarija, prav tako pa tudi ustrezno ovrednostimo relativne razlike med scenariji.

Rezultati vseh scenarijev so bili v programskem orodju HEC-RAS podrobneje obravnavani v orodju RAS Mapper, ki omogoča podrobno analizo rezultatov in izvoz rezultatov, kasneje pa tudi v ArcGIS Pro. Izvoz in analize so bile narejene v različici 6.4.1., ki omogoča enostavnejše izvažanje slojev rezultatov glede na različne vrednosti parametrov, ki jih izvažamo. Za vsak scenarij so bili izvoženi naslednji sloji:

- vrednosti globin po kriterijih: globine do **0,5** metra, globine **med 0,5 in 1,5** metra in globine **nad 1,5** metra.
- vrednosti produkta globine in hitrosti po kriterijih: vrednosti produkta do **0,5** m^2/s , vrednosti produkta **med 0,5 in 1,5** m^2/s in vrednosti produkta **nad 1,5** m^2/s .

Sloji so bili vneseni v orodje ArcGIS Pro, kjer smo določili površino posameznega sloja v hektarjih.

Za vsak scenarij je tako pridobljenih 6 slojev v shp. formatu. Sloji se med seboj izključujejo. Vrednosti kriterijev smo izbrali zato s smernicami za izdelavo kart poplavne nevarnosti in kart razredov poplavne nevarnosti (Pravilnik, 2007). V našem primeru sicer kart razredov poplavne nevarnosti nismo delali, a so v Sloveniji ti kriteriji globin ter produkta globine in hitrosti postali pogosto uporabljeni kazalci, ki jih je zaradi boljše predstave rezultatov smiselno upoštevati. Poleg tega gre za tri razpone vrednosti, ki so pri praktično vseh scenarijih vsi dovolj zastopani, da lahko nazorno predstavljajo dogajanje pri visokih vodah. Rezultati so predstavljeni v poglavju 5.4.

Vsi sloji oziroma rezultati veljajo za **maksimalne vrednosti**. To pomeni, da je v njih prikazana maksimalna vrednost kriterija globine vode oziroma produkta, ki se pojavi v katerem koli časovnem koraku simulacije. Tako je za posamezno celico računske domene upoštevana maksimalna vrednost posameznega parametra, ki se pojavi vsaj v enem časovnem koraku.

Pri prikazu produkta globine in hitrosti se lahko pojavijo nekorektni rezultati, saj model pri ustvarjanju slojev upošteva maksimalne vrednosti globin in maksimalne vrednosti hitrosti, ki niso nujno iz istega časovnega koraka. Ker se v našem modelu bodisi počasi vzpostavi dokaj stacionarno stanje (varianta obratovanja 1 – konstantni pretok na iztoku) ali pa se hipno pojavijo največje globine (varianta obratovanja 2 – konstantna kota v akumulaciji oz. visokovodni dogodki brez ukrepanja), kjer največje hitrosti približno sovpadajo tudi z največjo globino, je sloj produkta globine in hitrosti smiseln. Preverjeno je bilo tudi, da se ne pojavljajo nesmiselni rezultati.

Za oceno škode po izbrani metodologiji potrebujemo še podatke o rabi tal in vrednosti posamezne rabe tal. Pridobljeni so bili sloji rabe tal v letu 2023, ki so na območju obsega poplav določili sledečo porazdelitev rabe tal:

- 50 % tal je kmetijske rabe oziroma travniške rabe,
- 50 % tal je urbane rabe.

Urbane površine smo dalje razdelili na 50 %, ki so pozidana in na 50 %, kjer ni objektov temveč so ceste, dvorišča itd.

Izkazalo se je, da so površine za posamezen razred produkta hitrosti in globine za faktor dva manjše, kot površine pri upoštevanju kriterija globin. Pri oceni škode je bil tako večinoma prevladujoč kriterij globin.

Na podlagi uporabljene metodologije smo iz metode ocene škode v poglavju 2.4.2 prevzeli sledeče maksimalne vrednosti kvadratnega metra tal. Poudarimo, da gre le za oceno škode, ki bo služila predvsem kot **primerjava** med posameznimi obravnavanimi scenariji. Za čim bolj realno oceno škode bi bile potrebne nadaljnje analize, ki bi bile izven obsega magistrske naloge:

- Maksimalna vrednost travniških zemljišč/kmetijskih zemljišč znaša **0,77 €/m²**.
- Maksimalna vrednost objektov znaša 750 €/m². Ker smo predpostavili, da so objekti le polovica urbanih območij, smo vrednost razpolovili na **375 €/m²**.

Razbrali smo tudi »faktor škode« glede na razrede globine vode. S tem faktorjem množimo maksimalno vrednost zemljišča. Izbrane so bile naslednje vrednosti (tabela 14) glede na rabo tal in na globino vode, kjer je bila upoštevana mediana posameznega razreda globin.

Tabela 14: Faktorji škode glede na rabo tal in globino vode

Raba tal/globina vode	0,3 m	0,75 m	1,5 m
Urbano zemljišče	0.1	0.35	0.5
Kmetijstvo/travnik	0.2	0.45	0.65

Gre za povprečne vrednosti, saj točnih vrednostih za Slovenijo ni na voljo.

Iz produkta faktorja škode in maksimalne vrednosti zemljišč dobimo oceno vrednosti škode (tabela 15), ki se pojavi pri posameznem razredu globine na kvadratnem metru zemljišča.

Tabela 15: Ocena škode na kvadratni meter glede na globino vode

Raba tal/globina vode	0,3 m	0,75 m	1,5 m
Urbano zemljišče	75 €	132 €	188 €
Kmetijstvo/travnik	0.15 €	0.35 €	0.5 €

Za posamezen scenarij smo nato določili, kakšen je delež poplavljenih površin kmetijske rabe in kakšen je delež poplavljenih površin urbane rabe. Na tem mestu smo naredili manjšo poenostavitev, saj smo za obe rabi tal predpostavili enako razdelitev kriterijev globin. Menimo, da ne gre za preveliko poenostavitev, saj so globine vode podobne na poplavljenih zemljiščih obeh rab.

Pripadajoča površina razreda globin je bila nato pomnožena s pripadajočo ocenjeno škodo, tako za urbano rabo tal kot za kmetijsko. Rezultat je celotna ocenjena škoda.

Pri izračunu škode smo zanemarili poplavljenе površine, ki jih poplavijo samo pritoki, torej predvsem Dašnjica in Češnjica. Prav tako smo ustrezno izločili površine vodotokov, saj struga ne sodi ne med urbano ne med kmetijsko rabo tal. Vsekakor pa se v strugi tudi pojavi škoda, ki pa bi bila po naši metodologiji za vse scenarije enaka, zato je lahko zanemarjena za potrebe primerjav scenarijev.

Opozorimo, da ne upoštevamo mostov, kar zmanjša obseg poplav. Hkrati pa upoštevamo Q_{100} pritokov, kar verjetno poveča obseg. Za morebiten vpliv mostov bi bilo za nadaljnje faze potrebno preveriti, kako se ta spreminja s scenariji za različne povratne dobe. V sklopu naloge smatramo, da je za vse scenarije vpliv podoben, zato so rezultati med seboj še vedno primerljivi, četudi vsi rahlo podcenjeni ali precenjeni. Bolj verjetno je, da je ocena pri nižjih povratnih dobah precenjena, pri višjih povratnih dobah pa podcenjena. Rezultati so prikazani v tabeli 16.

Tabela 16: Vrednosti obsega poplavljenih območij po posameznih kriterijih in ocena škode

	Scenarij/kriterij	D < 0,5 m	0,5 < D < 1,5 m	D > 1,5 m	DxV < 0,5 m ² /s	0,5 < DxV < 1,5 m ² /s	DxV > 1,5 m ² /s	Obseg [Ha]	% kmetijstvo	% urbano	Škoda [milijon]
Porušitve	Porušitev 1	19.2	21.7	3.6	23.6	15.1	5.9	44.5	60	40	20
	Porušitev 2	18.5	25.4	7.4	24.0	17.3	10.0	51.3	55	45	28
	Porušitev 3	10.7	27.7	24.0	15.7	18.2	28.6	62.4	50	50	45
Q200	1-Q200	17.3	24.9	5.7	26.1	17.7	9.1	47.9	70	30	17
	2 – Hitra reakcija	21.9	12.6	0.7	28.8	9.4	2.1	35.2	85	15	5
	3 - Pozno,120	21.1	14.6	1.1	28.2	11.0	2.6	36.8	79	21	8
	4 - Pozno, 140	21.4	13.5	0.8	28.3	10.0	2.3	35.7	80	20	7
	5 - Prelivanje,120	19.3	21.9	3.3	27.1	16.6	5.9	44.6	75	25	13
	6 - Prelivanje, 140	20.4	18.4	2.0	27.6	14.3	3.9	40.9	76	24	10
Q300	7-Q300	16.8	25.1	6.6	25.1	18.2	10.2	48.5	70	30	18
	8 – Hitra reakcija	21.3	13.9	0.9	28.4	10.4	2.4	36.2	83	17	6
	9 - Pozno, 120	20.6	16.5	1.5	27.6	12.9	3.2	38.7	79	21	9
	10 - Pozno, 140	20.9	15.6	1.3	27.8	12.0	2.9	37.8	80	20	8
	11 - Prelivanje, 120	18.6	22.8	4.0	26.8	16.8	6.8	45.4	75	25	13
	12 - Prelivanje, 140	19.8	21.0	2.9	27.3	16.2	5.1	43.6	76	24	12
Q400	13-Q400	16.3	26.2	7.9	24.9	18.5	11.9	50.4	65	35	22
	14 – Hitra reakcija	20.8	15.8	1.3	27.8	12.2	3.0	38.0	80	20	8
	15 - Pozno, 120	20.2	19.3	2.2	27.2	15.2	4.3	41.7	76	24	11
	16 - Pozno, 140	20.1	18.4	1.9	27.0	14.5	3.9	40.3	77	23	10
	17 - Prelivanje, 120	17.2	24.6	5.8	25.6	17.8	9.2	47.6	70	30	17
	18 - Prelivanje, 140	17.6	24.1	5.1	26.1	17.3	8.4	46.8	71	29	16
Q500	19-Q500	16.0	27.5	10.2	25.0	18.7	15.0	53.7	63	37	25
	20 – Hitra reakcija	20.2	17.8	1.8	27.1	14.0	3.7	39.8	75	25	11
	21 - Pozno, 120	19.3	22.2	3.8	27.2	16.5	6.6	45.3	71	29	15
	22 - Pozno, 140	19.8	21.4	3.2	27.2	16.4	5.7	44.3	72	28	14
	23 - Prelivanje, 120	16.0	26.8	8.5	24.9	18.6	12.8	51.4	60	40	25
	24 - Prelivanje, 140	16.2	26.4	8.0	25.0	18.6	12.1	50.7	61	39	24

Rezultati, prikazani v zgornji tabeli, podajajo bistvene primerjave med posameznimi variantami obratovanja z zadrževalnikom. Obratovanje z zgodnjo identifikacijo in reakcijo in spuščanjem večjih količin pretoka ima za vsako povratno dobo bistveno manjšo oceno škode, kot obratovanje s prelivanjem vode na koti 510 m.n.v.

Ugotovimo lahko naslednje:

- Kriterij globin je na splošno bolj neugoden kot kriterij produkta hitrosti in globine. Tudi ko se pojavi večja površina območja produkta nad $1,5 \text{ m}^2/\text{s}$, je pri istem scenariju površina z globinami med 0,5 m in 1,5 m toliko večja kot pri produktu, da je škoda pri upoštevanju produkta manjša. Globine so torej kritične za izračun škode.
- Zgodnja reakcija po varianti obratovanja 1 je tako po obsegu poplav kot tudi po nastali škodi najbolj ugoden scenarij.
- Kljub zgornji alineji je škoda pri hitri reakciji po varianti obratovanja 1, ne glede na povratno dobo, velika (5 do 11 milijonov, naraščajoče s povratno dobo). To je posledica Q_{100} na pritokih in istih faktorjev za oceno škode za vse scenarije, kar verjetno preceni škodo za nižje povratne dobe.
- Pozna reakcija po varianti obratovanja 1 je drugi najbolj ugoden obratovalni scenarij. Razlika med obratovalnim pretokom $120 \text{ m}^3/\text{s}$ oz. $140 \text{ m}^3/\text{s}$ je cca 1 milijon € v škodi, oziroma cca 1 hektar poplavljenih površin. Nižji obratovalni pretok pred prilagoditvijo obratovanja pomeni večji obseg poplavljenih površin in večje globine, predvsem na račun urbanih površin. Pri varianti obratovanja 1 je ugodna predvidljivost poplavnega dogodka, saj ohranjamo konstanten iztok.
- Prelivanje na koti 510 m.n.v. po varianti obratovanja 2, kot je trenutno predvideno v obratovalnem pravilniku pri dogodkih nad Q_{100} , je z vidika škode neugodno. Ker se z večanjem povratne dobe dogodka pri takšnem obratovanju konica visokovodnega dogodka vse bolj bliža začetku/konici prelivanja, je obseg poplavljanja velik in ocena škode posledično blizu oceni škode brez ukrepanja. Z večanjem povratne dobe je nezadržan visokovodni dogodek vse bližje varianti obratovanja 2, tako po obsegu poplavljanja kot tudi nastali škodi. Razlika med obratovalnim pretokom pred pričetkom prelivanja $120 \text{ m}^3/\text{s}$ oz. $140 \text{ m}^3/\text{s}$ je cca 1 milijon € v nastali škodi, oziroma cca. 0,8 ha poplavljenih površin.
- Kljub zgornji alineji ima varianta obratovanja 2 zelo verjetno ugodne učinke glede na visokovodni dogodek brez zadrževanja, ki sicer ni bil zajet v izračunih in oceni škode. To je vezano predvsem na nevarnost dotoka plavja in večjih količin sedimentov, ki je pri varianti 2 obratovanja verjetno v večji meri zadržano, saj zadržimo celotno naraščajočo vejo hidrograma poplavnih vod, ko je transport sedimentov največji. Prav tako je pri varianti obratovanja 2 čas poplavljanja najkrajši, kar bi lahko imelo ugoden vpliv, če bi upoštevali še erozijske procese, ki

v sklopu te naloge niso bili upoštevani. Ugodni vplivi lahko večje vrednosti pretokov sicer izničijo v primerjavi z varianto obratovanja 1.

- Delna porušitvena pri scenarijih P1 in P2 imata, zaradi nižjih vrednosti pretokov upoštevani za pritoke, – nižjo ocenjeno škodo, kot je ta pri scenarijih večjih od Q_{300} . Z istimi robnimi pogoji bi bila škoda večja, saj je pretok ob konici VV vala v primeru porušitev večji od Q_{500} .
- Primer porušitve P3 (počasna porušitev pregrade) ima kljub nizkim vrednostim pritokov daleč največji obseg poplav in največjo ocenjeno škodo.
- Ocenjena škoda za najvišje povratne dobe poplavnih valov in primere porušitev je verjetno podcenjena. Poplave leta 2007, ko je bila struga sicer manj prevodna, naj bi po navedbah objavljenih analiz in ocen škode znašale med 50 in 80 milijonov evrov. Počasna porušitev pa po naši oceni povzroči »le« za 45 milijonov evrov škode v Železnikih. Razlogi so lahko v drugačnih ocenah vrednosti zemljišč in objektov, bolj podrobnih analizah, mostovih, vplivu plavja in sedimentov na odtočne razmere ter upoštevanju škode vodnih ureditev v strugi Selške Sore in škode zaradi pritokov, škode na premoženju prebivalcev itd.
- Kljub temu enotna metodologija nudi dobro relativno primerjavo med posledicami posameznega obratovalnega scenarija, četudi ocenjena škoda ni povsem realna.

Kot je bilo ugotovljeno, je ocenjena škoda dobra primerjava med posameznimi obratovalnimi scenariji, ne moremo pa trditi, da gre za povsem realno ocenjene škode. Zato smo pripravili tudi tabelo, ki prikazuje število poplavljenih objektov, ki so v posameznem razredu globine oziroma produkta globine in hitrosti. Rezultate prikazuje tabela 17.

Tabela 17: Število poplavljenih objektov pri posameznem scenariju

	Scenarij/kriterij	D < 0,5 m	0,5 < D 1,5 m	D > 1,5 m	DxV < 0,5 m ² /s	0,5 < DxV 1,5 m ² /s	DxV > 1,5 m ² /s	Skupno poplavljenih
Porušitve	Porušitev 1	90	102	60	130	58	64	252
	Porušitev 2	85	121	92	140	74	84	298
	Porušitev 3	46	85	207	72	78	188	338
Q200	1-Q200	38	105	77	101	54	65	220
	2 – Hitra reakcija	40	76	29	85	47	13	145
	3 - Pozno,120	33	96	29	90	55	13	158
	4 - Pozno, 140	38	83	29	99	39	12	150
	5 - Prelivanje,120	59	86	56	109	56	36	201
	6 - Prelivanje, 140	36	104	35	100	52	23	175
Q300	7-Q300	49	100	83	96	68	68	232
	8 – Hitra reakcija	38	88	29	108	35	12	155
	9 - Pozno, 120	33	104	31	102	48	18	168
	10 - Pozno, 140	30	101	30	100	47	14	161
	11 - Prelivanje, 120	60	90	59	113	47	49	209
	12 - Prelivanje, 140	53	94	49	105	56	35	196
Q400	13-Q400	80	103	91	145	54	75	274
	14 – Hitra reakcija	30	102	30	105	43	14	162
	15 - Pozno, 120	48	107	35	108	56	26	190
	16 - Pozno, 140	40	107	33	108	50	22	180
	17 - Prelivanje, 120	57	84	79	109	49	62	220
	18 - Prelivanje, 140	56	86	73	110	45	60	215
Q500	19-Q500	93	103	107	155	56	92	303
	20 – Hitra reakcija	34	110	31	106	47	22	175
	21 - Pozno, 120	29	118	62	117	46	46	209
	22 - Pozno, 140	36	112	53	111	54	36	201
	23 - Prelivanje, 120	69	122	98	158	52	79	289
	24 - Prelivanje, 140	57	124	95	147	53	76	276

Podatki o objektih so bili pridobljeni iz spletnih strani GURS (Javni geodetski podatki, 2023) in so bili tudi že upoštevani v modelu.

Metodologija določitve števila objektov v posameznem razredu nevarnosti je bila naslednja:

- Objekti, ki jih poplavita samo Dašnjica in Češnjica pri Q_{100} , niso bili upoštevani.
- Število objektov je bilo ločeno določeno za sloje po prvem kriteriju (globina vode) in za drugim kriteriju (produkta globine in hitrosti).
- V programskem orodju ArcGIS Pro smo določili tiste objekte, ki so znotraj sloja posameznega kriterija globine ali produkta globine in hitrosti oziroma so v 30 cm bližini tega sloja. Tako je obdelava rezultatov izvedena bistveno hitrejša, z rezultati pa smo na varni strani, saj tako rahlo precenimo število hiš v posameznem sloju.
- Kjer se posameznega objekta dotika več slojev globine oziroma produkta, je upoštevan bolj neugoden sloj. Sloji se torej med seboj izključujejo.

Z upoštevanjem števila poplavljenih objektov dobimo ločeno ocenjeno škodo, ki ni vezana na ocenjeno vrednost rabe tal, izbran faktor škode glede na globino vode in na točno delitev obsega poplavnih vod glede na rabo tal. Rezultati so tako bolj objektivni. Smo pa še vedno na varni strani, saj po naši metodologiji dela že 30 cm bližina razreda globine pomeni, da objekt smatramo kot poplavljen v tem razredu globine.

Objektom vrednosti nismo pripisali, saj nismo razpolagali s podatki CC-SI klasifikacije objektov (npr. stanovanjski objekti industrijski objekti itd.), vrednost objektov na m^2 pa tudi ni točno določena.

Ugotovitve so enake kot pri oceni škode:

- Bolj neugoden kriterij s stališča velikosti površin in števila objektov v posameznem razredu nevarnosti so globine vode.
- Hitra reakcija po varianti obratovanja 1 ima najmanj objektov, ki so potopljeni oziroma ogroženi s strani poplavnih vod.
- Pozna reakcija po varianti obratovanja 1 je z vidika ogroženih objektov bolj ugodna, kot prelivanje na koti 510 m.n.v. Obratovanje s $120 m^3/s$ pred prilagoditvijo obratovanja pomeni cca 8-10 poplavljenih objektov več, kot pri obratovanju s $140 m^3/s$. Večje je tudi število objektov v razredu globin večjih od 1,5 m.
- Prelivanje na koti 510 m.n.v. po varianti obratovanja 2 je najmanj ugoden obravnavan obratovalni scenarij. Z večanjem povratne dobe se število poplavljenih objektov bliža številu poplavljenih objektov, če ne bi zadrževali visokovodnega dogodka. Obratovanje s $120 m^3/s$ pred prilagoditvijo obratovanja pomeni cca 8-10 poplavljenih objektov več, kot pri obratovanju s $140 m^3/s$. Večje je tudi število objektov v razredu globin večjih od 1,5 m..

- Porušitveni scenariji zaradi nižjih vrednosti pritokov znova niso primerljivi. Primer počasne porušitve pregrade P3 pa je, kljub ugodnejšim robnim pogojem, znova najbolj neugoden scenarij.

5.4.1 Grafične priloge k rezultatom hidravličnega modela

Vsi scenariji, opisani v zgornjem poglavju, imajo svoj pripadajoč obseg poplavljenosti, polje globin ter produkta globine in hitrosti. Vsi scenariji so prikazani v grafičnih prilogah A_P1 do A_P3 (scenariji porušitev) in A1 do A24 (scenariji obratovanja). Pri prikazu rezultatov obravnavanih scenarijev smo se omejili le na prikaz kriterija globin, ki je bolj neugoden od kriterij produkta globine in hitrosti. Zaradi večjega obsega prilog smo za vsak scenarij tudi podali le eno karto oziroma prilogo, ki pa ne prikazuje celotnega modeliranega območja, temveč le najbolj ogroženo območje, tj. z največ poplavljenih objektov. To območje se nahaja od visokovodnega nasipa oziroma od prvega večjega sklopa hiš, v smeri dolvodno od zadrževalnika, pa do travniških površin dolvodno od sotočja z Dašnico in Češnjico. Gorvodno in dolvodno od tega območja je le manjše število objektov in urbane rabe prostora prevladujejo pa predvsem poplavne ravnice, kjer se obseg poplav med obravnavanimi scenariji sicer spreminja, a nima večjega vpliva na ocenjeno škodo ali število poplavljenih objektov.

Spodnja tabela 18 prikazuje obravnavan scenarij, opis in oznako pripadajoče grafične priloge.

Tabela 18: Seznam prilog in opis k prilogam

Številka scenarija	Opis scenarija	Številka priloge
P1	Porušitveni primer 1	A_P1
P2	Porušitveni primer 2	A_P2
P3	Porušitveni primer 3	A_P3
1	Q ₂₀₀ brez zadrževanja.	A1
2	Q ₂₀₀ , takojšnje ukrepanje po varianti obratovanja 1 in povečanje iztoka na 164 m ³ /s, dosežena kota 510 m.n.v.	A2
3	Q ₂₀₀ , ukrepanje na vrhu visokovodnega dogodka po varianti obratovanja 1, do takrat iztok 120 m ³ /s. Iztok 184 m ³ /s, dosežena kota 510 m.n.v.	A3
4	Q ₂₀₀ , ukrepanje na vrhu visokovodnega dogodka po varianti obratovanja 1, do takrat iztok 140 m ³ /s. Iztok m ³ /s m ³ /s, dosežena kota 510 m.n.v.	A4
5	Q ₂₀₀ , ohranjanje kote 510 m.n.v. po varianti obratovanja 2, prej iztok 120 m ³ /s. Q _{max} = 268 m ³ /s.	A5
6	Q ₂₀₀ , ohranjanje kote 510 m.n.v. po varianti obratovanja 2, prej iztok 140 m ³ /s. Q _{max} = 231 m ³ /s.	A6
7	Q ₃₀₀ brez zadrževanja.	A7
8	Q ₃₀₀ , takojšnje ukrepanje po varianti obratovanja 1 in povečanje iztoka na 178 m ³ /s, dosežena kota 510 m.n.v.	A8
9	Q ₃₀₀ , ukrepanje na vrhu visokovodnega dogodka po varianti obratovanja 1, do takrat iztok 120 m ³ /s. Iztok 202 m ³ /s, dosežena kota 510 m.n.v.	A9
10	Q ₃₀₀ , ukrepanje na vrhu visokovodnega dogodka po varianti obratovanja 1, do takrat iztok 140 m ³ /s. Iztok 193 m ³ /s, dosežena kota 510 m.n.v.	A10
11	Q ₃₀₀ , ohranjanje kote 510 m.n.v. po varianti obratovanja 2, prej iztok 120 m ³ /s. Q _{max} = 272 m ³ /s.	A11
12	Q ₃₀₀ , ohranjanje kote 510 m.n.v. po varianti obratovanja 2, prej iztok 140 m ³ /s. Q _{max} = 253 m ³ /s.	A12
13	Q ₄₀₀ brez zadrževanja.	A13
14	Q ₄₀₀ , takojšnje ukrepanje po varianti obratovanja 1 in povečanje iztoka na 195 m ³ /s, dosežena kota 510 m.n.v.	A14

15	Q ₄₀₀ , ukrepanje na vrhu visokovodnega dogodka po varianti obratovanja 1, do takrat iztok 120 m ³ /s. Iztok 227 m ³ /s, dosežena kota 510 m.n.v.	A15
16	Q ₄₀₀ , ukrepanje na vrhu visokovodnega dogodka po varianti obratovanja 1, do takrat iztok 140 m ³ /s. Iztok 218 m ³ /s, dosežena kota 510 m.n.v.	A16
17	Q ₄₀₀ , ohranjanje kote 510 m.n.v. po varianti obratovanja 2, prej iztok 120 m ³ /s. Q _{max} = 299 m ³ /s.	A17
18	Q ₄₀₀ , ohranjanje kote 510 m.n.v. po varianti obratovanja 2, prej iztok 140 m ³ /s. Q _{max} = 291 m ³ /s.	A18
19	Q ₅₀₀ brez zadrževanja.	A19
20	Q ₅₀₀ , takojšnje ukrepanje po varianti obratovanja 1 in povečanje iztoka na 213 m ³ /s, dosežena kota 510 m.n.v.	A20
21	Q ₅₀₀ , ukrepanje na vrhu visokovodnega dogodka po varianti obratovanja 1, do takrat iztok 120 m ³ /s. Iztok 260 m ³ /s, dosežena kota 510 m.n.v.	A21
22	Q ₅₀₀ , ukrepanje na vrhu visokovodnega dogodka po varianti obratovanja 1, do takrat iztok 140 m ³ /s. Iztok 250 m ³ /s, dosežena kota 510 m.n.v.	A22
23	Q ₅₀₀ , ohranjanje kote 510 m.n.v. po varianti obratovanja 2, prej iztok 120 m ³ /s. Q _{max} = 346 m ³ /s.	A23
24	Q ₅₀₀ , ohranjanje kote 510 m.n.v. po varianti obratovanja 2, prej iztok 140 m ³ /s. Q _{max} = 338 m ³ /s.	A24

6 ZAKLJUČEK

V sklopu magistrske naloge smo obravnavali obratovanje suhega zadrževalnika Pod Sušo nad Železniki za povratne dobe poplavnih vod nad Q_{100} . V prvih poglavjih so opisana orodja in teoretična izhodišča, potrebna za pripravo in analizo obratovalnih scenarijev. Pri opisu vhodnih podatkov smo podali obratovalne parametre pregrade in trenutni predvideni načrt obratovanja zadrževalnika. Ta predvideva zadrževanje vseh pretokov nad 120 do 140 m^3/s , pri čemer kota vode na pregradi ne sme preseči 510 m.n.v. Ko je ta kota dosežena (za kar smo določili cca Q_{130}), se to koto ohranja, vso doteklo vodo pa prelivamo preko preliva na pregradi. Kota 511 m.n.v. je lahko dosežena pri dogodkih Q_{10000} , kota 512 m.n.v., krona pregrade, pa ne sme biti nikoli dosežena.

Zadrževalnik je bil dimenzioniran na podlagi hidrološke študije iz leta 2010, leta 2021 pa je bila izdelana nova študija, ki ima bistveno večje konične vrednosti pretoka od Q_{100} naprej, konice visokovodnih valov pa so dosežene uro hitreje. Odločili smo se, da nadaljnje analize izvedemo na osnovi nove hidrološke študije, in sicer za pretoke Q_{200} , Q_{300} , Q_{400} in Q_{500} .

Za analize delovanja zadrževalnika smo naredili dva modela:

- Enostaven model v programu MS Excel, ki podaja povezavo med volumnom in koto nadmorske višine vode v zadrževalniku, skladno s obratovalnimi parametri talnega izpusta in preliva pregrade. Z modelom smo analizirali obratovalne scenarije, ki so bili vhodni podatek za hidravlični model.
- Polni 2D hidravlični model načrtovanega stanja območja Železnikov in Selške Sore, dolvodno od zadrževalnika. Model, umerjen na projektirano stanje pri Q_{100} , je narejen na podlagi prečnih profilov za načrtovano stanje Selške Sore in na podlagi LIDAR podatkov. V modelu so bili upoštevani vsi stanovanjski in industrijski objekti, protipoplavni nasipi, pritoki in različni tipi rabe tal. Zaradi pomanjkanja podatkov nismo upoštevali mostov, jezovi in pragovi na obravnavanem odseku pa so upoštevani na delno poenostavljen način. V vseh obravnavanih scenarijih je bila dosežena ustrezna stabilnost modela, rezultati pa so primerljivi z vsemi razpoložljivimi študijami in poplavnimi kartami.

Na podlagi prvega modela, obratovalnih navodil in hidrološke študije smo analizirali režime obratovanja zadrževalnika pri dogodkih nad Q_{100} . Za dogodke od cca Q_{130} - Q_{150} dalje se je namreč izkazalo, da je zaradi večjih vrednosti pretoka po novi hidrološki študiji kota 510 m.n.v. presežena. Zato smo podali dva različna predloga obratovalnih scenarijev:

- Predvideno obratovanje, ki predvideva prelivanje vse dotekle vode z namenom ohranjanje kote 510 m.n.v.

- Predlog obratovanja, ki predvideva povečan konstantni izpust vode iz pregrade, ko je ugotovljeno, da povratna doba visokovodnega vala presega Q_{100} . Glede na čas identifikacije visokovodnega dogodka (zelo zgodaj ali na vrhu dogodka) so podane vrednosti pretoka, ki ga moramo spuščati, da na pregradi ne presežemo kote 510 m.n.v.

Za obe varianti obratovanja smo preverili tudi hidrograme iztoka iz pregrade, če bi lahko dosegli koto 511 m.n.v. ali 512 m.n.v. Nadaljne analize nismo izdelali, saj spreminjanje obratovalnih parametrov pregrade ni predmet naloge. Preverili smo, kakšen je vpliv projektnega iztoka $120 \text{ m}^3/\text{s}$ oziroma $140 \text{ m}^3/\text{s}$ pred začetkom prelivanja oziroma povečanjem iztoka.

Na podlagi višine vode v akumulaciji za posamezen časoven korak in vrednosti projektnega iztoka iz pregrade smo naredili tabele, ki lahko služijo pri identifikaciji povratne dobe visokovodnega dogodka med obratovanjem. Tabele upoštevajo le višino vode in eno obliko hidrograma visokovodnih valov, saj ostali podatki akumulacije in hidroloških meritev v tej fazi projekta še niso (bile) jasne.

Vsi zbrani iztočni hidrogrami – po 6 scenarijev (visokovodni val brez zadrževanja, zgodnja identifikacija, pozna identifikacija z dvema projektnima iztokoma in prelivanje z dvema projektnima iztokoma) za Q_{200} do Q_{500} – so bili zbrani in vneseni v hidravlični model. Analizirana sta bila tudi scenarija delne porušitve pregrade in scenarij počasne porušitve pregrade. Izračunanih je bilo torej 27 scenarijev, 24 scenarijev obratovanja s komplementarnimi vrednostmi pritokov Q_{100} in 3 scenariji porušitve pregrade z upoštevanjem nizkih vrednosti pritokov. Za izbrane scenarije in porušitve je bila analizirana dinamika gibanja poplavnih vod skozi Železnike.

Za vsak scenarij je bil določen obseg poplavljanja. Ugotovljeno je bilo, da se zaradi majhnih razpoložljivih razlivnih površin v ozki dolini ta ne spreminja v večjem obsegu, zato so bili skladno s Pravilnikom (2007) določeni trije razredi globin poplavne vode in trije razredi produkta globine in hitrosti poplavne vode. Kriterij globin se je izkazal kot bolj neugoden. Za vse scenarije je bil obseg poplavljenih površin analiziran po posameznem kriteriju. Ti obsegi so služili za osnovo določitve škode pri posameznem scenariju. Ocenjena škoda zaradi pomanjkanja podatkov o realni vrednosti zemljišč in objektov na območju Železnikov morda ni realna, vsekakor pa služi kot dobra relativna primerjava med posledicami različnih povratnih dob poplav in posledicami posameznega obratovalnega režima.

Ugotovljeno je bilo, da je največja škoda v primeru popolne porušitve pregrade in pri nezadržanih visokovodnih valovih, čemur se je nujno treba izogniti. Pri obratovalnih primerih je bilo ugotovljeno, da je trenutni predvideni način obratovanja pri dogodkih nad Q_{100} , torej ohranjanje kote 510 m.n.v. in prelivanje dotekle vode, bistveno manj ugoden kot predlagani režim obratovanja, ki sloni na identifikaciji visokovodnega vala nad Q_{100} .

Trenutni način obratovanja pri dogodkih nad Q_{100} z prelivanjem je z večanjem povratne dobe po posledicah vse bolj podoben nezadržanemu visokovodnemu valu. Razlog je v tem, da je z večanjem povratne dobe čas dosežene kote 510 m.n.v. vse bližje času konice doteklega visokovodnega vala. Ko se torej začne prelivati enak pretok, kot v akumulacijo priteka in s tem ohranjati koto, prelivamo konične vrednosti visokovodnih dogodkov. Zadrževalnik torej zadrži le naraščajočo vejo visokovodnega vala, ne pa samih pretokov tik za konico VV vala in padajoče veje, ki ima tudi zelo visoke pretoke.

Predlagan način obratovanja, torej zgodnja identifikacija oziroma identifikacija na vrhu doteklega visokovodnega vala, pa ima tudi svoje omejitve. Napačna identifikacija in posledično večji iztok bi lahko pomenil manjše poplave v Železnikih, ki pa ne bi bile potrebne. Pri identifikaciji se v nalogi tudi opiramo na večje število predpostavk. Vsekakor pa bi bilo za optimiziranje obratovanja v času izrednih razmer na zadrževalniku potrebno vzpostaviti dober sistem meritev hidroloških parametrov in pretokov v prispevnem območju Selške Sore gorvodno od zadrževalnika, na katere bi se lahko pri obratovanju oprli v času dogodkov in ustrezno ukrepali, vsaj v skladu s pozno identifikacijo dogodka (ob konici pretoka), ki smo jo v nalogi obravnavali in se izkaže kot bistveno bolj ugodna kot v prejšnjem odstavku opisano obratovanje s prelivanjem.

Predlagan način obratovanja torej zahteva več meritev, a v kolikor te meritve zagotavljajo možnost okvirne identifikacije povratne dobe visokovodnega dogodka, lahko s prilagoditvijo obratovanja preprečimo večje obsege poplavljanja dolvodno in hkrati zagotovimo varnost pregrade.

Pri vseh rezultatih naloge se moramo tudi zavedati, da je v preteklih dogodkih k precejšnjemu obsegu škode pri poplavljanju Selške Sore prispeval vpliv velikih količin plavja ter nanosov sedimentov in blatnega toka, ki so posledica izrazito hudourniškega delovanja Selške Sore in pritokov, posledično pa zaradi njih prihaja do večjih obsegov poplavljanja. Takšne dogodke je zelo težko modelirati in predvideti, pregrada pa jih zadrži le delno. Zato je pomembno, da so hudourniki in gozdovi na prispevnem območju pravilno urejeni in redno vzdrževani, kar bo ob visokovodnih dogodkih zmanjšalo količino plavja in sedimentov ter povečalo protipoplavno varnost.

Pri nadaljnji pripravi obratovalnih navodil zadrževalnika bi bil smiselni tudi širši pogled na možno vlogo obravnavanega objekta v sistemu preprečevanja škodljivega delovanja voda in sicer na nivoju porečja celotne Sore in Save. Zaradi razgibanega reliefa na območju lahko poplavlja Poljanska Sora, pretok na Selški Sori pa ne preseže npr. $100 \text{ m}^3/\text{s}$. Pri takšnem pretoku Železniki sicer niso poplavljeni, a lahko v kombinaciji z večjim pretokom Poljanske Sore dolvodno pomeni poplavljanje Sore ali Save, kar se je deloma zgodilo v Medvodah v avgustovski ujmi v letu 2023 (ko je bil zadrževalnik sicer še v fazi gradnje). Za takšne dogodke bi bilo smiselno v bodoče aktivirati zadrževalnik in vsaj delno omiliti

obseg poplavljanja dolvodno. Žal so takšni dogodki zaradi podnebnih sprememb vse bolj pogosti, tematike obratovanja zadrževalnikov in poplavnih vod pa vse bolj pomembne.

VIRI

Agencija Republike Slovenije za okolje. 2023. Spletni pregledovalnik Lidar. Ljubljana, ARSO.
http://gis.arso.gov.si/evode/profile.aspx?id=atlas_voda_Lidar@Arso. (Pridobljeno 1. 3. 2023.)

ARSO, 2007. Porocilo o vremenski in hidrološki situaciji 18. septembra 2007. (24.09.2007)

Atlas okolja. Ministrstvo za okolje, podnebje in energijo, Agencija Republike Slovenije za okolje. 2023.
(Pridobljeno 29. 12. 2023.)

Boussekine, M. and Djemili, L. (2016). Modelling approach for gravity dam break analysis. *Journal of Water and Land Development*, 30(1), pp.29–34. doi:<https://doi.org/10.1515/jwld-2016-0018>.

Branko, Z. 2012. Smernice za zagotavljanje varnosti pregradnih objektov. El. Knjiga - Ljubljana: Inženirska zbornica Slovenije.

Brilly, M., Mikoš, M., Šraj, M. 1999. Vodne ujme: varstvo pred poplavami, erozijo in plazovi. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo

Brunner, G. W. 2016. HEC-RAS River Analysis System User's Manual. Virginia, U.S. Army Corps of Engineers: 960 str.

dnevnik.si, <https://www.dnevnik.si/1042476489> (Pridobljeno 29. 12. 2023.)

HEK, projektiranje in svetovanje, Doroteja Starec s.p. 2018. Celovita hidrološko-hidravlična analiza porečja Selške, Poljanske in skupne Sore na območju občin Žiri, Gorenja vas – Poljane, Škofja Loka in Medvode s predlogom celovitih ukrepov za zmanjševanje poplavne H/18, Hidrološki del – obnova hidroloških izhodišč Poljanske, Selške in skupne Sore. Št. naloge nevarnosti, št. projekta. K60- 8/2018-HŠ.

Hemert, H., Igigabel, M., Pohl, R. et al. 2013. The International Levee Handbook. London, Ciria

Hidroinštitut, inštitut za hidravlične raziskave, 2022. Hidravlična modelna raziskava pregrade pod Sušo. Poročilo. Št. poročila 1228.

HSE-Invest, družba za inženiring in izgradnjo energetskih objektov d.o.o. 2022. Protipoplavna ureditev Selške Sore II. Faza. PZI - projektna dokumentacija za izvedbo gradnje. Št. projekta 8015/2021

Huizinga, J., De Moel, H. and Szewczyk, W. (n.d.). Methodology and the database with guidelines Global flood depth-damage functions 2017 EUR 28552 EN. [online] doi:<https://doi.org/10.2760/16510>

Human, N. 2008. Skrb za varnost pregrad v Sloveniji in možnost za zmanjšanje tveganja. Mišičev vodarski dan - zbornik. Maribor: 269-278

ICOLD Bulletin 99: Statistical analysis of dam failures (ICOLD Committee on Dam Safety, 2019)

Inštitut za vode Republike Slovenije. 2018. Metodologija za novelacijo predhodne ocene poplavne ogroženosti (določitev novih oz. dodatnih območij pomembnega vpliva poplav): 64 str.

IZVO-R, projektiranje in inženiring d.o.o. 2010. Idejni projekt za ureditev Selške Sore za zagotavljanja poplavne varnosti širšega območja Železnikov. Št. projekta C54-FR/10

IZVO-R, projektiranje in inženiring d.o.o. 2012. Izdelava kart poplavne nevarnosti in kart razredov poplavne nevarnosti za izbrana območja občine Železniki. Št. projekta E-56-FR/12.

Karim, I.R., Hassan, Z.F., Abdullah, H.H. and Alwan, I.A. (2021). 2D-HEC-RAS Modeling of Flood Wave Propagation in a Semi-Arid Area Due to Dam Overtopping Failure. Civil Engineering Journal, 7(9), pp.1501–1514.

Klabus, A. 2007. Visoke vode 18. septembra 2007 - že četrte poplave v povodju Selške Sore v zadnjih 17 letih. Poplave v Sloveniji 2007: 15-21

kraji.eu, <https://kraji.eu/slovenija/zelezniki/slo> (Pridobljeno 29. 12. 2023.)

Maribeth Hughett Price (2023). Mastering ArcGIS Pro. New York: McGraw-Hill Education.

MKGP Portal. Ministrstvo za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano. 2023. (Pridobljeno 29. 12. 2023.)

odkrito.svet24.si, <https://odkrito.svet24.si/clanek/sveze/suse-poplave-tropske-noci-to-caka-slovenijo-ze-v-kratkem-825709> (Pridobljeno 29.12.2023.)

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. Uradni list RS, št. 60/07. (Objavljeno 6. 7. 2007.)

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

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 (samozaložba G. Rak): 130 str.

Rusjan S., Kobold M., Mikoš M. 2009. Characteristics of the extreme rainfall event and consequent flash floods in W Slovenia in September 2007. Nat. Hards Earth Syst. Sci., 9: 947-956

Steinman F., Banovec, P. 2008. Vodne zgradbe I. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za mehaniko tekočin z laboratorijem.

Trobec, T. 2011. Vodogradbeni protipoplavni ukrepi za varstvo pred škodljivim delovanjem hudourniških poplav kot sestavni del obvladovanja poplavnega tveganja. Dela 35: 103-124

Turk M. in sod. 2012. Varnost pregradnih objektov. I. kongres o vodah Slovenija 2012: 23- 32

Urzică, A., Mișu-Pintilie, A., Stoleriu, C.C., Cîmpianu, C.I., Huțanu, E., Pricop, C.I. and Grozavu, A. (2020). Using 2D HEC-RAS Modeling and Embankment Dam Break Scenario for Assessing the Flood Control Capacity of a Multi-Reservoir System (NE Romania). Water, 13(1), p.57.
doi:<https://doi.org/10.3390/w13010057>

USACE. 2018. Benchmarking of the HEC-RAS Two-Dimensional Hydraulic Modeling Capabilities: 137 str.

USACE. 2023. HEC-RAS 2D Modeling User's manual

USACE. 2023. HEC-RAS Hydraulic Reference Manual

www.poplavna-varnost.si, <https://www.poplavna-varnost.si/zelezniki/poplavna-ogrozenost/>
(Pridobljeno 29. 12. 2023.)

Zakon o vodah (ZV-1). Uradni list RS, št. 67/02, 2/04 – ZZdrI-A, 41/04 – ZVO-1, 57/08, 57/12, 100/13, 40/14, 56/15, 65/20, 35/23 – odl. US in 78/23 – ZUNPEOVE. (Objavljeno 26. 7. 2002.)

Zaletelj, M. 2010. Zadrževalniki na povodju Grosupeljščice. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Zaletelj): 57 str.