

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
za gradbeništvo
in geodezijo



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

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

To je izvirna različica zaključnega dela.

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

Javornik, L., 2015. Novelacija obratovanja HE Vrhovo z vidika upravljanja s plavinami na območju akumulacije. Magistrsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Kryžanowski, A., comentor Mikoš, M.): 126 str.

Datum arhiviranja: 16-12-2015

University
of Ljubljana

Faculty of
Civil and Geodetic
Engineering



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

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

This is original version of final thesis.

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

Javornik, L., 2015. Novelacija obratovanja HE Vrhovo z vidika upravljanja s plavinami na območju akumulacije. M.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljani, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Kryžanowski, A., co-supervisor Mikoš, M.): 126 pp.

Archiving Date: 16-12-2015

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*

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



**MAGISTRSKI ŠTUDIJ
GRADBENIŠTVA
HIDROTEHNIČNA SMER**

Kandidat:

LUKA JAVORNIK, univ. dipl. inž. grad.

**NOVELACIJA OBRATOVANJA HE VRHOVO Z VIDIKA
UPRAVLJANJA S PLAVINAMI NA OBMOČJU
AKUMULACIJE**

Magistrsko delo štev.: 249

**HPP VRHOVO OPERATION AMENDMENT ON
RESERVOIR SEDIMENT MANAGEMENT ASPECT**

Master of Science Thesis No.: 249

Mentor:
doc. dr. Andrej Kryžanowski

Predsednik in član komisije:
prof. dr. Matjaž Četina

Somentor:
prof. dr. Matjaž Mikoš

Član komisije:
izr. prof. dr. Dušan Žagar

Ljubljana, 25. november 2015

STRAN ZA POPRAVKE

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

IZJAVE

Podpisani **LUKA JAVORNIK**, univ. dipl. inž. grad., izjavljam, da sem avtor magistrskega dela z naslovom: **»NOVELACIJA OBRATOVANJA HE VRHOVO Z VIDIKA UPRAVLJANJA S PLAVINAMI NA OBMOČJU AKUMULACIJE«**.

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

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

Ljubljana, november 2015

.....

(podpis)

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

| | |
|-------------------------|---|
| UDK: | 004.414.23:627.9.09(497.4Radeče)(043.3) |
| Avtor: | Luka Javornik |
| Mentor: | doc. dr. Andrej Kryžanowski |
| Somentor: | prof. dr. Matjaž Mikoš |
| Naslov: | Novelacija obratovanja HE Vrhovo z vidika upravljanja s plavinami na območju akumulacije |
| Tip dokumenta: | magistrsko delo |
| Obseg in oprema: | 126 str., 27 pregl., 83 sl., 39 en. |
| Ključne besede: | prodonosnost, plavine, modeliranje premestitvene zmogljivosti, kalnost, obratovanje, denivelacijska krivulja |

IZVLEČEK

Hidroelektrarna Vrhovo je prva v verigi spodnjesevskih elektrarn, zgrajena leta 1993, in kot hidrotehnični objekt, ki je umeščen v prostor vodotoka po celotni širini, vpliva na hidravlične razmere v akumulaciji. Obratovanje na pregradnem objektu hidroelektrarne je v obstoječem poslovniku obratovanja določeno v odvisnosti od pretokov iz gorvodnih območij, ne pa tudi v odvisnosti od vpliva dotekajočih plavin in naplavin v akumulaciji. V nalogi je uvodoma predstavljena vloga hidroenergije kot obnovljivega vira energije v elektroenergetskem sistemu, sledi krajši pregled obstoječe literature s področja vpliva plavin v akumulaciji in zgodovinski pregled obstoječih analiz prodonosnosti oz. premestitvene zmogljivosti in kalnosti na območju hidroelektrarne Vrhovo kot osnova za kasnejšo validacijo modela premestitvene zmogljivosti. V analitičnem delu naloge je uvodoma preučevano časovno spreminjanje volumna akumulacije zaradi vpliva plavin, sledijo teoretične podlage in predstavitev uporabljenega modela premestitvene zmogljivosti, izdelava računske mreže in določitev robnih ter vhodnih pogojev modela. Jedro naloge predstavlja analiza in vrednotenje rezultatov simulacije premestitvene zmogljivosti in kasnejše implementacija teh rezultatov za optimizacijo obstoječe denivelacijske/obratovalne krivulje s priporočili.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 004.414.23:627.9.09(497.4Radeče)(043.3)
Author: Luka Javornik
Supervisor: assist. prof. Andrej Kryžanowski, Ph. D.
Cosupervisor: prof. Matjaž Mikoš, Ph. D.
Title: HPP Vrhovo operation amendment on reservoir sediment management aspect
Document type: M. Sc. Thesis
Scope and tools: 126 p., 27 tab., 83 fig., 39 eq.
Keywords: bedload, sediments, sediment transport modelling, suspended load, operation, operation rule curve

ABSTRACT

HPP Vrhovo is the first powerplant in the chain of the lower Sava River Basin, built in 1993 and as an object, spatially positioned across the full width of the river, influences hydraulic conditions within the reservoir. Operation rulebook of the HPP Vrhovo determines dam gates and flaps operation only according to upstream flows, without considering sediment influence in the reservoir. At first, the role of hydroenergy as a renewable energy source in electricity production is presented, followed by a short literature review from the expert field of sediment influence on reservoir hydraulic conditions and historical review of key sediment transport analyses of the HPP Vrhovo reservoir as one of later validation tools of the sediment transport simulation results. In the analytical section of the thesis, temporal changes of the HPP Vrhovo reservoir volume are analysed initially, followed by sediment transport theoretical basis, short introduction of used sediment transport model, development of model numerical grid and setting of initial and boundary conditions of the model. The core of this thesis is presented in the latter part, analysis and validation of the results of sediment transport simulation and finally implementation of those results into optimization of existing operation rule curve with final recommendations.

ZAHVALA

Za svetovanje in podporo pri nastajanju tega magistrskega dela se zahvaljujem mentorju doc. dr. Andreju Kryžanowskemu in somentorju, prof. dr. Matjažu Mikošu.

Zahvaljujem se tudi podjetjema Savske elektrarne Ljubljana kot upravljavcu HE Vrhovo in Geateh, d. o. o., za pomoč in posredovanje ključnih podatkov ter podlag za izdelavo naloge.

Na koncu sledi še posebna zahvala moji ženi in staršem za podporo in spodbudo med magistrskim študijem.

KAZALO VSEBINE

| | |
|--|------------|
| STRAN ZA POPRAVKE..... | I |
| IZJAVE | II |
| BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK | III |
| BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT..... | IV |
| ZAHVALA | V |
| | |
| 1 UVOD | 1 |
| 1.1 Cilji naloge | 2 |
| 1.2 Teza in pričakovani rezultati | 2 |
| | |
| 2 OVE KOT STRATEGIJA RAZVOJA V EU IN SLOVENIJI..... | 4 |
| 2.1 Vloga hidroenergije v elektroenergetskem sistemu Republike Slovenije | 7 |
| 2.1.1 Vloga HE Vrhovo v elektroenergetskem sistemu..... | 8 |
| | |
| 3 KRATEK PREGLED LITERATURE NA PODROČJU VPLIVA PLAVIN NA UPRAVLJANJE Z VODOTOKI..... | 10 |
| 3.1 Vpliv plavin na obratovanje hidroenergetskega objekta..... | 10 |
| 3.2 Vpliv plavin na habitat..... | 10 |
| 3.3 Modeliranje prodonosnosti – razvoj programske opreme | 11 |
| 3.4 Vzdrževanje poplavne varnosti in stabilnih razmer v akumulacijah | 13 |
| | |
| 4 ZGODOVINA NAJPOMEMBNEJŠIH RAZISKAV PRODONOSNOSTI IN ZAMULJEVANJA AKUMULACIJE HE VRHOVO | 15 |
| 4.1 Namen izvedenih raziskav | 15 |
| 4.1.1 Prodonosnost reke Save in pritokov (Colarič, 1968)..... | 15 |
| 4.1.2 Letne količine proda Save (Krško), Savinje (Laško) in Sopot (Žebnik) (Šetina, 1982) | 17 |
| 4.1.3 Ocena dviga dna in gladine v akumulaciji jezera HE Vrhovo (Colarič, 1985) | 21 |
| 4.1.4 Študija zajezenega odseka struge Sopot zaradi akumulacije HE Vrhovo (Ciuha, 1992)..... | 24 |
| 4.1.5 Raziskava problematike v zvezi s transportom (zastajanjem in izpiranjem) proda in suspenzij na odseku Save med Zidanim Mostom in hrvaško mejo, med izgradnjo verige HE in po njej (Čehovin, 1990)..... | 25 |
| 4.2 Skupni imenovalci rezultatov raziskav | 26 |
| | |
| 5 HIDROELEKTRARNE NA REKI SAVI | 30 |
| 5.1 Hidroelektrarna Vrhovo..... | 30 |
| 5.2 Osnovni hidrološki podatki..... | 33 |
| 5.3 Geološka in pedološka sestava tal v akumulaciji HE Vrhovo | 35 |
| 5.4 Izmere akumulacije HE Vrhovo | 37 |
| 5.4.1 Bilančna analiza naplavin | 40 |
| 5.4.2 Primerjava vzdolžnih profilov dna akumulacije za leto 2006, februar in oktober 2010..... | 42 |
| | |
| 6 METODOLOGIJA 2-D MODELIRANJA MORFOLOŠKIH SPREMEMB V AKUMULACIJI HE VRHOVO | 44 |
| 6.1 2-D model CCHE2D..... | 44 |
| 6.1.1 Teoretične osnove..... | 44 |
| 6.1.2 Enačbe za vrednotenje/ocenjevanje premestitvene zmogljivosti..... | 49 |
| 6.1.2.1 Enačba premestitvene zmogljivosti Wu, Wang in Jia (Wu et al., 2000) | 49 |
| 6.1.3 Struktura modela CCHE2D | 50 |

| | | |
|------------------|---|------------|
| 7 | STRUKTURA PODLAG IN VHODNIH PODATKOV SIMULACIJE PREMESTITVENE ZMOGLJIVOSTI | 54 |
| 7.1 | Batimetrija – digitalni model akumulacije HE Vrhovo..... | 54 |
| 7.2 | Izdelava računske mreže | 54 |
| 7.3 | Priprava hidroloških podlag za modeliranje transporta plavin | 59 |
| 7.3.1 | Časovni obseg hidrološkega dogodka | 59 |
| 7.3.2 | Hidrološka izhodišča modela – nestalni tok s prosto gladino | 61 |
| 7.3.3 | Hidravlične razmere na pregradnem objektu | 64 |
| 7.3.4 | Umerjanje koeficienta hrapavosti akumulacije | 67 |
| 7.4 | Izhodišča modela s stališča transporta plavin..... | 68 |
| 7.5 | Povzetek izbranih vrednosti parametrov modela CCHE2D | 76 |
| 7.6 | Zagon simulacije | 76 |
| 8 | REZULTATI MODELIRANJA TOKA S PROSTO GLADINO IN TRANSPORTA PLAVIN..... | 77 |
| 8.1 | Oprelitev modelnih scenarijev in opazovanih karakterističnih mest v modelu | 77 |
| 8.1.1 | Modelna scenarija V_1 in V_2 | 77 |
| 8.1.2 | Karakteristična mesta opazovanja v modelu | 78 |
| 8.2 | Rezultati simulacij | 79 |
| 8.2.1 | Scenarij V_1 | 79 |
| 8.2.2 | Scenarij V_2 in primerjava s scenarijem V_1 | 86 |
| 8.3 | Verifikacija modela in izbor scenarija..... | 94 |
| 8.3.1 | Verifikacija modela | 94 |
| 8.3.2 | Izbor scenarija za potrebe ustreznega obratovanja HE Vrhovo | 95 |
| 9 | UPRAVLJANJE PREGRADE HE VRHOVO GLEDE NA MORFOLOŠKE RAZMERE V AKUMULACIJI..... | 97 |
| 9.1 | Ravnanje s plavinami | 97 |
| 9.1.1 | Praksa v tujini | 98 |
| 9.2 | Obstoječi način obratovanja HE Vrhovo glede na razmere | 99 |
| 9.3 | Optimizacija obratovalne krivulje | 102 |
| 9.3.1 | Odvisnosti med hidromorfološki spremenljivkami in obratovalno krivuljo | 102 |
| 9.3.2 | Oblikovanje nove denivelacijske krivulje | 105 |
| 9.3.2.1 | Izboljšana denivelacijska krivulja dk_1 – predlagani protokol obratovanja št. 1 | 106 |
| 9.3.2.2 | Denivelacijska krivulja dk_2 – predlagani protokol obratovanja št. 2..... | 108 |
| 9.3.2.3 | Denivelacijska krivulja dk_3 – predlagani protokol obratovanja št. 3..... | 109 |
| 9.3.2.4 | Obratovanje HE Vrhovo po stabilizaciji pretočnih razmer | 111 |
| 10 | ZAKLJUČKI | 114 |
| 11 | POVZETEK..... | 117 |
| 12 | SUMMARY..... | 120 |
| VIRI..... | | 123 |

KAZALO PREGLEDNIC

| | |
|---|-----|
| Preglednica 1: Skupna proizvodnja energije iz obnovljivih virov in deleži posameznih virov na območju EU oz. EU-27 (povzeto po EUROSTAT, 2014)..... | 5 |
| Preglednica 2: Količine in deleži obnovljivih virov energije v skupni proizvodnji električne energije v Sloveniji (Vir: Statistični urad Republike Slovenije (SURŠ), 2014)..... | 5 |
| Preglednica 3: Oddaja električne energije HE v prenosno omrežje | 9 |
| Preglednica 4: Širina prodonosnega pasu v odvisnosti od pretoka..... | 19 |
| Preglednica 5: Zbirni pregled obratovalnih parametrov HE Vrhovo (povzeto po: Kryžanowski, 2009)..... | 28 |
| Preglednica 6: Hidravlični in hidrološki parametri akumulacije HE Vrhovo (obdobje 1965–1993)..... | 34 |
| Preglednica 7: Spreminjanje volumna akumulacije Vrhovo med pregrado in novim mostom pri Radečah..... | 37 |
| Preglednica 8: Konstante v modelu k- ε (vir: Rodi, 1993)..... | 46 |
| Preglednica 9: Postopek priprave in zagona simulacije ter vizualizacije rezultatov simulacije..... | 51 |
| Preglednica 10: Podatki o dimenzijah elementov in gladkosti računske mreže | 56 |
| Preglednica 11: Klasifikacija zrnastostnih razredov po MIT (MIT, 2012)..... | 68 |
| Preglednica 12: Rezultati granulometrijske analize vzorcev, odvzetih v akumulaciji HE Vrhovo (Geateh, 2010)..... | 70 |
| Preglednica 13: Izbrani premeri zrn (frakcije) na dnu akumulacije HE Vrhovo..... | 71 |
| Preglednica 14: Debelina reprezentativnih plasti (layer) glede na pozicijo v območju modeliranja | 71 |
| Preglednica 15: Zastopanost frakcij znotraj plasti glede na cono (stacionaža) | 72 |
| Preglednica 16: Odvisnost pretoka od koncentracije plavin na merilnih mestih VP Veliko Širje in Hrastnik ter na iztoku iz akumulacije Vrhovo | 75 |
| Preglednica 17: Deleži posameznih velikostnih razredov plavin na dotoku v model | 75 |
| Preglednica 18: Parametri modela nestalnega toka s prosto gladino..... | 76 |
| Preglednica 19: Parametri modela transporta plavin..... | 76 |
| Preglednica 20: Definicija scenarijev kot računski vzorec dotoka plavin v model | 77 |
| Preglednica 21: Primerjava izmerjenih in izračunanih volumnov transporta plavin..... | 94 |
| Preglednica 22: Regulacija nivoja akumulacije Vrhovo glede na pretok na VP Hrastnik | 99 |
| Preglednica 23: Regulacija nivoja gladine glede na vsoto pretokov Save/VP Hrastnik in Savinje/VP Veliko Širje | 100 |
| Preglednica 24: Potek denivelacije po krivulji dk ₁ | 106 |
| Preglednica 25: Potek denivelacije po krivulji dk ₂ | 108 |

| | |
|--|-----|
| Preglednica 26: Potek denivelacije po krivulji dk_3 | 110 |
| Preglednica 27: Polnjenje akumulacije po nastopu konice VV vala..... | 111 |

KAZALO SLIK

| | |
|---|----|
| Slika 1: Poraba energije v Sloveniji v letu 2011 (vir: Letna energetska statistika 2011, 2012) | 6 |
| Slika 2: Struktura oddane električne energije v prenosno omrežje, ločeno na oddajo hidroelektrarn, Jedrske elektrarne Krško, termoelektrarn in ostalih (biomasa, plin) (vir: ELES, letno poročilo, 2011)..... | 7 |
| Slika 3: Trend deleža HE v skupni proizvodnji električne energije v Sloveniji za obdobje 1994–2011..... | 8 |
| Slika 4: Trend deleža HE Vrhovo v skupni proizvodnji električne energije v Sloveniji za obdobje 1997–2011 | 9 |
| Slika 5: Premestitvena zmogljivost reke Save v akumulaciji Vrhovo (Kryžanowski, 2009)..... | 28 |
| Slika 6: HE Vrhovo – situacija pregrade (vir: GURS DOF5 ortofoto) | 30 |
| Slika 7: HE Vrhovo – situacija pregrade s posameznimi objekti (vir: Savske elektrarne Ljubljana)..... | 31 |
| Slika 8: HE Vrhovo – prerez skozi pretočno polje (vir: Savske elektrarne Ljubljana) | 31 |
| Slika 9: HE Vrhovo – prerez skozi strojnico (vir: Savske elektrarne Ljubljana) | 32 |
| Slika 10: HE Vrhovo – prelivna polja dolvodno | 32 |
| Slika 11: HE Vrhovo – segmentna zapornica z zaklopko | 33 |
| Slika 12: Porečje akumulacije HE Vrhovo – porečje reke Save – spodnja Sava | 33 |
| Slika 13: Srednji letni pretok za obdobje 1965–1993..... | 35 |
| Slika 14: Geološka karta širšega območja akumulacije HE Vrhovo (podatki: Geološki zavod Slovenije, 2009) | 35 |
| Slika 15: Mesta vrtin na območju akumulacije HE Vrhovo (Geateh, 2010)..... | 36 |
| Slika 16: Vzdolžni prerez – shematizirana geološka sestava tal (Geateh, 2010) | 37 |
| Slika 17: Spreminjanje prostornine akumulacije HE Vrhovo od leta 1995..... | 38 |
| Slika 18: Spreminjanje prostornine akumulacije od leta 1995 v odnosu na srednji mesečni pretok | 38 |
| Slika 19: Spreminjanje prostornine akumulacije HE Vrhovo glede na predhodne meritve | 39 |
| Slika 20: Odnos med spreminjanjem prostornine glede na predhodne meritve in srednjim mesečnim pretokom..... | 39 |
| Slika 21: Delež plavin glede na celotno prostornino akumulacije HE Vrhovo | 40 |
| Slika 22: Bilančna analiza naplavin v akumulaciji HE Vrhovo za obdobje februar–oktober 2010..... | 41 |
| Slika 23: Vzdolžni prerez dna akumulacije v letih 2006 (rdeče), februar 2010 (zeleno) in oktober 2010 (modro) | 42 |

| | |
|---|----|
| Slika 24: Primerjava sprememb dna v karakterističnih stacionažah za leto 2006, februar 2010 in oktober 2010..... | 42 |
| Slika 25: Konfiguracija transporta plavin (prevzeto po: Zhang, 2006)..... | 47 |
| Slika 26: Struktura programskega paketa CCHE2D | 50 |
| Slika 27: Shematski prikaz poteka simulacije od generiranja računske mreže do rezultatov | 53 |
| Slika 28: Multibeam tehnologija meritev dna | 54 |
| Slika 29: Lokalni koordinatni sistem ij računske mreže | 55 |
| Slika 30: Batimetrija akumulacije HE Vrhovo (vir terenskih podatkov: Izmera bazena HE Vrhovo, 2010) | 55 |
| Slika 31: Postopek generiranja računske mreže (izbrani postopki so odebeljeni) | 57 |
| Slika 32: Mejno območje obdelave, ki je hkrati tudi območje numerične mreže modela | 58 |
| Slika 33: Stebri mostov kot neaktivni elementi računske mreže v primeru cestnega mostu pri Radečah (levo) in pri naselju Vrhovo, 700 m gorvodno od pregrade HE Vrhovo (desno) | 58 |
| Slika 34: Razmerja med Q_{sr} leta 2010 in povprečnimi srednjimi pretoki v obdobju 1971–2000 (vir: Pretoki rek v letu 2010, 2011)..... | 59 |
| Slika 35: Razmerja med Q_{sr} leta 2010 in obdobjem 1971–2000. Razmerja so izračunana kot povprečja razmerij na izbranih merilnih postajah (vir: Pretoki rek v letu 2010, 2011)..... | 60 |
| Slika 36: Krivulja trajanja srednjega mesečnega pretoka v obdobju 1996–2012 v odnosu do pretoka ob začetku izpiranja blatne cone..... | 60 |
| Slika 37: Hidrogram na profilu HE Vrhovo za obdobje 17. 9.–26. 9. 2010 (vir podatkov: SEL, d. o. o.)..... | 62 |
| Slika 38: Gladina zg. vode h_{zg} (17. 9.–26. 9. 2010) kot izhodni robni pogoj modela (vir podatkov: SEL, d. o. o.)..... | 62 |
| Slika 39: Časovno sovpadanje hidrograma in nivoja gladine zgornje vode h_{zg} (obdobje 17. 9.– 26. 9. 2010) na profilu pregrade HE Vrhovo | 63 |
| Slika 40: Računski hidrogram kot vhodni robni pogoj | 64 |
| Slika 41: Konsumpcijske krivulje za pretočno polje ob spušenih zaklopkah za različne nivoje zgornje vode (h_{zg})..... | 65 |
| Slika 42: Pretok prek zaklopke pri različnih gladinah zgornje vode (h_{zg})..... | 65 |
| Slika 43: Denivelacijske krivulje HE Vrhovo (Hidroelektrarne na spodnji Savi, 2012) | 66 |
| Slika 44: Presejna krivulja v akumulaciji HE Vrhovo (Geateh, 2010) | 69 |
| Slika 45: Togo sestavljanje s Fullerjevo zrnavostno krivuljo v prostorninski vzorec..... | 69 |
| Slika 46: Histerezni zanki odvisnosti koncentracije suspendiranih plavin od pretoka na VP Veliko Širje..... | 72 |
| Slika 47: Histerezni zanki odvisnosti koncentracije suspendiranih plavin od pretoka na VP Hrastnik..... | 73 |

| | |
|--|----|
| Slika 48: Zrnavost plavin na iztoku iz akumulacije Vrhovo (vir: Dolinar et al., 2008) | 74 |
| Slika 49: Karakteristične točke/vozlišča in linije opazovanja | 78 |
| Slika 50: Nivo gladine akumulacije na koncu VV dogodka – simulacije (26. 9. 2010)..... | 79 |
| Slika 51: Primerjava nivojev dna v akumulaciji Vrhovo na začetku simulacije, ob nastopu pretokov Q_{100} in na koncu simulacije – scenarij V_1 | 80 |
| Slika 52: Primerjava koncentracij plavin vzdolž akumulacije v času $t = 2$ h, pri Q_{100} in na koncu simulacije..... | 80 |
| Slika 53: Koncentracije plavin v akumulaciji Vrhovo v času $t = 2$ h ($Q \sim 1080$ m ³ /s) – v povprečju največje koncentracije plavin znotraj simulacije..... | 81 |
| Slika 54: Koncentracija plavin v odvisnosti od časa in v primerjavi s hidrogramom na mestu tik gorvodno od pregrade (j868) | 81 |
| Slika 55: Deleži posameznih frakcij v koncentraciji plavin/celotna koncentracija plavin v odvisnosti od časa nastopa pretoka tik gorvodno od pregrade HE Vrhovo | 82 |
| Slika 56: Deleži posameznih frakcij v koncentraciji plavin/celotna koncentracija plavin v odvisnosti od časa nastopa pretoka v točki i9j380 (srednja stacionaža akumulacije) | 83 |
| Slika 57: Primerjava poteka koncentracij plavin s časom za točki i9j868 (tik gorvodno od pregrade) in i9j380 (srednja stacionaža akumulacije) | 84 |
| Slika 58: Primerjava nivojev dna v akumulaciji za liniji j380 (srednja stacionaža) in j868 (tik nad pregrado) za začetno stanje (t_0), stanje 2 uri po začetku dogodka ($t = 2$ h), stanje pri Q_{100} in končno stanje | 85 |
| Slika 59: Histerezni zanki za območje okoli točke i9j380 (levo) in območje tik nad pregrado i9j868 (desno) – V_1 | 85 |
| Slika 60: Primerjava nivojev dna obeh scenarijev v akumulaciji Vrhovo na koncu simulacije..... | 87 |
| Slika 61: Primerjava koncentracij plavin obeh scenarijev vzdolž linije i9 za različne časovne preseke | 87 |
| Slika 62: Primerjava koncentracij plavin obeh scenarijev s pretokom glede na časovni potek tik gorvodno od pregrade | 88 |
| Slika 63: Deleži posameznih frakcij v koncentraciji plavin/celotna koncentracija plavin v odvisnosti od časa nastopa pretoka tik gorvodno od pregrade (j868) – scenarij V_2 | 88 |
| Slika 64: Deleži posameznih frakcij v koncentraciji plavin/celotna koncentracija plavin v odvisnosti od časa nastopa pretoka na srednji stacionaži – scenarij V_2 | 89 |
| Slika 65: Primerjava prečnih prerezov dna v akumulaciji za mesto tik nad pregrado in na srednji stacionaži akumulacije za t_0 , $t = 2$ h, stanje pri Q_{100} in končno stanje | 89 |
| Slika 66: Meja med prodno in blatno cono na koncu VV dogodka; levo zastopanost frakcije VFS, desno CS – V_2 | 90 |
| Slika 67: Zastopanost najbolj grobih frakcij na dnu akumulacije na koncu VV dogodka – scenarij V_2 | 91 |

| | |
|---|-----|
| Slika 68: Porazdelitev frakcij sestave dna na začetku (levo) in koncu (desno) VV dogodka (simulacije) | 91 |
| Slika 69: Porazdelitev frakcij sestave dna v času prve konice (levo) in druge konice (desno) koncentracij plavin..... | 92 |
| Slika 70: Premer zrna d_{50} vzdolž akumulacije za različne časovne preseke v simulaciji..... | 93 |
| Slika 71: Histerezni zanki za območje okoli točke i9j380 (levo) in območje tik nad pregrado i9j868 (desno) – V_2 | 93 |
| Slika 72: Primerjava vzdolžnih profilov dna akumulacije za izmerjene in izračunane vrednosti..... | 95 |
| Slika 73: Ukrepi za ravnanje s plavinami..... | 97 |
| Slika 74: Koncentracija plavin v času gladinskega stanja v točkah i9j868 (levo) in i9j380 (desno) | 103 |
| Slika 75: Deleži posameznih frakcij v koncentraciji plavin/celotna koncentracija plavin ob nastopu prvega ekstrema koncentracij ($Q \sim 1.080 \text{ m}^3/\text{s}$) glede na mesto v akumulaciji..... | 104 |
| Slika 76: Deleži posameznih frakcij v koncentraciji plavin/celotna koncentracija plavin ob nastopu stabilnih pretočnih razmer glede na mesto v akumulaciji | 104 |
| Slika 77: Denivelacijska krivulja po obstoječem poslovniku obratovanja in prelivna krivulja prostega preliva..... | 105 |
| Slika 78: Denivelacijska krivulja dk_1 in prelivna krivulja prostega preliva – prehod pri gladini 188,2 m | 107 |
| Slika 79: Denivelacijska krivulja dk_2 in prelivna krivulja prostega preliva – prehod pri gladini 188,2 m | 109 |
| Slika 80: Denivelacijska krivulja dk_3 in prelivna krivulja prostega preliva – prehod pri gladini 188,2 m | 110 |
| Slika 81: Obratovalna krivulja ob polnjenju akumulacije in prelivna krivulja prostega preliva – prehod pri gladini 188,2 m..... | 112 |
| Slika 82: Primerjava vseh treh novih variant obratovalnih krivulj..... | 112 |
| Slika 83: Shematski prikaz poteka obratovanja HE Vrhovo glede na različne denivelacijske krivulje..... | 113 |

LIST OF TABLES

| | |
|---|-----|
| Table 1: Energy produced from renewable sources with shares of individual sources in EU member countries (adopted from EUROSTAT, 2014) | 5 |
| Table 2: Amounts and shares of renewable energy sources in total electrical energy production in EU member countries (Source: Statistical office RS, 2014)..... | 5 |
| Table 3: Hydropower produced electrical energy distribution to the network | 9 |
| Table 4: Bedload transport zone width in relation to flow | 19 |
| Table 5: Review of operation parameters of HPP Vrhovo (adopted from: Kryžanowski, 2009)..... | 28 |
| Table 6: Hydrological and hydraulic parameters of HPP Vrhovo reservoir (period 1965 to 1993) | 34 |
| Table 7: Changes in HPP Vrhovo reservoir volume in the section between the dam and new bridge in Radeče..... | 37 |
| Table 8: Constants of k- ϵ model (source: Rodi, 1993)..... | 46 |
| Table 9: Data preparation, simulation run and visualisation of simulation results procedure..... | 51 |
| Table 10: Numerical cells dimensions and grid smoothness | 56 |
| Table 11: Classification of sediment fractions by MIT guidelines (MIT, 2012)..... | 68 |
| Table 12: Grain size distribution analysis of the samples drilled at the Vrhovo reservoir (Geateh, 2010)..... | 70 |
| Table 13: Selected grain sizes at the bottom of the reservoir HPP Vrhovo..... | 71 |
| Table 14: Depth of representative layers according to the position in the area of simulation..... | 71 |
| Table 15: Representation of grain sizes in a surface layer according to position..... | 72 |
| Table 16: Sediment concentration relation to flow at Veliko Širje and Hrastnik gauging stations and at the HPP Vrhovo reservoir outlet | 75 |
| Table 17: Shares of individual sediment size classes at the model entry | 75 |
| Table 18: Unsteady flow model input parameters | 76 |
| Table 19: Sediment transport model input parameters | 76 |
| Table 20: Scenarios definition as an adjusted sediment inflow sample | 77 |
| Table 21: Comparison of measured and simulated (computed) volumes of the sediment transport | 94 |
| Table 22: Vrhovo reservoir water level management with relation to flow at Hrastnik gauging station | 99 |
| Table 23: Vrhovo reservoir water level management with relation to total flow from Sava and Savinja River | 100 |
| Table 24: Operation rule procedure by dk ₁ scenario | 106 |
| Table 25: Operation rule procedure by dk ₂ scenario | 108 |

| | |
|--|-----|
| Table 26: Operation rule procedure by dk ₂ scenario | 110 |
| Table 27: Reservoir fill after the flood wave peak | 111 |

LIST OF FIGURES

| | |
|---|----|
| Figure 1: Slovenian energy consumption in 2011 (source: Annual energy statistics of 2011, SURS, 2012) | 6 |
| Figure 2: Structure of distributed electrical energy, divided to hydropower, nuclear plant Krško, coal plants and others (biomass, gas) (source: ELES, Annual report, 2011) | 7 |
| Figure 3: Hydropower contribution to total electrical energy produced in Slovenia for 1994–2011..... | 8 |
| Figure 4: HPP Vrhovo contribution to total electrical energy produced in Slovenia for 1997–2011..... | 9 |
| Figure 5: River Sava sediment transport capacity in Vrhovo reservoir (Kryžanowski, 2009)..... | 28 |
| Figure 6: HPP Vrhovo – aerial view (source: GURS DOF5 aerial imagery)..... | 30 |
| Figure 7: HPP Vrhovo – dam with individual objects (source: Savske elektrarne Ljubljana)..... | 31 |
| Figure 8: HPP Vrhovo – spillway longitudinal cross section (source: Savske elektrarne Ljubljana)..... | 31 |
| Figure 9: HPP Vrhovo – machine room longitudinal cross section (source: Savske elektrarne Ljubljana)..... | 32 |
| Figure 10: HPP Vrhovo – spillway downstream section..... | 32 |
| Figure 11: HPP Vrhovo – radial/tainter gate with flap..... | 33 |
| Figure 12: HPP Vrhovo reservoir basin – River Sava watershed – spodnja Sava..... | 33 |
| Figure 13: Mean annual flow for period of 1965 to 1993 | 35 |
| Figure 14: Geological map of the HPP Vrhovo reservoir area (data: Geological Survey of Slovenia, 2009) | 35 |
| Figure 15: Drill holes locations in HPP Vrhovo reservoir (Geateh, 2010)..... | 36 |
| Figure 16: Schematic geological ground composition – longitudinal profile (Geateh, 2010)..... | 37 |
| Figure 17: Changes in HPP Vrhovo reservoir volume since 1995 | 38 |
| Figure 18: Changes in reservoir volume since 1995 in relation to mean annual flow..... | 38 |
| Figure 19: Changes in reservoir volume in relation to prior measurements..... | 39 |
| Figure 20: Reservoir volume changes compared to prior measurements relation to mean annual flow | 39 |
| Figure 21: Sediment shares in relation to total Vrhovo reservoir volume..... | 40 |
| Figure 22: Cut-fill analysis of HPP Vrhovo reservoir (period of february–october 2010) | 41 |
| Figure 23: Reservoir bottom longitudinal profile of year 2006 (red line), february 2010 (green line) and october 2010 (blue line)..... | 42 |
| Figure 24: Reservoir bottom level changes comparison at certain stations for year 2006 and 2010 (february and october)..... | 42 |
| Figure 25: Schematic configuration of sediment transport (adopted from: Zhang, 2006) | 47 |

| | |
|---|----|
| Figure 26: Schematic structure of CCHE2D software package | 50 |
| Figure 27: Simulation flowchart – from generating numerical grid to the results | 53 |
| Figure 28: Multibeam reservoir surface scanning..... | 54 |
| Figure 29: Local coordinate system ij numerical grid..... | 55 |
| Figure 30: Bathymetry of Vrhovo reservoir (field data source: Izmera bazena HE Vrhovo, 2010) | 55 |
| Figure 31: Numerical grid generation (selected individual procedures are presented bold)..... | 57 |
| Figure 32: Numerical grid boundary | 58 |
| Figure 33: Bridge columns as inactive numerical grid cells in the case of road bridge in Radeče (left) and near Vrhovo village, approx. 700 m upstream of HPP Vrhovo dam (right) | 58 |
| Figure 34: Mean annual flow of 2010 ratio to mean flow of the period 1971–2000 (source: Pretoki rek v letu 2010, 2011) | 59 |
| Figure 35: Mean annual flow of 2010 ratio to mean flow of the period 1971–2000. Ratios are determined as average ratios at selected gauging stations (source: Pretoki rek v letu 2010, 2011)..... | 60 |
| Figure 36: Duration curve of mean monthly flow of the period 1996–2012 in relation to the flow at the initiation of suspended load laden zone flushing | 60 |
| Figure 37: Hydrograph at the HPP Vrhovo dam for period of 17. 9.–26. 9. 2010 (data: SEL, d. o. o.)..... | 62 |
| Figure 38: Stage hydrograph (17. 9. – 26. 9. 2010) as a downstream boundary condition (data: SEL, d. o. o.)..... | 62 |
| Figure 39: Coinciding of flow and stage hydrograph at the HPP Vrhovo dam (17. 9.–26. 9. 2010) | 63 |
| Figure 40: Adjusted flow hydrograph as an upstream boundary condition | 64 |
| Figure 41: Operating curves for an individual spillway (with flaps lowered) at various upstream water levels | 65 |
| Figure 42: Flow over individual flap at various upstream water levels | 65 |
| Figure 43: Estimated operating rule curve for HPP Vrhovo (Hidroelektrarne na spodnji Savi, 2012)..... | 66 |
| Figure 44: Grain size curve of HPP Vrhovo reservoir (Geateh, 2010) | 69 |
| Figure 45: Adjustment of the grain size distribution to the Fuller curve | 69 |
| Figure 46: Hysteresis loops of sediment concentration to flow relation at Veliko Širje gauging station for periods 17.–26. september 2010 (left) and 23.–30. 12. 2009 (right) | 72 |
| Figure 47: Hysteresis loops of sediment concentration to flow relation at Hrastnik gauging station for periods 23. – 29. december 2010 (left) and 23. – 31. 12. 2009 (right) | 73 |
| Figure 48: Grain size distribution at the HPP Vrhovo reservoir outlet (source: Dolinar et al., 2008) | 74 |

| | |
|--|----|
| Figure 49: Characteristic points/nodes and monitoring lines | 78 |
| Figure 50: Reservoir water level at the end of simulation (26. 9. 2010) | 79 |
| Figure 51: Vrhovo reservoir bottom level comparison at the beginning of simulation, at Q_{100} and at the end – V_1 scenario | 80 |
| Figure 52: Sediment concentration comparison along the reservoir at $t = 2$ h, at Q_{100} and at the end of simulation..... | 80 |
| Figure 53: Sediment concentration comparison in the reservoir at $t = 2$ h – on average, the highest sediment concentrations of the simulation period | 81 |
| Figure 54: Sediment concentration time dependency with comparison to flow hydrograph just upstream of dam..... | 81 |
| Figure 55: Shares of individual grain-size fractions of sediment concentration/total sediment concentration relation to flow just upstream of the dam..... | 82 |
| Figure 56: Shares of individual grain-size fractions of sediment concentration/total sediment concentration relation to flow at the central station of the reservoir (point i9j380)..... | 83 |
| Figure 57: Comparison of sediment concentration curves just upstream of the dam to the central station of the reservoir with relation to time | 84 |
| Figure 58: Comparison of reservoir bottom levels at central station of the reservoir and just upstream of the dam at the beginning, at $t = 2$ h, at Q_{100} and at the end of simulation | 85 |
| Figure 59: Hysteresis loops at the central station of the reservoir and just upstream of the dam – scenario V_1 | 85 |
| Figure 60: Comparison of reservoir bottom levels for both scenarios at the end of simulation | 87 |
| Figure 61: Comparison of sediment concentration along the reservoir for both scenarios at various time frames | 87 |
| Figure 62: Comparison of sediment concentration to flow just upstream of the dam for both scenarios with relation to time | 88 |
| Figure 63: Shares of individual grain-size fractions of sediment concentration/total sediment concentration relation to flow just upstream of the dam – scenario V_2 | 88 |
| Figure 64: Shares of individual grain-size fractions of sediment concentration/total sediment concentration relation to flow at the central station of the reservoir – scenario V_2 | 89 |
| Figure 65: Comparison of reservoir bottom cross sections at central station of the reservoir and just upstream of the dam at the beginning, at Q_{100} and at the end of simulation..... | 89 |
| Figure 66: Boundary line between dominating bedload and dominating suspended load zone; on image at the left side representation of VFS fraction and on the right side of CS fraction | 90 |
| Figure 67: Representation of coarser sediments at the bottom at the end of simulation – scenario V_2 | 91 |

| | |
|--|-----|
| Figure 68: Distribution of fractions of the sediment composition at the reservoir bottom at the beginning (left) and at the end (right)..... | 91 |
| Figure 69: Distribution of fractions of the sediment composition at the reservoir bottom at the time of primary sediment concentration peak and at the time of the secondary concentration peak..... | 92 |
| Figure 70: d_{50} grain diameter along the reservoir for various time frames | 93 |
| Figure 71: Hysteresis loops at the central station and just upstream of the dam – scenario V_2 | 93 |
| Figure 72: Comparison of longitudinal profiles of the bottom for measured and computed values | 95 |
| Figure 73: Sediment management measures | 97 |
| Figure 74: Sediment concentration with water levels at the central station of the reservoir and just upstream of the dam with relation to time | 103 |
| Figure 75: Shares of individual grain-size fractions of sediment concentration/total sediment concentration at the time of primary sediment concentration peak related to position along the reservoir | 104 |
| Figure 76: Shares of individual grain-size fractions of sediment concentration/total sediment concentration at the time of flow conditions stabilization | 104 |
| Figure 77: Operation rule curve by existing operation procedure manual with free flow curve..... | 105 |
| Figure 78: Operation rule curve dk_1 and free flow curve – crossing at 188,2 m.a.s.l. | 107 |
| Figure 79: Operation rule curve dk_2 and free flow curve – crossing at 188,2 m.a.s.l. | 109 |
| Figure 80: Operation rule curve dk_3 and free flow curve – crossing at 188,2 m.a.s.l. | 110 |
| Figure 81: Operation rule curve for reservoir fill procedure with free flow curve – crossing at 188,2 m.a.s.l..... | 112 |
| Figure 82: Comparison of all three new operation rule curves | 112 |
| Figure 83: Flowchart of HPP Vrhovo operation considering the new operation rule curves | 113 |

KRATICE

| | |
|-------|--|
| ARSO | Agencija Republike Slovenije za okolje |
| ASCII | American standard code for information interchange |
| ASL | Above sea level |
| CAD | Computer-aided design |
| CM | Coarse silt |
| CS | Coarse sand |
| CV | Center vodenja |
| EE | Električna energija |
| EES | Elektroenergetski sistem |
| EU | Evropska unija |
| FM | Fine silt |
| FS | Fine sand |
| GIS | Geografski informacijski sistem |
| GUI | Graphical user interface |
| HE | Hidroelektrarna |
| HEC | Hydrologic engineering center |
| HPP | Hydropower plant |
| IBE | Inženirski biro Elektroprojekt Ljubljana |
| IEA | International environment agency |
| JEK | Jedrska elektrarna Krško |
| MM | Medium silt |
| MPM | Meyer-Peter-Müller |
| MS | Medium sand |
| NEK | Nuklearna elektrarna Krško |
| NEP | Nacionalni energetske program |
| OVE | Obnovljivi viri energije |
| RD | Ribiški dom |
| RL | Ryskin-Leal |
| RTP | Razdelilna transformatorska postaja |
| SEL | Savske elektrarne Ljubljana |
| SIAM | Sediment impact assessment model |
| TE | Termoelektrarna |
| TJ | Terajoule |
| URE | Učinkovita raba energije |

| | |
|-------|---------------------------------------|
| USACE | United States Army Corps of Engineers |
| VCS | Very coarse sand |
| VFG | Very fine gravel |
| VFM | Very fine silt |
| VFS | Very fine sand |
| VGI | Vodnogospodarski inštitut |
| VP | Vodomerna postaja |
| VV | Visokovodni |

»Ta stran je namenoma prazna«

1 UVOD

Izgradnja hidroelektrarne Vrhovo pomeni oviro pri transportu plavin, predvsem plavin rinjenega tipa (rinjene plavine), ne pa toliko plavin lebdečega tipa (lebdeče plavine). Prodonosnost je bila z izgradnjo hidroelektrarne Vrhovo praktično prekinjena, medtem ko se je kalnost ohranila v večinski meri s pretokom v času visokih voda prek prelivnih polj hidroenergetskega objekta. Prekinitev prodonosnosti zaradi izgradnje HE Vrhovo in posledično akumuliranje v akumulaciji dolvodno od pregrade povzroča poglobljanje dna struge, ki je med drugim odvisno tudi od odvzema rinjenih plavin za najrazličnejše industrijske namene. V akumulacijo HE Vrhovo v vsem obdobju obratovanja, tj. od leta 1993 oz. 1996 dalje, tudi sicer doteka vedno manj rinjenih plavin. Vzroka ne gre iskati toliko pri vplivu gornjesavskih stopenj, saj se v porečju srednje Save (Ljubljana–Zidani Most) s pomočjo najrazličnejših tipov erozije in ekstremnih geoloških dogodkov sprosti skoraj 500.000 ton dodatnega erozijskega materiala, ki se odplavlja in prispeva k prodonosnosti in kalnosti, kjer pa dejanski deleži niso znani (Geateh, 2010), temveč v že omenjenem odvzemu plavin za industrijske namene – npr. letni povprečni odvzem plavin na separaciji Zg. Hotič je v letih 2009 in 2010 znašal v povprečju 30.000 m³ na leto (Pretoki rek v letu 2010, 2011).

V času postopne graditve vodnih elektrarn od HE Vrhovo v dolvodni smeri proti hrvaški meji (v okvirnem obdobju 20 let), se bodo vplivi prekinjenega dotoka rinjenih plavin v dolvodne odseke reke Save, ki je danes povzročen z akumulacijo HE Vrhovo, s časom širili v dolvodni smeri. V tem času bo spodnja Sava na še nezajezjenih odsekih razliko med premestitveno zmogljivostjo in praktično prekinjeno prodonosnostjo skozi zgrajene gorvodne stopnje erodirala iz podlage, kjer bo to možno (Mikoš, 1999). Po drugi strani bo zmanjševanje kalnosti z izgradnjo posameznih stopenj na spodnji Savi zaradi delnega zamuljevanja akumulacij le postopno. Za prodonosnost reke Save so značilne zelo velike razlike med mokrim in sušnim hidrološkim letom. Pri analizi prodonosnosti so velika odstopanja med posameznimi hidrološkimi obdobji: med srednjim in mokrim letom znaša razmerje 1:4, ki pa lahko izjemno naraste, v primerjavi s sušnim letom tudi do razmerja 1:100. Druga značilnost prodonosnosti Save je v tem, da pojav nastopa v sorazmerno kratkih časovnih intervalih (Kryžanowski, 2009). Največja kalnost v Savi se pojavljajo sicer v pomladnih in jesenskih mesecih, kar je v skladu z dežno-snežnim pretočnim režimom, za katerega je značilen višek vode spomladi in jeseni (Ulaga, 2005). Maksimalne koncentracije v obdobju 1954–1973 (Mikoš, 1999) naraščajo vse tja do 2 kg/m³, po tem obdobju do začetka obratovanja HE Vrhovo sledi nihanje koncentracij med 0,5 in 1,5 kg/m³, v obdobju po začetku polnega obratovanja HE Vrhovo pa je opazen trend ustalitve na vrednosti okoli 1 kg/m³.

Minimalni zahtevani pretok, pri katerem pride do premika aritmetičnega srednjega zrna (Q_0), je v po do sedaj izvedenih meritvah prodonosnosti nihal med 200 in 230 m³/s, letna količina rinjenih plavin pa

je v merskem profilu Radeče znašala med 60.000 in 65.000 m³; aritmetično srednje zrno (d_m) je bilo v povprečju med 22 in 30 mm.

V zadnjem obdobju se izvajajo meritve morfoloških sprememb v akumulaciji HE Vrhovo predvsem kot osnova za napoved morfoloških procesov v akumulaciji v prihodnosti. Morfološki procesi v akumulaciji so v splošnem le del erozijsko-sedimentacijskega kroga, zajeti v rečni eroziji in sedimentaciji, zato lahko rečemo, da gre dejansko za odlaganje in odplavljanje plavin.

Raziskave, ki so bile osnova za primerjave stanja dna akumulacije, se izvajajo neprekinjeno od leta 1998. Z rezultati meritev je bila potrjena domneva, da se v akumulaciji HE Vrhovo (razen ekstremno mokrih let, npr. 2002, in let z ekstremnimi hidrološkimi dogodki, npr. 2010) lahko pričakuje vzpostavitev cikličnosti odlaganja/erozije, predvsem lebdečih plavin. V korenu zaježitve se usedajo večje frakcije zrn, bolj proti pregradi se delež drobnih frakcij povečuje. Meja blatne cone je tako pod Radečami. Pri velikih pretokih (nad 1.000 m³/s) je v akumulaciji vzpostavljen naravni način odtoka – dalj kot traja, večje je izpiranje iz akumulacije in bolj se cona izpiranja pomika gorvodno. V prvi polovici akumulacije (od vtoka Savinje v Savo do Radeč) je poglobljanje struge bistveno manj izrazito, saj se pozna vpliv Savinje, ki s seboj prinaša pretežno grobe peske.

1.1 Cilji naloge

Glavne ugotovitve večletnih raziskav (zamuženost akumulacije Vrhovo, pričakovana vzpostavitev cikla zasipanje-erodiranje akumulacije, znatne spremembe v morfologiji zaradi kratkih, a hidrološko izjemno intenzivnih dogodkov) so osnova za izoblikovanje ciljev te naloge:

- Oblikovanje usmeritev za upravljanje s plavinami in naplavinami (odloženimi plavinami) na območju akumulacije HE Vrhovo, tj. kako postaviti mejo, do kdaj dovoljevati usedanje plavin v akumulaciji in kdaj začeti interventne ukrepe odstranjevanja plavin.
- Dinamika lege oz. premikanja blatne cone in oblikovanje razmerja med blatno in prodno cono znotraj akumulacije HE Vrhovo.

1.2 Teza in pričakovani rezultati

Aktualni poslovnik obratovanja HE Vrhovo predvideva štiri obratovalne režime – sušni, normalni, visokovodni in poplavni režim. Poslovnik sicer predvideva meritve morfologije dna na dve leti oz. po vsaki visoki vodi, ki je večja od Q_5 , ne pa tudi posebnih meritev spremljanja transporta plavin v akumulaciji (Kryžanowski, 2009) ter posledično priporočil oz. navodil za ravnanje s plavinami, ki

igrajo, predvsem v luči dokončanja verige HE na spodnji Savi in predvidene verige HE na srednji Savi, zelo pomembno vlogo. V magistrski nalogi smo uporabili podatke in analize iz obdobja po drugi svetovni vojni pa vse do današnjega dne, s poudarkom na podatkih, ki še niso bili del obširnejših analiz; podatki, pridobljeni v času obratovanja HE Vrhovo – med leti od prve delne polnitve akumulacije v letu 1993 do danes. Osnova za preučevanje morfoloških procesov v akumulaciji Vrhovo je simulacija premestitvene zmogljivosti v času visokovodnega dogodka v septembru 2010, ki zajema celoten razpon pretokov od Q_1 (Q_{sr}) do Q_{100} . S tem smo pridobili podatke o morfološki dinamiki v akumulaciji, predvsem o spremenjenih nivojih dna, zrnastosti sestavi dna vzdolž akumulacije in na karakterističnih mestih ter koncentraciji plavin. Obstoječi poslovník obratovanja HE Vrhovo ne upošteva vpliva plavin na obratovanje na pregradi, z upoštevanjem rezultatov modeliranja transporta plavin v tej nalogi pa pričakujemo drugačna, ustrežnejša razmerja med pretoki in vzdrževano gladino v akumulaciji – novelirano obratovalno krivuljo HE Vrhovo.

2 OVE KOT STRATEGIJA RAZVOJA V EU IN SLOVENIJI

Obnovljivi viri energije (OVE) so najbolj zanesljivi stalni energijski viri na Zemlji. Letna sončna energija, ki doseže Zemljo, je 2.895 ZJ. Zaloge vseh neobnovljivih virov so 325 ZJ (nafta 8.690 EJ; plin 17.280 EJ; uran 114 ZJ in premog 185 ZJ). Trenutna svetovna raba energije je okoli 560 EJ/leto (Key World Energy Statistics, 2014).

Obnovljivi viri energije so pridobljeni iz naravnih virov (Key World Energy Statistics, 2014):

- sonce,
- veter,
- dež,
- bibavica,
- valovi,
- geotermalna toplota,
- biomasa.

Eden izmed ciljev okoljsko-energetske politike EU je delež obnovljivih virov energije povečati na 20 % do leta 2020. S tem bi se znižale toplogredne emisije, EU bi postala tudi manj odvisna od uvožene energije, ne nazadnje pa se poleg tega s tem spodbudi tehnološki napredek in zaposlovanje znotraj EU (European Commission, 2012). Med obnovljivimi viri energije v EU prednjači energija vetra (Nemčija, Danska, Španija, Nizozemska); fotovoltaične elektrarne in ostali obnovljivi viri električne energije so še v bolj ali manj pozni fazi razvoja. Prednost hidroenergije kot OVE je na primer v tem, da lahko enostavno z izrabo vodnega potenciala HE kompenzira nihanja v elektroenergetskem sistemu (EES) (Gubina, 2011).

Deleži obnovljivih virov energije so na globalni ravni, predvsem pa na območju Evropske unije (EU) v zadnjih dvanajstih letih v zmernem porastu. Tako se je med letoma 2004 in 2013 delež obnovljivih virov energije na območju EU v povprečju povečal za 80 %, v Sloveniji pa le za polovico povprečja EU-27 (v povprečju je delež obnovljivih virov energije v Sloveniji še vedno večji od povprečja članic EU), kot je razvidno iz spodnje preglednice (Eurostat, 2014), kjer sledi, da proizvodnja energije iz obnovljivih virov v splošnem najbolj narašča na območju najrazvitejših držav EU.

Preglednica 1: Skupna proizvodnja energije iz obnovljivih virov in deleži posameznih virov na območju EU oz. EU-27 (povzeto po EUROSTAT, 2014)

Table 1: Energy produced from renewable sources with shares of individual sources in EU member countries (adopted from EUROSTAT, 2014)

| | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| EU28 | 8.3% | 8.7% | 9.2% | 10.0% | 10.5% | 11.9% | 12.5% | 12.9% | 14.3% | 15.0% |
| Belgium | 1.9% | 2.3% | 2.7% | 3.4% | 3.8% | 5.2% | 5.7% | 6.1% | 7.4% | 7.9% |
| Bulgaria | 9.5% | 9.4% | 9.6% | 9.2% | 10.5% | 12.2% | 14.1% | 14.3% | 16.0% | 19.0% |
| Czech Republic | 5.9% | 6.0% | 6.4% | 7.4% | 7.6% | 8.5% | 9.5% | 9.5% | 11.4% | 12.4% |
| Denmark | 14.5% | 15.6% | 15.9% | 17.8% | 18.6% | 20.0% | 22.0% | 23.4% | 25.6% | 27.2% |
| Germany | 5.8% | 6.7% | 7.7% | 9.0% | 8.5% | 9.9% | 10.4% | 11.4% | 12.1% | 12.4% |
| Estonia | 18.4% | 17.5% | 16.1% | 17.1% | 18.9% | 23.0% | 24.6% | 25.5% | 25.8% | 25.6% |
| Ireland | 2.4% | 2.9% | 3.1% | 3.6% | 4.1% | 5.1% | 5.6% | 6.6% | 7.3% | 7.8% |
| Greece | 6.9% | 7.0% | 7.2% | 8.2% | 8.0% | 8.5% | 9.8% | 10.9% | 13.4% | 15.0% |
| Spain | 8.3% | 8.4% | 9.2% | 9.7% | 10.8% | 13.0% | 13.8% | 13.2% | 14.3% | 15.4% |
| France | 9.4% | 9.6% | 9.5% | 10.3% | 11.2% | 12.3% | 12.8% | 11.2% | 13.6% | 14.2% |
| Croatia | 13.2% | 12.8% | 12.8% | 12.1% | 12.1% | 13.1% | 14.3% | 15.4% | 16.8% | 18.0% |
| Italy | 5.6% | 5.8% | 6.4% | 6.4% | 7.3% | 9.1% | 10.5% | 12.1% | 15.4% | 16.7% |
| Cyprus | 3.1% | 3.1% | 3.3% | 4.0% | 5.1% | 5.6% | 6.0% | 6.0% | 6.8% | 8.1% |
| Latvia | 32.8% | 32.3% | 31.1% | 29.6% | 29.8% | 34.3% | 30.4% | 33.5% | 35.8% | 37.1% |
| Lithuania | 17.2% | 17.0% | 17.0% | 16.7% | 18.0% | 20.0% | 19.8% | 20.2% | 21.7% | 23.0% |
| Luxembourg | 0.9% | 1.4% | 1.5% | 2.7% | 2.8% | 2.9% | 2.9% | 2.9% | 3.1% | 3.6%* |
| Hungary | 4.4% | 4.5% | 5.1% | 5.9% | 6.5% | 8.0% | 8.6% | 9.1% | 9.5% | 9.8% |
| Malta | 0.1% | 0.2% | 0.2% | 0.2% | 0.2% | 0.2% | 1.0% | 1.4% | 2.7% | 3.8% |
| Netherlands | 1.9% | 2.3% | 2.6% | 3.1% | 3.4% | 4.1% | 3.7% | 4.3% | 4.5% | 4.5% |
| Austria | 22.7% | 23.9% | 25.5% | 27.5% | 28.4% | 30.3% | 30.8% | 30.9% | 32.1% | 32.6% |
| Poland | 6.9% | 6.9% | 6.9% | 6.9% | 7.7% | 8.7% | 9.2% | 10.3% | 10.9% | 11.3% |
| Portugal | 19.2% | 19.5% | 20.8% | 21.9% | 23.0% | 24.4% | 24.2% | 24.7% | 25.0% | 25.7% |
| Romania | 17.0% | 17.6% | 17.1% | 18.3% | 20.5% | 22.7% | 23.4% | 21.4% | 22.8% | 23.9% |
| Slovenia | 16.1% | 16.0% | 15.6% | 15.6% | 15.0% | 19.0% | 19.3% | 19.4% | 20.2% | 21.5% |
| Slovak Republic | 5.7% | 5.9% | 6.3% | 7.6% | 7.7% | 9.3% | 9.0% | 10.3% | 10.4% | 9.8% |
| Finland | 29.2% | 28.8% | 30.0% | 29.6% | 31.4% | 31.5% | 32.5% | 32.9% | 34.5% | 36.8% |
| Sweden | 38.7% | 40.5% | 42.6% | 44.1% | 45.2% | 48.2% | 47.2% | 48.9% | 51.1% | 52.1% |
| United Kingdom | 1.2% | 1.4% | 1.6% | 1.8% | 2.4% | 3.0% | 3.3% | 3.8% | 4.2% | 5.1% |

Preglednica 2: Količine in deleži obnovljivih virov energije v skupni proizvodnji električne energije v Sloveniji (Vir: Statistični urad Republike Slovenije (SURS), 2014)

Table 2: Amounts and shares of renewable energy sources in total electrical energy production in EU member countries (Source: Statistical office RS, 2014)

| | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 |
|--|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| OVE za električno energijo (TJ – terajouli) | | | | | | | | | | |
| Hidro | 14860.4 | 14849.3 | 15008.9 | 14818.9 | 14923.4 | 15523.2 | 15556.6 | 15107.7 | 14970.2 | 15561.0 |
| Veter | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 14.4 |
| Sončna | 0.0 | 0.1 | 0.5 | 1.6 | 2.7 | 14.3 | 46.3 | 236.5 | 586.1 | 774.2 |
| Trdna biogoriva | 325.7 | 293.6 | 271.9 | 234.0 | 836.7 | 430.7 | 430.3 | 450.5 | 411.1 | 427.7 |
| Vsi ostali OVE | 109.1 | 115.8 | 125.0 | 173.4 | 201.3 | 247.1 | 350.5 | 455.8 | 551.2 | 507.4 |
| DELEŽ [%] | 29.3 | 28.7 | 28.2 | 27.7 | 30 | 33.8 | 32.2 | 30.8 | 31.4 | 32.8 |

Strategija Republike Slovenije na področju OVE je zapisana v Resoluciji o Nacionalnem energetskega programu (NEP), sprejetega leta 2004 (Uradni list RS, 57/2004); v letu 2013 se je pričakovalo sprejetje novega NEP, in sicer NEP do leta 2030, kjer je OVE kot podprogram implementiran na sledeč način:

Cilji slovenske energetske politike za obnovljive vire energije so:

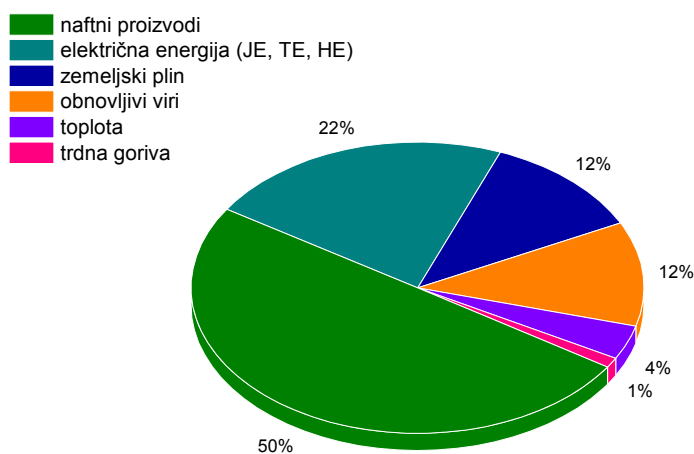
- zagotoviti 25-odstotni delež OVE v končni rabi energije do leta 2020 in 30-odstotni delež OVE do leta 2030; dolgoročno povečevati delež OVE v končni rabi energije po letu 2030,
- zagotoviti 10-odstotni delež OVE v prometu do leta 2020,
- uveljaviti URE (učinkovita raba energije) in OVE kot prioritete gospodarskega razvoja.

Podprogram obravnava proizvodnjo toplote in razpršeno proizvodnjo električne energije v enotah pod 10 MW. Operativni cilji podprograma so zagotoviti:

- 33-odstotni delež proizvodnje toplote iz OVE do leta 2020 in 37-odstotni do leta 2030,
- 12-odstotni delež razpršene proizvodnje električne energije iz OVE do leta 2020 in 18-odstotni do leta 2030 ter s tem prispevati k doseganju 53-odstotnega deleža proizvodnje električne energije iz OVE v bruto končni rabi električne energije do leta 2030,
- zagotoviti 20 % OVE v sistemih daljinskega ogrevanja do leta 2020,
- v petih občinah spodbuditi 100-odstotno rabo OVE do leta 2020 in v dvajsetih do leta 2030.

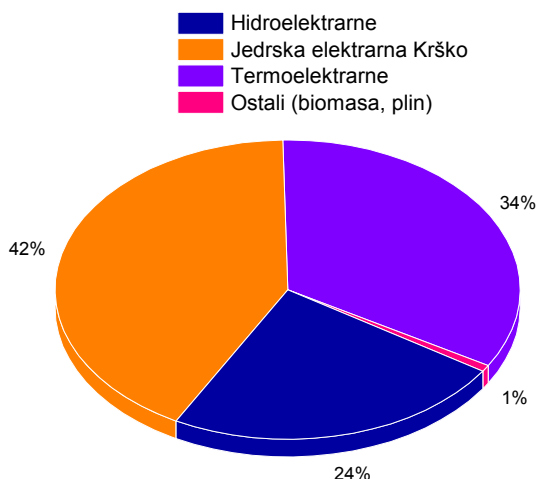
V Sloveniji prihaja električna energija (EE) iz treh glavnih virov – jedrske elektrarne Krško (pri 100-odstotni proizvodnji), termoelektrom in hidroelektrom. Zanimarljiv delež pri tem predstavlja proizvodnja električne energije iz biomase, plina itd.

Elektroenergetska odvisnost Slovenije je danes okoli 20-odstotna, v prihodnji letih pa naj bi se še povečevala. Močna medsebojna povezanost slovenskega elektroenergetskega sistema za zdaj še omogoča pokritje primanjkljaja z uvozom iz sosednjih držav. Težave z oskrbo v sosednjih državah pa so v preteklosti pokazale, da ima lahko povečana odvisnost od uvoza negativne posledice za zanesljivost oskrbe.



Slika 1: Poraba energije v Sloveniji v letu 2011 (vir: Letna energetska statistika 2011, 2012)

Figure 1: Slovenian energy consumption in 2011 (source: Annual energy statistics of 2011, SURS, 2012)



Slika 2: Struktura oddane električne energije v prenosno omrežje, ločeno na oddajo hidroelektrarn, Jedrske elektrarne Krško, termoelektrarn in ostalih (biomasa, plin) (vir: ELES, letno poročilo, 2011)

Figure 2: Structure of distributed electrical energy, divided to hydropower, nuclear plant Krško, coal plants and others (biomass, gas) (source: ELES, Annual report, 2011)

2.1 Vloga hidroenergije v elektroenergetskem sistemu Republike Slovenije

V splošnem so prednosti HE v elektroenergetskem sistemu (EES) sledeče (Gubina, 2011):

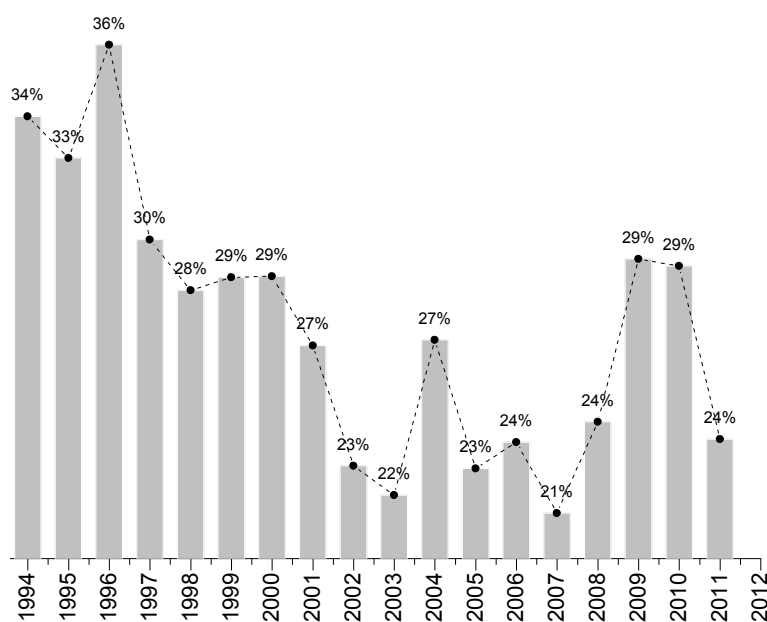
- bistveno povečuje delež OVE v elektroenergetiki,
- možnost gospodarjenja z vodo,
- prispevek k obratovanju EES:
 - konična in trapezna moč,
 - regulacija moči in frekvence caa +/-30–40 MW,
 - regulacija napetosti in jalovih moči,
 - črni start ob razpadu EES,
 - hitri prevzem moči ob izpadu zmogljivosti,
- izboljšuje kakovost dobavljene električne energije odjemalcem pri nihanju proizvodnje OVE,
- dolga življenjska doba (do 100 let).

V letu 2011 je bil delež hidroelektrarn v EES Slovenije 23,8 % (struktura oddane električne energije v prenosno omrežje) oz. 3.362 GWh, kar je za skoraj 20 % manj kot leta 2010, ko je bilo v prenosno omrežje s strani hidroelektrarn oddano 4.249 GWh. Zmanjšan obseg oddaje električne energije v prenosno omrežje je bil delno krit z NEK in TE Trbovlje, kljub temu pa je bilo v letu 2011 v prenosno omrežje oddano 8 % manj energije kot v letu 2010 (prejem energije iz tujine v letu 2011 je bil za 18 % nižji kot leto prej – sledenje cilju zmanjšanja energetske odvisnosti od tujine). Hidroelektrarne na reki Savi so v letu 2011 med vsemi HE v Sloveniji imele 14-odstotni delež, tj. 3,2 % celotne oddaje EE v

prenosno omrežje (brez prejema EE iz tujine). Največji delež med hidroelektrarnami pri oddaji v prenosno omrežje EE imajo HE na reki Dravi, tj. skoraj 75 %, pri čemer je reka Drava hidroenergetsko izkoriščena skoraj v celoti (97,8 %) (Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 2008), reka Sava pa le 23,7 % – delež izrabe hidroenergetskega potenciala v Sloveniji je le 47 %, cilj je povečati ta delež na 60 % do leta 2020.

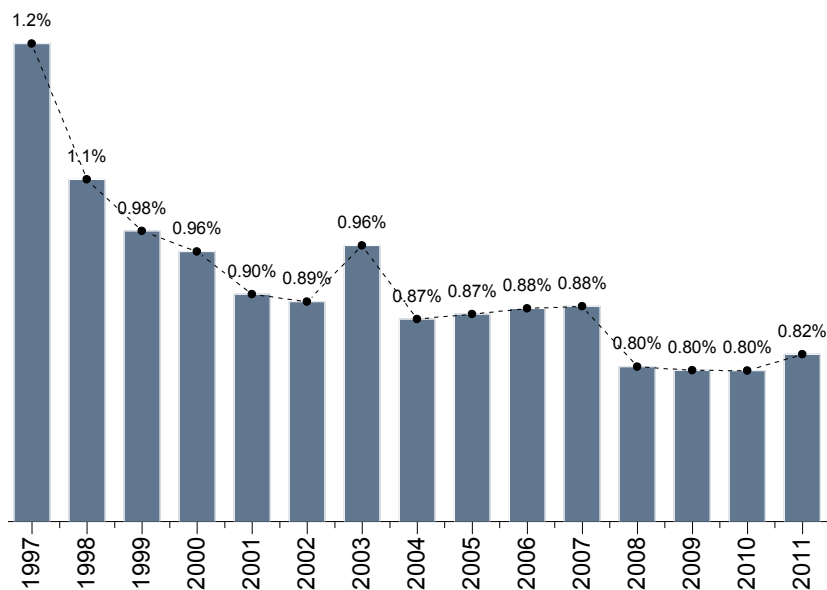
2.1.1 Vloga HE Vrhovo v elektroenergetskem sistemu

Hidroelektrarna Vrhovo ima inštalirano moč 3 x 14,3 MVA napetosti 6,3 kV in je prek transformatorja (45 MVA, 119/6,3 kV) priključena v 110 kV omrežje z vzankanjem. Moč na pragu je 34 MW, srednja letna proizvodnja pa znaša 116 GWh, kar predstavlja 26 % letne proizvodnje HE na Savi, 4 % letne proizvodnje vseh HE v Sloveniji oz. 1 % letne oddaje EE v prenosno omrežje v letu 2011.



Slika 3: Trend deleža HE v skupni proizvodnji električne energije v Sloveniji za obdobje 1994–2011
Figure 3: Hydropower contribution to total electrical energy produced in Slovenia for 1994–2011

HE Vrhovo deluje po principu pretočne akumulacije in ima vlogo čelne akumulacije v verigi HE, v večinski meri pa služi pokrivanju potreb znotraj variabilnega dela dnevnega diagrama porabe električne energije; po izgradnji celotne verige hidroelektrarn na Savi bo HE Vrhovo prevzela vlogo vmesne izravnalne akumulacije. Vključitev hidroenergetskega objekta v omrežje oz. EES poteka z vzankanjem v obstoječe 110 kV omrežje ali v nekaterih primerih z radialnim priključkom v obstoječo razdelilno transformatorsko postajo (RTP). Na tak način je HE Vrhovo (trije generatorji in en transformator) vpeta v 110 kV daljnovod od Brestanice do Trbovelj (Keršič, 2010).



Slika 4: Trend deleža HE Vrhovo v skupni proizvodnji električne energije v Sloveniji za obdobje 1997–2011
Figure 4: HPP Vrhovo contribution to total electrical energy produced in Slovenia for 1997–2011

Preglednica 3: Oddaja električne energije HE v prenosno omrežje
Table 3: Hydropower produced electrical energy distribution to the network

| leto | oddaja HE Vrhovo [GWh] | oddaja HE na Savi [GWh] | oddaja vseh HE [GWh] | celotna proizvodnja [GWh] | delež HE Vrhovo/HE na Savi | delež HE Vrhovo/HE v SVN | delež HE Vrhovo/celotna proizvodnja | delež HE/celotna proizvodnja |
|------|------------------------|-------------------------|----------------------|---------------------------|----------------------------|--------------------------|-------------------------------------|------------------------------|
| 1994 | 116 | - | 3129 | 9209 | - | 3,7% | 1,26% | 34% |
| 1995 | 116 | - | 2976 | 9112 | - | 3,9% | 1,27% | 33% |
| 1996 | 116 | - | 3355 | 9258 | - | 3,5% | 1,25% | 36% |
| 1997 | 116 | 257 | 2839 | 9439 | 45% | 4,1% | 1,23% | 30% |
| 1998 | 116 | 317 | 3145 | 11043 | 37% | 3,7% | 1,05% | 28% |
| 1999 | 116 | 324 | 3411 | 11808 | 36% | 3,4% | 0,98% | 29% |
| 2000 | 116 | 330 | 3513 | 12145 | 35% | 3,3% | 0,96% | 29% |
| 2001 | 116 | 354 | 3449 | 12901 | 33% | 3,4% | 0,90% | 27% |
| 2002 | 116 | 287 | 2991 | 13046 | 40% | 3,9% | 0,89% | 23% |
| 2003 | 116 | 220 | 2650 | 12045 | 53% | 4,4% | 0,96% | 22% |
| 2004 | 116 | 363 | 3603 | 13392 | 32% | 3,2% | 0,87% | 27% |
| 2005 | 116 | 280 | 3036 | 13289 | 41% | 3,8% | 0,87% | 23% |
| 2006 | 116 | 350 | 3120 | 13176 | 33% | 3,7% | 0,88% | 24% |
| 2007 | 116 | 347 | 2815 | 13132 | 33% | 4,1% | 0,88% | 21% |
| 2008 | 116 | 453 | 3511 | 14436 | 26% | 3,3% | 0,80% | 24% |
| 2009 | 116 | 546 | 4278 | 14517 | 21% | 2,7% | 0,80% | 29% |
| 2010 | 116 | 702 | 4249 | 14527 | 17% | 2,7% | 0,80% | 29% |
| 2011 | 116 | 455 | 3362 | 14143 | 25% | 3,5% | 0,82% | 24% |

3 KRATEK PREGLED LITERATURE NA PODROČJU VPLIVA PLAVIN NA UPRAVLJANJE Z VODOTOKI

3.1 Vpliv plavin na obratovanje hidroenergetskega objekta

Dinamika transporta plavin in območje odlaganja plavin v akumulacijah vplivata na obratovanje elektrarne ravno v tolikšni meri, kot vpliva obratovanje elektrarne na dinamiko transporta plavin in mesto odlaganja plavin v akumulacijah. Kot bomo pokazali v nadaljevanju naloge, lahko z ustreznim obratovanjem elektrarne dosežemo ugodnejše razmere v akumulaciji, tj. vsaj ohranjanje prostornine akumulacije in na primer zmanjšanje škodljivega vpliva plavin na delovanje strojne opreme. Neopane (2010) je preučeval vpliv rečnih plavin na dele turbinskih sklopov Francisove turbine z določitvijo relativne intenzitete erodiranja in kritičnih točk turbinskih komponent. Ugotovil je kritične točke na robovih lopatic, predvsem na mestih pojavljanja podtlakov in pa na sesalnem delu vodilnih lopatic. Proces erodiranja turbinskih komponent je odvisen od velikosti, oblike delcev plavin (asferični delci povzročajo večjo stopnjo erozije) in koncentracije plavin ter obratovalnih pogojev, pri čemer je pomembno, da turbine v primeru visokih koncentracij plavin obratujejo na minimalni učinkoviti stopnji ali pa se povsem zaustavijo.

Manipulacija z zapornicami na pregradnem objektu povzroča neposredne vplive na prodonosnost in kalnost; kot sta pokazala Ding in Wang (2012) pa je obratovanje z več zapornicami hkrati bolj ugodno kot z eno samo, saj se s tem ohranja večja stabilnost struge dolvodno. Med letoma 1922 in 1935 je bilo na reki Lower River Murray v Avstraliji (Walker et al., 1993) zgrajenih deset nizkih pregrad, prvotno za potrebe rečne plovbe, kasneje in še sedaj pa predvsem za ohranjanje ustrezne vodne gladine. Obratovanje z zapornicami je povzročilo stopničast padec struge zaradi izmenjujoče erozije in odlaganja plavin dolvodno. Locher in Wang (1995) sta uporabila 1-D model HEC-6 (USACE – US Army Corps of Engineers – inženirski oddelek ameriške vojske) za izdelavo krivulje obratovanja za potrebe minimiziranja odlaganja plavin v akumulaciji Cowlitz Falls, ZDA, in zmanjšanje vpliva na dolvodno ležeče območje Big Bottom, pri čemer je bil cilj ustvariti pogoje naravnega (pred izgradnjo pregrade) pretoka ob nastopu visokih voda in zmanjšanje odlaganja plavin ter zagotavljanje podatkov za vzpostavitev stalnega monitoringa plavin v akumulaciji po izgradnji pregradnega objekta.

3.2 Vpliv plavin na habitat

Pomemben del upravljanja z vodotoki je vzdrževanje ustreznega ekosistema, saj so najrazličnejši habitati odvisni med drugim tudi od stabilnosti struge. Na tem področju se je v preteklosti uporabilo veliko najrazličnejših metod za opredelitev stabilnosti struge in brežin. Schwendel et al. (2003)

razporejajo metode glede na glavne značilnosti stabilnosti struge v strižne napetosti, razporejenost plasti pod posteljico struge, erozijo in odlaganje, transport posteljice in obrus zaradi plavin. Strižna napetost, ki deluje na posteljico, igra pomembno vlogo v stabilnosti rečne struge. Bilotta et al. (2006) analizirajo vpliv lebdečih plavin na kakovost vode in na vodne organizme glede na koncentracijo in trajanje koncentracije lebdečih plavin ter glede na kemijsko in granulometrijsko sestavo delcev. Avtorji so preučevali tudi same smernice v zvezi z vplivom lebdečih plavin na kakovost vode. Lebdeče plavine naj bi temeljile na podatkih o motnosti skupaj z granulometrijsko sestavo in kemijskimi lastnostmi. Jones et al. (2012) so preučevali vpliv lebdečih plavin na makro nevretenčarje in ugotovil, da je smernicam treba dodati vpliv lebdečih delcev na kakovost vode. Visoke koncentracije lebdečih plavin so tudi škodljive za nekatere ribje vrste. Wilber et al. (2001) so tako ugotovili, da lahko smrt za nekatere vrste rib nastopi že pri koncentracijah, večjih od 55 mg/l, pri izpostavljenosti več kot en dan.

3.3 Modeliranje prodonosnosti – razvoj programske opreme

V splošnem se programska oprema za modeliranje premestitvene zmogljivosti v primeru toka s prosto gladino deli na matematične modele 1-D, 2-D in 3-D. Enodimenzionalni modeli so najbolj enostavni, zahtevajo tudi najmanj vhodnih podatkov, pri čemer je težav s stabilnostjo modela manj. Pomanjkljivost modela 1-D je v tem, da zajema in prikazuje rezultate samo po linijskem principu, v nasprotju z modeloma 2-D in 3-D, ki situacije zajemata in podajata rezultate v ploskovni oz. prostorski obliki. V splošnem velja, da je najboljši kompromis za modeliranje realnih razmer uporaba modela 2-D, ki je sicer nekoliko kompleksnejši, a zato po drugi strani toliko natančnejši od modela 1-D, hkrati pa ob minimalni izgubi natančnosti za vsakdanje vodarske probleme tudi hitrejši od modela 3-D. Prednosti modeliranja 3-D so ob trenutnih zmogljivostih strojne računalniške opreme samo v primeru strogo prostorsko omejenih analiz, kjer so območja obdelave manjša (npr. hidrodinamični modeli izpustov, prelivnih elementov pregrad, zaporničnih elementov in ostalih hidrotehničnih objektov). Na področju preučevanja prodonosnosti pa je prednost modelov 3-D predvsem v upoštevanju tretje, prostorske oz. vertikalne komponente, večja natančnost, vendar primerna le za manj obsežna območja obdelave. Pomembno je, da modeli implementirajo polne Saint-Venantove enačbe in upoštevajo pogoje nestalnega toka s prilagoditvijo lebdečih plavin ravnotežnim pogojem (Sloff, 1991).

V sklopu modelov za transport plavin je bil eden izmed prvih model HEC-6 (1-D). Leta 2008 je bil model nadgrajen in kot modul vgrajen v modelni paket (1-D) HEC-RAS (ob verziji 4.0). Modul za transport plavin sestavljata dva modula oz. dve metodi izračuna, in sicer metoda »Sediment Transport Analysis/Movable bed analysis« in metoda »Sediment Impact Assessment Model (SIAM)«. Prvi modul se uporablja za račun in dolgoročne napovedi trendov odnašanja in odlaganja plavin, kar se

kaže v spremembi korita struge, zastajanju plavin v akumulacijah itd. Po tej metodi model posodablja geometrijo prečnih profilov z izračunanimi trendi odnašanja ali odlaganja plavin in te spremembe upošteva v nadaljevanju izračuna (Geateh, 2010). Modul SIAM predstavlja prvi korak pri prepoznavanju problemov, povezanih s transportom plavin v vodotoku, in je običajno podlaga za nadaljnje detajlnejše modeliranje. Za razliko od modula »Sediment Transport Analysis«, ki računa spremembo morfologije korita (prečnih profilov), modul SIAM podaja zgolj bilančno oceno med vnosom plavin in premestitveno zmogljivostjo posameznega odseka vodotoka in kot rezultat poda potencialne lokacije, kjer bo v sistemu prišlo do odnašanja oz. odlaganja plavin. Modul SIAM ne računa končne spremembe morfologije korita vodotoka. Model je bil uporabljen in preverjen na številnih vodotokih po celem svetu. Hummel in Duan (2011) sta uporabila HEC-RAS 4.1 za simulacijo transporta plavin sušnih strug vodotokov v Arizoni, ZDA, in sicer na vodotokih Pantano Wash in Rincon Creek (pritok reke Tucson). Avtorja sta tudi primerjala metode za vrednotenje premestitvene zmogljivosti Ackers-White, Engelund-Hansen, Laursen, Toffaleti in Yang. Za potrebe sanacije obale v ameriški zvezni državi Louisiani (pomanjkanje plavin zaradi ukrepov pred poplavami) so avtorji Pereira et al. (2009) analizirali transport plavin in kot najustreznejšo metodo izbrali metodo Engelund-Hansen.

Na področju 2-D modeliranja premestitvene zmogljivosti je bera programske opreme sorazmerno skromna, še najbolj dodelana in preizkušena programska oprema na tem področju je model CCHE2D, ki je bil razvit na univerzi Mississippi v ZDA (National Center for Computational Hydroscience and Engineering, University of Mississippi). Model CCHE2D je globinsko-povprečen model 2-D za tok s prosto gladino, transport plavin, kakovost vode in ekologije v vodnih sistemih. V splošnem je paket sestavljen iz generatorja računske mreže in posebnega grafičnega okolja (Zhang, 2006). Model je postavljen v programsko okolje, ki podpira vse sodobne podlage GIS in CAD ter vse sodobne metodologije hidravličnih izračunov in transporta plavin; tudi zato je bil ta model v nadaljevanju izbran za simulacijo premestitvene zmogljivosti in posledično sprememb batimetrije v akumulaciji HE Vrhovo.

Mnogo študij je pokazalo uporabnost modela CCHE2D; He et al. (2009) so uporabili model za preučitev vpliva petih večjih lesenih konstrukcij (pragovi, jezbece) na tok, transport plavin, spremembo posteljice dna struge in ribjega okolja vodotoka Little Topashaw Creek v ameriški zvezni državi Mississippi. S pomočjo modela CCHE2D je bilo ugotovljeno, da imajo te konstrukcije pozitiven vpliv na določene vrste rib. Scott in Jia (2006) sta preučevala uporabnost modela za reševanje problematike transporta plavin na odseku reke Mississippi v dolžini 40 km. Kvazinstabilna simulacija toka s prosto gladino je bila uporabljena za dolgoročno napoved dogajanja v strugi. Ocena odlaganja oz. odnašanja plavin na mestu preliva na odseku Catfish point je bila podana za desetletno obdobje pretokov; zaradi tega se je preučeval tudi vpliv izgradnje sistema regulacijskih objektov

(jezbic) za stabilizacijo struge na zmanjšanje odnašanja plavin na odseku Redeye Crossing. Qamal in Baig (2012) sta vrednotila zmožnost modela za napoved morfoloških procesov v akumulaciji Tarbela na reki Ind v Pakistanu. Avtorja sta izvedla kalibracijo modela z izmerjenimi terenskimi podatki in ugotovila dobro ujemanje z uporabo nestalnega toka s prosto gladino v rečni strugi s kompleksno geometrijo z ostrimi meandri in širokimi poplavnimi ravnici.

V Sloveniji se model CCHE2D zaradi njegove široke dostopnosti (vmesne razvojne verzije programske opreme so na voljo brezplačno) vedno bolj uporablja za študijske namene, za praktične namene pa je bil model uporabljen za analizo 2-D morfoloških procesov v bodoči akumulaciji HE Brežice (Geateh, 2010) po izgradnji verige hidroelektrarn gorvodno (že zgrajene HE Vrhovo, HE Boštanj, HE Arto-Blanca in HE Krško). Na osnovi vzorcev v akumulaciji Vrhovo je bilo osnovanih več računskih vzorcev plavin (večinska zastopanost lebdečih plavin, saj je pretok grobozrnatih plavin z izgradnjo HE prekinjen), ki so bili ponovno umerjeni z dodatnimi odvzemi in presejki vzorcev, vzetih na mestih NE Krško, HE Boštanj in tudi deloma pri VP Hrastnik v času visokih voda v septembru 2010. Za potrebe preučevanja transporta plavin v akumulaciji HE Brežice je bila uporabljena metoda Wu-Wang-Jia (2000), pri čemer se je za potrebe umerjanja uporabljalo tudi analogije iz akumulacij dravskih elektrarn. Rezultati modeliranja so iz vrednotili reprezentativni vzorec plavin ter možne scenarije morfoloških procesov (nihanje volumna akumulacije, lokacije z intenzivnejšim odnašanjem oz. odlaganjem plavin, vpliv varovalnih objektov pred poplavami na batimetrijo) za reprezentativni vzorec za daljše časovno obdobje delovanja HE. Žal študija ni zmogla podati povsem natančnih in enoznačnih odgovorov, saj je bilo za potrebe te študije izvedenih premalo terenskih meritev oz. vhodnih podatkov.

3.4 Vzdrževanje poplavne varnosti in stabilnih razmer v akumulacijah

Različni ukrepi so bili predlagani za vzdrževanje oz. ponovno vzpostavitev stabilnih morfoloških razmer v akumulacijah. Ercan (2009) je preučeval obseg potencialne erozije brežin v odseku reke Sacramento v Kaliforniji (ZDA). Maksimalna stopnja erozije je bila ocenjena na 6 m/leto v primeru brez regulacijskih ukrepov in slabih 5 m/leto z vplivom izvedbe regulacijskih ukrepov, jezbic na konkavnem bregu reke, kar pomeni, da so se v tem primeru jezbece izkazale kot ustrezen ukrep proti spodjedanju brežin. Znotraj raziskave na reki Klarälven, mejni reki med Švedsko in Norveško (Dargahi, 2008), ki je v spodnjem toku razvejana na dve strugi, so bili opredeljeni ukrepi za povečanje sposobnosti transporta plavin zahodne struge – vzdrževanje gladine, jezbece, usmerjevalni zidovi oz. krila ter lokalna utrjevanja rečnega dna. Uporabljen je bil model CCHE2D, s čigar uporabo se je izkazalo, da so najprimernejši ukrep jezbece oz. usmerjevalni zidovi. Avtorji Duan et al. (2006) so razvili model 2-D, s katerim se je preučevalo vpliv jezbece na lebdeče plavine na sotočju rek Kankakee

in Iroquois v ameriški zvezni državi Illinois. Študija je ugotovila, da so kratki jezovi na sotočju rek zmanjšali koncentracijo usedanja plavin, v nasprotju z daljšimi jezovi, ki so zaradi zmanjšanja hitrosti vodnega toka posledično povečali koncentracijo usedanja lebdečih plavin. Študija upravljanja z jezovi v zgornjem toku reke Kizu na Japonskem (Sumi et al., 2001) se je poleg same tehnologije »uravnoveženja« bilance plavin osredotočila tudi na ekonomsko upravičenost posameznih tehnik upravljanja z naplavinami, izdelana je bila analiza stroškov in koristi, ki je pokazala, da je med tehnikami, ki so se izkazale za primerne, najbolj ugoden klasičen izkop (angl. *dredging*) naplavin; kot sam ali pa v kombinaciji s kontrolnim jezom/prodnim zadrževalnikom. Tehniki, ki sta ekonomsko manj ugodni, vendar pa sta bolj zanimivi v primeru večjih količin naplavin, sta plavljenje naplavin prek objektov jezu oz. hidroelektrarne ter izgradnja rečnega obvoza za potrebe plavljenja presežnih naplavin – primer na prodni pregradi Hrušica, kjer se prod odvzema, drobnejše frakcije pa se prek preusmeritvenega kanala spuščajo v akumulacijo HE Moste.

Iz literature izhaja skupni imenovalec, da je za potrebe vzdrževanja stabilnih razmer v akumulaciji najučinkovitejše odstranjevanje naplavin iz akumulacij, kjer razmere dovoljujejo, pa je najboljša, vendar ekonomsko nekoliko manj ugodna, kombinacija klasičnega izkopa naplavin in regulacijskih ukrepov z različnimi usmerjevalnimi hidrotehničnimi objekti.

4 ZGODOVINA NAJPOMEMBNEJŠIH RAZISKAV PRODNOSNOSTI IN ZAMULJEVANJA AKUMULACIJE HE VRHOVO

4.1 Namen izvedenih raziskav

Za potrebe načrtovanja izgradnje elektrarn na spodnji Savi so se v obdobju 1968–1990 izvajale različne študije in analize, ki so na podlagi terenskih meritev in hidroloških podatkov poskušale prikazati morfološke lastnosti struge spodnje Save in prodne bilance pred izgradnjo HE na spodnjesavski verigi (HE Vrhovo) in po njej. Najzgodnejše študije so se posluževale računa prodnosnosti z uporabo različnih metod (npr. enačba premestitvene zmogljivosti Meyer-Peter-Müller – MPM), kasneje, z razvojem strojne in programske opreme, pa z enodimenzionalnimi modeli (1-D). Po izgradnji HE Vrhovo, ki je časovno delno sovpadala z osamosvojitvijo Republike Slovenije, so raziskave prodnosnosti in kalnosti v večini zamrle, na določene časovne intervale se izvajajo le še izmere posameznih akumulacij (HE Vrhovo od leta 1995 naprej), ki so v pristojnosti upravljavcev HE, in nekaj manj obsežnih raziskav. Z nadaljevanjem izgradnje spodnjesavske verige HE pa se tudi stanje na tem področju počasi izboljšuje.

4.1.1 Prodnosnost reke Save in pritokov (Colarič, 1968)

Treba je poudariti, da se je v preteklosti v strokovni terminologiji izenačevalo prodnosnost (dejanski pretok) in izračun premestitvene zmogljivosti, kar sicer ni problem, če gre za pogoje zasičenega vodnega toka, tj. da je na voljo dovolj rinjenih plavin.

V letu 1968 je Vodogradbeni laboratorij v Ljubljani izdelal elaborat, ki vsebuje kronološki pregled značilnosti rečnih plavin (predvsem proda) in metodologijo računa premestitvene zmogljivosti reke Save in njenih pritokov.

Kronologija meritev:

Prve meritve prodnosnosti Save so se začele leta 1949 (Vodogradbeni laboratorij Ljubljana) z uporabo prvega prodnega merilca (Karoly), z določenimi modifikacijami pa so se redne meritve prodnosnosti začele izvajati po letu 1953 za potrebe na novo zgrajene HE Medvode in prodne pregrade Javornik. *Za analizo letne prodnosnosti slovenskega dela reke Save so se do leta 1964 izvrševale meritve na profilih Šentjakob, Radeče in Krško* (za analizo prodnosnosti slovenskega dela reke Save so pomembne tudi meritve v letu 1964 na območju merskega profila Zagreb).

Značilnosti rečnega proda:

Odvzem ustreznih vzorcev na odseku reke Save od Mojstrane do Rugvice (pri Zagrebu) se je ob nizkem vodostaju izvedel/izvajal z izvedbo sondažnih izkopov, tlorisne površine 1 m², globine 30–40 cm, z odstranjenimi krovno plastjo na značilnih prodiščih. Sledil je odvzem vzorca iz spodnje plasti, na vsakem mestu po 25 kg. Izogibalo se je izpostavljenim gorvodnim delom prodišča, ki so vsebovali le groba zrna, in v nasprotju s tem tudi izpostavljenim dolvodnim delom prodišča, ki so vsebovali le bolj fine frakcije. Nekatera prodišča s svojo morfologijo kažejo na povečano turbulenco vodnega toka ali lokalno večji padec, kar ima za posledico intenzivnejše izpiranje finih frakcij (profil Radeče, Mrtvice in Čatež). Na vsakem prodišču je bilo v povprečju odvzetih pet vzorcev. Presejna krivulja vzorcev je bila izvedena z uporabo standardnih sit od 0,23 do 60 mm v suhem stanju.

Za profila Mrtvice in Čatež so bili na voljo samo vzorci na enem prodišču, granulometrijska sestava tega vzorca pa kaže preveliko tendenco h grobim frakcijam, kar se lahko pripiše lokalni spremembi padca in povečani turbulenci vodnega toka, kar posledično povzroči večje izpiranje frakcij. Tako je situacija najbolj jasna v primeru profila Radeče (cona akumulacije Vrhovo) – v letih 1949, 1958 in 1968 je bilo odvzetih 15 vzorcev, skupne teže 300 kg, na dveh prodiščih. Srednje zrno (d_m) je 30,9 mm, $d_{50} = 24$ mm, $d_{90} = 72,5$ mm, sestava tako kaže na pomanjkanje frakcij med 2 in 15 mm. Srednje zrno izhaja iz povprečja obeh prodišč (dolvodno prodišče kaže na prevlado velikih frakcij).

Račun premestitvene zmogljivosti:

Ugotavljanje količine transportiranega proda (prodonosnosti) je temeljilo na ocenah premestitvene zmogljivosti za posamezne (karakteristične) profile, na podlagi geodetskih podatkov nekaterih akumulacij in na podlagi neposrednih meritev prodonosnosti.

Račun premestitvene zmogljivosti se je izvajal s pomočjo enačbe MPM (Meyer-Peter-Müller, 1949). Izbira te metode je bila potrjena z neposrednimi meritvami v profilu Šentjakob med letoma 1952 in 1958. Hidravlični račun letne prodonosnosti se je izvajal na podlagi srednjega hidrološkega leta 1958.

Stopnje letne prodonosnosti (G) za posamezne merske profile:

- Sava pri Jesenicah – 20.500 m³ (mejno zrno po Kresserju je 4,5 mm), $Q_0 = 9$ m³/s,
- Sava pri Kranju – 28.450 m³, $Q_0 = 75$ m³/s,
- Sava Šentjakob – 40.300 m³, $Q_0 = 72$ m³/s,
- Savinja, profil Veliko Širje – 25.830 m³, $Q_0 = 55$ m³/s,
- **Sava pri Radečah – 61.500 m³, $Q_0 = 200$ m³/s,**
- Sava pri Zagrebu – 63.300 m³, Q_0 – ni podatka.

Raziskovalna študija se opira na razpoložljivi material, dobljen iz meritev, opazovanj in odvzemov vzorcev plavin na terenu. Zanesljivost teh podatkov se spreminja od primera do primera. Rezultati meritev in analiz kažejo, da ima reka Sava od Mojstrane do Zagreba aritmetično srednje zrno (d_m) velikosti med 22 in 30 mm.

4.1.2 Letne količine proda Save (Krško), Savinje (Laško) in Sopote (Žebnik) (Šetina, 1982)

Za potrebe HE Vrhovo je bilo treba določiti prodonosnost Save nad Zidanim Mostom ter Savinje in Sopote pred izlivom v Savo na podlagi razpoložljivih podatkov o direktnih meritvah prodonosnosti v Krškem in hidroloških podatkov za Radeče, Krško, Sopoto in VP Žebnik.

SAVA PRI KRŠKEM:

Leta 1975 so se izvajale direktne meritve prodonosnosti pri Krškem – odvisnost profilne prodonosnosti od pretoka je naslednja:

$$Q_0 = 230 \text{ m}^3/\text{s} \text{ (profil Radeče)}$$

za:

$$230 < Q < 1000 \text{ m}^3/\text{s} \rightarrow G_v = \left(\frac{Q - 230}{109} \right)^{2,25} \quad (1)$$

$$Q > 1000 \text{ m}^3/\text{s} \rightarrow G_v = \left(\frac{Q}{100} \right)^{1,91} \dots [t/s] \quad (2)$$

Pretoki v Radečah in Krškem so v razmerju

$$Q_{Krško} = 1,058 Q_{Radeče} \quad (3)$$

Iz predhodno podane odvisnosti in iz odvisnosti $G = f(Q)$ so se za profil Krško izračunali dnevni pretoki proda (plavin) za obdobje 1926–1978.

Spreminjanje letne prodonosnosti (Krško – Sava):

Za obdobje 1926–1978 je povprečna letna prodonosnost 61.600 m^3 ; pri tem se lahko izvzame zelo mokro leto 1926, zaradi tega je povprečna letna količina proda cca 59.000 m^3 . Če se znotraj tega

obdobja upošteva le obdobje med letoma 1960 in 1972 (za to obdobje so primerljivi podatki za Sopot), potem je letna količina proda 77.800 m^3 .

Iz meritev prodonosnosti sledi:

- največja letna prodonosnost znaša 210.000 m^3 (zelo mokro leto 1926),
- prodonosnost, ki je vsaj dvakrat večja od dolgoletnega povprečja, se je v tem obdobju pojavila šestkrat,
- prodonosnost, ki znaša polovico povprečne prodonosnosti (ali manj), se je v tem obdobju pojavila 12-krat,
- najmanjša letna količina se je pojavila leta 1946 – 2.500 m^3 , kar je 4 % povprečne letne količine,
- najvišja dnevna prodonosnost v vsem obdobju je znašala 24.000 m^3 , kar znaša 40 % povprečne količine proda, transportiranega skozi profil v enem letu, in 10-krat letni minimum (2.500 m^3 leta 1946),
- največje dnevne prodonosnosti se gibljejo okoli 8.000 m^3 .

SAVINJA PRI LAŠKEM:

Dnevni, mesečni in letni pretok proda:

Iz Colarič (1968) je bila računsko določena odvisnost $G = f(Q)$. $Q_0 = 58 \text{ m}^3/\text{s}$. Odvisnost količine proda od pretoka je bila podana s štirimi enačbami (v [t/dan]):

$$58 < Q < 75 \text{ m}^3/\text{s} \rightarrow G = 2,2 \left(\frac{Q}{58}\right)^{8,5} - 2,2 \quad (4)$$

$$75 < Q < 105 \text{ m}^3/\text{s} \rightarrow G = 17,5 \left(\frac{Q}{75}\right)^{5,33} \quad (5)$$

$$105 < Q < 196 \text{ m}^3/\text{s} \rightarrow G = 105 \left(\frac{Q}{105}\right)^{3,78} \quad (6)$$

$$196 < Q \rightarrow G = 1110 \left(\frac{Q}{196}\right)^{2,66} \quad (7)$$

Iz dnevnih pretokov za Laško in predhodnih enačb je bil izračunan pretok proda za obdobje 1926–1978 (brez 1973) za vsak dan ter mesečne in letne vsote.

Spreminjanje letne prodonosnosti (Laško – Savinja):

Za obdobje 1926–1973 je povprečna ocena letne prodonosnosti 24.500 m^3 proda; pri tem se lahko izvzame zelo mokro leto 1926, zaradi tega je povprečna ocena letne prodonosnosti (do leta 1978) 22.400 m^3 . Če se znotraj tega obdobja upošteva le obdobje med letoma 1960 in 1972 (za to obdobje so primerljivi podatki za Sopoto), potem je ocena letne prodonosnosti 24.400 m^3 .

Iz meritev prodonosnosti sledi:

- največja ocena letne prodonosnosti je bila podobno kot pri reki Savi v letu 1926, in sicer 131.400 m^3 ,
- količina, ki je vsaj dvakrat večja od povprečne letne količine v tem obdobju (49.500 m^3), se je pojavila štirikrat,
- količina, ki je manjša kot polovica povprečne ocene letne prodonosnosti (pod $12.000 \text{ m}^3/\text{leto}$), se je v obravnavanem obdobju pojavila 18-krat,
- najmanjša ocena letne prodonosnosti v obdobju je 217 m^3 (1945), kar je 0,8 % povprečne ocene letne prodonosnosti,
- največja ocena letne prodonosnosti v obravnavanem obdobju je znašala 64.000 m^3 , kar je 2,6-krat povprečne ocene letne prodonosnosti.

VP ŽEBNIK (SOPOTA):

Za Sopoto so bili razpoložljivi podatki za obdobje 1960–1972 (brez leta 1961). $Q_0 = 1,5 \text{ m}^3/\text{s}$.

Profilna prodonosnost se je določila po enačbi Bogardija [t/dan]:

$$G = 0,01 \left(\frac{Q}{1,5} \right)^{2,89} 86,4b \quad (8)$$

b – širina prodonosnega pasu, ki znaša:

Preglednica 4: Širina prodonosnega pasu v odvisnosti od pretoka
Table 4: Bedload transport zone width in relation to flow

| Pretok [m^3/s] | Širina b [m] |
|----------------------------------|----------------|
| 1,5 | 1 |
| 2 | 3 |
| 3 | 4 |
| > 4 | 5 |

Spreminjanje letne količine proda (VP Žebnik – Sopota):

V obdobju 1960 do 1972 (brez 1961) je letna prodonosnost Sopote 60.000 m^3 ($5.000 \text{ m}^3/\text{leto}$).

Iz meritev prodonosnosti sledi:

- največja ocena letne prodonosnosti je bila leta 1972 – 11.100 m^3 ,
- ocena letne prodonosnosti, ki je vsaj dvakrat večja od povprečne ocene letne količine (10.000 m^3), je v obravnavanem obdobju nastopila dvakrat,
- ocena letne prodonosnosti, manjša kot 50 % ocene letne prodonosnosti (2.500 m^3), se je pojavila štirikrat,
- najmanjša ocena letne prodonosnosti v tem obdobju znaša 973 m^3 .

DOLOČITEV PRODONOSNOSTI SAVE – ZIDANI MOST:

Ocena povprečne letne prodonosnosti za obdobje 1960–1972 (brez 1961):

- Sava Krško – 77.800 m^3 (v Krškem je v obdobju 1926–1978 ocena letne prodonosnosti 80 % ocenjene prodonosnosti v obdobju 1960–1972),
- Savinja Laško – 24.400 m^3 ,
- Sopota – 5.000 m^3 .

Na profilu Zidanega Mosta se torej zadrži $(77.800 - 5.000 - 24.400) \text{ m}^3 = 48.400 \text{ m}^3$ proda.

Iz splošne analize prodonosnosti Savinje do Celja je izhajalo, da je transportna zmogljivost Savinje večja, kot je dotok proda iz gorvodnega odseka. Savinja nad Celjem ima delno zasičen vodni tok, razlike med premestitveno zmogljivostjo in prodonosnostjo pa ne more več erodirati v svojem dnu ali na brežinah, zato pričakujemo zmanjševanje količine proda v Savinji tudi pod Laškim. Na podlagi tega sledi ocena o letnih količinah proda (80 % vrednosti iz obdobja 1960–1972):

- Sava Krško – 62.000 m^3 ,
- Savinja Laško – 20.000 m^3 ,
- Sopota – 4.000 m^3 ,
- Sava Zidani Most – 38.000 m^3 .

4.1.3 Ocena dviga dna in gladine v akumulaciji jezera HE Vrhovo (Colarič, 1985)

HE Vrhovo je prva akumulacija na spodnjiesavski verigi v rečnem km 778,000 z zaježitvijo gladine na absolutni koti 191,0 m. Jez v celoti prekine prodonosnost Save, tudi prod, ki ga Savinja prinese s seboj v Savo. Prodonosnost Sopote, ki je največji pritok v akumulacijo Vrhovo, se je prekinila po izgradnji prodnega zadrževalnika gorvodno od papirnice Radeče. Velike površine profilov akumulacije HE Vrhovo omogočajo delno usedanje kalnosti.

Cilja raziskave:

- Zajezne gladine pri Q_{100} za stanje dna po 20 letih (brez bagranja) – prvi račun.
- Določitev zmanjšane dviga dna gorvodnega dela akumulacije HE Vrhovo (predviden odvzem proda pred Litijo (Zg. Hotič) in račun gladin pri Q_{100} po 20 letih).

Najpomembnejše značilnosti prodonosnosti za reko Savo v VP Radeče:

- $Q_{sr} = 233 \text{ m}^3/\text{s}$,
- $Q_0 = 230 \text{ m}^3/\text{s}$,
- $Q_{100} = 3.100 \text{ m}^3/\text{s}$,
- G (letna prodonosnost Save v profilu VP Radeče) = $66.000 \text{ m}^3/\text{leto}$,
- število prodonosnih dni v letu ($Q > Q_0$) = 140,
- merodajni prodonosni pretok vode $Q_m = 570 \text{ m}^3/\text{s}$,
- letna kalnost skozi profil VP Radeče = $1.050.000 \text{ t/leto}$,
- povprečna koncentracija lebdečih plavin za VP Radeče (c_{sr}) = 150 g/m^3 ,
- maksimalna koncentracija lebdečih plavin (merjeno) (c_{max}) = 270 g/m^3 ,
- značilnosti zrnivosti plavin:
 - $d_{90} = 73 \text{ mm}$,
 - $d_m = 31 \text{ mm}$,
 - $d_{50} = 24 \text{ mm}$.

Kot najustreznejši način za doseg ciljev naloge se je izkazala t. i. primerjalna metoda, kjer se izhaja iz podatkov za akumulacije na reki Dravi – analizira se zmanjšanje začetne prostornine V_0 [m^3], nato pa sledi podrobna analiza zmanjšanja površine posameznih prečnih profilov S_0 [m^2] znotraj akumulacij, in sicer za HE Dravograd, Vuzenica in Fala na Dravi ter HE Medvode na Savi.

V smislu morfologije akumulacije je akumulaciji Vrhovo še najbolj podobna akumulacija Dravograd, razlika med njima pa je v prodonosnosti, saj je HE Dravograd z dvema gorvodno ležečima

akumulacijama popolnoma zaščitena pred dotokom rinjenih plavin (proda) za razliko od HE Vrhovo, kjer se je še pred samo izgradnjo HE Vrhovo poleg proda zaradi akumulacije pojavljala povečana kalnost zaradi delovanja zasavskih rudnikov (organske snovi – premog). Sodobne čistilne naprave in implementacija okoljske regulative so zmanjšale izpuste v reke in s tem tudi kalnost zaradi organskih snovi na minimum.

Od primerjalnih akumulacij sta razmeram v drugi polovici (južno od dotoka Sopote v Savo do jezua Vrhovo) še najbolj podobni HE Medvode in HE Dravograd. Obe kažeta približno enako stopnjo zmanjševanja prostornine akumulacije, in sicer za 25 % v 20 letih, kar lahko privzamemo za globalno oceno razmer v akumulaciji HE Vrhovo.

Za natančnejšo oceno morfoloških procesov v akumulaciji HE Vrhovo je potrebna analiza spremembe površine prečnih profilov v času meritev – za te potrebe je treba jezero razdeliti na dva dela, na gorvodni del, kjer se odlagajo frakcije plavin od $d = 1$ mm do d_{\max} (prod), in na dolvodni del (blatna cona), kjer se odlagajo lebdeče plavine zaradi manjših profilnih hitrosti vode. V tej fazi je smiselna uporaba analize morfoloških procesov na HE Dravograd (po 23 letih) – prodna cona je skoraj prazna, za usedanje lebdečih plavin pa ni hidravličnih pogojev (srednje profilne hitrosti ne padejo pod 0,5 m/s, kar je pogoj za začetek usedanja lebdečih plavin). Blatna cona je dolga 6,5 km, površina tlorisa cone pa se giblje med 500 in 1.500 m², kar predstavlja enake hidravlične razmere, kot naj bi nastopile v blatni coni HE Vrhovo.

Analiza prodne in blatne cone HE Vrhovo

Lokacija grobozrnatih plavin (prod) se določi prek korena zajezebe pri pretokih $Q_0 = 230$ m³/s in $Q_1 = 1.400$ m³/s (vsakoletna visoka voda), in sicer na stacionaži km 766,350 za čas 20 let po izgradnji. Na podlagi letne prodonosti Save v Radečah je prostornina prodnega zaplavka po 20 letih ocenjena na 1.320.000 m³.

Na podlagi modelnih raziskav se položaj/mesto prodnih plavin oceni na naslednji način – če se označi dolžino prodnih plavin z L , potem se $2/3 L$ nahaja gorvodno od korena zajezebe in $1/3 L$ dolvodno od korena zajezebe. Dvig dna na meji med prodno in blatno cono pri vtoku Savinje v Savo se določi s pomočjo enačbe, s katero se oceni hitrost, pri kateri se začne premik srednjega zrna plavin:

$$v_0 = 0,30 \times d_m^{0,45} \quad (9)$$

kjer je d_m = srednje zrno [mm], v_0 je hitrost, pri kateri se začne premik srednjega zrna [m/s].

Za račun dviga dna v blatni coni so izhajali iz analiz akumulacije HE Dravograd. Za oceno dviga dna v blatni coni (od pregrade HE Vrhovo do meje med blatno in prodno cono) so uporabili izraz:

$$\Delta S\% = 10 \frac{(S_0 - 500)}{500} \quad (10)$$

kjer je S_0 = površina prečnega profila v času izgradnje akumulacije na absolutni koti gladine 191,0 m.

Za potrebe analize podatkov o zablatenju akumulacije se vpeljeta nova izraza:

- koncentracija usedanja c_u (kg/m^3), ki je del koncentracije lebdečih plavin, ki se usedajo, in se določi/izračuna kot razmerje med prostornino zaplavlka (V_z) in celotno količino vode, ki je v pripadajočem času pretekla skozi akumulacijo,
- koncentracija izpiranja blatnih plavin c_i (kg/m^3), ki predstavlja razmerje med prostornino odplavljenega blata (V_i) in pripadajočo količino vode, ki je v tem času pretekla skozi akumulacijo.

Analiza HE Dravograd (obdobje 1943–1961) kot analogija HE Vrhovo:

$$V_z = 1.900.000 \text{ m}^3 = 2,28 \cdot 10^9 \text{ kg blata}$$

$$V = 1,5 \cdot 10^{11} \text{ m}^3 \text{ vode}$$

$$c_u = 0,015 \text{ kg}/\text{m}^3$$

Na osnovi izračuna za HE Dravograd se oceni koncentracija usedanja lebdečih plavin za akumulacijo HE Vrhovo na $c_u = 0,014 \text{ kg}/\text{m}^3$. Na podlagi tega sledi prostornina odloženega blata v prvih 10 letih – $V_z = 856.000 \text{ m}^3$. V prodni coni se v prvih 10 letih odloži 660.000 m^3 proda, torej znaša skupni zaplavek $1.516.000 \text{ m}^3$ oz. 18 % prvotne prostornine akumulacije. Na podlagi analogije z dravsko verigo HE sledi, da koncentracija usedanja skozi leta stalno pada; tako sledi, da je c_u v naslednjih 10 letih samo še $0,0015 \text{ kg}/\text{m}^3$. Pričakovana količina blata je tako 950.000 m^3 , skupni zaplavek pa $2.270.000 \text{ m}^3$ oz. 26 % začetne prostornine.

H končni oceni količine prodnega in blatnega zaplavka je treba dodati:

- kalnost je bila merjena v VP Radeče, vrednosti pa bi lahko bile prenizke, saj so bili odvzeti vzorci le tik pod gladino,
- upoštevanih je bilo 20 srednjih hidroloških let, kar je manj ugodno, saj se bo v času 20 zaporednih let gotovo pojavila konica s pretokom več kot $1.600 \text{ m}^3/\text{s}$, ki bo povzročila vsaj delno izplakovanje blatnega zaplavka.

Treba je izvesti račun zaplavlkov za 20 različnih (zaporednih) hidroloških let, zato pa je poleg koeficienta usedanja lebdečih plavin potreben tudi koeficient koncentracije izpiranja c_i . Izhajali so iz podatkov za akumulacijo HE Fala na reki Dravi za leti 1926 in 1935. Za obe leti sledita koeficienta koncentracije izpiranja (leto 1926 je bilo zelo mokro leto), in sicer $0,070 \text{ kg/m}^3$ za leto 1926 oz. $0,058 \text{ kg/m}^3$ za leto 1935.

S pomočjo podatkov o izpiranju za HE Fala in podatkov o usedanju (izhajajoč iz podatkov HE Dravograd) so izračunali količine odloženih oz. izpranih naplavin v blatni coni HE Vrhovo z uporabo dnevnih pretokov v obdobju 1956–1975.

Račun gladin pri Q_{100} so opravili po dveh različicah:

- $Q_{100} = 3.057 \text{ m}^3/\text{s}$ za primer zmanjšane prodonosnosti in zablatenja po 20 letih; v profilu Radeče pride do dviga gladine za 0,9 m,
- ob upoštevanju zmanjšane prodonosnosti in delno izprane blatne cone (izprano 450.000 m^3 blata) pride do dodatnega dviga gladine za 0,35 m.

4.1.4 Študija zajezenega odseka struge Sopote zaradi akumulacije HE Vrhovo (Ciuha, 1992)

Glavni cilj naloge je bil ugotoviti posledice in predlagati ustrezne ukrepe za odpravo posledic v zajezenem odseku reke Sopote zaradi zajeze po izgradnji HE Vrhovo.

Po izgradnji HE Vrhovo sega zajeza Sopote v samo mesto Radeče, pri čemer se zaradi zmanjšanja hitrosti v posameznih profilih poveča nevarnost usedanja plavin in s tem dviganja dna struge; to pa predstavlja večjo nevarnost za nastanek katastrofalno visokih voda. V izogib tej nevarnosti sta predvidena dva ukrepa – izgradnja zadrževalnika plavin za zadrževanje proda in suspenzij (nad papirnico) ter ustrezen režim manipulacije prelivnih polj HE Vrhovo (denivelacija gladine akumulacije). Ocena letne prodonosnosti Sopote je $5.000 \text{ m}^3/\text{leto}$, količine lebdečih plavin niso znane.

Cilji:

- Analiza različnih variant oblikovanja struge iztočnega odseka Sopote glede na nevarnost usedanja suspenzij in možnost njihovega ponovnega izpiranja.
- Določiti obratovalni režim HE Vrhovo, da je stopnja usedanja na obravnavanem odseku minimalna.

- Določiti robne pogoje (koncentracije in granulacijski sestav suspenzij) v zajezeni odsek Sopot, tako da pri danih pogojih ne pride so usedanja (podlaga za dimenzioniranje zadrževalnika plavin).

Matematični model obsega zajezeni odsek Sopot v dolžini cca 400 m od izliva v Savo (1-D), kjer so profilne hitrosti dovolj nizke, da je potencialna nevarnost usedanja suspendiranih plavin. Za model se predpostavi, da je enodimenzijski (1-D) s prosto gladino, sestavljen iz dveh odsekov, katerih ločnica je most; poleg tega pa je predpostavljena možnost denivelacije gladine v akumulaciji HE Vrhovo.

Za določitev gladine v akumulaciji HE Vrhovo, ki zajezuje vodo v zajezenem odseku Sopot, je prevzet naslednji način obratovanja – do pretoka $Q_{10} = 66 \text{ m}^3/\text{s}$ za Sopot je gladina v akumulaciji na območju izliva Sopot 192,68 m, pri pretokih, ki so večji od Q_{10} , pa se začne denivelacija gladin tako, da doseže gladina pri pretoku v Sopot $Q_{100} = 125 \text{ m}^3/\text{s}$ absolutno koto 191,20 m.

Analiza usedanja v območju modela 1-D

Analiza najpogostejših pretokov ($< 5 \text{ m}^3/\text{s}$) kaže, da je voda pri teh pretokih skoraj čista, saj so hitrosti tako nizke, da je usedanje prisotno. V primerih, ko ti pretoki niso že naravno čisti, je treba to doseči z zadrževalnikom, z najpomembnejšim kriterijem, da je srednja profilna hitrost v zadrževalniku nižja od tiste v strugi. Okvirni presek zadrževalnika znaša 60 m^2 . Dimenzije plavljenega zrna se gibljejo od 10^{-6} m (pri pretoku $5 \text{ m}^3/\text{s}$) do $0,003 \text{ m}$ (pri pretoku $125 \text{ m}^3/\text{s}$). Analize usedanja kažejo, da bo pri malih pretokih pod $5 \text{ m}^3/\text{s}$ prišlo do usedanja na zajezenem odseku Sopot, če obstaja transport suspenzij pri teh pretokih; pri večjih pretokih, kjer prihaja do dejanskega transporta suspenzij zaradi večjih hitrosti, pa je verjetnost usedanja minimalna.

4.1.5 Raziskava problematike v zvezi s transportom (zastajanjem in izpiranjem) proda in suspenzij na odseku Save med Zidanim Mostom in hrvaško mejo, med izgradnjo verige HE in po njej (Čehovin, 1990)

V raziskavi je bila podana prognoza usedanja suspenzij in zastajanja proda v bodočih akumulacijah na Savi med Zidanim Mostom in hrvaško mejo, kakor tudi vpliv morfoloških sprememb na potek gladin. Osnovni, enodimenzijski matematični model je bil sicer izdelan leta 1987, vendar je bil leto kasneje dodelan z možnostjo obravnave večjega števila akumulacij in pritokov.

Z raziskavo se je izdelala prognoza spremembe stanja struge, in sicer :

- prognoza stanja dna in gladin po 20 letih,

- časovni potek zasipanja posameznih akumulacij (brez umetnega izpiranja in z izpiranjem akumulacij),
- učinkovitost izpiranja akumulacij in posledice tega na zasipanja nizvodnih akumulacij,
- prognoza erozije nizvodno od pregrade pred izgradnjo spodnjih stopenj,
- določitev lokacij povečanega odlaganja plavin gorvodno od stopenj,
- časovna prognoza razmer v iztočnem profilu na meji s Hrvaško.

Granulometrijska sestava naplavin kaže, da je večina usedlih naplavin velikosti med 0,1 in 0,5 mm. Profilne meritve so bile izvedene za pretoke, nižje od 200 m³/s, kar zadostuje samo za oceno koncentracij pri nižjih pretokih. Pri večjih pretokih se meritve niso izvajale, zato so se v matematičnem modelu upoštevali ekstrapolirani podatki.

Glavni zaključki modela 1-D:

- Izvedene meritve pretoka lebdečih plavin in njihova kemijska analiza so pokazale na njihovo kritično stanje, tako po količini in še bolj po kemični onesnaženosti.
- Rezultati modela so pokazali, da je prva akumulacija HE Vrhovo najbolj obremenjena s posledicami zmanjšanja transportne zmogljivosti reke Save. Rešitev predstavljajo občasna izpiranja akumulacije, kar pa ima negativne ekološke posledice v obliki povečanih koncentracij na iztoku iz izpirane akumulacije oziroma na meji s Hrvaško.
- Dvig gladin zaradi dviga dna je znatno v akumulaciji HE Vrhovo.
- Prva v verigi akumulacij, HE Vrhovo, vpliva na zmanjšanje srednjih letnih koncentracij na iztoku, tako brez izpiranja kakor tudi z izpiranjem akumulacij. Ta vpliv se z leti zmanjšuje. Zmanjšanje maksimalnih koncentracij je znatno samo v prvih letih obratovanja brez izpiranja akumulacij. Pri izpiranju akumulacij vpliva na zmanjšanje koncentracij skoraj ni, temveč se maksimalne koncentracije na iztoku celo povečujejo.

4.2 Skupni imenovalci rezultatov raziskav

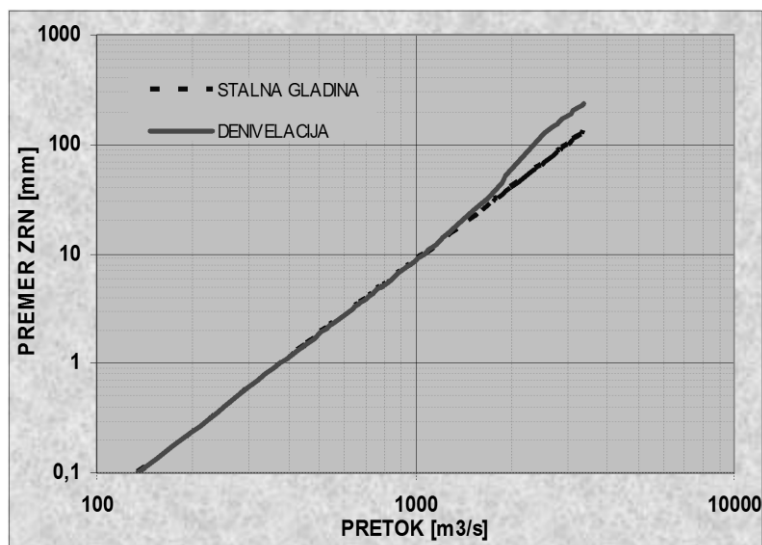
Izhajajoč iz literature in raziskav ter analiz prodonosnosti reke Save, ki so se izvajale v največji meri pred dejansko izgradnjo pregradnega objekta HE Vrhovo, smo lahko za osnovno razumevanje procesov dinamike plavin v akumulaciji podali določena izhodišča, kot sledi v nadaljevanju. Dejanske razmere v akumulaciji so se izkazale za nekoliko drugačne od napovedi pred samo izgradnjo HE Vrhovo, zato je tudi potrebna novelacija analize morfoloških procesov glede na terenske meritve in hidrološke razmere v obdobju po letu 1993. Izgradnja HE Vrhovo je kot ovira v vodnem toku povzročila spremembe v hidravličnih in hidroloških razmerah. Gladina reke se je dvignila, povprečne

hitrosti vodnega toka so se posledično zmanjšale, kar je imelo za posledico morfološko delitev v akumulaciji HE Vrhovo na prodno in blatno cono.

- **Prodna cona** se začne takoj dolvodno od sotočja Savinje in Save pri Zidanem Mostu in se konča približno 500 m dolvodno od VP Radeče, pri sotočju z reko Sopot. Zaradi zmanjšanih hitrosti vodnega toka je tudi transportna sposobnost manjša, kar pomeni, da se večje frakcije pojavljajo pretežno na gorvodnem odseku akumulacije. Na tem področju prevladujejo frakcije proda od $d = 1\text{ mm}$ do d_{max} , srednje zrno d_m pa je dolvodno v upadanju. Prod prispe v akumulacijo s premeščanjem po rečnem dnu.
- **Blatna cona** se začne s koncem prodne cone in se konča pri pregradnem objektu. Tu prevladujejo frakcije velikosti $d \leq 1\text{ mm}$, ki se znotraj akumulacije premeščajo v lebdečem stanju in po odložitvi na dno oblikujejo izmenjevalno plast dna zaradi zmanjšane povprečne hitrosti vode v akumulaciji.

Razmejitev med prodno in blatno cono je v primeru nižinskih vodotokov v splošnem vedno dokaj jasno opredeljena. Upadanje velikosti srednjega zrna d_m vzdolž akumulacije je neposredno odvisno od velikosti mejne hitrosti, pri kateri pride do transporta srednjega zrna d_m v profilu znotraj akumulacije (enačba 9). Na osnovi enačbe 9 je možno določiti, kolikšna je premestitvena zmogljivost za rinjene plavine v izbranem profilu v akumulaciji pri različnih pretokih Save. Na sliki 5 so prikazane preračunane vrednosti srednjih zrn proda v odvisnosti od pretoka Save v srednjem profilu v blatni coni in z upoštevanjem stalne gladine v akumulaciji ter denivelacije gladine, skladno z režimom obratovanja na pregradi (Kryžanowski, 2009).

Premestitvena zmogljivost zajezone reke Save na HE Vrhovo pokaže, da se ob normalnih obratovalnih razmerah plavine zadržujejo v akumulaciji, tako lahko izpiranje plavin iz akumulacije pričakujemo šele ob pojavu visokih voda, pri čemer se lahko blatna cona v spodnji polovici akumulacije začne izpirati že ob nastopu vsakoletnih pretokov. V nasprotju z blatno cono pa se izpiranje iz prodne cone pojavi šele ob nastopu izjemnih pretokov Save. Izhajajoč iz slike 5, v območju normalnih obratovalnih razmer pričakujemo zgolj pretok čez prelivna polja pregrade s plavinami velikosti do premera 1 mm, iz neposrednega dotoka ali pa z odnašanjem iz blatne cone v spodnji polovici akumulacije.



Slika 5: Premestitvena zmogljivost reke Save v akumulaciji Vrhovo (Kryžanowski, 2009)

Figure 5: River Sava sediment transport capacity in Vrhovo reservoir (Kryžanowski, 2009)

Preglednica 5: Zbirni pregled obratovalnih parametrov HE Vrhovo (povzeto po: Kryžanowski, 2009)

Table 5: Review of operation parameters of HPP Vrhovo (adopted from: Kryžanowski, 2009)

| LETO | MESEC | OBRATOVALNI DNEVI | | OBRATOVALNI ČAS | | OBRATOVALNI ČAS S SEDIMENTI | | KOLIČINA PRELIV | | KOLIČINA VODE (KUMULATIVNO) | KOLIČINA SEDIMENTOV | | KOLIČINA SEDIMENTOV (KUMULATIVNO) |
|------------------|-------------|-------------------|-------|-----------------|------------|-----------------------------|------------|-----------------|------------|-----------------------------|---------------------|------------|-----------------------------------|
| | | PRELIV | PROD | PODLIVANJE | PRELIVANJE | PODLIVANJE | PRELIVANJE | PODLIVANJE | PRELIVANJE | | PODLIVANJE | PRELIVANJE | |
| | | [dan] | [dan] | [h] | [h] | [h] | [h] | [1.000 m³] | [1.000 m³] | [1.000 m³] | [kg] | [kg] | [kg] |
| 2002 | marec | 2 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 666 | 0 | 666 | 0 | 0 | 0 |
| | april | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 396 | 0 | 396 | 0 | 0 | 0 |
| | avgust | 7 | 5 | 41 | 65 | 39 | 11 | 19.285 | 10.806 | 30.091 | 489.039 | 75.514 | 564.553 |
| | oktober | 7 | 5 | 11 | 89 | 11 | 22 | 6.984 | 13.749 | 20.733 | 99.182 | 29.837 | 129.019 |
| | november | 7 | 5 | 23 | 64 | 23 | 24 | 10.811 | 11.853 | 22.664 | 301.100 | 46.785 | 347.884 |
| | december | 3 | 1 | 6 | 31 | 1 | 0 | 2.959 | 4.469 | 7.428 | 7.890 | 0 | 7.890 |
| skupaj 2002 | | 27 | 16 | 84 | 249 | 74 | 57 | 41.101 | 40.877 | 81.978 | 897.211 | 152.135 | 1.049.347 |
| 2003 | januar | 2 | 0 | 0 | 11 | 0 | 0 | 0 | 124 | 124 | 0 | 0 | 0 |
| | februar | 1 | 0 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 637 | 637 | 0 | 0 | 0 |
| | oktober | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 230 | 230 | 0 | 0 | 0 |
| | november | 7 | 5 | 52 | 52 | 34 | 7 | 24.588 | 8.823 | 33.411 | 424.111 | 4.004 | 428.115 |
| | december | 2 | 2 | 11 | 25 | 1 | 7 | 4.018 | 5.310 | 9.328 | 24 | 1.755 | 1.779 |
| | skupaj 2003 | | 13 | 7 | 63 | 92 | 35 | 14 | 28.606 | 15.124 | 43.730 | 424.136 | 5.759 |
| 2004 | januar | 5 | 1 | 7 | 68 | 5 | 0 | 3.161 | 11.218 | 14.378 | 7.260 | 0 | 7.260 |
| | marec | 5 | 3 | 47 | 38 | 31 | 12 | 22.068 | 7.524 | 29.592 | 148.659 | 6.730 | 155.389 |
| | april | 5 | 3 | 26 | 53 | 24 | 13 | 11.851 | 7.155 | 19.007 | 224.110 | 13.778 | 237.888 |
| | maj | 3 | 2 | 0 | 24 | 0 | 6 | 0 | 4.427 | 4.427 | 0 | 1.124 | 1.124 |
| | junij | 2 | 1 | 13 | 15 | 11 | 6 | 4.234 | 2.863 | 7.096 | 36.366 | 7.021 | 43.387 |
| | julij | 3 | 2 | 3 | 22 | 2 | 7 | 1.001 | 3.518 | 4.519 | 7.845 | 4.503 | 12.348 |
| | skupaj 2004 | | 23 | 12 | 96 | 220 | 73 | 44 | 42.314 | 36.705 | 79.019 | 424.240 | 33.156 |
| skupaj 2002-2004 | | 63 | 35 | 243 | 561 | 182 | 115 | 112021 | 92706,1 | 204.727 | 1.745.587 | 191.050 | 1.936.637 |

Meritve izpiranja plavin v akumulaciji Vrhovo v času obratovanja elektrarne posebej niso bile izvedene (delno so uporabni podatki o izmerah akumulacije, ki prikazujejo spremembe batimetrije akumulacije kot presežke v volumnu (odložene plavine) in kot deficit (erodirane plavine)).

V preglednici 5: so zbirno prikazani karakteristični parametri, ki so se spremljali za potrebe analize abrazijskih procesov na pregradi Vrhovo (Kryžanowski, 2009). Razvidno je, da so bili pogoji za transport plavin čez prelivna polja izpolnjeni le v dobri polovici (56 %) vseh obratovalnih dni, s

stališča trajanja obratovalnih dogodkov po obratovalnih urah pa je delež prodonosnih obratovalnih ur le dobro tretjino (37 %) vseh obratovalnih ur (skoraj polovica prodonosnih obratovalnih dni se je zgodila v letu 2002, kar se kaže tudi v daleč največji kumulativni količini prenesenih plavin čez pregrado). Nekoliko drugačna situacija je v primeru režima prelivanja – s podlivanjem pod zapornico znaša delež prodonosnega pretoka 75 % vseh obratovalnih ur, s prelivanjem čez zaklopke pa le 20 %. Rezultati analize so razumljivi glede na to, da je med opazovalnim obdobjem srednji pretok Save v času podlivanja znatno presegal mejni pretok ($Q_{0\text{susp}} = 630 \text{ m}^3/\text{s}$), v času prelivanja pa je bil srednji pretok Save nižji od mejnega pretoka.

Podatki o koncentracijah so do danes temeljili na podlagi primerljivih akumulacij na Savi in na drugih vodotokih (predvsem akumulacije na verigi HE na reki Dravi). Po opravljenih analizah usedanja plavin v hidravlično podobnih akumulacijah je bila s preteklimi analizami za akumulacijo Vrhovo podana ocena, da se začne izpiranje plavin iz blatne cone ob nazivni koti akumulacije pri pretokih Save, večjih od $630 \text{ m}^3/\text{s}$. Za natančnejše ocene (vrednosti koncentracij plavin pri različnih pretokih, porazdelitev srednjega zrna plavin vzdolž akumulacije, zastopanost deležev posameznih velikostnih razredov plavin glede na hidrogram itd.) smo v nadaljevanju uporabili dvodimenzijski model z modulom za transport plavin CCHE2D.

S temi analizami pričakujemo tudi bolj merodajno osnovo za bolj optimalno obratovanje HE Vrhovo glede na stanje plavin v akumulaciji, kar je posledično pomembno tudi za zagotavljanje poplavne varnosti.

5 HIDROELEKTRARNE NA REKI SAVI

V nasprotju z reko Dravo je reka Sava energetske izkoriščena le 30 %, pri čemer pa ta delež z leti in gradnjo novih hidroenergetskih stopenj počasi narašča. Energetske se je kot prva začela izkoriščati zgornja Sava (pod tem pojmom se razume odsek Save, vključno s Savo Dolinko, od izvira v Zelencih pri Podkorenu do vključno HE Medvode, tik nad sotočjem Sore in Save). Prva je bila leta 1914 zgrajena HE Završnica, leta 1952 je bila zgrajena HE Moste pri Žirovnici, leto kasneje pa HE Medvode. Vmesni člen zgornjesavske verige predstavlja še HE Mavčiče iz leta 1986 (SEL, 2011).

Spodnjesavska veriga se je začela izoblikovati leta 1993 z izgradnjo HE Vrhovo, do današnjega dne pa so poleg nje v obratovanju še HE Boštanj, HE Blanca in HE Krško. HE Brežice je trenutno v gradnji, začetek poskusnega obratovanja sledi v letu 2016. V predinvesticijski fazi je veriga hidroelektrarn na srednji Savi (odsek Save od Medvod do Zidanega Mosta), ki predvideva verigo desetih hidroenergetskih stopenj za kritje konic rabe električne energije.

5.1 Hidroelektrarna Vrhovo

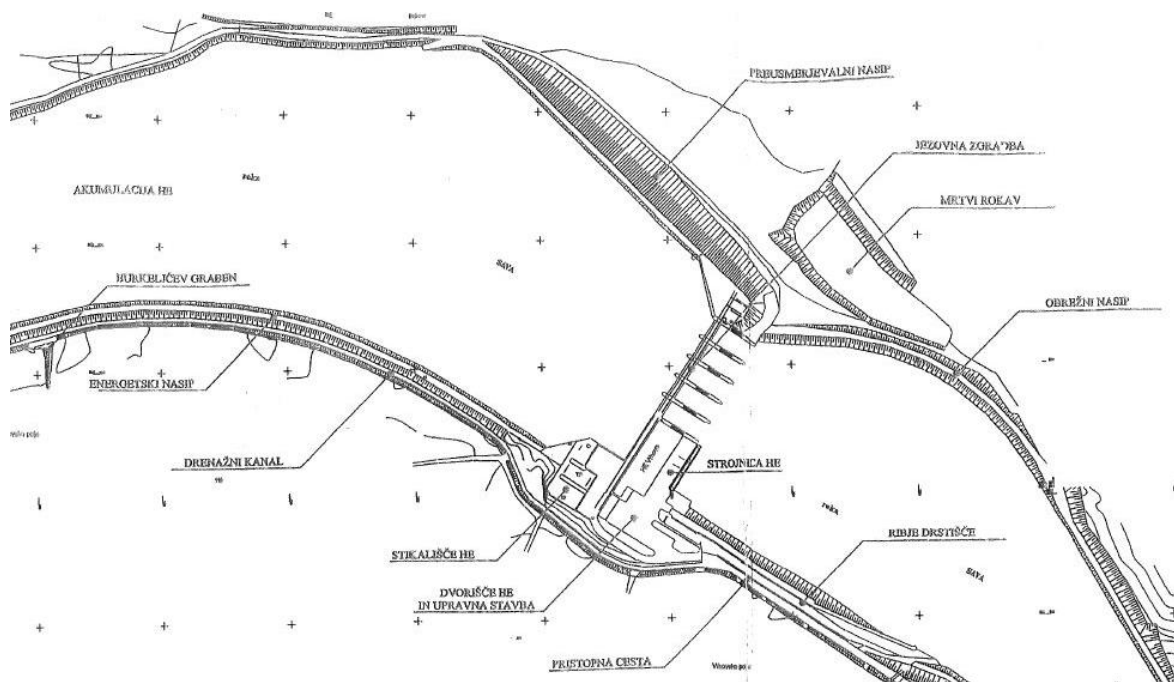
Hidroelektrarna Vrhovo leži ob manjšem zaselku Vrhovo, južno od Radeč, kjer se rečna dolina razširi v široko polje, po katerem preide Sava v dolinski režim toka.



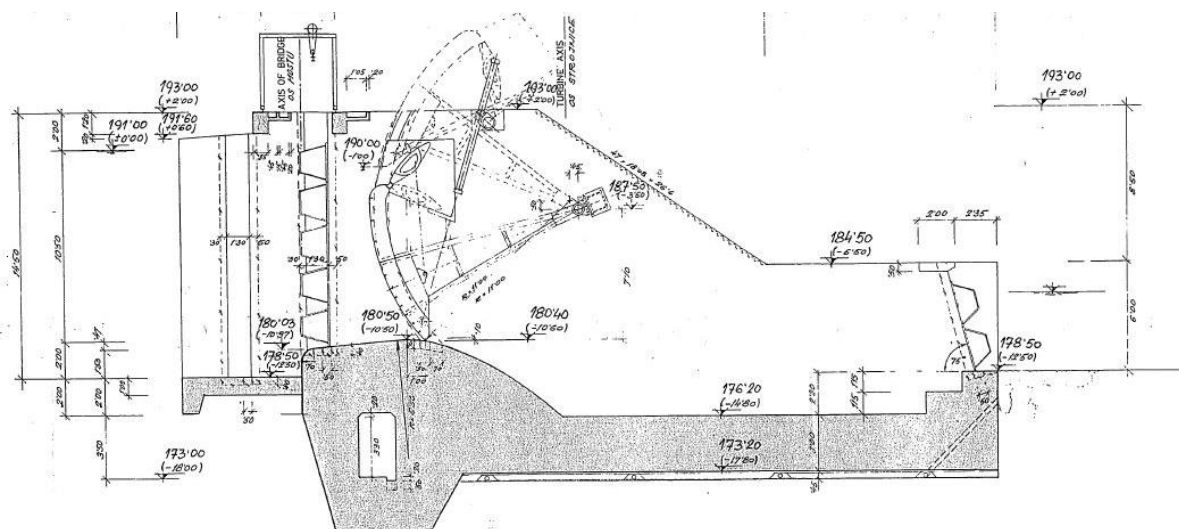
Slika 6: HE Vrhovo – situacija pregrade (vir: GURS DOF5 ortofoto)

Figure 6: HPP Vrhovo – aerial view (source: GURS DOF5 aerial imagery)

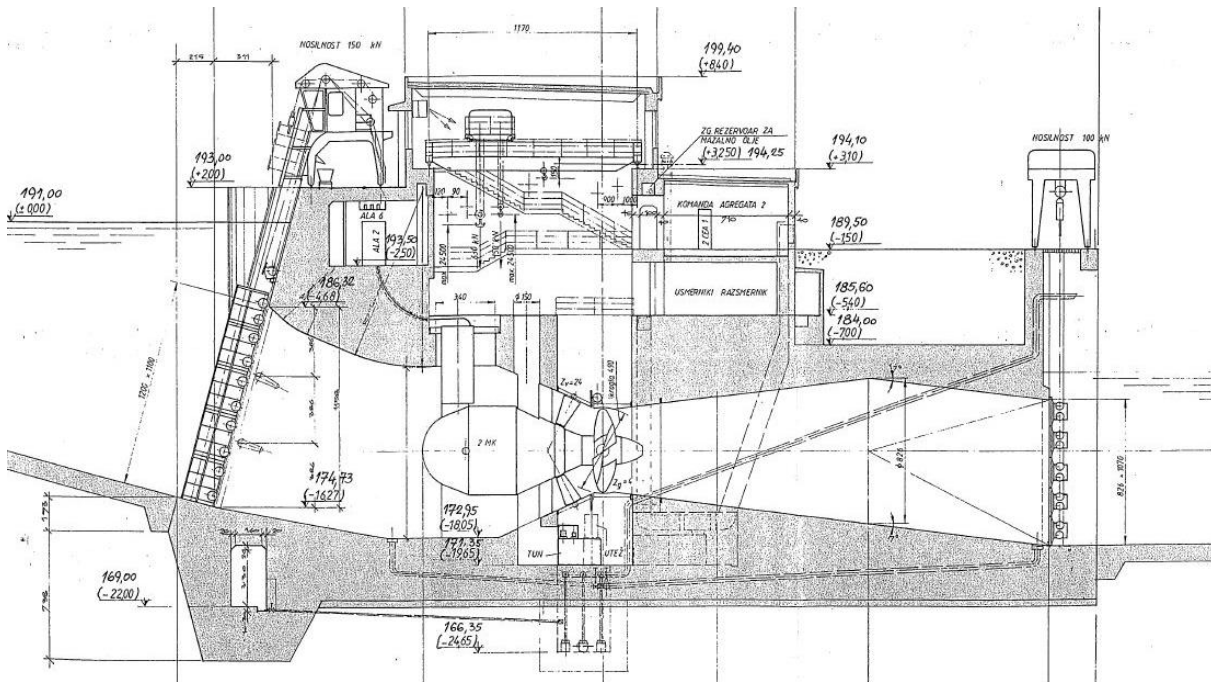
Akumulacija HE Vrhovo je prva v spodnjesavski verigi, v rečnem km 778,000 z zaježitvijo gladine na koti 191,0 m. Pregradni objekt, betonsko-težnostnega tipa, konstrukcijske višine 27 m, je bil dokončan leta 1993, obratuje pa v dnevno-pretočnem režimu z akumulacijo, ki ima vlogo čelne akumulacije za spodnjesavsko verigo, po izgradnji celotne savske verige pa bo akumulacija Vrhovo imela vlogo vmesne izravnalne akumulacije.



Slika 7: HE Vrhovo – situacija pregrade s posameznimi objekti (vir: Savske elektrarne Ljubljana)
Figure 7: HPP Vrhovo – dam with individual objects (source: Savske elektrarne Ljubljana)



Slika 8: HE Vrhovo – prerez skozi pretočno polje (vir: Savske elektrarne Ljubljana)
Figure 8: HPP Vrhovo – spillway longitudinal cross section (source: Savske elektrarne Ljubljana)



Slika 9: HE Vrhovo – prerez skozi strojnico (vir: Savske elektrarne Ljubljana)

Figure 9: HPP Vrhovo – machine room longitudinal cross section (source: Savske elektrarne Ljubljana)



Slika 10: HE Vrhovo – prelivna polja dolvodno

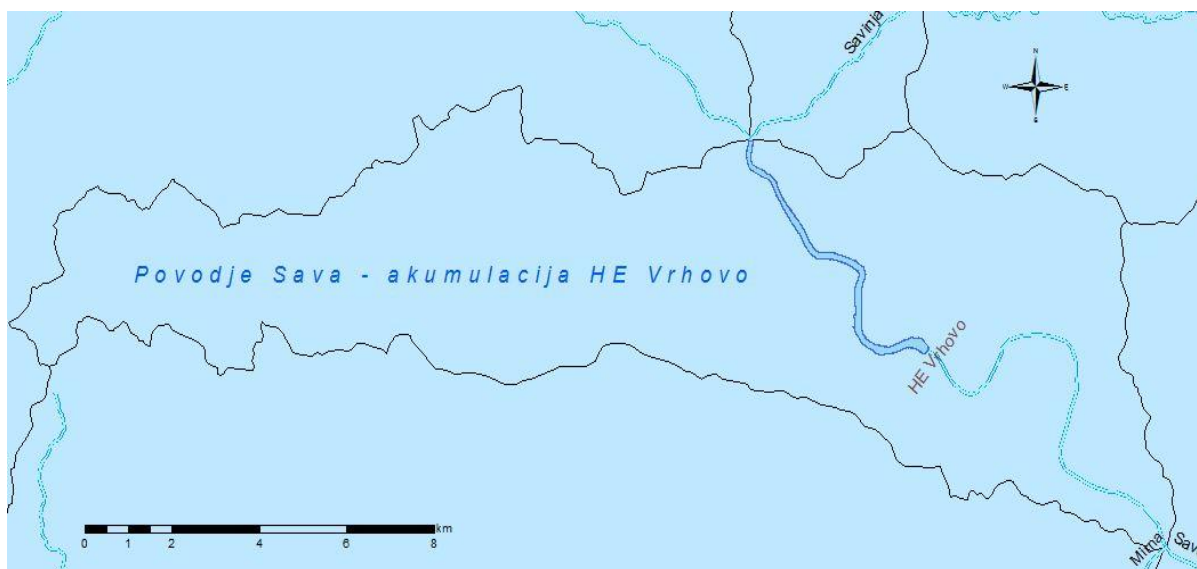
Figure 10: HPP Vrhovo – spillway downstream section



Slika 11: HE Vrhovo – segmentna zapornica z zaklopko
Figure 11: HPP Vrhovo – radial/tainter gate with flap

5.2 Osnovni hidrološki podatki

Hidrološki podatki za akumulacijo HE Vrhovo temeljijo na meritvah na vodomerni postaji (VP) Radeče, ki je obratovala med letoma 1909 in 1994, torej eno leto po dokončanju pregradnega objekta HE Vrhovo. Vodomerna postaja je locirana 5 km gorvodno od pregradnega objekta, ob starem mostu pri kraju Radeče (Pretoki rek v letu 2010, 2011).



Slika 12: Porečje akumulacije HE Vrhovo – porečje reke Save – spodnja Sava
Figure 12: HPP Vrhovo reservoir basin – River Sava watershed – spodnja Sava

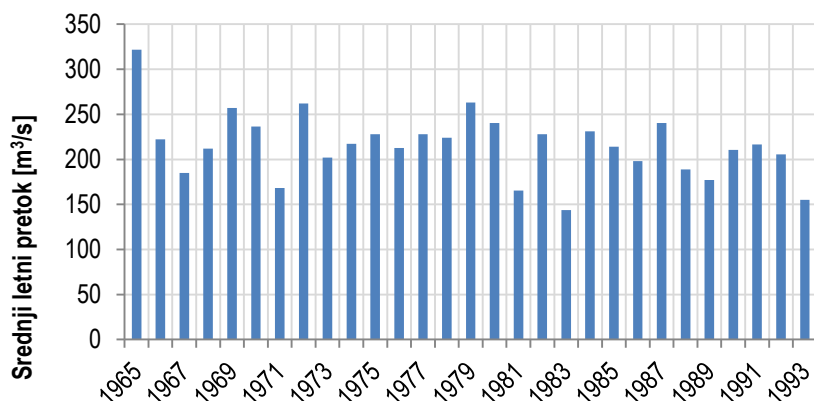
Hidrološki parametri, ki so se spremljali na VP Radeče za potrebe HE Vrhovo:

- vodostaj [cm],
- pretok [m^3/s],
- temperatura vode [$^{\circ}C$],
- transport suspendiranih plavin [kg/s],
- vsebnost suspendiranih plavin [g/m^3].

Po izgradnji HE Vrhovo je VP Radeče izgubila svojo vlogo v mreži vodomernih postaj na reki Savi, leta 1998 pa je bila tudi ukinjena. Nadaljnje hidrološke meritve, ki se izvajajo v sklopu delovanja HE Vrhovo na samem pregradnem objektu, zajemajo meritve vodostaja, pretoka in temperature vode.

Preglednica 6: Hidravlični in hidrološki parametri akumulacije HE Vrhovo (obdobje 1965–1993)
Table 6: Hydrological and hydraulic parameters of HPP Vrhovo reservoir (period 1965 to 1993)

| PARAMETRI AKUMULACIJE HE VRHOVO | |
|--|-------------------------------|
| porečje (zaledna prispevna površina) HE Vrhovo | 7.198 km ² |
| kota zaježitve | 191,0 m |
| kota spodnje vode | 182,88 m |
| bruto padec | 8,12 m |
| površina akumulacije | 1,43 km ² |
| prostornina akumulacije | 8,60 hm ³ |
| razpoložljiva prostornina pri denivelaciji 1,0 m | 1,16 hm ³ |
| <i>Hidrološki parametri</i> | |
| | <i>m³/s</i> |
| minimalni pretok | 55 |
| srednji letni pretok (obdobje 1965–1993) | 216 |
| <i>Povratne dobe (Pearson III)</i> | |
| visoka voda s povratno dobo 5 let | 2.297 |
| visoka voda s povratno dobo 10 let | 2.616 |
| visoka voda s povratno dobo 50 let | 3.256 |
| visoka voda s povratno dobo 100 let | 3.507 |
| visoka voda s povratno dobo 500 let | 3.748 |
| visoka voda s povratno dobo 1000 let | 4.267 |

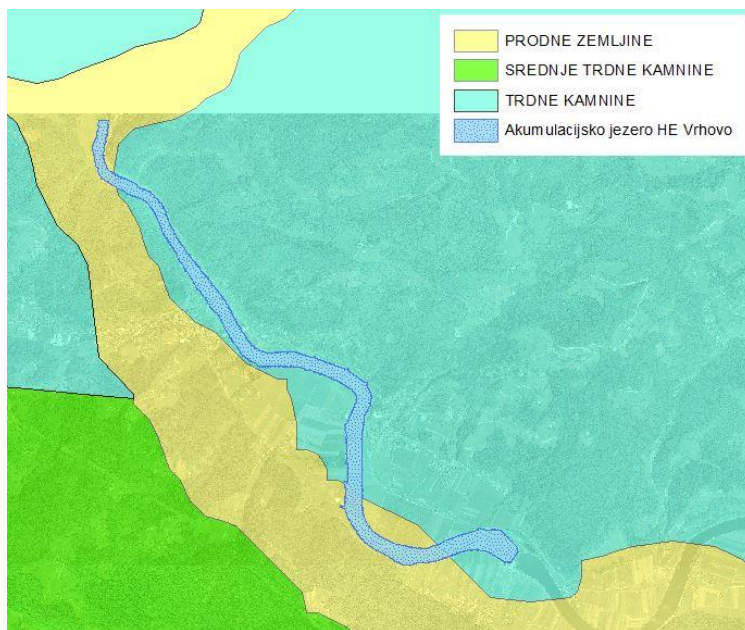


Slika 13: Srednji letni pretok za obdobje 1965–1993
Figure 13: Mean annual flow for period of 1965 to 1993

V predhodni preglednici so podatki o povratnih dobah katastrofalno visokih voda na območju akumulacije HE Vrhovo za obdobje 1965–1993, preračunali smo jih glede na verjetnostno porazdelitev Pearson III. Zaradi ekstremnih hidroloških dogodkov v zadnjih 15 letih je pričakovati do 10 % višje vrednosti ekstremnih pretokov.

5.3 Geološka in pedološka sestava tal v akumulaciji HE Vrhovo

Znotraj akumulacije s širšo okolico tvorijo tla v splošnem sloje neprepustnih permo-karbonskih skrilavcev, ki jih prekrivajo prodno-peščene kvartarne plavine s krovno plastjo peščenega melja in humusa (Savske elektrarne Ljubljana, 2011).



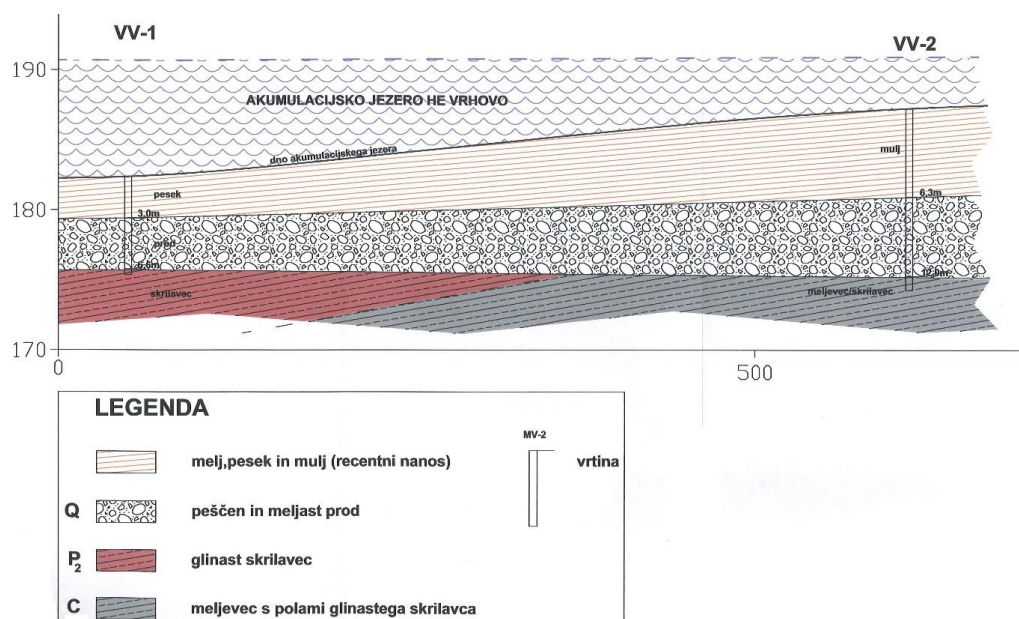
Slika 14: Geološka karta širšega območja akumulacije HE Vrhovo (podatki: Geološki zavod Slovenije, 2009)
Figure 14: Geological map of the HPP Vrhovo reservoir area (data: Geological Survey of Slovenia, 2009)

V letu 2009 so bile za potrebo morfološke študije *Plavine v zajezitvah verige hidroelektrarn na reki Savi* (Geateh, 2010) izvedene terenske meritve – izvedba vrtin v akumulacijah HE Medvode in HE Vrhovo. Opravljene raziskave so imele namen ugotoviti vrsto, količino in prostorski razpored akumuliranih plavin.

V akumulaciji HE Vrhovo sta bili zavrtani dve vrtini (VV-1 in VV2) (Slika 15). Globina vode v času meritve je bila 8,3 m (VV-1) in 3,7 m (VV-2) oz. kot absolutna kota gladine vode 190,7 m (VV-1) in 190,95 m (VV-2). Na območju akumulacije HE Vrhovo se pod dnom akumulacije pojavlja v spodnji vrtini (VV-2) najprej 6,0 m mulja in še 30 cm grušča in proda, ki je ostanek iz časa gradnje. Pod tem recentnim nanosom nastopa do globine 12,0 m holocenski prod in podrejeno pesek s premogovim prahom, ki je značilen plavinski delec savskih prodov dolvodno od zasavskih premogovnikov (separacijska jalovina). V vrtini VV-1 je recentnega nanosa le 3,0 m in to prevladujočega peska. Prod iz časa pred izgradnjo elektrarne je do globine 6,6 m. Kot kamninska podlaga se je v tej vrtini pojavljala vijoličast glinast skrilavec (srednji perm), v vrtini VV-2 pa temnosiv glinast skrilavec in meljevec (karbonske starosti).



Slika 15: Mesta vrtin na območju akumulacije HE Vrhovo (Geateh, 2010)
Figure 15: Drill holes locations in HPP Vrhovo reservoir (Geateh, 2010)



Slika 16: Vzdolžni prerez – shematizirana geološka sestava tal (Geateh, 2010)
Figure 16: Schematic geological ground composition – longitudinal profile (Geateh, 2010)

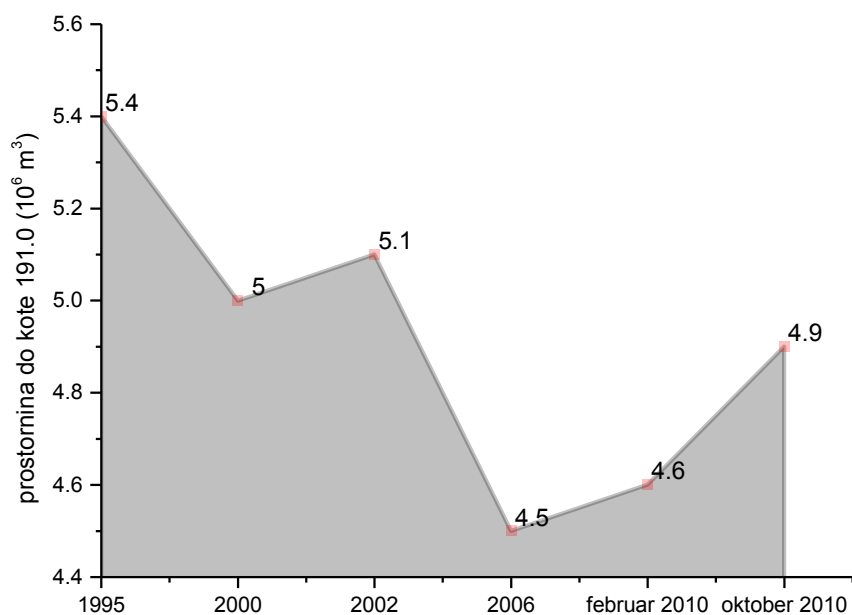
Finejše plavine so bližje pregradi, je pa pri njihovi razporeditvi v vzdolžni in prečni smeri pomembna tudi pozicija hitrejšega toka vode. Odlaganje plavin se vrši na mestih z zmanjšano hitrostjo vodnega toka, iz česar izhaja, da je ta na mestu VV-1 precej večja kot na mestu VV-2.

5.4 Izmere akumulacije HE Vrhovo

Za potrebe spremljanja spreminjanja batimetrije akumulacije HE Vrhovo se v rednih časovnih intervalih izvajajo geodetske meritve akumulacije, pri čemer smo ugotavljali bilanco v intervalu med posameznimi meritvami in spremembe dna zaradi odlaganja plavin ali odplavljanja naplavin.

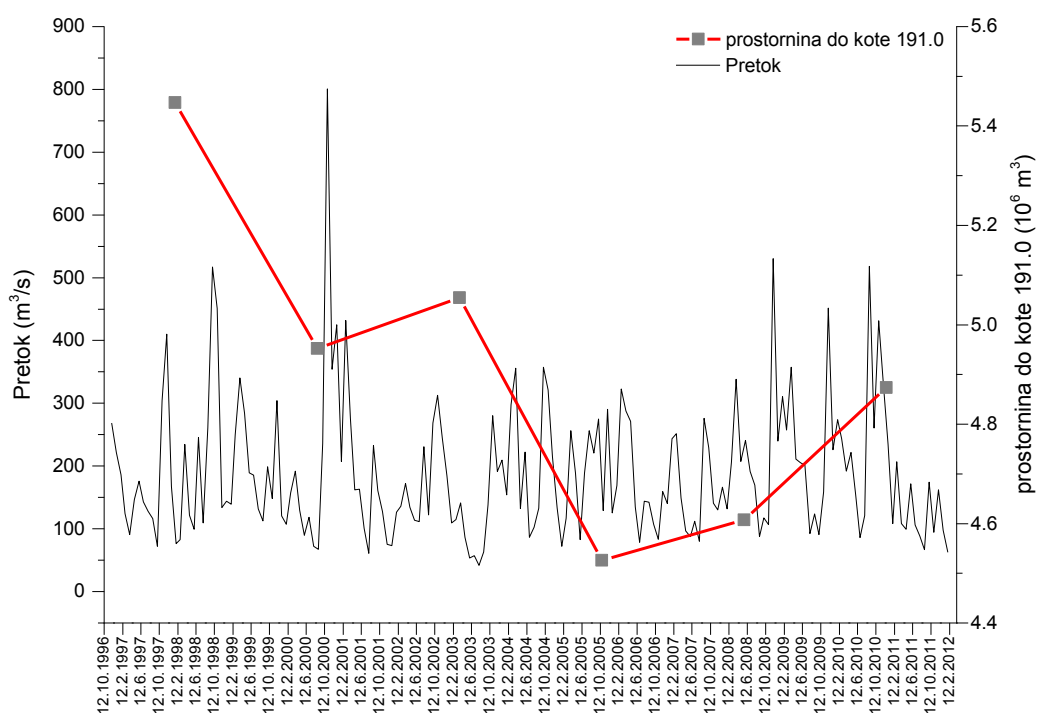
Preglednica 7: Spreminjanje volumna akumulacije Vrhovo med pregrado in novim mostom pri Radečah
Table 7: Changes in HPP Vrhovo reservoir volume in the section between the dam and new bridge in Radeče

| | glede na l. 1995 | | | | glede na prejšnjo meritev | | |
|--------------------------------------|--|---|-----------|-----------|---|-----------|-----------|
| | vol. do kote 191,0 (10 ⁶ m ³) | usedline (10 ⁶ m ³) | % usedlin | % na leto | usedline (10 ⁶ m ³) | % usedlin | % na leto |
| leto | 5,4 | - | - | - | - | - | - |
| 2000 | 5,0 | 0,5 | 9,1 | 1,8 | 0,5 | -9,1 | 1,8 |
| 2002 | 5,1 | 0,4 | 7,2 | 1,0 | -0,1 | 2,1 | -1,0 |
| 2006 | 4,5 | 0,9 | 16,9 | 1,5 | 0,5 | -10,4 | 2,6 |
| februar 2010 | 4,6 | 0,8 | 15,4 | 0,9 | 0,1 | 1,8 | -0,4 |
| oktober 2010 | 4,9 | 0,6 | 10,5 | 0,6 | 0,3 | 5,5 | -7,8 |
| povprečje v obdobju 1995– 2010 | 4,92 | 0,64 | 11,83 | 1,16 | 0,25 | 2,04 | -0,97 |

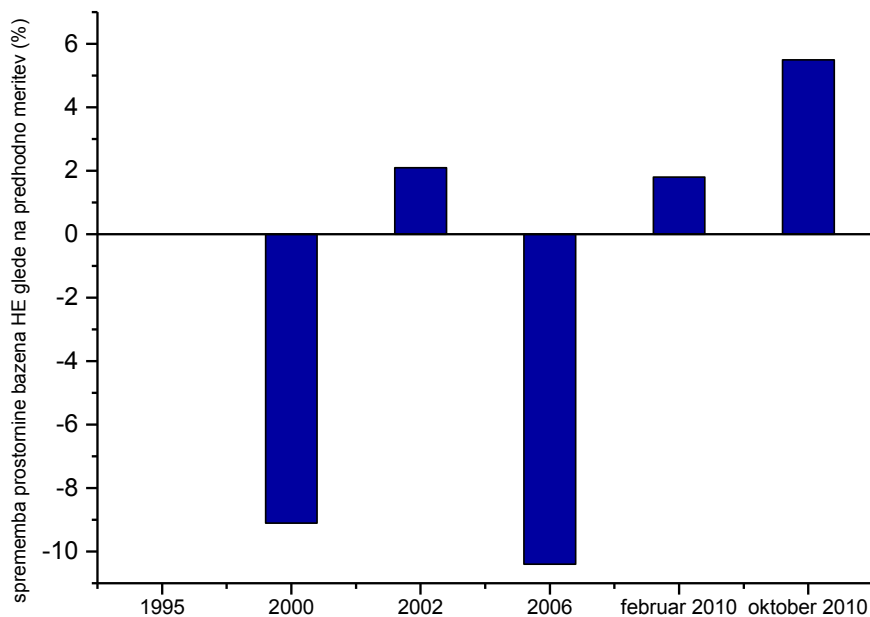


Slika 17: Spreminjanje prostornine akumulacije HE Vrhovo od leta 1995
Figure 17: Changes in HPP Vrhovo reservoir volume since 1995

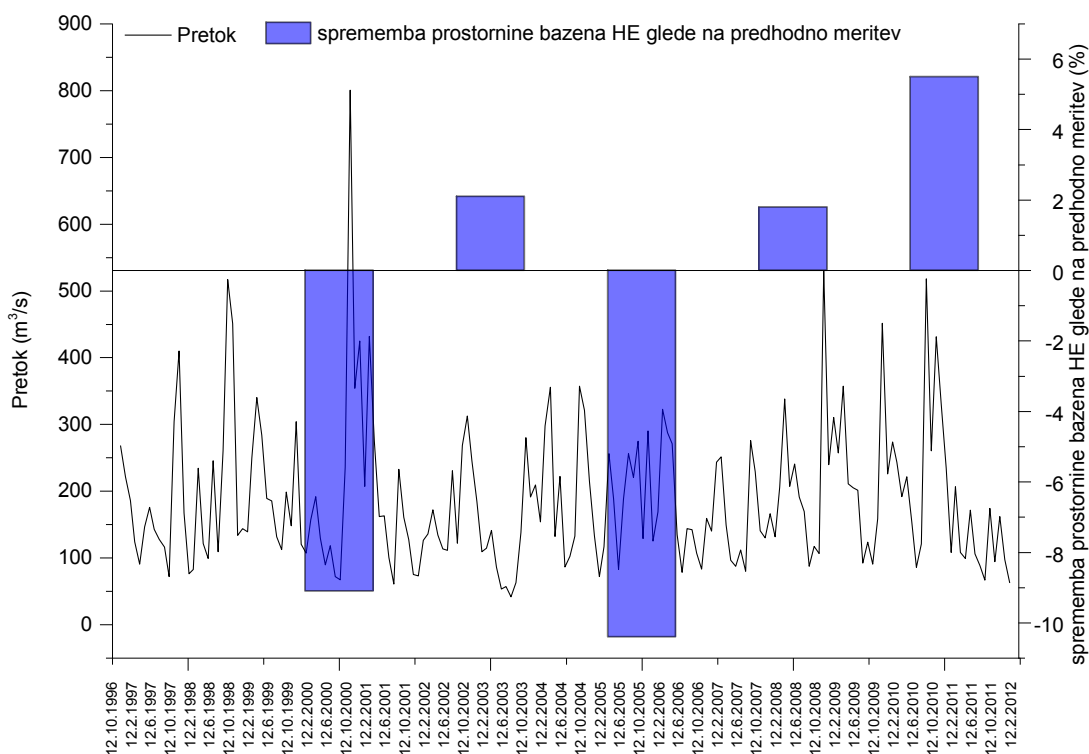
Preglednica 7 prikazuje nihanje prostornine akumulacije HE Vrhovo ob stalni koti gladine 191,0 m. Obravnavana prostornina (obdelana je bila prostornina akumulacije med pregrado Vrhovo in novim cestnim mostom v Radečah zaradi primerljivosti rezultatov) se je v obdobju 1995–2010 z vmesnimi nihanji sicer zmanjšala s 5,4 mio m³ na 4,9 mio m³, vendar lahko na podlagi izkušenj iz akumulacije HE Dravograd na reki Dravi in trenda nihanja prostornine v prihodnosti pričakujemo stabilizacijo razmer.



Slika 18: Spreminjanje prostornine akumulacije od leta 1995 v odnosu na srednji mesečni pretok
Figure 18: Changes in reservoir volume since 1995 in relation to mean annual flow

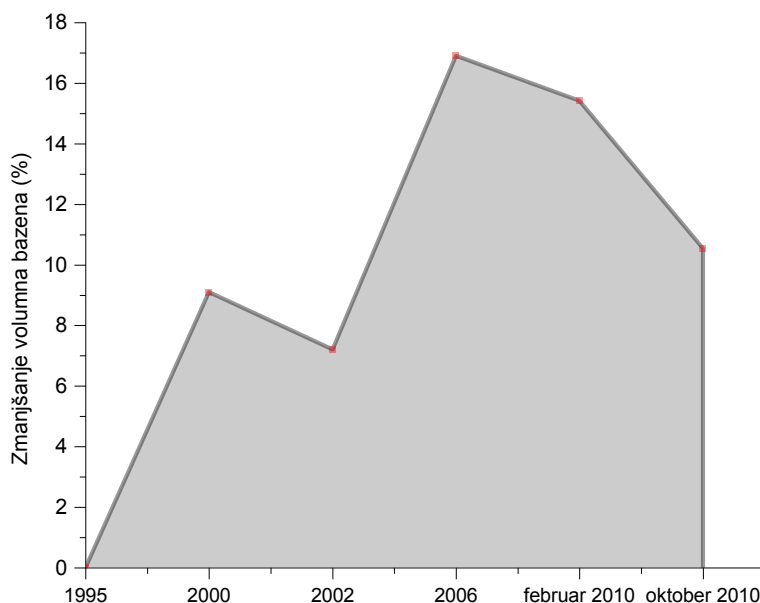


Slika 19: Spreminjanje prostornine akumulacije HE Vrhovo glede na predhodne meritve
Figure 19: Changes in reservoir volume in relation to prior measurements



Slika 20: Odnos med spreminjanjem prostornine glede na predhodne meritve in srednjim mesečnim pretokom
Figure 20: Reservoir volume changes compared to prior measurements relation to mean annual flow

S slike 20 sledi, da se je prostornina akumulacije v začetnem obdobju v povprečju povečevala (odplavljanje/spiranje plavin) ob pretokih nad $230 \text{ m}^3/\text{s}$, ko se začne izpiranje rinjenih plavin, in zmanjševala pod to vrednost. Sčasoma se je vpliv rinjenih plavin zmanjšal do te mere, da so bile pri bilanci prostornine akumulacije zastopane v pretežnem le še lebdeče plavine.



Slika 21: Delež plavin glede na celotno prostornino akumulacije HE Vrhovo
Figure 21: Sediment shares in relation to total Vrhovo reservoir volume

Dotok rinjenih plavin v akumulacijo je minimalen zaradi hidroenergetskih stopenj na odseku zgornje Save in točkovnih odvzemov, kot je na primer odvzem za separacijo Zg. Hotič – 30.000 m³ odvzetega voda v povprečju na leto (Pretoki rek v letu 2010, 2011), poleg tega pa je tudi premestitvena zmogljivost Savinje za rinjene plavine večja, kot je dotok rinjenih plavin (dejanska prodonosnost), kar pomeni, da Savinja na mesto izliva v Savo pri Zidanem Mostu prinese sorazmerno majhno količino rinjenih plavin. Nihanje prostornine akumulacije HE Vrhovo je tako v največji meri odvisno od dotoka in vnosa lebdečih plavin.

S primerjavo izmer dna akumulacije za leta 2006, februar 2010 in oktober 2010 (vir podatkov: SEL, d. o. o.) smo izvedli spremembe v prostornini akumulacije HE Vrhovo v obdobju pred visokovodnim dogodkom septembra 2010 (2006–februar 2010) in takoj po njem, kar je lahko indikator naravnega odnašanja odloženih lebdečih plavin, po drugi strani pa so nam izračuni služili za orientacijo in verifikacijo pri kasnejši interpretaciji rezultatov modela transporta plavin.

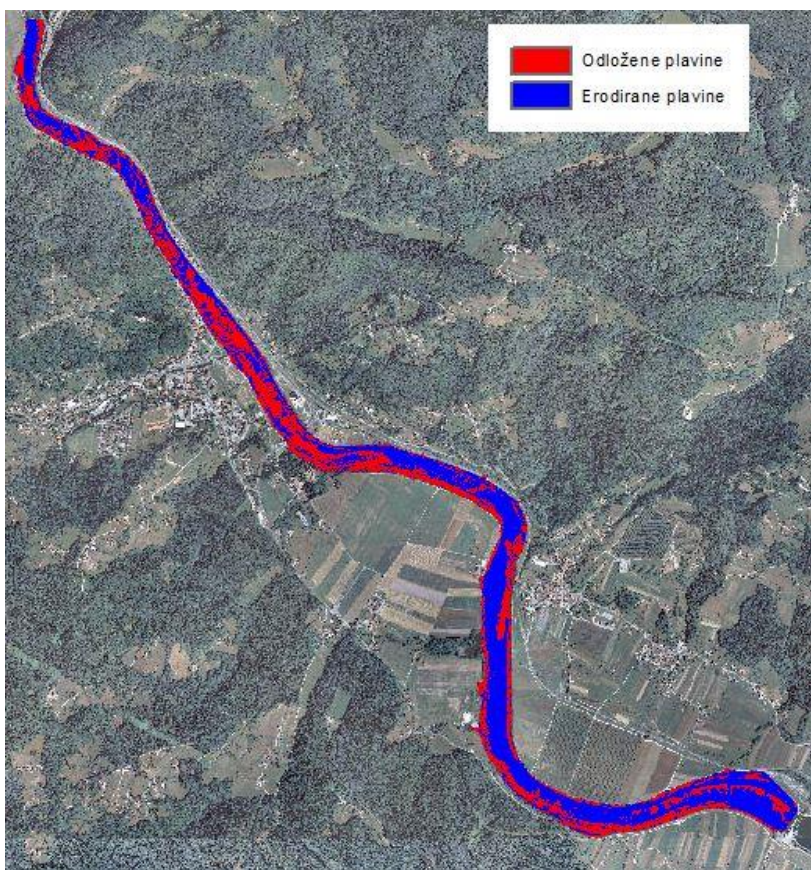
Izvedla se je tudi bilančna analiza dna akumulacije (angl. *cut-fill analysis*), ki prikazuje bilančno stanje (na)plavin.

5.4.1 Bilančna analiza naplavin

Bilančno analizo naplavin smo izvedli za meritvi batimetrije v mesecih februar in oktober 2010, torej pred poplavami in po njih v septembru 2010. S pomočjo programskega orodja GIS smo primerjali

morfologijo – digitalni modelni relief stanja dna akumulacije za oba meseca, pri čemer so nastali presežki prostornine (odložene plavine) in deficit prostornine (erodirane plavine) – Slika 22.

V obdobju februar 2010–oktober 2010, z vmesnimi poplavami, se je torej na območju akumulacije HE Vrhovo odložilo 76.800 m^3 plavin, hkrati pa je bilo odplavljenih 374.000 m^3 plavin, kar pomeni, da je bilanca plavin akumulacije HE Vrhovo $374.000 \text{ m}^3 - 76.800 \text{ m}^3 = 297.200 \text{ m}^3$ predvsem rezultat izrednega visokovodnega dogodka v septembru 2010.

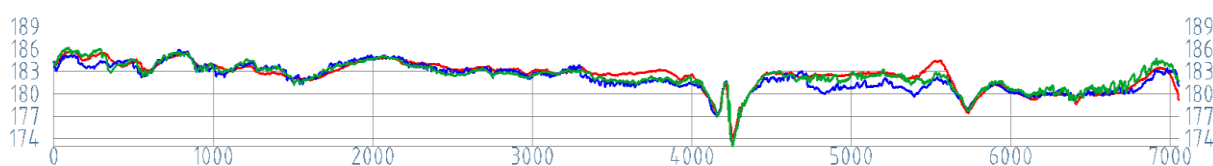


Slika 22: Bilančna analiza naplavin v akumulaciji HE Vrhovo za obdobje februar–oktober 2010
Figure 22: Cut-fill analysis of HPP Vrhovo reservoir (period of february–october 2010)

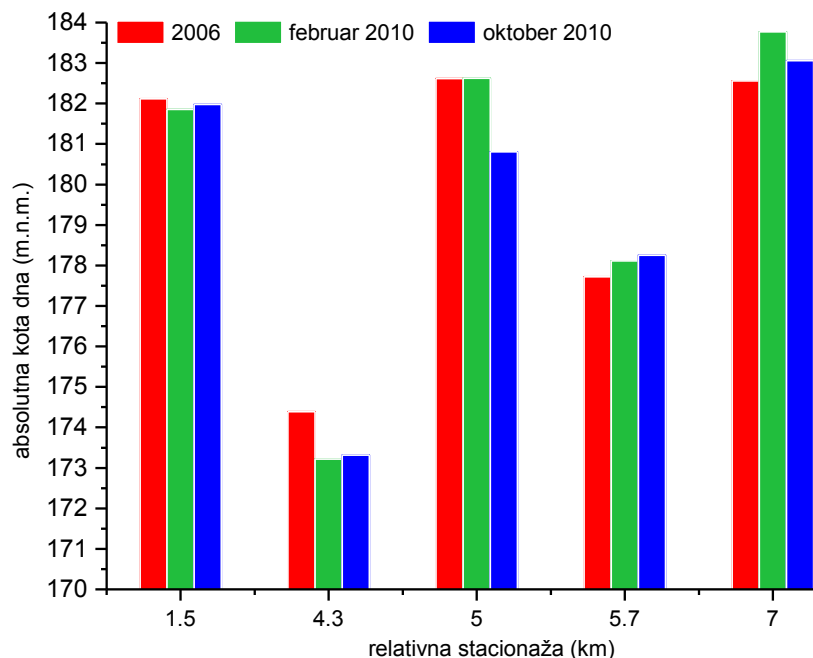
Na sliki 22 je tako vidno, da so se plavine praviloma odlagale v zgornji polovici akumulacije (dotok lebdečih plavin iz Savinje in srednje Save), ker pa je premestitvena zmogljivost Save v tem območju večja od dotoka plavin, je v spodnjem delu akumulacije prišlo pretežno do odnašanja plavin, razen na mestih povečanih lokalnih cirkulacij in nižjih hitrosti vodnega toka.

5.4.2 Primerjava vzdolžnih profilov dna akumulacije za leto 2006, februar in oktober 2010

Primerjava vzdolžnih profilov nazorno kaže tendenco poglobljanja struge zaradi odnašanja plavin (kar kaže tudi bilančna analiza naplavin), predvsem v spodnji polovici akumulacije – Slika 23. V zgornji polovici akumulacije (od vtoka Savinje v Savo do Radeč) je, kot rečeno, poglobljanje struge bistveno manj izrazito, saj se pozna vpliv Savinje, ki s seboj prinaša znatne količine (lebdečih) plavin (samo v obdobju štirih mesecev, tj. v obdobju september–december 2010, je masna bilanca plavin 300.000 ton v merskem profilu Veliko Širje I pred vtokom Savinje v Savo pri Zidanem Mostu). Poleg Savinje ima manjši vpliv na odlaganje plavin tudi reka Sopota, katere obdobjna bilanca plavin sicer ni znana.



Slika 23: Vzdolžni prerez dna akumulacije v letih 2006 (rdeče), februar 2010 (zeleno) in oktober 2010 (modro)
Figure 23: Reservoir bottom longitudinal profile of year 2006 (red line), february 2010 (green line) and october 2010 (blue line)



Slika 24: Primerjava sprememb dna v karakterističnih stacionažah za leto 2006, februar 2010 in oktober 2010
Figure 24: Reservoir bottom level changes comparison at certain stations for year 2006 and 2010 (february and october)

S slike 24, kjer smo primerjali nivoje dna akumulacije za tri različne časovne preseke, je najprej viden vpliv geometrije struge na odlaganje in odplavljanje plavin – na relativni stacionaži 1,5 km, kjer je potek struge naravnost, sprememb v nivojih dna akumulacije skoraj ni, za razliko od ostalih relativnih

stacionaž, predvsem pri meandru ob RD (ribiški dom) Radeče (rel. stacionaža 4,3 km) in meandru ob zaselku Vrhovo (rel. stac. 5 km). Poleg tega je iz primerjav nivojev dna očitno odlaganje plavin v spodnji četrtini akumulacije, v ostalem delu akumulacije je naplavine odplavljalo. Že na tej točki naloge lahko tako sklepamo, da se meja blatne cone pomika gorvodno po akumulaciji, kar je glede na deficit bolj grobih frakcij pričakovano.

6 METODOLOGIJA 2-D MODELIRANJA MORFOLOŠKIH SPREMEMB V AKUMULACIJI HE VRHOVO

Za potrebe izdelave modela smo privzeli, da je bil v modeliranem obdobju v akumulaciji HE Vrhovo dominanten transport drobnozrnatih, lebdečih plavin, medtem ko grobozrnatih peskov in proda (ki se v manjši meri sicer pojavljajo v zgornji tretjini akumulacije), tj. plavin, ki so v povprečju večje od 1 mm, v modelu nismo upoštevali.

6.1 2-D model CCHE2D

6.1.1 Teoretične osnove

Dvodimenzijski (2-D) model CCHE2D (National Center for Computational Hydroscience and Engineering's 2-Dimensional Model, Univerza Mississippi, ZDA) je hidrodinamični model za modeliranje nestalnega turbulentnega toka s prosto gladino in transporta plavin, ki na prvem mestu temelji na globinsko-povprečenih dvodimenzijskih enačbah (Zhang, 2006).

Kontinuitetna enačba:

$$\frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \quad (11)$$

Dinamični enačbi:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial Z}{\partial x} + \frac{1}{h} \left[\frac{\partial(h\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(h\tau_{xy})}{\partial y} \right] - \frac{\tau_{bx}}{\rho h} + f_{Cor} v \quad (12)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial Z}{\partial y} + \frac{1}{h} \left[\frac{\partial(h\tau_{yx})}{\partial x} + \frac{\partial(h\tau_{yy})}{\partial y} \right] - \frac{\tau_{by}}{\rho h} + f_{Cor} u \quad (13)$$

kjer je u globinsko-povprečena hitrostna komponenta v x smeri, v globinsko-povprečena hitrostna komponenta v y smeri, g gravitacijski pospešek ($9,81 \text{ m/s}^2$), Z = nivo vodne gladine, h globina vode, f_{Cor} Coriolisov parameter, τ_{xx} , τ_{xy} , τ_{yx} , τ_{yy} globinsko-povprečene Reynoldsove napetosti ter τ_{bx} , τ_{by} strižne napetosti na dnu struge v prečni in vzdolžni smeri.

Turbulentne Reynoldsove napetosti so dejansko približki, ki temeljijo na Boussinesqovi predpostavki, da so povezani s povprečnim tokom (s čimer se doseže določenost sistema enačb), pri čemer se vpelje koeficient vrtnične viskoznosti.

$$\tau_{xx} = 2\nu_t \frac{\partial u}{\partial x} \quad (14)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \nu_t \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (15)$$

$$\tau_{yy} = 2\nu_t \frac{\partial v}{\partial y} \quad (16)$$

kjer je ν_t koeficient vrtnične viskoznosti, ki je v programu CCHE2D določen z globinsko-povprečenim paraboličnim modelom, globinsko-povprečenim modelom dolžine mešanja ali pa s t. i. modelom $k-\varepsilon$ (Zhang, 2006).

Model dolžine mešanja računa vrtnično viskoznost kot funkcijo globinsko-povprečene mešalne dolžine in gradientov globinsko-povprečenih hitrosti v horizontalni in vertikalni smeri.

$$\nu_t = \bar{l} \sqrt{2\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + 2\left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{U}}{\partial z}\right)^2} \quad (17)$$

kjer je \bar{l} globinsko-povprečena mešalna dolžina in $\frac{\partial \bar{U}}{\partial z}$ gradient skupne hitrosti v vertikalni smeri.

Globinsko-povprečeni parabolični model upošteva samo strižne hitrosti, ki so povezane z gradientom hitrosti v vertikalni smeri.

$$\nu_t = \alpha_t U_* h \quad (18)$$

kjer je α_t empirični koeficient, ki je v splošnem odvisen od von Karmanove konstante κ ($\alpha_t = \frac{\kappa}{6}$ pri $\kappa = 0,4$), U_* = strižna hitrost ($U_* = \sqrt{c_f(U^2 + V^2)}$), h = globina vode.

V splošnem se sicer modeli delijo glede na število enačb transporta, ki jih vsebujejo. Tako sta parabolični model in model dolžine mešanja brezenačbna modela turbulence, medtem ko je model $k-\varepsilon$

dvoenačbni model turbulence, ker se ti poslužujejo dveh enačb, in sicer enačbe za dolžinsko merilo turbulence in t. i. k -enačbe, pri čemer sta najpogosteje v uporabi koncept vrtničenje-viskoznost (pulzacije hitrosti najpogosteje opredelimo s \sqrt{k} , kjer je k kinetična energija turbulence na enoto mase in je merilo velikosti pulzacij turbulence v prostoru za turbulenco večjih razsežnosti) in Kolmogorov-Prandtlova relacija (Rodi, 1993).

$$v_t = c'_\mu \sqrt{k} L \quad (19)$$

kjer je c'_μ empirična konstanta. Točnost enačbe 19 se izboljša s porazdelitvijo k (reševanje transportne enačbe za k , za visoka Reynoldsova števila – razčlenjeno enačbo dobimo iz Navier-Stokesove enačbe).

$$v_t = c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \Gamma = \frac{v_t}{\sigma_t} \quad (20)$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\partial v_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + v_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \beta g_i \frac{v_t}{\sigma_t} \frac{\partial \phi}{\partial x_i} - \varepsilon \quad (21)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + U_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + c_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (P + G) (1 + c_{3\varepsilon} R_f) - c_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (22)$$

kjer je ε stopnja disipacije, Γ stopnja turbulentne difuzivnosti toplote/mase, ostalo pa so empirične konstante. V primeru mrežne turbulence sta faktorja P in G enaka 0, tako je empirična konstanta $c_{2\varepsilon}$ edina, ki se pojavlja v enačbah (21 in 22) in se giblje v rangi med 1,8 in 2,0. Konstanta c_μ , ki se pojavi v enačbi (20), pa znaša $\sim 0,09$. V območjih »obstenskega« toka prevladuje logaritemski profil hitrosti; tam je $P \sim \varepsilon$, konvekcija ε pa je zanemarljiva (Rodi, 1993).

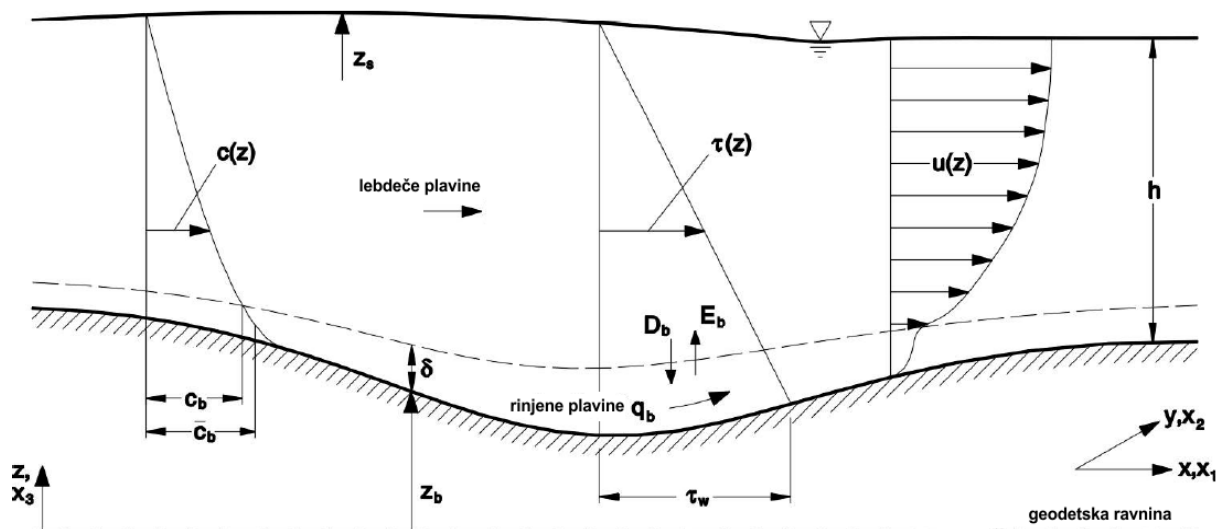
$$c_{1\varepsilon} = c_{2\varepsilon} - \frac{\chi^2}{\sigma_\varepsilon \sqrt{c_\mu}} \quad (23)$$

Preglednica 8: Konstante v modelu k - ε (vir: Rodi, 1993)

Table 8: Constants of k - ε model (source: Rodi, 1993)

| Konstante v modelu k - ε | $c_{1\varepsilon}$ | $c_{2\varepsilon}$ | σ_ε | σ_k | c_μ |
|--|--------------------|--------------------|----------------------|------------|---------|
| | 1,44 | 1,92 | 1,30 | 1,0 | 0,09 |

Neravnotežen model transporta plavin znotraj programa CCHE2D se oblikuje s pomočjo reševanja globinsko-povprečenih konvekcijsko-difuznih enačb kalnosti in kontinuitetne enačbe rinjenih plavin (Wu, 2004).



Slika 25: Konfiguracija transporta plavin (prevzeto po: Zhang, 2006)

Figure 25: Schematic configuration of sediment transport (adopted from: Zhang, 2006)

Kot izhaja s slike 25, se celotna globina vode deli na dve območji – na območje lebdečih plavin in na območje rinjenih plavin. Višina plasti rinjenih plavin δ je neposredno odvisna od višine mešanja rinjenih plasti z vodo. Po predpostavki Einsteina (1950) se lahko uvede poenostavitev, da je δ enaka dvakratniku povprečnega premera delca ($\delta = 2d$, kjer je d premer delca). Pri frakcijskem modeliranju premeščanja plavin se granulometrijska struktura plavin razdeli na več velikostnih razredov. Za vsak velikostni razred velja konvekcijsko-difuzijska enačba transporta plavin:

$$\frac{\partial(c_k)}{\partial t} + \frac{\partial(uc_k)}{\partial x} + \frac{\partial(vc_k)}{\partial y} + \frac{\partial(wc_k)}{\partial z} - \frac{\partial(\omega_{sk}c_k)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x}(\epsilon_s \frac{\partial c_k}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\epsilon_s \frac{\partial c_k}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\epsilon_s \frac{\partial c_k}{\partial z}) \quad (24)$$

kjer je c_k koncentracija k -tega velikostnega razreda plavin; u , v in w komponente hitrosti v x , y in z smeri; ω_{sk} hitrost posedanja k -tega velikostnega razreda plavin ter ϵ_s vrtnična difuzivnost plavin. Z integriranjem gornje enačbe v območju lebdečih rinjenih plavin dobimo:

$$\frac{\partial(hC_k)}{\partial t} + \frac{\partial(UhC_k)}{\partial x} + \frac{\partial(VhC_k)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x}(\epsilon_s h \frac{\partial C_k}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\epsilon_s h \frac{\partial C_k}{\partial y}) + \alpha \omega_{sk}(C_{s,k} - C_k) \quad (25)$$

in

$$\frac{\partial(\delta_b \bar{c}_{bk})}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha_{bx} q_{bk})}{\partial x} + \frac{\partial(\alpha_{by} q_{bk})}{\partial y} + \alpha \omega_{zk} (C_{*k} - C_k) + (1 - p'_m) \left(\frac{\partial z_b}{\partial t} \right)_k = 0 \quad (26)$$

kjer je h globina toka, C_k globinsko-povprečena koncentracija k -tega velikostnega razreda lebdečih plavin; U in V sta globinsko-povprečeni hitrosti toka v x in y smeri, α neravnotežni adaptacijski koeficient lebdečih plavin (empirični koeficient, ki je povezan s stopnjo razvoja dna struge), C_{*k} globinsko-povprečena koncentracija lebdečih plavin znotraj ravnotežnih pogojev, δ_b debelina plasti rinjenih plavin, \bar{c}_{bk} povprečna koncentracija rinjenih plavin, α_{bx} in α_{by} smeri prodonosnosti (običajno v smeri strižnih napetosti v dnu struge), q_{bk} stopnja transporta k -tega velikostnega razreda rinjenih plavin, p'_m količnik por v posteljici struge ter $\left(\frac{\partial z_b}{\partial t} \right)_k$ stopnja spremembe dna struge glede na k -ti velikostni razred plavin.

Sprememba dna struge se določi na naslednji način:

$$(1 - p'_m) \left(\frac{\partial z_b}{\partial t} \right)_k = \frac{1}{L} (q_{tk} - q_{t* k}) = \alpha \omega_{zk} (C_k - C_{*k}) + \frac{1}{L} (q_{bk} - q_{b* k}) \quad (27)$$

kjer je q_{tk} dejanska stopnja transporta k -tega velikostnega razreda rinjenih plavin, $q_{t* k}$ premestitvena zmogljivost k -tega velikostnega razreda rinjenih plavin, L neravnotežna adaptacijska dolžina transporta plavin ter $q_{b* k}$ premestitvena zmogljivost rinjenih plavin oz. stopnja transporta v ravnotežnem stanju. Iz enačb 25, 26 in 27 se lahko določi neznanke C_k , q_{bk} in $\left(\frac{\partial z_b}{\partial t} \right)_k$.

V primeru, da so med premeščenimi plavinami zastopane pretežno rinjene plavine, se vpliv lebdečih plavin zanemari in sledi:

$$\frac{\partial(\delta_b \bar{c}_{bk})}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha_{bx} q_{bk})}{\partial x} + \frac{\partial(\alpha_{by} q_{bk})}{\partial y} + \frac{1}{L} (q_{bk} - q_{b* k}) = 0 \quad (28)$$

in

$$(1 - p'_m) \left(\frac{\partial z_b}{\partial t} \right)_k = \frac{1}{L} (q_{bk} - q_{b* k}) \quad (29)$$

Po drugi strani, če so med premeščenimi plavinami pretežno zastopane lebdeče plavine, se vpliv rinjenih zanemari in sledi (Zhang, 2006):

$$\frac{\partial(hC_k)}{\partial t} + \frac{\partial(UhC_k)}{\partial x} + \frac{\partial(VhC_k)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_s h \frac{\partial C_k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_s h \frac{\partial C_k}{\partial y} \right) + \alpha \omega_{sk} (C_{*k} + C_k) \quad (30)$$

in

$$(1 - p'_m) \left(\frac{\partial z_b}{\partial t} \right)_k = \alpha \omega_{sk} (C_{*k} + C_k) \quad (31)$$

6.1.2 Enačbe za vrednotenje/ocenjevanje premestitvene zmogljivosti

V teoriji obstaja precej enačb za račun premestitvene zmogljivosti, vsaka pa ima svoje prednosti in slabosti oz. svoje področje uporabe v različnih pogojih.

Najbolj pogosto so uporabljene enačbe (modificirani) Ackers in White, SEDTRA (sestavljen model za različne frakcije – Laursen, Yang in MPM), Engelund in Hansen, Wu, Wang in Jia ter MPM (Meyer-Peter-Müller). V modelu CCHE2D je možnost uporabe prvih štirih enačb, enačba premestitvene zmogljivosti MPM pa je uporabna šele pri drobnih gramozih oz. bolj grobih plavinah.

Natančnejši vpogled v primernost enačb v modelu premestitvene zmogljivosti za akumulacijo HE Vrhovo bi dala primerjava rezultatov več scenarijev prodonosnosti, pri čemer bi vsak scenarij privzel svojo enačbo. Taki postopki pa zahtevajo različne prilagoditve parametrov (lastnosti računske mreže, parametri toka s prosto gladino oz. premestitvene zmogljivosti), kar za potrebe te naloge ni smiselno. V pomoč pri odločitvi za vrsto enačbe premestitvene zmogljivosti nam je bil model 2-D premestitvene zmogljivosti akumulacije HE Brežice (Geateh, 2010), kjer se je (najnovejša) enačba Wu, Wang in Jia (2000) izkazala kot najustreznejša, zato modeliranje v akumulaciji HE Vrhovo v nadaljevanju utemeljemo na tej enačbi.

6.1.2.1 Enačba premestitvene zmogljivosti Wu, Wang in Jia (Wu et al., 2000)

Osnovna enačba (Wu et al., 2000) se glasi:

$$q_{bk} = \Phi_{bk} \left(p_{bk} \sqrt{\left(\frac{\gamma_s}{\gamma} - 1 \right) g d_k^3} \right) \quad (32)$$

$$\Phi_{bk} = 0,0053 \left[\left(\frac{n'_g \tau_b}{n_g \tau_{ck}} - 1 \right) \right]^{2,2} \quad (33)$$

kjer je q_{bk} ravnotežna stopnja transporta k -tega velikostnega razreda (frakcije) na enoto širine, Φ_{bk} brezdimenzionalna kapaciteta prodonosnosti, p_{bk} gradacija materiala dna struge, d_k premer k -tega velikostnega razreda plavin, τ_{ck} kritična strižna napetost, τ_b strižna napetost na dno struge, n_g Manningov koeficient izgub in n'_g Manningov koeficient, povezan s hrapavostjo ostenja.

Kritična strižna napetost τ_{ck} se izračuna po enačbi:

$$\tau_{ck} = 0,03(\gamma_s - \gamma) d_k \left(\frac{p_{hk}}{p_{ek}} \right)^{0,6} \quad (34)$$

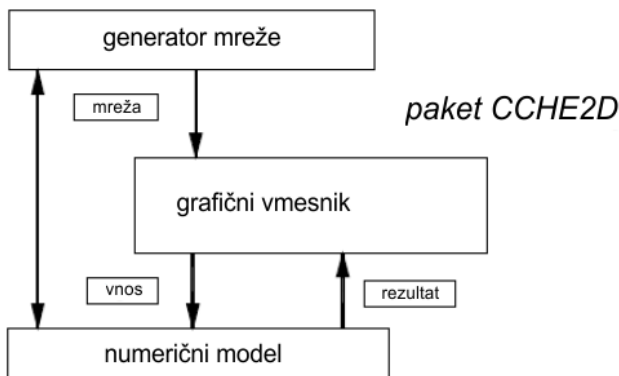
$$p_{hk} = \sum_{j=1}^N p_{bj} \frac{d_j}{(d_k + d_j)} \quad (35)$$

$$p_{ek} = \sum_{j=1}^N p_{bj} \frac{d_k}{(d_k + d_j)} \quad (36)$$

kjer sta p_{hk} in p_{ek} verjetnosti izpostavljenosti posameznih zrn plavin vodnemu toku – če je dno struge sestavljeno iz več različnih velikosti zrn, je večja verjetnost, da bo večje zrno bolj izpostavljeno toku.

6.1.3 Struktura modela CCHE2D

CCHE2D je programski paket za dvodimenzijsko simulacijo toka s prosto gladino, premestitvene zmogljivosti in ostalih morfoloških procesov. Sestavljen je iz dveh delov, generatorja mreže (angl. *mesh*) in grafičnega vmesnika.



Slika 26: Struktura programskega paketa CCHE2D
Figure 26: Schematic structure of CCHE2D software package

V prvih korakih modeliranja je treba izdelati računsko mrežo z orodjem za generiranje mreže (angl. *mesh generator*) na osnovi batimetričnih in ostalih topografskih podatkov. Elementi mreže so pravokotni, pri čemer se pri generiranju mreže stremi k elementom, ki se v čim večji meri približajo kvadratu.

V splošnem pa se postopek znotraj orodja za generiranje mreže deli na naslednje korake:

- določanje vplivnega območja,
- generiranje algebraične mreže,
- generiranje numerične mreže (gladkost in pravilnost elementov mreže se določa z dodatnimi iteracijami),
- interpolacija batimetrije,
- priprava rezultatov za uporabo v grafičnem vmesniku, kjer poteka simulacija (CCHE2D-GUI; angl. *GUI = graphical user interface*).

CCHE2D-GUI je programsko okolje s štirimi glavnimi funkcijami:

- priprava začetnih in robnih pogojev,
- priprava parametrov modela,
- zagon simulacije,
- vizualizacija rezultatov simulacije.

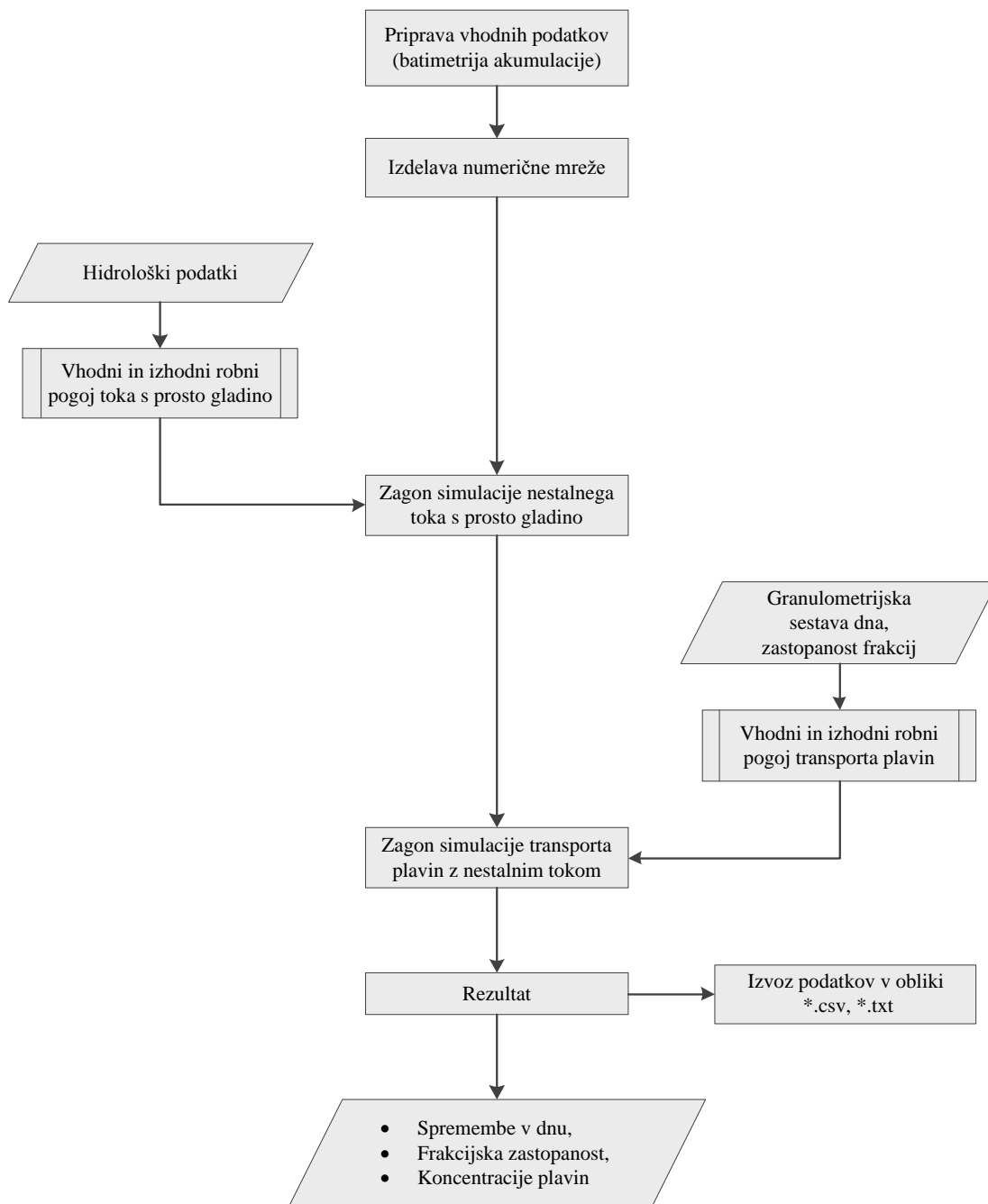
Preglednica 9: Postopek priprave in zagona simulacije ter vizualizacije rezultatov simulacije
Table 9: Data preparation, simulation run and visualisation of simulation results procedure

| KORAK | POSTOPEK | SIMULACIJA TOKA S PROSTO GLADINO | SIMULACIJA TRANSPORTA PLAVIN |
|-------|----------------------------|---|--|
| 1 | Izdelava mreže | | |
| 2 | Določitev začetnih pogojev | Začetno stanje dna struge | Erodibilnost dna struge |
| | | Začetni nivo vodne gladine | Maksimalna debelina odloženih plavin |
| | | Hrapavost in oblikovitost dna (n_g) | Maksimalna debelina erozije |
| | | | Debelina računske plasti (angl. <i>layer 1–3</i>) |
| | | | Granulometrijski vzorec (layer 1–3) |

Preglednica se nadaljuje na naslednji strani

Nadaljevanje preglednice

| KORAK | POSTOPEK | SIMULACIJA TOKA S PROSTO GLADINO | SIMULACIJA PREMESTITVENE ZMOGLJIVOSTI |
|---------------------------------|----------------------------|---|---|
| 3 | Določitev robnih pogojev | Vhodni robni pogoj – stalni tok/nestalni tok | Vhodni robni pogoj – koncentracija lebdečih plavin |
| | | Izhodni robni pogoj <ul style="list-style-type: none"> ▪ gladina vode (absolutna) ▪ diagram odvisnosti pretoka od gladine (Q-h) ▪ diagram odvisnosti gladine od časa (h-t) | Izhodni robni pogoj – masni tok [kg/s] |
| 4 | Priprava parametrov modela | Časovni korak (čas simulacije) | Velikostni razredi plavin |
| | | Število časovnih korakov | Določitev značilnega vzorca sestave dna struge (poroznost, velikostni razredi) |
| | | Vmesna datoteka | Način transporta plavin <ul style="list-style-type: none"> ▪ premeščene plavine (rinjene + lebdeče) |
| | | Parametri izhodne datoteke rezultatov glede na časovni korak | |
| | | Parametri turbulentnega toka <ul style="list-style-type: none"> ▪ model parabolične vrtnične viskoznosti ▪ model mešalne dolžine ▪ model k-ε | <ul style="list-style-type: none"> ▪ premeščene plavine (rinjene) ▪ premeščene plavine (lebdeče) |
| | | Račun nestalnega toka s prosto gladino | Način simulacije <ul style="list-style-type: none"> ▪ počasna sprememba dna s stalnim tokom ▪ hitra sprememba dna z nestalnim tokom |
| | | Hrapavost in oblikovitost dna (n_g , K_s) | |
| | | Coriolisov koeficient | Specifična teža plavin |
| | | Gravitacijski pospešek | Erodibilnost brežin |
| | | Von Karmanova konstanta | |
| Kinematična viskoznost tekočine | | | |
| 5 | Zagon simulacije | Zagon z ničelne točke (angl. <i>cold start</i>) | Zagon simulacije transporta plavin z ničelne točke |
| | | Zagon simulacije na točki že izračunanih parametrov (angl. <i>hot start</i>) | Zagon simulacije transporta plavin na točki že izračunanih parametrov |
| 6 | Vizualizacija rezultatov | Izvoz v obliki ASCII ali *.txt, *.csv po posameznih linijah računske mreže ali v določeni točki | Izvoz v obliki ASCII ali *.txt, *.csv po posameznih linijah računske mreže ali v določeni točki oz. poligonu |



Slika 27: Shematski prikaz poteka simulacije od generiranja računske mreže do rezultatov
Figure 27: Simulation flowchart – from generating numerical grid to the results

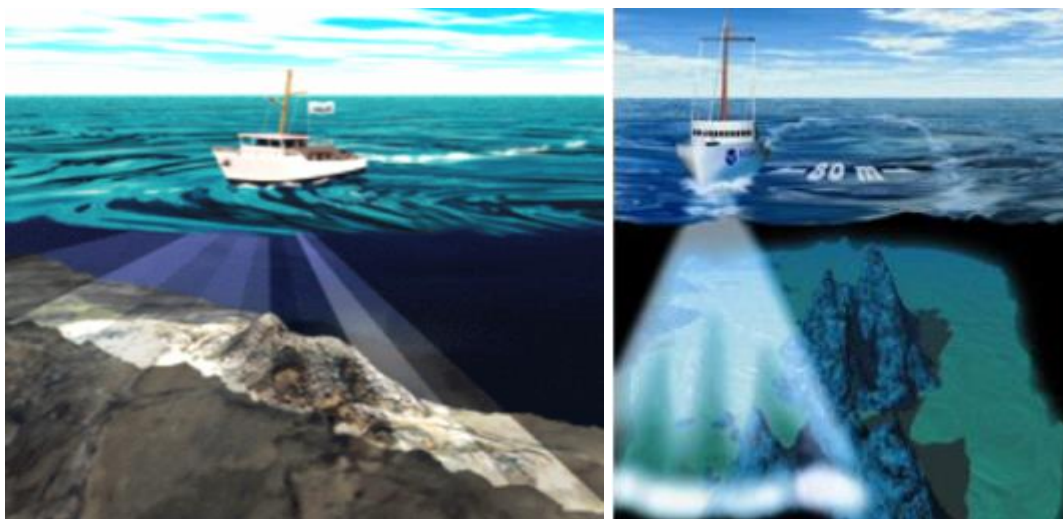
7 STRUKTURA PODLAG IN VHODNIH PODATKOV SIMULACIJE PREMESTITIVNE ZMOGLJIVOSTI

7.1 Batimetrija – digitalni model akumulacije HE Vrhovo

Batimetrija akumulacije HE Vrhovo je bila izdelana s pomočjo večsnopne tehnologije (angl. *multibeam*) (Izmera bazena HE Vrhovo, 2010). Meritve globin dna (batimetrija) s sonarji temeljijo na napravah, ki oddajo zvok in izmerijo čas, ko se odbiti zvok vrne do izvora.

Bistvo multibeam (večsnopne) tehnologije je uporaba sonarjev, ki merijo dno pod plovilom z množico sond naenkrat. 240 sond vsako 1/60 sekunde posname podatke o globinah pod seboj. Ker je kot, v katerem so razporejene sonde, 160° , se lahko naenkrat posname območje dna širine 10 x globina vode. Pri 5 m globine vode je to 50 m pas pod plovilom. Tako je v smeri, pravokotni na smer plovbe, izmerjenih 240 točk na 50 m ali vsaj ena točka na 2 dm. Pri hitrosti vožnje plovila okoli 3 m/s (10 km/h) in frekvenci snemanj 60 s^{-1} se dobi posneto točko v smeri vožnje prav tako vsake 0,2 m. Za natančnejše meritve se zoži kot med sondami ter upočasni vožnjo plovila.

Vožnje se planirajo tako, da se posneta območja delno prekrivajo in se s tem preverja točnost meritev.

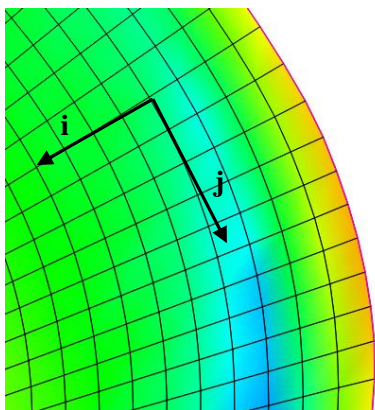


Slika 28: Multibeam tehnologija meritev dna
Figure 28: Multibeam reservoir surface scanning

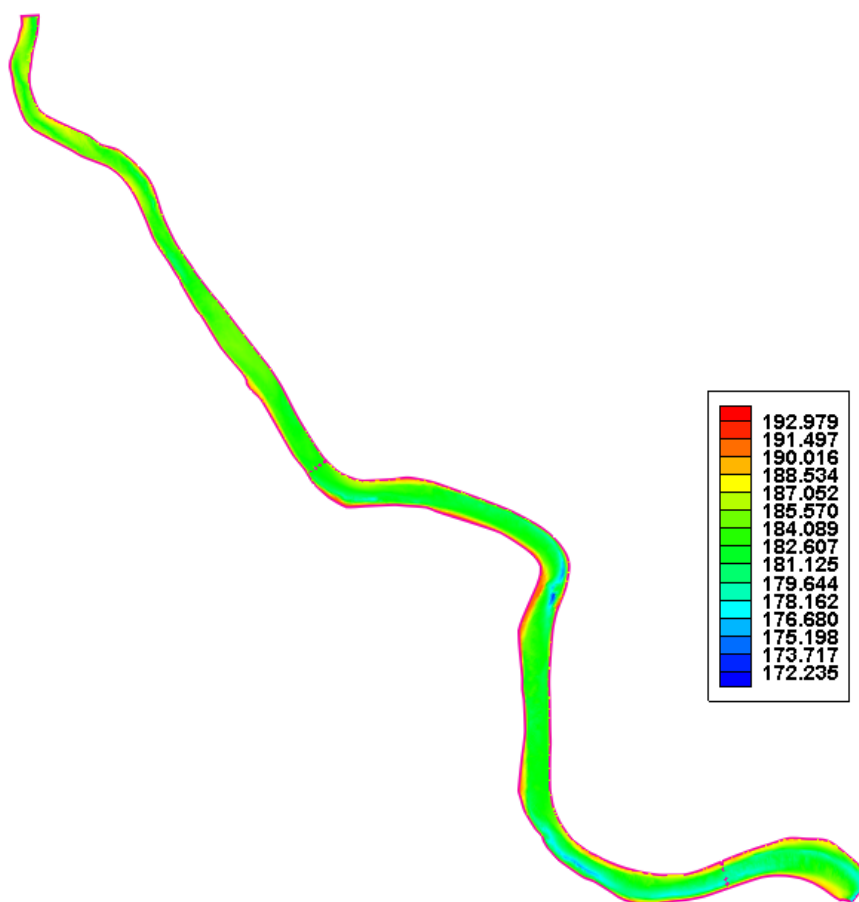
7.2 Izdelava računske mreže

Osnova generiranja računske mreže so podatki batimetrije akumulacije HE Vrhovo (format ASCII txt), posnete v mesecu februarju 2010 z večsnopno tehnologijo. Na robovih posnetka smo generirali

rob računске mreže (angl. *boundary*). Računska mreža ima svoj lasten koordinatni sistem, in sicer **ij**, kjer **i** poteka v smeri prečno na sredinsko linijo akumulacije, **j** pa vzdolž akumulacije. V smeri **i** je bila torej mreža sestavljena iz 17 pravokotnih elementov, v smeri **j** pa iz 869. Zmnožek elementov v smeri **i** in **j** poda končno število elementov v mreži (14.773).



Slika 29: Lokalni koordinatni sistem ij računске mreže
Figure 29: Local coordinate system ij numerical grid



Slika 30: Batimetrija akumulacije HE Vrhovo (vir terenskih podatkov: Izmera bazena HE Vrhovo, 2010)
Figure 30: Bathymetry of Vrhovo reservoir (field data source: Izmera bazena HE Vrhovo, 2010)

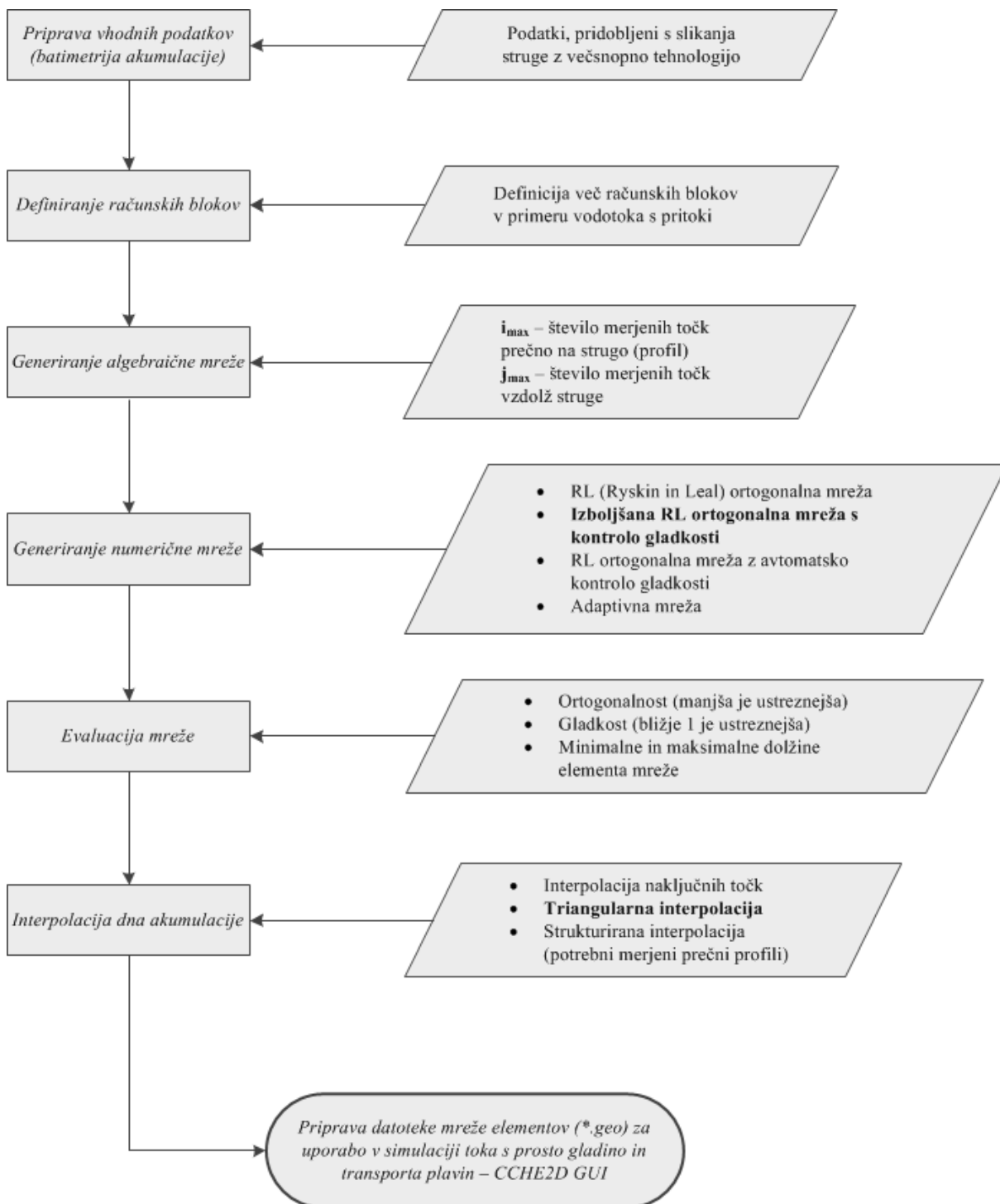
S tem smo generirali algebraično mrežo, ki služi za podlago numerični ortogonalni mreži. Algebraična mreža sama je premalo natančna, saj generira računsko mrežo le na podlagi interpolacije, medtem ko je numerična ortogonalna mreža izdelana na podlagi reševanja sistema parcialnih diferencialnih enačb. Na podlagi več izdelanih primerov mreže se je na koncu izkazalo, da je numerično najbolj stabilna in robustna *izboljšana RL (Ryskin in Leal) ortogonalna numerična mreža*, sestavljena iz 14.773 kvazi pravokotnikov, katere vpeljava je predlagal Zhang (2007). Izboljšani sistem generiranja ortogonalne mreže (dvodimenzionalni adaptivni eliptični sistem) temelji na osnovnem RL sistemu ortogonalnosti in načelu enakomerne porazdelitve elementov mreže (adaptivnost), pri čemer avtor upošteva tudi gladkost mreže z uporabo metode, ki pravi, da so izkrivljene funkcije določene tako s faktorji razmerij dimenzij elementov mreže kot tudi s povprečnimi faktorji razmerij konstantnih linij mreže (Zhang et al., 2006). Ustrezno ortogonalnost in gladkost mreže smo dosegli z določenim številom iteracij (običajno zadostuje 10 iteracij).

Preglednica 10: Podatki o dimenzijah elementov in gladkosti računske mreže
Table 10: Numerical cells dimensions and grid smoothness

| Ortogonalnost mreže | |
|---|------|
| Povprečna deviacija ortogonalnosti | 4,2 |
| Maksimalna deviacija ortogonalnosti | 36,6 |
| Gladkost mreže | |
| Povprečno razmerje med dimenzijama elementa (angl. <i>aspect ratio</i>) | 1,2 |
| Maksimalno razmerje med dimenzijama elementa | 2,3 |
| Minimalna in maksimalna dolžina elementa | |
| Minimalna dolžina elementa v i smeri | 1,6 |
| Maksimalna dolžina elementa v i smeri | 15,1 |
| Minimalna dolžina elementa v j smeri | 4,4 |
| Maksimalna dolžina elementa v j smeri | 13 |

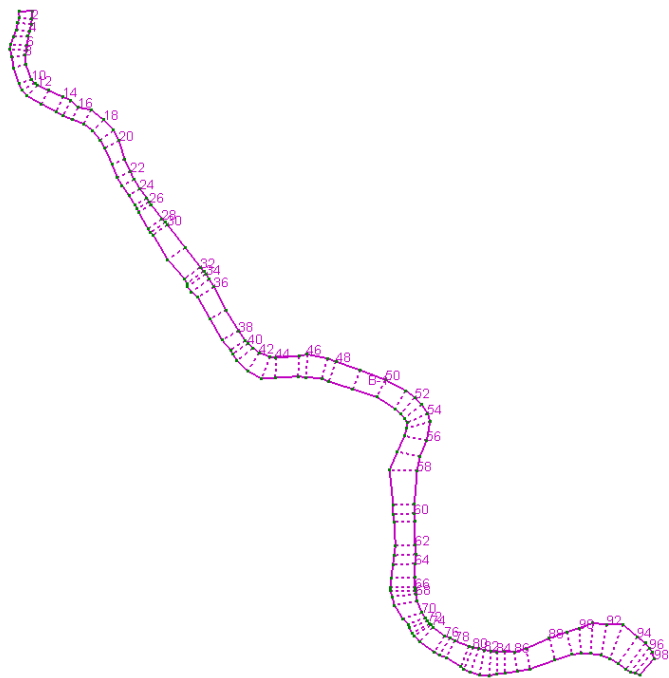
S približevanjem gladkosti mreže k vrednosti 1,0 se izboljša numerična stabilnost računske mreže, pri čemer smo pri določenih vrednostih morali sprejeti kompromis med čim bolj stabilno podlago modela in čim krajšim računskim časom. Z več poskusi se je izkazalo, da sta vrednosti gladkosti mreže, kot sta prikazani v zgornji preglednici, optimum za nadaljnje modeliranje. Z nadaljnjimi iteracijami se računski časi podaljšujejo, pri čemer je doprinos pri numerični stabilnosti modela zanemarljiv. Pri tem je treba poudariti, da so parametri iz zgornje tabele specifični za računsko območje mreže akumulacije

HE Vrhovo. Število dodatnih iteracij je smiselno v primeru kompleksnejših računskih območij, kjer na primer vodotok bolj meandrira ali pa vsebuje otoke in ima bolj razčlenjene brežine.



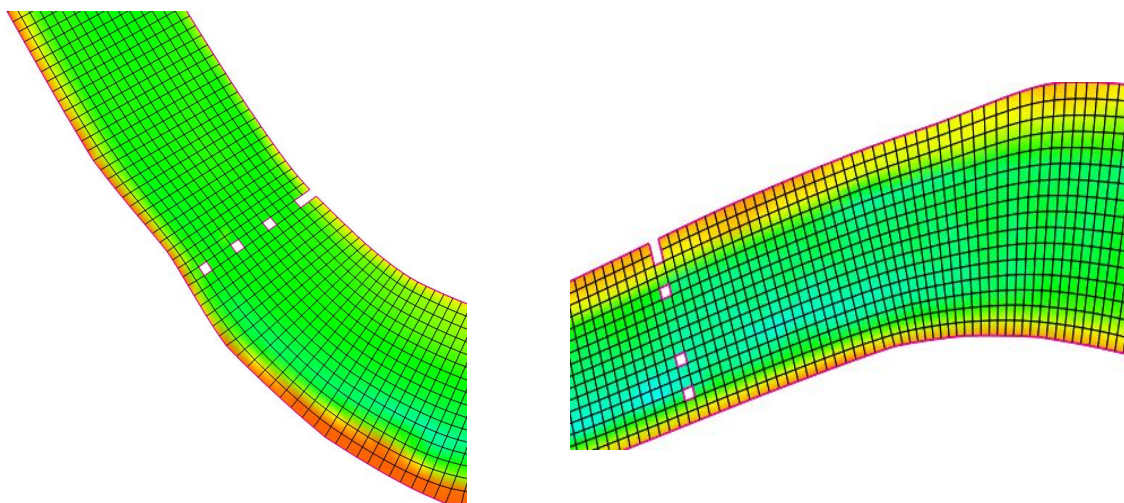
Slika 31: Postopek generiranja računske mreže (izbrani postopki so odebeltjeni)

Figure 31: Numerical grid generation (selected individual procedures are presented bold)



Slika 32: Mejno območje obdelave, ki je hkrati tudi območje numerične mreže modela
Figure 32: Numerical grid boundary

Programski paket CCHE2D v splošnem ne omogoča neposredne integracije mostov in hidrotehničnih objektov v model, zato smo stebre dveh mostov na območju akumulacije HE Vrhovo vnesli kot posamezne (neaktivne) mejne elemente, kjer se nahajajo stebri. Model tako privzame neaktivne elemente znotraj struge kot ovire v vodnem toku (stebri mostov).



Slika 33: Stebri mostov kot neaktivni elementi računske mreže v primeru cestnega mostu pri Radečah (levo) in pri naselju Vrhovo, 700 m gorvodno od pregrade HE Vrhovo (desno)
Figure 33: Bridge columns as inactive numerical grid cells in the case of road bridge in Radeče (left) and near Vrhovo village, approx. 700 m upstream of HPP Vrhovo dam (right)

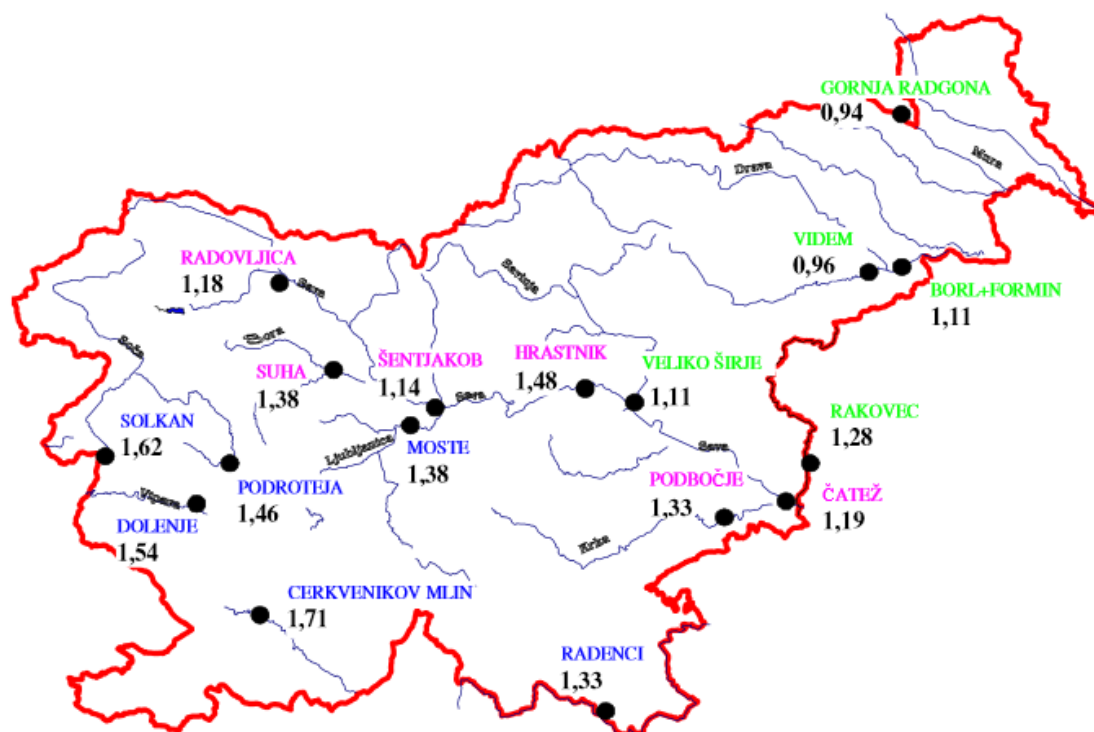
Na koncu postopka se v generatorju mreže izvede še ortogonalna interpolacija batimetrije struge z vozlišči računske mreže, rezultat pa predstavlja vhodni podatek za simulacijo toka s prosto gladino in transporta plavin v drugem delu modela (CCHE2D – GUI).

7.3 Priprava hidroloških podlag za modeliranje transporta plavin

7.3.1 Časovni obseg hidrološkega dogodka

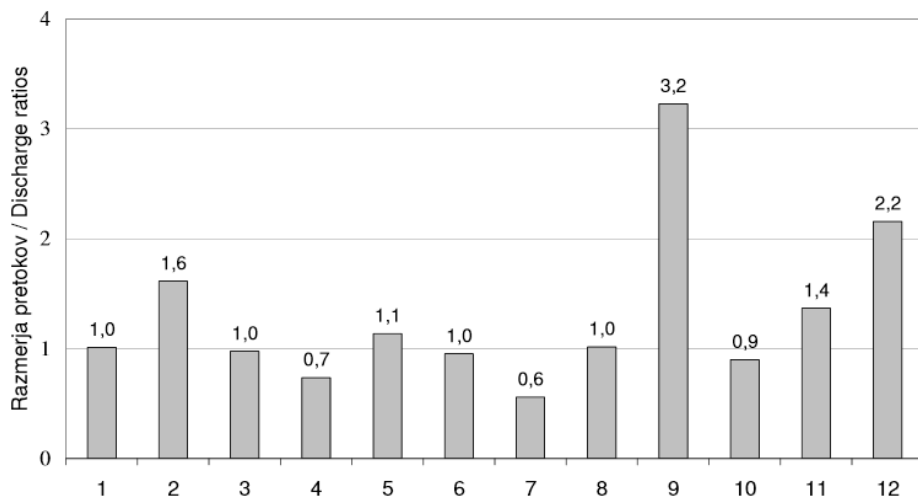
V magistrski nalogi smo imeli za cilj kar najbolj optimalno dopolnitev poslovnika obratovanja HE Vrhovo z vidika ravnanja s plavinami. Za tako analizo je najbolj primerna obravnava ekstremnega hidrološkega dogodka (od leta 1993 naprej), ki z ovojnico nizkih/srednjih in ekstremno velikih pretokov podaja podlago za preučevanje morfoloških procesov v akumulaciji HE Vrhovo.

V obdobju od leta 1993 do danes so se na povodju spodnje Save (kamor spada HE Vrhovo), tudi v luči nekoliko bolj razgibanega klimatskega obdobja, zvrstili številni hidrološki ekstremi (npr. leta 1998, 2000 itd.), med temi pa najbolj izstopa hidrološki dogodek v septembru 2010, ko so bile na območju HE Vrhovo dosežene stoletne vode (Q_{100}).



Slika 34: Razmerja med Q_{sr} leta 2010 in povprečnimi srednjimi pretoki v obdobju 1971–2000 (vir: Pretoki rek v letu 2010, 2011)

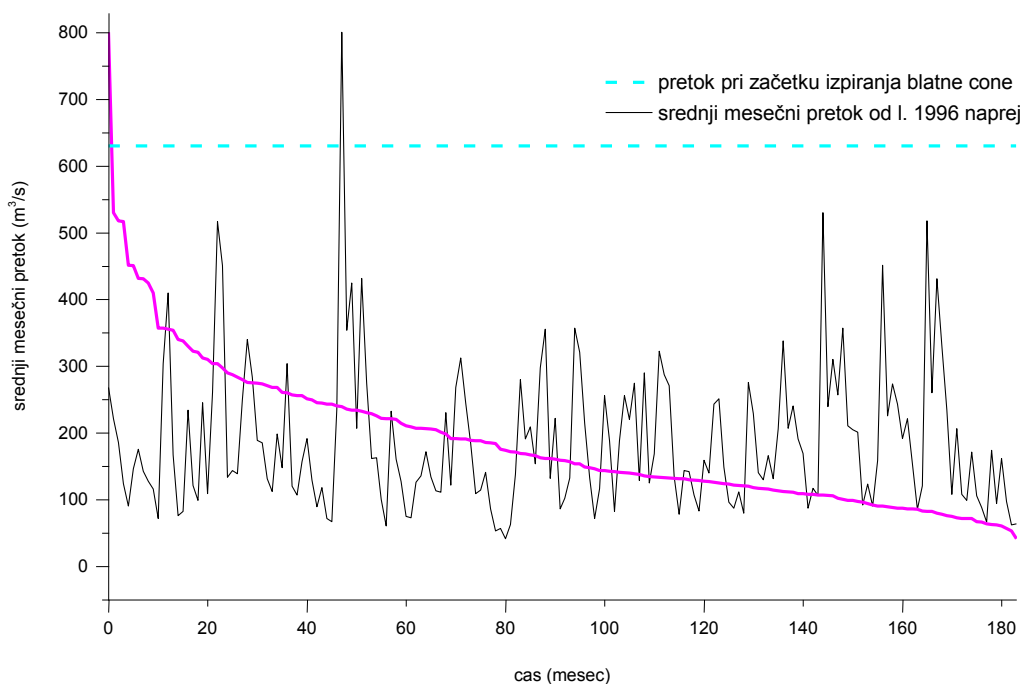
Figure 34: Mean annual flow of 2010 ratio to mean flow of the period 1971–2000 (source: Pretoki rek v letu 2010, 2011)



Slika 35: Razmerja med Q_{sr} leta 2010 in obdobjem 1971–2000. Razmerja so izračunana kot povprečja razmerij na izbranih merilnih postajah (vir: Pretoki rek v letu 2010, 2011)

Figure 35: Mean annual flow of 2010 ratio to mean flow of the period 1971–2000. Ratios are determined as average ratios at selected gauging stations (source: Pretoki rek v letu 2010, 2011)

Leto 2010 je doseglo nadpovprečno vodnatost predvsem na račun meseca septembra. Na relevantnih merilnih postajah (VP Hrastnik na Savi in VP Veliko Širje na Savinji) so bili srednji letni pretoki večji od obdobjnega povprečja tudi do 50 % (VP Hrastnik), povprečje razmerij za merilne postaje (slika 34) pa za september 2010 kaže več kot trikratno povečanje Q_{sr} glede na Q_{sr} 1971–2000.



Slika 36: Krivulja trajanja srednjega mesečnega pretoka v obdobju 1996–2012 v odnosu do pretoka ob začetku izpiranja blatne cone

Figure 36: Duration curve of mean monthly flow of the period 1996–2012 in relation to the flow at the initiation of suspended load laden zone flushing

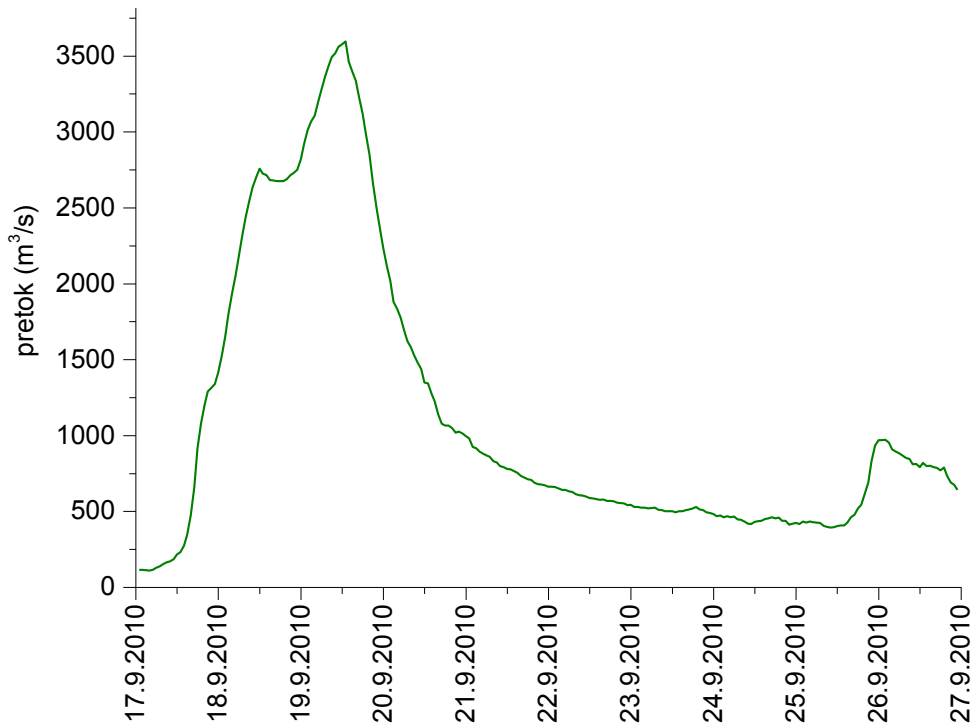
Pretok, pri katerem se domnevno začne izpiranje blatne cone (plavine velikosti $d < 1$ mm), je bil v obdobju 1996–2012 dosežen/presežen dva meseca, kar je 1 % celotnega obdobja. V času ekstremnega poplavnega dogodka iz septembra 2010, ko so bili pretoki višji od $630 \text{ m}^3/\text{s}$ le 9 dni, se je premestila letošnja količina plavin za leto 2010.

Ekstremno visoki pretoki v septembru 2010 so se pojavili predvsem v obdobju med 17. in 19. septembrom, za boljši vpogled v morfološko dogajanje v akumulaciji pa smo računsko obdobje za modeliranje razširili na čas med 17. septembrom (nastop ekstremno visokih voda) in 26. septembrom 2010, ko so se pretoki na profilu HE Vrhovo bližali $Q_{\text{oblatna}} = 630 \text{ m}^3/\text{s}$ (pretok, pri katerem pride do izpiranja naplavin ob normalni obratovalni gladini). Za izbrano računsko obdobje ocenjujemo, da v svojem sorazmerno kratkem obdobju zajame relevantno letošnje morfološko dogajanje v akumulaciji HE Vrhovo, saj bi se z zajemom celega leta 2010 bistveno podaljšal čas izračuna, s tem da so obdobja v letu 2010, ko je pretok na nivoju $Q < 630 \text{ m}^3/\text{s}$ ($= Q_{\text{oblatna}}$), s stališča transporta plavin za cilje te naloge nezanimiva. Pretok $Q > Q_{\text{oblatna}}$ se v celotnem letu 2010 pojavi le v 6 % primerov.

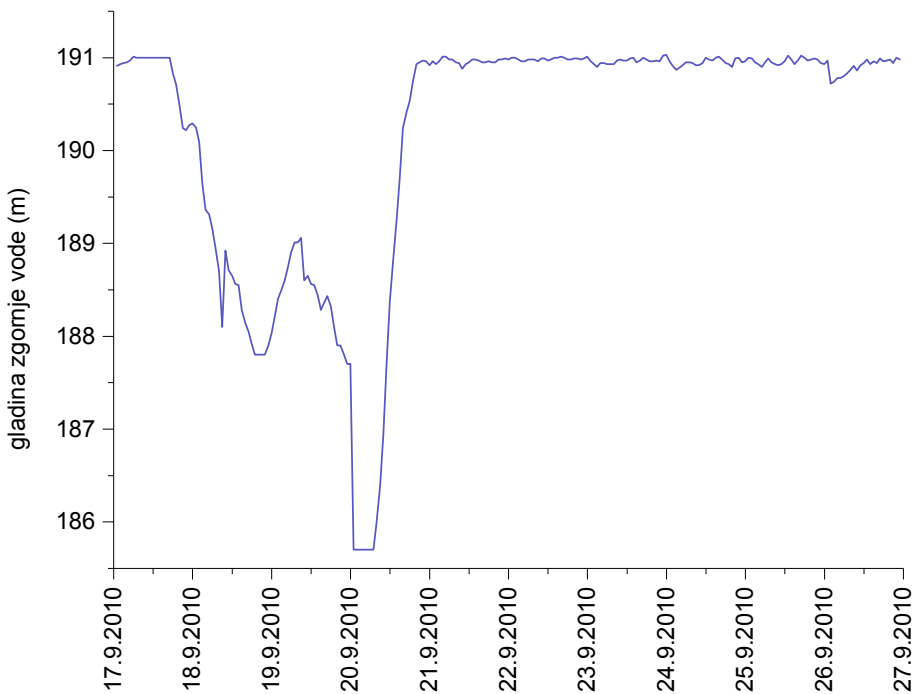
7.3.2 Hidrološka izhodišča modela – nestalni tok s prosto gladino

Visokovodni dogodek med 17. in 20. septembrom 2010 je bil ekstremni pojav, ki se s svojo konico pojavlja v povprečju le z enoodstotno verjetnostjo, kljub temu pa je oblika hidrograma oz. časovna razporeditev pretokov (razpon pretokov med Q_{sr} in Q_{100}) primerna za hidrološko podlago modeliranja transporta plavin in kasneje novelacije obratovalne/denivelacijske krivulje (vhodni, »podaljšani« hidrogram je sicer obsegal pretoke med 17. in 26. septembrom zaradi neenoznega odnosa med koncentracijami plavin in pretoki). Upravljaivec na pregradnem objektu upravlja z zapornicami in zaklopkami glede na velikosti pretokov na VP Hrastnik/Veliko Širje, velikosti pretokov na profilu pregradnega objekta pa se računajo iz moči na pragu.

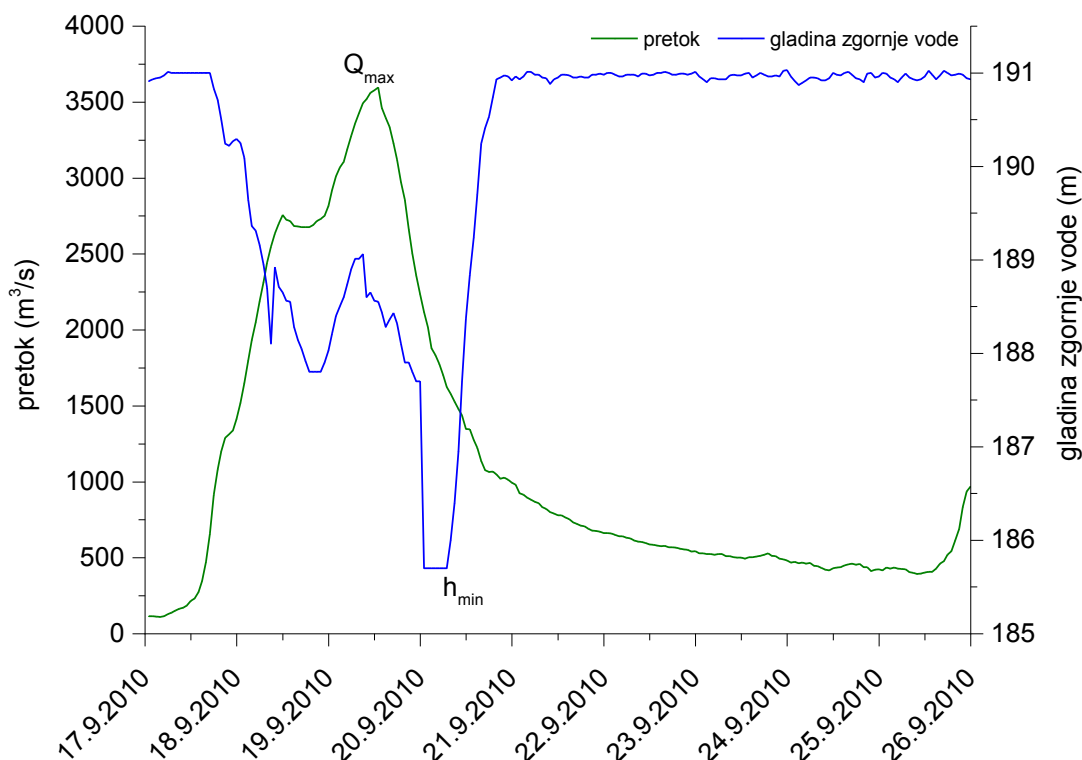
Hidrogram tega »podaljšanega« VV dogodka je klasične oblike (glej sliko 37) in kaže, da so bile ocenjene stoletne vode ($p = 0,01 - Q_{100}$) presežene 12 ur in desetletne vode ($p = 0,1 - Q_{10}$) 36 ur. Maksimalni izmerjeni pretok je bil na profilu pregrade HE Vrhovo dosežen 19. septembra 2010 ob 13:00 ($3.596 \text{ m}^3/\text{s}$). Pretok je po petih dneh (22. 9. 2010) sicer upadel pod mejo začetka izpiranja iz blatne cone, vendar se vpliv plavin (predvsem melj) na morfološke razmere v akumulaciji ne zmanjšuje povsem skladno z dinamiko pretokov v strugi oz. se povišane koncentracije plavin pogosto pojavijo še po stabilizaciji pretočnih razmer; torej lahko zaradi velikosti predhodnih pretokov (do 22. 9. 2010) pričakujemo »podaljšan« vpliv zaradi naravne kalnosti še pri $Q < Q_{\text{oblatna}}$.



Slika 37: Hidrogram na profilu HE Vrhovo za obdobje 17. 9.–26. 9. 2010 (vir podatkov: SEL, d. o. o.)
Figure 37: Hydrograph at the HPP Vrhovo dam for period of 17. 9.–26. 9. 2010 (data: SEL, d. o. o.)



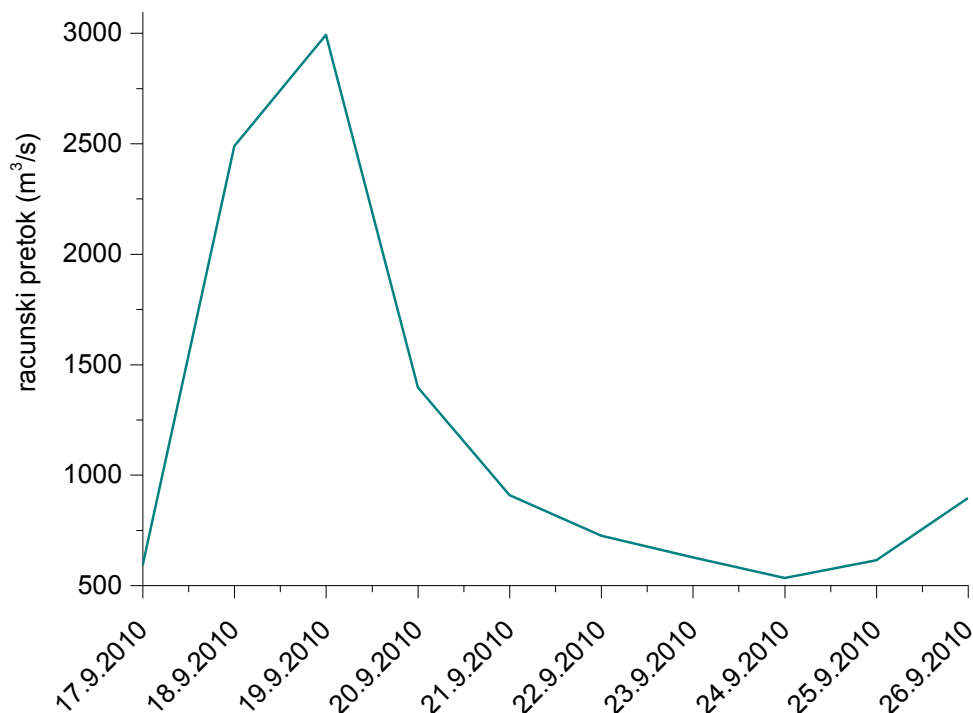
Slika 38: Gladina zg. vode h_{zg} (17. 9.–26. 9. 2010) kot izhodni robni pogoj modela (vir podatkov: SEL, d. o. o.)
Figure 38: Stage hydrograph (17. 9. – 26. 9. 2010) as a downstream boundary condition (data: SEL, d. o. o.)



Slika 39: Časovno sovpadanje hidrograma in nivoja gladine zgornje vode h_{zg} (obdobje 17. 9.–26. 9. 2010) na profilu pregrade HE Vrhovo

Figure 39: Coinciding of flow and stage hydrograph at the HPP Vrhovo dam (17. 9.–26. 9. 2010)

Za natančnejšo hidrološko sliko poplavnega dogodka septembra 2010 bi potrebovali vsaj še eno merilno mesto pretokov in koncentracij plavin na območju HE Vrhovo. Ena od potencialnih lokacij monitoringa plavin skupaj z meritvami pretokov, gladin in temperatur je 500 m dolvodno od sotočja Save in Savinje (Hidroelektrarne na spodnji Savi, 2012), kjer je zrnavostna sestava dna nekoliko bolj enakomerno zastopana (prisotnost večjih peskov, ki jih tik nad pregrado v času Q_{sr} ni). Predlog hidrološkega monitoringa kalnosti (Mikoš, 2012b) izpostavlja potrebo po dveh merilnih mestih (hidrološka profila) za vsako akumulacijo HE za izvedbo neprekinjenih meritev lebdečih plavin, in sicer usklajeno s predlaganimi merilnimi mesti (vodomeri), ki so namenjeni usklajenemu obratovanju elektrarn v verigi na osnovi spremljanja gladin v času povišanih in poplavnih pretokov. Do leta 1994 (meritve koncentracij so se izvajale do vključno leta 1993) je delovalo merilno mesto VP Radeče (vodostaj in temperatura sta se merila do leta 1997 oz. 1998), po letu 1993 pa so meritve koncentracij sporadične oz. jih ni. Zaradi tega so bile že pri osnovah modeliranja toka s prosto gladino in transporta plavin potrebne določene aproksimacije, na primer ocena dejanskega, vhodnega hidrograma (vhodni robni pogoj) modela tik pod sotočjem Save in Savinje pri Zidanem Mostu. Aproksimacijo smo zaradi pomanjkanja podatkov izvedli na podlagi podatkov o pretokih iz VP Hrastnik na Savi, VP Veliko Širje na Savinji in podatkov na profilu pregrade HE Vrhovo (vpliv Sopote pri Radečah smo zanemarili).



Slika 40: Računski hidrogram kot vhodni robni pogoj

Figure 40: Adjusted flow hydrograph as an upstream boundary condition

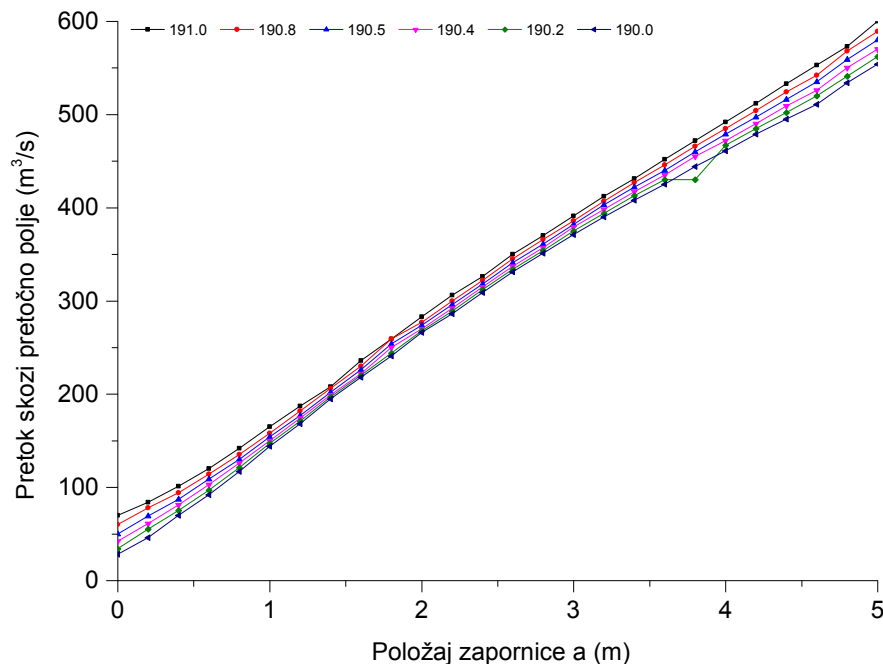
Na sliki 40 je vhodni hidrogram na mestu tik dolvodno od sotočja Save in Savinje, ocenjen z relacijo

$$Q_{vhodni} = Q_{Hrastnik} + Q_{Veliko\ Širje} + 0,063(Q_{Hrastnik} + Q_{Veliko\ Širje}) \quad (37)$$

Faktor 0,063 izhaja iz kalibracije pretokov s pomočjo podatkov o pretokih leta 1994 (zadnje leto meritev pretoka na VP Radeče) na VP Radeče, VP Hrastnik in VP Veliko Širje na Savinji.

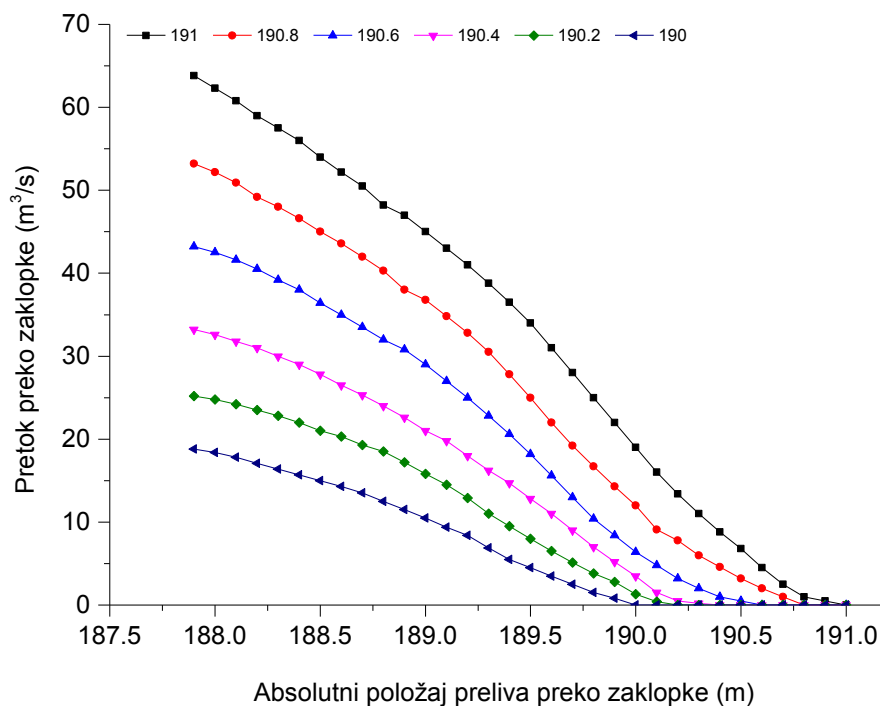
7.3.3 Hidravlične razmere na pregradnem objektu

Podatki o gladinskem stanju na profilu pregrade HE Vrhovo predstavljajo spodnji robni pogoj modela toka s prosto gladino in ustrezajo obdobju med 17. in 26. septembrom 2010. Gladinsko stanje na spodnjem robu modelnega območja (h_{zg}) je neposreden odraz upravljanja z objekti na elektrarni. Z upravljanjem turbin (maksimalna požiralnost 500 m³/s), zaklop na zapornicah (pretočna zmogljivost pri nominalni zaježitveni koti 191,0 je 319 m³/s) in nazadnje tudi samih zapornic v času ekstremno visokih pretokov se gladina v akumulaciji (torej h_{zg}) ustrezno zniža glede na pričakovan pretok iz gorvodnih odsekov vodotokov.



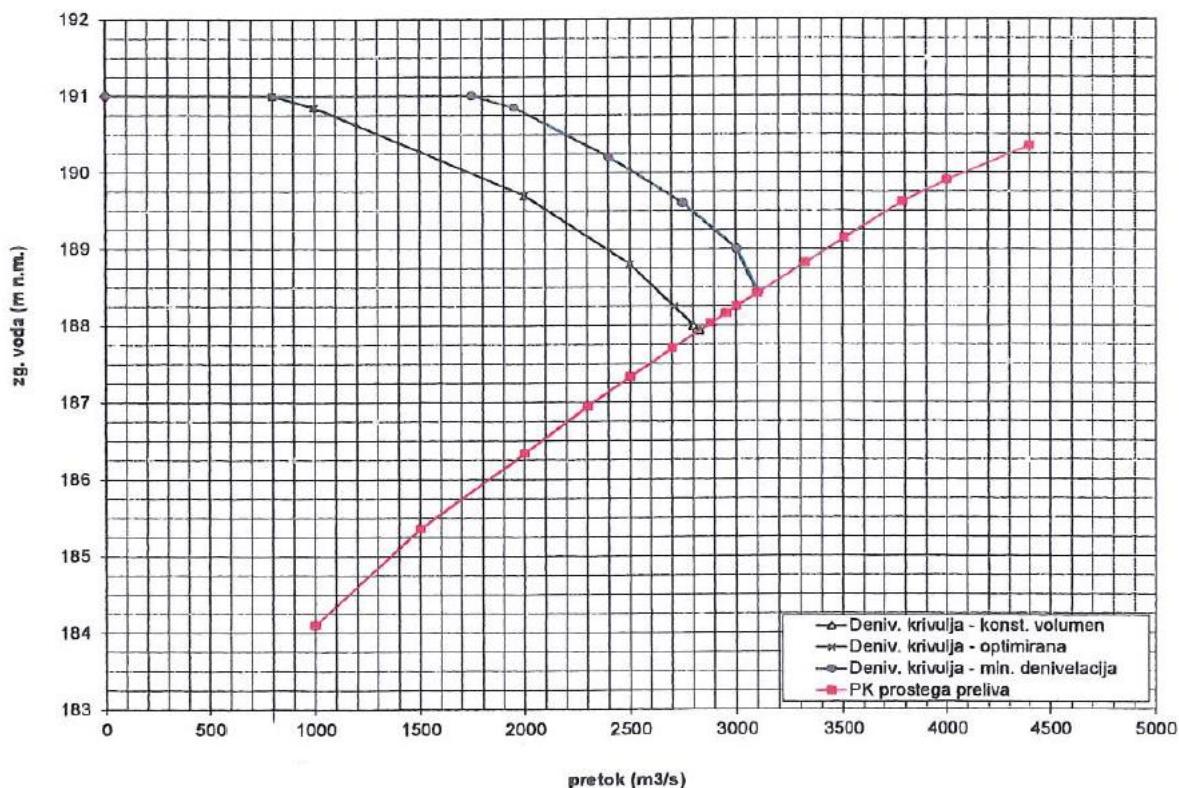
Slika 41: Konsumpcijske krivulje za pretočno polje ob spuščeni zaklopkah za različne nivoje zgornje vode (h_{zg})
Figure 41: Operating curves for an individual spillway (with flaps lowered) at various upstream water levels

Slika 41 podaja pretok skozi posamezno pretočno polje pod zapornico ob popolnoma spuščeni zaklopki. Pretok skozi pretočno polje je odvisen od dviga segmenta a (položaj zapornice) in od nivoja zgornje vode h_{zg} . Absolutna kota stika segmentnih zapornic s hrbtom prelivnega polja je 180,5 m. Zaprta zapornica sama po sebi še ne zagotavlja ničelnega pretoka skozi prelivna polja, saj se upošteva dodatna regulacija z manevriranjem z zaklopko, kot izhaja s slike 42.



Slika 42: Pretok prek zaklopke pri različnih gladinah zgornje vode (h_{zg})
Figure 42: Flow over individual flap at various upstream water levels

Na sliki 42 podajamo pretok prek zaklopke segmentne zapornice, ki je odvisen od absolutnega položaja preliva prek zaklopke ter od nivoja zgornje vode h_{zg} . Zaklopka segmentne zapornice se uporablja v primeru delovne denivelacije gladine (-1,0 m), tj. v rangu 190,0–191,0 m.



Slika 43: Denivelacijske krivulje HE Vrhovo (Hidroelektrarne na spodnji Savi, 2012)

Figure 43: Estimated operating rule curve for HPP Vrhovo (Hidroelektrarne na spodnji Savi, 2012)

Spodnja obratovalna gladina akumulacije HE Vrhovo je za potrebe remonta, čiščenja mulja, plavja in ostalih tehničnih ukrepov omejena na 188,0 (187,90) m. Izjeme se pojavijo pri ekstremno visokih pretokih (kot je bil poplavni dogodek v septembru 2010), ko se po smernicah obstoječega poslovnika obratovanja pri pretokih na profilu pregrade nad 3.100 m³/s zapornice nadzorovano popolnoma dvignejo in se vzpostavi naravni, nezajezeni pretok.

Slika 43 kaže optimizirane denivelacijske/obratovalne krivulje HE Vrhovo glede na obratovalni režim prevajanja visokovodnih valov prek HE (Hidroelektrarne na spodnji Savi, 2012). Kot optimalni obratovalni režim se je v tem primeru izkazal način obratovanja po pretoku s konstantnim volumnom v akumulaciji, pri čemer morfologija ni upoštevana oz. zgolj z vidika umerjenega koeficienta hrpavosti n_g .

Poleg vhodnega hidrograma in izhodnega gladinskega stanja na profilu pregrade HE Vrhovo je dodatni robni pogoj modela začetna gladina v akumulaciji, ki pa ne sme prekomerno odstopati od obratovalne gladine akumulacije (191,0 m), saj lahko to povzroči divergiranje modela in s tem

numerično nestabilnost. Izkazalo se je, da je optimalna izbira začetne kote gladine enaka maksimalni višini terena, izhajajoč iz interpolirane računske mreže.

Za začetno gladino akumulacije pri simulaciji z nestalnim tokom je bila tako izbrana gladina na koti 194,0 m (normalna obratovalna kota gladine je sicer 191,0 m, vendar se zaradi zagotavljanja numerične stabilnosti simulacije izbere nekoliko višja, »pomožna« vrednost).

Predpostavljamo, da bo z implementacijo modula transporta plavin v samem modelu mogoča dodatna optimizacija krivulje na sliki 43, saj bo upoštevan tudi vidik dinamike odlaganja in erozije plavin znotraj ekstremnega hidrološkega dogodka (kot je bil septembra 2010).

7.3.4 Umerjanje koeficienta hrapavosti akumulacije

Z zaježitvijo vodnega toka in nastankom akumulacije HE Vrhovo so se spremenile tudi hidravlične razmere v obravnavanem odseku (stacionaža 778.000–785.085), predvsem na račun spremenjenih morfoloških razmer v strugi in spremenjene granulometrijske krivulje (delež drobnozrnatih oz. lebdečih plavin se je glede na rinjene plavine znatno povečal). Zaradi tega se je spremenil tudi koeficient hrapavosti struge (n_g), ki bi ga morali umeriti, pri čemer za potrebe te naloge zadostuje prevzem umerjanja koeficienta hrapavosti iz predhodnih analiz na istem območju (Hidroelektrarne na spodnji Savi, 2012).

Izhajajoč iz literature smo umerjanje koeficienta hrapavosti izvedli na podlagi konice visokovodnega vala 19. septembra 2010 in nastopa konstantne velikosti pretoka in gladin 18. septembra 2010 ob 18:00. Za odsek med 785.085 (tik dolvodno od sotočja Save in Savinje) in 780.896 smo zaradi pomanjkanja podatkov o merjenih gladinah privzeli $n_g = 0,037$, za preostali odsek do pregrade HE Vrhovo pa je bil ugotovljen $n_g = 0,039$.

V sklopu modeliranja toka s prosto gladino in transporta plavin smo po celotnem obravnavanem odseku struge privzeli $n_g = 0,039$, s čimer smo na varni strani. V primerjavi z literaturo, kjer se je umerjal n_g , so gladine vode pri visokovodni konici vala (19. september 2010 ob 13:00 – 3.596 m³/s na profilu pregrade HE Vrhovo) na mestih VP Radeče in izliva Sopote v Savo enake oz. z zanemarljivimi razlikami (+5 cm). Spremembe (znižanje) n_g zaradi transporta plavin vzdolž akumulacije nismo upoštevali.

7.4 Izhodišča modela s stališča transporta plavin

V splošnem sta posledici transporta plavin kalnost (angl. *suspended load*) in prodonosnost (angl. *bed load*). Prodonosnost je pojav, ki v splošnem zajema (rinjene) plavine, ki se premeščajo v bližini rečnega dna, medtem ko kalnost povzročajo kalni delci (angl. *wash load*), sestavljeni pretežno iz delcev velikosti gline in melja, ki pritekajo v rečno strugo s pomočjo površinskega spiranja zemljin in se transportirajo neovirano (tudi ob Q_{sr}) brez posebne izmenjave z rečnimi plavinami v dnu (Mikoš, 2005). Z drugimi besedami se lahko taka kalnost poimenuje tudi naravna kalnost (Mikoš, 2012a). S pojavom visokovodnih oz. poplavnih razmer h transportu plavin pomembno prispevajo tudi lebdeče plavine, ki zajemajo nekoliko bolj grobe plavine, pretežno peske v velikosti med 0,06 in 2 mm. Te plavine se praviloma prenašajo le v času poplavnih pretokov, saj se s stabilizacijo pretočnih razmer ponovno odložijo na dnu reke. Taka poplavna kalnost je značilna za slovenske reke z izrazito hudourniško naravo, kjer so reke ob srednjem pretoku pretežno bistre in postanejo kalne le ob spremembi hidravličnih razmer ob poplavi (Mikoš, 2012a). Morfološke razmere v akumulaciji Vrhovo so, kot se je kasneje izkazalo z rezultati modeliranja transporta plavin, tipične za pojav poplavne kalnosti v slovenskih rekah.

Osnova vhodnih podatkov za modul analize transporta plavin so podatki o granulometrijski sestavi plavin. V splošnem se velikostni razredi plavin delijo glede na klasifikacijo zrnastostnih razredov v preglednici 11.

Preglednica 11: Klasifikacija zrnastostnih razredov po MIT (MIT, 2012)
Table 11: Classification of sediment fractions by MIT guidelines (MIT, 2012)

| Drobljenec | Prod (G) | | | | | Pesek (S) | | | | | Melj (M) | | | | Glina |
|-----------------------------|------------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|-----------|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|-----------|------------|-------|
| Premer zrna [mm] | <i>VCG</i> | <i>CG</i> | <i>MG</i> | <i>FG</i> | <i>VFG</i> | <i>VCS</i> | <i>CS</i> | <i>MS</i> | <i>FS</i> | <i>VFS</i> | <i>CM</i> | <i>MM</i> | <i>FM</i> | <i>VFM</i> | |
| | 60 | 32 | 20 | 6 | 4 | 2 | 1 | 0,6 | 0,2 | 0,125 | 0,06 | 0,02 | 0,006 | 0,004 | 0,002 |

kjer je:

VC (angl. *very coarse*) – zelo grobozrnat,

C (angl. *coarse*) – grobozrnat,

M (angl. *medium*) – srednji,

F (angl. *fine*) – drobnzrnat,

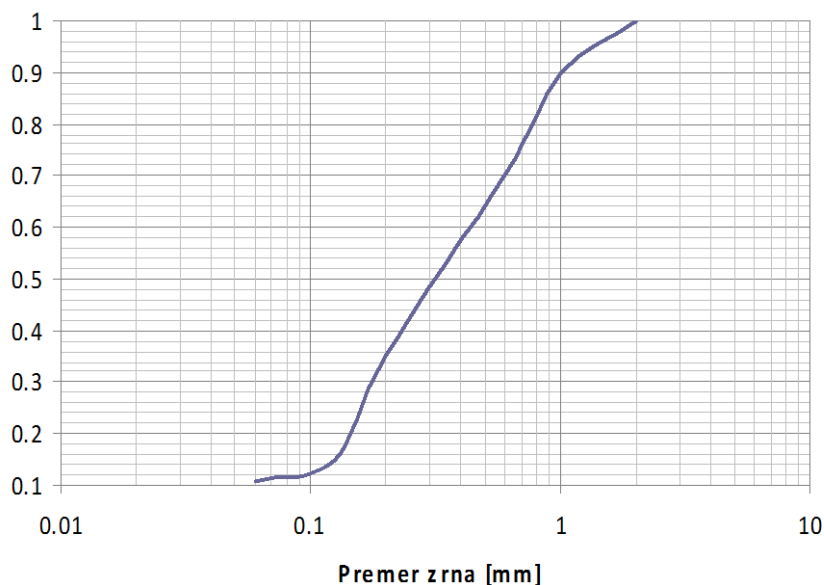
VF (angl. *very fine*) – zelo drobnzrnat,

G (angl. *gravel*) – prod,

S (angl. *sand*) – pesek,

M (angl. *silt*) – melj.

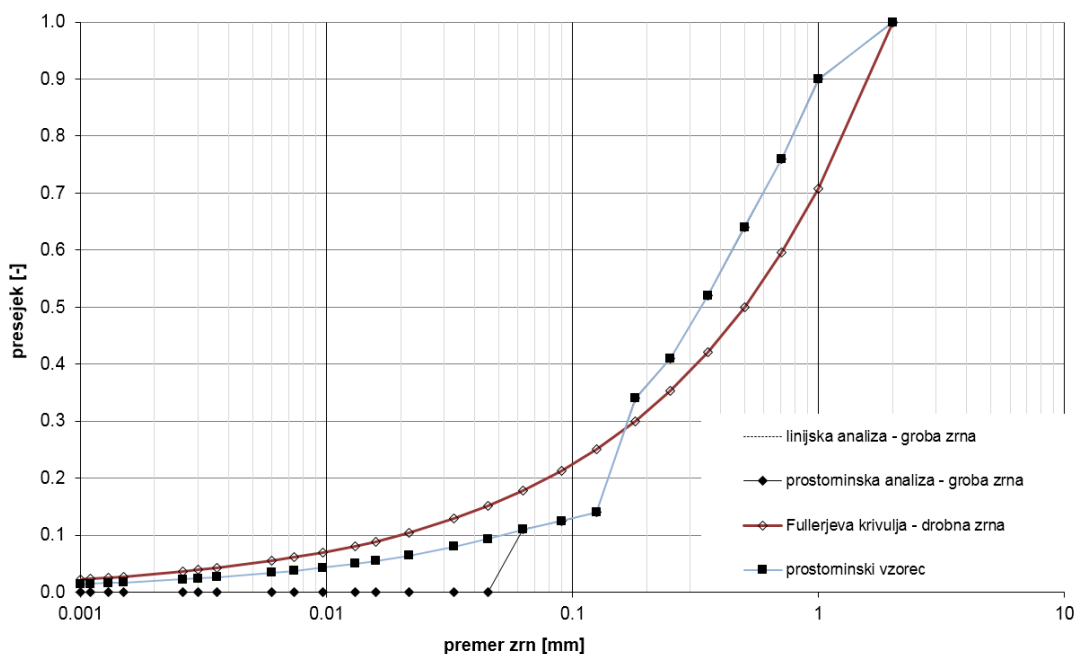
Slika 44 prikazuje presežno krivuljo dna akumulacije Vrhovo (Geateh, 2010), kjer je očitno, da vsaj v spodnjih 70 % akumulacije (na tem območju sta bili izvedeni vtini, ki sta osnova te krivulje) primanjkuje srednjih in večjih rinjenih plavin, saj je d_{90} enak 1 mm, d_{max} pa je 2 mm (zelo grob pesek). Frakcije plavin se v večini gibljejo med 0,06 in 0,1 mm (grobi melj – drobnozrnat pesek). Delež drobnozrnatega melja je nekoliko višji v globljih plasteh (preglednica 12).



Slika 44: Presežna krivulja v akumulaciji HE Vrhovo (Geateh, 2010)

Figure 44: Grain size curve of HPP Vrhovo reservoir (Geateh, 2010)

Kalna voda reke Save do odvzemnega mesta je že izgubila bolj grobe frakcije, zato smo izvedli Fullerjevo analizo, ki za rezultat podaja novo presežno krivuljo. Srednje aritmetično zrno (d_m) znaša 0,48 mm.



Slika 45: Togo sestavljanje s Fullerjevo zrnastostno krivuljo v prostominski vzorec

Figure 45: Adjustment of the grain size distribution to the Fuller curve

V vzorcih (preglednica 12) so zastopane frakcije gline, finega melja, grobega melja ter peska.

Preglednica 12: Rezultati granulometrijske analize vzorcev, odvzetih v akumulaciji HE Vrhovo (Geateh, 2010)

Table 12: Grain size distribution analysis of the samples drilled at the Vrhovo reservoir (Geateh, 2010)

| vzorec | mineralni trdni delci > 2 mm | glina | fini melj | grobi melj | pesek |
|-------------------------|------------------------------|-------|-----------|------------|-------|
| VV 1 – 0–1 m | 4,3 | <0,20 | 5,60 | 4,70 | 89,7 |
| VV 1 – 2–3 m | 4,0 | <0,20 | 1,70 | 1,60 | 96,7 |
| VV 2 – 0–1 m | 0,0 | 9,10 | 27,3 | 23,7 | 39,9 |
| VV 2 – 2–3 m | 0,0 | 12,8 | 41,6 | 10,2 | 35,4 |
| VV 2 – 4–5 m | 0,0 | 9,10 | 33,9 | 15,3 | 41,7 |
| VV K – vzorec iz korita | 0,0 | <0,20 | 21,9 | 2,50 | 75,6 |

Delci, ki so manjši od 0,04 mm, flokulirajo, kar je posledica električnih in drugih sil na površini. Flokulacija je odvisna od koncentracije, gibanja delcev drug mimo drugega (sprijemanje večjih delcev z manjšimi) ipd. Eden od načinov obravnave flokulacije je tudi izračun nadomestnega premera drobnih frakcij, ki dejansko predstavlja premer flokul (Geateh, 2010).

Hitrost usedanja flokule w_f [mm/s] (Migniot, 1989):

$$w_f = \frac{250w_s}{d_s^2} \text{ za } d_s < 40 \cdot 10^{-6} \text{ m} \quad (38)$$

d_s = premer plavinskih delcev [10^{-6} m],

w_s = hitrost posedanja posameznega delca [mm/s].

Sledi, da je za zelo fini melj ($d = 0,004$ mm) v povprečju hitrost usedanja flokul ~ 16 -krat večja od hitrosti usedanja posameznih delcev. Na podlagi Stokesovega zakona za določitev končne hitrosti posedanja (angl. *terminal settling velocity*) v viskozni tekočini (Mikoš, 2012a) izpeljemo nadomestni premer »flokulirajočih« delcev.

Hitrost usedanja delcev za glino in melje se tako določi po:

$$w_s = \frac{(s-1)gd^2}{18\nu} \quad (39)$$

d = premer plavinskih delcev [m],

g = pospešek sile teže [$9,81 \text{ m/s}^2$],

s = relativna gostota plavinskih delcev [-],

ν = kinematična viskoznost tekočine [$\sim 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$].

Hitrost usedanja za delec zelo finega melja (0,004 mm) je $1,4 \cdot 10^{-5}$ m/s, iz tega izhaja nadomestni premer zrna 0,016 mm, kar spada v velikostno območje srednjega melja. Na osnovi tega in preglednice 12 smo določili zastopanost posameznih velikostnih razredov plavin v računskem vzorcu. Izbrali smo pet razredov, kot sledi na preglednici 13.

Preglednica 13: Izbrani premeri zrn (frakcije) na dnu akumulacije HE Vrhovo
Table 13: Selected grain sizes at the bottom of the reservoir HPP Vrhovo

| | Srednji melj | Srednji/grobi melj | Fini pesek | Zelo grob pesek | Zelo fini prod |
|-----------------------------|-----------------|-----------------------|---------------|--------------------|-------------------|
| Premer zrna [mm] | 0,02 | 0,04 | 0,2 | 2 | 4 |

Porazdelitev posameznih frakcij, tj. delež zastopanosti posameznega velikostnega razreda plavin, je pomembna za vse tri računske plasti dna struge, saj se z njo opredeli granulometrijska sestava posameznih plasti. Zgornja plast oz. t. i. izmenjevalna plast (angl. *mixing layer*) je debeline 0,05 m, medtem ko se ostali plasti razlikujeta v odvisnosti od lokacije v akumulaciji.

Na osnovi odvzetih vzorcev vrtin (Geateh, 2010) smo določili debelino reprezentativnih plasti dna v akumulaciji.

Preglednica 14: Debelina reprezentativnih plasti (layer) glede na pozicijo v območju modeliranja
Table 14: Depth of representative layers according to the position in the area of simulation

| | Stacionaža 785.085–781.700 | Stacionaža 781.700–778.000 |
|--------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Zgornja plast [m] | 2,7 | 5 |
| Spodnja plast [m] | 2,3 | 2 |

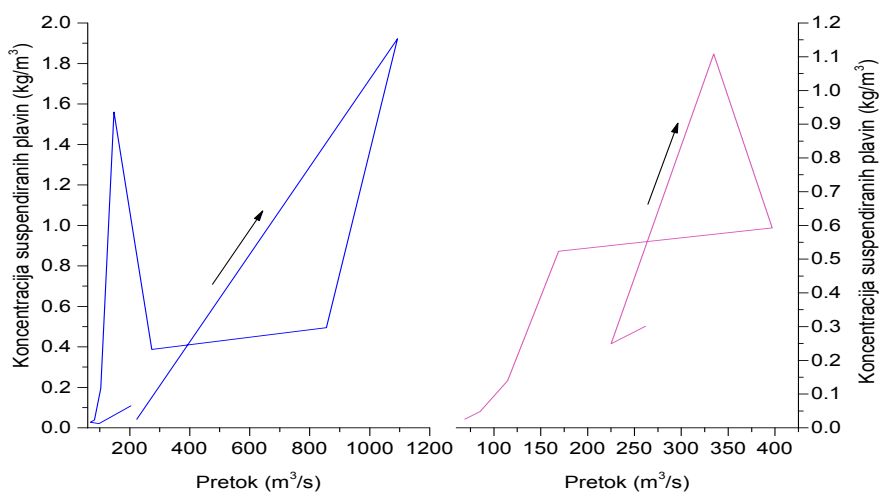
Predpostavljamo, da se plavine velikosti nad 4 mm (VFG – angl. *very fine gravel*) v akumulaciji ne pojavljajo več, prod ($d > 1$ mm) pa se pojavlja v spodnjih plasteh, pa še to le v gorvodni coni zaradi vpliva dotoka plavin iz Savinje. Za potrebe morfološke študije iz leta 2010 so se vrtine z vzorci dna izvedle le na dveh mestih, kar pomeni, da za natančnejšo oceno granulometrijske sestave dna manjkajo vsaj še 2–4 vrtine. Iz tega sledi, da smo morali za granulometrijsko strukturo plasti dna akumulacije uvesti določene aproksimacije na podlagi izkušenj iz podobnih primerov (npr. Ptujsko jezero).

Preglednica 15: Zastopanost frakcij znotraj plasti glede na cono (stacionaža)
Table 15: Representation of grain sizes in a surface layer according to position

| Plast | Delež frakcije v plasti | | | | | |
|--|-------------------------|---------|---------|--------|------|------|
| | poroznost | 0,02 mm | 0,04 mm | 0,2 mm | 2 mm | 4 mm |
| Izmenjevalna plast (layer 1) | 0,56 | 0,13 | 0,42 | 0,01 | 0,1 | 0,34 |
| Spodnja plast (layer 2) 785.085–781.700 | 0,44 | 0 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,85 |
| Spodnja plast (layer 2) 781.700–778.000 | 0,56 | 0,13 | 0,42 | 0,01 | 0,1 | 0,34 |
| Najnižja plast (layer 3) 785.085–781.700 | 0,44 | 0 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,85 |
| Najnižja plast (layer 3) 781.700–778.000 | 0,56 | 0,09 | 0,34 | 0,01 | 0,15 | 0,41 |

Refrakcijska analiza vzorcev, odvzetih med visokovodnim dogodkom (17. 9.–19. 9. 2010) na VP Hrastnik, kaže, da znaša povprečni delež gline v vzorcu 11 %, melja 73 % in peska 16 %. Grobega melja je 22 %, srednjega 34 % in finega 17 % (Geateh, 2010). Podatkov o granulometrijski sestavi plavin, ki dotekajo s Savinjo v Savo pri Zidanem Mostu ni, predpostavljamo nekoliko večji delež grobozrnatih plavin ($d > 1$ mm) kot pri Savi gorvodno od sotočja s Savinjo. Model transporta plavin zahteva še dva robna pogoja, in sicer podatke o koncentraciji na vhodu v model za lebdeče plavine in podatke o masnem toku rinjenih plavin; odvisno od načina transporta.

Koncentracijo lebdečih plavin smo določili s pomočjo aproksimacij vrednosti, ki so bile pridobljene z razmerji med pretokom in koncentracijo plavin za VP Hrastnik in VP Veliko Širje.



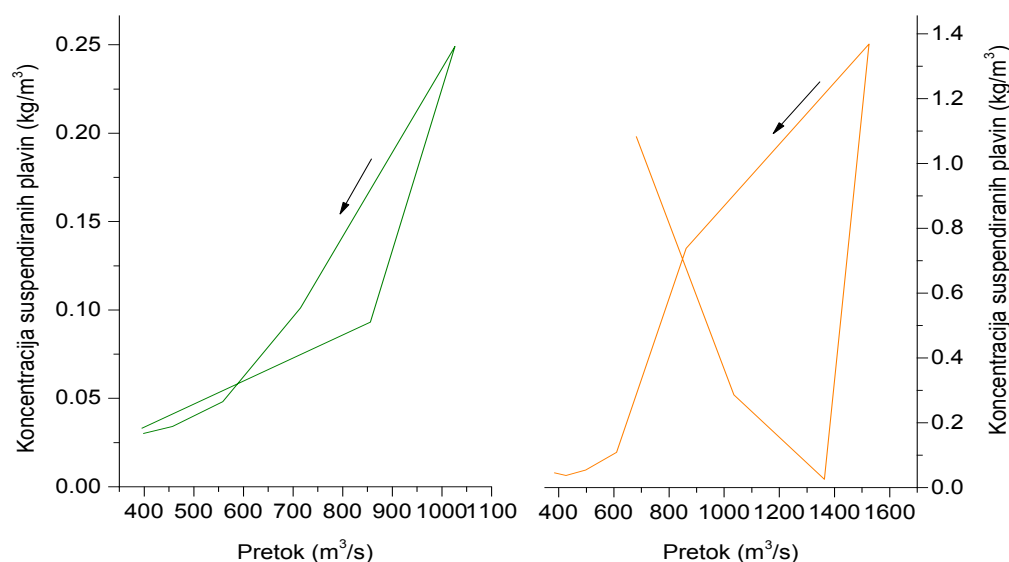
Slika 46: Histerezni zanki odvisnosti koncentracije suspendiranih plavin od pretoka na VP Veliko Širje
17.–26. september 2010 (levo) in 23.–30. 12. 2009 (desno)

Figure 46: Hysteresis loops of sediment concentration to flow relation at Veliko Širje gauging station for periods
17.–26. september 2010 (left) and 23.–30. 12. 2009 (right)

Žal so bile v obdobju med 17. in 26. 9. 2010 na VP Hrastnik izvedene meritve koncentracij suspendiranih plavin le za dneve med 17. in 19. 9., kar pomeni, da je grafični prikaz odvisnosti koncentracij suspendiranih plavin od pretoka za tri meritve nesmiseln; kljub pomanjkanju podatkov o koncentraciji plavin pa smo podatke za obdobje 17.–19. 9. 2010 uporabili za aproksimacijo »vhodne koncentracije« modela.

Za orientacijski prikaz odvisnosti na VP Hrastnik smo uporabili podatke med 23. in 29. 12. 2010, ko je bilo ob visokih vodah izvedeno sedem zaporednih meritev koncentracije suspendiranih plavin (prav tako za obdobje med 23. in 31. 12. 2009). Prikaz spodnjih histereznih zank služi le za potrebe opredelitve smeri poteka zanke.

Histerezni zanki za leto 2010 se razlikujeta v smeri poteka, in sicer poteka histerezna zanka za VP Veliko Širje v smeri urinega kazalca, zanka VP Hrastnik pa v obratni smeri. Podobno obnašanje opazimo pri primerjavi zank za obdobji v letu 2009.



Slika 47: Histerezni zanki odvisnosti koncentracije suspendiranih plavin od pretoka na VP Hrastnik, 23.–29. december 2010 (levo) in 23.–31. 12. 2009 (desno)

Figure 47: Hysteresis loops of sediment concentration to flow relation at Hrastnik gauging station for periods 23. – 29. december 2010 (left) and 23. – 31. 12. 2009 (right)

V smislu transporta plavin pomeni potek histerezne zanke v smeri urinega kazalca (pozitivna histereza, običajna za naravne struge), da se pretok povečuje, plavine pa odnaša s posameznih lokacij v akumulaciji (Brandt, 1999). Plavine, ki so se odložile v padajoči fazi v preteklih dogodkih, se premestijo v celoti še pred konico visokovodnega vala. »Negativna histereza« na VP Hrastnik pomeni, da se večje koncentracije plavin pojavijo po konici visokovodnega vala, ko pretok pada. Vzroki so lahko trije (Black, 2008):

- omejena količina oz. pomanjkanje plavin,

- časovno zakasnen začetek transporta plavin,
- oddaljen vir plavin.

Negativna histereza, ki se pojavlja na VP Hrastnik, tako le še potrjuje dejstvo, da je transport plavin po reki Savi gorvodno od sotočja s Savinjo pri Zidanem Mostu pretežno odvisen od drobnih plavin, ki zaradi visokih (poplavnih) voda preidejo v lebdeče stanje, tj. poplavna kalnost (Mikoš, 2012a).

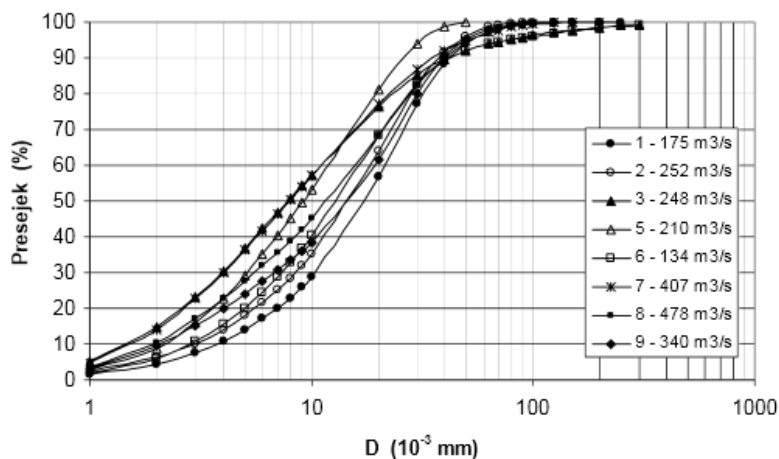
Stanje je nekoliko drugačno na VP Veliko Širje, kjer se pojavlja pozitivna histereza, kar je pričakovano, saj na Savinji večjih ovir (kot so pregrade in HE) ni in je transport plavin do sotočja s Savo v večini neoviran.

(Aproksimacijo) odvisnosti med pretokom in koncentracijo plavin smo opredelili na podlagi sledečega:

- hkratne meritve pretokov in koncentracij na vtoku v akumulacijo HE Boštanj (Dolinar et al., 2008),
- meritve koncentracij in pretokov na VP Hrastnik in VP Veliko Širje.

Meritve koncentracij in pretokov na vtoku in iztoku akumulacije HE Boštanj so pokazale določene odvisnosti koncentracij plavin od pretokov, vendar le za velikosti pretokov do 500 m³/s. Razmerja med pretoki in koncentracijami plavin so preveč kompleksna, da bi se jim lahko pripisalo neko enostavno odvisnost, zato omenjenih meritev na vtoku v akumulacijo HE Boštanj nismo ekstrapolirali na večje pretoke.

V sklopu meritev v akumulaciji HE Boštanj se je merila tudi granulometrijska sestava plavin na vtoku v akumulacijo Boštanj (iztok iz akumulacije Vrhovo). Pretežno prevladuje melj, glinenih delcev in drobnih peskov pa je za vzorec.



Slika 48: Zrnastost plavin na iztoku iz akumulacije Vrhovo (vir: Dolinar et al., 2008)

Figure 48: Grain size distribution at the HPP Vrhovo reservoir outlet (source: Dolinar et al., 2008)

Opredelitev odvisnosti večjih pretokov ($> 500 \text{ m}^3/\text{s}$) od koncentracij plavin na »vhodu« v model smo aproksimirali z meritvami pretokov in koncentracij na VP Hrastnik in VP Veliko Širje, ki sta vodomerni postaji s podatki tako o pretokih kot tudi o koncentracijah, ležeči najbližje vhodu v model.

Preglednica 16: Odvisnost pretoka od koncentracije plavin na merilnih mestih VP Veliko Širje in Hrastnik ter na iztoku iz akumulacije Vrhovo

Table 16: Sediment concentration relation to flow at Veliko Širje and Hrastnik gauging stations and at the HPP Vrhovo reservoir outlet

| Q [m ³ /s] | c [kg/m ³] | | Q [m ³ /s] | c [kg/m ³] | | Q [m ³ /s] | c [g/m ³] |
|-----------------------|------------------------|-----------------|-----------------------|------------------------|-------------|----------------------------|-----------------------|
| 30 | 0,01 | VP Veliko Širje | 130 | 0,30 | VP Hrastnik | 30 | 0,002 |
| 50 | 0,02 | | 190 | 0,26 | | 50 | 0,003 |
| 100 | 0,05 | | 1.370 | 0,48 | | 100 | 0,004 |
| 200 | 0,12 | | 1.450 | 0,67 | | 200 | 0,008 |
| 500 | 0,43 | | 2.080 | 0,58 | | 500 | 0,061 |
| 1.000* | 1,11 | | 2.280 | 0,83 | | | |
| | | | | | | Vtok v akumulacijo Boštanj | |

*Opomba: Pretoki za VP Veliko Širje se nad $1.000 \text{ m}^3/\text{s}$ ne pojavljajo, ekstrapolacija na višje pretoke pa zaradi narave odvisnosti pretoka od koncentracije (histerezna zanka) ni smiselna.

Vhodni pretok v model, tj. Q_{t_0} , je enak $657 \text{ m}^3/\text{s}$ (17. 9. 2010 ob 17:00); zgornji robni pogoj modeliranja transporta plavin je koncentracija plavin (c_{t_0}) pri pretoku Q_{t_0} na mestu tik dolvodno od sotočja Save in Savinje.

Iz preglednice 14 izhaja, da je koncentracija plavin na VP Hrastnik pri pretoku Q_{t_0} v rangu $0,2\text{--}0,3 \text{ kg/m}^3$, na VP Veliko Širje pa $0,5\text{--}0,6 \text{ kg/m}^3$. Privzeli smo grobo poenostavitev, da je Sava dominantnejša od Savinje, iz česar izhaja, da je bila koncentracija plavin na mestu vhoda v model v času t_0 enaka $\sim 0,4 \text{ kg/m}^3$ (c_{t_0}).

Za čas t_0 smo morali opredeliti tudi frakcije plavin na dotoku v model.

Preglednica 17: Deleži posameznih velikostnih razredov plavin na dotoku v model

Table 17: Shares of individual sediment size classes at the model entry

| | Srednji melj | Srednji/grobi melj | Fini pesek | Zelo grob pesek | Zelo fini prod |
|-------|--------------|--------------------|------------|-----------------|----------------|
| t_0 | 30 % | 30 % | 20 % | 10 % | 10 % |

Zaradi narave modela 2D nismo upoštevali vertikalnih komponent koncentracije plavin (po globini).

7.5 Povzetek izbranih vrednosti parametrov modela CCHE2D

Matematično modeliranje je računsko aproksimacija dejanskega stanja, ki je v modelu CCHE2D poleg računske mreže in robnih (vhodnih in izhodnih) pogojev odvisna tudi od parametrov toka s prosto gladino in parametrov transporta plavin.

Preglednica 18: Parametri modela nestalnega toka s prosto gladino

Table 18: Unsteady flow model input parameters

| | |
|---|---|
| Čas simulacije [s] | 802.800 (= 9 dni 7 ur) |
| Časovni korak [s] | 20 |
| Model turbulence | Model dolžine mešanja (angl. <i>mixing length model</i>) |
| Koeficient turbulentne viskoznosti | 1 |
| Hrapavost dna | $n_g = 0,039$ |
| Coriolisov koeficient | 0 |
| Von Kármánova konstanta | 0,41 |
| Kinematična viskoznost tekočine | $1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ |

Preglednica 19: Parametri modela transporta plavin

Table 19: Sediment transport model input parameters

| | |
|---|---|
| Način transporta plavin | Tip enačbe za lebdeče plavine (konvekcija – difuzija) |
| Enačba transporta plavin | Wu, Wang in Jia (2000) |
| Način simulacije | Hitra sprememba dna z nestalnim tokom |
| Adaptacijska dolžina | $7,3 \times$ povprečna dolžina sipin na dnu akumulacije |
| Adaptacijski faktor α | 0,1 |
| Viskozna/molekularna difuzija – Schmidtovo št. | 0,5 |
| Specifična teža plavin | $2,1 \text{ t/m}^3$ |

7.6 Zagon simulacije

Model CCHE2D se lahko zažene v ničelnem načinu (angl. *cold start*), tj. v načinu, ki ne temelji na predhodnih izračunih, ali v t. i. »hot start« načinu; velja tako za simulacijo toka s prosto gladino kot tudi za simulacijo transporta plavin. Začetni pogoj simulacije toka s prosto gladino v ničelnem načinu je začetna gladina akumulacije, pri simulaciji transporta plavin pa ničelni podatki o višinah dna struge in že izračunani podatki toka s prosto gladino. »Hot start« način temelji na že izračunanih višinah dna struge.

8 REZULTATI MODELIRANJA TOKA S PROSTO GLADINO IN TRANSPORTA PLAVIN

Glavni namen modeliranja toka s prosto gladino in transporta plavin v akumulaciji HE Vrhovo je bil ugotoviti, kakšne in v kakšnem obsegu so možnosti optimizacije obratovanja zapornic in zaklopk na pregradnem objektu HE Vrhovo s stališča ravnanja s plavinami v akumulaciji v odvisnosti od pretokov. Osredotočili smo se na poplavni dogodek v septembru 2010, kjer se je le v devetih dneh (17.–26. 9.) skozi profil pregradnega objekta sprostilo več kot 90 % letne količine plavin, zato smo privzeli ta dogodek kot dovolj reprezentativen za določitev količin in koncentracij plavin ter lokacij sprememb v dnu struge ter ga s simulacijo poskušali prikazati čim bolj reprezentativno.

8.1 Opredelitev modelnih scenarijev in opazovanih karakterističnih mest v modelu

8.1.1 Modelna scenarija V_1 in V_2

Na podlagi meritev, preteklih izračunov in inženirskih ocen v najrazličnejših analizah smo pripravili dva scenarija, ki pa se razlikujeta med sabo le v eni, bistveni postavki, in sicer v računskem vzorcu dotoka plavin v modelirani odsek reke Save.

Računski vzorec dotoka plavin v model prikazuje sestavo plavin v dotočnem hidrogramu. Glede na to, da izkušnje zadnjih let kažejo, da se skozi pregradne objekte dolvodno prenašajo zgolj melj in še drobnejše frakcije (Geateh, 2010), določeni fini peski pa se zadržujejo le še na pregradi HE Vrhovo (Dolinar, 2008), smo scenarija V_1 in V_2 podali v razmerjih, kot sledi v preglednici 20.

Preglednica 20: Definicija scenarijev kot računski vzorec dotoka plavin v model
Table 20: Scenarios definition as an adjusted sediment inflow sample

| VZOREC | delež frakcije v vzorcu | | | | |
|------------------|-------------------------|------|------|------|-----|
| | 0,02 | 0,04 | 0,2 | 2 | 4 |
| premer zrna [mm] | | | | | |
| scenarij V_1 | 35 % | 35 % | 20 % | 10 % | 0 % |
| scenarij V_2 | 10 % | 10 % | 67 % | 7 % | 6 % |

Scenarija se razlikujeta v deležih posameznih frakcij v vzorcu, pri čemer ima scenarij V_1 večjo zastopanost drobnega in srednjega melja, v scenariju V_2 pa prevladujejo drobni peski.

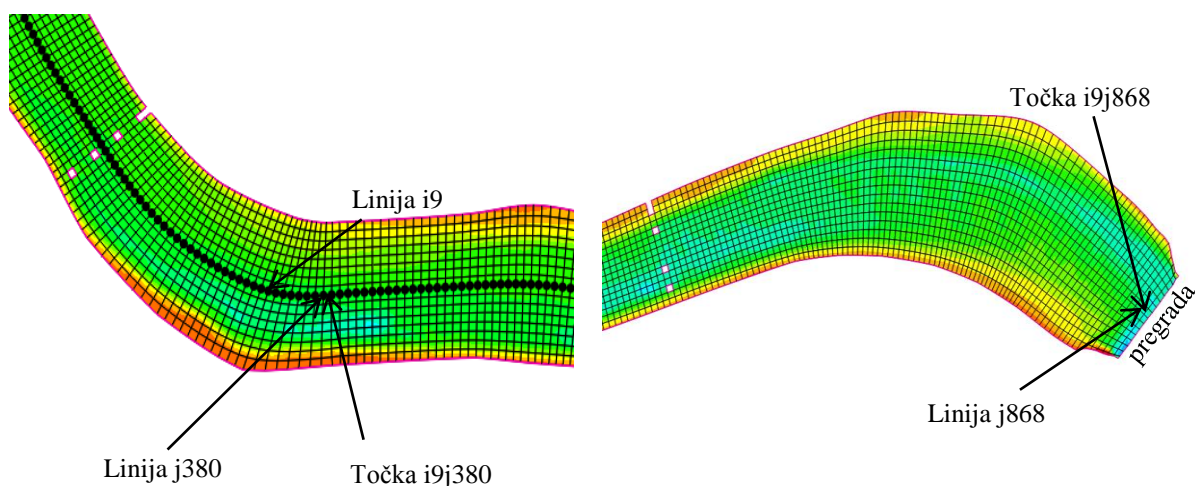
Simulacijo toka s prosto gladino smo izvedli neposredno z uporabo vhodnega hidrograma kot zgornjega robnega pogoja, ki je bil določen na podlagi poplavnega dogodka med 17. in 26. 9. 2010, pri

čemer je dolvodni/spodnji robni pogoj podatek o gladinah na profilu pregrade HE Vrhovo. V fazi simulacije toka s prosto gladino je potreben še robni pogoj začetne gladine v akumulaciji.

8.1.2 Karakteristična mesta opazovanja v modelu

Pred zagonom simulacije toka s prosto gladino je bilo treba določiti še točke oz. linije v modelu (dejansko so to vozliščne točke in linije v računski mreži), kjer se izvaja primerjava količin (višine, koncentracije, porazdelitev frakcij ipd.). V modelu akumulacije smo za primerjavo opredelili sledeče točke in linije:

- vzdolž linije j380 in j868,
- vzdolž linije i9,
- vozlišče/točka i9j380,
- vozlišče/točka i9j868.



Slika 49: Karakteristične točke/vozlišča in linije opazovanja
Figure 49: Characteristic points/nodes and monitoring lines

Rezultati simulacije toka s prosto gladino so na voljo v obliki:

- vodna gladina,
- globina vode,
- hitrost toka u in $v \rightarrow x$ in y smer,
- magnituda hitrosti toka,
- specifični pretok u in v skupaj z rezultanto,
- strižne napetosti v x in y smeri skupaj z rezultanto,
- vrtnična viskoznost,
- Froudovo število.

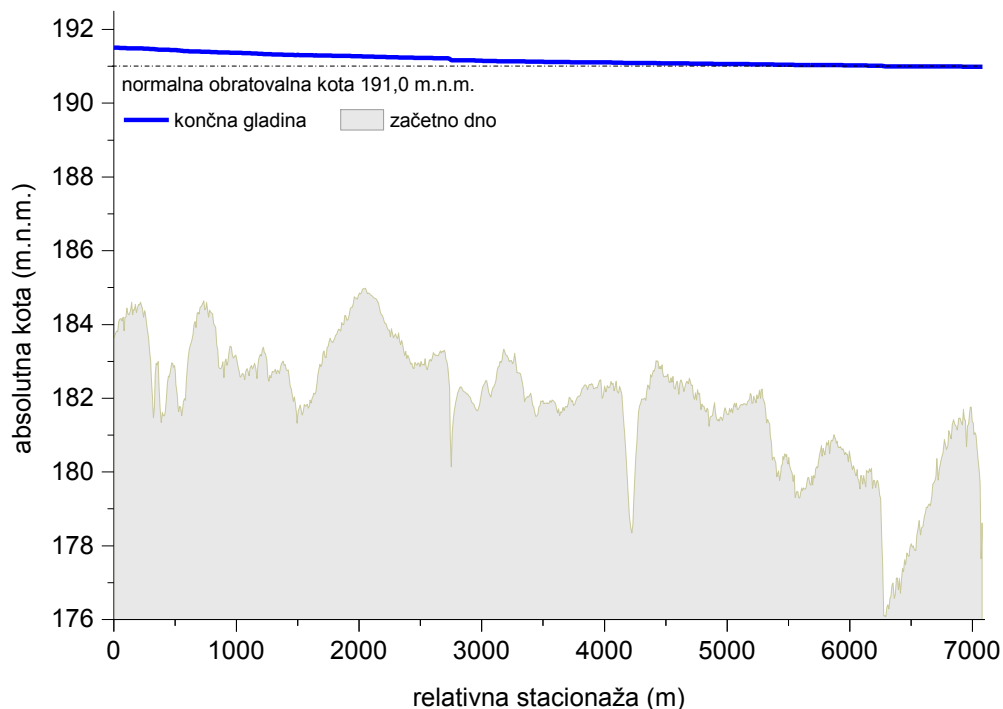
Rezultati simulacije transporta plavin so na voljo v obliki:

- (nova) nadmorska višina dna struge,
- spremembe v dnu struge,
- porazdelitev plavin presejka d_{50} ,
- koncentracija lebdečih plavin,
- koncentracija lebdečih plavin, porazdeljena po posameznih frakcijah,
- začetna in končna frakcijska sestava tal na dnu akumulacije.

8.2 Rezultati simulacij

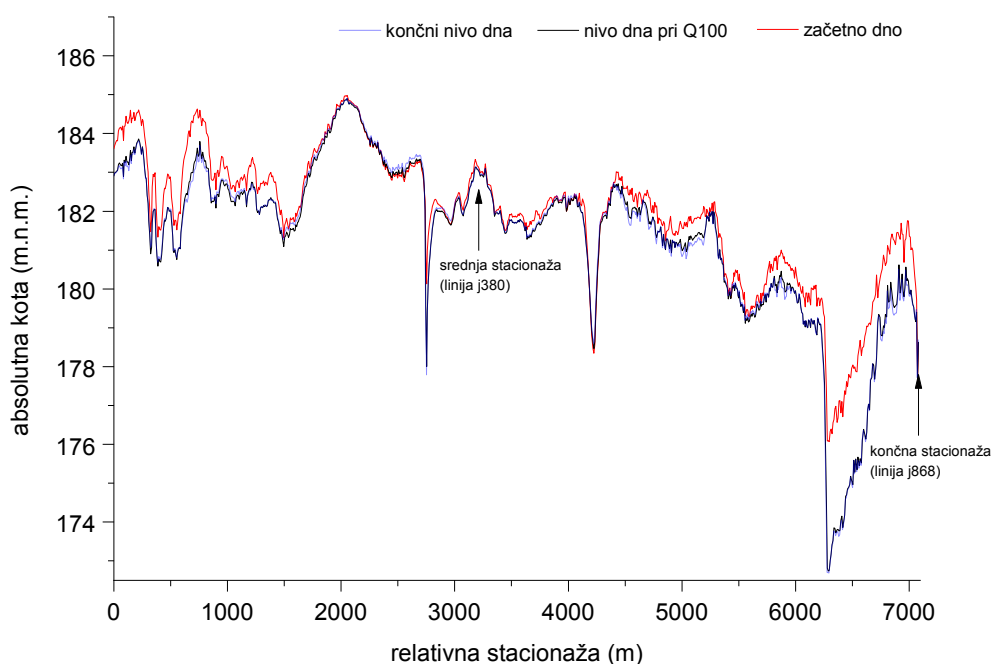
8.2.1 Scenarij V₁

Majhen vzorec meritev koncentracij in porazdelitev frakcij v akumulaciji Vrhovo in tik dolvodno od pregrade v zadnjih 15 letih kaže na zadrževanje drobnih peskov v akumulaciji Vrhovo ter transport melja dolvodno, kar kaže na pretežno zastopanost treh frakcij (MM, CM, VFS/FS). S prvim scenarijem smo predvideli nekoliko bolj enakomerno zastopanost frakcij v računskem vzorcu, več drobnejših delcev (srednji in grobi melj), drobni peski so v manjšini, ostalih frakcij pa je za vzorec oz. so bolj namenjene armiranju dna.



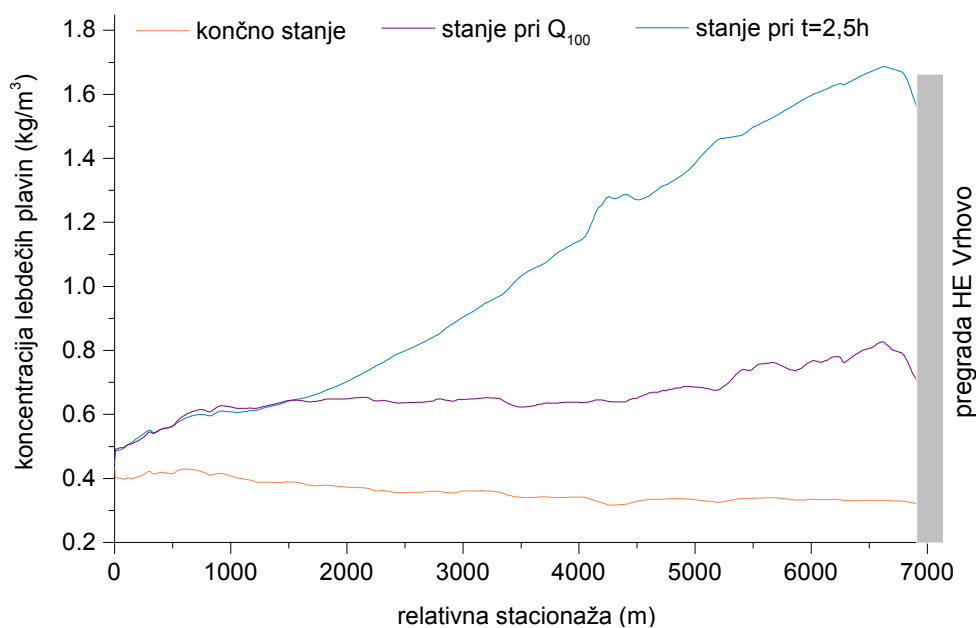
Slika 50: Nivo gladine akumulacije na koncu VV dogodka – simulacije (26. 9. 2010)
Figure 50: Reservoir water level at the end of simulation (26. 9. 2010)

Že na sliki 51 je očitno, da je odložene plavine med visokovodnim dogodkom vzdolž celotne akumulacije HE Vrhovo pretežno odnašalo, najbolj pa so poglobitve dna zaradi odplavljanja vidne v spodnji tretjini akumulacije (transport naplavin, ki so posledica prejšnjih visokovodnih dogodkov prek pregrade dolvodno) in v zgornji tretjini akumulacije, kjer je odnašalo nanose/naplavine iz preteklih poplavnih dogodkov, dotekajoče plavine pa se na tem območju niso usedle, ampak le prenesle bolj dolvodno v spodnjo polovico akumulacije. To so pretežno (srednje)grobi peski.



Slika 51: Primerjava nivojev dna v akumulaciji Vrhovo na začetku simulacije, ob nastopu pretokov Q_{100} in na koncu simulacije – scenarij V_1

Figure 51: Vrhovo reservoir bottom level comparison at the beginning of simulation, at Q_{100} and at the end – V_1 scenario



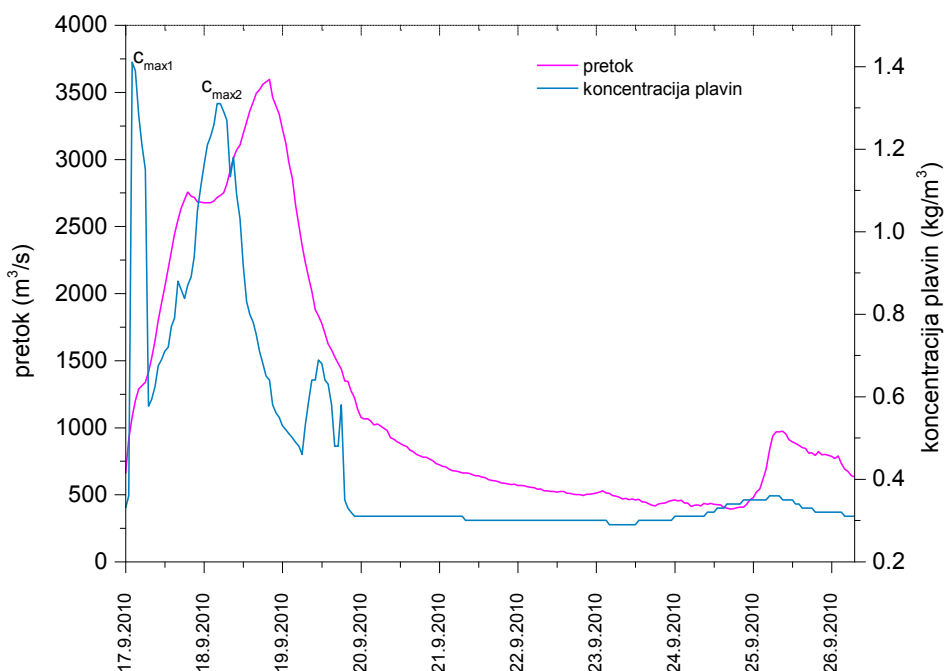
Slika 52: Primerjava koncentracij plavin vzdolž akumulacije v času $t = 2$ h, pri Q_{100} in na koncu simulacije

Figure 52: Sediment concentration comparison along the reservoir at $t = 2$ h, at Q_{100} and at the end of simulation



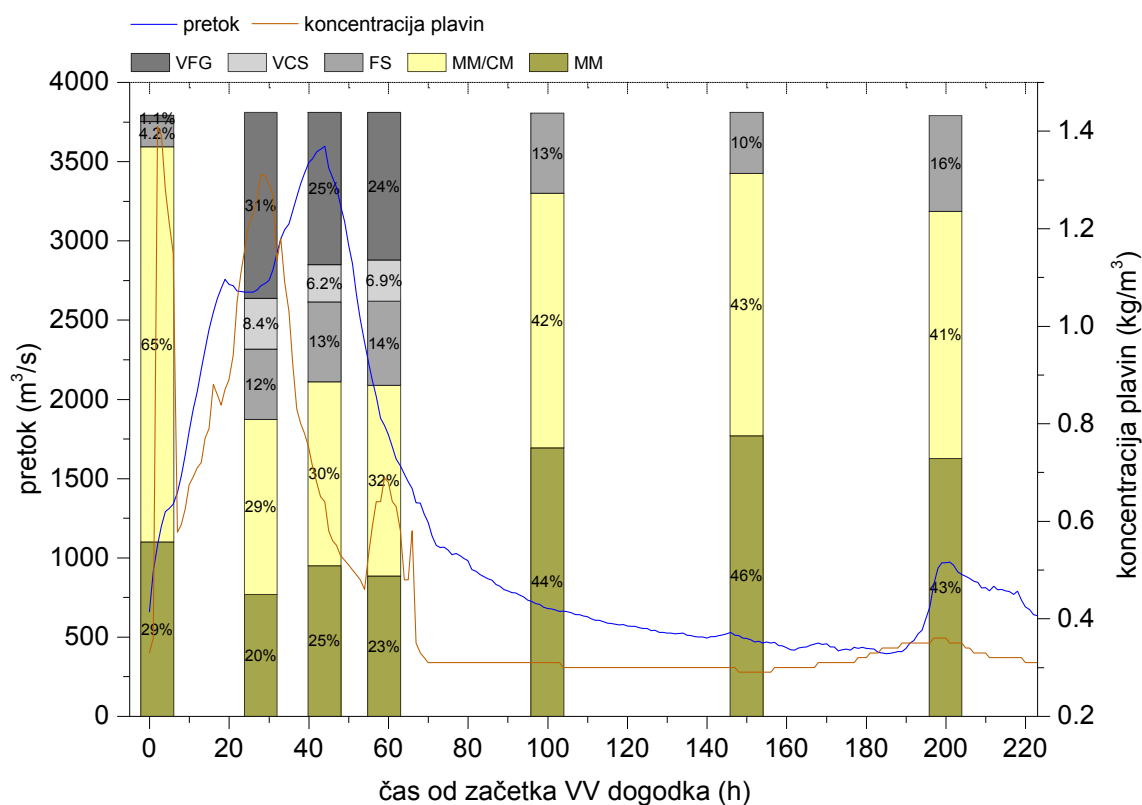
Slika 53: Koncentracije plavin v akumulaciji Vrhovo v času $t = 2$ h ($Q \sim 1080$ m³/s) – v povprečju največje koncentracije plavin znotraj simulacije
Figure 53: Sediment concentration comparison in the reservoir at $t = 2$ h – on average, the highest sediment concentrations of the simulation period

Primerjava koncentracij vzdolž akumulacije Vrhovo na sliki 52 prikazuje zanimivo (in tudi pričakovano) morfološko lastnost, in sicer se najvišje koncentracije plavin pojavljajo predvsem v spodnji polovici akumulacije, tik nad pregrado, kjer prevladujejo lebdeče plavine, in to pred nastopom maksimalnih pretokov (slika 54).



Slika 54: Koncentracija plavin v odvisnosti od časa in v primerjavi s hidrogramom na mestu tik gorvodno od pregrade (j868)
Figure 54: Sediment concentration time dependency with comparison to flow hydrograph just upstream of dam

Vzrok je najverjetneje v tem, da so se v spodnji coni akumulacije HE Vrhovo pojavile naplavine, katerih izpiranje se začne predvidoma pri $630 \text{ m}^3/\text{s}$. Na začetku simulacije transporta plavin je bil pretok na mestu pregrade že $657 \text{ m}^3/\text{s}$, kar pomeni, da je že prišlo do transporta plavin, predvsem v spodnji polovici akumulacije z maksimumom tik gorvodno od pregradnega objekta. Dve uri po začetku simulacije ($t = 2\text{--}2,5 \text{ h}$), ko je bil pretok na pregradi cca $1.080 \text{ m}^3/\text{s}$, se pojavi prvi maksimum koncentracij plavin (do $1,5 \text{ kg}/\text{m}^3$), ki pa traja tako kratek čas, da so naplavine že v veliki meri sprane, kar je vzrok v njihovem naglem padcu koncentracije (na $0,8 \text{ kg}/\text{m}^3$). V tem času pa rezultati simulacije kažejo, da je reka Sava z naraščajočim pretokom s seboj prinašala vedno večje količine plavin in cca 24 ur po nastopu prvega maksimuma koncentracije plavin (vzrok: odplavljeni predhodni nanosi plavin) nastopi drugi maksimum, ki pa je posledica transportiranih plavin iz gorvodne cone v akumulaciji. Drugi maksimum nastopi pri $2.750 \text{ m}^3/\text{s}$, pri čemer je trajanje višjih koncentracij (nad $1,2 \text{ kg}/\text{m}^3$) nekoliko daljše (koncentracija plavin pada nekoliko več časa) kot pri prvem maksimumu, saj še vedno dotekajo lebdeče plavine iz gorvodne cone in se plavine iz akumulacije ne spirajo dovolj hitro.



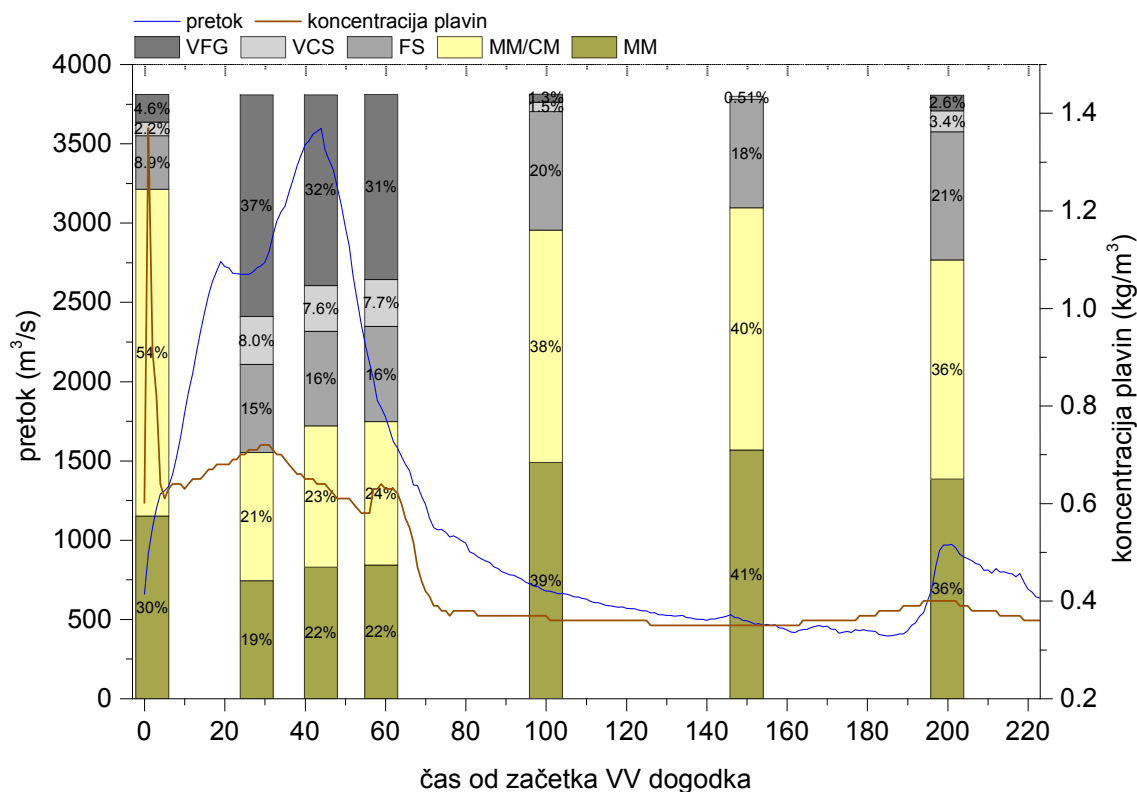
Slika 55: Deleži posameznih frakcij v koncentraciji plavin/celotna koncentracija plavin v odvisnosti od časa nastopa pretoka tik gorvodno od pregrade HE Vrhovo

Figure 55: Shares of individual grain-size fractions of sediment concentration/total sediment concentration relation to flow just upstream of the dam

Zgornjo hipotezo iz rezultatov simulacije potrjuje tudi slika 55, kjer se ob nastopu prvega maksimuma ($t = 2\text{--}2,5 \text{ h}$) odplavlja predvsem srednji in grobi melj, ki je v večini sestavljal naplavine pred začetkom poplavnega dogodka, medtem ko je ob nastopu drugega maksimuma koncentracij plavin,

zastopanost posameznih frakcij, bolj enakomerna, saj to predstavlja pretežno odplavljanje naplavine iz gorvodne cone akumulacije. Očitno je, da je bila premestitvena zmogljivost vodotoka večja od dotoka plavin pred nastopom maksimuma koncentracij plavin. Najbolj grobe frakcije, ki so zastopane v akumulaciji, so se premestile v času največjih koncentracij plavin.

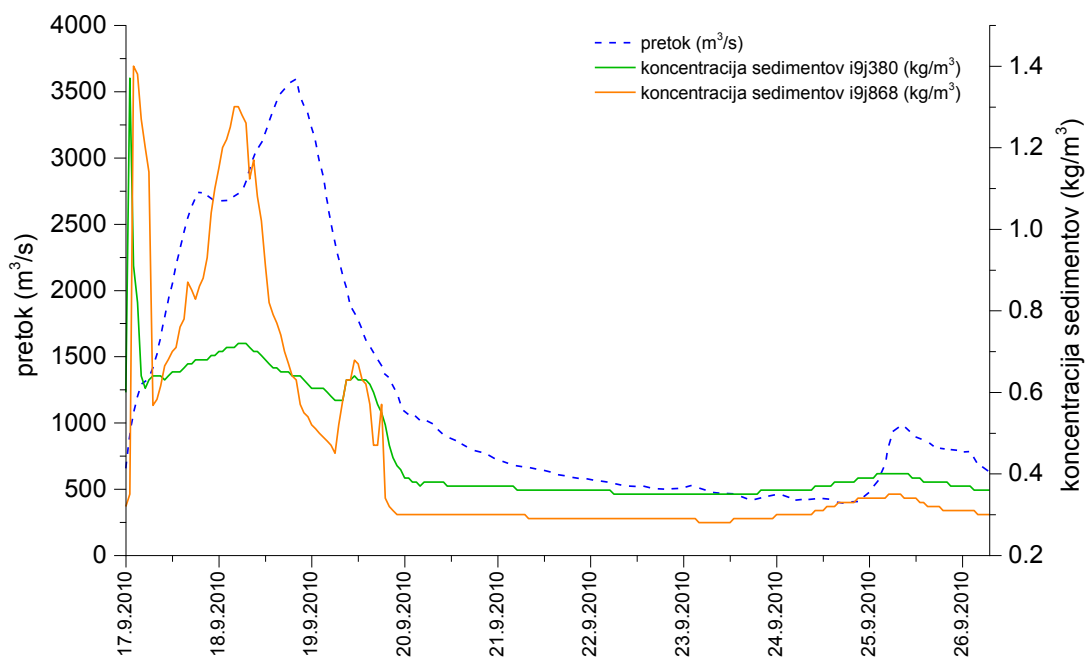
Situacija je nekoliko drugačna v primeru opazovane točke i9j380 (cca 150 m dolvodno od cestnega mostu pri Radečah oz. na srednji stacionaži akumulacije). V primerjavi z mestom tik nad pregrado so bili pretekli nanosi naplavin nekoliko manjši, zato dosega začetni maksimum koncentracije plavin ($t = 2-2,5$ h) nekoliko nižje vrednosti (slika 56). Za razliko od mesta opazovanja tik nad pregrado kaže model v obdobju 24 ur po nastopu začetnega maksimuma na mestu i9j380 koncentracije nižje kar za polovico (do $0,7 \text{ kg/m}^3$), saj je nanose plavin odneslo že v času začetnega maksimuma, nove plavine pa dotekajo v vedno manjših količinah – najbolj gorvodno oddaljena območja v akumulaciji so že sprana plavin.



Slika 56: Deleži posameznih frakcij v koncentraciji plavin/celotna koncentracija plavin v odvisnosti od časa nastopa pretoka v točki i9j380 (srednja stacionaža akumulacije)

Figure 56: Shares of individual grain-size fractions of sediment concentration/total sediment concentration relation to flow at the central station of the reservoir (point i9j380)

S slik 55, 56 in 57 izhajajo dodatna potrditev teze, da v akumulacijo Vrhovo v pretežni meri dotekajo le plavine iz Savinje, saj se maksimalne koncentracije pojavijo na začetku opazovanega obdobja, ko se pretežno spirajo že od prejšnjih visokovodnih dogodkov odložene naplavine.



Slika 57: Primerjava poteka koncentracij plavin s časom za točki i9j868 (tik gorvodno od pregrade) in i9j380 (srednja stacionaža akumulacije)

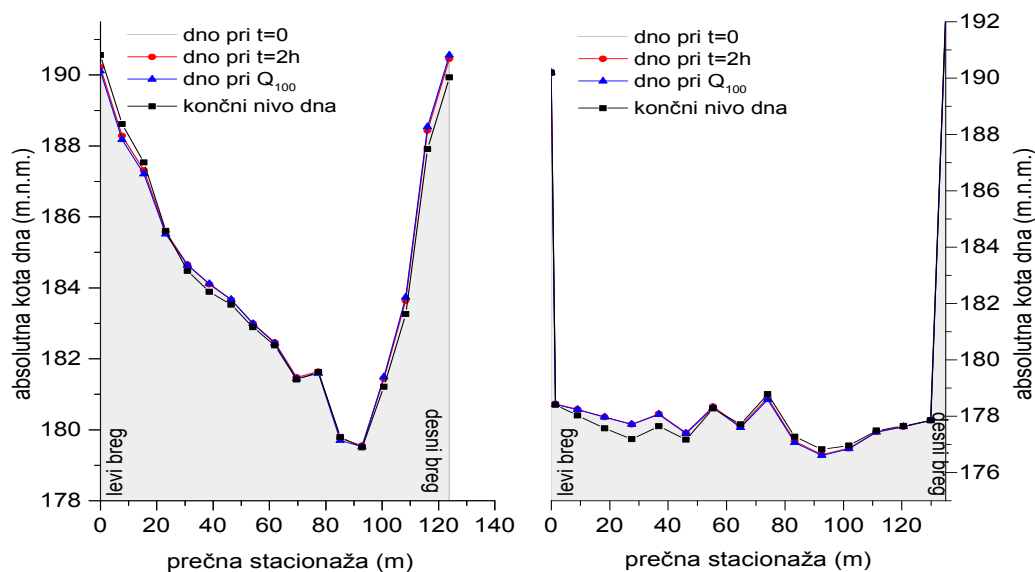
Figure 57: Comparison of sediment concentration curves just upstream of the dam to the central station of the reservoir with relation to time

Začetni maksimumi nato naglo padejo, nato pa ponovno narastejo do nekoliko nižjih koncentracij v primeru območja tik nad pregrado (dotekajoče plavine z gorvodnih območij). V istem časovnem obdobju se nivoji koncentracij na območju srednje stacionaže akumulacije bistveno ne spreminjajo, saj dotok plavin iz Savinje upada, večino nanosov pa je odneslo dolvodno. Z zmanjševanjem pretokov na nivo $< Q_{0\text{susp}} = 630 \text{ m}^3/\text{s}$ pride do večjega upada koncentracij plavin na območju tik nad pregrado, kjer se usedajo le srednji/grobi melj in fini peski, na območju srednje stacionaže akumulacije pa je viden večji delež usedlih frakcij bolj grobih peskov in zelo finega proda, kar se v splošnem ujema z lastnostmi podobnih akumulacij (HE Dravograd ipd.).

Zaradi pomanjkanja plavin se grobi delci odložijo v zgornjih conah (pretok hitreje upade v zgornjih conah akumulacij), drobnejše frakcije pa v spodnjih conah, predvsem tik gorvodno od pregrade.

Zanimiva je tendenca odlaganja in izpiranja plavin (slika 58) za različne časovne preseke s prikazom prečnih profilov na srednji in končni stacionaži (pregrada). V času prvega maksimuma koncentracij plavin ($t = 22,5 \text{ h}$) povzroči intenziteta vodnega toka transport plavin, kar pa se na mestu tik nad pregrado še ne pozna pri spremembi nivoja dna struge. Pred drugim maksimumom koncentracij plavin (pred nastopom konice visokovodnega vala – VV) se plavine ob levem bregu izperejo, ob desnem pa zaradi cirkulacij toka in s tem manjših hitrosti vode odložijo. Kasneje se dno ob levem bregu pogloblja (do 70 cm glede na začetno stanje), ob desnem pa se plavine v manjši meri odložijo. Odložene plavine

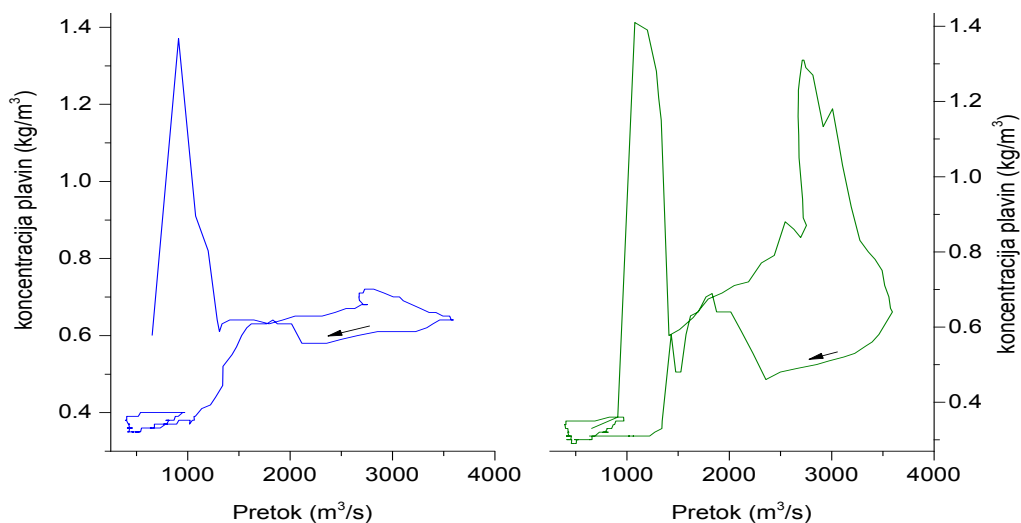
ob desnem bregu so v drugi polovici visokovodnega dogodka najverjetneje posledica padca pretokov pod nivo, ki povzroča spiranje drobnejših frakcij.



Slika 58: Primerjava nivojev dna v akumulaciji za liniji j380 (srednja stacionaža) in j868 (tik nad pregrado) za začetno stanje (t_0), stanje 2 uri po začetku dogodka ($t = 2$ h), stanje pri Q_{100} in končno stanje

Figure 58: Comparison of reservoir bottom levels at central station of the reservoir and just upstream of the dam at the beginning, at $t = 2$ h, at Q_{100} and at the end of simulation

Odnos med pretoki v akumulaciji in koncentracijo plavin je na prvi pogled (histerezne zanke) kaotičen, kljub temu pa lahko na podlagi oblike in usmerjenosti zanke sklepamo na dogajanje v akumulaciji HE Vrhovo, kot izhaja s slike 59, v času poplavnega dogodka. Obe zanki sta v začetku v obliki podobni diagramu koncentracije plavin, v nadaljevanju pa je zanka v coni srednje stacionaže nekoliko bolj sploščena, saj koncentracije plavin zaradi manjših dotokov dosegajo nižje vrednosti. Histerezni zanki imata tudi enako, pozitivno usmerjenost. Narava takšnih zank oz. zank II. razreda (Williams, 1989) je vidna tudi na slikah 55 in 56, kjer se maksimumi koncentracij plavin pojavijo pred konico visokovodnega vala.



Slika 59: Histerezni zanki za območje okoli točke i9j380 (levo) in območje tik nad pregrado i9j868 (desno) – V₁

Figure 59: Hysteresis loops at the central station of the reservoir and just upstream of the dam – scenario V₁

Vzroki za tako naravo histereznih zank akumulacije Vrhovo so (Williams, 1989):

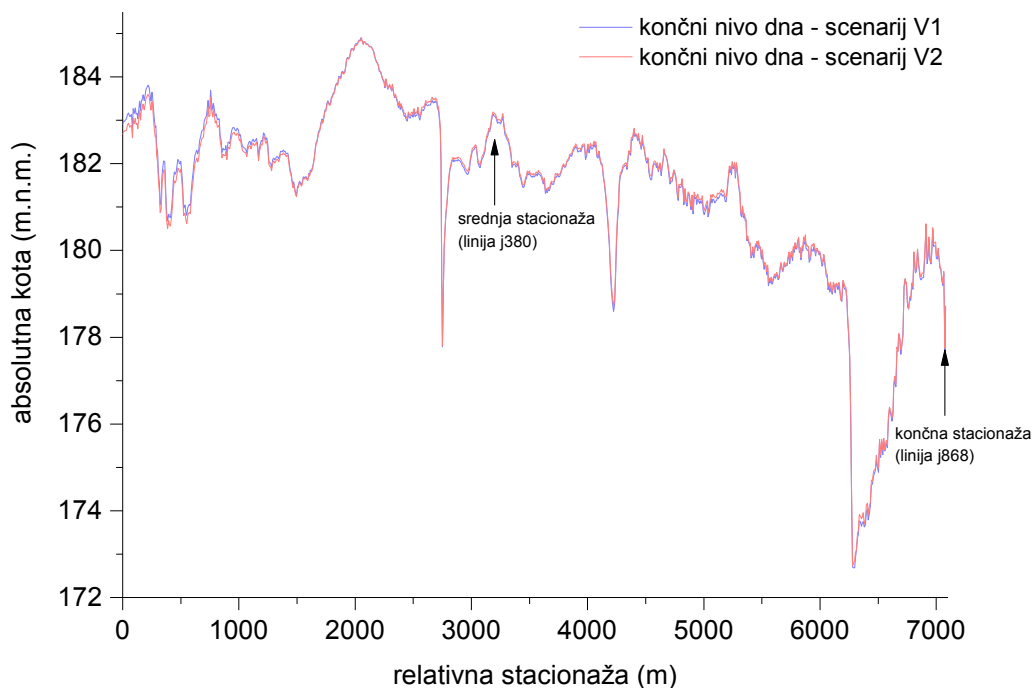
- Sorazmerno erodibilne naplavine v akumulaciji oz. naplavine, ki so posledica prejšnjih visokovodnih dogodkov, odplavi pred konico visokovodnega vala, kar povzroči deficit plavin v nadaljnjem poteku visokovodnega dogodka.
- Zaloge plavin iz dna struge se pojavljajo v vedno manjših količinah zaradi razvoja krovnege sloja dna akumulacije.
- Variacije v padavinah in erodibilnosti na območju akumulacije lahko povzročijo koncentriran tok plavin z območij, kjer so večje količine predhodno odloženih plavin (tik nad pregrado HE Vrhovo) v času, ko pretok še ni dosegel najvišjih vrednosti.

V nasprotju z urbano odvodnjo padavinske vode, kjer se voda z večjo koncentracijo plavin zadržuje in se odvaja čistejša voda, je v tipičnih akumulacijah zaželeno, da se vode z večjo koncentracijo plavin odvajajo dolvodno po strugi.

8.2.2 Scenarij V₂ in primerjava s scenarijem V₁

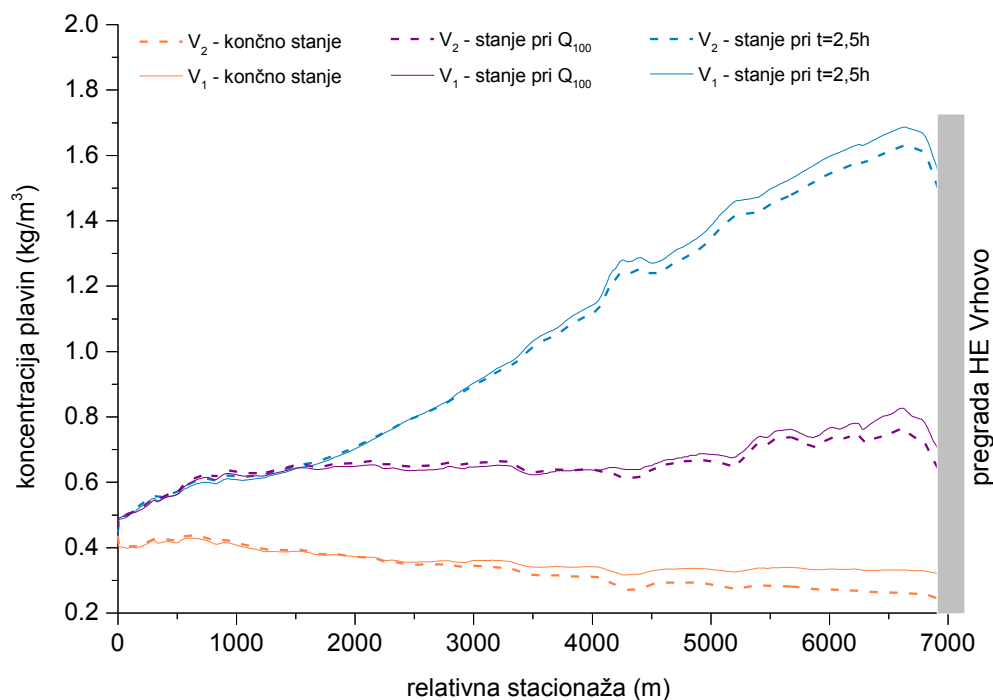
Bistvena razlika med obema scenarijema je v tem, da scenarij V₂ predvideva prevladujočo frakcijo drobnih peskov, zato smo pričakovali v povprečju nekoliko nižjo stopnjo erozije dna reke Save kot pri scenariju V₁. Vzdolž matice toka v akumulaciji HE Vrhovo (linija i9) med posameznimi časovnimi preseki ne prihaja do bistvenih razlik v nivojih dna v akumulaciji, dno pri nastopu Q₁₀₀ je skoraj enako tistemu v primeru scenarija V₁ (razlike do 4 cm), nekoliko večje pa so razlike na koncu opazovanega obdobja, kjer se gibljejo tudi do 20 cm (slika 60). Skladno z zgornjo hipotezo smo pokazali, da je erozija dna nekoliko večja v primeru scenarija V₁ (prevladujoči delež pritekajočih drobnejših frakcij, ki se ne odlagajo, temveč se le premeščajo skozi pregrado dolvodno), razen v zgornji coni dolžine cca 1300 m (do starega železniškega mostu pri Radečah), kar se lahko pripiše vhodni zrnastosti sestavi računskega vzorca na tem območju, ki vsebuje večji delež bolj grobih frakcij (CS, VFG).

Analogije iz primerjave dna med obema variantama se kažejo tudi pri primerjavi poteka koncentracij plavin vzdolž linije i9. Koncentracije plavin, podobno kot nivoji dna akumulacije, so nekoliko višje v zgornji coni akumulacije, v dolžini cca 1.300 m, potem pa se glede na varianto V₁ do profila pregrade zmerno znižujejo, vendar niso nikoli nižje kot pri varianti V₁ za več kot 5 %.



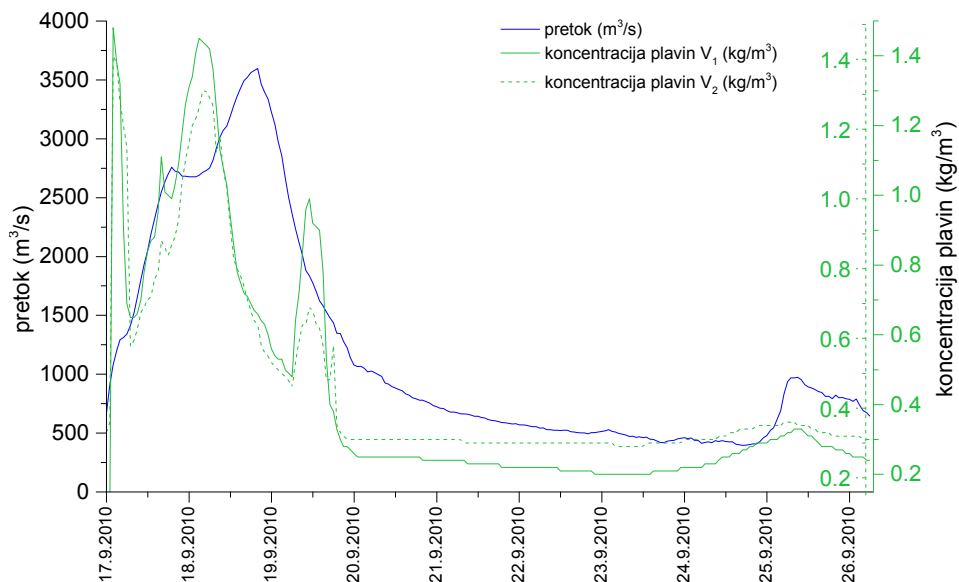
Slika 60: Primerjava nivojev dna obeh scenarijev v akumulaciji Vrhovo na koncu simulacije
Figure 60: Comparison of reservoir bottom levels for both scenarios at the end of simulation

Situacija je, izhajajoč iz deležev posameznih frakcij v scenariju, pričakovana, saj vsebuje scenarij V₂ večji delež peskov, ki se tudi hitreje posedajo, s tem pa je tudi koncentracija v določenem časovnem preseku nekoliko nižja.



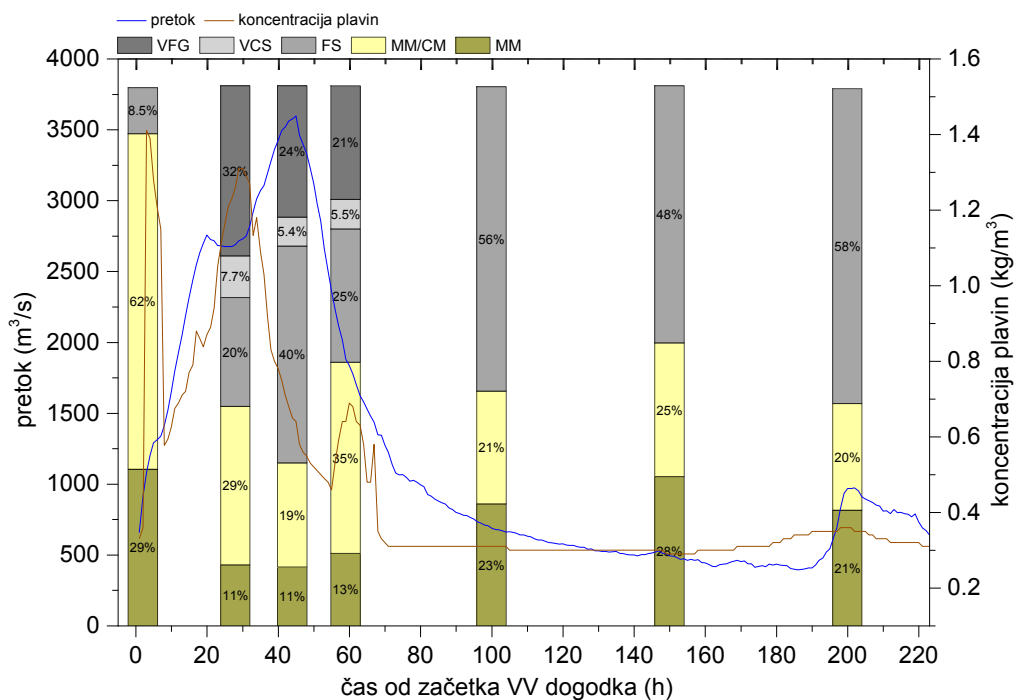
Slika 61: Primerjava koncentracij plavin obeh scenarijev vzdolž linije i9 za različne časovne preseke
Figure 61: Comparison of sediment concentration along the reservoir for both scenarios at various time frames

Odvisnost koncentracij plavin od časa kaže pri varianti V_2 podobne tendence kot pri prvi varianti (V_1), s tem da so koncentracije v povprečju nižje v času konice visokovodnega vala, prevoj pa se zgodi ob padcu pretokov na vrednost $\sim 1.000 \text{ m}^3/\text{s}$, ko se ohranjajo nekoliko višje koncentracije v primeru scenarija z večjo vsebnostjo peskov do konca dogodka, kar je posledica večje specifične gostote plavin v scenariju V_2 .



Slika 62: Primerjava koncentracij plavin obeh scenarijev s pretokom glede na časovni potek tik gorvodno od pregrade

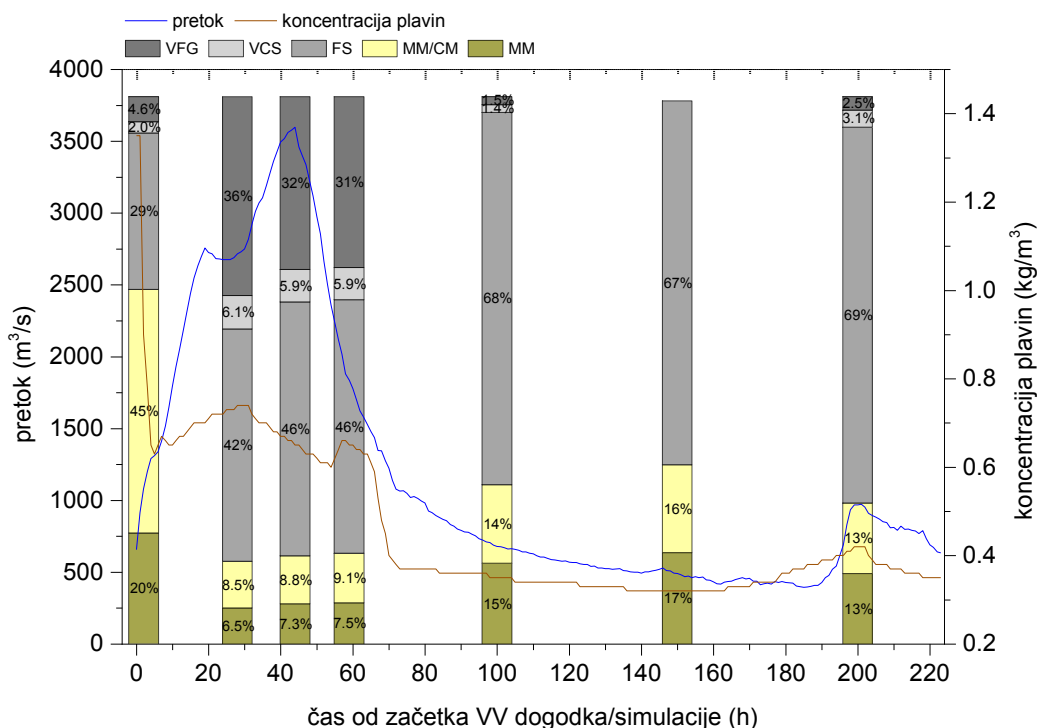
Figure 62: Comparison of sediment concentration to flow just upstream of the dam for both scenarios with relation to time



Slika 63: Deleži posameznih frakcij v koncentraciji plavin/celotna koncentracija plavin v odvisnosti od časa nastopa pretoka tik gorvodno od pregrade (j868) – scenarij V_2

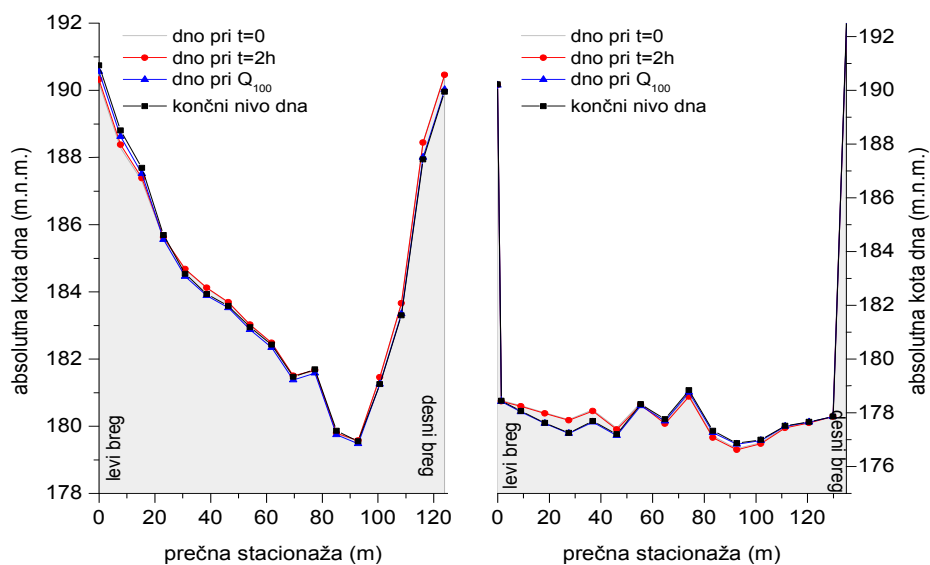
Figure 63: Shares of individual grain-size fractions of sediment concentration/total sediment concentration relation to flow just upstream of the dam – scenario V_2

Tudi v primeru scenarija V_2 je opaziti podobne trende gibanja stopnje koncentracije v odvisnosti od časa in pretoka kot pri scenariju V_1 (razlike v koncentracijah plavin glede odvisnosti od časa in pretoka so minimalne). Razlike se pojavijo predvsem v fazi padanja in ustalitve pretoka, ko daleč največji delež frakcij predstavljajo fini/drobni peski, ki so bili v podobnih razmerjih podani že kot računski vzorec.



Slika 64: Deleži posameznih frakcij v koncentraciji plavin/celotna koncentracija plavin v odvisnosti od časa nastopa pretoka na srednji stacionaži – scenarij V_2

Figure 64: Shares of individual grain-size fractions of sediment concentration/total sediment concentration relation to flow at the central station of the reservoir – scenario V_2

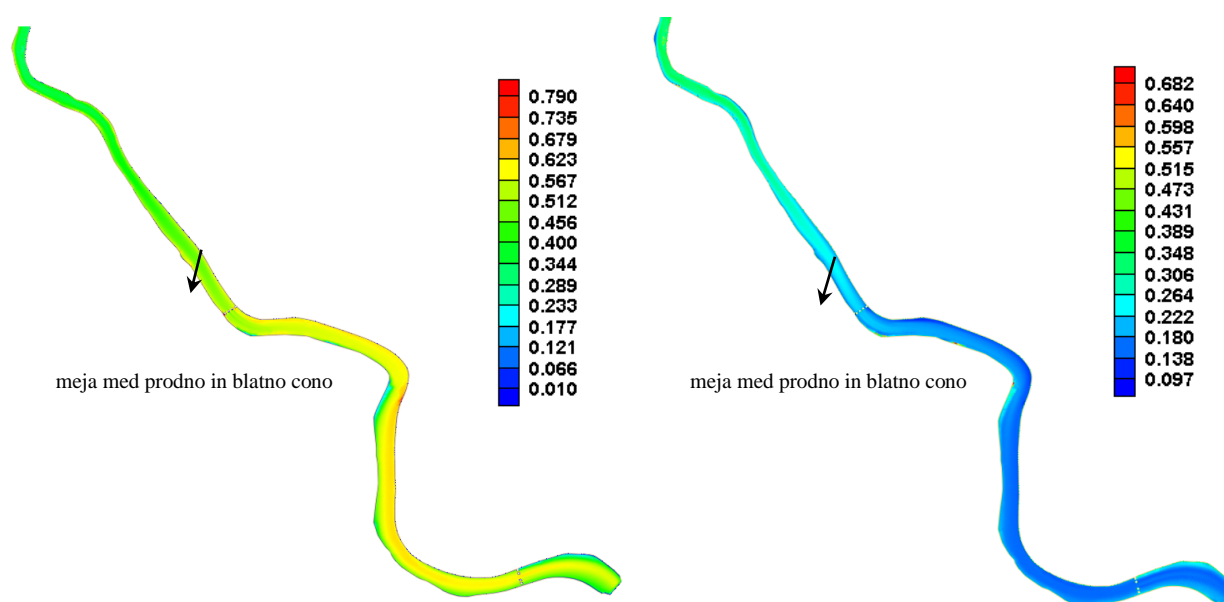


Slika 65: Primerjava prečnih prerezov dna v akumulaciji za mesto tik nad pregrado in na srednji stacionaži akumulacije za t_0 , $t = 2$ h, stanje pri Q_{100} in končno stanje

Figure 65: Comparison of reservoir bottom cross sections at central station of the reservoir and just upstream of the dam at the beginning, at Q_{100} and at the end of simulation

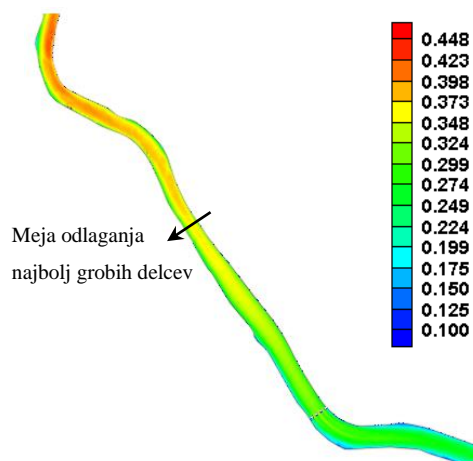
Očitno je, da se z upadom pretokov na začetno vrednost razmerja med posameznimi frakcijami stabilizirajo na podobna tistim v začetnem času t_0 , predvsem v opazovanem profilu na srednji stacionaži (slika 64), medtem ko se na profilu tik nad pregrado do konca opazovanega VV dogodka ta razmerja zaradi bolj dolvodne lokacije še niso povsem stabilizirala (slika 63).

Rezultati simulacije v času prvega maksimuma koncentracij plavin, tj. takoj po začetku VV dogodka ($t = 2-2,5$ h) ob levem bregu tik nad pregrado, kjer je Sava oblikovala desni meander, in na desnem bregu, podobno kot pri scenariju V_1 še ne kažejo bistvenih sprememb v dnu struge (slika 65). Slaba dva dneva (44 ur) po začetku VV dogodka, tj. pri nastopu Q_{100} , pa rezultati kažejo na sorazmerno intenzivno spiranje plavin ob levem bregu, medtem ko se plavine ob desnem bregu v manjši meri odlagajo. Nivo dna tik nad pregrado se nato do konca VV dogodka ohranja, kar je posledica spiranja nanosov drobnejših frakcij na začetku simulacije VV dogodka, pri čemer iz gorvodnih con v nadaljevanju priteka manj plavin, ker začetni bolj »grobi« računski vzorec scenarija V_2 povzroči več odloženih plavin v gorvodni coni akumulacije. Meja med prodno in blatno cono je nekoliko zabrisana, vendar pa jo je z nekoliko manjšo natančnostjo (± 150 m) mogoče zadovoljivo opredeliti (slika 66). Mejni profil med prodno in blatno cono se glede na frakcijo nekoliko spreminja, vendar se giblje na razdalji ~ 4.300 m gorvodno od pregrade HE Vrhovo.



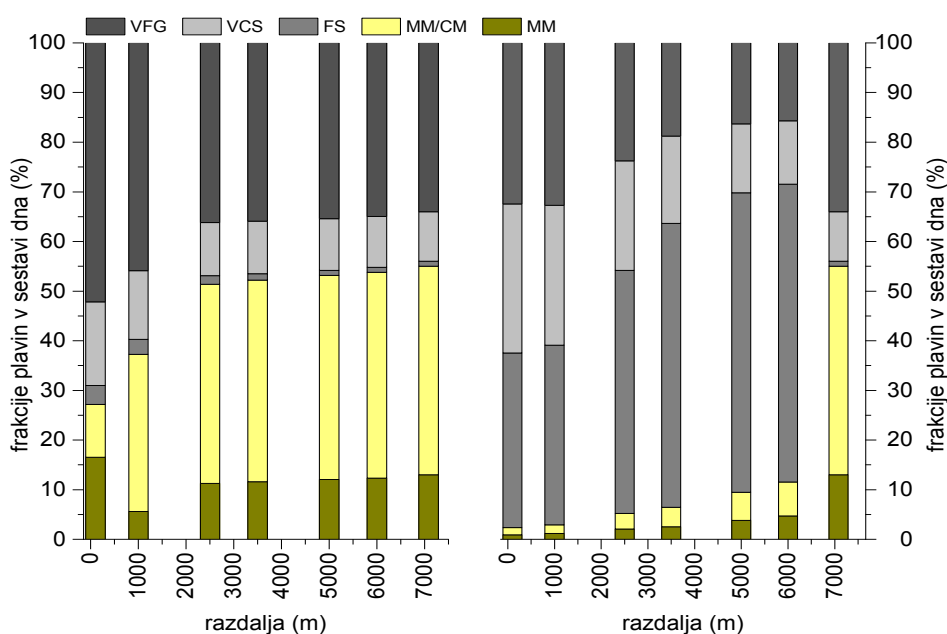
Slika 66: Meja med prodno in blatno cono na koncu VV dogodka; levo zastopanost frakcije VFS, desno CS – V_2
Figure 66: Boundary line between dominating bedload and dominating suspended load zone; on image at the left side representation of VFS fraction and on the right side of CS fraction

V primeru scenarija V_1 je meja med prodno in blatno cono bolj zabrisana, saj so tudi frakcije v računskem vzorcu dotoka plavin v model bolj enakomerno zastopane. Podobno kot pri scenariju V_2 so tudi tu grobi delci velikosti več kot 2 mm zastopani pretežno le v zgornji četrtini akumulacije (slika 67).

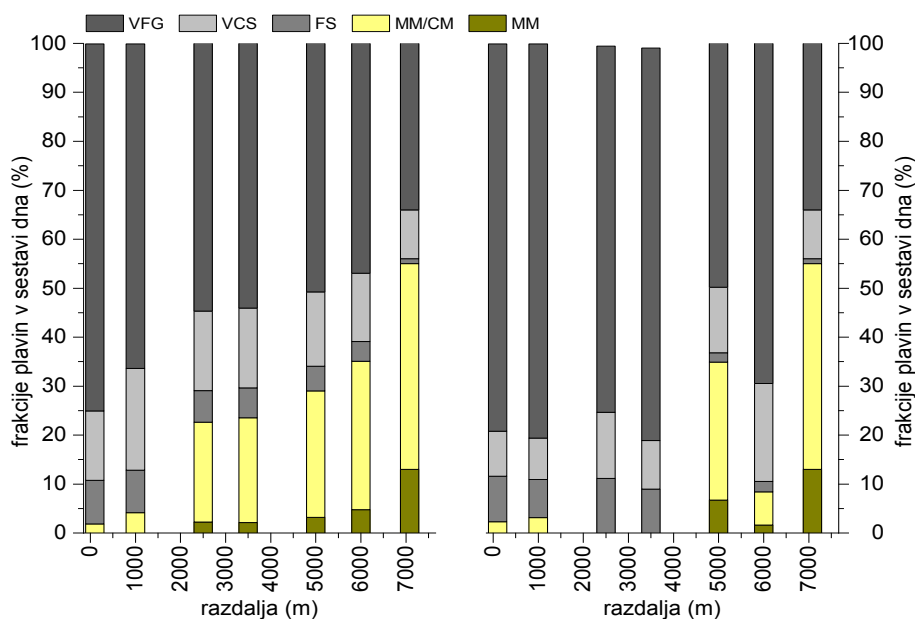


Slika 67: Zastopanost najbolj grobih frakcij na dnu akumulacije na koncu VV dogodka – scenarij V₂
Figure 67: Representation of coarser sediments at the bottom at the end of simulation – scenario V₂

Terenske meritve v sklopih preteklih študij (Geateh, 2010; Dolinar et al., 2008) kažejo, da se v akumulaciji Vrhovo zadržujejo frakcije finega peska, vendar se ne transportirajo dolvodno od pregrade. Fini peski so v večini posledica plavin, ki jih s tokom prinese Savinja v Savo med visokovodnim dogodkom, nekaj manjši delež pa jih je kot del nanosov preteklih visokih voda, zato v zgornji polovici akumulacije prevladujejo v izmenjevalni plasti in zgornji polovici spodnje plasti dna akumulacije (v spodnji polovici akumulacije so fini peski in srednji melj med sabo bolj enakomerno zastopani). Na začetku simulacije/VV dogodka so ocenjeni deleži frakcij v sestavi dna akumulacije glede na obstoječe podatke in izvedeni vrtini v letu 2009.



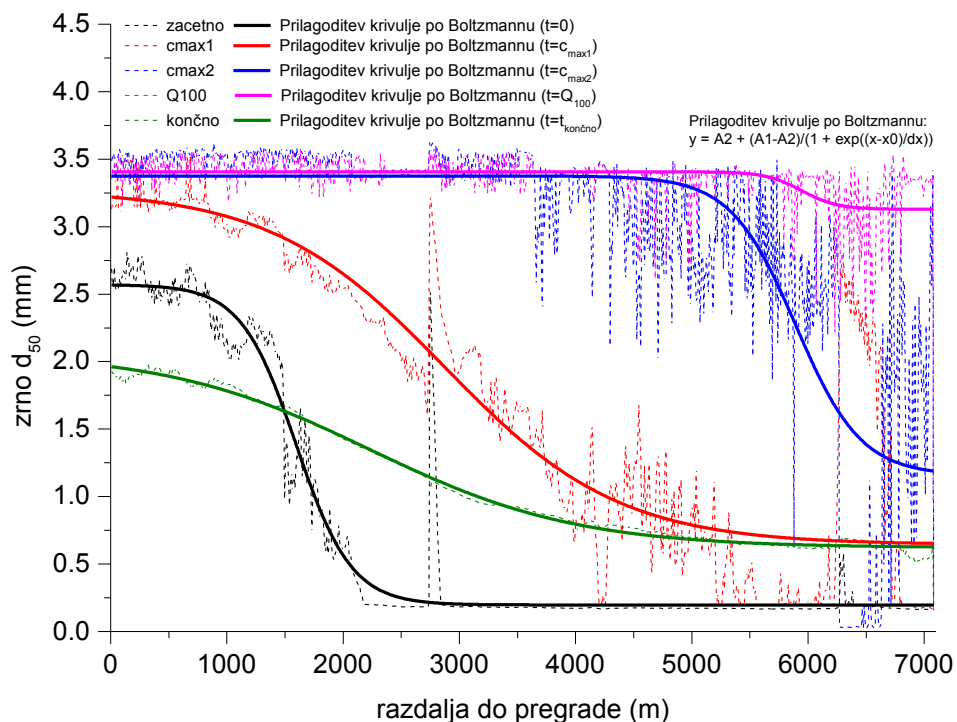
Slika 68: Porazdelitev frakcij sestave dna na začetku (levo) in koncu (desno) VV dogodka (simulacije)
Figure 68: Distribution of fractions of the sediment composition at the reservoir bottom at the beginning (left) and at the end (right)



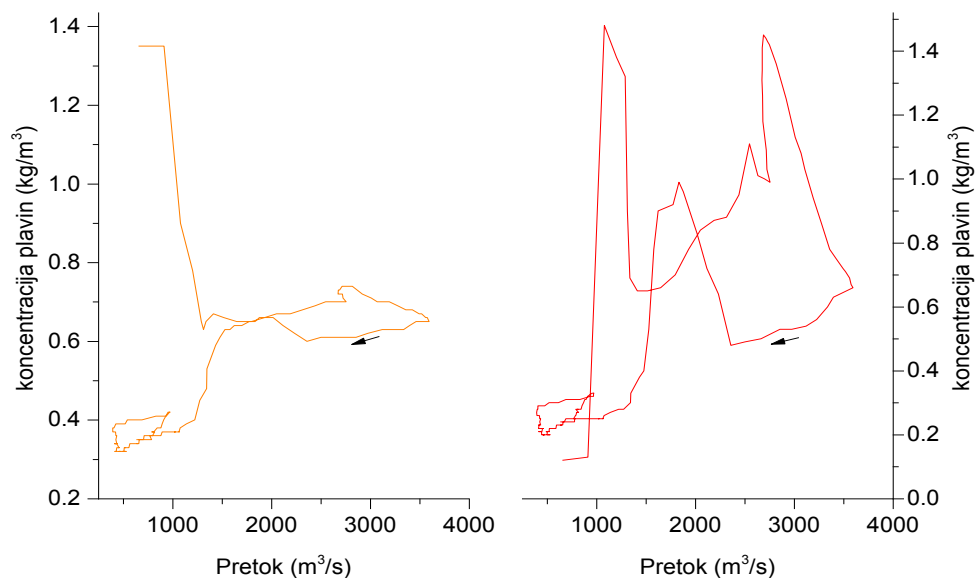
Slika 69: Porazdelitev frakcij sestave dna v času prve konice (levo) in druge konice (desno) koncentracij plavin
 Figure 69: Distribution of fractions of the sediment composition at the reservoir bottom at the time of primary sediment concentration peak and at the time of the secondary concentration peak

V zgornji tretjini akumulacije na začetku simulacije prevladujejo nekoliko bolj grobe frakcije (VFG, VCS), dolvodno od izliva Sopote v Savo pa so v večini zastopane fine frakcije (MM, CM) (slika 68). Po ustalitvi pretoka oz. na koncu simulacije prevladujejo v sestavi tal peski (FS, VCS), razen 500–700 m gorvodno od pregrade, kjer stabilizacija hidroloških razmer povzroči usedanje melja (MM/CM). Ob nastopu ekstremov koncentracij se melj ohranja le v coni 500–700 m gorvodno od pregrade (predvsem ob nastopu drugega ekstrema koncentracij, ko se melj le transportira vzdolž akumulacije, useda pa se 500–700 m gorvodno od pregrade, ko hitrosti nekoliko padejo zaradi ovire v toku) in tvori zgornjo plast (povprečne debeline 2–4 m), medtem ko v zgornjih plasteh dna, v bolj gorvodnih legah akumulacije, po nastopu konice pretokov prevladujejo peski in zelo fini prod.

Slika 70 kaže porazdelitev zrna d_{50} vzdolž akumulacije za različne časovne preseke – na začetku, na koncu simulacije in vmes, v času obeh ekstremov koncentracij in ob nastopu Q_{100} . Pričakovano je velikost zrn d_{50} največja v času največjih pretokov, ne pa toliko v času največjih koncentracij. Velikost zrna d_{50} je v času največjih pretokov konstantna vzdolž akumulacije razen v spodnjih 1.000–1.500 m, kjer velikost d_{50} pade zaradi mešanja s plavinami blatne cone. Vpliv plavin blatne cone je z višanjem pretoka vedno manjši. Ob pretokih velikosti Q_1 pada velikost d_{50} vzdolž akumulacije asimptotično do velikosti $\sim 0,6$ mm tik nad pregrado. Na koncu simulacije oz. VV dogodka je velikost d_{50} v povprečju dvakrat višja kot pred VV dogodkom (na začetku prevladujejo melj in zelo fini peski, na koncu pa zelo fini/fini peski).



Slika 70: Premer zrna d_{50} vzdolž akumulacije za različne časovne preseke v simulaciji
Figure 70: d_{50} grain diameter along the reservoir for various time frames



Slika 71: Histerezni zanki za območje okoli točke i9j380 (levo) in območje tik nad pregrado i9j868 (desno) – V_2
Figure 71: Hysteresis loops at the central station and just upstream of the dam – scenario V_2

Odvisnosti koncentracij plavin od pretoka oz. histerezni zanki za scenarij V_2 sta zelo podobni tistim iz prvega scenarija in imata enako, pozitivno usmerjenost, zato so zaključki za zanki II. reda analogni tistim za histerezni zanki odnosa med pretokom in koncentracijo plavin scenarija V_1 .

8.3 Verifikacija modela in izbor scenarija

8.3.1 Verifikacija modela

Oba obravnavana scenarija sta temeljila na visokovodnem dogodku med 17. in 26. 9. 2010, za katerega se na podlagi pretokov in dosedanjih izkušenj smatra, da zajame celoletno bilanco plavin oz. služi za izračun celoletne prodonosnosti Save v profilu HE Vrhovo.

Savske elektrarne Ljubljana kot upravljavec HE Vrhovo z akumulacijo prek podizvajalcev izvaja izmero akumulacije za potrebe analize zasipanja oz. erodiranja vsakih pet let. Redna analiza se je izvajala v mesecu februarju 2010, rezultat pa je bila med drugim tudi batimetrija, ki je v modelu te naloge služila kot vhodni terenski podatek. Oktobra 2010, tj. en mesec po obravnavanem VV dogodku v septembru 2010, pa se je za potrebe analize posledic VV dogodka ponovno izmerilo batimetrijo dna s ciljem ugotoviti trende odlaganja oz. erodiranja plavin pri VV dogodku. Primerjalo se je obe batimetriji in pridobilo volumen erodiranih plavin v obdobju februar–oktober 2010, pri čemer je bilo 95 % letne prostornine plavin iz akumulacije odnesenih v času VV dogodka v septembru 2010.

Verifikacija modela se je izvajala na sledeči osnovi:

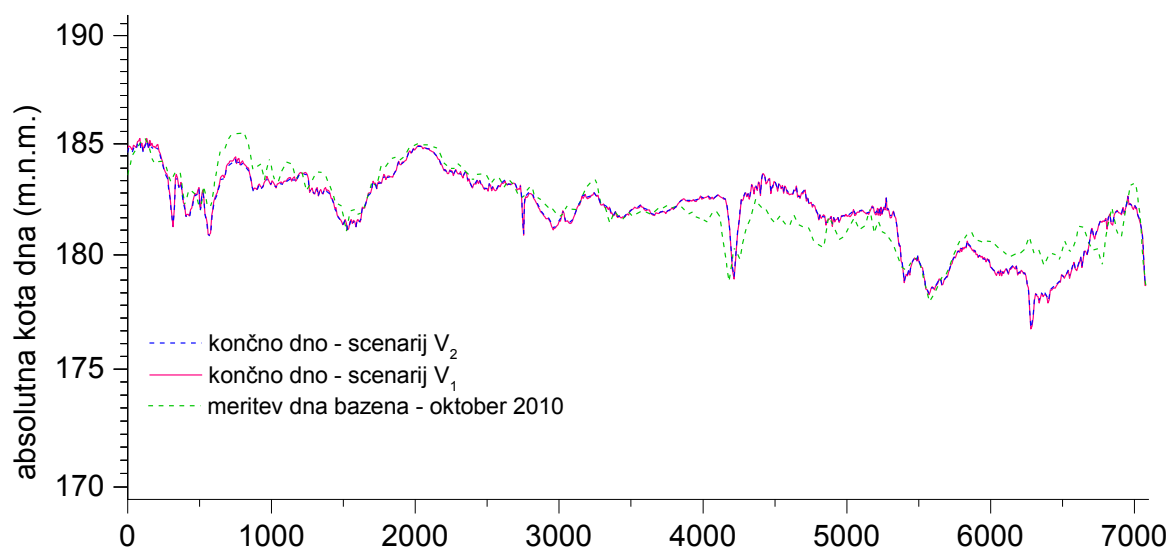
- Izračun volumna erodiranih plavin, pridobljenega s primerjavo obeh izmerjenih batimetrij (februar in oktober 2010), in primerjava tega z izračunom transporta plavin v času VV dogodka (ocenjena specifična teža plavin je $2,1 \text{ t/m}^3$).
- Grafična primerjava simuliranega končnega nivoja dna vzdolž sredinske linije akumulacije (linija i9 v modelu) z dnem sredinske linije akumulacije izmere dna v oktobru 2010.

Preglednica 21: Primerjava izmerjenih in izračunanih volumnov transporta plavin

Table 21: Comparison of measured and simulated (computed) volumes of the sediment transport

| Primerjava izmerjenih batimetrij – feb/okt 2010 | Izračun volumna transporta plavin z modelom |
|---|--|
| 297.000 m ³ | 283.000 m ³ – scenarij V ₁ |
| | 291.000 – scenarij V ₂ |

Preglednica 19 kaže zadovoljivo stopnjo ujemanja med izračunanimi vrednostmi, pri čemer se tudi oba scenarija bistveno ne razlikujeta med sabo; nekoliko bolj se z izmerjenimi količinami ujema scenarij V₂ (98-odstotno ujemanje; 95-odstotno ujemanje v primeru scenarija V₁).



Slika 72: Primerjava vzdolžnih profilov dna akumulacije za izmerjene in izračunane vrednosti
Figure 72: Comparison of longitudinal profiles of the bottom for measured and computed values

Primerjava dna, ki izhaja s slike 72, kaže sorazmerno dobro ujemanje med nivoji dna, z določenimi odstopanji v spodnji polovici akumulacije, kar je med drugim posledica tega, da so se v času med koncem opazovanega obdobja visokih voda in med izvedbo meritev dna v oktobru 2010 v manjši meri še pojavljali pretoki, ki so povzročili transport in odlaganje plavin. Odstopanja v nivojih dna so nastala tudi zaradi razlik med primerjalnimi vzdolžnimi profili zaradi lokalnih sprememb nivoja dna. Spremembe nivoja dna so omejene na majhno območje in tako ni nujno, da jih primerjalni vzdolžni profil zajame. Model CCHE2D tudi ne omogoča implementacije hidrotehničnih objektov v strukturo modela – mogoča je le deaktivacija celic(e) računske mreže, kar program upošteva kot oviro v toku s (kvazi)pravokotnim profilom oz. v primeru mostov steber s pravokotnim profilom. Mostni steber seveda ni pravokotne oblike, zato tudi natančnejšega erozijskega dogajanja neposredno ob mostnem stebru program ne upošteva. Posledica so razlike na posameznih mestih vzdolž akumulacije med dejanskimi meritvami dna v akumulaciji (oktober 2010) in modeliranimi – primer, neujemanje dejanskih in modeliranih višin na mestu mosta cca 750 m gorvodno od pregrade.

8.3.2 Izbor scenarija za potrebe ustreznega obratovanja HE Vrhovo

V sklopu modeliranja toka s prosto gladino in transporta plavin v akumulaciji Vrhovo sta se izvedla dva scenarija, ki sta se razlikovala v deležih posameznih frakcij plavin, ki dotekajo v akumulacijo. Rezultati obeh scenarijev se med sabo bistveno ne razlikujejo, razlike se pojavljajo predvsem na račun prevladujočega deleža frakcije finih peskov v scenariju V₂.

Primerjava vzdolžnih profilov dna obeh scenarijev z izmerjenim stanjem je pokazala nekoliko boljše ujemanje scenarija V₂. Primerjava prostornine erodiranih plavin obeh scenarijev z dejanskim stanjem je pokazala sicer minimalne razlike med obema, vendar v prid scenarija V₂.

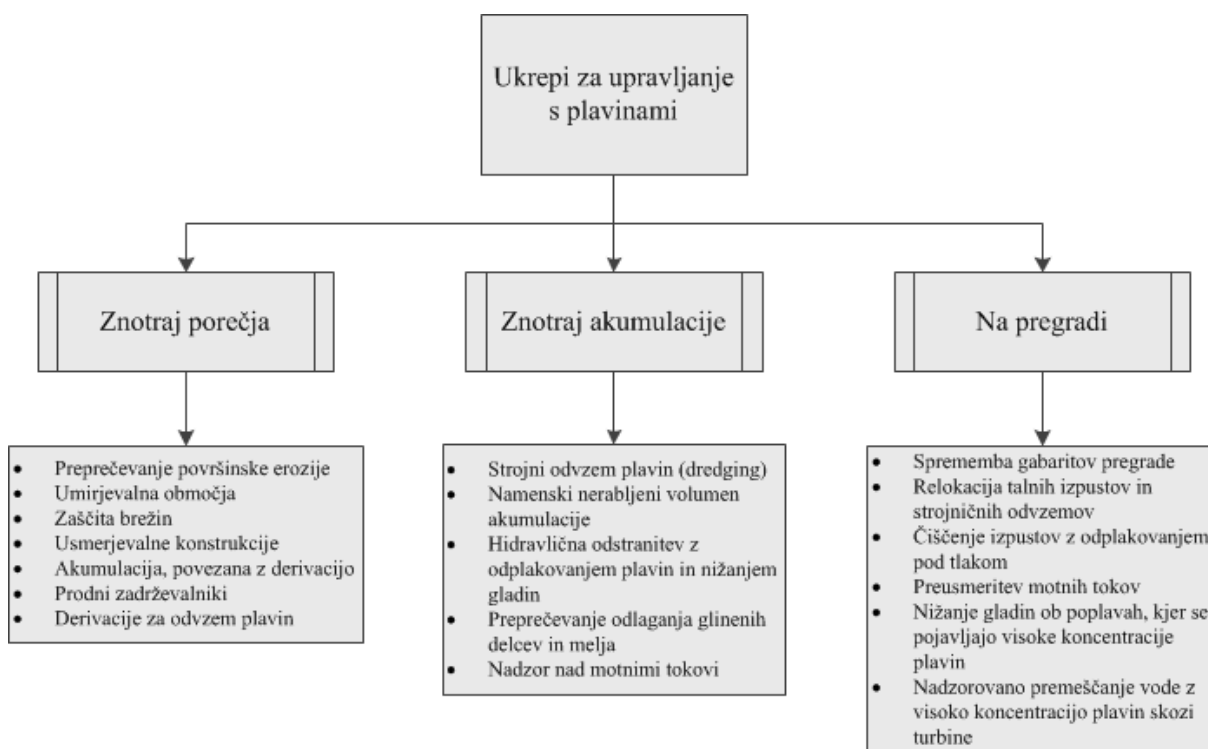
V nadaljnjih analizah smo zato upoštevali parametre in zaključke scenarija V₂.

9 UPRAVLJANJE PREGRADE HE VRHOVO GLEDE NA MORFOLOŠKE RAZMERE V AKUMULACIJI

9.1 Ravnanje s plavinami

Upravljanje s plavinami se v splošnem deli na tri prostorsko definirane segmente, in sicer so to:

- ukrepi v ožjem porečju akumulacije,
- ukrepi znotraj območja akumulacije,
- ukrepi na pregradi.



Slika 73: Ukrepi za ravnanje s plavinami
Figure 73: Sediment management measures

Za potrebe te naloge je najbolj zanimiv postopek spiranja (angl. *flushing*) z nižanjem gladin akumulacije ob povišanih pretokih oz. povišanih koncentracijah plavin.

Spiranje je metoda, s katero se plavine odstranjujejo iz akumulacije s pomočjo vodnega toka. Tako z rečno-morfološkega kot tudi ekonomskega vidika ima ta metoda mnogo prednosti, uporabna pa je le v obdobjih povišanih pretokov. Pogosto uporabljena, empirično pridobljena vrednost, ki podaja začetek plavljenja plavin glede na pretok, je $0,5-0,7 Q_1$, kar za HE Vrhovo znaša od 600 do 800 m³/s. Ob tem velja, da je pri teh velikostih pretokov učinek plavljenja največji ob nadzoru nad ključnimi parametri, kot so količina plavin, vsebnost organskih snovi, stopnja potrebe po kisiku itd. Ne glede na pojavnost

voda, pri katerih se začne spiranje (dvig zapornic), je treba plavljenja redno izvajati v intervalih 1–3 leta (Knoblauch, 2006), kar omogoča tudi prilagoditev ostalim parametrom (npr. drstitev rib).

Ravnanje s plavinami v akumulacijah zajema še druge postopke, ki niso neposredno povezani z upravljanjem s hidromehansko opremo, kot so strojni izkop drobnozrnatih usedlin in peščenih nanosov, gradnja različnih regulacijskih objektov, ki vplivajo na hidravlične razmere v akumulaciji, na primer jezbece, ali pa odvzemi plavin s pomočjo odzemnih objektov. V reki Savi se transport plavin sproža pretežno v času visokih voda, v območju srednjih pretokov je Sava bistra, prevladuje poplavna kalnost. Povečane koncentracije plavin se pojavljajo torej ob izjemnih hidroloških dogodkih, zato je takrat upravljanje s plavinami najbolj ekonomično z ustreznim ravnanjem s hidromehansko opremo na pregradnem objektu.

9.1.1 Praksa v tujini

V tujini je ravnanje s plavinami v pretočnih akumulacijah podobno kot v Sloveniji; v nadaljevanju je podan primer spiranja plavin na avstrijskem delu reke Drave, kjer je veriga desetih hidroelektrarn v dolžini 134 km in skupnim padcem 176 m. V vodnem dovoljenju je določeno, da rinjene plavine ne smejo dotekati v akumulacije, kar je bilo večinoma doseženo s prodnimi zadrževalniki in usedalniki na gorvodnih odsekih. Usedanje plavin je do določene meje dovoljeno, nad to mejo pa je potrebno spiranje teh plavin z nižanjem gladine akumulacije, pri čemer pretoki ne smejo biti nižji od $0,7 Q_1$, poleg tega je potrebno vzdrževanje gladine v odvisnosti od pretokov. Običajno se nižanje gladin začne pri pretokih velikosti Q_1 in se spreminja glede na koncentracijo plavin in morfološke lastnosti akumulacije.

Izkušnje kažejo, da se je metoda spiranja plavin izkazala kot učinkovita. Najbolj gorvodno ležeča HE Rosegg (Rožek) je zadnjih 20 let vsako leto podvržena spiranju, kar ima za posledico, da nižanje gladine za 2,5 m v primerjavi s 5,5 m, prvotno določenimi v vodnem dovoljenju, povsem zadostuje. V povezavi z akumulacijo Rosegg se je delno nižanje gladin akumulacije izvajalo tudi na dolvodno ležečih HE Feistritz/Bistrica (2,5 m) in HE Edling/Kazaze (1,5 m). Nižanje gladin se tako ne začne, dokler prognozični modeli ne predvidijo pretokov, višjih od $700 \text{ m}^3/\text{s}$ (Knoblauch, 2006). V akumulaciji HE Rosegg se na primer za zaščito Beljaka pred poplavami izvaja tudi mehanska odstranitev plavin in ne le spiranje z upravljanjem s hidromehansko opremo.

9.2 Obstoječi način obratovanja HE Vrhovo glede na razmere

(prevzeto iz Poslovnika obratovanja HE Vrhovo, SEL, d. o. o. – v nadaljevanju poslovnik)

Normalna kota zaježitve akumulacije Vrhovo je 191,0 m, pri tem pa znaša normalna denivelacija 1,0 m (do kote 190,0 m). Glavni razlog denivelacije akumulacije za 1,0 m je v vršnem obratovanju, pri pretokih do 500 m³/s, v fazah vzdrževanja akumulacije, pregrade, zmanjšanja stopnje usedanja rinjenih in lebdečih plavin v akumulaciji ali drugih potreb so izjemoma dovoljene tudi večje denivelacije. V območju denivelacije akumulacije, tj. v času praznjenja in tudi ponovnega polnjenja, je največja dovoljena hitrost 0,5 m na uro, kar velja tudi za hitrost dviga gladine spodnje vode. Obstoječi poslovnik določa dvoje območij obratovanja akumulacije, in sicer med 500 in 1.000 m³/s ter nad 1.000 m³/s.

Obratovanje z akumulacijo pri pretoku Save med 500 in 1.000 m³/s

Pretoki, ki so večji od kapacitet turbin 500 m³/s, se odvajajo prek zaklopk prelivnih polj (pretočna zmogljivost zaklopk pri normalni koti obratovanja 191,0 m je 319 m³/s). V primeru potrebe po večji pretočni sposobnosti prelivnih polj se v fazi vseh spuščениh zaklopk dvignejo segmentne zapornice, tako da je podliv porazdeljen enakomerno pod vsemi segmentnimi zapornicami. Pri pretoku Save v Hrastniku nad 1.000 m³/s se začne denivelacija akumulacije.

Obratovanje z akumulacijo pri pretoku Save nad 1.000 m³/s

V primeru visokih pretokov Save na vodomerni postaji Hrastnik je način reguliranja akumulacije Vrhovo sledeč:

Preglednica 22: Regulacija nivoja akumulacije Vrhovo glede na pretok na VP Hrastnik
Table 22: Vrhovo reservoir water level management with relation to flow at Hrastnik gauging station

| Pretok Save na VP Hrastnik [m³/s] | H_{zg} [m] |
|---|---------------------------|
| 1.000 | 191,0 |
| 1.200 | 190,3 |
| 1.400 | 189,7 |

Način regulacije akumulacije Vrhovo se spremeni v primeru nastopa pretoka, ki je v seštevku Save na VP Hrastnik in Savinje na VP Veliko Širje večji ali enak 1.400 m³/s.

Preglednica 23: Regulacija nivoja gladine glede na vsoto pretokov Save/VP Hrastnik in Savinje/VP Veliko Širje
Table 23: Vrhovo reservoir water level management with relation to total flow from Sava and Savinja River

| Pretok Save na VP Hrastnik in Savinje na VP Veliko Širje [m^3/s] | H_{zg} [m] |
|--|-----------------------|
| 1.600 | 189,7 |
| 1.800 | 189,4 |
| 2.000 | 189,0 |
| 2.500 | 188,2 |
| 3.000 | 188,2 |
| nad 3.100 | popolni dvig zapornic |

Hitrosti praznjenja akumulacije se regulirajo skladno s prirastkom dotoka reke Save oz. največ 20 cm na uro, saj lahko prehitro in nekontrolirano praznjenje (polnjenje) povzroči poslabšanje razmer dolvodno in gorvodno (nevarnost erodiranja brežin izven območja energetskih nasipov, prelivanje brežin na določenih odsekih dolvodno od pregrade).

Pri nedelujočih agregatih in naraščanju pretoka se lahko izvede tudi večje znižanje H_{zg} , vendar ne pod nivojem 188,0 m in z omejitvijo $v_{\max} = 0,2$ m/h.

Praznjenje akumulacije pod nivo 190,0 m

Znižanje nivoja vode v akumulaciji pod nivo 190,0 m pri normalnem pretoku je dovoljeno v primeru:

- vzdrževanja akumulacije,
- vzdrževanja objektov jezusa (remont),
- zmanjšanja stopnje zaprojevanja in predvsem zamuljevanja akumulacije,
- drugih izjemnih potreb.

Obratovanje hidroelektrarne mora v tem primeru delovati tako, da hitrost povečevanja pretoka ne preseže $200 \text{ m}^3/\text{s/h}$, pri čemer je treba predhodno obvestiti pristojne inštitucije, kot so Ministrstvo za kmetijstvo in okolje – ARSO, Urad za upravljanje z vodami – oddelek območja spodnje Save Novo mesto, Inšpektorat za okolje, Jedrsko elektrarno Krško (JEK), Ribiško družino Radeče, Slovenske železnice, podjetje Infra in CV HSE.

Praznjenje akumulacije na naravni pretok Save

V tem primeru veljajo enake omejitve in obveznosti kot v primeru praznjenja pod nivo 190,0, razen v primeru visokih vod.

Polnjenje akumulacije do 190,0 m

Polnjenje akumulacije do kote 190,0 m se izvaja samo pri pretokih Save, ki so večji od 100 m³/s. Pri nižjih dotokih se nivo akumulacije ohranja. Hitrost polnjenja akumulacije je tudi tu omejena na ≤ 20 cm/s.

Minimalni pretok – biološki minimum

Do izgradnje HE Boštanj se je na HE Vrhovo zahtevalo prevajanje minimalnega pretoka (biološki minimum), katerega velikost je prilagojena tehničnim zahtevam Jedrske elektrarne Krško. Pri dotokih nad 100 m³/s znaša biološki minimum 100 m³/s, pod to vrednostjo pa se upošteva naravni dotok. Od vključitve HE Boštanj v energetske verige HE je zagotavljanje biološkega minimuma prevzela Jedrska elektrarna Krško z regulacijo na jezcu JEK.

Zaščita Radeč

Na lokaciji nekdanjega profila meritve pretoka Save pri železnem mostu v Radečah se izvaja zvezna meritev nivoja gladine reke Save. Rezultati meritev se uporabljajo za ugotavljanje zaprojenosti/zamuljenosti rečnega korita.

Meritve gladine reke Sopote se izvajajo na mestu črpališča Radeče. Merilni inštrument je postavljen 50 m gorvodno od iztoka Sopote v Savo in prikazuje razmere v strugi Sopote, kar je neposredno povezano z zagotavljanjem poplavne varnosti v Radečah. Meritev je povezana na krmilnik prelivnih polj v Radečah, ki na osnovi teh informacij izvaja aktivnosti na vseh segmentih zapornic HE Vrhovo. Normalna kota gladine akumulacije na lokaciji tega merilnega mesta za pretok Save 100 m³/s znaša 191,17 m. Če gladina naraste na vrednost 191,33 m, se izvede avtomatski dvig vseh segmentov zapornic HE Vrhovo za 30 cm. Sledi časovna zakasnitev v trajanju 24 min; znotraj tega časovnega segmenta pride vpliv povečanega pretoka HE Vrhovo do merilnega mesta v Radečah. Po tej zakasnitvi se izvede nova meritev, pri vseh nadaljnjih pa se zapornice dvigujejo postopoma po 30 cm. Po znižanju kote gladine akumulacije pod nivo 191,28 m se zaščitna funkcija Radeč deaktivira.

Nadzor gladine Sopote se vrši na profilu Sopote pod mostom na ulici OF (Laznikov most), ki je izven vpliva akumulacije HE Vrhovo. Meritev je prenesena na sistem vodenja HE Vrhovo in v primeru prekoračitve gladine Sopote nad 1 m nad normalno koto se izda opozorilo upravljavcu HE Vrhovo, ki začne nižati akumulacije na koto 190,0 m s hitrostjo nižanja gladine akumulacije 20 cm/uro.

Obveščanje o vodnem režimu

Upravljavca HE Vrhovo je dolžan obveščati upravljavca dolvodno ležeče HE Boštanj o vodnem režimu v sledečih primerih:

- odstopanje od predvidene proizvodnje za več kot 4 MW,
- povečanje ali zmanjšanje pretoka za 50 m³/s zaradi prelivanja na pretočnih poljih,
- odplavljanje plavja prek pretočnih polj,
- ob visokih vodah nad 2.000 m³/s, ko se poleg dolvodno ležeče HE obvešča tudi Center za obveščanje.

Obveznosti do obveščanja NEK ima elektrarna, ki ji je gorvodno najbližje.

9.3 Optimizacija obratovalne krivulje

9.3.1 Odvisnosti med hidromorfološkimi spremenljivkami in obratovalno krivuljo

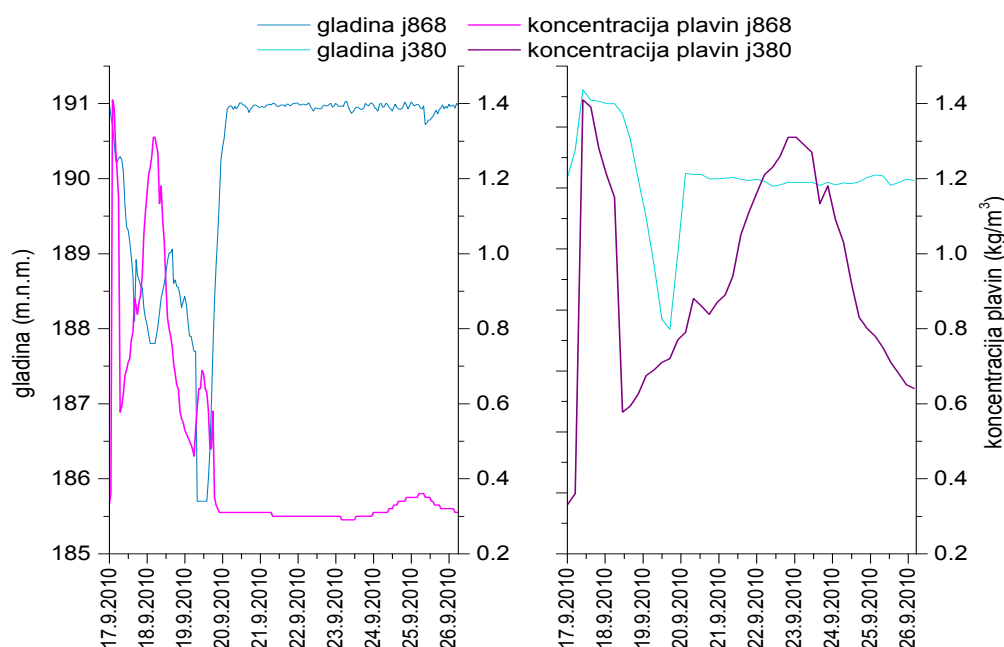
Rezultati modeliranja kažejo, da se maksimalne koncentracije plavin v akumulaciji Vrhovo pojavljajo pred nastopom konic visokovodnih valov – začetni ekstrem koncentracij plavin je posledica sprožitve transporta nanosov iz prejšnjih visokovodnih dogodkov, drugi ekstrem koncentracij plavin pa je posledica transporta plavin iz zgornjega dela akumulacije zaradi povišanih pretokov.

V nadaljnjem obdobju pričakujemo podobne morfološke trende v akumulaciji, med drugim pa so ti odvisni tudi od nadaljnjih posegov na reki Savinji (morebitna gradnja HE na Savinji bi pretežno prekinila tok rinjenih plavin) in v manjši meri tudi na srednji Savi, kjer je predvidena gradnja devetih hidroenergetskih stopenj (dotok plavin z območja srednje Save je že v osnovi skromen).

Trendom, ki jih je nakazal tudi visokovodni dogodek v septembru 2010, smo prilagodili obratovalno oz. denivelacijsko krivuljo, s ciljem zmanjšanja vpliva plavin na odtočne razmere na minimum. Za upravljavca pregradnega objekta HE Vrhovo so s stališča upravljanja s plavinami zanimivi časovni odseki, kjer koncentracija plavin doseže svoj maksimum oz. kjer začne upadati.

Drugače povedano: optimizacija delovanja pregradnega objekta išče točke, kjer bo koncentracija maksimalno velika ob minimalno visokem pretoku (minimalna potrebna denivelacija), in točke, kjer je koncentracija plavin že v fazi upadanja tako nizka, pretok pa se znižuje v taki meri, da se upraviči spust zapornic do določenega nivoja, ki ne povzroča dvig gladine v akumulaciji nad nominalno koto akumulacije 191,0 m.

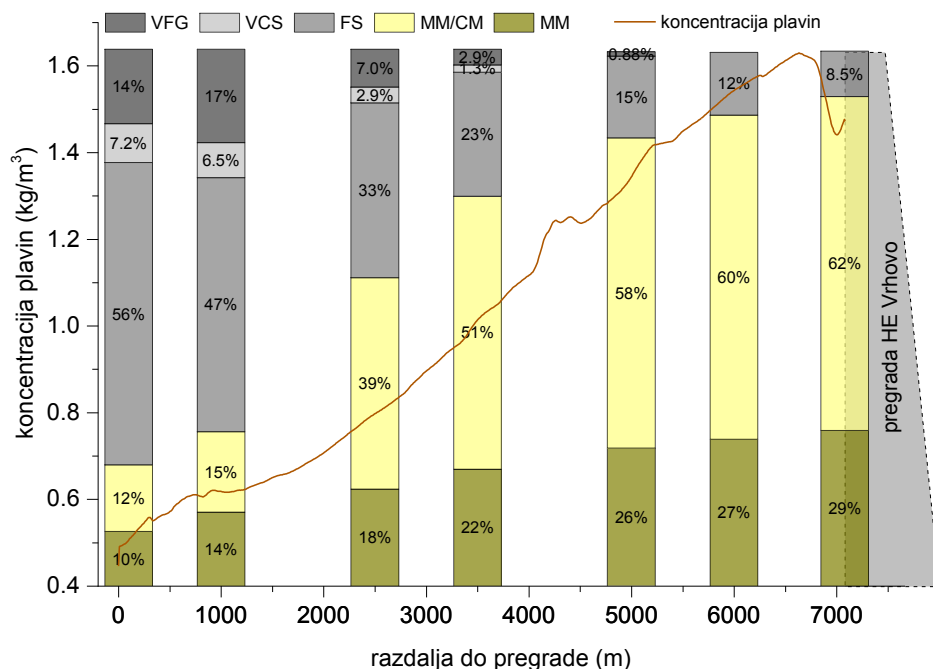
V času VV dogodka septembra 2010 sta se pojavila dva ekstrema koncentracij, ki pa sta se zaradi morfološke narave akumulacije pojavila pred nastopom konice visokovodnega vala. Ob nastopu prvega ekstrema, tj. ~ 2 uri po nastopu pretokov, ki povzročajo izpiranje plavin iz blatne cone, so pretoki že v rangju 1.000–1.200 m³/s, ko se po obstoječem poslovniku obratovanja začne denivelacija, vendar pa kaže, da je treba denivelacijo začeti nekoliko prej. Upoštevati je treba velikost pretokov na VP Hrastnik in VP Veliko Širje, ki se na sotočju seštejeta, in magnitudo hitrosti vodotoka na začetku visokovodnega dogodka, ki znaša 1,5–2 m/s (hitrost kasneje nekoliko naraste – do 3 m/s), kar pomeni, da val od VP Hrastnik do sotočja pri Zidanem Mostu potuje več kot 60 minut, od VP Veliko Širje pa vsaj 30 minut. Menimo, da mora upravljevec na pregradi HE Vrhovo že ob najavi pretokov, ki so na obeh merilnih postajah gorvodno v seštevku precej nižji kot 1.000 m³/s (začetek denivelacije po obstoječem poslovniku obratovanja), začeti postopno denivelacijo akumulacije (do 20 cm/h). Več o hitrosti denivelacije in pogojih izbire govorimo v nadaljevanju.



Slika 74: Koncentracija plavin v času gladinskega stanja v točkah i9j868 (levo) in i9j380 (desno)

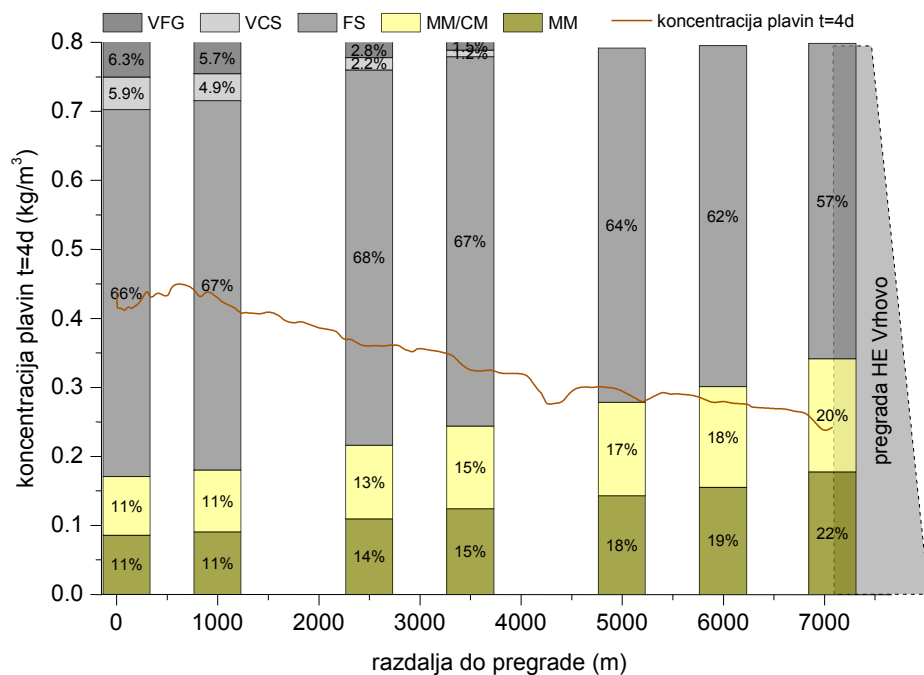
Figure 74: Sediment concentration with water levels at the central station of the reservoir and just upstream of the dam with relation to time

Obstoječi poslovnik obratovanja predvideva dvig samo vseh segmentnih zapornic hkrati, glede na prostorsko razporeditev plavin v akumulaciji pa je smiseln razmislek o dvigu zapornic, še preden je popolnoma izkoriščena kapaciteta turbin in zaklopk (819 m³/s), predvsem v času, ko se iz VP gorvodno (Hrastnik, Veliko Širje) obetajo skupni pretoki, višji od 650–700 m³/s. Model je pokazal, da pretoki take velikosti na začetku sprožijo pretežno manjše frakcije, srednji in grobi melj v spodnji polovici akumulacije oz. fine peske in melj v zgornji tretjini, kot je vidno na sliki 75, ki kaže porazdelitev po frakcijah in koncentracije plavin glede na mesto v akumulaciji pri nastopu pretoka, ki povzroči prvi ekstrem koncentracij plavin (obstoječe naplavine).



Slika 75: Deleži posameznih frakcij v koncentraciji plavin/celotna koncentracija plavin ob nastopu prvega ekstreme koncentracij ($Q \sim 1.080 \text{ m}^3/\text{s}$) glede na mesto v akumulaciji
 Figure 75: Shares of individual grain-size fractions of sediment concentration/total sediment concentration at the time of primary sediment concentration peak related to position along the reservoir

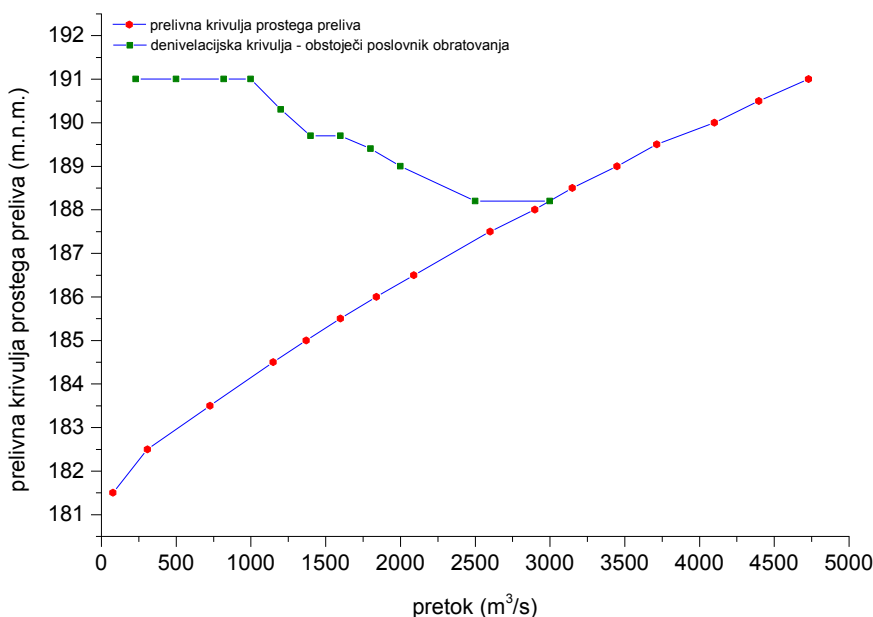
Koncentracija plavin in pretok se štiri dni po začetku VV dogodka ustalita na začetnih vrednostih z dotekanjem pretežno finih peskov (FS) v času drugega ekstreme koncentracij plavin (slika 76). Do konca simulacije visokovodnega dogodka se deleži frakcij bistveno ne spremenijo.



Slika 76: Deleži posameznih frakcij v koncentraciji plavin/celotna koncentracija plavin ob nastopu stabilnih pretočnih razmer glede na mesto v akumulaciji
 Figure 76: Shares of individual grain-size fractions of sediment concentration/total sediment concentration at the time of flow conditions stabilization

9.3.2 Oblikovanje nove denivelacijske krivulje

Obstoječa denivelacijska krivulja (slika 77) je v grobem ločena na tri dele: 1. del, kjer se na pregradi obratuje samo s turbinami in zaklopkami, 2. del, kjer se začne denivelacija in je obratovanje odvisno zgolj od pretokov na VP Hrastnik (do $1.400 \text{ m}^3/\text{s}$), in 3. del, kjer se upoštevajo še pretoki na VP Veliko Širje na Savinji.



Slika 77: Denivelacijska krivulja po obstoječem poslovniku obratovanja in prelivna krivulja prostega preliva
Figure 77: Operation rule curve by existing operation procedure manual with free flow curve

Način obratovanja po obstoječem poslovniku specifično ne obravnava vpliva plavin na hidrolške razmere, upošteva jih le na grobo, z nekoliko pretiranim nižanjem gladin v akumulaciji glede na območja pretokov (predvsem v območju $1.250\text{--}2.500 \text{ m}^3/\text{s}$), po drugi strani pa začne denivelacijo gladine akumulacije šele pri $1.000 \text{ m}^3/\text{s}$ ($190,3 \text{ m}$ pri $1.200 \text{ m}^3/\text{s}$), čeprav se glede na rezultate modela transporta plavin povišane koncentracije v akumulaciji pojavijo že pri pretokih $800 \text{ m}^3/\text{s}$. V nekaterih specifičnih primerih, ko prinaša Savinja, zaradi pozicije in časovnega poteka obilnejših padavin, v Savo večje količine plavin, Sava pa ima še nekoliko nižje pretoke, je meja, kjer se pojavljajo povišane koncentracije na mestu pregrade, že pri pretokih $700\text{--}750 \text{ m}^3/\text{s}$.

Glede na rezultate modela transporta plavin in izhodišča obstoječe denivelacijske krivulje predlagamo tri variante izboljšanih denivelacijskih krivulj, ki se med seboj ločijo glede na obratovanje turbin in pozicije zaklopk oz. zapornic (pozicije zaklopk/segmentnih zapornic so odvisne od pretokov in spremljajočih koncentracij plavin) in jih opisujemo v nadaljevanju.

9.3.2.1 Izboljšana denivelacijska krivulja dk_1 – predlagani protokol obratovanja št. 1

Denivelacijska krivulja dk_1 poteka s predpostavko, da vse tri turbine v strojnici v svojem območju delovanja delujejo nemoteno in optimalno, pri čemer se jih zaradi povečane koncentracije plavin, kopičenja pri vtočnih tunelih v strojnico (Grom, 2015) in s tem zmanjšanja kapacitete turbin (možnosti okvare) izklopi pri pretoku $800 \text{ m}^3/\text{s}$.

Preglednica 24: Potek denivelacije po krivulji dk_1
Table 24: Operation rule procedure by dk_1 scenario

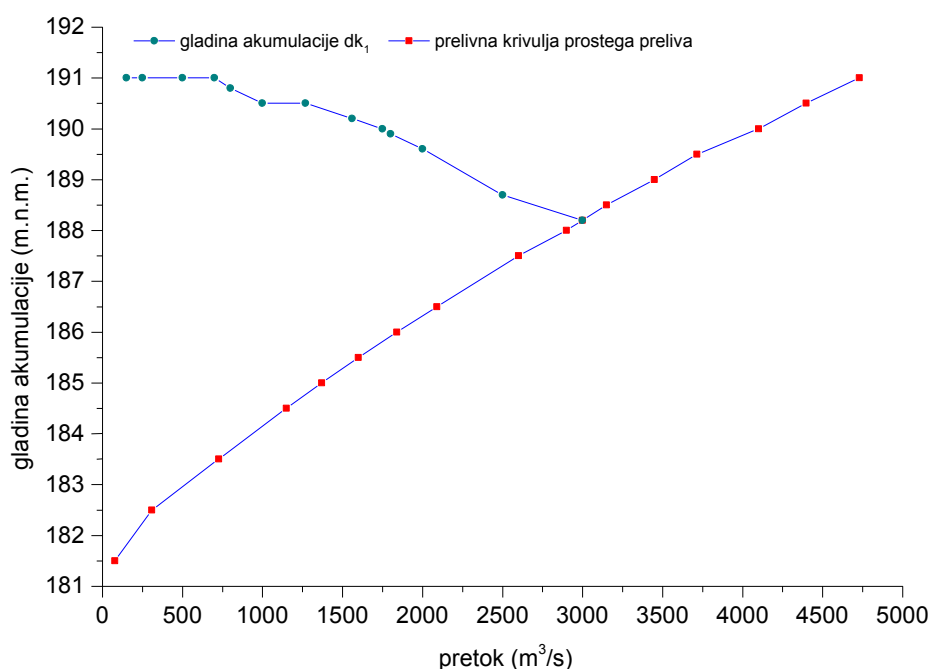
| Denivelacija dk_1 | | | | |
|----------------------------------|---------------------|--------------------|---------------------|-------------------------------|
| Pretok [m^3/s] | Gladina akumulacije | Obratovanje turbin | Zaklopka – dvig [m] | Zapornica – dvig segmenta [m] |
| 150 | 191,0 | 2 turbine | / | / |
| 250 | 191,0 | 2 turbine | / | / |
| 500 | 191,0 | 3 turbine | 1,4 | / |
| 700 | 191,0 | 3 turbine | 3,1 | / |
| 800 | 190,8 | / | / | 1,0 |
| 1.000 | 190,5 | / | / | 1,4 |
| 1.270 | 190,5 | / | / | 1,8 |
| 1.560 | 190,2 | / | / | 2,4 |
| 1.750 | 190,0 | / | / | 2,8 |
| 1.800 | 189,9 | / | / | 3,1* |
| 2.000 | 189,6 | / | / | 4,1* |
| 2.500 | 188,7 | / | / | 4,5* |
| 3.000 | 188,2 | / | / | popoln dvig zapornic |

prehajanje v
prosti preliv

Turbine se ne smejo zapirati prehitro zaradi možnosti vodnega udara (v roku ene ure od prejema obvestila o povišanih pretokih na VP gorvodno), medtem ko se segmentne zapornice dvignejo za 1 m, gladina akumulacije pa se zniža na nivo 190,8 m, s čimer se prek pregrade omogoča pretok $800 \text{ m}^3/\text{s}$ s hitrostjo spusta gladine v dovoljenem okviru 0,2 m/h. Nanose plavin se začne v spodnjem delu akumulacije z dvigom zapornic in podlivanjem pod njimi pretežno odplakovati dolvodno od pregradnega objekta, kar omogoča več manevrskega prostora pri obratovanju ob nastopu pretokov, višjih od $1.500 \text{ m}^3/\text{s}$, in nekoliko manj intenzivno nižanje gladin akumulacije. Z nadaljnjim višanjem pretoka se zapornice dvignejo še za 0,4 m na 1,4 m, gladina akumulacije pa pade na 190,5 m, kar omogoča pretok $1.015 \text{ m}^3/\text{s}$. Tudi zaradi načina obratovanja po obstoječem poslovniku se najvišje koncentracije pojavijo pri teh pretokih, z zgodnejšim odpiranjem zapornic in s tem tudi zgodnejšim odplakovanjem pa so koncentracije pri pretokih v območju $1.000 \text{ m}^3/\text{s}$ predvidoma nekoliko nižje.

Gladina akumulacije ostane pri pretokih do $1.270 \text{ m}^3/\text{s}$ na nivoju $190,5 \text{ m}$, zapornice pa se morajo zaradi tega dvigniti na $1,8 \text{ m}$, da se zadosti pretočni sposobnosti (koncentracije plavin v tem obdobju naglo padajo).

Koncentracije plavin v spodnji polovici akumulacije začnejo zopet naraščati pri pretoku $1.290 \text{ m}^3/\text{s}$ 17. septembra ob 21:00. Sledijo štiri ure naraščanja pretoka v povprečju $55 \text{ m}^3/\text{s/h}$, povečanje koncentracij plavin pa je po kratkotrajnem padcu minimalno, vendar je zaradi naraščajočih pretokov potreben dodaten dvig zapornic na $2,4 \text{ m}$, pri čemer se gladina akumulacije spusti na $190,2 \text{ m}$.



Slika 78: Denivelacijska krivulja dk_1 in prelivna krivulja prostega preliva – prehod pri gladini $188,2 \text{ m}$
Figure 78: Operation rule curve dk_1 and free flow curve – crossing at $188,2 \text{ m.a.s.l.}$

Sekundarni ekstrem koncentracij se pojavi pri $2.700 \text{ m}^3/\text{s}$ (Q_{10}), kar je 24 ur kasneje od začetka ponovnega naraščanja koncentracij plavin, tokrat zaradi dotoka plavin iz zgornje polovice akumulacije. Znotraj tega obdobja ima naraščajoča krivulja hidrograma približno enak naklon kot krivulja odvisnosti koncentracije plavin od časa.

Krivulja obratovanja (slika 78) se pri nadaljnjem naraščanju pretoka oblikuje skladno s pravilom spuščanja gladine akumulacije z maksimalno hitrostjo $0,2 \text{ m/h}$ – pri pretokih z vrednostjo $1.750 \text{ m}^3/\text{s}$ in $1.800 \text{ m}^3/\text{s}$ se gladina zniža na $190,0$ oz. $189,9 \text{ m}$ in tako vse do minimalne gladine akumulacije, dosežene z dvigovanjem zapornic, $188,2 \text{ m}$ pri pretoku $3.000 \text{ m}^3/\text{s}$. Ob nastopu in prekoračitvi tega pretoka se izvede nadzorovan popolni dvig zapornic, denivelacijska krivulja pa preide v krivuljo prostega preliva. Koncentracije plavin začnejo po nastopu Q_{10} padati z enakim naklonom kot 20 ur kasneje hidrogram in pri nadaljnjem poteku denivelacijske krivulje ne igrajo več bistvene vloge.

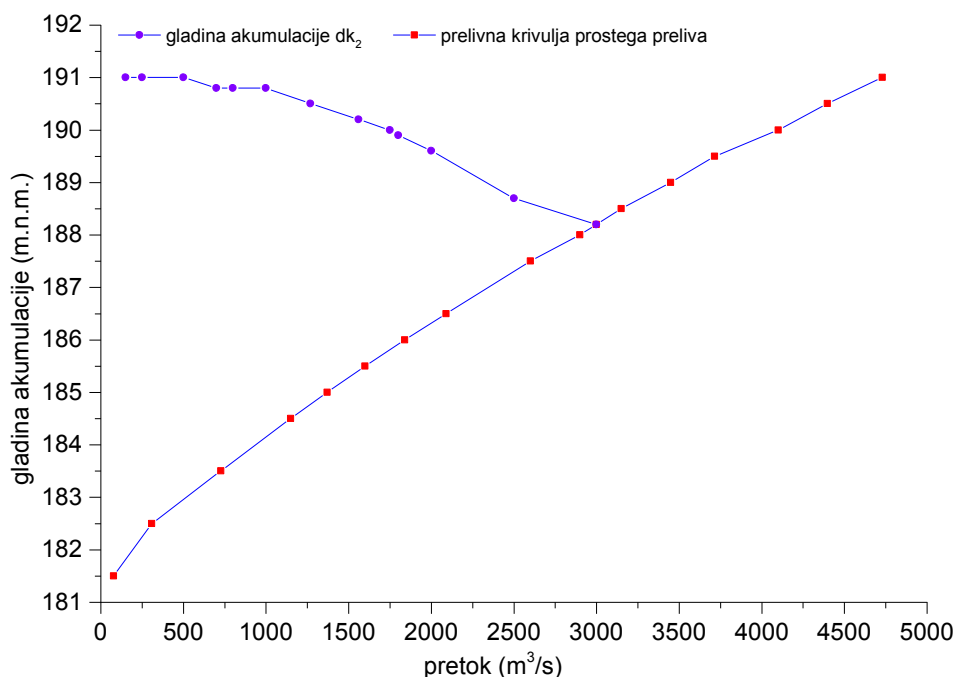
9.3.2.2 Denivelacijska krivulja dk₂ – predlagani protokol obratovanja št. 2

Druga predlagana varianta denivelacijskih krivulj je osnovana na predpostavki, da delujeta le dve od treh turbin, torej je pretočna zmogljivost turbinskega dela hidroelektrarne Vrhovo pri izkoristku turbin $\mu = 0,8$ v območju 265–270 m³/s. Turbine delujejo v primeru variante krivulje dk₂ pri nekoliko višjih pretokih kot v prvem primeru, vendar pri pretokih nad 700 m³/s samo z eno turbino.

Preglednica 25: Potek denivelacije po krivulji dk₂
Table 25: Operation rule procedure by dk₂ scenario

| Denivelacija dk ₂ | | | | | |
|------------------------------|---------------------|--------------------|---------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Pretok [m ³ /s] | Gladina akumulacije | Obratovanje turbin | Zaklopka – dvig [m] | Zapornica – dvig segmenta [m] | |
| 150 | 191,0 | 2 turbini | / | / | |
| 250 | 191,0 | 2 turbini | / | / | |
| 500 | 191,0 | 2 turbini | 2,4 | / | |
| 700 | 190,8 | 1 turbina | / | 0,6 | |
| 800 | 190,8 | 1 turbina | / | 0,8 | |
| 1.000 | 190,8 | / | / | 1,4 | |
| 1.270 | 190,5 | / | / | 1,8 | |
| 1.560 | 190,2 | / | / | 2,4 | |
| 1.750 | 190,0 | / | / | 2,8 | |
| 1.800 | 189,9 | / | / | 3,1* | prehajanje v prosti preliv |
| 2.000 | 189,6 | / | / | 4,1* | |
| 2.500 | 188,7 | / | / | 4,5* | |
| 3.000 | 188,2 | / | / | popoln dvig zapornic | |

Kapaciteta ene same turbine z izkoristkom $\mu = 0,8$, znaša 130–135 m³/s, zato sta pri pretoku 700 m³/s za namen zagotovitve pretočne sposobnosti HE na voljo dve možnosti – zagotovitev zadostne pretočne sposobnosti z zaklopkami in manjšim dvigom zapornic ali pa samo nekoliko večji dvig zapornic. Zaklopke imajo pretočno sposobnost pri nominalni gladini akumulacije 191,0 m 319 m³/s, kar samo po sebi ne zadostuje, poleg tega pa se lahko pri 700 m³/s že pojavljajo povišane koncentracije plavin, ki se jih najučinkoviteje spira z dvigom zapornic. Varianta krivulje dk₂ torej pri pretoku 700 m³/s predvideva delovanje ene turbine in denivelacijo gladine akumulacije na 190,8 m, kar zahteva dvig segmentnih zapornic za 0,6 m. Turbina deluje še pri naraslem pretoku na 800 m³/s, kjer se nivo gladine akumulacije ohranja, potreben pa je dvig zapornic za 0,2 m. Denivelacija akumulacije v primeru variante dk₂ se začne pri 700 m³/s, kar je 100 m³/s manj in eno uro prej kot pri varianti dk₁. Posledica zgodnejše denivelacije je zgodnejše spiranje naplavin iz prejšnjih visokovodnih dogodkov v spodnji polovici akumulacije, kar pomeni, da je lahko gladina akumulacije pri 1.000 m³/s zaradi nižjih koncentracij plavin nekoliko višja (190,8 m) kot v primeru dk₁.



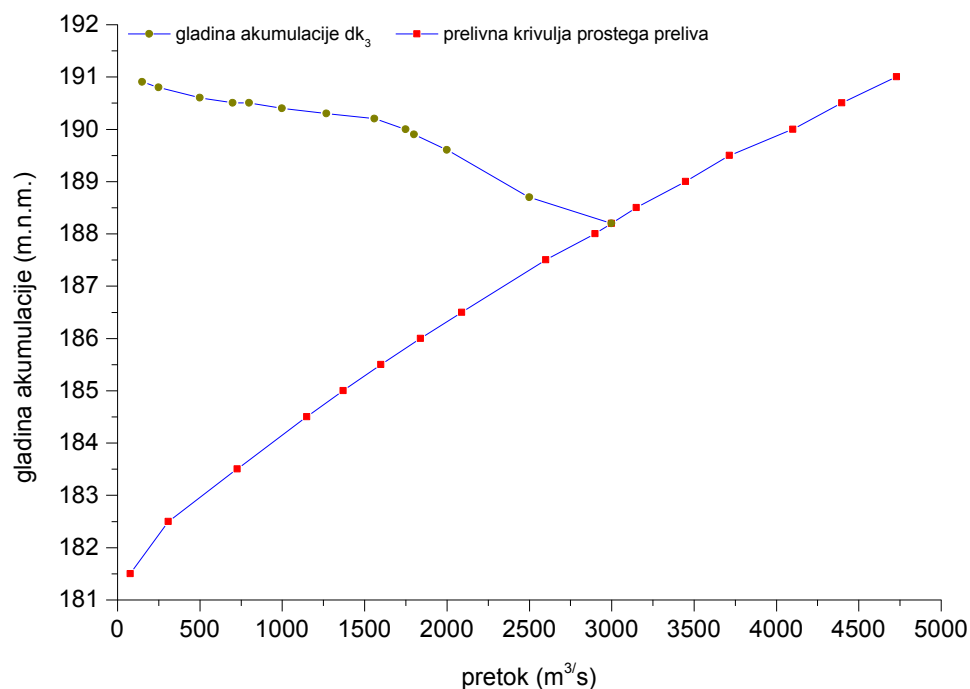
Slika 79: Denivelacijska krivulja dk_2 in prelivna krivulja prostega preliva – prehod pri gladini 188,2 m
Figure 79: Operation rule curve dk_2 and free flow curve – crossing at 188,2 m.a.s.l.

V nadaljnjem poteku hidrograma je potek denivelacijske krivulje dk_2 enak poteku krivulje dk_1 .

9.3.2.3 Denivelacijska krivulja dk_3 – predlagani protokol obratovanja št. 3

Predlagana varianta dk_3 ima za osnovo predpostavko, da so vse tri turbine nedelujoče, česar posledica je neposredno zmanjšanje pretočne sposobnosti HE za vsaj 130–135 m^3/s (efektivno delovanje vsaj ene turbine) oz. 400 m^3/s (efektivno delovanje vseh treh turbin). S stališča proizvodnje je varianta dk_3 najmanj zaželena, saj HE z nedelujočimi turbinami ne prispeva v omrežje elektroenergetskega sistema. Verjetnost takega dogodka je sicer zelo nizka, kljub temu pa je treba tak dogodek obravnavati kot eno izmed možnih variant.

Posledica nedelovanja vseh turbin pomeni, da je smiselno že takoj začeti denivelacijo akumulacije. Pri nizkih in srednjih pretokih (do 300 m^3/s) se gladina spušča postopoma v intervalih po 0,1 m z regulacijo zaklopk, kasneje, z nadaljnjim naraščanjem pretoka, pa se za regulacijo oz. nižanje gladine akumulacije uporabljajo izključno zapornice. Ob nastopu povečanih koncentracij plavin, ki se lahko pojavljajo že pri dotoku 650–700 m^3/s , je gladina akumulacije na 190,5 m, zapornice pa odprte 0,7 m. Denivelacijska krivulja poteka v nadaljevanju podobno kot pri varianti dk_2 , rezidualne plavine pa se tako pretežno odplaknejo še nekoliko prej zaradi podlivanja pod segmentnimi zapornicami.



Slika 80: Denivelacijska krivulja dk_3 in prelivna krivulja prostega preliva – prehod pri gladini 188,2 m
Figure 80: Operation rule curve dk_3 and free flow curve – crossing at 188,2 m.a.s.l.

Preglednica 26: Potek denivelacije po krivulji dk_3
Table 26: Operation rule procedure by dk_2 scenario

| Denivelacija dk_3 | | | | |
|-----------------------|---------------------|-----------------------|------------------------|-------------------------------|
| pretok [m^3/s] | gladina akumulacije | obratovanje turbin | zaklopka – dvig [m] | zapornica – dvig segmenta [m] |
| 150 | 190,9 | / | 1,8 | / |
| 250 | 190,8 | / | 2,6 | / |
| 319 | 190,7 | / | / | 0,3 |
| 420 | 190,6 | / | / | 0,4 |
| 500 | 190,6 | / | / | 0,5 |
| 700 | 190,5 | / | / | 0,7 |
| 800 | 190,5 | / | / | 0,8 |
| 1.000 | 190,4 | / | / | 1,4 |
| 1.270 | 190,3 | / | / | 1,6 |
| 1.560 | 190,2 | / | / | 2,4 |
| 1.750 | 190,0 | / | / | 2,8 |
| 1.800 | 189,9 | / | / | 3,1* |
| 2.000 | 189,6 | / | / | 4,1* |
| 2.500 | 188,7 | / | / | 4,5* |
| 3.000 | 188,2 | / | / | popoln dvig zapornic |

prehajanje v
prosti preliv

9.3.2.4 Obratovanje HE Vrhovo po stabilizaciji pretočnih razmer

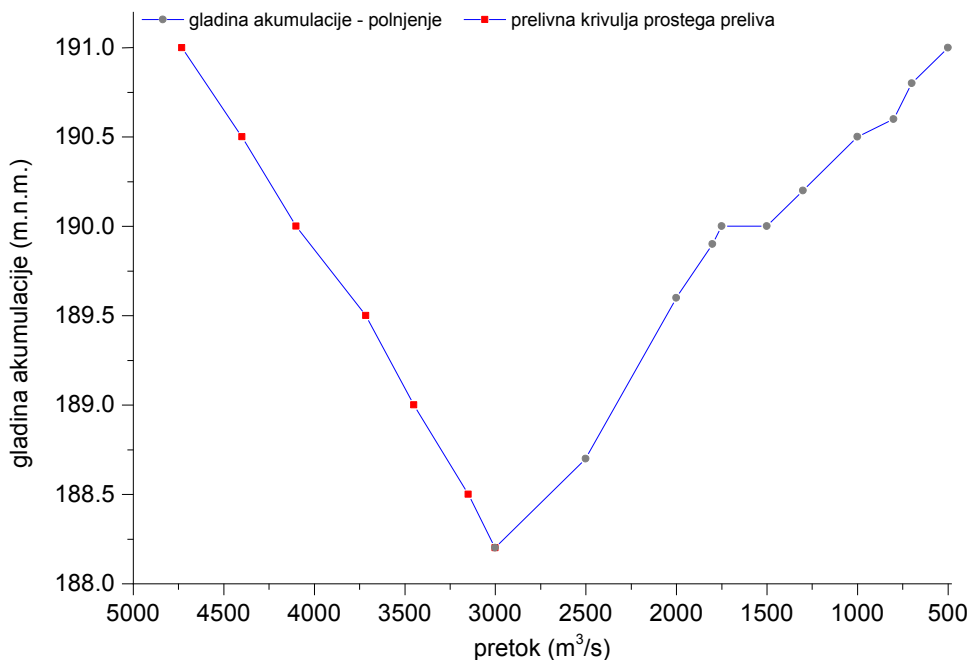
Rezultati modeliranja transporta plavin kažejo, da se je z načinom obratovanja po poslovniku na koncu VV dogodka v spodnjih 10 % akumuliral pretežno melj, predvsem ob robovih pretočnega prereza, medtem ko je sredinski del poglobljen. Podobna situacija je v ostalih delih akumulacije, le da tam prevladujejo fini peski (slika 76). Deleži posameznih frakcij v koncentraciji plavin kažejo podobno sliko, s tem da je melj vzdolž akumulacije nekoliko bolj zastopan.

Debeline nanosov plavin po nastopu stabilizacije pretočnih razmer se gibljejo do 0,5 m, v interesu upravljavca elektrarne in poplavne varnosti pa je, da se količina nanosov, ki bi se lahko začeli premeščati ob naslednjem visokovodnem dogodku, zmanjša na minimum.

Odplakovanje plavin po nastopu stabilnih pretočnih razmer, ki so se pretežno usedle po transportu iz Savinje in srednje Save, se lahko izvede z ustreznim režimom spuščanja zapornic, pri čemer oblikovanje več variant obratovalne krivulje pri polnjenju akumulacije zaradi (ne)delovanja turbin ni smiselno. Segmentne zapornice se začnejo po padcu pretokov pod 3.000 m³/s zopet spuščati, pri čemer je, izhajajoč iz obstoječega poslovnika obratovanja, edina omejitev, da se do kote 190,0 m akumulacija polni z maksimalno hitrostjo 0,2 m/h ob dotokih Save nad 100 m³/s. Pretoki na merilnem mestu na pregradi padajo z enako intenziteto kot naraščajo (enak naklon hidrograma pri naraščanju in padanju pretokov). Obratovalna krivulja polnjenja akumulacije do vzpostavitve gladine 190,0 m ostane enaka, ob nadaljnjem padanju pretokov pa se oblikuje po principu, ki sledi iz preglednice 27 (glej tudi sliko 81).

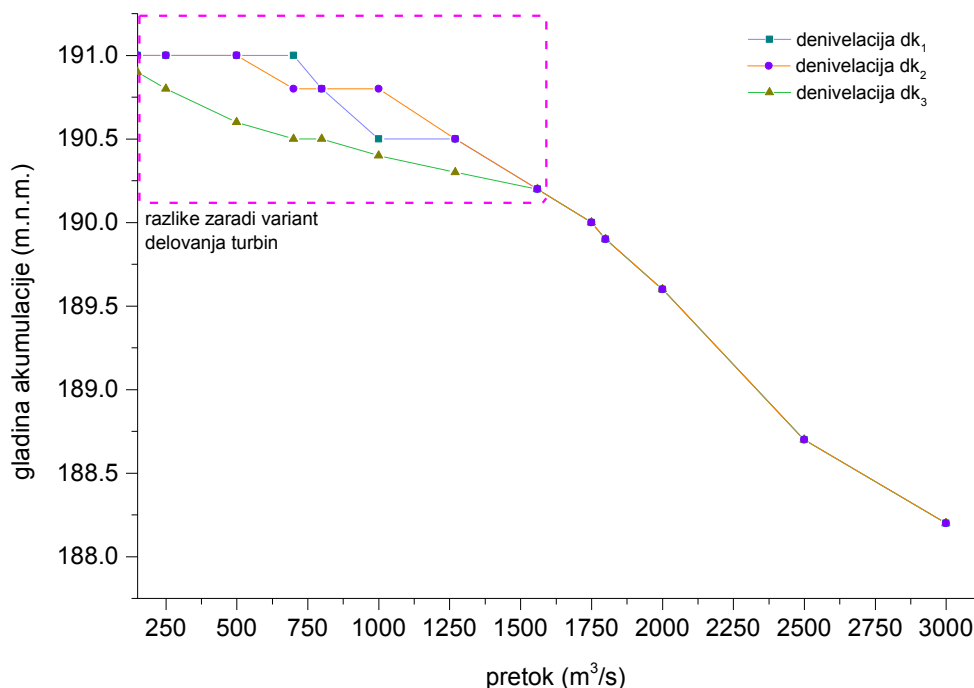
Preglednica 27: Polnjenje akumulacije po nastopu konice VV vala
Table 27: Reservoir fill after the flood wave peak

| Polnjenje akumulacije | | |
|----------------------------|---------------------|-------------------------------|
| Pretok [m ³ /s] | Gladina akumulacije | Zapornica – dvig segmenta [m] |
| 3.000 | 188,2 | popoln dvig zapornic |
| 2.500 | 188,7 | 4,5 |
| 2.000 | 189,6 | 4,1 |
| 1.800 | 189,9 | 3,1 |
| 1.750 | 190,0 | 2,8 |
| 1.500 | 190,0 | 2,4 |
| 1.300 | 190,2 | 2,0 |
| 1.000 | 190,5 | 1,4 |
| 800 | 190,6 | 0,9 |
| 700 | 190,8 | 0,7 |
| 500 | 191,0 | / |



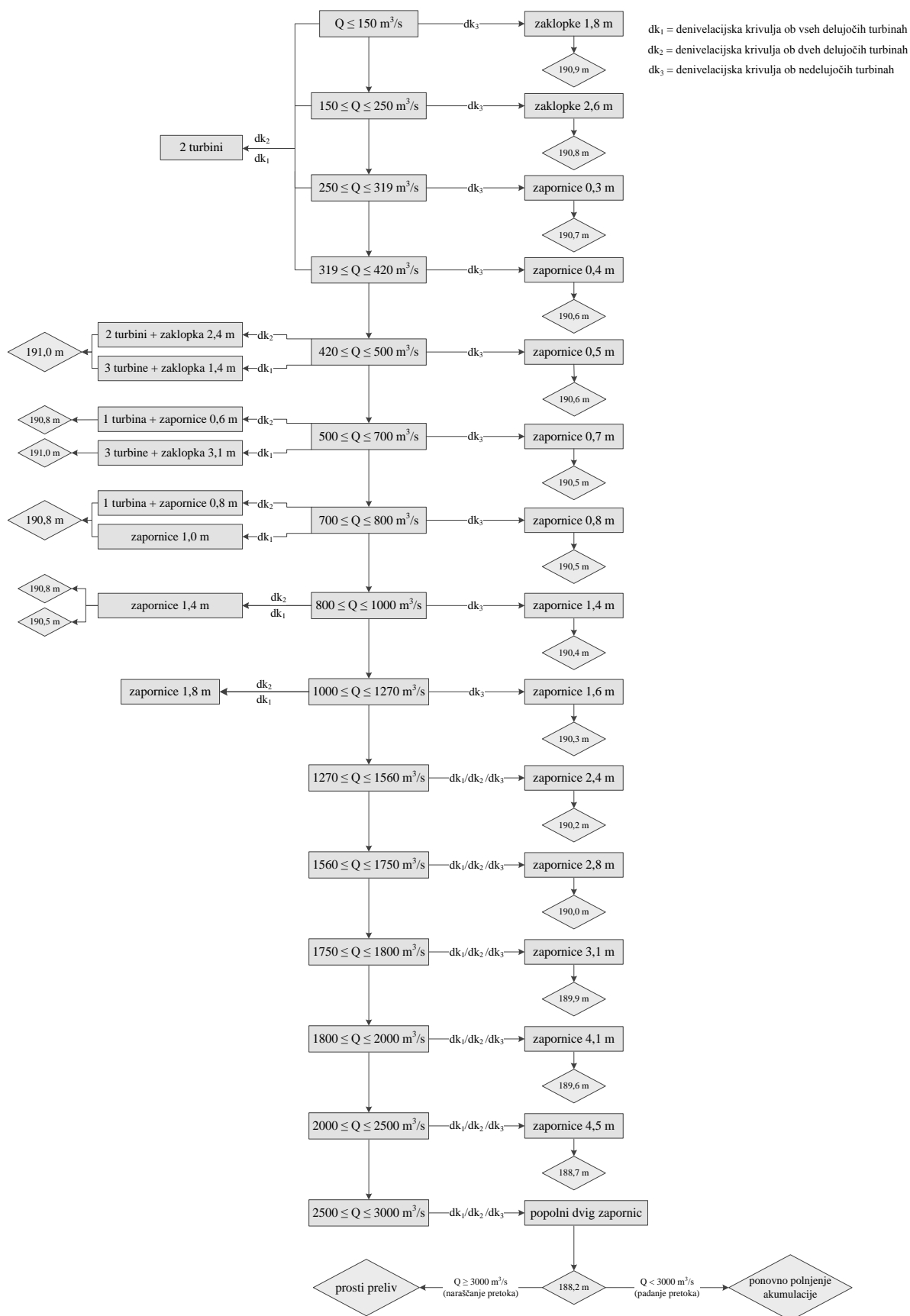
Slika 81: Obratovalna krivulja ob polnjenju akumulacije in prelivna krivulja prostega preliva – prehod pri gladini 188,2 m

Figure 81: Operation rule curve for reservoir fill procedure with free flow curve – crossing at 188,2 m.a.s.l.



Slika 82: Primerjava vseh treh novih variant obratovalnih krivulj

Figure 82: Comparison of all three new operation rule curves



Slika 83: Shematski prikaz poteka obratovanja HE Vrhuvo glede na različne denivelacijske krivulje
Figure 83: Flowchart of HPP Vrhuvo operation considering the new operation rule curves

10 ZAKLJUČKI

Pri zasnovi, umeščanju v prostor, načrtovanju, dimenzioniranju in obratovanju (optimizaciji) verige vodnih elektrarn predstavljajo rečne plavine pomemben element, kadar je reka, na kateri gradimo verigo hidroelektrarn, prodonosna (Mikoš, 2012). Spremenjena dinamika transporta plavin zaradi nižjih hitrosti vode v akumulacijah običajno pomeni zadrževanje oz. kopičenje plavin na različnih mestih v akumulaciji, kar lahko predstavlja težavo pri vzdrževanju gladine akumulacije zaradi zmanjšanega volumna; poleg tega pa lahko kopičenje plavin povzroča težave na primer pri samem obratovanju s turbinami v času povišanih pretokov.

Magistrsko nalogo smo razdelili na pet bistvenih delov. Prvi del zajema kratko analizo deleža hidroenergije kot OVE za proizvodnjo električne energije, sledi pregled obstoječe literature oz. zgodovina izvedenih raziskav transporta oz. dinamike plavin, kar je služilo predvsem kot orientacija pri analizi rezultatov modela transporta plavin znotraj te naloge. Te raziskave so bile izvedene pred samo izgradnjo HE Vrhovo in so preučevale bilanco plavin v akumulaciji pred izgradnjo HE Vrhovo in po njej (in ostalih HE v spodnesavski verigi) ter v manjši meri dvig dna po izgradnji HE z uporabo empiričnih enačb in kasneje z uporabo modelov 1-D. Ugotovljamo, da so v splošnem ti modeli (VGI, 1985) predvideli nekoliko prenizke nivoje dna v blatni coni in nekoliko previsoke nivoje dna v prodni coni ($\pm 1,0$ do $2,0$ m). Vzroki za razlike so predvsem v manjši natančnosti vhodnih podatkov (meritve dna), znanih pomanjkljivosti modelov 1-D pri analizah dinamike plavin in pa neupoštevanje najrazličnejših, bolj ali manj legalnih odvzemov plavin gorvodno od akumulacije Vrhovo (na primer registrirani odvzem za separacijo Zg. Hotič – 30.000 m^3 (cca 70.000 ton) na leto). Ob pomanjkanju bolj grobih frakcij je Sava med visokovodnimi dogodki prenašala več drobnejših frakcij, kar pojasnjuje višje dno v blatni coni.

V drugem delu naloge je poleg podanih osnovnih hidravlično-hidroloških lastnosti akumulacije in teoretičnih izhodišč bistven segment o dinamiki spreminjanja volumna akumulacije HE Vrhovo po izgradnji leta 1993. Izmere akumulacije in primerjava teh od leta 1995 naprej kažejo podobne trende odlaganja/odnašanja kot v akumulaciji HE Dravograd, kjer se je med letoma 1943 in 2003 prostornina akumulacije zmanjšala za četrtno, v akumulaciji HE Vrhovo pa med letoma 1995 in 2010 (februar) za nekaj manj kot petino. Volumni akumulacije kratkoročno sicer precej nihajo (povečanje prostornine akumulacije HE Vrhovo po visokih vodah v septembru 2010 za 300.000 m^3), v naslednjih letih oz. na dolgi rok pa pričakujemo, da bo šel trend v smeri stabilizacije razmer. Analiza izmer akumulacije nam je služila predvsem v nadaljevanju naloge v fazi interpretacije in verifikacije rezultatov modela.

Izbor in priprava vhodnih hidroloških in geomorfoloških podatkov ter izdelava računske mreže modela transporta plavin sledijo v tretjem delu naloge, kjer smo se dokončno osredotočili na visokovodni dogodek septembra 2010 kot na najustreznejše izhodišče za analizo dinamike transporta plavin v času

ekstremnih visokovodnih razmer, saj so se v sorazmerno kratkem obdobju zvrstili pretoki s povratnimi dobami od Q_1 do nekaj več kot Q_{100} , kot izhaja iz hidrograma na sliki 37. Vhodni podatki, tako pretoki in gladine kot predvsem zrnastostne sestave in koncentracije plavin, so bili na voljo le za določena, zelo omejena območja, zato so bile potrebne določene aproksimacije pri določanju robnih pogojev, kot sta določitev računskega hidrograma in določitev koeficienta hrapavosti, kar pa na koncu ni bistveno vplivalo na rezultate, kot kaže sorazmerno dobro ujemanje merjenih in izračunanih količin ter zadovoljivo ujemanje izračunanih in merjenih nivojev dna (slika 72). V obsegu simulacije smo uporabili dva scenarija, enega z enakomerno porazdelitvijo drobnih frakcij in drugega s prevladujočim deležem finih peskov.

Interpretacijo rezultatov modela transporta plavin, primerjavo rezultatov obeh scenarijev in izbor ter verifikacijo scenarija smo predstavili v četrtem delu naloge, ki je bil ključen za novelacijo obratovalne krivulje. V tem delu smo se delno naslonili tudi na zaključke preteklih raziskav v akumulaciji, eden od teh je izpiranje bolj grobih frakcij, kot so grobi peski in zelo fini prod šele ob nastopu povišanih pretokov ($> 650\text{--}900\text{ m}^3/\text{s}$), kar smo potrdili tudi v tej nalogi. Iz porazdelitve plavin velikosti d_{50} izhaja, da so se bolj grobe frakcije v času visokovodnega dogodka sicer odplavljale dolvodno, ne pa tudi prek pregrade. Glavna vira bolj grobih frakcij (VCS, VFG) so recentni nanosi v zgornji tretjini akumulacije in plavine iz Savinje, kar pomeni, da sta (sorazmerno skromna) vira dokaj oddaljena od pregrade; preden so bolj grobe frakcije dosegle profil pregrade, so se pretočne razmere že umirile.

Odnos med pretokom in koncentracijo plavin v obliki histereznih zank II. reda kaže na sorazmerno erodibilen material v akumulaciji, ki pa ga je v obliki recentnih nanosov odneslo pred nastopom konice visokovodnega vala. Akumulacije, kjer se pojavlja tak odnos med pretokom in koncentracijami plavin, imajo običajno vsaj dva ekstrema koncentracij plavin, prvega, ko se sproži transport že omenjenih recentnih nanosov v akumulaciji, in drugega, ko se po vmesnem padcu koncentracij plavin pojavi drugi ekstrem koncentracij plavin zaradi dotoka plavin iz Savinje in v manjši meri Save. Če je bila na začetku zrnastostna sestava plavin, ki so se prenašale vzdolž akumulacije, pretežno drobnozrnata (melj), kaže ob nastopih konic koncentracij plavin in pretokov na prevladujoči delež nekoliko bolj grobih frakcij oz. finih peskov ob stabilizaciji pretokov (razen tik nad pregrado, kjer še prevladuje melj).

Obravnavana scenarija sta podala podobne rezultate, verifikacija modela pa je pokazala, da se z dejanskimi razmerami nekoliko bolj ujema drugi scenarij s prevladujočim deležem finih peskov, kar smo glede na rezultate redkih izvedenih analiz in terenskih raziskav tudi pričakovali.

Obstoječi poslovnik obratovanja predvideva začetek denivelacije akumulacije pri pretoku $1.000\text{ m}^3/\text{s}$, pri čemer se vpliv plavin in naplavin na hidravlične razmere v akumulaciji ne upošteva. Z modelom

smo pokazali, da se maksimumi koncentracij pojavljajo že pri pretokih velikosti 700–800 m³/s, v nekoliko bolj neugodnih razmerah (visoka voda Savinje in nizka Save do sotočja pri Zidanem Mostu) pa še prej. Pri novelaciji obratovalne krivulje smo se tako osredotočili na začetek denivelacije ob vsaj 20 % nižjih pretokih, kot velja v obstoječem poslovniku. Predpostavili smo tri variante denivelacijskih krivulj, ki se med sabo razlikujejo predvsem v režimu pretokov med 650 in 1.250 m³/s, kar je posledica načina obratovanja s turbinami (trije scenariji obratovanja turbin), iz česar sledijo različni časovni preseki, ko se začne obratovanje z dvigovanjem zaklopk oz. zapornic, da se zagotovi ustrezen pretok skozi pregrado oz. ustrezna gladina akumulacije glede na gorvodne pretočne razmere. Modificirano delovanje turbin ima za posledico torej spremenjen časovni potek manipulacije z zapornicami – pri pretokih do 319 m³/s se pregrado ob ohranjanju nominalne gladine akumulacije 191,0 m lahko upravlja le z zaklopkami, pri višjih pretokih pa je potreben dvig zapornic in nižanje gladine, kar pomeni, da recentne nanose plavin odplavi dolvodno na podoben način kot pri nezajezenih razmerah. Tu nekoliko odstopa denivelacijska krivulja dk₃, kjer je predvideno popolno nedelovanje turbin (primer okvare, remonta ipd.), in denivelacija akumulacije poteka že pri nizkih pretokih (vendar ne pod 150 m³/s). Pri nadaljnjem povišanju pretokov so lahko nižanja gladine nekoliko manj intenzivna, kot predvideva obstoječi poslovnik. Ob nastopu pretokov nad 1.250 m³/s potekajo vse tri denivelacijske krivulje enako, v povprečju z nekoliko višjimi gladinami akumulacije, kot predvideva obstoječi poslovnik. Zaradi neenoznagega odnosa med pretoki in koncentracijami plavin je potrebno ustrezno upravljanje s hidromehansko opremo na pregradi tudi pri polnjenju akumulacije po upadanju pretokov.

Z oblikovanjem ustrežnejših obratovalnih krivulj, ki ne temeljijo le na pretočnih razmerah gorvodno, kot je to v obstoječem poslovniku obratovanja, temveč tudi na podlagi morfoloških razmer v akumulaciji, smo v tej nalogi želeli izpostaviti problematiko vpliva transporta in zastajanja (na)plavin na obratovanje hidroenergetskega objekta in posledično na poplavno varnost. V Sloveniji se aktivnejša obravnava te problematike spet počasi postavlja na noge, ključnega pomena pri tem pa je med drugim vzpostavitev avtomatiziranih merilnih mest pretokov, vodostaja in koncentracij plavin na območjih akumulacij verige HE na Spodnji Savi in kasneje na Srednji Savi, kar bi upravljavcu HE in ostalim deležnikom omogočalo zvezno spremljanje hidravličnih in hidroloških (morfoloških) razmer v akumulaciji in ustrežnejše ukrepanje ter ravnanje na pregradnem objektu.

11 POVZETEK

Hidroelektrarne so objekti, ki vedno bolj prihajajo v ospredje na področju rabe virov energije, saj so z rabo vode za proizvodnjo električne energije del naraščajočega deleža objektov za proizvodnjo obnovljivih virov energije v EU. Kljub temu pa hidroelektrarne kot prostorsko zahtevni in delikatni objekti pomenijo nove pogoje v okolju, saj predstavljajo oviro v vodnem toku, posledično se spremenijo hidravlične razmere v akumulacijah, to pa pomeni, da se spremeni dinamika transporta plavin v odvisnosti od hidroloških razmer. Običajne hidrološke razmere, tj. razmere, kjer v povprečju prevladujejo srednji pretoki, s stališča ravnanja s plavinami in dinamike plavin niso problematične. Hidravlično-morfološke razmere v akumulaciji pa se lahko, kot smo v nalogi prikazali, začnejo spreminjati že pri vsakoletnih pretokih, pri čemer so pogoji premika prodnega zrna oz. izpiranja blatne/proodne cone odvisni od lastnosti posamezne akumulacije in se med seboj razlikujejo. HE Vrhovo je bila zgrajena leta 1993 kot prva v spodnjiesavski verigi. Povzročila je spremembo dinamike transporta plavin, posledično pa tudi spremembe v prostornini akumulacije, ki je prva leta po začetku obratovanja precej nihala, zadnja leta pa, skladno z analogijami s HE na reki Dravi in analizo obdobjnih izmer akumulacije, vidimo trend počasne stabilizacije razmer.

Pretočne hidroelektrarne niso le vir proizvodnje električne energije, temveč izboljšujejo tudi poplavno varnost z regulacijami visokovodnih razmer. Obratovanje HE Vrhovo v času sušnih, normalnih (srednjih), visokih in ekstremnih pretokov določa poslovnik obratovanja, ki pa v sedANJI izvedbi določa le nivoje gladin akumulacije glede na pretok iz gorvodno ležečih vodomernih postaj Hrastnik in Veliko Širje, tj. denivelacijsko krivuljo, ne upošteva pa morfoloških vplivov v akumulaciji glede na pretočne razmere. Cilj te naloge tako predstavlja določitev nove, optimizirane denivelacijske krivulje z upoštevanjem morfoloških razmer v akumulaciji.

Osnova za izdelavo optimizirane denivelacijske krivulje je bilo modeliranje/simulacija premestitvene zmogljivosti v akumulaciji HE Vrhovo v času visokih in ekstremno visokih pretokov. Za te potrebe smo izbrali visokovodni dogodek, ki je bil časovno dovolj obsežen in ki je zajemal zadostno ovojnico pretokov. Kot najbolj primeren visokovodni dogodek se je izkazal dogodek med 17. in 26. septembrom 2010, ko so se predvsem v prvih treh dneh zvrstili ekstremno visoki pretoki, tudi do Q_{100} . Kronična težava pri analizah morfoloških razmer v akumulacijah v Sloveniji je pomanjkanje podatkov za podrobnejše in obširnejše analize zaradi pomanjkanja merilnih mest, ki bi izvajala tovrstne meritve – poleg pretokov in vodostaja je za vzdrževanje akumulacije nujen podatek o koncentraciji plavin. Pomanjkanje podatkov je predstavljalo težavo tudi v tej nalogi, saj smo bili primorani uvesti določene aproksimacije pri podatkih o morfološkem stanju v akumulaciji, delno pa tudi pri podatkih o pretokih, saj sta najbližji gorvodno ležeči vodomerni postaji Hrastnik na srednji Savi in Veliko Širje na Savinji. Vpliva staranja akumulacije na koeficient hrapavosti v akumulaciji nismo posebej upoštevali,

koeficient smo določili na podlagi izsledkov iz literature in s tem menimo, da so rezultati simulacije na varni strani.

Vhodne podatke in robne pogoje modela smo določili na podlagi pretokov in vodostajev visokovodnega dogodka v septembru 2010, morfološka izhodišča modela pa so bila določena na podlagi izvedenih vrtin v akumulaciji leta 2009 in posameznih, manj obsežnih terenskih raziskav v zadnjih desetih letih.

Znotraj simulacije premestitvene zmogljivosti smo izvedli dva scenarija, ki se med seboj razlikujeta v deležih posameznih frakcij vhodnega podatka v model. Prvi scenarij ima bolj enakomerno zastopanost drobnih frakcij, kot je srednji in grobi melj, medtem ko v drugem scenariju prevladujejo fini peski. Rezultati simulacij na podlagi obeh scenarijev so bili podobni, pri obeh se kažeta dva ključna dogodka ob nastopu najvišjih koncentracij plavin, in sicer prvi, ko koncentracije plavin narastejo zaradi odplavljanja naplavin, usedlih iz prejšnjih visokovodnih dogodkov, in drugi, ko koncentracije plavin narastejo zaradi dotoka naplavin iz gorvodnih območij v območje blizu pregrade, pri čemer se v akumulaciji pretežno zadržujejo fini in srednji/grobi peski, razen v spodnji četrtini akumulacije, kjer se s stabilizacijo pretočnih razmer še zadržuje melj. Prvi ekstrem koncentracij plavin se pojavlja pri velikosti pretokov med 650 in 750 m³/s, kar sovpada z izsledki prejšnjih analiz, ko naj bi se blatna cona začela izpirati pri 630 m³/s. Drugi ekstrem koncentracij plavin se pojavlja pri velikosti pretokov 1.000–1.100 m³/s, zanimivo pri tem je, da se ekstremi koncentracij pojavljajo pred konico visokovodnega vala, kar je značilnost akumulacij, kjer se pojavljajo sorazmerno erodibilne naplavine oz. se naplavine pojavljajo v vedno manjših količinah zaradi razvoja krovnega sloja dna akumulacije.

Rezultate simulacij obeh scenarijev smo primerjali z geodetskimi izmerami akumulacije po visokovodnem dogodku oktobra 2010 in ugotovili dobro ujemanje tako terenskih izmer prostornine akumulacije in rezultatov simulacije kot tudi dobro ujemanje vzdolžnih profilov dna akumulacije. Nekoliko boljše ujemanje se je pokazalo v primeru scenarija s prevladujočimi finimi peski v vhodnem podatku modela, zato smo ta scenarij privzeli za nadaljnje analize.

Lastnost akumulacije, da se ekstremi koncentracij pojavljajo pred nastopom konice visokovodnega vala, je temelj novelacije obratovalne krivulje HE Vrhovo, saj je za upravljavca s stališča ravnanja s plavinami bistveno obdobje, ko so koncentracije najvišje, kar pomeni, da je treba začeti dvigovati zapornice, s čimer se ti koncentrirani tokovi odplavijo dolvodno, pred nastopom ekstremnih visokovodnih razmer. Iz obstoječe denivelacijske krivulje poslovnika obratovanja izhaja, da se denivelacija bazena začne šele nad 1.000 m³/s, zato smo optimizirano denivelacijsko krivuljo oblikovali na dejstvu, da se najvišje koncentracije plavin pojavljajo že pri 20–30 % nižjih pretokih. Za potrebe optimizacije smo predvideli tri denivelacijske krivulje, ki se med seboj razlikujejo v delovanju

turbin, tj. od optimalno delujočih vseh treh turbin do popolnoma nedelujočega stanja turbin. Posledica teh variant so različna gladinska stanja akumulacije ob različnih časovnih presekih zaradi ravnanja z zapornicami in zaklopkami v režimu pretokov med 650 in 1.250 m³/s, ko se zaradi najvišjih koncentracij plavin in zgodnejšega dvigovanja zapornic odplavi večino naplavin. Zgodnejše odplavljanje naplavin omogoča nekoliko višje gladine akumulacije pri pretokih nad 1.500 m³/s.

Ocenjujemo, da smo z novimi, optimiziranimi denivelacijskimi krivuljami dosegli boljše izhodišče s stališča vzdrževanja stabilnih hidravličnih razmer v akumulaciji, pri čemer ne smemo pozabiti na boljše razmere za delovanje strojne opreme in manjšo potrebo po drugih metodah ravnanja s plavinami v akumulaciji, to pa ima za posledico tudi učinkovitejše zagotavljanje poplavne varnosti.

12 SUMMARY

Share of the run-of-the-river hydropowerplants (HPPs) as a mean to provide electrical energy from a renewable energy source is increasing throughout the EU, especially with rising electricity demands at the peak hours. However, as with every spatial intervention, there are numerous aspects to evaluate when planning, building and managing HPPs, since a dam and a machine room, as two main parts of the run-of-the-river powerplant present an obstacle in a river environment. Consequently, hydraulic conditions within the HPP reservoir change and that means a significant change in sediment transport dynamics in relation to river hydrology. As it was presented in the thesis, flows as low as 50 % of Q_1 initiate the process of flushing the recent sediment deposits of the earlier flood events in the HPP Vrhovo reservoir.

HPP Vrhovo was built in 1993 as first run-of-the-river HPP on a lower River Sava section and it caused significant changes in sediment transport dynamics and later in a reservoir volume that fluctuated significantly within the first 10 – 15 years after start of operation, however in the last 5 – 10 years a trending of gradual conditions stabilization through periodical reservoir bathymetry monitoring is seen, similar to the reservoirs at the Drava River HPP chain.

Run-of-the-river HPPs are not only objects for providing electrical energy; they improve flood safety with regulation of high flows. HPP Vrhovo operation procedure in the case of low, normal, high and extreme flows is defined in an operation procedure manual, which in a present state, determines appropriate reservoir levels only in a relation to upstream incoming flows from gauging stations Hrastnik and Veliko Širje and as such doesn't consider sediment effects on a reservoir morphologic conditions due to increasing flow levels. The main goal of this thesis was to determine new, optimised operation rule curve with the consideration of sediment effect on reservoir bathymetry.

Basis to determine optimised, amended operation rule curve was created with simulation of sediment transport in an HPP Vrhovo reservoir in the case of high and extreme flows occurrence. A flood event, with significant duration and with broad enough spectrum of flow levels, was thought of to be the most appropriate for the task. Such event occurred in September of 2010, more precisely, the highest flows, up to Q_{100} , occurred from 17th to 19th September 2010. An important issue in Slovenia is lack of data to support detailed and extensive reservoir sedimentation analyses due to shortage of gauging stations measuring needed data continuously – aside from discharges and water level, sediment concentration levels as a key factor when managing and maintaining reservoir conditions, are insufficiently monitored. Lack of appropriate data was also a problem in this thesis, since we were forced to implement certain sediment and incoming flow input data approximations, because the nearest gauging stations are located quite far from HPP Vrhovo dam. Sediment transport effect on a

change of reservoir roughness coefficient was not thoroughly analysed, mainly because there was some data available from some earlier analyses and we estimated that due to that, sediment transport simulation results would be on a safe side. Flow input data and boundary conditions were determined on a basis of discharge data and water levels at the nearest gauging stations and at the dam in September of 2010 (17th to 26th more precisely) with sediment input data determined on a basis of data obtained from two drill holes made in 2009 and some smaller field data researches in the last decade.

Two sediment transport simulation scenarios were created, differing in shares of individual sediment size classes at the sediment transport model input. First scenario predicted evenly distributed shares of smaller size classes (medium and coarse silt), whereas second scenario predicted dominant levels of fine sands at the model entry at the time of start of simulation. Simulation results of both scenarios were similar; both were pointing out two main peaks of sediment concentrations within the flood event – the first one as a consequence of initiation of flushing of recent sediment deposits of earlier flood events and second as incoming sediment from upstream sections to the area near the dam. At the time of the stabilisation of the flow levels, fine sands settled in the reservoir in a majority, except in the lowest downstream quarter of the reservoir, where medium and coarse silt were dominant. First peak of sediment concentration occurred at the flow levels between 650 and 750 m³/s, which coincides with findings from some of previous analyses where smaller grain sizes (silt) deposits were predicted to flush at approx. 630 m³/s. Second peak of sediment concentration occurred at the flow levels between 1000 and 1100 m³/s (less than Q₁). We observed a sediment concentration peak occurring before the peak of the flood wave which is typical of reservoirs where relatively erodible sediment deposits are found and where sediment deposits are found in smaller quantities due to the development of an armor layer in the reservoir.

For validation and verification purposes we compared the results of the sediment transport simulation of both scenarios to the findings of the field surveys of the reservoir, carried out after the flood event of September 2010 and found good fit of longitudinal profiles and excellent fit of reservoir volume change during the flood event. After that we chose the more appropriate scenario for further analyses and because of somewhat more realistic morphological conditions in the HPP Vrhovo reservoir, we chose the second scenario with dominant fine sands.

The characteristic of a HPP Vrhovo reservoir, where sediment concentration peak occurs before flood wave peak, is a key to amend the operation rule curve. From the sediment reservoir management stand point, the period of sediment concentration peak is crucial, because dam gates and flaps have to be managed in such a manner, that there is as much sediment flushed under the gates as possible with flows as low as possible. Existing operation rule curve predicts reservoir drawdown as late as at the flow level of 1000 m³/s, which is why we were trying to create an optimised operation rule curve,

based on the fact that sediment concentration peaks occur earlier, at up to 30 % lower flows as determined in the current operation procedure manual. Three different operation rule curve scenarios were developed, each one predicting different turbine operation levels, from the first rule curve scenario where all three turbines would be working optimally to the least favourable operation rule curve scenario, when all of the three turbines would be inoperable. Consequently, different water levels were obtained for such conditions due to gate and flaps manipulation, mainly in the flow period between 650 and 1250 m³/s, where most of the sediment would be flushed downstream. Earlier sediment flushing allows for somewhat higher reservoir water levels at the flows above 1500 m³/s.

New, optimised operation rule curves should help obtain better starting point from the standpoint of maintaining stable hydraulic conditions at the HPP Vrhovo reservoir and providing better operating conditions especially for turbines with lower demands for other reservoir sediment management methods, consequently providing more effective flood safety measures.

VIRI

Bilotta, G.S and Brazier, R.E. 2008. Understanding the influence of suspended solids on water quality and aquatic biota. *Water Research*, 42,12: 2849-2861.

Black, L. L. 2008. Quantifying instream sediment transport in several reaches of the Upper Brazos River Basin, Texas, USA. Fort Worth, Graduate Faculty of the College of Science and Engineering, Texas Christian University, USA: 62 str.

Brandt, S. A. 1999. Reservoir desiltation by means of hydraulic flushing: Sedimentological and Geomorphological Effects in Reservoirs and Downstream Reaches as illustrated by the Cachi Reservoir and the Reventazon River, Costa Rica. Copenhagen, Institute of Geography, Faculty of Science, University of Copenhagen, Denmark: 233 str.

Čehovin, I. 1990. Raziskave problematike v zvezi s transportom proda in suspenzij na odseku Save med Zidanim mostom in hrvaško mejo, med in po izgradnji verige HE. Ljubljana, Vodnogospodarski inštitut - vodogradbeni laboratorij: 21 str.

Ciuha, D. 1992. Študija zajezenega odseka struge Sopotne zaradi akumulacije HE Vrhovo. Ljubljana, Vodnogospodarski inštitut - vodogradbeni laboratorij: 28 str.

Colarič, O. 1968. Prodnosnost reke Save in pritokov. Ljubljana, Vodnogospodarski inštitut: 45 str.

Colarič, O. 1985. Ocena dviga dna in gladine v akumulaciji bazena HE Vrhovo. Ljubljana, Vodnogospodarski inštitut - vodogradbeni laboratorij: 31 str.

Dargahi, B. 2008. Mitigation of sedimentation problems in the lower reach of the River Klarälven. *Hydraulic Research*, 46,2: 224-236.

Ding, Y., Wang, S. 2012. Optimal control of flood water with sediment transport in alluvial channel. *Separation and Purification Technology*, 84: 85-94.

Dolinar, B., Kovačič, B., Kramer, J., Kamnik, R. 2008. Meritve vsebnosti suspendiranega materiala v akumulacijskem jezeru HE Boštanj. Maribor, 19. Mišičevi vodarski dan 2008: 8 str.

Duan, J. G., Nanda, S.K. 2006. Two-dimensional depth-averaged model simulation of suspend sediment concentration distribution in a groyne field. *Hydrology*, 327 (3-4): 426-437.

Einstein, H. A. 1950. The Bed-Load Function for Sediment Transportation in Open Channel Flows. Washington, Soil Conservation Service, United States Department of Agriculture: 74 str.

ELES, 2012. Letno poročilo 2011. ELES Ljubljana: 70 str.

Ercan, A., Younis, B. A. 2009. Prediction of bank erosion in a reach of the Sacramento River and its mitigation with groynes. *Water Resources Management*, 23,15: 3121-3147.

European Commission, Renewable energy – Moving towards a low carbon economy. <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/renewable-energy> (Pridobljeno 14. 12. 2014.)

Eurostat, 2014. Shares of energy from renewable sources. SHARES (Renewables) aplikacija, European Commission. Bruselj.

- Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. 2008. Hidropotencial v Sloveniji – študijsko raziskovalna naloga, vodilni partner konzorcija Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 52 str.
- GEATEH. 2010. Morfologija in plavine reke Save po izgradnji hidroenergetske verige – študijsko raziskovalna naloga, Ljubljana: 238 str.
- GEATEH. 2012. Plavine v zaježitvah verige hidroelektrarn na reki Savi – študijsko raziskovalna naloga, vodilni partner konzorcija in odgovorni vodja projekta GEATEH, d.o.o., Ljubljana: 38 str.
- Grom, R. 2015. Osebna komunikacija.
- Gubina, F., Gubina, A. 2011. Veriga HE na Srednji Savi. Ljubljana, Zveza za tehnično kulturo Slovenije: 8 str.
- He, Z., Wu, W., Douglas-Shields, F. 2009. Numerical analysis of effects of large wood structures on channel morphology and fish habitat suitability in a Southern US Sandy creek. *Ecohydrology*, 2,3: 370-380.
- Hidroelektrarne na spodnji Savi. 2012. Ljubljana, IBE, d.d.: 50 str.
- Hummel, R., Duan, J. G. 2011. Modelling sediment transport in the Pantano Wash. Tucson, World Environmental and Water Resources Congress 2011: 4246-4254.
- Izmera bazena HE Vrhovo. 2002. Koper, HARPHA SEA d.o.o.
- Izmera bazena HE Vrhovo. 2006. Koper, HARPHA SEA d.o.o.
- Izmera bazena HE Vrhovo. 2010. Koper, HARPHA SEA d.o.o.
- Jones, J. I. et al. 2012. The Impact of fine sediment on macro-invertebrates. *River Research and Applications*, 28,6: 1055-1071.
- Keršič, B. 2010. Remont HE Vrhovo, diplomsko delo. Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Univerza v Mariboru: 47 str.
- Key World Energy Statistics. 2014. Paris, International Energy Agency: 82 str.
- Knoblauch, H. 2006. Sediment Management Methods – Technical and legal aspects, Sustainable Sediment Management in Alpine Reservoirs considering ecological and economical aspects. Neubiberg, ALPRESERV: 135 str.
- Kryžanowski, A. 2009. Abrazijska odpornost betonskih površin na vodnih zgradbah. Doktorska disertacija, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana: 148 str.
- Letna energetska statistika 2011. 2012.
<http://www.stat.si> (Pridobljeno 10. 12. 2012.)
- Locher, F.A., Wang, J.S. 1995. Operation Procedures for Sediment Bypassing at Cowlitz Falls Dam. In 15th Annual USCOLD Lecture Series, USCOLD, Denver, ZDA: 75-90.
- Migniot, C. 1989. Bedding-down and rheology of muds, part 2. *Houille Blanche*, 2: 95-111.
- Mikoš, M. 1999. Problematika rečnih plavin v zaježitvenih prostorih hidroelektrarn na reki Savi. Ljubljana, Strokovno mnenje, IMOS Gea: 28 str.

- Mikoš, M. 2005. Sediment transport. V: LEHR, J.H. (ur.). Water encyclopedia. John Wiley & Sons: 417–421.
- Mikoš, M. 2012a. Kalnost v rekah kot del erozijsko-sedimentacijskega kroga. Gradbeni vestnik, 61,6: 129-136.
- Mikoš, M. 2012b. Predlog obratovalnega hidrološkega monitoringa kalnosti na Spodnji Savi. Gradbeni vestnik, 61,8: 170-176.
- Neopane, H. P. 2010. Sediment Erosion in Hydro Turbines. Trondheim, Faculty of Engineering Science and Technology, Norwegian University of Science and Technology: 201 str.
- OpenCourseWare MIT. Boston, Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts. <http://ocw.mit.edu> (Pridobljeno, 5. 4. 2013).
- Pereira, J. F. et al. 2009. Numerical simulation of bed material transport in the lower Mississippi River. Coastal Research, Special Issue, 56: 1449-1453.
- Poslovnik obratovanja HE Vrhovo. 2006. Medvode, SEL, d.o.o.: 37-41.
- Pretoki rek v letu 2010. 2011. Ljubljana, ARSO, Urad za hidrologijo in stanje okolja, Sektor za analize in prognoze površinskih voda: 7 str.
- Program hidrološkega monitoringa površinskih voda za leto 2015. 2015. Ljubljana, ARSO, Urad za hidrologijo in stanje okolja, Sektor za analize in prognoze površinskih voda: 26 str.
- Qamar, M. U., Baig, F. 2012. Calibration of CCHE2D for Sediment Simulation of Tarbela Reservoir. Proceedings of the World Congress on Engineering 2012 Vol I, WCE 2012, London, UK: 6 str.
- Resolucija o Nacionalnem energetskega programu. Uradni list RS, 57/2004: 7390-7451.
- Rodi, W. 1993. Turbulence Models and Their Application in Hydraulics – a state-of-the-art review. International Association for Hydraulic Research Monography: 105 str.
- Savske elektrarne Ljubljana, d.o.o., Savske elektrarne Ljubljana. <http://www.sel.si> (Pridobljeno 15. 3. 2013.)
- Schwendel, A. C., Death, R. G. in Fuller, I. C. 2010. The assessment of shear stress and bed stability in stream ecology. Freshwater Biology, 55,2: 261-281.
- Scott, S. H., Jia, Y. 2008. Simulation of sediment transport and channel morphology change in large river systems: proceedings of the US-CHINA Workshop on advanced computational modelling in hydroscience & engineering, Oxford, Mississippi, USA, September 19-21, 2006. Oxford, National Center for Computational Hydroscience and Engineering, University of Mississippi, ZDA: 54 str.
- Sloff, C.J. 1991. Reservoir Sedimentation: A Literature Survey. Report no. 91-2, Communications on Hydraulic and Geotechnical Engineering, Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering, Delft, Nizozemska: 124 str.
- Sumi, T., Morikawa, I., Takata, Y., Sanaka, Y. 2009. Study of reservoir sedimentation management measures for dams in the upper Kizu River basin, Environmental Disaster Mitigation Management, Kyoto University: 6 str.
- Šetina, B. 1982. Letne količine proda Save (Krško), Savinje (Laško) in Sopote (Žebnik). Ljubljana, Vodnogospodarski inštitut - vodogradbeni laboratorij: 24 str.

- Švab, M. 2010. Zg. Hotič. Sporočilo za: Švab, M. 3. 10. 2010. Osebna komunikacija.
- Ulaga, F. 2008. Monitoring suspendiranega materiala v slovenskih rekah. *Acta Hydrotechnica*, 23,39: 117-127.
- Walker, K. F., Thoms, M. C. 1993. Environmental effects on flow regulation on the lower River Murray, Australia. *Regulated Rivers: Research & Management*, 8 (1-2): 103-119.
- Wilber, D. H., Clarke D. G. 2001. Biological Effects of Suspended Sediments: A Review of Suspended Sediment Impacts on Fish and Shellfish with Relation to Dredging Activities in Estuaries. *North American Journal of Fisheries Management*, 21: 855-875
- Williams, G. P. 1989. Sediment concentration versus water discharge during single hydrologic events in rivers. *Journal of Hydrology*, 1989,111: 89-106.
- Wu, W. 2004. Depth-averaged two-dimensional numerical modelling of unsteady flow and nonuniform sediment transport in open channels. *Hydraulic Engineering*, 10,130: 1013-1024.
- Wu, W., S. Wang., S. Y., Jia, Y. 2000. Nonuniform sediment transport in alluvial rivers. *Journal of Hydraulic Research*, 38,6: 427-434.
- Zhang, Y. 2006. CCHE-GUI-Graphical users interface for NCCHE model user's manual, Technical Report No. NCCHE-TR-2006-02, National Center for Computational Hydroscience and Engineering, University of Mississippi, ZDA: 158 str.
- Zhang, Y., Jia, Y., Wang, S. S. Y. 2007. Two-dimensional Adaptive Mesh Generation. *Int'l Journal for Numerical Methods in Fluids*, 54,11: 1327-1350.