

UDK/UDC: 502/504:627(497.4Železniki)(078.7)

Prejeto/Received: 27.09.2024

Izvirni znanstveni članek – *Original scientific paper*

Sprejeto/Accepted: 19.11.2024

DOI: [10.15292/acta.hydro.2024.05](https://doi.org/10.15292/acta.hydro.2024.05)

Objavljeno na spletu/Published online: 13.01.2025

OPTIMIZACIJA DELOVANJA VISOKOVODNEGA ZADRŽEVALNIKA – ŠTUDIJA PRIMERA POPLAVNE ZAŠČITE MESTA ŽELEZNIKI Z VISOKOVODNIM ZADRŽEVALNIKOM POD SUŠO

OPTIMISATION OF A HIGH-WATER RESERVOIR – A CASE STUDY ON FLOOD PROTECTION FOR THE TOWN OF ŽELEZNIKI USING FLOOD RESERVOIR POD SUŠO

Igor Mlakar¹, Matjaž Knapič¹, Gašper Rak^{2,*}

¹ Hse Invest d.o.o., Obrežna ulica 170, 2000 Maribor

² Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Univerza v Ljubljani, Jamova 2, Ljubljana, Slovenija

Izvleček

Visokovodni zadrževalniki so eden najučinkovitejših protipoplavnih ukrepov, v načrtovanje katerih je ob izboljšanju poplavne varnosti možno vključiti tudi okoljske cilje za izboljšanje ekološkega stanja vodnih teles in obvodnega prostora. Zaradi dolgotrajnih postopkov načrtovanja in usklajevanja projektnih rešitev z zahtevami pristojnih deležnikov in mnenjedajalcev prihaja v tem času zaradi novih visokovodnih dogodkov in njihovih analiz do spremenjenih projektnih pretokov, kar zahteva spreminjanje in prilagajanje rešitev oziroma delovanje objektov. Članek na primeru zadrževalnika Pod Sušo nad Železniki predstavlja rezultate raziskave, katere cilj je bila optimizacija delovanja zaradi novih hidroloških izhodišč, ki izkazujejo bistveno višje vrednosti pretokov konic visokovodnih valov nad Q_{100} , kot so bile uporabljene v prejšnjih fazah načrtovanja. Predstavljen je model, ki je bil uporabljen za simulacije različnih pristopov obratovanja pri visokovodnih dogodkih do pretokov s 500-letno povratno dobo. Ocena posledic posameznega načina obratovanja pri različnih povratnih dobah visokovodnih dogodkov je bila analizirana z uporabo polnega 2D hidravličnega modela dolvodnega območja, pri čimer je bila na podlagi globin poplavnih vod in rabe tal ocenjena škoda za posamezni obravnavani scenarij. Rezultati kažejo, da je mogoče s predlaganim obratovanjem zadrževalnika doseči ugodnejši vpliv na poplavne razmere dolvodno in zmanjšanje gmotne škode.

Ključne besede: poplavna nevarnost, omilitveni ukrepi, visokovodni zadrževalnik, obratovalna navodila, ocena poplavne škode.

Abstract

Flood control reservoirs are one of the most effective flood prevention measures, as, in addition to improving flood safety, they can also incorporate environmental objectives to improve the ecological status of water bodies and riparian areas. Due to the lengthy processes of planning and coordinating project solutions with the requirements of all relevant stakeholders and experts, new flood events and their hydrological analyses have led to changes in the design discharges during this time, which require modifications and adaptations to the

* Stik / Correspondence: gasper.rak@fgg.uni-lj.si

© Mlakar I. et al.; Vsebina tega članka se sme uporabljati v skladu s pogoji [licence Creative Commons Priznanje avtorstva – Nekomercialno – Deljenje pod enakimi pogoji 4.0](#).

© Mlakar I. et al.; This is an open-access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution – NonCommercial – ShareAlike 4.0 Licence](#).

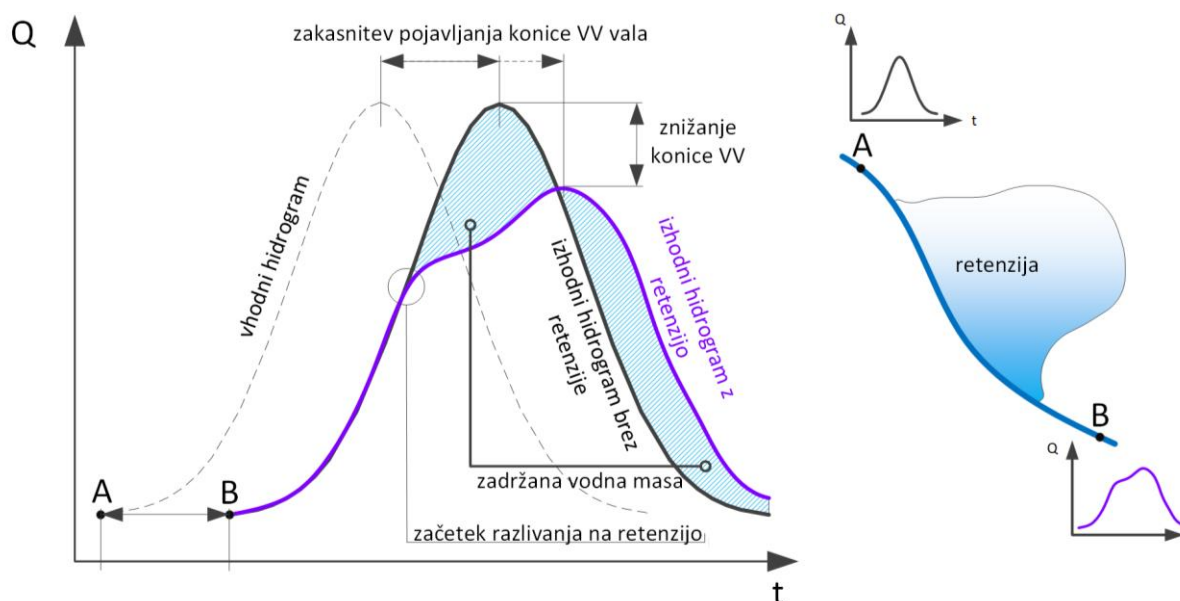
operating rules of flood control reservoirs. Using the Pod Sušo retention reservoir above Železniki in Slovenia as an example, this article presents the results of investigations aimed at optimising the reservoir’s operation based on new hydrological data, which show significantly higher peak discharge values above Q_{100} compared to the values used in previous planning phases. The model used to simulate different operating modes for flood events up to 500-year return period discharges is presented. The impact of each mode for different return periods of flood events was analysed using a full 2D hydraulic model of the downstream area, with damage assessed for each scenario based on flood depths and land use. The results indicate that the proposed operation of the flood retention basin can have a more favourable impact on downstream flood conditions and reduce material damage.

Keywords: flood hazard, mitigation measures, high-water reservoir, operation rules, flood damage assessment.

1. Uvod

Tako v Sloveniji kot tudi drugod po svetu poplave sodijo med naravne nesreče, ki letno povzročijo največ gmotne škode in prizadenejo veliko število prebivalstva. Glede na to, da Slovenija leži na prehodu alpskega sveta v nižinski panonski svet, se ta nevarnost pojavlja tako ob hudourniških strugah hribovitih območij kot tudi ob vodotokih na ravninskih območjih. Kar 15 % površin Slovenije je poplavno ogroženih, 7 % ljudi živi na območjih, kjer so poplave običajen pojav, in 24 % prebivalstva na območju velikih poplav (Penca et al., 1999). Najpogostejše in tudi z največ negativnimi posledicami so poplave vodotokov, ko je presežena

pretočna sposobnost glavne struge in se voda začne razlivi v obvodni prostor in poplavne ravnice. Za te vrste poplav so od naravnih vzrokov najpogostejši vremenski in podnebni pojavi, kot so dolgotrajna deževja, taljenje snežne odeje oziroma kombinacija obeh pojavov. Pri dinamiki odtočnega režima vodotoka in poplavni varnosti dolvodnih območij imajo pomembno vlogo poplavne površine z retenzijsko sposobnostjo. Zadrževalna sposobnost retenzijskih površin ugodno vpliva na preoblikovanje poplavnih valov, podaljševanje potovalnega časa in zniževanje konice visokovodnega (VV) vala ter posledično ugodno vpliva na poplavno varnost dolvodnih območij (slika 1) (Rak et al., 2016).



Slika 1: Značilno preoblikovanje hidrograma VV vala pri prehodu čez retenzijska območja (Rak et al., 2016).

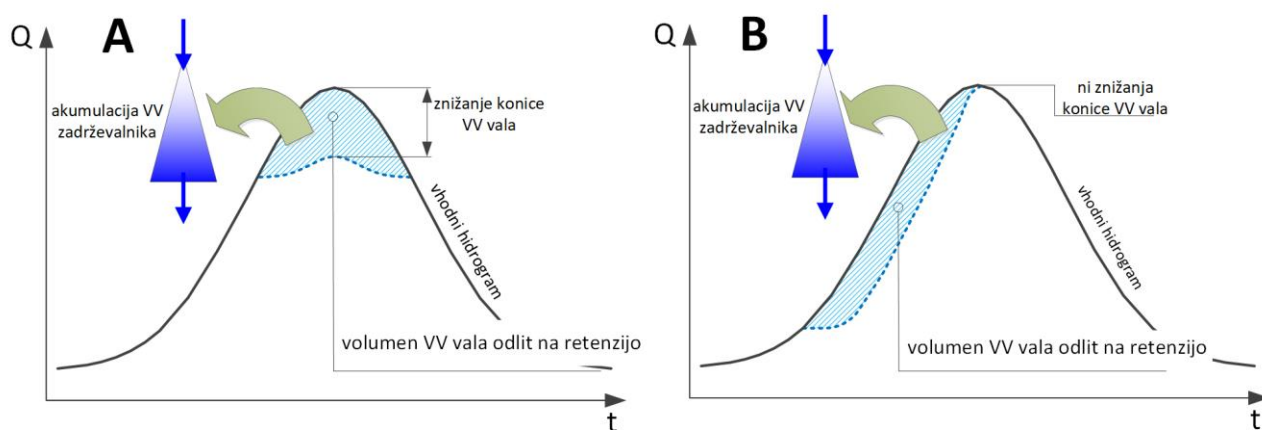
Figure 1: A typical flood wave hydrograph transformation in the passage across the retention areas (Rak et al., 2016).

Območja, ki imajo to funkcijo že zaradi samih naravnih danosti, je zato smiselno oziroma nujno ohranjati ali pa celo izboljšati njihovo zadrževalno sposobnost. Poplave so sicer od nekdaj prisoten pojav v obvodnem prostoru, ta prostor pa zaradi ugodnih geografskih lastnosti lahko predstavlja tudi velik razvojni potencial. Zato se pri prostorskem razvoju pojavljajo vse večji pritiski po koriščenju ravninskih območij ob vodotokih za različne gospodarske, športne in rekreacijske dejavnosti, gradnjo stanovanjskih sosesk itd. Z visokovrednimi posegi in izvajanjem dejavnosti, občutljivih na škodljivo delovanje voda na poplavnih površinah, se povečuje pričakovana poplavna škoda na teh območjih. Za njihovo zaščito se pogosto načrtujejo gradbeni posegi, kot so VV nasipi, s katerimi pa se spreminja odtočni režim in pri tem poplavno nevarnost preusmerja na druga območja, kar seveda ni sprejemljivo (Hill, 2010).

Predvsem z gradbenimi zaščitnimi ukrepi, kot so VV nasipi, regulacije, obtočni kanali, ki se načrtujejo za zmanjšanje poplavne nevarnosti, in drugimi antropogenimi posegi v prostor, lahko lokalno sicer izboljšamo stanje in preprečimo neposredne poplavne škode. Posledično pa se z zoženjem vodne poti izloči naravno funkcijo retenzijskih površin, spreminja dinamiko VV dogodkov in preusmerja poplavno nevarnost na druga območja (Sholtes, 2011; Rak et al., 2016). Na ta način namreč lahko dvignemo gladine vode v strugi in s tem poslabšamo razmere gorvodno, po drugi strani pa izključevanje retenzijskega prostora pomeni potovanje konice VV vala dolvodno z nezmanjšano ali celo povečano hitrostjo. Ker se retencija ne polni z vodo, ne prihaja do zadrževanja vode v njej in posledično se konica VV valov dolvodno ne znižuje (English Nature, 2002; Sholtes, 2011; Rak et al., 2016). To ima negativne posledice za območje ob vodotoku dolvodno. Trajnostno in uravnoteženo načrtovanje rabe prostora, usklajeno z gospodarskimi, okoljevarstvenimi in socialnimi interesi, mora zato vsebovati tudi obvladovanje poplavne nevarnosti z ohranjanjem oz. izboljšanjem

retenzijske sposobnosti poplavnih območij. Z namenom ohranjanja oziroma posnemanja funkcije poplavnih površin z zadrževanjem visokih voda in vplivom na odtočni režim ter zmanjšanje poplavne nevarnosti pri obvladovanju poplavne nevarnosti vse pogosteje uporabljamo tudi mokre in suhe VV zadrževalnike (Hill, 2010). VV zadrževalniki predstavljajo enega od bolj učinkovitih protipoplavnih ukrepov, v načrtovanje katerih je ob izboljšanju poplavne varnosti možno vključiti tudi sonaravne rešitve.

Zaradi navzkrižnih interesov pri prostorskem načrtovanju, umeščanju objektov v prostor oziroma določanju daljnoročne namembnosti rabe in varovanja značilnosti prostora oziroma okolja je premišljena strategija razvoja prostora in posegov v vode zelo pomembna. Trajnostna strategija razvoja prostora mora vsebovati tudi celovito in sistematično analizo in obvladovanje poplavne nevarnosti ogroženih območij (MNVP, 2017). Zaradi kompleksnosti umeščanja objektov za obvladovanje poplavne nevarnosti v prostor prihaja do dolgotrajnih postopkov načrtovanja in usklajevanja projektnih rešitev z zahtevami pristojnih deležnikov in mnenjedajalcev. Ker v času večletnih postopkov lahko pride do pojava novih VV dogodkov in novelacije hidroloških analiz, se lahko pri tem spremenijo tudi projektna izhodišča, čemur je treba prilagoditi projektne rešitve oziroma optimizirati delovanje objektov. Optimalno izkoriščanje koristnega volumna pri VV zadrževalnikih pomeni obratovanje z zaporničnimi elementi, ki je volumsko in časovno usklajeno z dinamiko VV vala. Polnjenje v prezgodnji fazi naraščanja pretoka pomeni zapolnitev razpoložljivega volumna VV zadrževalnika pred nastopom konice in posledično nezmožnost njenega znižanja (English Nature, 2002). Prav tako tudi prepozno aktiviranje zadrževalnika onemogoča izkoriščanje njegove polne prostornine in vpliva na znižanje konice (slika 2). Priprava optimizacije obratovanja VV zadrževalnika zahteva kompleksne hidrološko-hidravlične analize.



Slika 2: Različno preoblikovanje hidrograma VV vala v strugi glede na začetek prelivanja v retenzijo (prilagojeno po English Nature, 2002).

Figure 2: A different transformation of HW wave hydrograph of the river channel according to the beginning of the spilling onto the retention area (adopted from English Nature, 2002).

Večletno načrtovanje in izvedba izgradnje VV zadrževalnika Pod Sušo nad Železniki, katerega namen je reševanje poplavne varnosti mesta Železniki (IZVO-R, 2012), je dober primer potrebe po optimizaciji delovanja VV zadrževalnika. Mesto Železniki je izrazito podvrženo hudourniškim poplavam s strani Selške Sore in je bilo v zadnjih desetletjih poplavljeno kar osemkrat – leta 1979, 1990, 1992, 1993, 1995, 1998, 2007 in 2023. Poplave leta 2007 so bile med hujšimi v zgodovini Slovenije in so bile povod za sprejetje državnega prostorskega načrta v letu 2013, ki celovito ureja protipoplavno zaščito Železnikov v primeru nastopa 100-letnih vod (IZVO-R, 2012). V sklopu projekta IZVO-R (2012) se je načrtovala tudi izgradnja suhega VV zadrževalnika Pod Sušo. Iz posodobljenih hidroloških analiz, ki upoštevajo tudi VV dogodke med letoma 2008 in 2018 in korekcije starejših dogodkov, izhajajo hidrološka izhodišča, ki izkazujejo bistveno višje vrednosti pretokov konic VV valov nad 100-letno povratno dobo, glede na vrednosti, ki so bile upoštevane pri načrtovanju projektnih rešitev (HEK, 2021). Projekt VV zadrževalnika Pod Sušo, ki je v fazi izgradnje, je načrtovan na podatke, ki so bili določeni v sklopu projekta »Ureditev Selške Sore za zagotavljanje poplavne varnosti širšega območja Železnikov, IDP« (IZVO-R, 2012). Ker se projektne rešitve že umeščajo v prostor in jih ni mogoče spremeniti, je bil s strani izdelovalca dokumentacije PZI ponovno

preverjen predvideni način obratovanja zadrževalnika skladno s spremembo hidroloških izhodišč (HSE Invest, 2024).

Podrobna navodila za obratovanje in blaženje konic ekstremnih VV dogodkov za zadrževalnik Pod Sušo sicer še niso določena. Mednarodne smernice za dimenzioniranje, vzdrževanje in obratovanje suhih VV zadrževalnikov (Hemert et al., 2013; Riha, 2013) predlagajo čim bolj obdelan načrt obratovanja pri VV dogodkih. Glede na izsledke nove hidrološke študije (HEK, 2021) in vse bolj pogostih pojavov ekstremnih nalivov in padavin v članku obravnavamo in analiziramo različne metode obratovanja pri dogodkih, ki presegajo kapaciteto zadrževalnika, in njihove posledice na dolvodno območje. Analizirali smo predvideni način obratovanja, ki temelji na prvotnih hidroloških izhodiščih (IZVO-R, 2010), kakor tudi predlog načina obratovanja, ki je prilagojen prevajanju VV valov po noveliranih hidroloških izhodiščih (HEK, 2021). Rezultati analiz podajajo izhodišča za varnejše in optimalnejše obratovanje VV zadrževalnika. Pri tem smo se osredotočili na VV dogodke nad 100-letno povratno dobo. Varno obratovanje in reševanje poplavne varnosti dolvodnih območij tudi pri pretokih nad Q_{100} namreč pokaže, da projektne rešitve zagotavlja tudi odpornost na podnebne spremembe.

2. Metode in izhodišča modeliranja

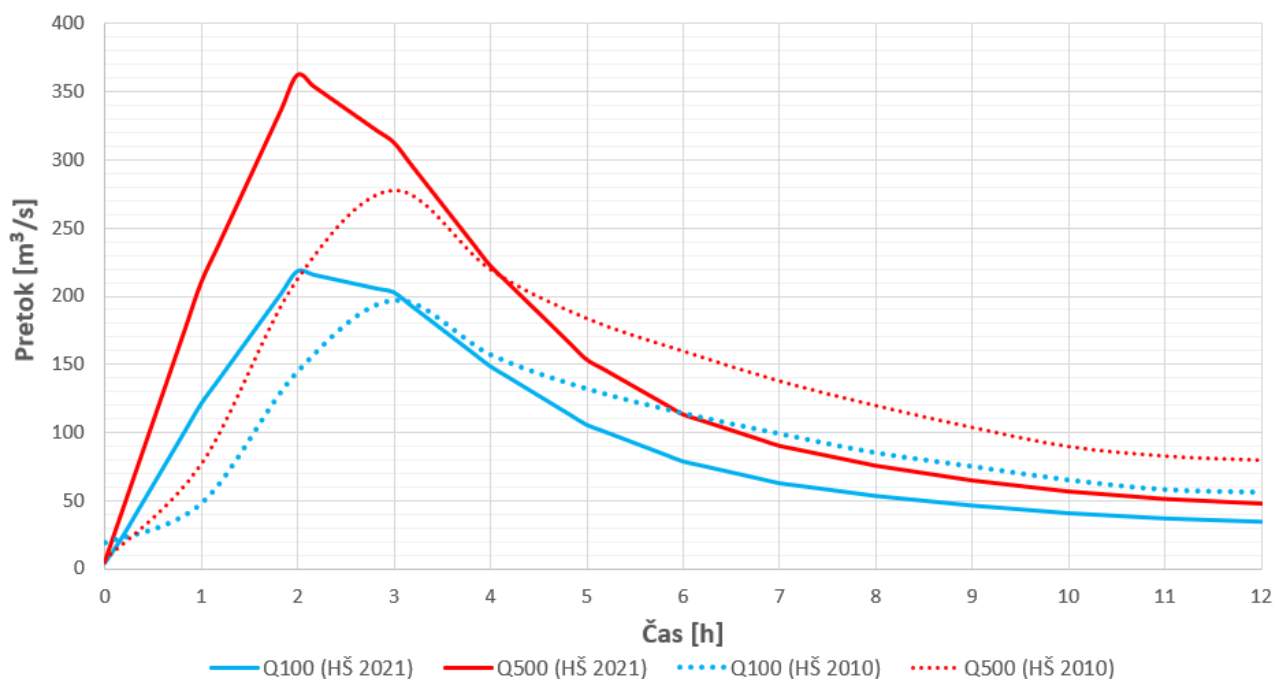
2.1 Hidrološka izhodišča

VV zadrževalnik Pod Sušo in celovite ureditve za zagotavljanje poplavne varnosti dolvodnih območij so bili načrtovani na podlagi hidroloških izhodišč, ki so bila določena s hidrološko študijo iz leta 2010 (IZVO-R, 2010), ki je bila izdelana v sklopu priprave projektne dokumentacija »Ureditev Selške Sore za zagotavljanje poplavne varnosti širšega območja Železnikov« (IZVO-R, 2012). Študija upošteva hidrološke podatke, izmerjene do leta 2008. Ta študija navaja, da lahko VV zadrževalnik Pod Sušo v primeru pojava VV valov Q_{100} zadrži vse pretoke, ki presežejo vrednosti med 120 in 140 m^3/s . Struga dolvodno od VV zadrževalnika (na območju Železnikov) je urejena na prevodnost 190 m^3/s . Tako ob pravilnem obratovanju zadrževalnika in tudi pri VV dogodkih na dolvodnih pritokih

(Zgornja in Spodnja Smoleva, Plenšak) pretok v mestu ne bi presegel 190 m^3/s .

Leta 2021 izdelana celovita hidrološka študija območja Sore zaradi korekcij pretokov vodomernih postaj in uporabe hidroloških podatkov, merjenih do leta 2018, bistveno povečuje pretoke nad Q_{100} (HEK, 2021). Vrednost Q_{100} se poveča s 197 m^3/s na 219 m^3/s , vrednost Q_{500} pa z 278 m^3/s na 363 m^3/s (preglednica 1). Prav tako so konice dogodkov dosežene eno uro prej. Slika 3 prikazuje primerjavo dogodka Q_{100} in Q_{500} po obeh hidroloških študijah (IZVO-R, 2010; HEK, 2021). V članku zaradi omenjenih povečanj analiziramo delovanje zadrževalnika z novimi hidrološkimi izhodišči.

Preostale konične vrednosti pretokov so bile grafično razbrane iz grafov porazdelitvenih funkcij obeh hidroloških študij in so podane v preglednici 1.



Slika 3: Primerjava VV valov Selške Sore po hidroloških študijah iz 2010 (IZVO-R, 2010) in 2021 (HEK, 2021).

Figure 3: Comparison of Selška Sora flood hydrographs from 2010 (IZVO-R, 2010) and 2021 (HEK, 2021) hydrological studies.

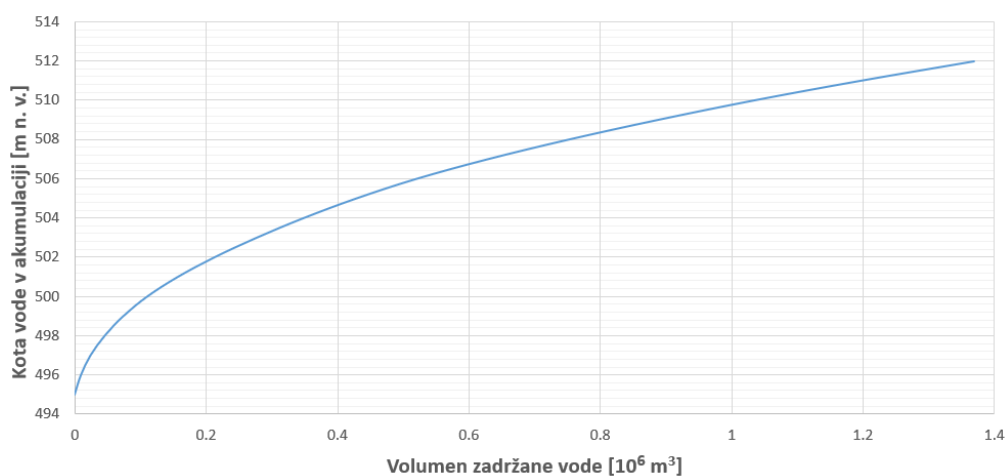
Preglednica 1: Vrednosti Q_{100} do Q_{500} Selške Sore po hidroloških študijah iz 2010 (IZVO-R, 2010) in 2021 (HEK, 2021).

Table 1: Peak discharges of the Selška Sora flood waves with return periods from 100 to 500 years from 2010 (IZVO-R, 2010) and 2021 (HEK, 2021) hydrological studies.

Povratna doba [leta]	Pretok konice VV vala (2010) [m ³ /s]	Pretok konice VV vala (2021) [m ³ /s]
100	197	219
200	224	288
300	248	308
400	267	328
500	278	363

2.2 Model za izračun obratovanja VV zadrževalnika

Za simuliranje relacij med posameznimi vhodnimi, notranjimi in izhodnimi parametri ter izračun njihovih vrednosti je bil izdelan 0-dimenzijski model v programskem orodju MS Excel. Model podaja medsebojno odvisnost parametrov: pretok na vtoku v VV zadrževalnik, volumen zadržane poplavne vode in njen nivo, iztok iz VV zadrževalnika preko preliva, iztok iz VV zadrževalnika preko talnega izpusta, volumen odtekle vode in kota vode v zadrževalniku. Podatki



Slika 4: Odvisnost med koto vode v akumulaciji VV zadrževalnika in količino zadržane vode, določena na podlagi podatkov iz IDP (IZVO-R, 2012).

Figure 4: Relationship between the water level in the flood control reservoir and the amount of water retained, based on the project documentation (IZVO-R, 2012).

so podani s časovno ločljivostjo 10 minut. Kjer prihaja do spremembe vhodnih parametrov znotraj časovnega intervala 10 min, npr. sprememba na 5 minut, so bile vrednosti linearno interpolirane za manjši časovni korak.

V modelu so bili uporabljeni naslednji podatki:

- Vhodni hidrogrami Q_{100} do Q_{500} so bili upoštevani po hidrološki študiji iz leta 2021.
- Kota vode v VV zadrževalniku pri količini zadržane vode je bila določena na podlagi enačbe, pridobljene iz odvisnosti med koto vode v VV zadrževalniku in količino zadržane vode, kot je podana v IDP (slika 4). Enačba je bila pridobljena iz funkcije »trendna črta« v programskem orodju MS Excel in verificirana na dejanskih podatkih. Odstopanja niso večja od 5 centimetrov.
- Osnovna obratovalna parametra pregrade (dopustne kote gladine v VV zadrževalniku in osnovni iztok iz VV zadrževalnika) sta podana v nadaljevanju (poglavje 2.3 »Karakteristike VV zadrževalnika Pod Sušo«).

Glavni rezultati modela so hidrogrami iztoka iz VV zadrževalnika in spreminjanje kote gladine vode v VV zadrževalniku pri posameznih obratovalnih primerih.

2.3 Karakteristike VV zadrževalnika Pod Sušo

Pri delovanju modela so bile upoštevane karakteristike VV zadrževalnika, ki izhajajo iz projektne dokumentacije (IZVO-R, 2012), in pretočne krivulje vseh pretočnih elementov, ki so bile določene z modelno raziskavo na fizičnem hidravličnem modelu (Hidroinštitut, 2022). Pregradni objekt VV zadrževalnika bo zgrajen kot nasuta pregrada v zoženju doline nekaj sto metrov nad pritokom Zadnje Smoleve, pred izrazitim rečnim meandrom. Na pregradi bo večji VV preliv s koto praga na pribl. 506 m n. v. in dolžino 25 m. Na prelivu je predvidena zaklopka višine 4 m. Pregrada bo imela temeljni izpust, ki sestoji iz dveh vzporednih cevi širine 5,5 m in višine 4,5 do 5,5 m. Pred talnim izpustom bo groba rešetka, vsaka cev izpusta pa bo regulirana s tablasto kotalno zapornico. Vsi elementi pregrade in hidromehanske opreme so bili ustrezno vključeni v modelno raziskavo.

Pri dimenzioniranju objekta so bila upoštevana naslednja izhodišča (IZVO-R, 2012):

- Pretočna sposobnost talnega izpusta: talni izpust je dimenzioniran tako, da s prosto gladino prevaja projektni pretok med 120 in 140 m³/s ob minimalni zaježitvi Selške Sore gorvodno od pregradnega profila. S podanim intervalom iztoka je mogoče ustrezno prilagajanje obratovanja glede na vodne količine pritokov na odseku med zadrževalnikom in Železniki. Projektni pretok je določen tako, da skupaj z vmesnimi dotoki dolvodno od VV zadrževalnika pri VV valovih ne presega pretoka, na katerega so dimenzionirani varovalni ukrepi v Železnikih (180–190 m³/s).
- Ob naraščanju pretoka nad vrednosti med 120 in 140 m³/s se začne polnjenje zadrževalnega prostora do maksimalne kote 510 m n. v., ki naj bi bila dosežena pri VV valu s povratno dobo 300 let po starih hidroloških izhodiščih oziroma pri VV valu s povratno dobo 150 let po novih hidroloških izhodiščih. Pri valovih, manjših od Q₁₀₀, zadrževalnik zadrži vse pretoke nad 120 oziroma 140 m³/s.
- Pri valovih s povratno dobo nad 100 let naj bi bilo obratovanje prilagojeno tako, da bo dosežen največji zadrževalni učinek, tj., da bo konica vala dolvodno od zadrževalnika čim nižja, čeprav bo presegala pretok za dimenzioniranje zaščitnih ukrepov v Železnikih.
- Glede na pravilnik za dimenzioniranje malih pregrad in VV zadrževalnikov (DWA, 2005) krone pregrade ne sme prelini visoka voda s povratno dobo 10.000 let ($Q = 525 \text{ m}^3/\text{s}$ po hidrološki študiji IZVO-R iz leta 2010), kar je projektni pretok za dimenzioniranje preliva čez pregrado ob predpostavki blokiranega talnega izpusta. Nekontrolirano prelivanje visokih voda čez nasuto pregrado bi povzročilo njeno porušitev. Pri 10.000-letni visoki vodi je kota gladine vode na pregradi 511 m n. v., kar je 1 m pod krono pregrade, ki je načrtovana na koti 512 m n. v.
- Za dogodke do Q_{10.000} je torej izhodišče obratovanje do največ kote 510 m n. v., za dogodek Q_{10.000} pa je dovoljena kota 511 m n. v. Potek dviga gladine v zadrževalniku s kote 510 na 511 m n. v. v primeru nastopa Q_{10.000} v tej fazi še ni natančno določen, zato je bila za vse izračune v članku upoštevana tako kota 510 kot tudi 511 m n. v. Kota 512 m n. v. ne sme biti dosežena, saj bi to pomenilo prelivanje čez nasuto pregrado in porušitev pregrade.
- Ko je kota gladine vode v VV zadrževalniku 510 m n. v. presežena, predvideno obratovanje predpisuje ohranjanje te kote in odvajanje vse dotekle vode iz VV zadrževalnika preko VV preliva.

Pri prevajanju vod skozi pregrado sodelujeta talni izpust in preliv. Sprva sodeluje le talni izpust, ki je ob VV dogodku reguliran s tablastima kotalnima zapornicama tako, da prevaja 120 m³/s. Ob tem gladina vode narašča. Ko gladina doseže koto 507,90 m n. v., se izvede manever hkratnega zapiranja talnega izpusta in začetka prelivanja čez VV preliv pregrade. Manever se izvede tako, da pretok ostane konstanten. Karakteristike

hidromehanske opreme so bile preverjene na fizičnem modelu (Hidroinštitut, 2022).

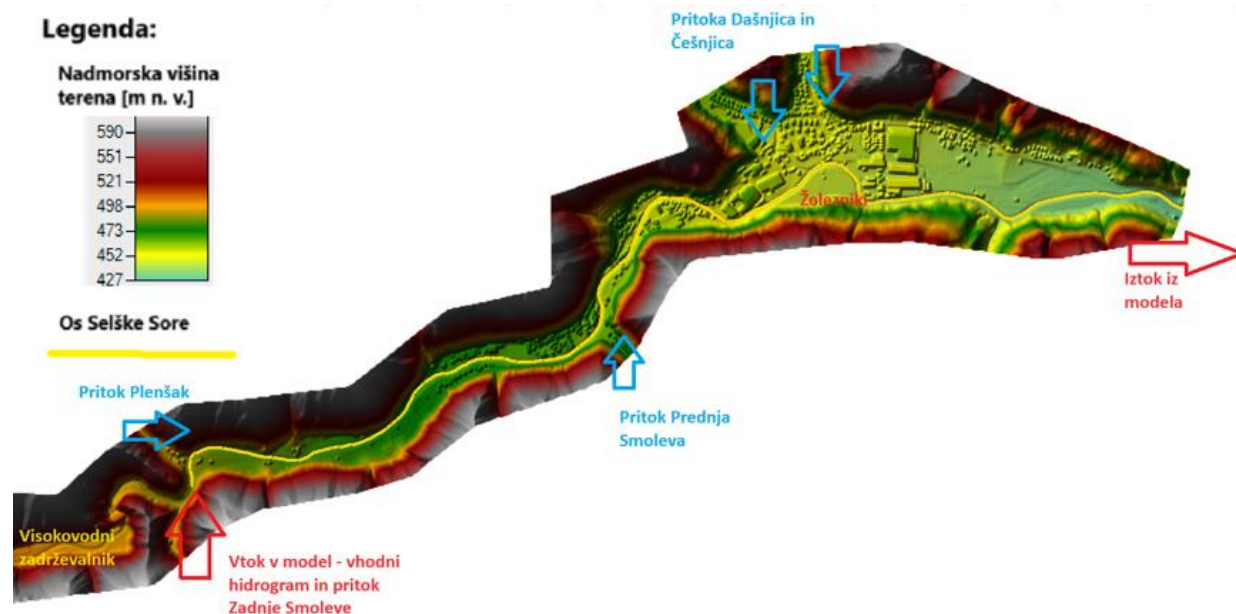
2.4 Polni 2D model vplivnega območja dolvodno

Za analizo vpliva različnega pristopa pri obratovanju VV zadrževalnika je bil izdelan polni 2D model v programskem orodju HEC-RAS 6.5. (USACE, 2023a; USACE, 2023b). HEC-RAS je razvila ameriška vojska in je poznan in uveljavljen program za hidrološke in hidravlične analize (npr. Rak et al., 2018; El Bilali et al., 2021; Bharath et al., 2021; Namara et al., 2022; Afzal et al., 2022; Burshtynska et al., 2023; Lim et al., 2024). Programsko orodje se v praksi uporablja tudi za 2D analize VV zadrževalnikov (Urzica et al., 2020) in za modeliranje obsega poplavnih vod pri poružitvah pregrade (Karim et al., 2021). Za vse obravnavane scenarije so bili z modelom analizirani potovanje in preoblikovanje VV valov dolvodno od VV zadrževalnika ter obseg poplavljenega območja in delež površin, ki se po veljavni zakonodaji za določitev stopnje poplavne nevarnosti nahaja v določenem razredu glede na 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). Osnovo za model so predstavljali trije nizi podatkov:

- Geodetski podatki iz LIDAR snemanja Slovenije in podatki o geometriji struge Selške Sore, ki so bili podani kot prečni prerezi na 20 metrov (IZVO-R, 2012). Iz prečnih profilov struge je bil izdelan 3D model struge, ki je bil z LIDAR terenom združen v enovit model terena.
- Podatki za umerjanje modela, ki izhajajo iz idejnega projekta za ureditev Selške Sore za zagotavljanje poplavne varnosti (IZVO-R, 2012).
- Hidrogrami na iztoku iz VV zadrževalnika, kot so bili določeni s simulacijami za posamezni scenarij obratovanja VV zadrževalnika.

Območje modeliranja zajema odsek dolvodno od VV zadrževalnika in obsega širše območje Železnikov, vse do zožitve doline pri Selcah (slika 5).



Slika 5: Območje polnega 2D hidravličnega modela za analizo vpliva obratovanja VV zadrževalnika na poplavne razmere dolvodno.

Figure 5: The domain of the full 2D hydraulic model for analysing the impact the flood control reservoir has on downstream flood conditions.

Dolžina modeliranega odseka Selške Sore in obvodnega prostora je znašala 6450 m. Osnovna velikost celice računske mreže je bila $3\text{ m} \times 3\text{ m}$, v strugi Selške Sore in njenih pritokih ter na območju topografskih detajlov in objektov pa so bile celice dodatno zgoščene na velikost $1\text{ m} \times 1\text{ m}$. Orodje HEC-RAS 2D uporablja tako imenovano podmrežno metodo, kjer za vsako stranico posamezne računske celice izračuna pripadajočo pretočno krivuljo, gladina vode pa se po posamezni celici spreminja glede na pripadajoči teren pod celico (USACE, 2023a), kar omogoča hitrejše izračune, hkrati pa so v modelu še vedno upoštevani elementi prostora, ki pomembno vplivajo na tokovne razmere. Na območjih, ki pomembno vplivajo na tokovne razmere (npr. struge vodotokov, VV nasipi, ceste, stavbe) in smo jih želeli natančneje simulirati, smo uporabili manjše celice, saj pri izračunih VV valov s strmo naraščajočim hidrogramom prihaja do zelo velikih in hitrih sprememb pretoka v strugi in zunaj nje. Hkrati pogosto prihaja do razlivanja vode med hišami, kjer smo prav tako uporabili manjše celice za natančnejši opis tokovnih razmer. Uporaba programa HEC-RAS za modeliranje zahtevnejših hidravličnih razmer podaja podobne rezultate kot primerljivi hidravlični modeli in programi (USACE, 2018).

Celice v strugi Selške Sore in v pritokih so bile usmerjene v smeri toka za večjo stabilnost modela. Prelomi celic vzdolž topografskih detajlov terena, ki pomembno vpliva na tokovne razmere, so bili izvedeni s pomočjo funkcije »breakline«, ki robove celic usmeri po zelenih lokalnih prelomih terena. Računska domena je imela skupno 452.919 celic in 72 elementov »breakline«. Koeficienti hrapavosti zunaj struge so bili določeni na podlagi rabe tal in so v razponu med 0,035 in $0,08\text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$, znotraj struge pa se gibljejo med 0,025 in $0,05\text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$ glede na rezultate umerjanja na Q_{100} po IDP (IZVO-R, 2012). Pri umerjanju je bilo ugotovljeno, da lokalno sicer prihaja do odstopanj do 15 cm, predvsem na meandrih in na območjih jezov v strugi. To je

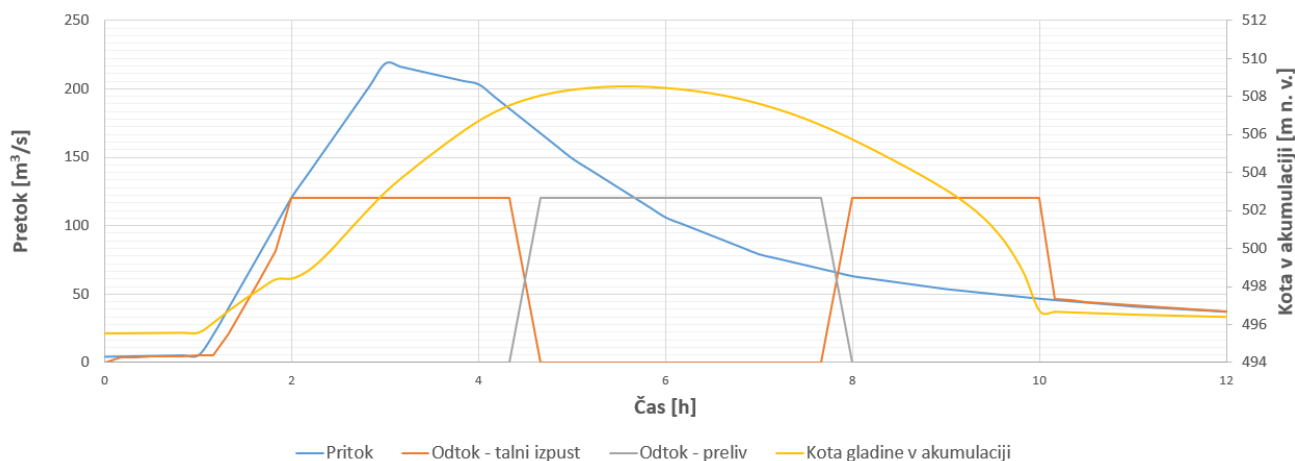
posledica različnega pristopa k modeliranju. Pri izračunih za IDP je bil uporabljen kombinirani 1D-2D model, v našem primeru pa polni 2D model. Poleg lokalnih odstopanj je ujemanje obeh modelov v splošnem dobro, zato menimo, da uporabljeni model realno prikazuje poteke VV dogodkov.

Modelirani so bili štirje pritoki, in sicer Plenšak, Prednja Smoleva, Dašnjica in Češnjica. Izmerjenih podatkov o njihovih strugah nam ni uspelo pridobiti, zato smo strugo, razvidno iz terena (izdelanega iz LIDAR podatkov), poglobili na način, da prevaja večino pretoka pri Q_{100} posameznega pritoka. Na obstoječih kartah poplavne nevarnosti (ARSO, 2023) smo namreč lahko preverili izračunani obseg poplav pritokov pri Q_{100} . Ugotovili smo, da je ujemanje ustrezno in zadosti natančno za potrebe analiz delovanja zadrževalnika.

3. Predlogi izboljšane obratovanja zadrževalnika

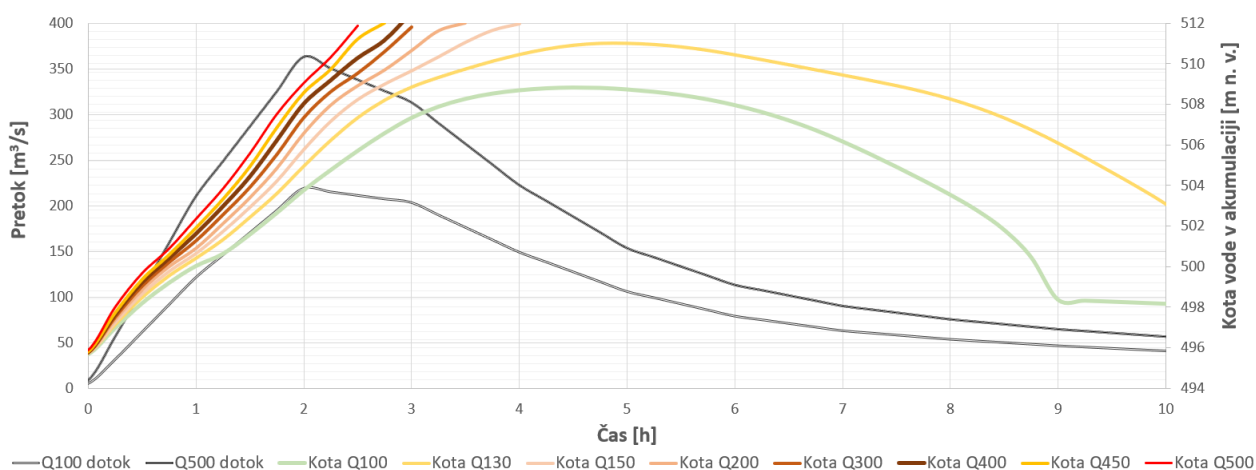
Za varno obratovanje VV zadrževalnika Pod Sušo je pomembno, da gladina dosežene vode pri različnih VV dogodkih in pri predvidenem iztoku ne preseže kote 510 m n. v. Kot primer izhodnega rezultata slika 6 prikazuje VV val Q_{100} na pregradi, ki je bil določen z modelom. Izkaže se, da je pregrada za prevajanje Q_{100} še vedno primerna, saj doseže maksimalno koto 508,50 m n. v.

Z modelom je bilo preverjeno gibanje gladine v zadrževalniku pri primerih od Q_{100} do Q_{500} v primeru zadrževanja vseh pritokov nad $120\text{ m}^3/\text{s}$ (slika 7). Vse analize so bile izvedene z najnovejšimi hidrološkimi izhodišči (HEK, 2021), ki so zaradi višjih pretokov manj ugodna za obratovanje VV zadrževalnika. Kota 510 m n. v. je dosežena pri dogodkih, katerih pretok konice VV vala doseže vrednost $240\text{ m}^3/\text{s}$. Ta vrednost torej predstavlja mejo, pri kateri VV zadrževalnik ni več v regularnem obratovanju, temveč lahko govorimo o izrednih VV dogodkih, ki presegajo kapaciteto VV zadrževalnika in povzročijo poplavljanje dolvodno.



Slika 6: Spreminjanje pretoka na vtoku v VV zadrževalnik, na iztoku skozi talni izpust, čez preliv in gibanje kote vode v akumulaciji VV zadrževalnika za primer obratovanja pregrade pri Q_{100} .

Figure 6: Inflow hydrograph, with outflow through the bottom outlet and via the spillway, as well as water level variations in the flood control reservoir for the case of dam operation at Q_{100} .



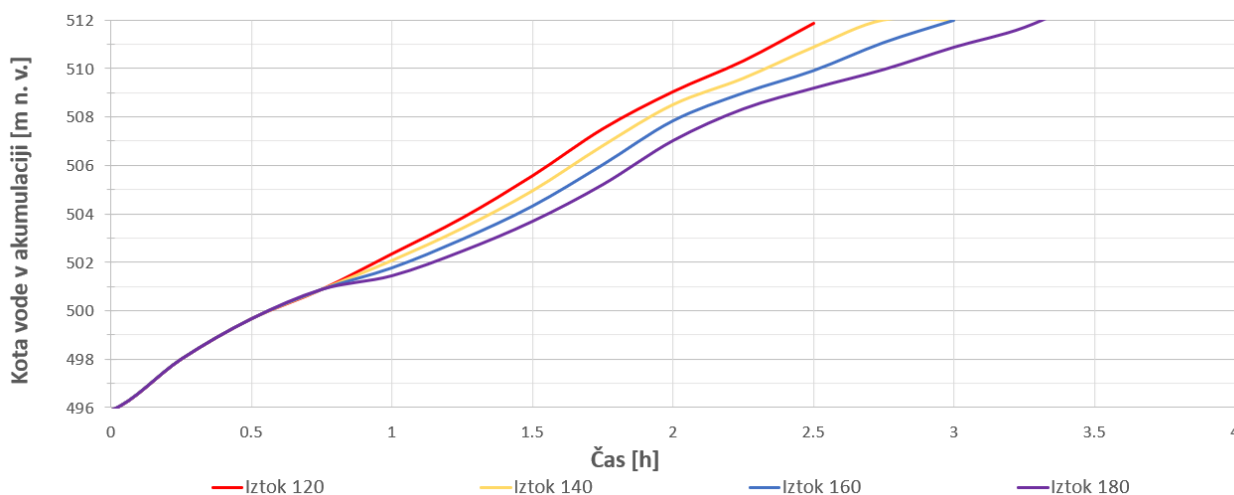
Slika 7: Dinamika kote vodne gladine v akumulaciji VV zadrževalnika pri iztoku $120 \text{ m}^3/\text{s}$ za VV valove različnih povratnih dob.

Figure 7: Dynamics of the water level in the flood control reservoir at the outflow of $120 \text{ m}^3/\text{s}$ for flood waves with different return periods.

Izračuni ob upoštevanju predvidenega načina obratovanja pokažejo zelo hitro naraščanje gladine v VV zadrževalniku pri vseh VV valovih nad pribl. Q_{150} (slika 7). Pri tem je najbolj neugoden gradient hitrosti naraščanja gladine, ki od kote 510 m n. v. do kritične kote 512 m n. v. pri dogodkih nad Q_{300} potrebuje manj kot pol ure, kar nakazuje izredno kratek razpoložljivi čas za ukrepanje.

Dodatno je bil preverjen vpliv na potek gladine v VV zadrževalniku, če se poveča dopusten iztok nad

120 oziroma $140 \text{ m}^3/\text{s}$. Pri iztoku iz pregrade $140 \text{ m}^3/\text{s}$ praktično ne prihaja do izboljšanja stanja. Pri iztoku iz zadrževalnika $160 \text{ m}^3/\text{s}$ pa že lahko prevajamo tudi dogodke do pribl. Q_{200} . Najbolj kritični obravnavani primer je bil Q_{500} . Rezultati pokažejo, da pri dogodku Q_{500} iztok $180 \text{ m}^3/\text{s}$ še vedno ne zadošča, kar je sicer že mejni pretok za vsaj delno poplavljanje dolvodno. Za dogodek Q_{500} slika 8 prikazuje naraščanje gladine v zadrževalniku pri iztokih med 120 in $180 \text{ m}^3/\text{s}$.



Slika 8: Dinamika gladine vode v akumulaciji VV zadrževalnika v primeru Q_{500} pri iztoku 120 do 180 m^3/s .

Figure 8: Water level dynamics in the flood control reservoir in the case of Q_{500} with outflow of 120 to 180 m^3/s .

Ne glede na iztok iz VV zadrževalnika (120 ali 180 m^3/s) presežemo koto krone pregrade. Pri tako ekstremnih dogodkih je zato nujna vsaj pripravljenost operaterjev in prebivalstva na možnost poplav in večje prilagoditve obratovanja tekom dogodka.

3.1 Obratovanje pri izrednih VV dogodkih po predvidenem načinu

Predvideni način obratovanja (IZVO-R, 2012) pri dogodkih, ki presegajo kapaciteto zadrževalnika, predvideva ohranjanje kote 510 m n. v., ko je ta dosežena. Koto se ohranja s prilagajanjem hidromehanske opreme tako, da je iztok preko VV preliava enak kot vtok v VV zadrževalnik. Takšno obratovanje je predvideno za dogodke, ki presegajo kapaciteto zadrževalnika, in povzroči poplavljanje dolvodnih območij.

V sklopu analiz smo za dogodke nad Q_{100} po tem načinu obratovanja analizirali še druge parametre, ki bi lahko vplivali na hidravlične razmere dolvodno, in sicer:

- Iztok iz VV zadrževalnika znaša 120 m^3/s oziroma 140 m^3/s , kar sta predvideni vrednosti iztoka, ki se prilagajata glede na razmere dolvodno od VV zadrževalnika.
- Maksimalna dosežena kota gladine se lahko dvigne s kote 510 na koto 511 m n. v.

Za vsako povratno dobo tako dobimo štiri možne kombinacije obratovanja, ki so bile analizirane z modelom obratovanja VV zadrževalnika.

3.2 Obratovanje pri izrednih VV dogodkih po predlaganem načinu

Glede na rezultate po predvidenem obratovanju, ki so prikazani v poglavju 4.1 in so se z vidika maksimalnih pretokov VV valov nad Q_{100} izkazali za neučinkovite pri zniževanju konic, je bil pripravljen predlog optimiziranega obratovanja. Treba je poudariti, da tudi pri predlaganem načinu obratovanja ni mogoče preprečiti poplavljanja Železnikov. Predlagani način obratovanja temelji na spremljanju pretokov Davče in Selške Sore ter na predhodnem povečanju iztoka iz VV zadrževalnika, čim je zanesljivo ugotovljeno, da dogodek presega kapaciteto VV zadrževalnika. To je možno ugotoviti na dva načina:

- Vrednost pretoka beležimo iz vodomernih postaj v VV zadrževalniku in primerjamo gibanje vrednosti pretoka z vnaprej določenimi hidrogrami VV valov.
- V primeru nedelovanja vodomernih postaj opazujemo gibanje kote gladine vode v VV zadrževalniku. Glede na iztok iz VV zadrževalnika in koto ob danem trenutku lahko ocenimo povratno dobo VV dogodka.

Pri tem je treba upoštevati vplive morebitne zamašenosti rešetke na talnem izpustu.

Pri obratovanju po predlaganem načinu je vrstni red naslednji:

- S spremljanjem meteoroloških podatkov skušamo že pred pričetkom zadrževanja napovedati velikostni red VV dogodka in primerno prilagoditi obratovanje VV zadrževalnika.
- Če zgornja točka ni možna, obratujemo kot v ustaljenih razmerah. Ko pretok VV dogodka doseže 240 m³/s, je kapaciteta VV zadrževalnika dosežena in bo z nadaljnjim večanjem pretoka tudi presežena. Iztok iz VV zadrževalnika se zato povečuje glede na dotok tako, da bo dosežena maksimalna kota 510 oziroma 511 m n. v. v primeru pretoka s 10.000-letno povratno dobo.
- Ko je dosežen največji pretok VV dogodka, se iztok iz VV zadrževalnika ustali na potrebni vrednosti prilagojenega iztoka, s katerim bo dosežena maksimalna kota 510 m n. v. oziroma 511 m n. v.
- Ko je kota iz prejšnje točke dosežena, se pretok VV vala že zmanjšuje pod maksimalno vrednost, kar je bilo preverjeno s simulacijami obratovanja VV zadrževalnika. Zato lahko začnemo ohranjati koto 510 oziroma 511 m n. v. VV zadrževalniku tako, da iztok iz VV zadrževalnika navežemo na pretok padajočega dela VV vala. Tako ne podaljšujemo VV razmer dolvodno in kontrolirano praznimo VV zadrževalnik.

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

- Čas identifikacije dogodka: prej ko prepoznamo potrebo po ukrepanju, več časa imamo za prelivanje potrebnega volumna zadržane vodne mase v VV zadrževalniku, kar pomeni manjši pretok, ki ga je za dosego cilja treba spuščati dolvodno.

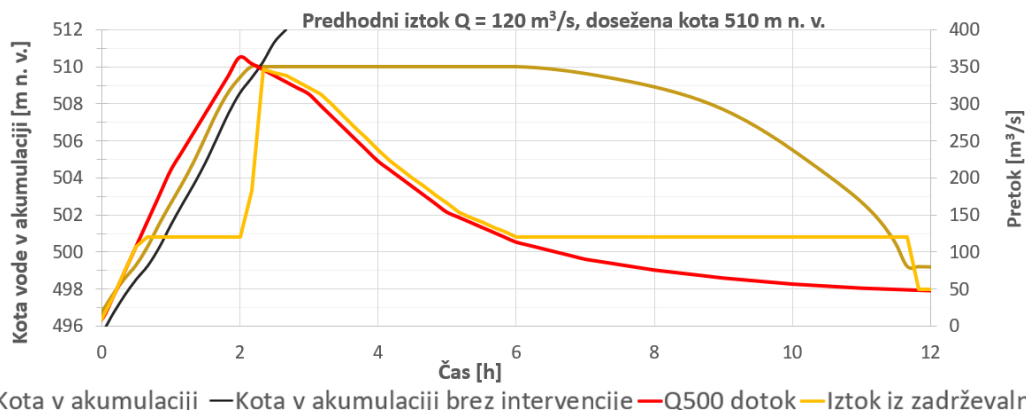
- Projektni iztok iz VV zadrževalnika: večji kot je dovoljeni iztok iz VV zadrževalnika, manjše povečanje iztoka, ki je opisano pod prejšnjo točko, potrebujemo.
- Omejitev kote na pregradi: če povišamo maksimalno dovoljeno koto na 511 m n. v., imamo večji razpoložljivi volumen zadrževalnika, kar zmanjša potrebno povečanje iztoka iz VV zadrževalnika.

Pri določitvi povečane vrednosti iztoka smo se omejili na dva skrajna primera – prvi primer predvideva, da 45 minut po začetku dogodka identificiramo povratno dobo dogodka na podlagi meteoroloških podatkov. Gre za malo verjeten primer, kjer se identifikacija zgodi že pred pričetkom zadrževanja vode, zato iztok iz VV zadrževalnika nima vpliva na prilagojeni iztok. V nadaljevanju je ta primer poimenovan »zgodnja identifikacija«. Drugi primer predvideva, da začnemo višati iztok iz VV zadrževalnika, ko pretok VV vala doseže 240 m³/s in iztok prilagajamo do doseženega vrha VV vala. Gre za realen primer, saj je na podlagi podatkov iz vodomernih postaj, ki so predvidene skladno z izvedbo projekta, možno spremljati vrednost pretokov, konice in pričetek upadanja VV vala. Ta primer poimenujemo »pozna identifikacija«.

4. Rezultati in diskusija

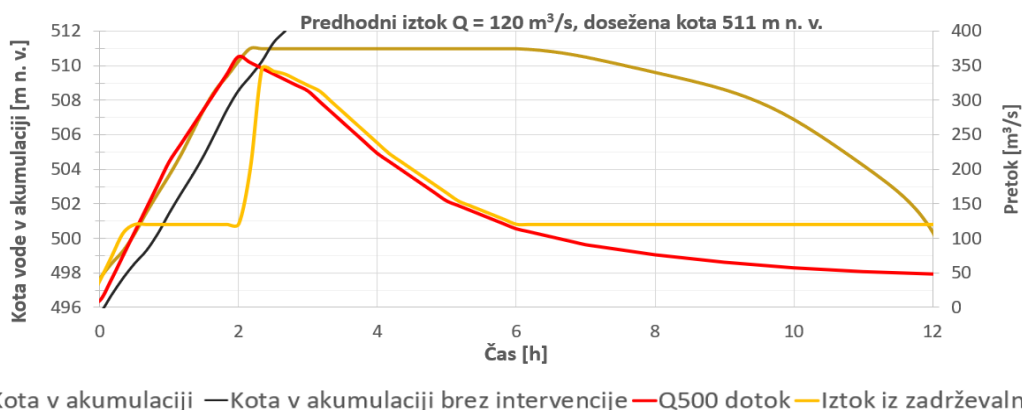
4.1 Analiza kontrolnih parametrov pri predvidenem načinu obratovanja

Slike 9–12 prikazujejo odnose med posameznimi analiziranimi parametri VV zadrževalnika, in sicer za dogodek Q₅₀₀ po novih hidroloških izhodiščih (HEK, 2021). Prikazana je konica vala Q₅₀₀, ki tudi predstavlja iztok brez vpliva zadrževanja, in iztok vode iz VV zadrževalnika. Zraven je prikazana še kota vode v VV zadrževalniku brez prilagoditve iztoka, ki hitro preseže koto 512 m n. v., in kota vode v VV zadrževalniku v primeru ohranjanja polne kote. Rezultati so prikazani za maksimalni doseženi koti 510 in 511 m n. v. in za predhoden iztok iz VV zadrževalnika 120 in 140 m³/s.



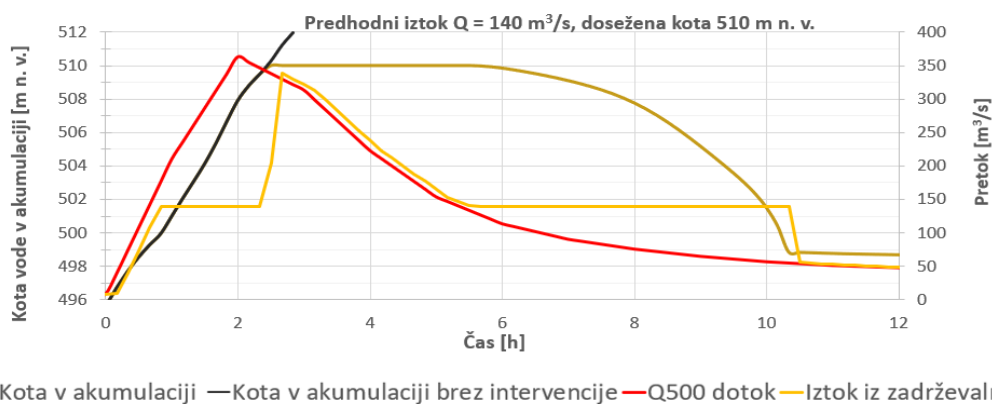
Slika 9: Obratovanje po predvidenem načinu v primeru Q_{500} : dinamika kote gladine in iztoka iz akumulacije VV zadrževalnika pri predhodnem iztoku $120 \text{ m}^3/\text{s}$ in maksimalni doseženi koti 510 m n. v.

Figure 9: Operation with the planned variant in the case of Q_{500} : dynamics of the water level and the outflow from the flood control reservoir with a preliminary outflow of $120 \text{ m}^3/\text{s}$ and a maximum water level of 510 m a.s.l.



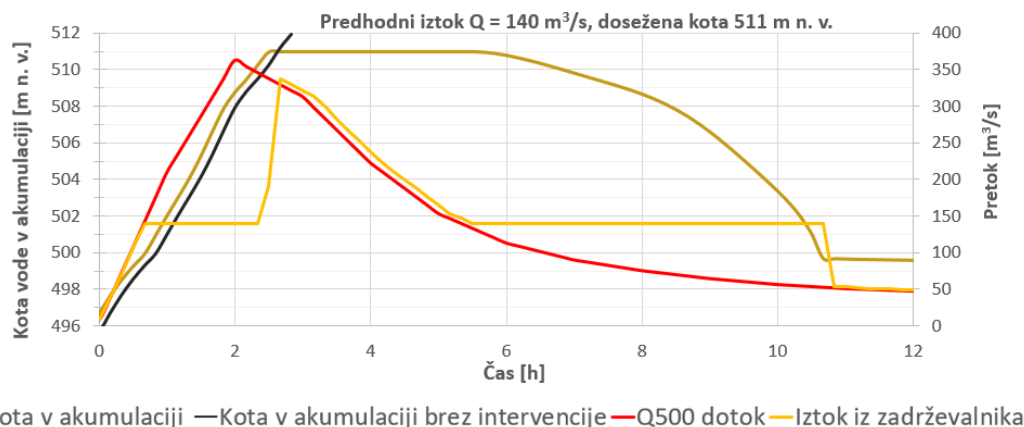
Slika 10: Obratovanje po predvidenem načinu v primeru Q_{500} : dinamika kote gladine in iztoka iz akumulacije VV zadrževalnika pri predhodnem iztoku $120 \text{ m}^3/\text{s}$ in maksimalni doseženi koti 511 m n. v.

Figure 10: Operation with the planned variant in the case of Q_{500} : dynamics of the water level and the outflow from the flood control reservoir with a preliminary outflow of $120 \text{ m}^3/\text{s}$ and a maximum water level of 511 m a.s.l.



Slika 11: Obratovanje po predvidenem načinu v primeru Q_{500} : dinamika kote gladine in iztoka iz akumulacije VV zadrževalnika pri predhodnem iztoku $140 \text{ m}^3/\text{s}$ in maksimalni doseženi koti 510 m n. v.

Figure 11: Operation with the planned variant in the case of Q_{500} : dynamics of the water level and the outflow from the flood control reservoir with a preliminary outflow of $140 \text{ m}^3/\text{s}$ and a maximum water level of 510 m a.s.l.



Slika 12: Obratovanje po predvidenem načinu v primeru Q_{500} : dinamika kote gladine in iztoka iz akumulacije VV zadrževalnika pri predhodnem iztoku $140 \text{ m}^3/\text{s}$ in maksimalni doseženi koti 511 m n. v.

Figure 12: Operation with the planned variant in the case of Q_{500} : dynamics of the water level and the outflow from the flood control reservoir with a preliminary outflow of $140 \text{ m}^3/\text{s}$ and a maximum water level of 511 m a.s.l.

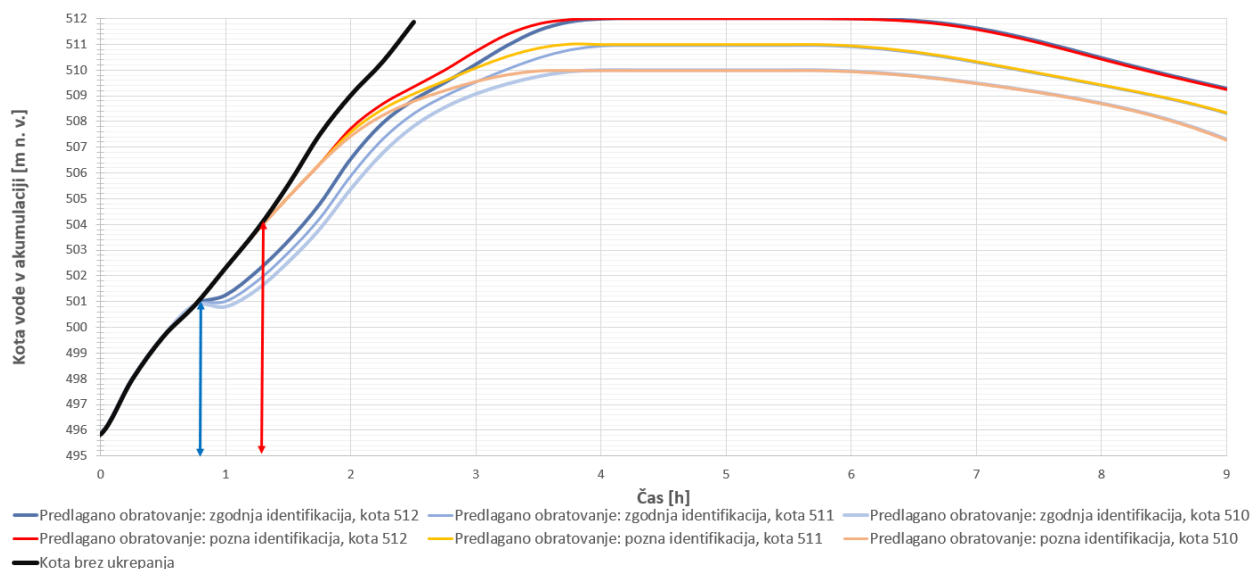
Iz rezultatov simulacij s predvidenim načinom obratovanja lahko ugotovimo naslednje:

- V vseh primerih pride do hipnega »skoka« v pretoku, ko je dosežena največja dovoljena kota vodne gladine v VV zadrževalniku. Ta »skok« se manjša s predhodnim povečanjem dovoljenega iztoka iz VV zadrževalnika in z višjo dovoljeno koto.
- Z večanjem pretoka/povratne dobe VV dogodka se učinkovitost zadrževanja manjša.
- Večji učinek dosežemo s predhodno večjim iztokom iz VV zadrževalnika kot z večanjem kote gladine.
- Zaradi hitrega naraščanja gladine in majhne razlike v iztočnem hidrogramu pri ohranjanju kote 510 oz. 511 m n. v. zaradi varnosti pregrade lahko zaključimo, da je dviganje kote na 511 m n. v. nesmiselno.

Predvideni način obratovanja je neugoden za obratovanje VV zadrževalnika, kjer bi morali v zelo kratkem času znatno povečati iztok, kot tudi za varnost območja dolvodno, ki bo podvrženo nenadnemu povečanju pretoka in poplavljanju. Ker gre za način obratovanja, pri katerem se vrednosti iztoka iz VV zadrževalnika približujejo pretokom vtočnega hidrograma VV vala, je takšno obratovanje smiselno le kot »rezervni« scenarij. Pri tem velja opozoriti, da je kapaciteta preliivanja preko VV preliava na koti 510 m n. v. enaka $380 \text{ m}^3/\text{s}$, kot izhaja iz modelnih raziskav, kar predstavlja obratovanja na meji varnega.

4.2 Analiza kontrolnih parametrov pri predlaganem načinu obratovanja

Slika 13 prikazuje gibanje vodne gladine v VV zadrževalniku pri Q_{500} po predlaganem načinu obratovanja, kjer modra puščica označuje čas zgodnje identifikacije VV vala, rdeča pa pozni čas identifikacije VV vala, ko pretok preseže $240 \text{ m}^3/\text{s}$.



Slika 13: Dinamika gibanja gladine vode v akumulaciji VV zadrževalnika pri predlaganem načinu obratovanja pri maksimalnih doseženih kotah 510–512 m n. v. in zgodnji (modra puščica) in pozni (rdeča puščica) identifikaciji.

Figure 13: Water level dynamics in the flood control reservoir under the proposed operating variant at maximum water levels of 510–512 m a.s.l. and with early (blue arrow) and late identification (red arrow).

Preglednica 2 podaja pripadajoče vrednosti prilagojenega iztoka iz VV zadrževalnika. Na vrednost prilagojenega iztoka pozitivno vplivamo z zgodnjo identifikacijo in z večjo dovoljeno doseženo maksimalno koto na pregradi. Prehodno obratovanje z večjim iztokom ima prav tako pozitiven vpliv na nižanje potrebne vrednosti prilagojenega iztoka. Pri »zgodnji identifikaciji«, torej pri prilagoditvi iztoka po le 45 minutah, je velikost vtoka pri visokovodnih dogodkih med Q_{200} in Q_{500} še manjša od $120 \text{ m}^3/\text{s}$, zato še ne pride do razlike v razpoložljivem volumnu v VV zadrževalniku oziroma do vpliva velikosti projektnega iztoka. Prilagojena vrednost iztoka pri zgodnji identifikaciji je tako enaka za oba projektna iztoka.

Iz rezultatov je razvidno, da je z vidika nižanja prilagojene vrednosti iztoka sicer bolj ugodno dovoliti dvig vode v akumulaciji do kote 511 m n. v., kot povečati projektni iztok s $120 \text{ m}^3/\text{s}$ na $140 \text{ m}^3/\text{s}$. Pri tem je treba upoštevati, da pri višanju kote v zadrževalniku sicer znižujemo potrebni prilagojeni iztok, vendar pri tem izgubimo meter varnostne višine, kar ima lahko pri ekstremnih dogodkih, posebej ob upoštevanju vpliva spremljajočih hudourniških pojavov (npr. vtok

plavja in plavin), izrazito negativne posledice na varnost pregrade. Pretok pri višji maksimalni dovoljeni koti gladine vode v VV zadrževalniku ni bistveno manjši in ne opraviči tveganja, ki ga prinaša zvišanje kote gladine vode v akumulaciji. To je bil razlog, da smo to možnost opustili iz nadaljnjih analiz in upoštevali le čas identifikacije in projektni iztok iz VV zadrževalnika.

Preglednica 2: Prilagojene vrednosti iztoka za Q_{500}

Table 2: Adjusted outflow values for flood wave Q_{500}

Čas reakcije in maks. kota/osnovni iztok	Iztok 120 m^3/s	Iztok 140 m^3/s
45 minut po začetku, maks. kota 510 m n. v.	213 m^3/s	213 m^3/s
45 minut po začetku, maks. kota 511 m n. v.	203 m^3/s	203 m^3/s
45 minut po začetku, maks. kota 512 m n. v.	190 m^3/s	190 m^3/s
120 minut po začetku, maks. kota 510 m n. v.	262 m^3/s	250 m^3/s
120 minut po začetku, maks. kota 511 m n. v.	241 m^3/s	231 m^3/s
120 minut po začetku, maks. kota 512 m n. v.	220 m^3/s	210 m^3/s

Preglednica 3: Prilagojene vrednosti iztoka iz VV zadrževalnika pri pretokih nad 240 m³/s.

Table 3: Adjusted HW reservoir outflow values for discharges above 240 m³/s.

Pretok VV vala na vtoku v akumulacijo [m ³ /s]	Prilagojeni iztok [m ³ /s]
240	120
260	138
280	160
300	184
320	209
340	235

Pri opisanem načinu obratovanja gre torej za kontrolirano poplavljanje Železnikov, ki se sicer začne prej kot pri predvidenem načinu obratovanja. Posledično je čas visokih vod daljši, a vrednost maksimalnega pretoka je manjša kot pri predvidenem načinu obratovanja.

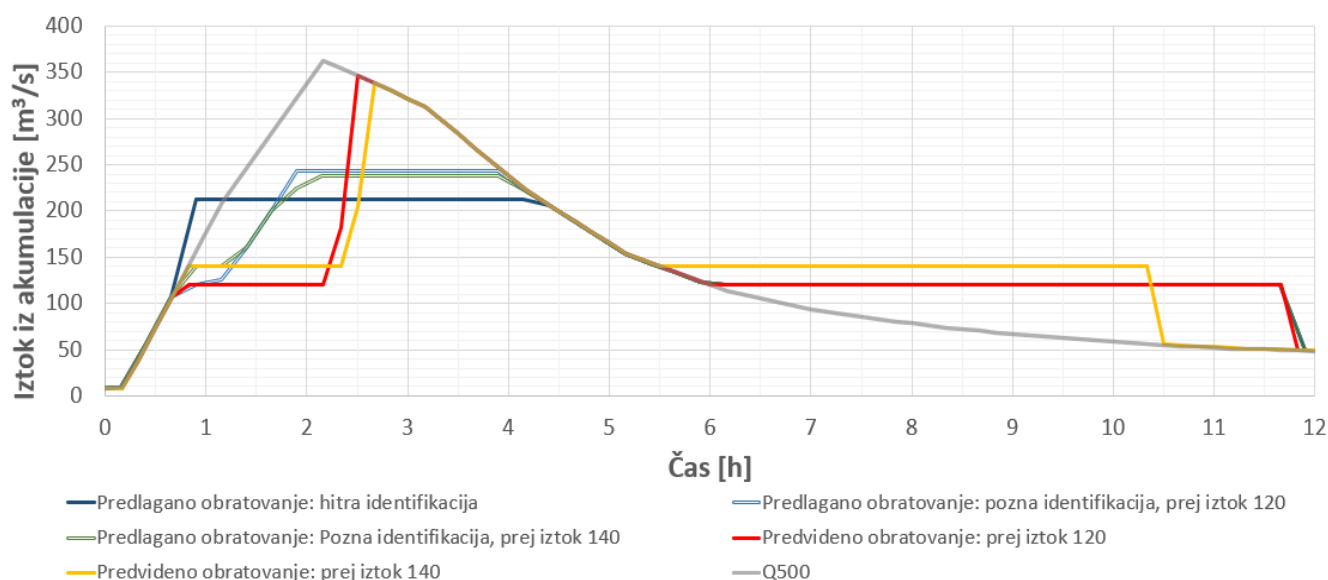
Preglednica 3 podaja potrebne prilagojene vrednosti iztoka iz VV zadrževalnika za pretoke nad 240 m³/s,

s katerimi bo na pregradi dosežena kota 510,00 m n. v.

4.3 Primerjava iztočnih hidrogramov pri različnih primerih obratovanja

Pri analizi rezultatov oziroma velikosti konic iztoka za oba predlagana načina pri VV dogodkih smo se opredelili predvsem do velikosti konice iztoka iz VV zadrževalnika. Predvideni način obratovanja ima krajšo, a večjo konico poplavnih vod, predlagani način pa manjšo, s konstantno vrednostjo, ki pa traja dlje časa in se prej pojavi. Kaj je bolj ugodno z vidika obsega poplavljenosti dolvodno, je prikazano v nadaljevanju. V tem poglavju so prikazani iztočni hidrogrami, ki bodo v kasnejših poglavjih vhodni podatek za hidravlično analizo obsega poplav pri posameznem načinu obratovanja.

Slika 14 prikazuje iztočne hidrograme za primere Q₅₀₀ brez delovanja zadrževalnika, predlagani način obratovanja z zgodnjo identifikacijo, predlagani način obratovanja s pozno identifikacijo (začetni iztok 120 in 140 m³/s) in predvideni način obratovanja (začetni iztok 120 in 140 m³/s).



Slika 14: Iztočni hidrogrami iz VV zadrževalnika v primeru Q₅₀₀ ob upoštevanju predlaganega obratovanja s hitro in pozno identifikacijo, predvideno obratovanje in VV val Q₅₀₀ brez vpliva zadrževanja.

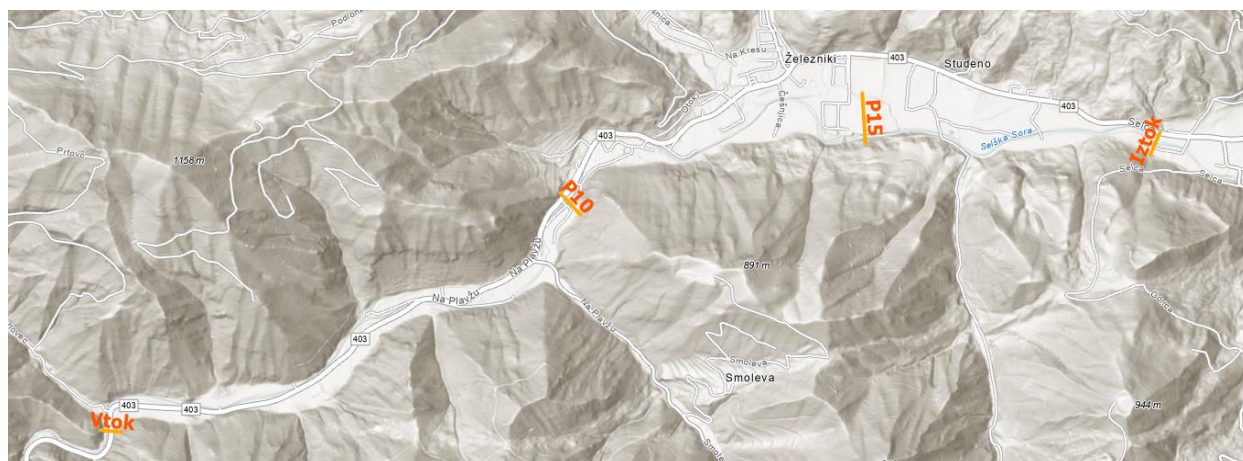
Figure 14: Outflow hydrographs from the flood control reservoir in case Q₅₀₀ considering the proposed operation with early and late identification, the planned operation, and the inflow hydrograph Q₅₀₀ without the influence of the flood control reservoir.

Iztočni hidrogrami predvidenega načina obratovanja sovpadajo s padajočim delom hidrograma brez vpliva zadrževanja. Viden je zadrževalni učinek do začetka ohranjanja kote 510 m n. v. (slika 9), ko nenadoma pride do velikega povečanja iztoka iz VV zadrževalnika. Vpliv med obratovalnim iztokom 120 ali 140 m³/s na obliko iztočnega hidrograma je minimalen. Predlagani način obratovanja z zgodnjo identifikacijo prvi dve uri predvideva nekoliko višji iztok, kot je vrednost pretoka iztoka pri drugih obratovalnih primerih. Predlagani način obratovanja s pozno identifikacijo izkazuje pribl. 50 m³/s višje vrednosti iztoka, ki pa se začnejo uro kasneje kot pri zgodnji identifikaciji. V obeh predlaganih načinih je vpliv zadrževanja prisoten čez celotni VV val.

4.4 Dinamika poplavljanja na dolvodnem odseku

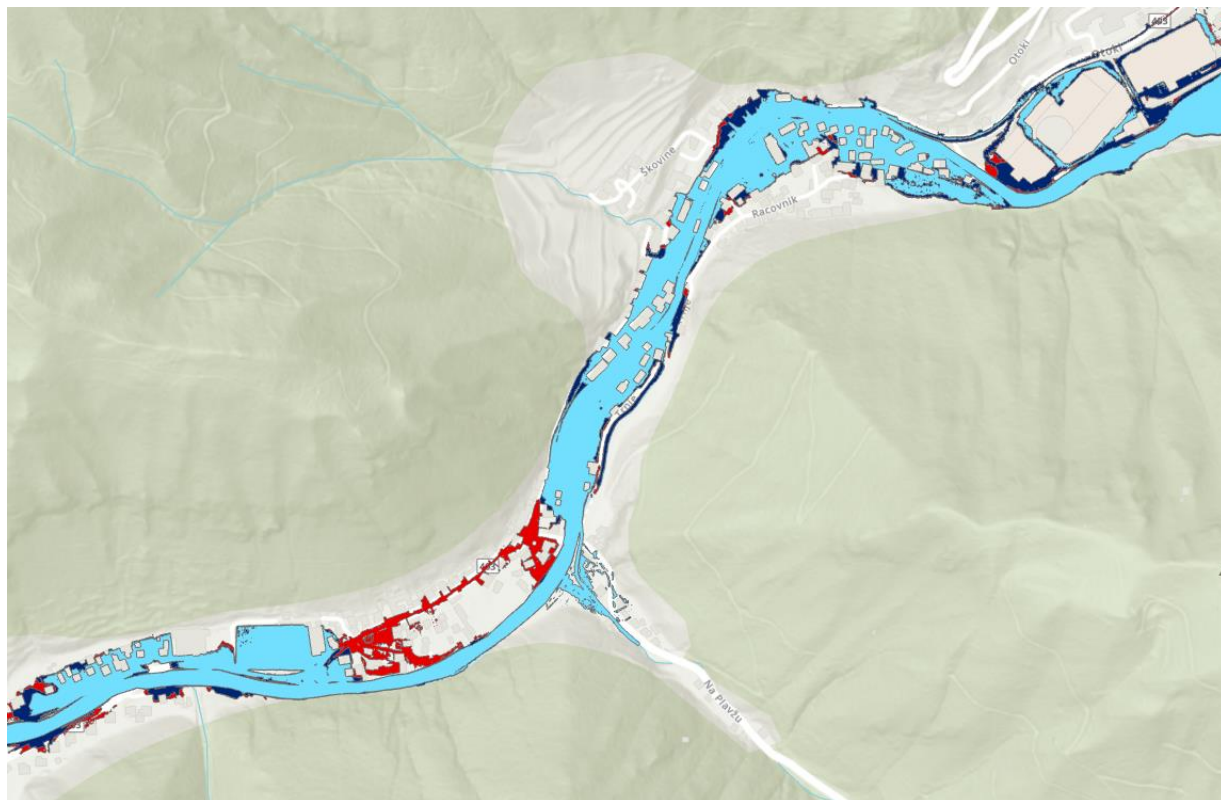
Iztočni hidrogrami, ki izhajajo iz opisanih načinov obratovanja, so bili v naslednji fazi uporabljeni kot gorvodni robni pogoj v hidravličnem modelu odseka Selške Sore od pregrade VV zadrževalnika

dolvodno do naselja Selca. S simulacijami vseh scenarijev obratovanja smo analizirali dinamiko potovanja VV vala dolvodno in obseg poplav, kar je predstavljalo izhodišče za ovrednotenje posameznega načina obratovanja pri izrednih dogodkih glede na nastalo gmotno škodo. Območje obravnave obsega pretežno dolinski del, na spodnjem robu katerega se nahaja poselitev (slika 15). Dolina se razširi, na zgornji polovici razširjene doline leži industrijska četrt Železnikov, na spodnji polovici pa so le travniki in polja. Analiza je bila izdelana v 20 kontrolnih prerezih, od katerih slika 15 prikazuje štiri merodajne kontrolne profile, v katerih je v nadaljevanju prikazano preoblikovanje poplavnih valov, ki iztekajo iz VV zadrževalnika. Na sliki 16 je kot primer prikazan obseg poplavljenih območij pri VV valu Q₄₀₀, in sicer je z rdečo barvo prikazano območje, ki je poplavljen pri obstoječem stanju brez VV zadrževalnika, s temno modro barvo območje, ki je poplavljen pri stanju z VV zadrževalnikom in ob upoštevanju predvidenega obratovanja, in s svetlo modro barvo poplavljen območja pri vseh treh stanjih.



Slika 15: Lokacije kontrolnih prerezov vzdolž obravnavanega odseka, v katerih je podana primerjava hidrogramov.

Figure 15: Locations of the control sections along the section under consideration where the comparison of the hydrographs is given.

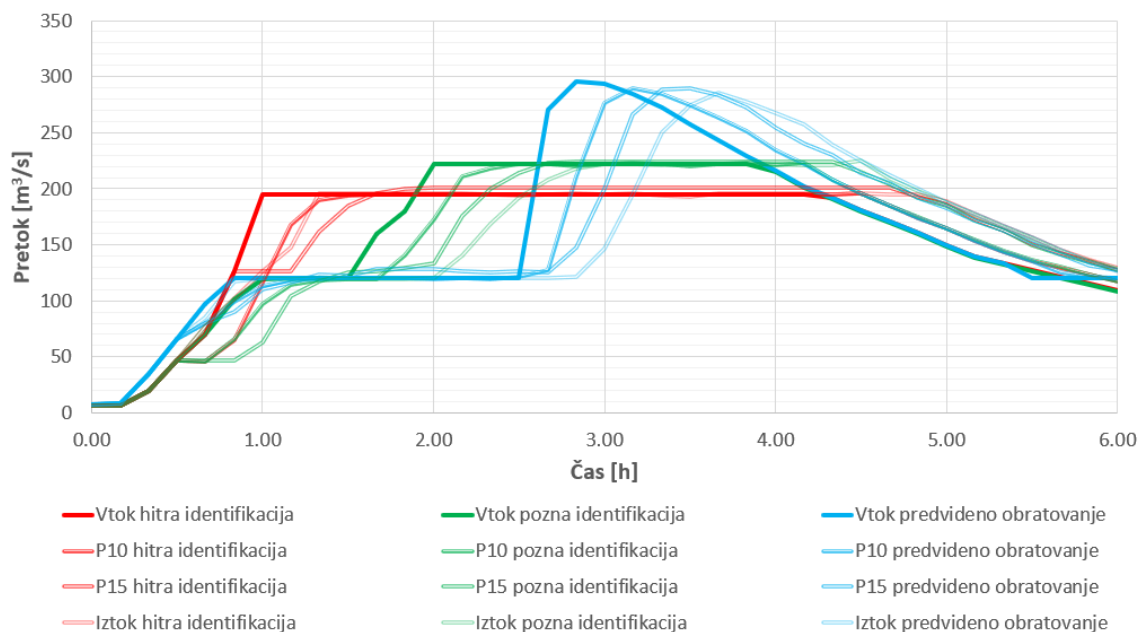


Slika 16: Obseg poplavljenosti na območju Železnikov za VV val Q_{400} ; rdeča – obstoječe stanje brez VV zadrževalnika, temno modra – stanje z VV zadrževalnikom (predvideno obratovanje) in svetlo modra – stanje z VV zadrževalnikom (predlagano obratovanje s pozno reakcijo).

Figure 16: Extent of flooding in the Železniki area during a 400-year flood wave; red – no flood control reservoir, dark blue – flood control reservoir (planned operation), and light blue – flood control reservoir (proposed operation with late response).

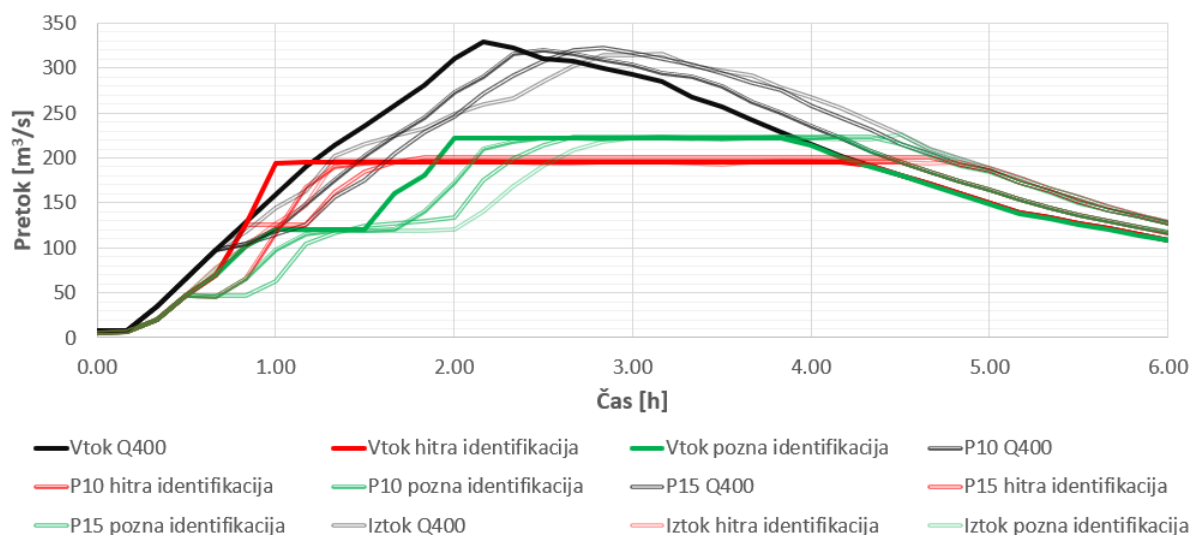
Rezultati simulacij kažejo na minimalno preoblikovanje poplavnih valov na odseku med pregrado in mestom Železniki. To je posledica zelo omejenih možnosti razlivanja in zadrževanja vodne mase v obvodnem prostoru, saj retenzijskih površin na tem odseku praktično ni. Zaradi razmeroma ozke doline in velikega vzdolžnega naklona se pojavijo tudi velike hitrosti vodnega toka. Slika 17 prikazuje preoblikovanje VV vala pri dogodku Q_{400} za tri primere obratovanja, in sicer:

- Predvideni način obratovanja z ohranjanjem kote 510 m n. v. (modra),
- predlagano obratovanje z zgodnjo identifikacijo (rdeča barva) ter
- predlagano obratovanje s pozno identifikacijo (zelena).



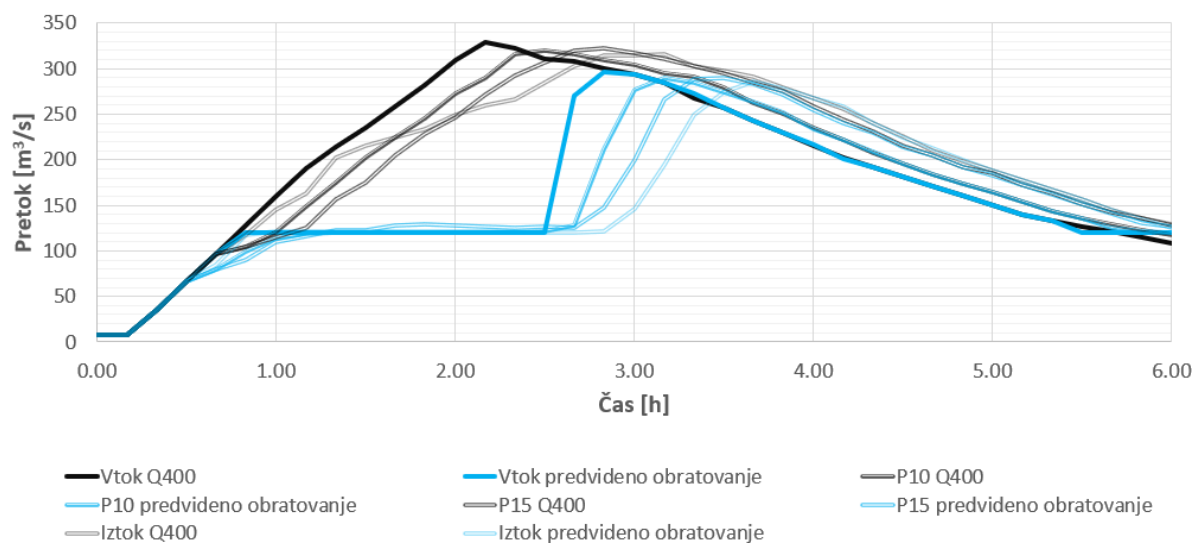
Slika 17: Primerjava hidrogramov vzdolž obravnavanega odseka pri dogodku Q_{400} za predvideni način obratovanja s prelivanjem na koti 510 m n. v. (modra), predlagano obratovanje s takojšnjo prilagoditvijo iztoka (rdeča barva) ter predlagano obratovanje s prilagoditvijo iztoka na vrhu VV vala (zelena).

Figure 17: Comparison of the hydrographs along the section under consideration for the Q_{400} event for the planned operation mode with overflow at 510 m a.s.l. (blue), the proposed operation mode with immediate outflow adjustment (red), and the proposed operation mode with outflow adjustment at the peak discharge of the flood wave (green).



Slika 18: Primerjava hidrogramov vzdolž obravnavanega odseka pri Q_{400} po predlaganem načinu obratovanja z zgodnjo in pozno identifikacijo in brez zadrževanja.

Figure 18: Comparison of the hydrographs along the considered section for the Q_{400} event under the proposed operation mode with early and late identification and without the flood control reservoir.



Slika 19: Primerjava hidrogramov vzdolž obravnavanega odseka pri Q_{400} po predvidenem načinu obratovanja in brez zadrževanja VV valov.

Figure 19: Comparison of the hydrographs along the considered section at Q_{400} under the planned operation variation and without the flood control reservoir.

Iz rezultatov je razvidno, da v obeh primerih obratovanja po predlaganem načinu čas visokih vod traja precej dlje, a je konična vrednost pretoka pomembno nižja, in sicer tudi do $100 \text{ m}^3/\text{s}$.

Slika 18 podaja še primerjavo Q_{400} po predlaganem načinu obratovanja in brez zadrževanja VV valov, slika 19 pa primerjavo Q_{400} po predvidenem načinu obratovanja in brez zadrževanja VV valov.

Zaključimo lahko, da predvideni način obratovanja pri izrednih dogodkih povzroči poplave, ki sovpadajo s padajočim delom hidrograma VV vala. Treba se je zavedati, da lahko zaradi VV zadrževalnika pride do zadrževanja plavja in drobirskega toka, ki sta prisotna v naraščajočem delu in predstavljata zelo velik dejavnik pri uničujočih posledicah VV valov. Zadrževalni učinek je pri predvidenem načinu obratovanja torej viden le pri naraščajočem delu hidrograma, nakar sledi nenaden poplavni val. Pri predlaganem načinu obratovanja pa je poplavni val daljši za 1–2 uri in se pojavi 1–2 uri prej. Podaljšanje je odvisno od povratne dobe dogodka in časa identifikacije. Treba je poudariti, da je pretok pri tem bistveno manjši in bolj predvidljiv, zadrževalni učinek pa se ohranja tekom celotnega VV dogodka.

4.5 Ocena poplavne škode

Rezultati simulacij poplavne dinamike so bili v naslednjem koraku, skupaj z upoštevanjem zahtevnosti obratovalnega primera, uporabljeni kot izhodišče za določitev najbolj ugodnega obratovalnega režima VV zadrževalnika. Pri tem je bila na podlagi rezultatov poplavne dinamike analizirana in ocenjena poplavna škoda. Ta je bila določena ob upoštevanju:

- Škodnih funkcij po metodi EU JRC (Huizinga et al., 2017), kjer smo uporabili tri razrede globin poplavne vode (30 cm, 75 cm in 150 cm) in dva tipa rabe tal (urbana in kmetijska raba tal). Zaradi poenostavitve in neznane natančne vrednosti tal je ocenjena škoda uporabljena bolj kot primerjava med posameznimi načini obratovanja kot ocena dejanske škode.
- Velikost poplavnih območij v posameznem razredu globine in razredu produkta (globina \times hitrost vode), kot jih določa Pravilnik (Uradni list RS, št. 60/07).

Pri škodnih funkcijah so bila določena naslednja izhodišča:

- Maksimalna vrednost travniških in kmetijskih zemljišč znaša $0,77 \text{ €/m}^2$.

- Maksimalna vrednost objektov znaša 750 €/m². Ker smo predpostavili, da so objekti le polovica urbanih območij, smo vrednost razpolovili na 375 €/m².
- Škodni faktorji, s katerimi se glede na globino vode množi maksimalno vrednost za oceno škode, so podani v preglednici 4.

Preglednica 4: Uporabljeni škodni faktorji.

Table 4: Factors used in the analysis of flood damage.

Raba tal/globina	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

Preglednica 5 poleg obsega poplavnih vod podaja tri razrede globin poplavnih vod (poplavne vode

globine pod 0,5 m, med 0,5 in 1,5 metra in nad 1,5 metra), med katerimi niso upoštevana razlivanja pritokov zunaj območja Selške Sore in območje struge vodotokov, in tri razrede produkta hitrosti in globin ob najvišji vrednosti produkta (pod 0,5 m²/s, med 0,5 in 1,5 m²/s, nad 1,5 m²/s). Za vsak obseg vod je podano, kakšen delež poplavnih vod je na kmetijskih zemljiščih in kakšen na urbanih zemljiščih. Zadnja vrstica v preglednici pa podaja ocenjeno škodo v milijonih evrov za posamezni primer.

Preglednica 5: Ocena škode in obseg poplavnih vod za visoke vode brez vpliva zadrževalnika, za predlagano in za predvideno obratovanje.

Table 5: Flood event intensity and damage assessment for the state without the influence of the flood control reservoir and for the state with flood control reservoir for planned and for proposed operation.

Scenarij/kriterij	D < 0,5	0,5 < D < 1,5	D > 1,5	DxV < 0,5	0,5 < DxV < 1,5	DxV > 1,5	Obseg [Ha]	Kmetijska raba tal [%]	Urbana raba tal [%]	Škoda [milijon €]
	[m]	[m]	[m]	[m ² /s]	[m ² /s]	[m ² /s]				
Q ₂₀₀	17,3	24,9	5,7	26,1	17,7	9,1	47,9	70	30	17
Zgodnja identifikacija	21,9	12,6	0,7	28,8	9,4	2,1	35,2	85	15	5
Pozna identifikacija, začetni iztok 120	21,1	14,6	1,1	28,2	11,0	2,6	36,8	79	21	8
Pozna identifikacija, začetni iztok 140	21,4	13,5	0,8	28,3	10,0	2,3	35,7	80	20	7
Predvideno obratovanje, začetni iztok 120	19,3	21,9	3,3	27,1	16,6	5,9	44,6	75	25	13
Predvideno obratovanje, začetni iztok 140	20,4	18,4	2,0	27,6	14,3	3,9	40,9	76	24	10
Q ₃₀₀	16,8	25,1	6,6	25,1	18,2	10,2	48,5	70	30	18
Zgodnja identifikacija	21,3	13,9	0,9	28,4	10,4	2,4	36,2	83	17	6
Pozna identifikacija, začetni iztok 120	20,6	16,5	1,5	27,6	12,9	3,2	38,7	79	21	9
Pozna identifikacija, začetni iztok 140	20,9	15,6	1,3	27,8	12,0	2,9	37,8	80	20	8
Predvideno obratovanje, začetni iztok 120	18,6	22,8	4,0	26,8	16,8	6,8	45,4	75	25	13
Predvideno obratovanje, začetni iztok 140	19,8	21,0	2,9	27,3	16,2	5,1	43,6	76	24	12
Q ₄₀₀	16,3	26,2	7,9	24,9	18,5	11,9	50,4	65	35	22
Zgodnja identifikacija	20,8	15,8	1,3	27,8	12,2	3,0	38,0	80	20	8

Pozna identifikacija, začetni iztok 120	20,2	19,3	2,2	27,2	15,2	4,3	41,7	76	24	11
Pozna identifikacija, začetni iztok 140	20,1	18,4	1,9	27,0	14,5	3,9	40,3	77	23	10
Predvideno obratovanje, začetni iztok 120	17,2	24,6	5,8	25,6	17,8	9,2	47,6	70	30	17
Predvideno obratovanje, začetni iztok 140	17,6	24,1	5,1	26,1	17,3	8,4	46,8	71	29	16
Q ₅₀₀	16,0	27,5	10,2	25,0	18,7	15,0	53,7	63	37	25
Zgodnja identifikacija	20,2	17,8	1,8	27,1	14,0	3,7	39,8	75	25	11
Pozna identifikacija, začetni iztok 120	19,3	22,2	3,8	27,2	16,5	6,6	45,3	71	29	15
Pozna identifikacija, začetni iztok 140	19,8	21,4	3,2	27,2	16,4	5,7	44,3	72	28	14
Predvideno obratovanje, začetni iztok 120	16,0	26,8	8,5	24,9	18,6	12,8	51,4	60	40	25
Predvideno obratovanje, začetni iztok 140	16,2	26,4	8,0	25,0	18,6	12,1	50,7	61	39	24

Iz rezultatov je razvidno, da je kriterij globin bolj neugoden kot kriterij produkta globine in hitrosti. Tudi ko se pojavi večja površina območja produkta nad 1,5 m²/s, je pri istem scenariju površina z globinami med 0,5 m in 1,5 m bistveno večja kot pri produktu, škoda pri upoštevanju produkta pa je ob tem manjša. Za izračun poplavne škode so tako bolj kritične globine vodnega toka kot produkt globine in hitrosti vode.

Ob upoštevanju omenjenih rezultatov analiz lahko ugotovimo naslednje:

- Najbolj ugodno obratovanje je pri predlaganem obratovanju ob zgodnji identifikaciji, da volumen VV vala presega razpoložljivi zadrževalni prostor VV zadrževalnika.
- Prilagoditev obratovanja na vrhu VV vala (predlagani način, pozna identifikacija) je nekoliko manj ugoden obratovalni način. Razlika med obratovalnim pretokom 120 m³/s oz. 140 m³/s je pribl. 1 milijon € v škodi, oziroma pribl. 1 hektar poplavljenih površin. Nižji obratovalni pretok pred prilagoditvijo obratovanja pomeni večji obseg poplavljenih površin in večje globine, predvsem na račun urbanih površin. Pri takšnem obratovanju ima pozitiven vpliv tudi predvidljivost poplavnega

dogodka, saj ohranjamo konstanten povečani pretok na iztoku iz VV zadrževalnika.

- Prelivanje na koti 510 m n. v. po predvidenem obratovanju je z vidika škode neugodno. Ker se z večanjem povratne dobe dogodka pri takšnem obratovanju konica VV dogodka vse bolj bliža začetku/konici prelivanja, je obseg poplavljanja velik in ocena škode posledično blizu oceni škode brez ukrepanja. Z večanjem povratne dobe sta tako obseg poplavljanja kot tudi nastala škoda pri predvidenem obratovanju vse bližje obsegu in škodi, ki bi nastala brez zadrževalnika (nezadržani VV val). Razlika med obratovalnim pretokom pred pričetkom prelivanja 120 m³/s oz. 140 m³/s je pribl. 1 milijon € v nastali škodi oziroma pribl. 0,8 ha poplavljenih površin.
- Kljub ugotovitvi iz zgornje točke ima predvideno obratovanje pozitivne učinke glede na VV val 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 predlaganem obratovanju verjetno v večji meri zadržana, saj zadržimo celotni naraščajoči del hidrograma VV vala, ko je transport sedimentov največji. Prav tako je pri predvidenem obratovanju čas poplavljanja

najkrajši, kar bi lahko imelo ugoden vpliv, če bi upoštevali še erozijske procese, ki v sklopu te analize niso bili upoštevani. Ugodni vplivi lahko večje vrednosti pretokov sicer izničijo v primerjavi s predlaganim obratovanjem.

5. Zaključki

VV zadrževalniki so učinkovit protipoplavni ukrep, ki pri svojem načrtovanju zahteva dobro poznavanje hidroloških značilnosti porečja gorvodnega območja in tudi upoštevanje podnebnih sprememb. Na VV zadrževalniku Pod Sušo je bila med fazo načrtovanja in fazo izgradnje izdelana nova celovita hidrološka študija (HEK, 2021), ki določa bistveno višje konice VV pretokov nad 100-letno povratno dobo.

Z namenom preveritve in optimizacije obratovanja zadrževalnika za dogodke med Q_{100} in Q_{500} po novejših hidroloških izhodiščih je bil izdelan 0-dimenzijski model, ki omogoča spremljanje ključnih parametrov za varno obratovanje VV zadrževalnika pri različnih načinih obratovanja. V ta namen sta bila preverjena dva scenarija obratovanja, in sicer po predvidenem načinu ter optimiziranem načinu. Pri slednjem smo preverili možnost zgodnje in pozne identifikacije. Predvideni način predvideva nespremenjeno obratovanje do zapolnitve VV zadrževalnika, nakar se zadrževalni učinek konča, predlagani način pa upošteva monitoring pretoka VV dogodka in predhodno večanje iztoka iz VV zadrževalnika, s čimer omogočimo zadrževalni učinek pri celotnem VV dogodku. Za vse načine obratovanja sta bila upoštevana dva različna bazična iztoka, in sicer $120 \text{ m}^3/\text{s}$ in $140 \text{ m}^3/\text{s}$. Dodatno je bila preverjena možnost dviga še dovoljene kote vodne gladine v zadrževalniku s 510 m n. v. na 511 m n. v.

Ugotovili smo, da je pregrada za VV dogodke do Q_{100} še vedno primerna, za dogodke s koničnim pretokom nad $240 \text{ m}^3/\text{s}$, kar približno ustreza Q_{150} , pa je kapaciteta zadrževalnika presežena, kar lahko povzroči prelivanje pregrade in razlivanje visokih vod dolvodno. Povečanje iztoka s $120 \text{ m}^3/\text{s}$ na $140 \text{ m}^3/\text{s}$ ima pri ekstremnih dogodkih pozitiven vpliv na poplavne razmere dolvodno, medtem ko višanje še dovoljene kote vodne gladine v zadrževalniku zaradi varnosti pregrade ni dopustno.

Hidrograme iztoka iz obeh načinov obratovanja smo uporabili v polnem 2D modelu dolvodnega območja. Za vsak obratovalni primer je bil določen obseg poplavnih vod in razredi globin poplavnih vod. Na podlagi globin poplavnih vod in rabe tal poplavljenih območij smo za posamezni obratovalni primer z uporabo škodnih funkcij ocenili škodo v milijonih evrov. Glede na ocenjeno škodo in dinamiko odtočnega režima poplavnih vod je bilo ugotovljeno, da je obratovanje po predvidenem načinu z vidika škode manj ugodno kot optimizirano obratovanje, kljub krajšemu času razlivanja visokih vod. Obratovanje po predlaganem načinu je ugodnejše in varnejše za dolvodna območja. Učinkovitost predlaganega načina obratovanja je odvisna od kakovosti hidrološkega monitoringa, kar opozarja na nujnost vzpostavitve ustrezne mreže merilnih postaj, poznavanja hidroloških značilnosti in prilagajanja podnebnim spremembam pri upravljanju VV zadrževalnikov.

Viri

Afzal, M.A., Ali, S., Nazeer, A., et al. (2022). Flood Inundation Modeling by Integrating HEC-RAS and Satellite Imagery: A Case Study of the Indus River Basin. *Water* 14:2984. <https://doi.org/10.3390/w14192984>

ARSO (2023). Atlas okolja. Ministrstvo za okolje, podnebje in energijo, Agencija Republike Slovenije za okolje. Dostopno na: <https://gis.arso.gov.si/atlasokolja/> (Pridobljeno 29. 12. 2023).

Bharath, A., Shivapur, A.V., Hiremath, C.G., Maddamsetty, R. (2021). Dam break analysis using HEC-RAS and HEC-GeoRAS: A case study of Hidkal dam, Karnataka state, India. *Environmental Challenges* 5:100401. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100401>.

Burshtynska, K., Kokhan, S., Pfeifer, N., et al. (2023). Hydrological Modeling for Determining Flooded Land from Unmanned Aerial Vehicle Images—Case Study at the Dniester River. *Remote Sensing* 15:1071. <https://doi.org/10.3390/rs15041071>.

DWA (2005). Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall. *Pravilnik DWA-M 522*, Hennef, 81 str.

El Bilali, A., Taleb, A., Boutahri, I. (2021). Application of HEC-RAS and HEC-LifeSim models for flood risk assessment. *Journal of Applied Water Engineering and*

Research **9:336–351**.

<https://doi.org/10.1080/23249676.2021.1908183>.

English Nature (2002). Wetlands, land use change and Flood Management. The Environment Agency, the Department for Environment, Food and Rural Affairs and the Forestry Commission: 23 str.

HEK, projektiranje in svetovanje, Doroteja Starec (2021). 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.

Hemert, H. et al. (2013). The International Levee Handbook. Ciria, London, 1332 str.

Hidroinštitut, inštitut za hidravlične raziskave (2022). Hidravlična modelna raziskava pregrade pod Sušo.

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

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., Moel, H. de, Szewczyk, W. (2017). Global flood depth-damage functions : methodology and the database with guidelines, Publications Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2760/16510>.

IZVO-R, projektiranje in inženiring d.o.o. (2010). Idejni projekt za ureditev Selške Sore za zagotavljanja poplavne varnosti širšega območja Železnikov.

IZVO-R, projektiranje in inženiring d.o.o. (2012). Izdelava kart poplavne nevarnosti in kart razredov poplavne nevarnosti za izbrana območja občine Železniki.

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)**: 1501–1514.

Lim, M., Minola Ginting, B., Senjaya, T., Kieswanti, C. (2024). Comparison of 1D, coupled 1D–2D, and 2D shallow water numerical modeling for dam-break flow analysis of Way-Ela dam, Indonesia. *Acta hydrotechnica*, **37(66)**: 27–50.

<https://doi.org/10.15292/acta.hydro.2024.02>.

MNVP (2017). Načrt zmanjševanja poplavne ogroženosti, Ministrstvo za naravne vire in prostor. 262 str.

Namara, W.G., Damisse, T.A., Tufa, F.G. (2022). Application of HEC-RAS and HEC-GeoRAS model for Flood Inundation Mapping, the case of Awash Bello Flood Plain, Upper Awash River Basin, Oromiya Regional State, Ethiopia. *Model Earth Syst Environ* **8**: 1449–1460. <https://doi.org/10.1007/s40808-021-01166-9>

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

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.

Rak, G., Kozelj, D., Steinman, F. (2016). The impact of floodplain land use on flood wave propagation. *Natural Hazards* **83**: 425–443. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2322-0>.

Rak, G., Grobljar, S., Steinman, F. (2018). Modeliranje poplavljanja urbanih površin. *Acta hydrotechnica*, **31(54)**: 21–33. <https://doi.org/10.15292/acta.hydro.2018.02>.

Riha, J. (2013). Safety problems of small embankment dams in the Czech Republic. *Acta hydrotechnica*, **26(44)**: 15–25.

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

Urzică, A., Miha-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(57)**. <https://doi.org/10.3390/w13010057>.

USACE (2018). Benchmarking of the HEC–RAS Two–Dimensional Hydraulic Modeling Capabilities, Davis, CA. 137 str.

USACE (2023a). HEC–RAS 2D Modeling User's manual. Davis, CA, 171 str.

USACE (2023b). HEC–RAS Hydraulic Reference Manual. Davis, CA, 477 str.