

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



Jamova cesta 2
1000 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si

**MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI
PROGRAM DRUGE
STOPNJE VODARSTVO IN
OKOLJSKO INŽENIRSTVO**

Kandidat/-ka:

Mentor/-ica:

Predsednik komisije:

Somentor/-ica:

doc. dr. Primož Banovec
viš. pred. dr. Gašper Rak

Član komisije:

STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

»Ta stran je namenoma prazna«

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	627.81:556.166(497.4)(043.3)
Avtor:	Miha Kračun
Mentor:	prof. dr. Franc Steinman
Somentor:	doc. dr. Primož Banovec
Somentor:	viš. pred. dr. Gašper Rak
Naslov:	Modeliranje transporta sedimentov v plitvi akumulaciji za oceno vpliva sedimentov na njeno sposobnost zadrževanja visokih voda
Tip dokumenta:	Magistrsko delo
Obseg in oprema:	115 str., 28 pregl., 50 en., 58 sl.
Ključne besede:	sedimentacija, hidravlično modeliranje, GIS, MIKE 21C, modeliranje morfoloških sprememb, večnamenske akumulacije

Izvleček

Izgradnja pregradnih objektov na vodotokih povzroča hidromorfološke spremembe na rečnem sistemu. Na vodnih akumulacijah se zaradi zadrževanja visokih voda spremeni odtočni režim kakor tudi dinamika premeščanja plavin. Sedimenti se v odvisnosti hidrodinamičnih pogojev odlagajo in erodirajo na območju akumulacijskega bazena in s tem povročajo morfološke spremembe dna, ki vplivajo na volumen akumulacije. Morfološke spremembe – predvsem zaponjevanje akumulacijskih volumnov s sedimenti – povročajo vplive na izvajanje namenskih rab na akumulacijah. V nalogi so predstavljena teoretična izhodišča upravljanja večnamenskih akumulacij, premeščanja plavin in metod analize morfoloških sprememb na akumulacijah. V praktičnem delu naloge smo za območje večnamenske plitve akumulacije Pernica I na podlagi obstoječih hidroloških, topografskih in podatkov o lastnostih sedimenta izdelali statično analizo sprememb volumna akumulacije z uporabo GIS programskih orodij ter v drugem delu dinamično analizo spreminjanja morfologije dna z uporabo dvorazsežnostnega hidravlično matematičnega modela morfoloških sprememb. Na podlagi umerjenega morfološkega modela smo simulirali morfološke spremembe dna do leta 2020 ter njihov vpliv na primarno namembnost akumulacije – zadrževanje visokih voda.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 627.81:556.166(497.4)(043.3)
Author: Miha Kračun
Supervisor: Prof. Franc Steinman, Ph.D
Co-advisors: Assist. Prof. Primož Banovec, Ph.D
Sen. Lect. Gašper Rak, Ph.D
Title: Modelling the transport of sediments in a shallow reservoir for assessing the impact on high water capacity
Document type: M. Sc. Thesis
Notes: 115 p., 28 tab., 50 eq., 58 fig.
Key words: sedimentation, hydraulic modelling, GIS, MIKE 21C, modelling of morphological changes, reservoirs

Abstract

The construction of barrier structures on the watercourses causes hydro morphological changes in the river system. Water reservoirs due to the retention of high waters change the drainage regime as well as the dynamics of sediment transport. Sediments are as a function of hydrodynamic conditions deposited and eroded in the area of the reservoir and cause morphological changes in the reservoir bathymetry. Morphological changes - especially the accumulation of sediments - have many effects on the implementation of dedicated uses on reservoirs. The paper presents the theoretical foundations of the management on multi-purpose reservoirs, sediment transport and a description of methods for analysis of morphological changes in reservoirs. The practical part of the thesis was to analyse a multipurpose shallow reservoir Pernica I based on of existing hydrological, topographical and sediment characteristics. Firstly a static analysis of changes in volume of the reservoir using GIS software tools was made and secondly a dynamic analysis of the changing morphology of the reservoir bathymetry with using a two-dimensional hydraulic mathematical model of morphological changes. Based on the calibrated morphological model a simulation of morphological changes until 2020 and their impact on the primary purpose of reservoir (floodwater retention) was simulated.

ZAHVALA

Zahvaljujem se vsem, ki so pomagali pri nastanku mojega magistrskega dela.

Posebno bi se rad zahvalil prof. dr. Franci Steinmanu za strokovno pomoč, podporo in spodbudo pri izdelavi magistrske naloge.

Zahvaljujem se tudi podjetju IEI d.o.o. Maribor, ki mi je nudilo spodbudno okolje za izdelavo naloge.

Posebna zahvala gre tebi, Karolina, ker mi vedno stojiš ob strani, za tvojo potrpežljivost, spodbujanje in ljubezen.

»Ta stran je namenoma prazna«

KAZALO VSEBINE

1	UVOD	1
1.1	OPIS PROBLEMATIKE IN RELEVANTNOSTI PROBLEMA	1
1.2	HIPOTEZE	2
2	TEORETIČNA IZHODIŠČA	3
2.1	VISOKOVODNI ZADRŽEVALNIKI	3
2.1.1	Upravljanje in raba na večnamenskih akumulacijah v Sloveniji	3
2.1.2	Visokovodni zadrževalniki in akumulacije	6
2.2	MORFOLOŠKE SPREMEMBE V AKUMULACIJAH	9
2.2.1	Morfološki vplivi na akumulacije	9
2.2.2	Proces premeščanja plavin	13
2.2.3	Teoretična izhodišča procesa premeščanja plavin	15
2.2.4	Posledice sedimentacije v akumulacijah	23
2.2.5	Merjenje sedimentacije na akumulacijah	24
2.2.6	Analiza morfoloških sprememb in prostornine akumulacije	28
2.2.7	Načini ravnanja s sedimentom v akumulacijskih ojezeritvah	31
2.3	MODELIRANJE MORFOLOŠKIH SPREMEMB V AKUMULACIJI Z UPORABO 2D HIDRAVLICNEGA MODELA MIKE 21C	35
2.3.1	Teoretične osnove matematičnega modela	35
2.3.2	Potrebni podatki za uporabo programskega orodja	43
2.3.3	Dolgotrajne meritve vhodnih parametrov za spremljanje morfoloških sprememb na vodotokih in akumulacijah	46
3	MODELIRANJE MORFOLOŠKIH SPREMEMB V AK PERNICA I	48
3.1	REKA PESNICA IN AKUMULACIJA PERNICA I	48
3.1.1	Hidrologija reke Pesnica	49
3.1.2	Geologija doline reke Pesnice kot vir sedimenta	50
3.1.3	Akumulacija Pernica	52
3.2	SISTEM – VHODNI PODATKI	60
3.2.1	Topografski podatki in batimetrija na območju akumulacije	60
3.2.2	Hidrološki podatki in hidravlični robni pogoji	61
3.2.3	Razpoložljivi podatki o lastnostih sedimenta	65
4	IZRAČUNI IN UGOTOVITVE	70
4.1	Koncept priprave vhodnih podatkov	70

4.1.1	Topografija akumulacijskega bazena	70
4.1.2	Hidrološki podatki	72
4.1.3	Vhodni podatki za morfološki model.....	75
4.1.4	Vpeljane poenostavitve v modelu	79
4.2	MORFOLOŠKE SPREMEMBE V AKUMULACIJI	80
4.2.1	Izdelava digitalnega modela globin akumulacijskega bazena AK Pernica I	80
4.2.2	Analiza spreminjanja volumna akumulacije med leti 2009 in 2013	81
4.2.3	Bilančna analiza morfoloških sprememb med leti 2009 in 2013	82
4.3	MODELIRANJE MORFOLOŠKIH SPREMEMB	86
4.3.1	Izdelava krivočrtne računske mreže	86
4.3.2	Hidrodinamični model	88
4.3.3	Model morfoloških sprememb	90
4.3.4	Rezultati modeliranja morfoloških sprememb 2009-2013.....	95
4.3.5	Simulacija sedimentacije za leto 2020	98
4.4	NEKATERI MOŽNI UKREPI IN PREDLOGI UPRAVLJANJA S SEDIMENTOM V PLITVI AKUMULACIJI ZA ZAGOTOVITEV NJENEGA NAMENA.....	103
4.4.1	Scenarij 1: »Brez ukrepov«	103
4.4.2	Scenarij 1: Obratovanje skladno s <i>Pravilnikom o obratovanju</i>	103
4.4.3	Scenarij 2: »Odstranitev sedimenta«	104
4.4.4	Scenarij 3: »Izvedba ekoremediacijskih v povodju«	104
4.5	REZULTATI PREVERJANJA HIPOTEZ.....	106
5	ZAKLUČEK.....	107
	VIRI	110

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Temeljni ukrepi, ki se navezujejo na hidromorfološke obremenitve na akumulacijah (MOP, 2016)	6
Preglednica 2: Dopolnilni ukrepi, ki se navezujejo na hidromorfološke obremenitve na in v prispevnem območju akumulacij (MOP, 2016)	6
Preglednica 3: Roussov parameter za razvrščanje načina premeščanja rečnih sedimentov (Mikoš, 2012a)	18
Preglednica 4: Terenske merilne metode za suspendirane plavine ((Mikoš, 2012b) prirejeno po (Wren, 2000))	25
Preglednica 6: Določitev kritičnega Shieldsovega parametra θC	41
Preglednica 7: Geometrijski vhodni podatki za programsko okolje MIKE 21C	43
Preglednica 8: Pomembnejši potrebni vhodni parametri hidrodinamičnega modula (DHI, 2016)	44
Preglednica 9: Izsek potrebnih podatkov za posamezen postopek v morfološkem modelu MIKE 21C (DHI, 2016)	45
Preglednica 10: Seznam vodomernih postaj na reki Pesnica (ARSO, 2013) * (Leitinger, 2012)	49
Preglednica 11: Projektni pretoki karakterističnih povratnih dob na AK Pernica (vir: (VGB Maribor, 2012),*obstoječi iztok po <i>Pravilniku o obratovanju</i> (Juvan, 2009a))	50
Preglednica 12: Pregled osnovnih karakteristike akumulacije Pernica (IZVRS, 2014)	55
Preglednica 12: Povzetek rezultatov geomehanske analize sedimenta (KMTal, 2016)	68
Preglednica 13: Dodatno iz vrednoteni parametri sedimenta za potrebe morfološkega modela	69
Preglednica 14: Kritična strižna napetost in Shieldsov brezdimenzijski parameter v odvisnosti od velikosti zrn pri 20 stopinjah Celzija (vir: (USGS, 2013))	69
Preglednica 15: Vrednoteni pretoki iz krivulje trajanja modificiranih pretokov na vtoku v AK Pernica	75
Preglednica 16: Povprečno enovito zrno s pripadajočimi lastnostmi	76
Preglednica 17: Lastnosti sedimenta pri ploskovni porazdelitvi srednjega zrna	76
Preglednica 18: Vhodni podatki za posamezne razrede sedimenta	78
Preglednica 19: Spremembe ocenjenega volumna akumulacije Pernica I (Vir: (VGI, 1980), (Krajnc, 2009), (Harpha Sea d. o. o., 2013), (Kračun, 2017))	81
Preglednica 20: Spremembe ocenjenega volumna akumulacije Pernica II (IZVRS, 2014; VGI, 1980)	82
Preglednica 21: Glavni vhodni podatki hidrodinamičnega modela	88

Preglednica 22: Izbrane spremenljivke morfološkega modula M21C.....	92
Preglednica 23: Rezultati simulacije za izbiro enačbe premestitvene zmogljivosti	92
Preglednica 24: Rezultati simulacije za izbiro načina vnosa podatkov o lastnostih sedimenta v morfološki model	93
Preglednica 25: Pregled umerjenih parametrov pri simulaciji morfoloških sprememb 2009– 2013.....	95
Preglednica 26: Statistični kazalniki končne umerjene simulacije morfološkega modela za obdobje 2009–2013	96
Preglednica 27: Pregled umerjenih parametrov pri simulaciji morfoloških sprememb 2013– 2020.....	98
Preglednica 28: Spremembe ocenjenega volumna akumulacije Pernica I med letoma 2013 in 2020 v m ³	102

KAZALO SLIK

Slika 1: Koncept celovitega upravljanja voda v okviru trajnostnega razvoja (Camis, 2015)	3
Slika 2: Rezultati raziskave sprememb namenskosti na večnamenskih akumulacijah v Sloveniji (Globevnik, 2010)	5
Slika 3: Primer iztočnega hidrograma iz zadrževalnika z nenadzorovanim in nadzorovanim izpustom (Steinman & Banovec, 2008)	8
Slika 4: DOF ustja reke Pesnice v akumulacijo Pernica I med leti 2001 in 2016, kjer se vidi tvorjenje rečne delte oziroma naplavnega vršaja na vtočnem delu reke v akumulacijo (Atlas okolja, 2016); (Google Earth, 2017)).....	9
Slika 5: Procesi odlaganja sedimenta in delitve zajezone prostornine v stalno ojezerjenih akumulacijskih bazenih (Julien Y., 2010; Steinman & Banovec, 2008).....	10
Slika 6: Procesi pri tvorjenju rečne delte oziroma naplavnega vršaja (Shahid Mashriqui, 2003)	11
Slika 7: Značilna funkcionalno-morfološka območja rečnih delt in naplavnih vršajev (povzeto po (Volke et al. 2015)).....	12
Slika 8: Shieldsov diagram za začetek prodnega premika (Mikoš, 2007)	16
Slika 9: Vertikalna porazdelitev koncentracije lebdečih plavin - levo za drobne in desno za grobe suspendirane sedimente (konceptualni prikaz) (Mikoš, 2012a)	17
Slika 10: Rezultati simulacije usedanja naplavin v obdobju 1981–1991 (Krzyk & Četina, 2003)	22
Slika 11: Nove variante obratovalnih krivulj izdelanih na podlagi morfološkega modela HE Vrhovo (Javornik, 2015).....	23
Slika 12: Grafični prikaz določitve karakterističnih krivulj volumna in površine akumulacije v odvisnosti od kote polnitve	29
Slika 13: Ravnanje s sedimentom v akumulaciji glede na lokacijo ukrepov po ICOLD (ICOLD, 2009)	31
Slika 14: Prikaz računske mreže v hidrodinamičnem modelu MIKE 21C (<i>angl. space staggered grid</i>) (DHI, 2004)	38
Slika 15: Ilustracija parametrov sekundarnega toka. V desni grafiki je prikazana porazdelitev hitrosti v vertikalnem profilu glede na smer primarnega in sekundarnega toka (prirejeno po (DHI, 2004)).....	39
Slika 16: Strižna napetost/sila na plavine je sestavljena iz treh komponent: sile zaradi glavnega toka F_{bs} , sile zaradi sekundarnega toka F_{bn} in sile gravitacije v odvisnosti od naklona dna vodotoka (DHI, 2004).....	42

Slika 17: Povprečni mesečni pretoki na VP Ranca v obdobju 1959 –2013 (vir: ARSO, 2015)	49
Slika 18: Geološka karta prispevnega območja AK Pernica, kjer vidimo prevladujoče območje laporjev iz obdobja krede, ki je obarvano z rumeno barvo, ter z belo obarvana aluvialna dna dolin. Z rdečim okvirjem je označeno območje akumulacije Pernica (vir: (Žnidarčič & Miač, 1987)).	51
Slika 19: Deleži pokrovnosti zemljišč po klasifikaciji CLC Corine v porečju reke Pesnice do AK Pernica v Sloveniji (vir: (Atlas okolja, 2016)).	52
Slika 20: Fotografija zapornično-pregradnega objekta in pomožnih objektov spomladi leta 2016 (lasten vir)	53
Slika 21: Popolnoma zaprti segmentni zapornici dne 1. aprila 2016 na pregradi Pernica I (lasten vir)	54
Slika 22: Karakteristični prerez Perniškega jezera s ključnimi višinskimi kotami v metrih nadmorske višine (prirejeno po (Blažeka & Petkovšek, 2014)).	55
Slika 23: Ocena ekološkega potenciala za akumulacijo Perniško jezero (ARSO, 2017).	58
Slika 24: Vizualiziran izsek izmere batimetrije AK Pernica v letu 2013 (Harpha Sea d. o. o., 2013)	61
Slika 25: Odtočna shema obravnavanega območja AK Pernica I	62
Slika 26: Hidrogram pretoka in karakteristični pretoki na VP Ranca (Kobold, 2016)	62
Slika 27: Krivulja trajanja pretokov reke Pesnice na VP Ranca za obdobje 1995–2015 in obdobje med meritvami dna akumulacije 2009–2013 (ARSO, 2016).	63
Slika 28: Pretoki na VP Ranca in višina gladine v AK Pernica (Ivanuša, 2016)	63
Slika 29: Manipulacija zapornic na pregradi Pernica v drugi polovici septembra 2010 (Ivanuša, 2016).	64
Slika 30: Meritve suspendiranega materiala na VP Ranca v drugi polovici sedemdesetih let (ARSO, 2016)	65
Slika 31: Soodvisnost pretoka in vsebnosti in transporta suspendiranega materiala na VP Ranca za obdobje 1967–73 ter letih 1975 in 1978 (ARSO, 2016)	66
Slika 32: Lokacije odvzetih vzorcev na akumulaciji Pernica I	67
Slika 33: Rezultati analize zrnastostne sestave sedimenta na AK Pernica I (prirejeno po (KMTal, 2016)).	68
Slika 34: Izdelan digitalni model višin akumulacijskega bazena za leti 2009 (leva slika) in leto 2013 (desna slika).	72
Slika 35: Hidrogram povečanja pretoka reke Pesnice na vtoku v akumulacijo	73

Slika 36: Predpostavljena soodvisnost hidrograma iztoka iz AK Pernica II v spodnjo AK Pernica I	74
Slika 37: Krivulja trajanja za korigirane pretoke na vtoku v AK Pernica I	74
Slika 38: Interpolirana razporeditev srednjega zrna d_{50} [mm] za celotno območje akumulacije z vrisanimi vrednostmi srednjega zrna na lokacijah odvzetih vzorcev sedimenta	77
Slika 39: Izbrani trije razredi (v razmerju 40/30/30) sedimenta kot povprečni vzorec odvzetih vzorcev	77
Slika 40: Modificirana soodvisnost pretoka in vsebnosti suspendiranih snovi, ki smo jo uporabili za določanje vsebnosti suspendiranih snovi v opazovanem obdobju 2009–2013 ..	78
Slika 41: Primer izdelane Karte globin z vrisanimi hidrobatami na akumulaciji Pernica I v letu 2009 in 2013 pri stalni gladini (246,40 m. n. v.)	80
Slika 42: Grafikon volumna in površine ojezeritve AK Pernica I v odvisnosti od kote gladine v letih 2009 in 2013.	82
Slika 43: Bilančna analiza naplavin na AK Pernica I	83
Slika 44: Bilančna razlika sedimenta po višinskih pasovih izračunana kot razlika v batimetriji akumulacije Pernica I med leti 2009 in 2013	84
Slika 45: Histogram rastrskega sloja razlike, ki prikazuje število celic glede na erozijo (negativne vrednosti) in deponiranje (pozitivne vrednosti)	84
Slika 46: Izdelana krivočrtna računska mreža na barvni podlagi koeficienta ortogonalnosti, ki smo jo uporabili v računskem modelu in izdelali v modulu Grid Generator	87
Slika 47: Uporabljeni hidrodinamični zgornji in spodnji robni pogoj v simulaciji pretokov, ki imajo na krivulji trajanja pretokov krajše trajanje kot 2 % leta	89
Slika 48: Primer izračunanega hitrostnega polja izbranega območja akumulacije, kjer je jasno razvidna pretočna razporeditev vektorjev lokalnih hitrosti na območju akumulacije Pernica I	89
Slika 49: Opazovalni prečni profili (P1-P6) za statistično analizo rezultatov računske simulacije in grafični prikaz razlik batimetrije med leti 2009 in 2013 na aproksimirani krivočrtni mreži za računsko območje na AK Pernica I (pozitivne vrednosti - območja odlaganja, negativne vrednosti – območja erodiranja)	90
Slika 50: Vizualna primerjava izračunanih vrednosti v koraku 2 v prečnem profilu P8	93
Slika 51: Prikaz odstopanja izračunanih vrednosti za simulacijo z velikim ($d_{50}=0.084$ mm) in manjšim ($d_{50}=0.011$ mm) povprečnim srednjim premerom enovitega zrna plavin	94
Slika 52: Grafični prikaz spremembe dna na območju AK Pernica I v izbrani končni simulaciji VR_01.02.14	96

Slika 53: Primerjava rezultatov simulacije VR_01.02.14 v profilu P6 z meritvami leta 2009 in 2013.....	97
Slika 54: Grafična ponazoritev simulirane morfologije dna na AK Pernica v letu 2020	99
Slika 55: Primerjava obstoječega stanja na ortofoto posnetku (Google Earth, 2017) in rezultati simulacije morfoloških sprememb z uporabo modela MIKE 21C za leto 2017 na AK Pernica I	100
Slika 56: Primerjava grafikonov volumen – kota gladine in površina ojezeritve – kota gladin z vključenimi linijami rezultatov simulacije 2020.....	101
Slika 57: Bilačna analiza odloženega sedimenta v simulaciji med leti 2013 in 2020	101
Slika 58: Predvideni ERM ukrepi na območju AK Pernica v občini Pesnica (ERM, 2011)...	105

SEZNAM PRILOG:

Priloga A	Prispevno območje AK Pernica z DMV in rečno mrežo
Priloga B	Prostorski prikaz premeščanja naplavin - območja erozije in deponiranja sedimenta v obdobju med leti 2009 in 2013
Priloga C	Digitalni model višin – pričakovana batimetrija akumulacije za leto 2020

OKRAJŠAVE IN SIMBOLI

AK	akumulacija
ARSO	Agencija Republike Slovenije za okolje
DOF	digitalni ortofoto
DRSV	Direkcija Republike Slovenije za vode
DMV	digitalni model višin
ERM	ekoremediacije
GIS	geografski informacijski sistemi
HE	hidroelektrarna
HD	hidrodinamični
HMS	hidromelioracijski sistem
LIDAR	Light Detecting and Ranging
MOP	Ministrstvo za okolje in prostor
NUV	Načrt upravljanja voda

1 UVOD

Zadrževalniki vode z zaježitvijo vodotokov povzročajo spremembo naravnih hidromorfoloških karakteristik vodnih teles in posledično zaželeno upočasnitev in zadrževanje odtoka vode. Zaradi zmanjšane pretoka se zmanjša premestitvena zmogljivost vodnega toka in na območju akumulacije se prične usedati in odlagati sediment. Dinamika vplivnih parametrov, ki so odvisni predvsem od večjih hidroloških dogodkov, geoloških in topografskih karakteristik vodozbirnega območja ter pretočnih karakteristik na območju akumulacije vplivajo na potek in razporeditev morfoloških sprememb dna akumulacije. Proces odlaganja sedimenta in posledičnega zmanjševanja zadrževalnega volumna vodne akumulacije povzroča negativne vplive na izvajanje namenskih rab na akumulacijah.

V Republiki Sloveniji imamo več kot 50 večjih vodozadrževalnih sistemov, to so pregrade z območjem zadrževanja voda. Prvotne rabe so bile hidroenergetska, varstvo pred poplavami in regulacija odtočnega režima na kmetijskih območjih. V zadnjih desetletjih so se predvsem na manjših večnamenskih zadrževalnikih razvile nove namenske rabe (ribištvo, rekreacija, turizem), ki vplivajo na način obratovanja in kvaliteto stanje voda ojezeritve (Globevnik, 2010). Vodozadrževalni sistemi so tako podvrženi vplivom iz vodozbirnega območja, izvajanja dejavnosti na njih in načinu obratovanja.

Tipičen primer takšnega vodozadrževalnega sistema je akumulacija Pernica, ki je sestavljena iz zgornje AK Pernica II in spodnje AK Pernica I. Akumulacija Pernica je večnamenski mokri zadrževalnik visokovodnih valov v sklopu hidromelioracijskega sistema na reki Pesnica. Osnovni namen prvotne akumulacije, zgrajene med leti 1966–68, je ureditev vodnega režima kmetijskih površin. V obdobju 2006–2009 je bila v sklopu izgradnje avtoceste Maribor – Lenart izvedena rekonstrukcija spodnje akumulacije – AK Pernica I, kjer se je izgradil nov pregradni nasip, izvedeno je bilo črpanje sedimenta in rekonstrukcija pregradnega objekta z izvedbo segmentnih zapornic. Pred in po rekonstrukciji se je akumulacija intenzivno zapolnjevala s sedimenti iz reke Pesnice. Primarna raba na akumulaciji je poplavna varnost, akumulacija pa se uporablja tudi za potrebe intenzivnega ribogojstva, ki ima (zlasti v poletnih mesecih zaradi zmanjšane volumna ojezeritve vsled zamuljevanja in nizkih pretokov reke Pesnice) velike probleme z eutrofikacijo (IZVRS, 2014).

V nalogi želimo prikazati uporabo GIS programskih orodij in razširjenega matematično-hidravličnega modela z morfološkim modulom za določitev poteka in stopnje zasipavanja vodnega prostora akumulacije s sedimentom. Z izvedbo teh analiz lahko dokažemo, da se lahko ta programska orodja uporabijo kot orodja za podporo pri odločanju in načrtovanju rabe akumulacije v prihodnje, predvsem iz vidika vpliva morfoloških sprememb v akumulaciji.

1.1 OPIS PROBLEMATIKE IN RELEVANTNOSTI PROBLEMA

AK Pernica je prva akumulacija v sklopu HMS Pesnica, zato hkrati deluje tudi kot usedalnik za plavine iz celotnega zgornjega dela porečja reke Pesnice. Odlaga se predvsem sediment meljastih in glinenih frakcij, ki zmanjšuje volumen akumulacije. Posledica tega je plitvejša akumulacija, ki se v poletnih mesecih pregreje, temu sledi eutrofičnost jezera in pogin rib. Zaradi zmanjšanja volumna zadrževalnega prostora pa je tudi ogrožena primarna namembnost zadrževanja poplavnih valov.

Upravljalci akumulacije in pristojne državne ustanove se srečujejo s problemom ravnanja s sedimentom, saj so stroški odstranitve veliki. Pri tem izhajamo iz dejstva, da je življenjska doba akumulacije kot večnamenski mokri zadrževalnik omejena s količino odloženega sedimenta, ki zmanjšuje zadrževalni volumen za visoke vode do te mere, da z njim ne bo več mogoče učinkovito zadržati visokovodnih konic reke Pesnice.

Na podlagi meritev dna in brežin akumulacije, v časovnem razmaku štirih let, želimo analizirati potek in obseg spreminjanja morfoloških sprememb akumulacije. Za analizo morfoloških sprememb, ki vplivajo na volumen akumulacije smo uporabili dva pristopa, s katerim bomo določiti vplive na zadrževanje visokih voda.

1.2 HIPOTEZE

Digitalizacija in dostopnost prostorskih podatkov omogočata širok nabor analiz z uporabo različnih orodij. V nalogi se bomo posvetili statični analizi izvedenih meritev z uporabo GIS programskih orodij in dinamični analizi spreminjanja dna pod vplivom naravnih parametrov s pomočjo dvorazsežnostnega matematično-hidravličnega modela.

V prvem sklopu magistrske naloge bomo iz meritev batimetrije akumulacije po rekonstrukciji leta 2009 in ponovnih meritev batimetrije v letu 2013 prikazali območja intenzivnega erodiranja in odlaganja ter določili spremembo zadrževalnega volumna in bilančno analizo sedimenta v opazovanem obdobju na akumulaciji Pernica I.

V drugem delu naloge bomo iz podatkov batimetrije akumulacije Pernica I, hidroloških meritev v tem časovnem območju na višje ležeči merilni postaji Ranca na reki Pesnica in rezultatov analize odvzetih vzorcev sedimenta iz akumulacijskega bazena določiti in umeriti dotok plavin, odlaganje in erodiranje sedimenta v odvisnosti od hidroloških parametrov ter simulirati potek sedimentacije in posledičnega spreminjanja morfologije v akumulaciji v prihodnje. Za simulacijo bomo uporabili dvorazsežnosti matematično-hidravlični model z morfološkim modulom na podlagi krivočrtne računske mreže v programskem okolju MIKE 21C danskega hidravličnega inštituta DHI.

V magistrskem delu želimo na podlagi predstavljene problematike (poglavje 1.1) preveriti naslednje trditve:

- Iz meritev dna akumulacije lahko spremljamo spremembe dna akumulacije. Identificiramo lahko območja odlaganja in erodiranja sedimenta. Iz sprememb volumna akumulacije v času med meritvami lahko določimo volumen odloženega oziroma erodiranega materiala.
- Z uporabo hidravlično-matematičnega modela lahko za opazovano časovno obdobje simuliramo tokovne razmere in morfološke spremembe v akumulaciji.
- Z razširjenim matematično-hidravličnim modelom lahko ocenimo vpliv morfoloških sprememb na sposobnost akumulacije za zadrževanje visokih vod.

Razumevanje povezave med zapolnjevanjem akumulacijskega prostora za zadrževanje poplavnih vod in hidroloških vplivov je pomembno za kratkoročno in dolgoročno usklajevanje različnih namenskih rab in načrtovanje posegov na akumulaciji.

2 TEORETIČNA IZHODIŠČA

V prvem delu naloge se bomo posvetili upravljanju večnamenskih zadrževalnikov v Sloveniji, v drugem delu teoretičnim izhodiščem in podlagam načrtovanja zadrževalnikov, v tretjem delu pa teoretičnim osnovam upravljanja s plavinami pri načrtovanju akumulacij, pristopom analize morfoloških sprememb na akumulacijah zaradi sedimentacije ter matematičnemu modeliranju procesa premeščanja in odlaganja plavin, sedimentacije in erozijskih procesov znotraj akumulacij. Natančneje bomo predstavili delovanje dvodimenzionalnega matematično-hidravličnega modela z morfološkim modulom MIKE 21C.

2.1 VISOKOVODNI ZADRŽEVALNIKI

Poplave so v Sloveniji pogost pojav. Vsled temu uporabljamo različne ukrepe za zmanjševanje poplavnih konic. V sredini prejšnjega stoletja je bil pogosto izbran ukrep izgradnja mokrih večnamenskih zadrževalnikov, ki združujejo več pozitivnih učinkov; zmanjšanje koncentracije pretokov in zadrževanje visokovodnih konic, ki predstavljata primarno rabo ter zadrževanje (akumuliranje oz. zadrževanje) vode za sekundarne rabe, kot so ribištvo, namakanje, turizem, rekreacija itd. Zaradi prostorskih in količinskih omejitev ter različnih vplivov na kvalitetno in količinsko stanje voda je za učinkovito upravljanje z večnamenskimi zadrževalniki potrebno upoštevati načela trajnostnega upravljanja z vodami.

2.1.1 Upravljanje in raba na večnamenskih akumulacijah v Sloveniji

Sodobno upravljanje z vodami zahteva celosten pristop, ki združuje varstvo, urejanje in rabo voda. Potrebno je zagotoviti trajnostno rabo obnovljivih naravnih virov. Upravljanje z vodami tako vključuje vzpostavitev in vzdrževanje ureditev za zmanjšanje poplavne ogroženosti in izboljšanje kakovosti vodnega in obvodnega prostora ter oskrbe s kakovostno pitno vodo. Osnovni namen trajnostnega upravljanja z vodami je usklajeno in pravično porazdelitev naravne dobrine z upoštevanjem družbenih, okoljskih in gospodarskih ciljev.



Slika 1: Koncept celovitega upravljanja voda v okviru trajnostnega razvoja (Camis, 2015)

Vrhovna pravna akta na področju upravljanja z vodami v Republiki Sloveniji sta *Zakon o vodah* (ZV-1) (UL RS 67/02, 2002) in *Zakon o varstvu okolja* (UL RS 39/06, 2006), ki vključujeta zahteve okvirne Vodne direktive (Direktiva, 2000/60/EC) in evropskih direktiv na področju varstva okolja. Po *Zakonu o vodah* (ZV-1) (UL RS 67/02, 2002) delimo rabo voda na splošno

in posebno rabo voda. Splošna raba voda je raba, s katero neznatno vplivamo na količino in kakovost voda in če s to rabo ne omejujemo ali onemogočamo enakih pravic drugih ali izvajanje vodnih pravic (MOP, 2011). Posebna raba voda je vsaka raba, ki presega meje splošne rabe. Za posebno rabo je potrebno pridobiti vodno pravico na podlagi vodnega dovoljenja ali koncesije oziroma je treba posebno rabo evidentirati.

Vodna pravica je pravica do posebne rabe vodnega ali morskega javnega dobra kot tudi naplavin, razen vodnega zemljišča. Imetnik vodne pravice mora za vsako posebno rabo plačevati okoljsko dajatev za rabo naravnih dobrin – plačilo za vodno pravico in vodno povračilo. Skladno z ZV-1 je imetnik vodne pravice na območju vpliva na izvajanja le-te dolžan odvzemati naplavine, v obsegu določenih v koncesiji (MOP, 2016).

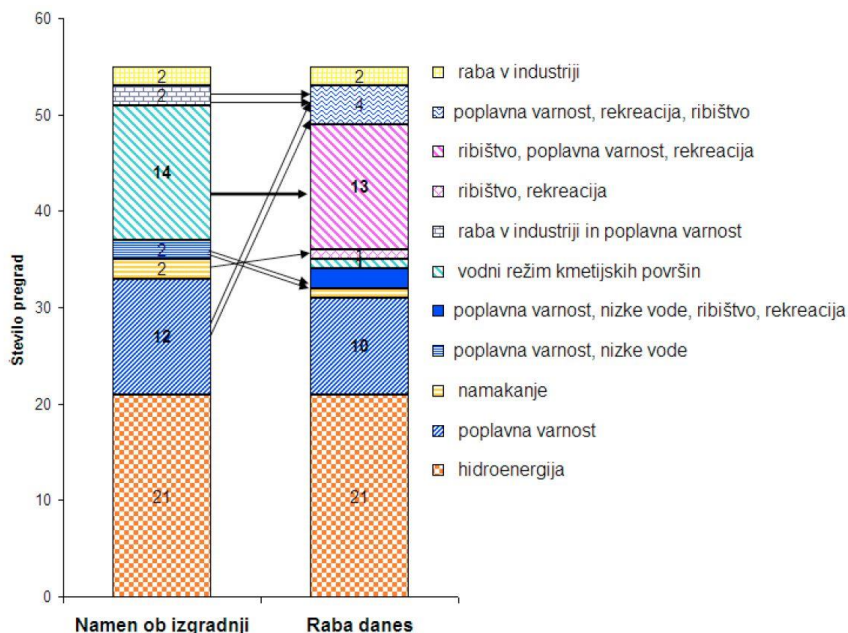
Za upravljanje z večnamenskimi zadrževalniki, ki niso predmet koncesije, je v Republiki Sloveniji je zadolženo Ministrstvo za okolje in prostor RS (MOP) oziroma Direkcija za vode RS (DRSV), ki ima z gospodarskimi javnimi službami urejanja voda sklenjene koncesijske pogodbe za upravljanje in vzdrževanje te vodne infrastrukture. Upravljelec izvaja nadzor nad obratovanjem in vzdrževanjem vodozadrževalnega sistema na podlagi *Pravilnika o obratovanju in vzdrževanju*.

Pravilnik o obratovanju in vzdrževanju je dokument, ki je usklajen z vsemi deležniki in celostno obravnava izvajanje namenskih rab ob upoštevanju prostorskih in okoljskih omejitev vodozadrževalnega sistema. *Pravilnik o obratovanju in vzdrževanju* mora med drugimi vsebinami na podlagi predhodnih analiz vsebovati dinamiko in način obratovanja, monitoringa in vzdrževanja akumulacije za preprečevanja oziroma zmanjševanje odlaganja sedimenta in posledičnega zmanjševanja volumna akumulacije (Hočurščak, 2016).

Na območjih stalnih ojezeritev se prav tako podeljujejo koncesije za upravljanje z vodnim življem, ki pa jih podeljuje Ministrstvo za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano (MKGP). Nekatera območja akumulacijskih bazenov manjših večnamenskih zadrževalnikov so zaradi razvoja ugodnih habitatnih pogojev za ogrožene živalske in rastlinske vrste razglašena za naravne vrednote in zaščitena naravna območja (Natura 2000, ekološko pomembna območja ...).

Na vodozadrževalnih sistemih v Sloveniji so se tekom desetletij razvile nove rabe, ki vplivajo na obratovanje in izvajanje obstoječih namenskih rab. Različne namenske rabe povzročajo različne hidromorfološke, biološke in kemijske spremembe vodnih ojezeritev. Predvsem se je razvilo izvajanje ribiške dejavnosti, na katero vpliva kvalitetno in količinsko stanje voda, hkrati pa se povečuje težnja po višjih kotah stalnih ojezeritev. Na Sliki 2 so prikazane spremembe namenskih rab na večnamenskih akumulacijah v Sloveniji.

Spremembe rab na večnamenskih akumulacijah so se pojavljale velikokrat stihijsko in brez ustreznih inženirskih ali strokovnih podlag. Poleg spremembe prvotne rabe so še tukaj problemi z upravljanjem in nadzorom, saj so nekateri zadrževalniki na zemljiščih v zasebni lasti ter ni celovitih razvojnih programov in posodobitev obratovalnih pravilnikov, ki bi opredelili dejavnosti, rabe, razmerja med deležniki, vzdrževanje, investicije in redni monitoring varnostnih parametrov (Globevnik, 2010). Pomembno je poudariti, da je za določitev in ureditev razmer na večnamenskih zadrževalnikih potrebno medsektorsko sodelovanje in dogovarjanje (Cvejić, et al., 2012). Upravljanje z akumulacijskih prostorom in deležniki je zato kompleksen in stalno spreminjajoč proces, v katerem je potrebno nenehno usklajevanje.



Slika 2: Rezultati raziskave sprememb namenskosti na večnamenskih akumulacijah v Sloveniji (Globevnik, 2010)

Eden od glavnih ciljev okvirne Vodne direktive je zagotavljanje t. i. dobrega statusa voda. V zakonodajo EU članic je bil z Vodno direktivo vpeljan nov sistem vrednotenja kakovosti voda – sistem vrednotenja ekološkega stanja voda, ki naslavlja biološke, fizikalno-kemijske in hidromorfološke elemente kakovosti voda. Umetne akumulacijske pregrade spadajo med glavne hidromorfološke obremenitve vodnih teles, saj vplivajo na več elementov vrednotenja hidromorfološke kakovosti vodnih teles:

- hidrološki režim (količina in dinamika vodnega toka ter povezava s telesi podz. vode),
- zveznost toka (migracija vodnih organizmov in premeščanje sedimenta) in
- morfološke razmere (struktura struge/obale in obrežnega pasu).

V splošnem interpretiramo, da se v hidromorfoloških elementih kakovosti zrcali intenzivnost fizičnih posegov v vodni, obvodni in širši prostor zaradi različnih potreb po rabi prostora oziroma rabi vode (Repnik Mah, et al., 2016).

Okoljski cilji Vodne direktive in mehanizmi za doseganje le-teh so implementirani v Načrtu upravljanja voda (NUV) in v Programu ukrepov načrta upravljanja voda (PU NUV). NUV predstavlja državni strateško-načrtovalski dokument na področju upravljanja voda. Vsak NUV ima tri cilje: okoljski cilj, ki zajema cilje v zvezi z varstvom voda, cilje v zvezi z urejanjem voda in cilje v zvezi z rabo voda. Namen NUV dokumentov je doseganje dobrega stanja voda in preprečitev poslabšanja stanja voda (MOP, 2011).

Program ukrepov Načrta upravljanja voda (PU NUV) predstavlja nabor temeljnih in dopolnilnih ukrepov za doseganje okoljskih ciljev. Temeljni ukrepi so potrebni za doseganje ciljev v zvezi z varstvom, urejanjem in rabo voda. Implementacija samo temeljnih ukrepov ni omogočala doseganje vseh okoljskih ciljev, zato so se ti dopolnilni z t. i. dopolnilnimi ukrepi, ki se nanašajo predvsem na doseganje dobrega stanja voda. Dopolnilne ukrepe delimo na podkategorije: dopolnilni ukrepi za preprečitev poslabšanja ali slabšanja stanja (DUDDS), dopolnilni ukrepi za doseganje dobrega stanja oziroma dobrega potenciala (DUDDS), drugi dopolnilni ukrepi (DDU), ekonomski instrumenti (ED) in dopolnilni ukrepi za podnebne spremembe (PS).

V aktualnem NUV II (MOP, 2016) in PU je za izboljšanje hidromorfološkega stanja vodnih teles predvidenih več temeljnih in dopolnilnih ukrepov, ki direktno in/ali posredno vplivajo na premeščanje sedimenta in ekološko stanje v akumulacijah.

Preglednica 1: Temeljni ukrepi, ki se navezujejo na hidromorfološke obremenitve na akumulacijah (MOP, 2016)

Šifra ukrepa	Ime ukrepa
HM8a	Ukrepi, ki se navezujejo na zagotavljanje dobrega stanja voda, vezano na hidromorfološke obremenitve
HM8b1	Strokovna podlaga za pripravo smernic in mnenj k načrtovanim prostorskim ureditvam
HM8b2	Strokovna podlaga za odločanje v okviru postopka pridobitve vodnih soglasij
HM8b4	Proučitev problematike rečnega sedimenta z vidika doseganja dobrega stanja voda

Dopolnilni ukrepi so v NUV II predvideni na področju vodnih teles, ki ne bodo dosegala okoljskih ciljev do leta 2021 oziroma 2027 kljub izvajanju temeljnih ukrepov. V preglednici so predstavljeni ukrepi na območju vodotokov oziroma akumulacij, ki pozitivno prispevajo k hidromorfološkem stanju vodnih teles.

Preglednica 2: Dopolnilni ukrepi, ki se navezujejo na hidromorfološke obremenitve na in v prispevnem območju akumulacij (MOP, 2016)

Šifra ukrepa	Ime ukrepa
DUDDS4	Izvedba ukrepov za zmanjšanje negativnega vpliva rabe tal v obrežnem pasu na stanje voda
DUDDS5.2	Izvedba ukrepov za zmanjšanje negativnega vpliva regulacij in drugih ureditev vodotokov, zadrževalnikov, jezer in obalnega morja na stanje voda
DUDD26	Izvedba ukrepov za zmanjšanje negativnega vpliva osuševanja zemljišč na stanje voda

Cilji aktualnega NUV II (MOP, 2016) na področju rabe voda tako predvidevajo vrsto ukrepov za doseganje trajnostne rabe voda. Med njimi je bil sprejet ukrep DDU19, »Ureditev primarne in sekundarnih rab vode na večnamenskih akumulacijah«, v katerem DRSV na podlagi zbranih podatkov o projektiranih in aktualnih rabah na večnamenskih akumulacijah predlaga ureditev razmerij rab in namenskosti na akumulacijah skladno z Vodno direktivo in *Zakonom o vodah*.

2.1.2 Visokovodni zadrževalniki in akumulacije

Varstvo pred poplavami delimo glede na način delovanja na aktivne in pasivne ukrepe ter glede na vrsto posega na gradbene in negradbene ukrepe. Pasivni ukrepi pred visokimi vodami so tisti, s katerimi zmanjšujemo ogroženost ali ranljivost (gradnja nasipov, prilagojena gradnja ipd.). Med aktivne ukrepe spadajo tisti ukrepi, s katerimi vplivamo na pojav (npr. zmanjšanje poplavne konice). Med njimi je eden najbolj uporabljenih ukrepov zadrževanje vode za pregradami (Banovec, 2003).

Zadrževanje vode je zasnovano tako, da se v času poplavnih voda del poplavne vode zadrži, kar vpliva na znižanje visokovodne konice odtočnega hidrograma. Zadržano vodo pa se po upadu vode kontrolirano vrača nazaj v vodotok. Z zadrževanjem vode navadno ne vplivamo samo na prostornino visokovodnega vala, temveč zgolj na njegovo višino in časovni potek

(Trobec, 2011). Zadrževalniki povzročijo dolvodno znižanje visokovodnih pretokov enakih povratnih dob kot pred njihovo izgradnjo.

Zadrževalniki spadajo med zajezne zgradbe. Objekt zadrževalnika sestavljajo pregrada z ustreznimi objekti (naprave za izpust vode in naprave za odvajanje viškov vode) ter prostor za vodo. Pregrade delimo na betonske in zemeljske. Betonske so težnostne, stebarske in ločne. Zemeljske pregrade se delijo na zemljinske (če je več kot 50 % zemljine) in kameninske. Zemljinske so lahko homogene ali slojevite, kameninske pa zložene, nasute ali slojevite. Tip pregrade pogojujejo predvsem geološke razmere, velikost objekta, dostopnost gradbenega materiala, vpliv na ljudi in že zgrajeno infrastrukturo. Na dobro nosilnih tleh so bolj primerne betonske pregrade, na slabo nosilnih tleh pa zemeljske, saj se prilegajo morebitnim posedkom temeljnih tal. Pri zemeljskih pregradah so posebno pomembni objekti za prelivanje viškov voda, varnostna višina, kontrola pronicanja in kontrola posedkov (Steinman & Banovec, 2008).

Zadrževalnike razvrščamo glede različnih lastnosti v več vrst, in sicer:

a) Glede na zadrževalni čas

Bistvena razlika med akumulacijami (zbiralniki) in zadrževalniki (retenzije) je v času zadrževanja vode, saj zadrževalniki zadržujejo odtok za krajše obdobje, akumulacije pa zadržujejo vodo za daljše obdobje. Zadrževalnike na podlagi zadrževalnega časa delimo na suhe in mokre. Suhi so tisti zadrževalniki, v katerih je čas zadrževanja krajši od 24 ur, ostali čas pa je namenjen sekundarnim dejavnostim. Takšni zadrževalniki služijo predvsem za zniževanje visokovodnih konic, v njih pa zaradi kratkega časa zadrževanja vode ne pride do usedanja finih sedimentnih delcev. Mokre zadrževalnike oziroma akumulacije ločimo na letne (sezonske), večletne ter zadrževalnike z večurno ali dnevno izravnavo (visokovodni zadrževalnik). Po namenski rabi so večnamenski, saj akumulirano vodo kot sekundarno rabo uporabljamo za hidroenergijo, vodooskrbo, namakanje, ribištvo, turizem ipd.

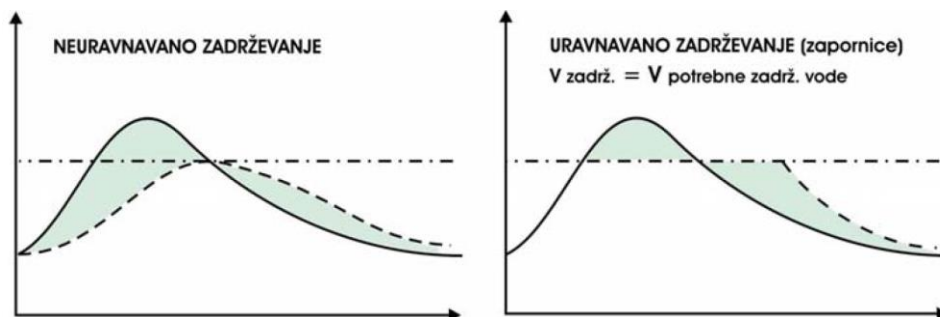
b) Glede na vtok

Vtok v zadrževalnik je lahko kontroliran ali nekontroliran. V odvisnosti od lokacije akumulacijskega bazena, na ali izven vodotoka poznamo različne hidrotehnične rešitve za vtok v zadrževalnik. Za zadrževalnike ob vodotoku je najbolj preprosto prelivanje preko bočnih prelivov. O primeru kontroliranega vtoka govorimo takrat, ko imamo prisotno hidromehansko opremo – ustrezno zapornico ali zasun in podslapje odporno proti eroziji (Duhovnik, 2007).

c) Glede na iztok oziroma izpust

Po načinu izpusta delimo zadrževalnike na nadzorovane (s hidromehansko opremo) in nenadzorovane (s prostim iztokom). Zadrževalniki z nenadzorovanim iztokom (neuravnano zadrževanje) pričnejo zadrževati vodo vedno pri istem pretoku, npr. pri Q_{20} . Tako so najbolj učinkoviti pri poplavah s povratno dobo 20 let, pri višjih povratnih dobah je učinek na zmanjšanje visokovodnih konic manjši. Pri zadrževalnikih z nadzorovanim iztokom (uravnano zadrževanje) s pomočjo hidromehanske opreme (zapornic ali zasunov) zadržujemo poplavne valove prej ali kasneje v odvisnosti od napovedi pretokov. Tako lahko bolj učinkovito zadržujemo pretoke različnih povratnih dob, vendar le v primeru zanesljive hidrološke napovedi (Banovec, 2003). Zadrževalnike z nadzorovanim izpustom imenujemo visokovodni zadrževalniki, zadrževalnike z nenadzorovanim izpustom pa protipoplavni zadrževalniki. Pri tem tipu je talni izpust vedno odprt, dimenzioniran je tako, da spušča največji pretok, ki je

odvisen od višine zajezebe, hkrati pa ne preseže pretočne sposobnosti odvodnika (Kocjan, 2009).



Slika 3: Primer iztočnega hidrograma iz zadrževalnika z nenadzorovanim in nadzorovanim izpustom (Steinman & Banovec, 2008)

V povodju je lahko eden ali več zadrževalnikov. Postavljeni so lahko zaporedno ali vzporedno. Večje število zadrževalnikov v povodju lahko poveča učinek zadrževanja, vendar pa se v primeru zadrževalnikov na pritokih in pri združitvi visokovodnih valov visokovodna konica lahko celo poveča (Banovec, 2003).

Zadrževalniki spadajo v skupino hidrotehničnih objektov, za katere je značilen vpliv zgradbe na vodo in vode na zgradbo, vpliv objekta na okolje, visoki stroški izgradnje, potencialno nevarno objekti, dolgotrajna gradnja, prav tako zavzamejo veliko prostora in vplivajo na transportno sposobnost vodotoka (Steinman & Banovec, 2008).

Akumulacije, ki imajo daljše zadrževalne čase, bistveno vplivajo na proces sedimentacije. Med te prištevamo tudi mokre zadrževalnike, ki akumulirajo poplavne konice za nadaljnjo sekundarno in terciarno rabo. Pri tem proces prekomerne sedimentacije vpliva na osnovno rabo in na ostale rabe na akumulaciji. Procese in vzroke za odlaganje in erodiranje sedimenta bomo predstavili v nadaljevanju.

2.2 MORFOLOŠKE SPREMEMBE V AKUMULACIJAH

Procesi erozije, premeščanja plavin, njihovega odlaganja in ponovnega spiranja, so pomembni naravni procesi, ki vplivajo na morfologijo vodotoka. Pri načrtovanju objektov, ki posegajo v vodni tok, moramo biti pozorni na ta proces, saj so morfološki procesi funkcija pretoka in razporeditve hitrostnega polja znotraj vodnega telesa. Iz tega razloga ima vsaka sprememba razmer posledico v morfoloških spremembah vodotoka oziroma batimetriji vodnega zadrževalnika. V procesu načrtovanja akumulacij moramo te procese posebej preučiti, saj lahko sediment vpliva na koristno prostornino akumulacije, s tem pa na izvajanje namenskih rab ter njeno življenjsko dobo.

2.2.1 Morfološki vplivi na akumulacije

Na svetu je več kot 40.000 velikih pregrad katere ogroža proces sedimentacije. Ocenjuje se, da se zaradi procesa sedimentacije letno zmanjša med 0,5 in 1,0 % skupnega volumna svetovnih akumulacij (Van Rijn, 2013). V Sloveniji se letna stopnja zapolnjevanja koristnih volumnov akumulacij ocenjuje na cca 0,8 % skupnega volumna na leto (ICOLD, 2009).

V akumulaciji se zaradi povečanja pretočnega profila ter zmanjšanja vzdolžnega padca gladine hitrost toka zmanjša. Posledično se zmanjša transportna sposobnost in sediment se prične odlagati. Sedimenti so tiste plavine, ki se v mirujoči vodi izločijo in usedejo na dno (Mikoš, 2007). Proces odlaganja sedimenta imenujemo sedimentacija. Glede na velikost sedimentnih delcev ločimo pojma zaprojevanja, ki je posledica odlaganja rinjenih plavin, in zamuljevanja akumulacij, ki je posledica usedanja predvsem lebdečih plavin (suspendirane snovi). V akumulacijah z veliko sedimenta se na vtoku oziroma ustju akumulacije prične tvoriti naplavni vršaj. Zaradi odlaganja sedimenta se na območju akumulacij spreminjajo morfološke in hidrodinamične lastnosti akumulacije. Na tem območju se ob nizkih vodostajih pokažejo območja odloženega materiala, sipine ali stalni otoki ter porasli z vegetacijo.



Slika 4: DOF ustja reke Pesnice v akumulacijo Pernica I med leti 2001 in 2016, kjer se vidi tvorjenje rečne delte oziroma naplavnega vršaja na vtočnem delu reke v akumulacijo (Atlas okolja, 2016); (Google Earth, 2017))

V akumulaciji se zaradi obratovanja in sedimentacijskih procesov vzpostavi značilen podolžni prečni prerez volumna vode in odloženega sedimenta v akumulaciji. Vodni del prostornine v stalno ojezerjeni akumulaciji delimo na podenote:

- Koristni volumen je volumen med najnižjim iztočnim izpustom in normalno gladino. Predstavlja volumen, ki je na razpolago za namensko rabo.
- Mrtvi volumen predstavlja volumen pod dnom najnižjega izpusta.
- Poplavni volumen je volumen med nivojem normalne gladine in maksimalno gladino zapolnitve akumulacije. Predstavlja volumen za zadrževanje poplavne vode.
- Prostornina zadrževalnika je celotni volumen akumulacije od dna rečnega korita do kote zaježitve (Van Rijn, 2013).

Zaradi zaježitve vodotoka se spremenita prvotno dno in gladina vodotoka. V akumulaciji se vzpostavi tipičen podolžni prerez odlaganja sedimenta (Slika 5). Največ plavin se odloži na vtočnem delu v akumulacijo, v smeri proti pregradnemu objektu pa se količina odloženega sedimenta zmanjšuje. V zgornjem delu se odlagajo pretežno rinjene plavine (grobe frakcije), druge frakcije se lahko prenesejo v notranjost akumulacije kot gostotni tokovi (*angl. density currents*). Kopičenje sedimenta na vtočnem delu akumulacije povzroči dvignjeno zaježno krivuljo, ki lahko povzroča poplavljanje gorvodno ob vodotoku.



Slika 5: Procesi odlaganja sedimenta in delitve zajezene prostornine v stalno ojezerjenih akumulacijskih bazenih (Julien Y., 2010; Steinman & Banovec, 2008)

Gostotni tokovi so definirani kot gibanje tekočin različnih gostot zaradi vpliva gravitacije. V akumulacijah se pojavljajo kot posledica razlik v gostoti dotečajoče vode s plavinami iz vodotoka, ki so večje gostote, in čiste vode v akumulaciji, ki imajo nižjo gostoto. Delci plavin v gostotnih tokovih izvirajo iz naravne kalnosti. Velikostni razred delcev je premera manj kot 20 mikrometrov (Julien Y., 2010). Zaradi razlike v gostoti se vzpostavi stratificirani globinski profil, kjer se težja voda s plavinami zaradi razlike v gostoti giblje po dnu akumulacije. Med gibanjem gostotnih tokov se pojavi vrtnčenje, zato jih imenujemo tudi kalni vrtinci (*angl. turbidity currents*). Le-ti predstavljajo prevladujoč proces pri premeščanju sedimenta v akumulacijah in se pojavljajo na območju rečnih delt oziroma naplavnih vršajev ob večjih poplavnih pretokih (Tigrek, et al., 2009).

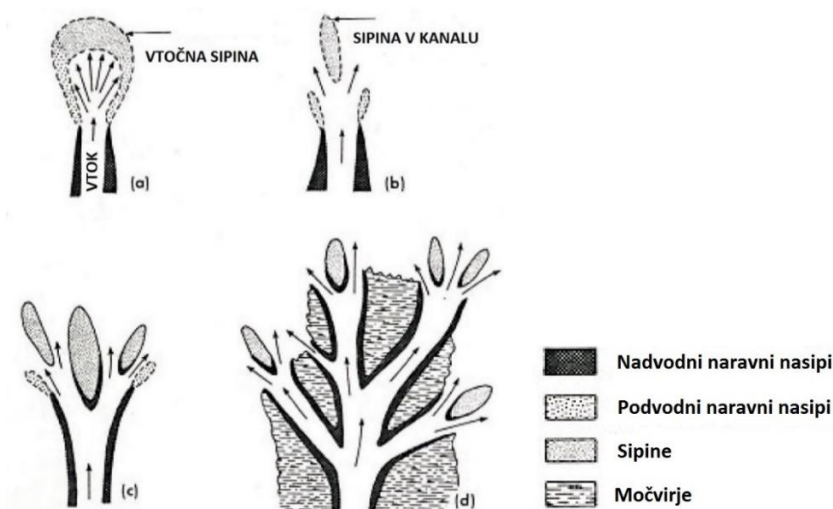
V smeri proti pregradi se povprečni premer odloženih zrn zmanjšuje, zato so najbolj fina zrna – lebdeče plavine v delu akumulacije pri pregradnem objektu oziroma iztoku. Fine frakcije kalnosti se prav tako posedajo v stranskih predelih akumulacije, kjer je glavni mehanizem sedimentacije posedanje lebdečih plavin flokulacija. Proces posedanja delcev prispeva povprečno največ 3 % k skupnemu volumnu deponiranega sedimenta (De Villiers, 2006).

Premeščanje sedimenta oziroma plavin je odvisno od sedimentacijskega potenciala (zaloge) povodja, transportne sposobnosti vodotoka in načina odlaganja. Zapolnjevanje akumulacije je odvisno od rečnega režima, pogostosti visokih vod, poplav, oblike in velikosti akumulacije, oblike dna akumulacije (batimetrija), stopnje konsolidacije sedimenta, obratovanja akumulacije, gostotnih tokov, velikosti sedimenta, fizikalnih in kemijskih lastnosti vode in sedimenta, temperature, potenciala flokulacije lebdečih plavin ter rabe tal in protierozijskih ureditev v prispevnem območju vodotoka oziroma zadrževalnika. Največ sedimenta se odloži v prvih letih po izgradnji akumulacije. Z zapolnjevanjem ojezeritve se tudi zmanjšuje stopnja odlaganja sedimenta, saj se skrajša zadrževalni čas vode vsled spremenjenih morfoloških razmer (Ojsteršek Zorčič, 2015; Julien Y., 2010).

V analizi sedimentacije akumulacije in posledičnega zmanjševanja njenega volumna najprej določimo prestrezno sposobnost zbiralnika (angl. *reservoir trap efficiency*), nato na podlagi podrobnejšega numeričnega (matematično-hidravličnega) modela sedimentacije (npr. empirični, 1D, 2D, 3D) predvidimo ukrepe za zmanjšanje stopnje sedimentacije v akumulaciji (angl. *control measures*).

2.2.1.1 Razvoj rečne delte oziroma naplavni vršaj

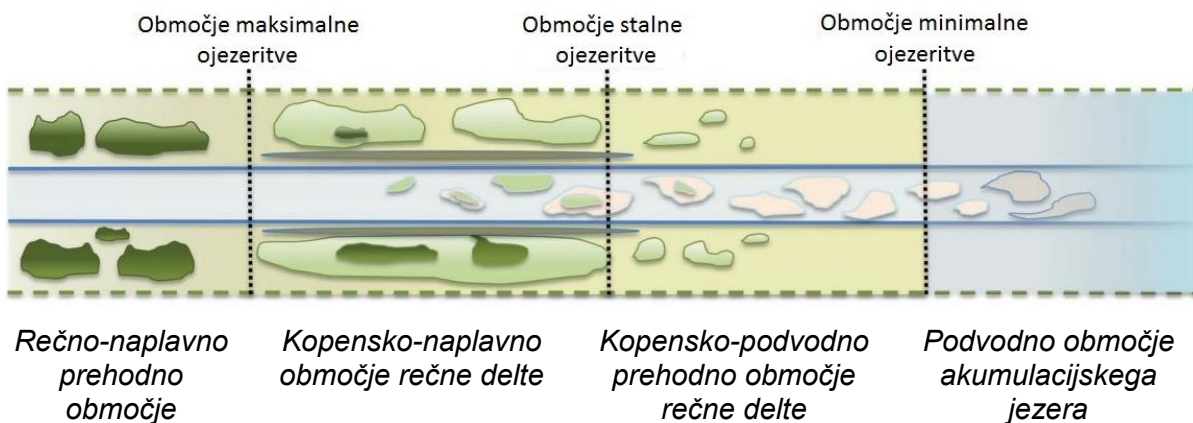
Izrazit proces odlaganja plavin tvori rečno delto oziroma naplavni vršaj. Rečna delta ali aluvialna naplavina nastane na vtoku vodotoka v večje mirujoče vodno telo (npr. morje, akumulacija, zaliv). Pri tem je rast in razvoj morfologije rečne delte odvisen od transportne sposobnosti vodotoka in erozije odloženega sedimenta zaradi valov, nihanja gladine zaradi obratovanja akumulacije, položaja iztočne odprtine in morskih tokov ter dinamike pojavnosti visokih pretokov.



Slika 6: Procesi pri tvorjenju rečne delte oziroma naplavnega vršaja (Shahid Mashriqui, 2003)

Razvoj morfologije delte oziroma vršaja je posledica zmanjšane hitrosti vodnega toka, zaradi česar le-ta ne more več prenašati večjih frakcij plavin. Večje frakcije se zato prično deponirati

na osrednjem območju rečnega kanala. Zaradi pojava deponiranih plavin v osrednjem delu kanala (pojavi se sipine), ki preusmerijo tok ob robove pretočnih kanalov, le-ta povzroči erozijo brežin. Na območjih dolvodno se zaradi povečane hrapavosti dna pojavi odlaganje tudi bolj finih frakcij. Odlaganje sedimenta tako tvori plitvine, ki pospešujejo nastanek novih kanalov, kjer se proces morfoloških sprememb ponovi. Reka tako tvori pahljačasto razvejano mrežo kanalov, ob katerih se pojavijo naravni »prelivni« nasipi (potopljeni ali nadvodni), sipine in plitvine, ki jih imenujemo poloji, kjer se prične tvoriti vegetacija, ki še dodatno upočasni vodni tok (Shahid Mashriqui, 2003).



Slika 7: Značilna funkcionalno-morfološka območja rečnih delt in naplavnih vršajev (povzeto po (Volke et al. 2015))

Novo nastala območja odloženega materiala, ki imajo zaradi obratovalnega nihanja gladine vode specifične pogoje, predstavljajo območja začetnih faz zaraščanja z vegetacijo. Ta proces imenujemo primarna sukcesija (Ignjatović et al. 2013). Na podlagi opazovanj lahko območja na rečnih deltah akumulacijskih jezer z izrazitim nihanjem gladine razvrstimo v štiri območja, kjer prepoznamo značilne funkcionalne in morfološke lastnosti (Volke et al. 2015):

- Rečno-naplavno prehodno območje (*angl. fluvial-delta transition zone*) je območje nad maksimalno ojezeritvijo akumulacije. Območje se primarno spreminja zaradi vpliva vodotoka, ki s poplavljanjem in z odlaganjem naplavin pogojuje spremembe znotraj območja. Na območju je prisotna lesna vegetacija (obrežni gozd) in značilna vegetacija obrežnega pasu.
- Na območju kopnega dela rečne delte (*angl. subaerial zone*), ki se nahaja v območju priobalnega pasu med koto maksimalne in stalne ojezeritve, so prisotni vplivi vodotoka in akumulacijski vplivi nihanja gladine zaradi obratovanja akumulacije. Za območje so značilne intenzivne morfološke spremembe zaradi odlaganja sedimenta. Tvorijo se novi naravni kanali, sipine, nasipi in poloji. Značilna je primarna vegetacija, predvsem vrbe (*lat. Salicaceae*) (Ignjatović et al. 2013).
- Kopensko-podvodno prehodno območje (*angl. subaerial-subaquatic delta zone*) je območje med stalno in minimalno koto ojezeritve. Za območje je značilno vertikalno odlaganje bolj finih frakcij in erozijskih procesov vodnega toka ob nizkih kotah gladin v ojezeritvi. V plitkih akumulacijah so lahko ta območja zelo obsežna. Vegetacija se vzpostavi v času obdobja okopnitve najvišjih predelov.
- Podvodno območje akumulacijskega jezera (*angl. subaquatic reservoir zone*) je območje, ki se nahaja pod koto minimalne gladine akumulacije. Območje je posledično stalno ojezerjeno. Na območju se odlagajo zelo fine frakcije, pri katerih je primarni

mehanizem flokulacija. Pri tem se tvori predvsem nekonsolidiran sediment. Na teh območjih najdemo v plitkih predelih ojezeritve vodne rastline. Značilno za plitve akumulacije z visoko kalnostjo je, da se zaradi pomanjkanja svetlobe na dnu ne tvori vegetacija (Volke et al. 2015).

Zavedati se moramo, da so matematično-hidravlični modeli orodje z omejeno zmožnostjo upoštevanja vseh vplivov, ki so prisotni pri modeliranju morfoloških sprememb v vodotokih in akumulacijah z vidika morfoloških sprememb zaradi procesa sedimentacije. K spremembam količine odloženega sedimenta bistveno prispevajo biološki in kemijski vplivi. Med biološkimi vplivi moramo izpostaviti vegetacijo, ki deluje v dveh smereh: s prepletenim koreninskim sistemom povečuje strižno odpornost zemljine na erozijske procese, z gosto zarastjo pa se tekom vegetacijskih ciklov spreminjajo koeficienti hrapavosti, ki direktno vplivajo na hitrost toka. Z zmanjšano hitrostjo toka se poveča hitrost posedanja delcev, kar dodatno prispeva k zadrževanju in odlaganju sedimenta in hranil.

2.2.1.2 Analiza življenjske dobe akumulacije

Življenjska doba akumulacije je čas, v katerem se bo akumulacija popolnoma zapolnila s sedimentom oziroma bo prišlo do zmanjšanja volumna do te mere, da akumulacija ne bo več primerna za prvotno namenjeno rabo. Za določitev življenjske dobe akumulacij izhajamo iz podatkov o lastnostih porečja, meritev transporta plavin in kalnosti v reki ter nato iz predvidene geometrije akumulacije izvednotimo zaježitvene krivulje in iz transportne sposobnosti določimo prestrezno sposobnost akumulacije in stopnjo usedanja sedimenta (Julien Y., 2010).

Vsaka pregrada ima svojo prestrezno sposobnost sedimenta (*angl. trap efficiency*), ki predstavlja razliko med skupnim dotokom in iztokom plavin iz akumulacije. Stopnja zmanjševanja akumulacije se izraža kot delež letne izgube volumna akumulacije. Na primer, če se volumen akumulacije zmanjšuje na račun sedimentacije za 0,6 % na leto, to pomeni, da se bo volumen akumulacije v času 50 let zmanjšal za cca 30 % prvotnega volumna (ICOLD, 2009). Izračun sposobnosti zadrževanja sedimenta prikazuje enačba:

$$TE = \frac{(V-V') \cdot 100}{(V \times N)}, \quad (1)$$

kjer so:

- TE* ... prestrezna sposobnost akumulacije (*angl. trap efficiency*),
- V* ... prvotni volumen akumulacije (ob času izgradnje),
- V'* ... trenutni volumen akumulacije (v času zadnje meritve batimetrije),
- N* ... starost pregrade (leto meritve batimetrije odšteto z letom izgradnje pregrade).

2.2.2 Proces premeščanja plavin

V erozijskem krogu vpliva vode na zemeljsko površje je prvi korak premeščanje v pretežno drobnozrnatih zemljin z zemeljske površine in v glavnem bolj grobozrnatega erozijskega drobirja iz virov plavin hudourniških območjih v porečje. Erozijska, odnašanje, odplavljanje (*angl. erosion*) in sedimentacija (odlaganje, nanašanje, *angl. sedimentation*) se izmenjujeta skozi celotno rečno mrežo od virov nastanka do mest končnega odlaganja (Rusjan & Mikoš, 2006).

Rečne sedimente, ki se premeščajo z rečnim tokom, imenujemo plavine (*angl. fluvial sediments, river sediments*). Posledica premeščanja plavin sta kalnost (*angl. suspended load*) in prodonosnost (*angl. bed load*) rek. Pojma prodonosnost in plavine imata v slovenskem izrazoslovju dvojni pomen (Mikoš, 2012a):

- Masni ali prostorski tok na časovno enoto (npr. kg/s; t/leto; m³/leto).
- Naravna pojava premeščanja rečnega materiala, ki povzročata kalnost in prodonosnost.

Po Mikošu, 2012a citiramo:

»Prodonosnost je tako na eni strani izraz za pojav in na drugi strani za dejanski pretok rinjenih plavin (angleško bed material; nemško Geschiebe), ki se premeščajo po dnu ali poskakujejo v rečni tok (angleško saltation load), a ostajajo v bližini rečnega dna.

Kalnost v reki (in posledično motnost, da ne vidimo rečnega dna) povzročajo kalni delci (angl. wash load), načeloma drobni sedimenti velikosti gline in melja, ki v reko pritekajo zaradi površinskega spiranja zemljin in se skozi rečni sistem premeščajo v suspenziji tudi ob normalnih pretokih skoraj neovirano, to je brez posebnega odlaganja in s tem izmenjave z rečnimi sedimenti v dnu.

Poleg tega dela kalnosti, ki bi jo lahko imenovali tudi naravna kalnost (ali sprane plavine; gre za dobesedni prevod angleškega izraza wash load), v času povišanih pretokov v rekah (tj. predvsem v času poplavnih valov) h kalnosti prispevajo pomemben del tudi lebdeče plavine oziroma suspendirane snovi (angl. suspended matter; nem. Schwebstoffe). Gre za bolj grob sediment s pomembnim deležem peskov (0,06 do 2 mm), ki so v suspenziji le ob povišanih pretokih; lahko bi jih poimenovali tudi poplavna kalnost, saj se ob spremenjenih hidravličnih pogojih lahko ponovno posedejo in odložijo na dnu reke.«

Bezak (2016) je ugotovil, da padavinski dogodki velikih intenzitet nadpovprečno vplivajo na procese sproščanja, premeščanja in odlaganja erozijskega sedimenta. Zato imamo v času poplav in intenzivnih nalivov prisotno izrazito poplavno kalnost, ki je izrazitejša pri hudourniških vodotokih. Poplavno kalnost predstavljajo lebdeče plavine, torej drobni deli rinjenih plavin, ki preidejo v suspendirano stanje. V času takšnih dogodkov so lahko količine premeščenega sedimenta nekaj velikostnih razredov večje od dolgoletnega povprečja. Konica oziroma najvišja koncentracija fluvialno premeščenih suspendiranih snovi se v Sloveniji pojavi pred nastopom konice pretoka (Mikoš, 2012a; Bezak, 2016).

Premeščanje sedimentov se s časom spreminja. Razlike se pojavljajo glede na letni čas in velikost ter obliko prispevnega območja. Predvsem je odvisno od erozijskih procesov v povodju. Med naravne vire povečanih količin sedimenta štejemo npr. potrese in velike plazove, zaradi česar se pojavijo velike količine plavin in gozdni požari, ki povečajo vir iziroma zalogo kalnosti. Med antropogene vplive štejemo velike infrastrukturne projekte (npr. gradnja avtocest, železniških povezav ipd.), intenzivno kmetijstvo, krčenje gozdov, rudarstvo in neustrezno čiščenje komunalnih in industrijskih voda.

V preteklosti je bila kalnost rek v Sloveniji bistveno višja, predvsem zaradi antropogenih vplivov, kot so neustrezno čiščenje komunalnih in industrijskih odpadnih voda ter odlagališč industrijskih odpadkov oziroma jalovišč iz rudniške dejavnosti. Po sprejetju Direktive o okoljski odgovornosti (Direktiva, 2004/35/ES), ki je dvignila okoljske standarde, se je zmanjšal

antropogen vnos hranil in sedimentov v rečne sisteme. Vsled temu se je izboljšalo kakovostno stanje in zmanjšala antropogeno povzročena kalnost slovenskih rek (Mikoš, 2012a).

2.2.3 Teoretična izhodišča procesa premeščanja plavin

Glavni vzrok premeščanja plavin je delovanje premikajoče se vode. Način odtekanja vode določa skupno delovanje komponente težnostne sile, ki deluje pospešujoče na delec vode v smeri toka, in sile trenja, ki zavira to gibanje.

Po 3. Newtonovem zakonu velja, da tako kot dno deluje na vodni tok, deluje tudi ta vodni tok na dno vodotoka z nasprotno enako silo. Pri stalnem enakomernem (1D) toku z integriranjem po globini vode tako dobimo na enoto površine dna delujočo strižno napetost τ_0 :

$$\tau_0 = \rho_w \cdot g \cdot h \cdot I, \quad (2)$$

kjer ρ_w predstavlja gostoto vode, g pospešek prostega pada, h globino vode (pri hidrostaticni porazdelitvi tlaka) in I vzdolžni padec energije, ki je pri stalnem enakomernem toku enak padcu dna oziroma gladini vodotoka (Mikoš, 2007).

Strižna napetost τ_0 predstavlja povprečen odpor posameznih zrn na premik zaradi vodnega toka. Na zrna delujejo tri komponente sil: teža potopljenega zrna $G \frac{s-1}{s}$ (zmanjšana za težo izpodrinjene tekočine, (s predstavlja relativno gostoto zrna plavin glede na gostoto vode)), dinamični vzgon A (ki je posledica razlike tlakov na sprednji in zadnji strani zrna) in potisna sila vodnega toka F_s . Odpor posameznega zrna je do začetka premika zrna (to predstavlja začetek prodnega premika za posamezno zrno) večji od potisne sile toka vode F_s :

$$F_s = c_w \cdot F \cdot \rho_w \cdot \frac{v^2}{2}, \quad (3)$$

kjer je c_w oblikovni koeficient upora toku vode, F površina zrna plavin, ki je izpostavljena vodnemu toku, ρ_w gostota vode in v lokalna pretočna hitrost vode. Pri tem je potrebno poudariti, da se zaradi soodvisnosti razporeditve lokalnih pretočnih hitrosti v , ki so odvisne od strižnih napetosti na dnu struge τ_0 , mejno stanje stabilnosti zrn plavin prevladujoče izraža v odvisnosti od strižnih napetosti τ_0 (Mikoš, 2007).

S pomočjo laboratorijskih raziskav so avtorji določili začetek prodnega premika predvsem za enovita zrna. Shields (1936) je tako s pomočjo laboratorijskih raziskav določil, da lahko kritične razmere ob začetku prodnega premika definiramo s pomočjo brezdimenzionalne strižne napetosti θ .

$$\theta = \frac{\tau_0}{\rho_w \cdot g \cdot (s-1) \cdot d} = \frac{h \cdot I}{(s-1) \cdot d}, \quad (4)$$

kjer so:

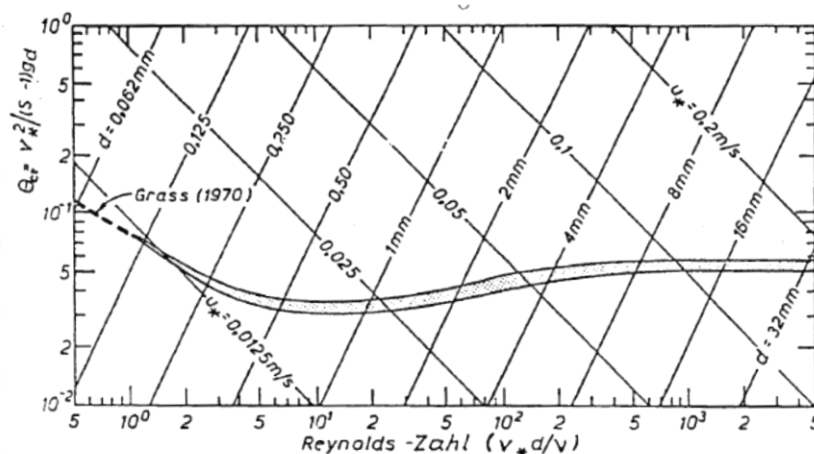
- θ ... brezdimenzionalna strižna napetost,
- τ_0 ... strižna sila ob dnu,
- h ... pretočna globina,
- g ... zemeljski pospešek,

d ... premer zrna plavin,
 ρ_w ... gostota vode,
 ρ_s ... gostota zrn plavin,
 $s = \frac{\rho_s}{\rho_w}$... relativna gostota zrna plavin glede na vodo.

Shields (1936) je prav tako izpostavil, da je začetek prodnega premika povezan z Reynolsovimi številom za zrna plavin Re^* , ki je odvisen od strižne hitrosti v_* , srednjega premera zrn plavin d in kinematične viskoznosti vode ν ;

$$Re^* = \frac{v_* d}{\nu}. \quad (5)$$

Začetek prodnega premika je tako podan v Shielsovem diagramu kot zveza med kritično strižno napetostjo θ_{cr} in Reynolsovimi številom za zrna plavin Re^* (Mikoš, 2007).



Slika 8: Shieldsov diagram za začetek prodnega premika (Mikoš, 2007)

Osnovno vprašanje pri računskem vrednotenju premestitvene zmogljivosti vodnega toka je določitev zveze med:

$$Q_{plavin} = f(Q_{vode}). \quad (6)$$

Pri tem so se v preteklosti raziskave ločile glede na vrsto obravnavanih plavin, in sicer na rinjene plavine in lebdeče plavine (Mikoš, 2007).

Za vrednotenje premestitvene zmogljivosti rinjenih plavin se je s pomočjo poskusov v laboratorijskih razmerah razvilo veliko enačb:

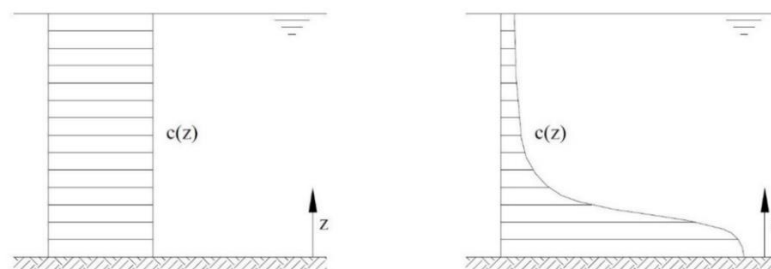
- Du Boys (1879),
- Meyer-Peter-Müller (MPM) (1948),
- Enačba VAW (1983),
- Smart-Jaeggi model (1983).

V drugi polovici 20. stoletja so avtorji razvili enačbe za oceno premestitvene zmogljivosti vodnih tokov za rinjene in lebdeče plavine:

- Einstein (1950),
- Engelund-Hansen (1967),
- Engelund-Fredsoe-Zyserman (1976),
- Ackers-White (1972),
- Yang (1973),
- Van Rijn (1984).

2.2.3.1 Transport lebdečih plavin

Ob nizkih pretokih se najprej v laminarnem režimu premeščajo samo rinjene plavine (groba zrna), to je takrat, ko je teža potopljenega delca večja od sile vzgona. Proces premeščanja suspendiranih snovi se vzpostavi ob turbulentnih pogojih, ko je sila vzgona večja kot teža potopljenega delca. Suspendirane snovi so takrat praktično enakomerno porazdeljene po celotnem vertikalnem profilu, kot prikazuje sledeča slika.



Slika 9: Vertikalna porazdelitev koncentracije lebdečih plavin - levo za drobne in desno za grobe suspendirane sedimente (konceptualni prikaz) (Mikoš, 2012a)

Za prehod plavin iz rinjenega v lebdeče stanje se pogosto uporablja Kresserjeva enačba:

$$\frac{v_m^2}{g \cdot d} = 360. \quad (7)$$

Enačba služi za hitro oceno deleža lebdečih plavin v_m pri obravnavi transportne sposobnosti vodotoka. Izhaja iz srednje pretočne hitrosti, zemeljskega pospeška g in premera zrn d . Za vrednotenje vertikalne porazdelitve lebdečih plavin, ki jo potrebujemo pri analizi določanja premestitvene sposobnosti iz meritev odvzetih vzorcev na vodotoku, pa uporabimo izpeljano razmerje iz difuzijske enačbe (Mikoš, 2012a):

$$\frac{c}{c_a} = \left(\frac{h-z}{z} \cdot \frac{a}{h-z} \right)^{\frac{w_s}{v_* \cdot \kappa}}, \quad (8)$$

kjer so:

- c ... koncentracija lebdečih plavin,
- c_a ... koncentracija lebdečih plavin »blizu dna«,
- z ... relativna višina nad dnom ($z=y/h$),
- h ... pretočna globina,
- w_s ... hitrost usedanja,
- v_* ... strižna hitrost,
- κ ... von Karmanova konstanta.

Enačbo uporabimo tako, da koncentracijo lebdečih plavin c množimo s hitrostjo v vodotoku v ter tako dobimo oceno pretoka lebdečih plavin Q_s . Eksponent v enačbi predstavlja brezdimenzijski Roussov parameter (1937), ki določa razvrstitev načina premeščanja rečnih sedimentov iz Preglednice 3.

$$P = \frac{w_s}{v_* \cdot \kappa} \quad (9)$$

Preglednica 3: Roussov parameter za razvrščanje načina premeščanja rečnih sedimentov (Mikoš, 2012a)

Roussov parameter P [-]	Način premeščanja plavin
$P > 7,5$	Delec miruje na rečnem dnu
$P = 7,5$	Delec se začne premikati po dnu kot rinjena plavina
$2,5 < P < 7,5$	Delec je rinjena plavina
$P = 2,5$	Delec počasi preskakuje in prehaja v suspendirano stanje
$P < 1,2$	Delec je lebdeča plavina

Vrednost Roussovega parametra za lebdeče plavine ustreza Bagnoldovem pogoju za prehod v suspendirano stanje (1966), ki je predstavljen kot kvocient med strižno hitrostjo in hitrostjo usedanja suspendiranih delcev (Mikoš, 2012a):

$$M = \frac{v_*}{w_s} \geq 1. \quad (10)$$

V primeru določevanja sedimentacije v akumulacijah moramo k suspendiranim snovem prišteti kalnost, ki izhaja iz zaledja vodotoka in iz zalednih površin akumulacije – torej ni posledica dotoka plavin iz dna vodotoka.

2.2.3.2 Lastnosti kohezivnega sedimenta

V procesu erodiranja, premeščanja in odlaganja sedimentov manjših frakcij imajo pomembno vlogo lastnosti sedimentov. Med pomembnejšimi lastnostmi je koherentnost (vezljivost) oziroma nekoherentnost (nevezljivost) materiala. Kohezivni sediment ima dovolj velike privlačne sile med posameznimi delci zrnja. Odloženi sedimenti so povezani s silo, ki se vzpostavi med pozitivno nabitimi in negativno nabitimi ioni sedimenta.

Meja med kohezivnimi in nekohezivnimi sedimenti ni jasno ločena, saj je odvisna od vrste sedimenta. Vpliv kohezije proti sili gravitacije se poveča z manjšanjem premera delcev zemljine. Tako ima kohezija bistveno višji vpliv na glinene delce ($d < 0,004$ mm) kakor na delce melja ($0,004$ - $0,065$ mm). Že 7 % delež glinenega in meljastega sedimenta pa povzroča, da ima sediment lastnosti kohezivnega sedimenta (De Villiers, 2006).

Zelo fini delci ($d < 0,002$ mm) lahko ostanejo v suspenziji zelo dolgo, saj med njimi deluje nasprotujoči magnetni naboj. Kohezivni sedimenti so transportirani v vodotokih kot kalnost (*angl. suspended load*). Pod vplivom teh sil in tokovnih pogojev se delci zlepijo in tvorijo aglomeracije, imenovane flokule (*angl. flocks*). Z večanjem flokul se teža poveča do te mere, da se flokula potopi na dno veliko hitreje kot vsak posamezen delec posebej (De Villiers, 2006).

Vsled temu so se razvili različni pristopi modeliranja transporta kohezivnega sedimenta:

- Mehta-Parthenaides (1973),
- Han-He (1990),
- uporaba difuzijske enačbe Zhang (1980),
- Soares (1982),
- Di Silvio (1995),
- ravnotežne enačbe transporta sedimenta s kalibracijo na osnovi meritev finih delcev,
- kombinacija enačb za transport plavin peščenih frakcij in difuzne enačbe za fine frakcije,
- uporaba adveksijsko-disperzijskega matematično-hidravličnega modela (De Villiers, 2006).

2.2.3.3 Izračun hitrosti posedanja suspendiranih delcev

Za določitev količine in hitrosti posedanja nevezanih (nekohezivnih) suspendiranih delcev v mirujočem vodnem telesu, ob upoštevanju predpostavk (koncentracija suspenzije je dovolj nizka, delci se posedajo neovirano, med delci ni interakcije), ločimo tri teoretične opise usedanja (Mikoš, 2012a):

- I. vrsta: Ločeno posedanje, kjer so delci v razredčeni suspenziji z minimalno interakcijo med delci. Teorija, ki jo bomo uporabili v matematičnem modelu, predstavljenem v nadaljevanju, izhaja iz Stokesovega zakona za posedanje finih kroglastih delcev in je bila leta 1984 modificirana (Van Rijn). Ločimo tri enačbe glede na velikost obravnavanega zrna plavin (DHI, 2016):

$$w_s = \frac{(s-1)gd^2}{18\nu} \quad \text{za } d < 0.01 \text{ mm}, \quad (11)$$

$$w_s = \frac{10\nu}{d} \left\{ \left[1 + \frac{0.01(s-1)gd^3}{\nu^2} \right]^{0.5} \right\} \quad \text{za } 0.1 < d < 1.0 \text{ mm}, \quad (12)$$

$$w_s = 1.1[(s-1)gd]^{0.5} \quad \text{za } d > 1.0 \text{ mm}, \quad (13)$$

kjer so:

- d ... premer plavinskih delcev,
- g ... gravitacijski pospešek,
- s ... relativna gostota plavinskih delcev,
- w_s ... hitrost usedanja,
- ν ... kinematična viskoznost tekočine.

- II. vrsta predstavlja posedanje kosmičev oziroma flokul v koncentrirani suspenziji z vplivom medsebojnega delovanja med delci in vplivom na hitrost posedanja.

Hitrost usedanja flokule w_f v milimetrih na sekundo (Migniot, 1989):

$$w_f = \frac{250 \cdot w_{s*}}{d_s^2} \quad \text{za } d_s < 40 \cdot 10^{-6} \text{ m}, \quad (14)$$

pri čemer predstavljata d_s premer delcev plavin v mikrometrih in w_s hitrost usedanja posameznega delca v milimetrih na sekundo (Javornik, 2015).

- III. vrsta, ki predstavlja oteženo posedanje v visoko koncentrirani suspenziji.

2.2.3.4 Modeliranje morfoloških sprememb z uporabo numeričnih modelov

Erodiranje, premeščanje in odlaganje sedimenta povzročajo časovno spreminjanje morfologije vodnih teles. Za razumevanje oziroma opis fizikalnih procesov dinamike rečnega toka in transporta sedimenta so se razvili različni modeli. Modeliranje delimo na fizično, tj. v laboratoriju s pomanjšanim fizičnim modelom, in na matematično, tj. z uporabo numeričnih metod. Reševanje problema zasipavanja akumulacij je z uporabo empiričnih in semiempiričnih enačb počasno in primerno za hitre ocene. Z razvojem računalniške opreme se je pospešil tudi razvoj matematičnih modelov, ki enačbe gibanja rešujejo z numeričnimi metodami. Kombinacija empirično določenih enačb transporta sedimenta iz laboratorijskih raziskav in numeričnih hidrodinamičnih modelov omogoča uspešno modeliranje tega kompleksnega procesa. Z numeričnimi modeli tako lahko ocenjujemo potek zasipavanja akumulacij iz podatkov, pridobljenih z meritvami pretoka, oblike dna ter koncentracije rinjenih in lebdečih plavin (Krzyk & Četina, 2003). Pri razvoju numeričnih modelov so se razvile nekatere poenostavitve. Ločimo eno dimenzijske (1D), dvodimenzijske (2D) in trodimenzijske (3D) numerične modele.

a) Enodimenzionalni modeli (1D)

Pri enodimenzionalnih oziroma enorazsežnih matematično-hidravličnih modelih (1D) je geometrija vodnega telesa predstavljena s serijo zaporednih prečnih profilov oziroma prereзов. 1D modeli računajo glavno komponento, ki je povprečena preko celotnega profila (npr. povprečna globina in hitrost). Enorazsežni numerični hidravlični model na vsakem časovnem koraku izračuna pretok in iz njega povprečno hitrost, globino in nagib gladine. Na podlagi teh podatkov se potem izvednoti enodimenzijska transportna sposobnost pretoka. Z uporabo kontinuitetne enačbe za transport plavin med posameznimi profili lahko izračunamo in napovemo potek odlaganja sedimenta (Defra, 2008). Ta vrsta modelov je primerna za območja, kjer se pretočni prerez ne spreminja v prečni smeri, zato je ta vrsta modelov primerna predvsem za modeliranje kanalov in ozkih strug vodotokov.

Primeri rezultatov 1D numeričnih modelov transporta plavin:

- sprememba kote dna v določenem prečnem prerezu ob določenem pretoku,
- količina odloženega sedimenta med dvema prečnima prerezoma po nekem času,
- volumen transportiranega sedimenta skozi prečni prerez v nekem časovnem oknu,
- granulometrijska sestava plavin in deponiranega sedimenta.

Primeri uporabe 1D numeričnih modelov transporta plavin:

- spremembe dna dolvodno od pregrade,
- spremembe dna zaradi spremembe rečne mreže (npr. izgradnja odvodnega kanala),
- spremembe dna zaradi izgradnje protipoplavnih nasipov,
- sedimentacija v podolgovatih (rečnih) akumulacijah (Defra, 2008).

b) Dvodimenzionalni modeli (2D)

Dvodimenzionalni matematični model so z večanjem zmogljivosti računalniških kapacitet in širokega nabora programske opreme vedno bolj pogosto uporabljeni. Glede na povprečenje jih delimo na 2D modele, ki so vertikalno povprečeni, in 2D modele, ki so horizontalno povprečeni. Večina 2D modelov transporta plavin je vertikalno povprečenih. Pri tem tipu modela je globinsko povprečena hitrost ali kateri drugi hidravlični parameter, ki opisuje hidravlične spremembe v območju vodnega telesa (USBR, 2006).

Primeri uporabe 2D numeričnih modelov transporta plavin:

- premeščanje sedimenta na območju akumulacij,
- premeščanje sedimenta na območju plitvin, rečnih delt (Defra, 2008)

Za analizo krajših odsekov izpustov tekočine, kjer je tekočina zaradi turbulence po vertikalnem profilu enakomerno premešana, in za analizo plitvih akumulacij, kjer so prevladujoče razmere v vodoravni ravnini, je priporočeno uporabiti dvodimenzijski matematično-hidravlični model (Krzyk & Četina, 2003).

c) Tridimenzionalni modeli (3D)

Tridimenzionalni numerični modeli transporta plavin so primerni za omejena področja, kjer imamo nestacionarne pogoje in kompleksno geometrijo. Pri teh modelih je pomembna tudi tretja prostorska dimenzija – vertikala. Takšni primeri so npr. načrtovanje in optimizacija hidrotehničnih objektov (odtok čez prelive, manipulacija talnih izpustov ipd.), morfološke spremembe na območju plitvin z vegetacijo, pri okoljskih simulacijah, kjer nas zanima razporeditev in resuspenzija plavin v vertikalnem profilu. Zaradi kompleksnosti modela so potrebni zelo dolgi računski časi in zelo natančno poznavanje razmer. Razmere spoznavamo oziroma verificiramo z natančnimi meritvami, ki pa jih je na obstoječih objektih zelo težko pridobiti. Vsled temu se 3D modeli pogosto uporabljajo v obliki hibridnih modelov, kjer se modeliranje izvaja vzporedno z matematičnim in fizičnim modelom (Rak, 2013).

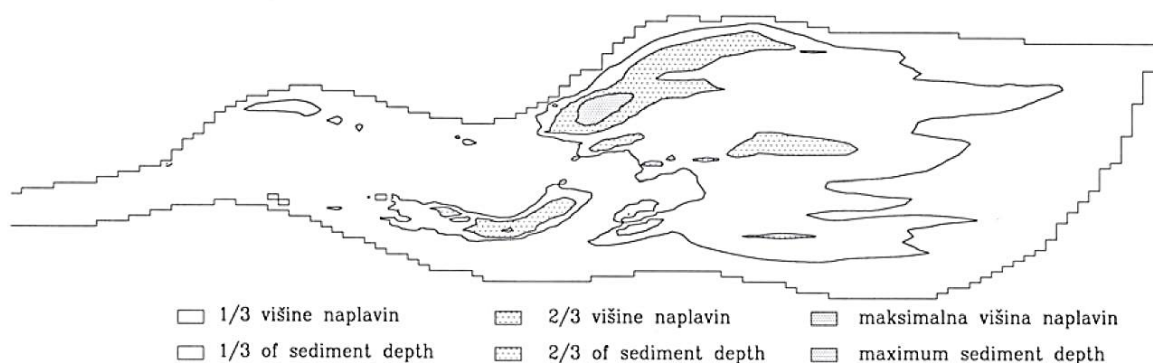
2.2.3.5 Primeri uporabe 2D matematično-hidravličnih modelov pri ravnanju s sedimentom na večnamenskih akumulacijah v Sloveniji

Iz pregleda strokovnih študij na področju matematičnega modeliranja morfoloških sprememb na akumulacijah smo povzeli nekatere primere uporabe podobnih matematičnih modelov v Sloveniji. Poudariti moramo, da večina študij obravnava plitvejša akumulacijska jezera hidroelektrarn. Takšen vzorec modeliranih objektov je razviden tudi v tuji literaturi, saj je na teh objektih zaradi izgube obratovalnega volumna gospodarska škoda največja.

a) Ptujsko jezero na reki Dravi

Eden prvih dvorazsežnih matematičnih modelov za modeliranje transporta plavin v Sloveniji je bil model PCFLOW2D, razvit v sredini devetdesetih let prejšnjega stoletja na Hidrotehnični smeri Fakultete za gradbeništvo in geodezijo v Ljubljani. Hidrodinamični dvodimenzijski globinsko povprečeni k-e matematični model je bil razvit v sklopu projekta sanacije in revitalizacije Ptujskega jezera, ki je akumulacija za HE Formin na reki Dravi, tako, da je bil dopolnjen z modulom, ki za simulacijo lebdečih plavin uporablja konvekcijsko-difuzijsko enačbo. Zaradi usedanja lebdečih plavin je v jezeru prihajalo do težav s kvaliteto vode, zato se je v projektu uporabil matematični model za prepoznavanje poteka usedanja plavin in načrtovanje ukrepov ob sanaciji.

Za pridobivanje vhodnih parametrov matematičnega modela usedanja lebdečih plavin so se izvedle obsežne hidrodinamične meritve ter meritve lebdečih plavin. Z uporabo pravokotne mreže računskih celic so bili z numerično simulacijo lebdečih plavin enotnega zrna pridobljeni rezultati območij odlaganja le-teh v kvantitativni obliki. Model se je še v naslednjih letih dodatno izpopolnjeval in dopolnjeval (Krzyk & Četina, 2003).



Slika 10: Rezultati simulacije usedanja naplavin v obdobju 1981–1991 (Krzyk & Četina, 2003)

b) Akumulacijski bazen HE Brežice pri Nuklearni elektrarni Krško

V sklopu priprave državnega prostorskega načrta za hidroelektrarno Brežice na reki Savi se je izdelal dvorazsežni model transporta plavin na območju novega akumulacijskega bazena. Naloga izdelovalcev je bila preveriti vpliv odlaganja sedimenta zaradi izgradnje novega akumulacijskega bazena z dvignjeno gladino na obstoječi odvzemni objekt pri Nuklearni elektrarni Krško in preučiti proces premeščanja ter odlaganja plavin znotraj predvidenega akumulacijskega bazena.

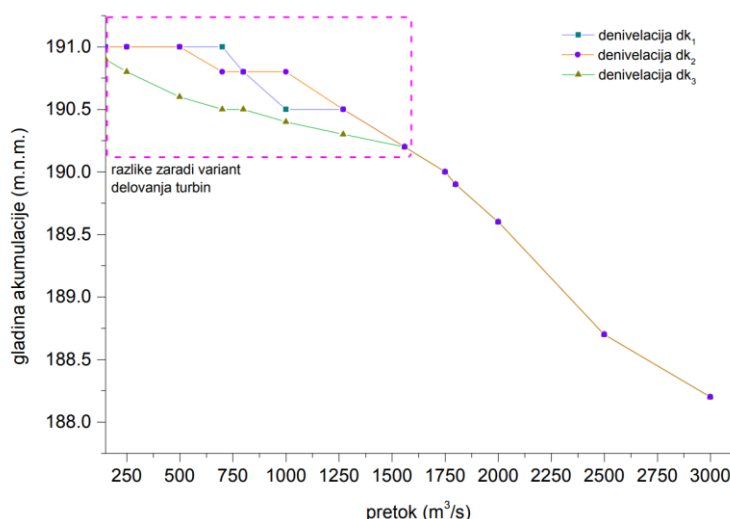
Za modeliranje sedimentacije in erodiranja plavin se je uporabil model CCHE2D, razvit pri Nacionalnem centru za računalništvo voda in inženirstvo na Univerzi Mississippi, ZDA. V modelu je bil uporabljen model transporta plavin, z uporabo enačbe premestitvene zmogljivosti po Wu&Wang&Jia (2000), ki je v primerjalnih simulacijah podal najbolj verodostojne rezultate. Računski model uporablja krivočrtno mrežo in ima 23x272 računskih celic. Računski model je tako obsegal 6256 elementov oziroma računskih celic s povprečno površino 670 m² na element.

Na podlagi simulacije se je ugotovilo, da bi bile za natančnejši izračun potrebne dodatne raziskave vhodnih podatkov. Z uporabo modela transporta plavin so avtorji prišli do sklepa, da v akumulaciji ne bo prišlo do deponiranja večjih količin plavin. Ocenili so tudi, da ne bo prišlo do zmanjšanja intenzitete usedanja v akumulaciji HE Brežice prej kot v 40–50 letih (Hojnik, 2010).

c) HE Vrhovo na reki Sava

Hidroelektrarna Vrhovo na reki Savi je bila zgrajena leta 1993 kot prva velika pregrada v samostojni državi in hkrati kot prva v spodnjesavski verigi. V magistrskem delu (Javornik, 2015) avtor s pomočjo dvorazsežnostnega matematičnega modela CCHE2D analizira vpliv spremembe poslovnika obratovanja na ustreznejše obratovanje hidroenergetskega objekta z

Za območje računskega modela akumulacijskega jezera je bila izdelana krivočrtna računska mreža z 14.773 računskimi celicami (17x869 celic). Osnova za izdelavo simulacije je bil visokovodni dogodek med 17. in 26. septembrom 2010, kjer so pretoki dosegli 100-letne povratne dobe. V letu 2010 so bile izvedene meritve batimetrije, in sicer v februarju in v oktobru. Iz bilančne analize dna je bilo ugotovljeno, da se je v vmesnem času preneslo 297.200 m² naplavin, in sicer predvsem v času visokovodnega dogodka v septembru 2010. Vhodni podatki za morfološki model so bili pridobljeni z vodomerne postaje Hrastnik na reki Savi in VP Veliko Širje na reki Savinji. Na območju akumulacije je bilo z izvedbo vrtin odvzetih več vzorcev sedimenta, iz katerega so se določile presejalne krivulje sedimenta na dnu akumulacije, ki so služile kot vhodni parameter morfološkega modela. Morfološki model uporablja enačbo za določanje premestitvene zmogljivosti po Wu, Wang in Jia-u (2000).



V sklopu morfološkega modela premestitvene zmogljivosti sta bila izvedena dva scenarija, ki sta se med seboj razlikovala po deležih posameznih frakcij sedimenta. Pri prvem scenariju so prevladovali grobi in fini melji, pri drugem pa fini peski, ki so izkazali boljše ujemanje z geodetskimi izmerami.

Kot končni rezultat naloge so bile predlagane tri denivelacijske krivulje, ki so upoštevale morfološke vplive na akumulaciji. Nove denivelacijske krivulje predvidevajo 20–30 % znižanje mejnih pretokov, pri katerih se začne denivelirati akumulacijski bazen. S posodobitvijo poslovnika obratovanja na podlagi dvodimenzionalnega modela se je izboljšalo dolgoročno delovanje hidroenergetskega objekta, kar hkrati zagotavlja tudi izboljšanje zagotavljanja poplavne varnosti (Javornik, 2015).

Zasipavanje akumulacij povzroča veliko posredne in neposredne škode. Med glavnimi negativnimi posledicami je zmanjšanje zadrževalnega prostora, dvig gladin gorvodno od akumulacije, zadržanje sedimenta z manj vezanimi onesnažili in poškodbe hidromehanske opreme. Med posrednimi vplivi, ki so jim še posebno izpostavljene plitve akumulacije, je potrebno predvsem izpostaviti (De Villiers (2006) po Basson in Rooseboom (1997)) naslednje:

a) Okoljske vplive:

- vpliv na življenjski prostor rib, ptic in živalskih habitatov zaradi degradacije prvotnega vodnega okolja gorvodno in dolvodno od akumulacije,
- zmanjšan dotok hranil dolvodno od akumulacije,
- kopičenje nevarnih in strupenih snovi v akumulaciji in povečanje koncentracij v primeru izpiranja le-teh (primer pregrada Moste),
- povečanje vsebnosti fosfornih in dušikovih spojin v sedimentu,
- prekinjeni pretok sedimenta v rečnem sistemu – pojav erozije dolvodno od akumulacije,
- hitrejše segrevanje in ohlajanje vode zaradi zmanjšane toplotne kapacitete akumulacije.

b) Ekonomske vplive:

- povečanje vzdrževalnih stroškov hidroelektrarn in namakalnih sistemov,
- vodne izgube zaradi zmanjšane kapacitete zadržane vode,
- stroški odstranjevanja in odlaganja sedimenta,
- vpliv na cestno infrastrukturo, mostne konstrukcije, vpliv na sisteme vodooskrbe in vpliv na odvodnjo iz komunalnih čistilnih naprav,
- vpliv na intenzivno kmetijstvo (gnojilni programi upoštevajo ranljivost ojezeritve na eutrofikacijo),
- višji stroški pridobivanja električne energije,
- stroški rekonstrukcije pregradnih objektov.

c) Sociološke vplive:

- poslabšanje kvalitete življenjskega prostora ob akumulaciji,
- povečanje poplavne ogroženosti gorvodno in dolvodno od akumulacije,
- vpliv na vodne pravice in dovoljenja.

2.2.5 Merjenje sedimentacije na akumulacijah

Za matematično modeliranje transporta plavin je potrebno poleg hidrodinamičnih parametrov določiti tudi lastnosti transportiranega sedimenta. Lastnosti lahko povzamemo iz literature, pri tem pa je vprašljiva natančnost in primernost parametrov za naš primer. V več državah je zato uveljavljena praksa stalnega monitoringa določenih parametrov, predvsem na večjih vodotokih oziroma akumulacijah. V Sloveniji se je v preteklosti izvajal skrbni monitoring prodonosnosti in merjenje suspendiranih snovi, vendar se je zaradi pomanjkanja finančnih sredstev na številnih lokacijah ukinil. Za kvalitetno modeliranje je smiselno opraviti za vsak posamezen primer potrebne terenske meritve in laboratorijske analize za identifikacijo vhodnih parametrov sedimenta (Krzyk, 1996). Posvetili se bomo predvsem metodam terenskih meritev suspendiranega materiala oziroma lebdečih plavin, ki predstavljajo večinski delež zapolnjevanja s sedimentom na obravnavani akumulaciji. Po procesu sedimentacije in odlaganja le-ti tvorijo kohezivni sediment oziroma kohezivne naplavine na dnu.

S kvalitetnim dolgoročnim monitoringom sedimentacijskih procesov lahko določimo:

- izgubo volumna akumulacije zaradi odlaganja sedimentov,
- pričakovano letno zadrževanje sedimenta,
- lokacijo odlaganja sedimenta znotraj akumulacije v odvisnosti od časa,
- stopnjo zbitosti sedimenta (*angl. sediment densities*),

- porazdelitev sedimenta po dolžini in širini akumulacije,
- prestrezno sposobnost akumulacije (*angl. trap efficiency*).

V svetu sta se uveljavili dve metodi monitoringa stopnje sedimentacije. Prva je monitoring in vzorčenje na vtočnem in iztočnem delu vodotoka oziroma iz akumulacije. Druga metoda so ciklične meritve spreminjanja dna oziroma batimetrije v akumulaciji (De Villiers, 2006).

2.2.5.1 Meritve kalnosti

Kalnost v vodotoku ocenjujemo s terenskimi meritvami koncentracije in zrnivosti suspendiranih sedimentov v vodi. Metode delimo na posredne in neposredne. Pri neposrednih metodah suspendirani sediment vzorčimo tako, da ga fizično zajamemo v rečni vodi (npr. s stekleničenjem, črpalnim vzorčenjem). Pri posrednih metodah sedimenta ne vzorčimo, ampak njegove lastnosti (koncentracijo in zrnivost) ocenjujemo posredno z merilniki. Merilniki delujejo s pomočjo oddajanja in sprejemanja mehanskega zvoka (zvočni in ultrazvočni) ali pa z elektromagnetnim valovanjem (infrardeča, vidna, laserska svetloba in rentgenski žarki ter žarki gama). Za kvalitetno analizo kalnosti je najbolj primerna kombinacija metod, ki izkoristi prednosti posamezne metode in izniči slabosti ostalih (Mikoš, 2012a). V nadaljevanju so prikazani podrobnejši opisi posameznih metod.

Preglednica 4: Terenske merilne metode za suspendirane plavine (Mikoš, 2012b) prirejeno po (Wren, 2000))

Metoda	Princip delovanja	Prednosti	Pomanjkljivosti
Stekleničenje	Merilno stekleno posodo potopimo v vodo (ročni odvzem) ali se med poplavnim valom napolni sama (samodejni odvzem) oziroma merilno plastično/teflonsko vrečko v hidrodinamično oblikovanem vzorčevalniku spustimo v vodni tok (izokinetični odvzem), analiza sledi ločeno.	Merilno stekleno posodo potopimo v vodo (ročni odvzem) ali se med poplavnim valom napolni sama (samodejni odvzem) oziroma merilno plastično/teflonsko vrečko v hidrodinamično oblikovanem vzorčevalniku spustimo v vodni tok (izokinetični odvzem), analiza sledi ločeno.	Slaba časovna ločljivost, invazivna metoda, brez laboratorijskega dela ni rezultatov, zahteva izurjeno terensko osebje, zajem vzorca ni nujno izokinetičen.
Črpalno vzorčenje	Vzorec vode in vzorec sedimenta črpamo iz toka in kasneje analiziramo, uporabljamo različne sesalne črpalke (peristaltične, membranske).	Preverjena metoda, omogoča določitev zrnivosti in koncentracije, omogoča samodejno vzorčenje.	Slaba časovna ločljivost, invazivna metoda, brez laboratorijskega dela ni rezultatov, pogosto zajem vzorca ni izokinetičen, omejena praktična sesalna višina.
Akustična	Odboj zvoka od sedimenta se uporabi za določanje zrnivosti in koncentracije.	Neinvazivna metoda, dobra prostorska in časovna ločljivost, tudi za večje globine.	Slabo prevajanje odbitega zvočnega signala, slabljenje signala ob visokih koncentracijah delcev.
Optična	Merimo odbojno sipanje pod različnimi koti ali prevajanje vidne ali infrardeče svetlobe skozi vzorec vode in sedimenta.	Preprosta metoda, dobra časovna ločljivost, omogoča uporabo in zajemanje podatkov na daljavo, relativno poceni.	Močno odvisna od zrnavostne sestave, invazivna metoda, samo točkovne meritve, pogosto onesnaženje instrumenta.
Odbojnost koncentriranega žarka	Merimo čas odboja laserskega žarka od površine delcev sedimenta.	Ni odvisna od zrnavostne sestave, pokriva širok interval zrnivosti in koncentracij.	Draga in invazivna metoda, samo točkovne meritve.
Laserska difrakcija	Merimo odbojni kot laserskega žarka od površine delcev sedimenta.	Ni odvisna od zrnavostne sestave.	Nezanesljiva in draga, invazivna metoda, samo točkovne meritve, omejen interval zrnivosti.
Jedrsko	Merimo odbojno sipanje ali prevajanje žarkov gama ali rentgenskih žarkov skozi vzorec vode in sedimenta.	Nizkoenergijska metoda, pokriva širok interval zrnivosti in koncentracij.	Nizka občutljivost, razpadanje jedrskega vira sevanja, okoljski predpisi, invazivna metoda, samo točkovne meritve.
Daljinski spektralni odboj	Daljinsko zaznavanje odboja in sipanja svetlobe od vodnih teles.	Uporabna za večja območja.	Slaba ločljivost, slaba uporabnost v rečnem okolju, odvisnost od zrnavostne sestave.

2.2.5.2 Meritve batimetrije akumulacije

Batimetrija je ime za topografijo podvodnega dela vodnega telesa. Za določitev batimetrije uporabljamo različne metode, s pomočjo katerih določimo globino in položaj točk dna vodnega telesa. Za merjenje globine, ki predstavlja vertikalno razdaljo med trenutnim nivojem vode in dnom, izvajamo meritve z direktnimi in indirektnimi metodami.

Direktne metode določajo globino neposredno z ročnim ali mehanskim globinomerom. Ročni globinomer je naprava sestavljena iz uteži, ki je pritrjena na žico ali vrv, in se spušča iz plovila do dna vodnega telesa. Primerna je za globine do 20 m. Pri mehanskem globinomeru, ki je primeren za večje globine, je žica navita na boben, merimo pa tudi temperaturo zaradi vpliva na raztezek žice. Tretja direktna metoda je s hidrografske ali sondno motiko, tj. lesena ali aluminijasta letev z označenimi globinami, primerna je za globine do 5 m. Direktne metode se uporabljajo predvsem v plitvih vodah, kjer je dostop za indirektne metode onemogočen (Krajnc, 2006).

Indirektne metode za določanje globine merijo globino s pomočjo količin, ki so v funkcijski povezavi z globino. Te količine so tlak v vodi, čas, ki ga porabi telo med spuščanjem do dna, ali pa čas potovanja odboja ultrazvoka od dna do oddajnika (Kolenc, 2005).

Bočni sonar (*angl. sidescan sonar (SSS)*) pridobiva slike dna vodnega telesa v realnem času. Glavni namen te tehnologije je pridobiti vizualno sliko oziroma morfologijo in strukturo dna.

Tretji princip za zaznavanje položaja dna, predvsem plitvih vodnih teles (do globine 60 m), je uporaba ALB (*angl. airborne lidar bathymetry*). Tehnologija temelji na LiDAR (*angl. Light detection and ranging*) tehnologiji, ki deluje po principu oddajanja in sprejemanju odboja dveh svetlobnih, laserskih impulzov: infrardečem (IR) in modro-zelenem. Medtem ko se IR impulzi odbijejo od gladine vode, modro-zeleni impulzi potujejo do dna vodnega telesa, kjer se odbijejo do sprejemnika. Globina se določi na podlagi časa potovanja impulza od oddajnika do sprejemnika, ki je pritrjen na zračnem plovilu (npr. letalu, helikopterju, brezpilotnem letalniku), opremljenim z GPS sistemom določitve lokacije v prostoru (Krajnc, 2006).

Dandanes se najbolj uporabljajo ultrazvočni globinomeri, ki delujejo na podlagi širjenja zvoka. Zvočni impulz potuje od oddajnika skozi vodo, se odbije od dna in potuje nazaj do sprejemnika, ki ga imenujemo hidrofon. Poznamo več sistemov za merjenje globine s to tehnologijo:

- sistem z eno sondo (*angl. singlebeam*),
- sistem z več sondami (*angl. sweep system*),
- sistem *Multibeam*, ki se deli na dva principa:
 - uporaba fizično ali elektronsko usmerjenega snopa pod velikim številom kotov,
 - uporaba interferometrije (*angl. swath*), ki oddaja ultrazvočno valovanje razpršeno (Kolenc, 2005).

Pomembno je poznavanje tehnologije in vpliva sestave dna na meritev batimetrije. Za primerjavo več zaporednih meritev dna moramo poznati »točko odboja« oziroma ustavitve globinomera glede na vrsto sedimenta na dnu. Posebej je potrebno umerjati metodo meritev pri zelo finih sedimentih, kjer se pri dnu lahko pojavljajo območja dvofaznega toka ter gostotnih tokov.

Za območja plitvejših vodotokov uporabljamo metodo meritev prečnih profilov z direktnimi metodami, pri meritvah večjih rek, jezer in akumulacij pa uporabljamo indirektne metode. Pri

meritvah v območju plitvin, ki so lahko porasli z vegetacijo, se zaradi slabe dostopnosti uporabljajo indirektna metoda ALB - LIDAR. Pomembno je, da meritve potekajo tudi v območju dosega visokih voda, tj. nad gladino vode pri normalni zajezi, saj je lahko tudi do 20 % odloženega sedimenta nad obratovalno gladino akumulacije (De Villiers, 2006). Nad gladino se uporabljajo metode klasične geodetske izmere, v zadnjem času pa tudi tehnologija LIDAR.

2.2.5.3 Vzorčenje sedimenta oziroma usedlin

Prav tako je potrebno opraviti meritve telesa sedimenta na dnu obravnavanega območja, v našem primeru akumulacije. S tem lahko pridobimo natančne podatke o posameznih slojih sedimenta, ki so ga odložili posamezni hidrološki dogodki v preteklosti.

S terenskim vzorčenjem dna pridobimo podatke o debelini sedimentnega oziroma odloženega materiala. Z uporabo laboratorijskih analiz pridobimo karakteristike sedimenta, kot so zrnastostna krivulja, fizikalne karakteristike, stopnja zbitosti oziroma poroznost po globini. Ti podatki nam služijo kot osnova za umerjanja matematičnega modela in njegovo verifikacijo. Pri upoštevanju procesov erozije je potrebno opraviti ustrezne laboratorijske in »in-situ« raziskave za koherentne lastnosti sedimenta (Krzyk, 1996).

Pri zajemanju vzorcev usedlin suspendiranih plavin iz dna akumulacij lahko uporabimo dve vrsti opreme:

a) Oprema za zajemanje neporušenih vzorcev usedlin

Vzorčevalniki so v obliki prozorne cevi ali valja in pritrjeni na drog. Prvo potisnemo vzorčevalnik v material dna, nato se zgornji in spodnji del cevi neprodušno zapre in v notranjosti cevi dobimo intakten vzorec sedimenta in vode. Klasični vzorčevalnik je dolžine 0,5 m, obstajajo pa tudi nastavki za skupne dolžine do 6 m (Krzyk, 1996).

b) Oprema za zajemanje porušanih vzorcev usedlin

Drugi tip vzorčevalnika, ki je primeren za omejeno serijo laboratorijskih analiz sedimenta, je vzorčevalni grabež (*angl. Van Veen grab sampler*). Grabež, ki je odprt pod 90° kotom, se spusti iz plovila po vrvi do prej izmerjene globine dna akumulacije. Ob vleku proti površini se grabež zapre in zajame cca 0,1 m³ zgornjega sloja usedlin. Slabost te metode je, da se vzorec zemljine poruši, del pa se lahko tudi izpere ob dvigu skozi vodni stolpec. Grabež je tudi primeren za odvzem rinjenih plavin in odstranitve rečne posteljice (Defra, 2008). Dandanes obstaja več različnih bolj dodelanih tipov vzorčevalnih grabežev (npr. Ekmanov, Ponar, Young), saj se leti uporabljajo tudi za vzorčevanje usedlin in dna morja.

2.2.5.4 Vzroki napačno ocenjenih sedimentacijskih potencialov akumulacije

Napake načrtovalcev so pogosto posledica pomanjkanja podatkov in pomanjkanja pozornosti na to problematiko v času načrtovanja. De Villiers (De Villiers, 2006) povzema glavne vzroke za napačno ocenjene vplive sedimentacije na delovanje in življenjsko dobo akumulacije:

- nemerjeni ali prekratki intervali meritev premeščanja plavin in kalnosti,
- omejene informacije o geoloških in pedoloških lastnostih porečja z vidika erozije tal,
- spremembe v rabi tal in gospodarskih dejavnostih (npr. rudarstvo),
- spremembe v rabi in vzdrževanju akumulacije.

2.2.6 Analiza morfoloških sprememb in prostornine akumulacije

Za določanje morfoloških sprememb oziroma za identifikacijo sprememb dna zaradi odlaganja, erozije ali antropogenih vplivov na vodotokih in akumulacijah uporabljamo sintezo hidravličnih, topografskih, geomorfoloških in drugih raziskovalnih metod (Engi, 2016). Cilj teh raziskav je ugotovitev razvoja, tendence, obsega, smeri in ostalih morfoloških sprememb, predvsem v odvisnosti glavnih vplivnih parametrov, ki povzročajo tovrstne spremembe.

Za analizo morfoloških sprememb na akumulaciji uporabljamo podobne pristope kot za določitev zamuljevanja inundacijskega prostora (Engi, 2016):

- **Terenske meritve**

Za določanje debeline odloženega oziroma erodiranega materiala se uporabljajo različne metode merjenja dna in brežin akumulacije. Za meritve brežin in nadvodnega dela naplavin se uporabljajo metode klasične geodetske izmere z meritvami na stalnih prečnih profilih in/ali tehnologija LIDAR, s katero se lahko zajame celotno obravnavano območje. Pri meritvah dna pa uporabljamo metode, ki smo jih podrobneje predstavili v točki 2.2.5.2. Iz rezultatov cikličnih meritev in analize podatkov lahko spremljamo in napovedujemo nadaljnji razvoj morfoloških sprememb.

- **Geoinformacijske (prostorske) analize**

Pri uporabi prostorskih analiz se primerjajo izmerjeni in digitalizirani podatki terenskih meritev. Z uporabo prostorsko informacijske programske opreme se primerjajo višinski podatki digitalnih modelov reliefa obravnavanega območja v različnih časovnih obdobjih.

Meritve topografije obdelamo s pomočjo GIS programske opreme in pretvorimo v ploskovne rastrske sloje z ustrezno resolucijo celic – digitalne modele višin (DMV). Resolucijo oziroma velikost posameznih celic določimo na podlagi natančnosti vhodnih podatkov. Vsaka celica nam torej po barvni skali prikazuje podatek o povprečni nadmorski višini batimetrije dna akumulacije na območju posamezne celice. GIS programsko okolje nam omogoča nadaljnjo obdelavo in analizo karakteristik obravnavanega območja ter spremljanje in identifikacijo sprememb volumnov akumulacijskega bazena. Za spremljanje sprememb na večjih območjih uporabljamo podatke daljinskega zaznavanja (*angl. remote sensing*), kjer uporabljamo in primerjamo podatke letalskih ali satelitskih posnetkov.

- **Modeliranje**

Procesi zamuljevanja in transporta sedimenta so redko simulirani v fizičnih modelih z gibljivim dnom, pa še tedaj, kjer so analizirane hidravlične razmere pogosto le kvalitativno obravnavani. Fizični modeli so namreč osredotočeni na raziskovalna področja vezana predvsem na področja, ki jih z matematično-hidravličnimi modeli težko določimo. Matematično-hidravlični modeli, ki vključujejo transportne module, omogočajo zelo dobro in hitro oceno razmer z enodimenzijskim strujanjem. V svetu je zelo uveljavljen HEC-RAS Transport calculations, ki omogoča računanje transportne sposobnosti vodotoka z več enačbami različnih avtorjev. Z razvojem računskih kapacitet so se razvili tudi široko uporabljeni dvodimenzijski matematično-hidravlični programski paketi, ki omogočajo vrednotenje ne samo transportne sposobnosti ampak tudi dolgoletnih morfoloških sprememb dna akumulacij, inundacij in razvejanih strug. Med te programske pakete spada tudi paket MIKE 21C, ki ga bomo uporabljali v našem primeru ter številni drugi (CCHE2D, HEC RAS 2D, Delft3D ...).

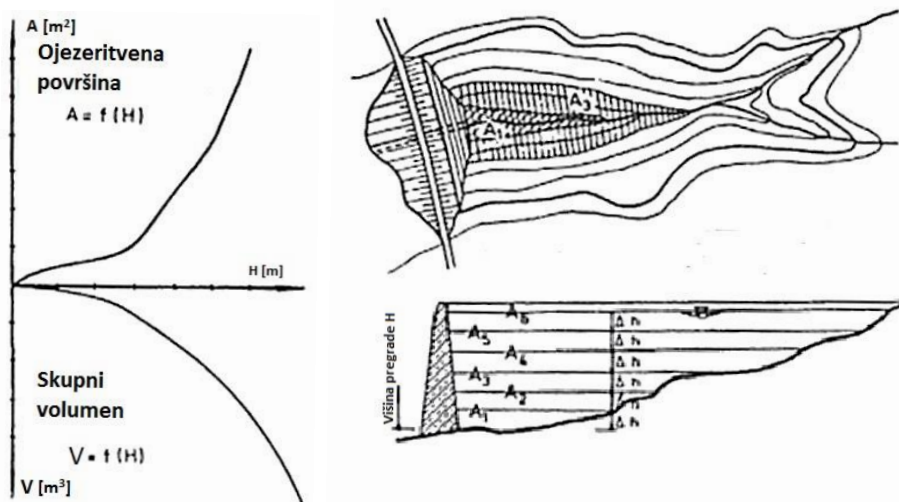
- **Metode določanja starosti slojev vzorca in hitrosti zamuljevanja**

Starost sedimenta določamo z radiometrijsko metodo, kjer identificiramo v sedimentu prisotne indikatorske materiale – markerje. Starost določimo na podlagi znane starosti indikatorskega materiala, kot so npr. rudarska dejavnost gorvodno (Cu, Pb, Cr) ali izotop kemijskega elementa Cezija ^{137}Cs , ki prihaja v sediment iz atmosfere iz obdobja jedrskih poskusov in jedrske nesreče v Černobilu. Iz znane starosti oziroma obdobja odlaganja markerja v prispevnem območju lahko določimo starost in časovni potek predvsem odlaganja sedimenta.

Za natančnejšo določitev in potrditev radiometrijske metode le-to dopolnimo z neodvisnimi metodami, kot je npr. dendrokronologija (določanje starosti sedimenta na podlagi starosti dreves in globine koreninskega sistema na obravnavanem območju) (Engi, 2016).

2.2.6.1 Določitev zveze med volumnom in površino ojezeritve v odvisnosti od kote polnitve

Osnovna karakteristika in rezultat meritev območja akumulacijskega bazena sta krivulji površina – kota gladine (A-H) in volumen – kota gladine (V-H). S pomočjo teh krivulj lahko natančno določimo zvezo med zadrževalnim volumnom in koto gladine, ki je potrebna za optimalno delovanje zadrževalnikov oziroma hidromehanske opreme na pregradah.



Slika 12: Grafični prikaz določitve karakterističnih krivulj volumna in površine akumulacije v odvisnosti od kote polnitve

Za izdelavo odvisnosti med nadmorsko višino gladine in volumnom akumulacije smo uporabili metodo srednjih površin, kjer s pomočjo GIS programskega okolja določimo površino akumulacije A na posameznem višinskem intervalu Δh znotraj ojezeritve. V naslednjem koraku seštejemo posamezne povprečne površine z višinskim intervalom Δh . Manjši, kot je višinski interval Δh , bolj je izračun natančen.

$$A = \sum_{i=1}^n \left(\frac{A_1}{3} + \frac{A_1 + A_2}{2} + \dots + \frac{A_{n-1} + A_n}{2} \right) \quad (15)$$

Na podlagi povprečnih površin ojezeritve A_i določimo delni volumen ΔV_i posameznega višinskega intervala Δh_i

$$\Delta V_i = \Delta h_i \cdot A_i \quad (16)$$

ter skupnega volumna akumulacije V v odvisnosti od kote polnitve:

$$V = \sum_{i=1}^n \Delta V_i = \sum_{i=1}^n \Delta h_i \cdot A_i. \quad (17)$$

Rezultat določitve krivulj odvisnosti volumna in površine ojezeritve akumulacije je tabela z višinskim intervalom Δh in s pripadajočimi kumulativnimi vrednostmi volumna za koto polnitve in površino ojezeritve. Z nadaljnjimi postopki delnih vsot lahko dokaj enostavno izvednotimo delne volumne med poljubnimi višinskimi kotami gladine in tudi pripadajočo površino ojezeritve.

S podatki večjega števila meritev dna lahko primerjamo posamezne krivulje ($V-H$ in $A-H$) ter prepoznamo območja sprememb morfologije. Z izračunom razlike med posameznimi intervalnimi volumni na enakih višinskih intervalih lahko prepoznamo bilančne razlike dna, ki predstavljajo območja odlaganja oziroma odnašanja.

2.2.6.2 Bilančna analiza morfoloških sprememb v akumulaciji

Z nadaljnjo obdelavo in s primerjavo digitalnega modela višin akumulacije v različnih časovnih obdobjih lahko identificiramo območja časovnih sprememb morfologije dna. Rezultat bilančne analize (*angl. cut-fill analysis*) je grafični prikaz območja erodiranja in območja odlaganja v dveh različnih barvnih odtenkih, ki ga izdelamo s pomočjo GIS programskih orodij.

$$DMV_{cut-fill} = DMV_{t2} - DMV_{t1} \quad \text{za } t2 > t1, \quad (18)$$

kjer so DMV_{t1} digitalni model višin akumulaciji v času $t1$, DMV_{t2} digitalni model višin akumulaciji v času $t2$ in $DMV_{cut-fill}$ bilančna razlika dna v pozitivni (območja deponiranja sedimenta) oziroma v negativni vrednosti (območja erodiranja sedimenta) v akumulaciji.

Z uporabo preproste metode na ta način določimo območja deponiranja, erodiranja, morebitnih izkopavanj in ostalih posegov na dnu akumulacije. V primeru, da imamo DMV zelo dobre ločljivosti in višinske natančnosti, lahko rezultate bilančne analize z GIS orodji preoblikujemo v barvno lestvico, kjer prepoznamo stopnjo spremembe dna v višinski natančnosti meritev dna.

Z GIS orodji lahko določimo volumen erodiranega in volumen deponiranega materiala v akumulaciji s seštevkom vrednosti rastrskih celic, ki so pozitivne (deponiran material) oziroma negativne (erodiran material);

$$V_{DM} = \sum_{i=1}^n (DMV_n^{cut-fill} \cdot A_{celice}) \quad \text{za } DMV_n^{cut-fill} > 0, \quad (19)$$

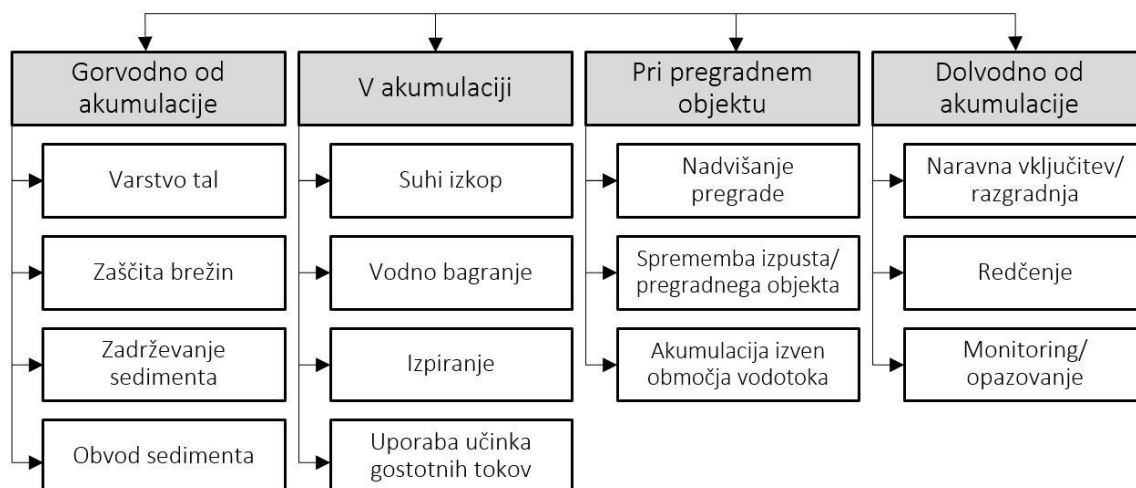
$$V_{EM} = \sum_{i=1}^n (DMV_n^{cut-fill} \cdot A_{celice}) \quad \text{za } DMV_n^{cut-fill} < 0, \quad (20)$$

kjer prestavljata $DMV_n^{cut-fill}$ vrednost v posamezni celici bilančne analize in A_{celic} površino posamezne rastrske celice znotraj digitalnega modela višin $DMV_n^{cut-fill}$.

Z uporabo statistične diskretne porazdelitve vrednosti posameznih celic $DMV_n^{cut-fill}$, kjer prepoznamo število celic v posameznem vrednostnem intervalu in jo grafično prikažemo na histogramu, lahko prepoznamo porazdelitev sprememb dna glede na vrednost v posamezni celici – torej prepoznamo kolikšen del območja je imelo izbrano vrednost spremembe dna.

2.2.7 Načini ravnanja s sedimentom v akumulacijskih ojezeritvah

Ravnanje s sedimentom na akumulacijah je ključno za dolgoročno uporabo te vodne infrastrukture. Osnovni cilj je z ohranjanjem volumna akumulacijskega bazena podaljševati življenjsko dobo objektom ter ohranяти primarne in sekundarnih dejavnosti. Prekinjeno premeščanje plavin povzroči morfološke in ekološke spremembe dolvodno od akumulacije. Zmanjšan zadrževalni volumen akumulacije preprečuje nabiro ustreznih količin vode, kar povzroči zmanjšanje prihodkov iz proizvodnje energije, vodooskrbe ali namakanja ter vpliv na vodni ekosistem v ojezeritvi. Ukrepe ravnanja s sedimentom glede na lokacijo izvajanja na akumulaciji delimo po sledečem diagramu.



Slika 13: Ravnanje s sedimentom v akumulaciji glede na lokacijo ukrepov po ICOLD (ICOLD, 2009)

2.2.7.1 Gorvodno od akumulacije

Glavni cilj teh ukrepov je zmanjšanje erozijskih procesov – odplavljanja zemljin in posledično dotoka plavin (*angl. sediment yield*) v akumulacijski bazen. Po Morris in Fan (2010) obstajata dve glavni strategiji zmanjšanja dotoka plavin:

- Ohranjanje oziroma zadrževanje zemljine (*angl. soil conservation*)

Ukrepi preprečevanja erozije oziroma preventivni ukrepi za zmanjševanje erozijskih procesov vključujejo ukrepe v celotnem prispevnem področju akumulacije. Ukrepi predvidevajo omilitev erozijskih procesov v povodju in s tem zmanjšajo dotok plavin do akumulacije. Osredotočeni

so na spremembe kmetijskih praks, pogozdovanje, protierozijske ukrepe na kmetijskih površinah, ustrezno organizacijo gradbišč ipd. Večina teh ukrepov spada v skupino ukrepov, imenovanih ekoremediacije, ki so za varstvo tal pred erozijo vključeni tudi v slovenski Kmetijsko okoljski program (KOP). Uspešna raba ekoremediacijskih ukrepov lahko zmanjša povprečni letni dotok suspendiranih snovi za tretjino. Uspeh ukrepov je odvisen predvsem od hidroloških in podnebnih karakteristik, topografije, tipov tal in rabe zemljišč (Ojsteršek Zorčič, 2015). Literatura navaja, da moramo biti pri teh ukrepih zadržani, saj se nekatere obsežne izvedbe ekoremediacijskih ukrepov v povodju niso izkazale kot uspešne (Morris & Fan, 2010; ICOLD, 2009). Ukrepi preprečevanja erozije se prav tako izvajajo na območju struge vodotoka, kjer z urejanjem brežin in s stabilizacijo dna z gradbenimi in negradbenimi ukrepi (vegetacija) ali s pasom zarasti ob vodotokih preprečujemo dodaten vnos materiala v vodotoke. Poznamo več vrst gradbenih ukrepov za zadrževanje sedimenta na območju povodja:

- Zadrževanje sedimenta (*angl. sediment trapping*)

Ukrepi zadrževanja sedimenta vključujejo pregradne objekte na vodotokih ali hudournikih, ki zadržujejo plavine:

- zaplavne pregrade (*angl. check dam*),
- zadrževalniki plavin/prebiralne pregrade (*angl. debris sorting dam*),
- sedimentacijski bazen (*angl. sedimentation basin*),
- zadrževalniki/akumulacije.

Za uspešno izvajanje ukrepov zadrževanja sedimenta v zalednih objektih je predvsem potrebno redno odstranjevanje sedimenta in košnja (Ojsteršek Zorčič, 2015). Ukrep, ki je prav tako lociran nad akumulacijo, je obvod s sedimentom zasičenih tokov ob akumulaciji (*angl. bypassing*). Za ta ukrep potrebujemo predvsem ustrezne topografske pogoje (npr. rečni meander), ki omogočajo izvedbo obvodnega kanala oziroma cevovoda (Morris & Fan, 2010).

2.2.7.2 Ukrepi v akumulaciji

Ukrepe pri ravnanju s sedimentom na območju akumulacije delimo v dve skupini. Prva skupina ukrepov predstavlja nabor ukrepov za odstranitev deponiranega sedimenta v akumulaciji:

- suhi izkop,
- bagranje iz vode (*angl. dredging*),
- izpiranje/splakovanje (*angl. flushing*).

Ukrepa mehanskega izkopa ali bagranja za ponovno pridobitev vodne prostornine oziroma izgubljene kapacitete zaradi odlaganja sedimenta se redko uporabljata, saj sta ukrepa povezana z visokimi stroški izvedbe in okoljskimi problemi odlaganja sedimenta. Uspešna rešitev problema odlaganja sedimenta, ki se je uporabila na območju akumulacij na reki Dravi, je odlaganje izkopanega sedimenta v stranskih rokavih in ustvarjanje umetnih otokov. Odlaganje sedimenta izven območja akumulacijskega bazena povzroča, da je potrebno sediment z ustreznimi laboratorijskimi analizami raziskati in klasificirati skladno z aktualno zakonodajo. Odloženi sedimenti lahko vsebujejo akumulirane snovi iz preteklih industrijskih, kmetijskih dejavnosti in okoljskih nesreč v prispevnem območju akumulacije (težke kovine, fitofarmacevtska sredstva, pesticidi ...) ter velik delež organskih snovi, kar ima lahko ob nepravilnem odlaganju negativne okoljske posledice. Pri mehanskem odstranjevanju

sedimenta lahko pride do negativnih okoljskih posledic na ekosistemu ojezeritve, ki jih povzročijo povečanje kalnosti, odstranjevanje bentoških nevretenčarjev ali sproščanje nevarnih snovi iz sedimenta (Ojsteršek Zorčič, 2015).

Pri metodi splakovanja (*angl. flushing*) z ustreznim manipuliranjem zapornic in talnega izpusta ter zniževanjem gladine akumulacije (praviloma do popolne izpraznitve) načrtno erodiramo in resuspendiramo že odloženi sediment na območju akumulacijskega bazena. Tako se na dnu akumulacije ustvari ozek erozijski kanal v deponiranem sedimentu, ki ga dopolnjujemo z dodatnimi načrtnimi lateralnimi erozijskimi kanali. Splakovanje je zelo uspešno v ozkih akumulacijah z velikim vzdolžnim padcem dna (Kondolf, et al., 2014). Pri splakovanju akumulacijskih bazenov prihaja do visokih koncentracij sproščenih suspendiranih snovi v zelo kratkem času, prav tako pa lahko pride do sproščanja onesnaženega sedimenta, kar privede do negativnih okoljskih posledic dolvodno od akumulacij (Morris & Fan, 2010).

Druga skupina ukrepov na območju akumulacijskih bazenov predstavlja metode, ki omogočajo prehod sedimenta skozi akumulacijo na dolvodno območje (*angl. sediment routing*). Metode se izvajajo z ustrežno manipulacijo zapornic in talnih izpustov. To sta:

- izpiranje s prehodom velikih pretokov skozi akumulacijo (*ang. sluicing, drawdown routing*),
- izpiranje z uporabo efekta gostotnih tokov (*angl. density current venting*).

Te metode se ločijo od splakovanja (*angl. flushing*) predvsem po tem, da se pri teh metodah ob visokovodnih dogodkih prepozna s plavinami zasičen dotok in se ga z ustrežno manipulacijo zapornic in talnih izpustov objekta spelje skozi akumulacijo, saj je cilj čim manjše odlaganje sedimenta znotraj akumulacije. Pri izpiranju koncentracije suspendiranih snovi ne smejo presegati naravnih nivojev, zato pri tej metodi ni obsežne okoljske problematike (Morris & Fan, 2010).

Metoda izpiranja z uporabo efekta gostotnih tokov omogoča premeščanje sedimenta skozi akumulacijo brez denivelacije ojezeritve. Pri tej metodi se s plavinami zasičeni pretoki, ki se gibljejo pri dnu v obliki gostotnih tokov, izpuščajo skozi odprte talne izpuste. Takšen način je mogoč samo na akumulacijah, ki imajo ustrezne morfološke karakteristike, ki preprečujejo razpršitev vtočnih tokovnic in zmanjšanja turbulence, kar omogoča gostotne tokove. Z uporabo te metode se lahko skozi akumulacijo prenese polovica s plavinami zasičenih pretokov (Kondolf, et al., 2014).

Uspešnost ukrepov izpiranja in splakovanja je pri ustrezni hidromehanski opremi in talnih izpustih predvsem odvisna od geometrijske oblike akumulacije in zadostnih količin vode oziroma dotočnih pretokov (Morris & Fan, 2010). Pri metodah izpiranja moramo biti pozorni na negativne posledice dolvodno od jezu, saj lahko s tem ukrepom povzročimo prekomerne koncentracije suspendiranih snovi v vodotoku, prav tako pa se premeščen sediment odloži na območju dolvodne struge vodotoka. Pomembno je, da se po splakovanju akumulacij v dolvodni vodotok dovaja povečana količina pretoka čiste vode, ki prenese sediment vzdolž daljšega odseka vodotoka in ustrezno zniža koncentracijo suspendiranih snovi v vodi (Kondolf, et al., 2014).

2.2.7.3 Na pregradnem objektu

Na območju pregradnega objekta so ukrepi usmerjeni v kompenzacijo izgubljenega volumna z nadvišanjem pregradnega objekta in kompenzacijo sprememb na pregradi oziroma hidromehanski opremi z uvedbo zapornic, ki omogočajo prehod sedimenta skozi pregrado. Umeščanje akumulacije izven območja struge reke je prav tako zelo učinkovit ukrep za preprečevanje vnosa rečnega sedimenta v akumulacijo (ICOLD, 2009).

2.2.7.4 Dolvodno od akumulacije

Cilj ukrepov v skupini dolvodno od akumulacije je vključitev akumulacije v naravni krog (*angl. natural incorporation*) in po zapolnitvi funkcionalnega volumna akumulacije njeno prilagoditev oziroma razgradnjo. V času obratovanja in posledično načrtnega zadrževanja sedimenta moramo predvideti obseg (latentne) erozije in vpliv na ekosistem v strugi dolvodno od akumulacije. Ukrep popolne ali delne razgradnje jezu lahko obsega ohranjanje pregradnega objekta ali odstranitev le-tega. Odstranitev pregradnega objekta je kompleksen proces, saj moramo poznati obseg erozije in količino transportiranega sedimenta iz akumulacije ter območja odlaganja le-tega in vpliv na dolvodne odseke vodotoka. Pri načrtovani razgradnji jezu moramo predvideti, kako in s katerimi ukrepi se bo nadzorovalo erozijo in v primeru onesnaženega sedimenta stabiliziralo le-tega na za to predvidenih območjih. Pri tem si pomagamo z matematičnimi modeli, ki omogočajo simulacijo scenarijev obsega in časovne razporeditve erozije, izvedbe odvodnih kanalov v akumulaciji ipd.

Ukrep, ki omogoča podaljšanje življenjske dobe akumulacije, je tudi načrtovano redčenje (*angl. dilution*). Pri tem ukrepu je potreben zelo učinkovit nadzor nad koncentracijo suspendiranih snovi v vodi, da se prepreči okoljska škoda dolvodno (ICOLD, 2009).

Tretji ukrep je monitoring in spremljanje sprememb v akumulacijskem bazenu, razlike prodonosnosti in kalnosti gorvodno in dolvodno od akumulacije, spremembe kvalitete vode dolvodno od akumulacije in vpliva latentne erozije. Monitoring različnih parametrov se mora izvajati pred, med in po ukrepih ravnanja s sedimentom, ki so predvideni v prejšnjih točkah. Z učinkovitim monitoringom se tako nadzorujejo spremembe, ki s prenosom sedimenta iz akumulacij vplivajo na ekosistem dolvodno, hkrati pa zbrani podatki predstavljajo vir informacij za učinkovitejše izvajanje ukrepov ravnanja s sedimentom.

Predstavljeni ukrepi se pogostokrat uporabljajo v kombinaciji in se ponavljajo v časovnih intervalih, ki so v soodvisnosti z dotokom plavin v akumulacijo. Za uspešno upravljanje akumulacijskega bazena in zagotavljanje dolge življenjske dobe akumulacije je potrebno ukrepe upravljanja s sedimentom predvideti v Načrtu ravnanja s sedimentom na akumulaciji, ki je lahko del obratovalnega pravilnika akumulacije.

2.3 MODELIRANJE MORFOLOŠKIH SPREMOMB V AKUMULACIJI Z UPORABO 2D HIDRAVLICNEGA MODELA MIKE 21C

AK Pernica je lokacijsko umeščena v območje spodnjega dela doline Jareninskega potoka, ki poteka v smeri slemen Slovenskih goric, v spodnjem delu pa se preusmeri v dolino reke Pesnice. Akumulacija posledično nima klasične oblike in razvoja rečnega naplavnega vršaja, kjer se vtočni del reke z naplavnim vršajem nahaja na gorvodni strani doline in širi vzdolž akumulacijskega bazena v smeri pregradnega objekta. Reka Pesnica priteče v območje akumulacije na osrednjem, tj. zahodnem delu akumulacije. Pretočna slika je zato izrazito ploskovno razporejena, prav tako pa poteka širitev naplavnega vršaja iz smeri osrednjega v stranske dele akumulacije. Za modeliranje morfoloških sprememb tako razvejenega toka je primerna uporaba dvorazsežnostnih numeričnih modelov. V nalogi smo zato uporabili dvodimenzijski matematični model z morfološkim modulom MIKE 21C, ki je bil razvit na Danskem hidravličnem inštitutu – DHI. Spada med najbolj uveljavljene programske produkte za modeliranje hidravlike odprtih vodotokov – tako v Sloveniji kot po svetu. MIKE 21C je nadgradnja uveljavljanega paketa MIKE 21 za modeliranje dvorazsežnostnega toka z nadgrajeno krivočrtno (*angl. curvilinear*), nepravokotno računsko mrežo. Programski paket 21C vsebuje več modulov, ki so pomembni pri modeliranju sedimentacije in morfoloških sprememb:

- hidrodinamični modul,
- advekcijsko-disperzijski modul,
- modul transporta sedimenta,
- modul upora toku,
- modul erozije,
- modul sprememb morfologije (DHI, 2004).

Program je namenjen predvsem modeliranju morfoloških sprememb vodotokov in akumulacij:

- načrtovanje ukrepov proti eroziji brežin,
- načrtovanje odvzema plavin iz dna struge,
- **napovedovanje zasipavanja akumulacij,**
- napovedovanje vpliva mostov in drugih objektov v vodnem toku na morfologijo dna,
- predvidevanje nastanka plitvin na plovnih poteh,
- **optimizacijo renaturacijskih ukrepov.**

V tem delu se bomo osredotočili predvsem na tretjo točko napovedovanja zasipavanja akumulacij, saj se upravljalci akumulacije Pernica srečujejo s tem problemom.

2.3.1 Teoretične osnove matematičnega modela

Pri vzpostavitvi in pripravi podatkov za izdelavo matematično-hidravličnega modela v programskem paketu MIKE 21C moramo opraviti naslednje postopke:

- Izbrati moramo območje obdelave podatkov in simulacija procesov.
- Potrebno je pripraviti digitalno batimetrijo obravnavanega vodnega telesa in izdelati digitalni model batimetrije, ki je podlaga za izdelavo krivočrtne mreže izbranega odseka vodotoka ali akumulacije oz. meritev transporta sedimenta v območje obravnave.

- Robni pogoji v simulaciji izhajajo iz podatkov opravljenih meritev pretoka ali gladin na vtočnem delu našega modela in iz podatkov meritev gladin ali pretokov na iztočnem delu obdelovanega območja.
- Pri simulaciji lahko izberemo dve možnosti:
 - računski model za simulacijo hidrodinamičnih parametrov (*angl. hydrodynamics only*), ki nam kot rezultat poda podatke o poteku gladin, spremembi globlin, pretokov in hitrosti na območju hidravličnega modela ali
 - model spremembe morfologije (*angl. hydrodynamics and river morphology*), ki je nadgradnja umerjenega hidravličnega modela ter kot rezultat poda spremembe dna vodnega telesa zaradi premeščanja plavin in erozije v odvisnosti od časa.

Končni rezultat modela je simulacija poteka odlaganja in erodiranja premeščenega sedimenta v akumulaciji oziroma v vodotoku v odvisnosti od pretočnih razmer. Vsak od teh korakov je vključen v posamezni modul, delovanje le-teh pa je podrobneje predstavljeno v nadaljevanju.

2.3.1.1 Izdelava krivočrtne mreže (*angl. elliptic grid generator*)

Pri hidravličnem modeliranju rečnih korit potrebujemo natančen opis robnih območij, za kar je zelo primerna ortogonalna (pravokotna) krivočrtna mreža. Prednosti uporabljen krivočrtne mreže so predvsem v krajših računskih časih. Le-ti so posledica uporabe manjšega števila računskih celic, hkrati pa krivočrtna mreža z boljšo resolucijo robnih računskih območij omogoča višjo računsko natančnost. Prav tako se lahko uporablja večji časovni korak, saj so linije krivočrtne mreže vzporedne oziroma potekajo po tokovnicah toka vode (DHI, 2004).

Grafični modul (*angl. grid generator*) za pripravo ortogonalne krivočrtne mreže rešuje sistem eliptičnih parcialnih diferencialnih enačb:

$$\frac{\partial}{\partial s} \left[g \frac{\partial x}{\partial s} \right] + \frac{\partial}{\partial n} \left[\frac{1}{g} \frac{\partial x}{\partial n} \right] = 0, \quad (21)$$

$$\frac{\partial}{\partial s} \left[g \frac{\partial y}{\partial s} \right] + \frac{\partial}{\partial n} \left[\frac{1}{g} \frac{\partial y}{\partial n} \right] = 0, \quad (22)$$

kjer so:

x, y ... koordinate kartezijskega koordinatnega sistema,

s, n ... koordinate krivočrtnega koordinatnega sistema (v nasprotni smeri urnega kazalca),

g ... funkcija uteži (*angl. weight function*).

Funkcija uteži je parameter, ki predstavlja razmerje med dolžino (s) in smerjo (n) v ortogonalni mreži, ki nam omogoča umerjanje mreže. Pri umerjanju mreže želimo vzpostaviti sistem, ki ima čim bolj kvadratno porazdelitev mrežnih celic.

Začetni in robni pogoji ortogonalno-nelinearnega sistema predstavljata enačbi (23)a in (23)b.

$$\frac{\partial x_b}{\partial s} \frac{\partial x_b}{\partial n} + \frac{\partial y_b}{\partial s} \frac{\partial y_b}{\partial n} = 0 \quad (a), \quad f(x_b, y_b) = 0 \quad (b). \quad (23)$$

Robni pogoj (a) predstavlja zakrivljenost računske mreže, začetni pogoj (b) pa predstavlja lokacijo (x, y) točk na računski mreži na specifični liniji.

Izdelava računske mreža poteka po sistemu iteracij, kjer se robna območja zgladijo. S pomočjo utežnostne funkcije se vzpostavijo enakomerni gradienti med celicami in enakomerne radialne linije (DHI, 2004).

2.3.1.2 2D model nestalnega toka (angl. hydrodynamic model)

Modeliranje hidravličnih sprememb meandrirajočih in razvejanih rečnih sistemov je kompleksen proces, saj se tok giblje v tridimenzionalnem (3D) vzorcu. Računski časi v trirazsežnostnih matematičnih modelih sprememb rečne morfologije tako velikih in časovno dolgih procesov bi bili preobsežni za praktične namene. Vsled temu se uporabi poenostavljena Navier-Stokesova enačba, kjer predpostavimo, da so vertikalni procesi manj izraziti in lahko računski model poenostavi v dvodimenzionalnega (2D). Pri tem se kot tridimenzionalni element pretoka uporablja sekundarni tok (DHI, 2016).

Hidrodinamični modul izračunava in simulira nihanje gladine in hitrosti vode v celicah ortogonalne krivočrtne računske mreže (s , n). Računski model temelji na reševanju dinamičnega in po vertikali integriranega zakona o ohranitvi gibalne količine (kontinuitetni enačbi) in zakona o ohranitvi mase (angl. *conservation of momentum*) (Saint Venantova enačba) v dveh smereh. Zakrivljenost mrežnih linij je dodaten pogoj v parcialni diferencialni enačbi pretoka. Zaradi dodatnih pogojev, ki opisujejo zakrivljenost računskih linij, je računski model počasnejši kot primerljiv model v Kartezijevem koordinatnem sistemu (x , y) s pravokotno računsko mrežo (MIKE 21), a krivočrtna numerična mreža omogoča boljše povzemanje zakrivljenosti brežin in batimetrije računskega območja ter zgoščevanje mreže na območjih kjer nas zanimajo boljše analize. Matematični model v hidrodinamičnem modelu MIKE 21C rešuje sistem naslednjih enačb (DHI, 2016):

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial s} \left(\frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{pq}{h} \right) + 2 \frac{pq}{hR_n} + \frac{p^2 - q^2}{hR_s} + gh \frac{\partial H}{\partial s} + \frac{g}{C^2} \frac{p\sqrt{p^2 + q^2}}{h^2} = RHS, \quad (24)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{q^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial s} \left(\frac{pq}{h} \right) + 2 \frac{pq}{hR_s} + \frac{p^2 - q^2}{hR_n} + gh \frac{\partial H}{\partial n} + \frac{g}{C^2} \frac{q\sqrt{p^2 + q^2}}{h^2} = RHS, \quad (25)$$

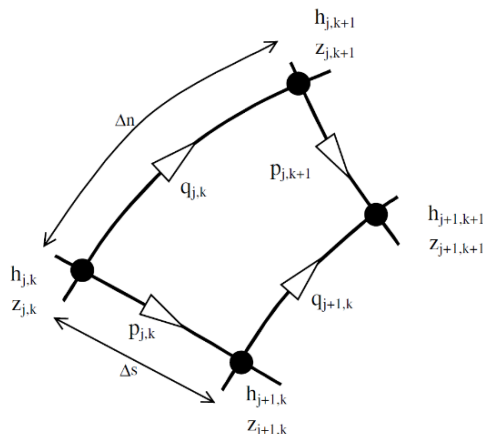
$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial s} + \frac{\partial q}{\partial n} - \frac{q}{R_s} + \frac{p}{R_n} = 0, \quad (26)$$

kjer so:

- s , n ... koordinate krivočrtnega koordinatnega sistema (v nasprotni smeri urnega kazalca),
- p , q ... masni pretok v s - in n - smeri lokalnega koordinatnega sistema,
- H ... nadmorska višina gladine vode,
- h ... globina vode,
- C ... Chezyjev koeficient hrapavosti,
- g ... gravitacijski pospešek,
- R_s, R_n ... radij krivulje s - in n - linije,
- RHS ... vsota vplivov na desni strani enačbe (angl. *right hand side in the force balance*).

Parameter RHS vsebuje več delov, med njimi so tudi t . i. Reynolsove napetosti, ki upoštevajo gladkost ukrivljenosti krivulj krivočrtne mreže (DHI, 2016). Sistem enačb se rešuje z implicitno

metodo končnih razlik (angl. *implicit difference*) s spremenljivkami v premaknjeni (angl. *staggered*) numerični mreži, kot prikazuje Slika 14.



Slika 14: Prikaz računske mreže v hidrodinamičnem modelu MIKE 21C (angl. *space staggered grid*) (DHI, 2004)

Hidrodinamični modul MIKE 21C uporablja dve tehniki za reševanje sistema enačb. Prva je ADI (angl. *alternate direction implicit*), ki je enaka kot v hidrodinamičnem modelu MIKE 21 in primerna za zelo dinamične tokove. Druga tehnika reševanja sistema enačb temelji na metodi predpostavljenega skoraj stalnega toka (angl. *quasi-steady assumptions*) in iteracijskem algoritmu na podlagi reševanja popravkov globin (angl. *predictor-corrector*), ki izvira iz metod nestisljivih tekočin. Druga tehnika je predvsem primerna za počasi spreminjajoči se tok in dolgotrajne simulacije (DHI, 2004).

Umerjanje hidrodinamičnega modela poteka s prilagajanjem številnih parametrov. Najbolj pomembna sta hidravlična hrapavost oziroma koeficient hrapavosti (Chezyjev ali Manningov koeficient hrapavosti) in na podlagi meritev hitrosti koeficient turbulentne viskoznosti (angl. *eddy viscosity*), ki je lahko podan kot konstanto, ploskovno porazdeljena vrednost ali v dinamični obliki po Smagorinskyjevi metodi. Vsi parametri imajo naraven fizikalen pomen, zato je potrebno paziti, da ostanejo znotraj naravnih velikostnih razredov karakteristik. Metoda določitve koeficienta turbulentne viskoznosti po Smagorinskyjevi metodi:

$$E = C_s^2 \Delta^2 \sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right)^2}, \quad (27)$$

kjer so:

x, y ... koordinate kartezijskega koordinatnega sistema,

u, v, w ... hitrost toka vode v u, v in w smeri.

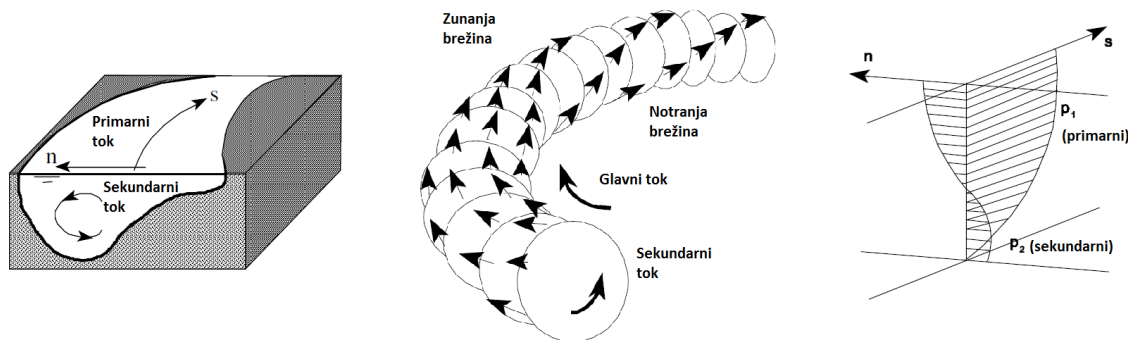
C_s ... brezdimenzionalni koeficient Smagorinsky

Hidrodinamični model s krivočrtno numerično mrežo je zelo primeren za plitvo in počasi se spreminjajočo topografijo terena ter za meandrijajoče in široke vodotoke z nizkimi Froudovimi števili (DHI, 2016).

2.3.1.3 Sekundarni tok v krivinah (angl. *helical flow*)

Sekundarni spiralni tok v krivinah vodotokov in naplavnih vršajev se pojavi pod vplivom centrifugalne sile, zaradi katere se tokovnice premaknejo h konveksni brežini, kar povzroča

dodatne energijske izgube (Mikoš, 2007). Zaradi te prečne cirkulacije se v krivini oblikujejo spiralni sekundarni tokovi, ki so ob dnu usmerjeni h konveksnem bregu, tok ob vodni gladini pa je usmerjen h konkavnemu bregu. Ob konkavnem bregu se pojavlja erozija brežin, medtem ko se na konveksnem bregu pojavljajo območja odlaganja plavin. Večji vpliv sekundarnega toka je prisoten pri vodotokih, ki imajo nizko razmerje med širino in globino vodotoka.



Slika 15: Ilustracija parametrov sekundarnega toka. V desni grafiki je prikazana porazdelitev hitrosti v vertikalnem profilu glede na smer primarnega in sekundarnega toka (prirejeno po (DHI, 2004))

Velikost sekundarnega toka je funkcija glavnega pretoka oziroma hitrosti toka, globine vode in radija krivin glavnih tokovnic v vodotoku. Moč sekundarnega toka χ_e se uporablja za določitev smeri toka plavin in suspendiranega materiala. V enačbi za določitev moči sekundarnega toka R_s predstavlja radij krivine tokovnic, H globino vode, g gravitacijski pospešek in κ Von Karmanov koeficient:

$$\chi_e = \frac{2}{\kappa^2} \left(1 - \frac{\sqrt{g}}{\kappa}\right) \frac{H}{R_s}. \quad (28)$$

Tako lahko določimo intenziteto sekundarnega toka i_h , ki je zmnožek moči sekundarnega toka in hitrosti glavnega toka U (DHI, 2004):

$$i_h = \chi_e \times U. \quad (29)$$

Sekundarni tok je hidrodinamična karakteristika vodnega toka, ki predstavlja kvazi-3D tok na območju obravnave. V programskem okolju je vključen kot del morfološkega modela, saj ima razporeditev in intenziteta sekundarnega toka velik vpliv na proces premeščanja in erodiranja sedimenta.

2.3.1.4 Model spremembe morfologije – premeščanja plavin

Pri dvodimenzionalnem matematičnem modeliranju sedimentacije in morfoloških sprememb v vodotokih z veliko vsebnostjo suspendiranega materiala je v modelu potrebno ločiti modeliranje rinjenih plavin in suspendiranega materiala. Z ločenim pristopom modeliranja rinjenih plavin in suspendiranega materiala želimo časovno simulirati spremembe v obliki dna vodotoka. Z uporabo metode sekundarnega toka lahko simuliramo spremembe na dnu vodotoka, ki so posledica odlaganja in erodiranja materiala, kot so npr. spremembe naklona dna in spremembe smeri pretoka vode in rinjenih plavin ter suspendiranega snovi (DHI, 2004).

V programskem paketu MIKE 21C so za potrebe ločenega modeliranja kohezivnega in suspendiranega materiala v kombinaciji z rinjenimi plavinami uporabljene enačbe za premestitveno zmogljivost (DHI, 2016):

- Englund-Hansen (1967),
- Englund-Fredsøe-Zyserman (1976),
- Ackers-White (1972),
- Yang (1973),
- Van Rijn (1984).

Program uporablja za opis enačb premestitvene zmogljivosti naslednje parametre:

- S_{bl} ... premestitvena sposobnost rinjenih plavin
 k_b ... faktor kalibracije za rinjene plavine
 S_{sl} ... premestitvena sposobnost za lebdeče plavine
 k_s ... faktor kalibracije za lebdeče plavine
 t_s ... čas
 S_{tl} ... skupna premestitvena zmogljivost
 s ... relativna gostota sedimenta
 c_e ... povprečna koncentracija lebdečih plavin
 C ... Chezyjevo število
 u ... hitrost
 θ ... Shieldsov brezdimenzijski parameter (Enačba 4)

Izpostavili smo enačbe, ki upoštevajo celotno premestitveno zmogljivost – torej rinjene in lebdeče plavine.

$$S_{tl} = S_{bl} + S_{sl} \quad (30)$$

Model Englund-Hansen (1967)

Englund in Hansen sta razvila pristop, ki razdeli celotno premestitveno zmogljivost na rinjene plavine in lebdeče plavine:

$$S_{bl} = k_b \cdot S_{tl}, \quad (31)$$

$$S_{sl} = k_s \cdot S_{tl}. \quad (32)$$

Skupna premestitvena zmogljivost je izražena z enačbo:

$$S_{tl} = 0.05 \cdot \frac{C^2}{g} \cdot \theta^{\frac{5}{2}} \cdot \sqrt{(s-1) \cdot g \cdot d_{50}^3}. \quad (33)$$

Van Rijn (1984)

Van Rijnjeva enačba prav tako loči določitev skupne premestitvene zmogljivosti na rinjene in lebdeče plavine:

$$S_{bl} = 0.053 \cdot \frac{T^{2.1}}{D_*^{0.3}} \cdot \sqrt{(s-1) \cdot g \cdot d_{50}^3}. \quad (34)$$

Pri tem je T razmerje med kritično strižno hitrostjo in efektivno strižno hitrostjo. Parameter D_* pa predstavlja funkcijo v odvisnosti od velikosti delcev in kinematične viskoznosti vode ν za modificirano obliko Shieldsovega parametra θ_c :

$$D_* = d_{50} \cdot \left(\frac{(s-1) \cdot g}{\nu^2} \right)^{\frac{1}{3}}. \quad (35)$$

Preglednica 5: Določitev kritičnega Shieldsovega parametra θ_c

D_*	θ_c
$D_* < 4$	$0.24/D_*$
$4 < D_* < 10$	$0.14 D_*^{-0.64}$
$10 < D_* < 20$	$0.04 D_*^{-0.1}$
$20 < D_* < 150$	$0.013 D_*^{0.29}$
$D_* > 150$	0.055

Transport lebdečih plavin je določen s kriterijem za kritično strižno hitrost u_f :

$$u_f = \frac{4w_s}{D_*}, \text{ za } D_* < 10, \quad (36)$$

$$u_f = 4w_s, \text{ za } D_* > 10. \quad (37)$$

Engelund-Fredsøe-Zyserman(1976)

Enačba temelji na teoriji verjetnosti, in sicer je določena verjetnost prenosa delca:

$$p = \left[1 + \left(\frac{\frac{\pi}{6} \mu_d}{\theta' - \theta_c} \right) \right], \theta' > \theta_c. \quad (38)$$

Pri tem je dinamični koeficient trenja $\mu_d = 0.51 = \tan 27^\circ$. Brezdimenzionalni strižni parameter θ' v odvisnosti od strižne hitrosti u'_f prikazuje spodnja enačba:

$$\theta' = \frac{u_f'^2}{(s-1) \cdot g \cdot d_{50}}. \quad (39)$$

Skupna premestitvena zmogljivost je izražena kot razmerje med rinjenimi plavinami

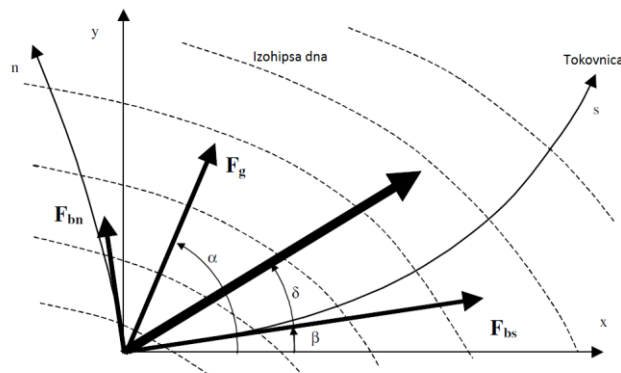
$$S_{bl} = 5 \cdot p \cdot (\sqrt{\theta'} - 0.7\sqrt{\theta_c}) \cdot \sqrt{(s-1) \cdot g \cdot d_{50}^3} \quad (40)$$

in lebdečimi plavinami

$$S_{sl} = c_b \cdot u \cdot h \cdot \int_{\eta_0}^1 u(\eta) \cdot c(\eta) \cdot d\zeta. \quad (41)$$

2.3.1.5 Transport rinjenih plavin (ang. bed load)

V modelu se lahko uporabijo različne enačbe za matematično modeliranje transporta rinjenih plavin. Model omogoča izbiro klasičnih enačb kot je Meyer-Peter-Müllerjeva (MPM) enačba (1948) in tudi enačbe, ki omogočajo ločeno modeliranje rinjenih in suspendiranih plavin, kot sta Engelund-Fredse (1976) in Van Rijn (1984). Pri modeliranju premeščanja rinjenih plavin enačbe upoštevajo predvsem kritično strižno napetost in premer zrna plavin.



Slika 16: Strižna napetost/sila na plavine je sestavljena iz treh komponent: sile zaradi glavnega toka F_{bs} , sile zaradi sekundarnega toka F_{bn} in sile gravitacije v odvisnosti od naklona dna vodotoka (DHI, 2004)

2.3.1.6 Transport suspendiranega materiala (angl. suspended load)

Pri modeliranju transporta suspendiranega materiala v visoki časovni resoluciji moramo biti pozorni na časovni zamik transporta sedimenta v primerjavi s pretokom vode. Tako se v vodotoku pojavi proces premika plavin znotraj vodotoka in vnos sedimenta iz povodja, ki ima časoven zamik zaradi časa koncentracije (DHI, 2004).

Za transport lebdečih plavin izhaja matematično-hidravlični model iz parcialne diferencialne enačbe, ki opisuje transport sedimenta po konvekcijsko-difuzijski obliki po avtorju Galappattiju (1983):

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + w \frac{\partial c}{\partial z} = w_s \frac{\partial c}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon \frac{\partial c}{\partial z} \right), \quad (42)$$

kjer posamezni parametri enačbe predstavljajo:

- z ... pretočna globina,
- c ... koncentracijo suspendiranega sedimenta, lebdečih plavin,
- ε ... turbulentna difuzija plavin,
- w_s ... hitrost usedanja zrna plavine v navpični smeri (os z),
- u, v, w ... komponente hitrost toka vode v u, v in w smeri.

Časovni zamik T , ki predstavlja čas usedanja zrna sedimenta, je izražen kot kvocient efektivne globine h_* in hitrosti usedanja zrna w_s , ki smo jo podrobneje predstavili v poglavju 2.2.3.3. Efektivna globina je odvisna od oblike vertikalne koncentracije suspendiranega sedimenta, hitrosti usedanja in disperzije (angl. *eddy dispersion*). Tako lahko določimo časovni zamik L (angl. *length scale*), ki je produkt zamika koncentracije suspendiranega sedimenta T in hitrosti toka v prevladujoči smeri toka U .

$$T = \frac{h_*}{w_s} \quad (43)$$

$$L = T \times U \quad (44)$$

2.3.2 Potrebni podatki za uporabo programskega orodja

Programsko okolje v grafičnem uporabniškem vmesniku (*angl. GUI - Graphical user interface*) omogoča enostaven in pregleden vnos in shranjevanje podatkov potrebnih za simulacijo. Uporabniški vmesnik je sestavljen v obliki posameznih sklopov, ki nam ob aktiviranju sklopa odprejo podkategorije potrebnih dodatnih vhodnih parametrov. Grafični vmesnik je osnovan na grafičnem vmesniku MIKE Zero, ki je značilen za programske pakete DHI.

Programsko okolje numeričnega modela MIKE 21C temelji na krivočrtni nepravokotni računski mreži, ki jo izdelamo v ločenem modulu. Na izdelano krivočrtno računsko mrežo z uporabo GIS orodij aproksimiramo višinske točke topografije, ki jo pridobimo iz različnih virov, npr. topografskih meritev, projektne dokumentacije itd. Na podlagi pridobljenih geometrijskih podatkov (batimetrija in meritve brežin), ob pomoči ortofoto posnetkov in terenskega ogleda razlignega območja izdelamo vhodne geometrijske podlage v obliki krivočrtne računske mreže za numerični modul matematično hidravličnega modela.

Preglednica 6: Geometrijski vhodni podatki za programsko okolje MIKE 21C

Korak	Postopek	Modul GridGenerator	Potrebni vhodni podatek
1	Izdelava računske mreže	Izdelava krivočrtne računske mreže	Topografija območja obdelave s tridimenzionalnimi koordinatami terena za začetno stanje (rastrska ali vektorska oblika)
2	Aproksimacija topografije na računsko mrežo	Ortogonalna interpolacija batimetrije na računsko mrežo	Topografija območja obdelave s tridimenzionalnimi koordinatami terena za začetno stanje (rastrska ali vektorska oblika)

Osnovno izhodišče numeričnega modela je izbrano računsko obdobje in računski korak. Manjši kot je računski korak, bolj bo simulacija stabilna, vendar bodo računski časi daljši. Na podlagi izdelane računske mreže in hidroloških podatkov, ki predstavljajo zgornji in spodnji robni pogoj numeričnega modela, izdelamo hidrodinamični model. Glavni rezultati hidrodinamičnega dela so hitrosti in gladina obravnavanega vodnega telesa. Za hidrološke podatke potrebujemo dolgoletne meritve vodnih gladin (pretokov) na umerjeni vodomerni postaji ali pa izdelamo ustrezno umerjeno hidrološko analizo. Za simulacijo morfoloških sprememb je najprimernejša simulacija s celotnim spektrom pretokov v opazovanem obdobju. Čas opazovalnega obdobja je običajno definiran med meritvami topografije obravnavanega območja vodotoka ali akumulacije. Zaradi krajših računskih časov in dejstva, da so večje morfološke spremembe pojavljajo ob višjih hidroloških dogodkih, avtorji simulacij uporabljajo različne metode skrajševanja simulacije (npr. upoštevanje pretokov na podlagi krivulje trajanja pretokov). Za zgornji robni pogoj lahko uporabimo simulacijo s hidrogramom stalnega ali nestalnega pretoka. Spodnji robni pogoj hidrodinamičnega modela nam med več možnostmi predstavljajo meritve vodnih gladin, ki jih bomo uporabili tudi v našem testnem primeru.

Zelo pomemben parameter za umerjanje modela je hrapavost dna, ki jo lahko podamo kot Manningov ali Chezyjev koeficient hrapavosti v konstantni vrednosti ali kot ploskovno porazdeljene vrednosti, aproksimirane na krivočrtno računsko mrežo. Za umerjanje hidrodinamičnega modela lahko uporabimo tudi meritve hitrosti v posameznih točkah vodnega telesa ob različnih pretokih, ki služijo za umerjanje koeficienta turbulentne viskoznosti.

Preglednica 7: Pomembnejši potrebni vhodni parametri hidrodinamičnega modula (DHI, 2016)

Korak	Postopek	Hidrodinamični modul	Potrebni vhodni podatek
1	Časovni obseg simulacije	Časovni obseg izbrane HD simulacije z računskim intervalom	Časovni obseg med meritvami topografije terena
2	Zgornji robni pogoj	Zgornji robni pogoj	Hidrološki podatki na zgornjem robu obravnavanega območja (pretoki, gladine)
3	Spodnji robni pogoj	Spodnji robni pogoj	Hidrološki podatki na spodnjem robu obravnavanega območja (pretoki, gladine), padec nivelete odvodnika
4	Začetno stanje gladine	Začetno stanje gladine	Začetno stanje gladine na območju obdelave ob začetku simulacije
5	Umerjanje HD modela	Koeficient turbulentne viskoznosti	Meritve hitrosti na območju akumulacije omogočajo umerjanje le-tega
6	Umerjanje HD modela	Hrapavost dna	Ortofoto posnetek, raba tal in terenski ogledi, zrnastostna sestava dna

Na podlagi umerjenega hidrodinamičnega dela in podatkov o lastnostih plavin ter sedimenta na območju obdelave v programskem okolju aktiviramo morfološki modul numeričnega modela. Simulacija poteka ob vzporednem računanju obeh modulov, saj se morfološke spremembe vršijo na podlagi hidrodinamičnih karakteristik vodnega toka. Hidrodinamični in morfološki modul imata zaradi različnih velikostnih razredov sprememb različne računske in časovne korake.

Glavni vhodni podatek nam predstavljajo lastnosti zrna in dinamika premeščanja plavin iz prispevnega območja in obstoječa zrnastost ter razporeditev sedimenta na obravnavanem območju. Na vtočnem delu morfološkega modela, ki nam predstavlja zgornji robni pogoj, moramo poznati vrsto plavin (na podlagi zrnastostne sestave) in količino premeščenega materiala, ki je v odvisnosti od hidroloških dogodkov. Le-te lahko ponazorimo s krivuljo odvisnosti koncentracije plavin od pretoka.

Podatke o fizikalnih lastnostih premeščenega in odloženega sedimenta pridobimo s presajanjem odvzetih terenskih vzorcev in z ustreznimi laboratorijskimi analizami. Z uporabo geoloških in geomehanskih laboratorijskih analiz lahko pridobimo podatke o poteku odlaganja plavin in deformacijskih lastnostih sedimenta, kot so npr. poroznost, stopnja konsolidacije, relativna gostota, kritična strižna napetost itd. Morfološki model umerjamo na podlagi meritve sprememb dna med meritvami topografije, kjer identificiramo območja erodiranja in odlaganja sedimenta.

Preglednica 8: Izsek potrebnih podatkov za posamezen postopek v morfološkem modelu MIKE 21C (DHI, 2016)

Korak	Postopek	Morfološki modul	Potrebni vhodni podatek
1	Časovni obseg simulacije	Časovni obseg izbrane morfološke simulacije z računskim intervalom	Časovni obseg med meritvami topografije terena
2	Sekundarni tok	Sekundarni tok	Vertikalne meritve hitrosti v opazovalnih profilih
3	Zgornji robni pogoj	Zgornji robni pogoj	Meritve vsebnosti suspendiranega materiala in transport rinjenih plavin Meritve dna
4	Spodnji robni pogoj	Spodnji robni pogoj	Meritve vsebnosti suspendiranega materiala in transport rinjenih plavin Meritve dna
5	Začetno stanje gladine	Začetno stanje gladine	Začetno stanje gladine na območju obdelave ob začetku simulacije
6	Premeščanje sedimenta	Lastnosti in porazdelitev sedimenta	Za vsako posamezno frakcijo: Lastnosti sedimenta (ne/koherentnost, poroznost, gostota, Shieldsov parameter itd.) Konstantni premer zrn ali ploskovno porazdeljena vrednost
7	Premeščanje sedimenta	Začetna koncentracija plavin	Vsake posamezne frakcije kot konstantna ali ploskovno porazdeljena vrednost
8	Premeščanje sedimenta	Izbrana enačba premestitvene zmogljivosti	6 različnih enačb premestitvene zmogljivosti za vsako posamezno frakcijo in ločen pristop za rinjene in lebdeče plavine z možnostjo določitve deleža med njimi
9	Morfološke spremembe dna	Morfološke spremembe dna	Določitev debeline posameznih slojev sedimentov (konstanto ali kot ploskovno spreminjajoče polje) Določitev deleža posamezne frakcije, gostote sedimenta, poroznosti, Shielsovega brezdimenzijskega parametra itd. v posameznem sloju

Pomembna je izbira ustrezne enačbe premestitvene zmogljivosti plavin, ki smo jih predstavili v prejšnjih poglavjih. Enačbo izberemo v odvisnosti od vrste in velikosti premeščenih plavin. Enačbe premestitvene zmogljivosti in ustrezne karakteristike sedimenta izberemo s sistematičnim umerjanjem (kalibriranjem) morfološkega modela. Umerjanje poteka s primerjanjem rezultatov posameznih simulacij z merjenimi vrednostmi (merjenje koncentracije plavin dolvodno, meritve topografije itd.) na območju obravnave. Natančnejše kot je ujemanje rezultatov simulacije z merjenimi vrednostmi, boljše smo izdelali morfološki model.

Morfološki modul nam omogoča več načinov vnosa podatkov o lastnostih sedimenta. Prva razvrstitev je razvrstitev sedimenta po frakcijah, kjer lahko izberemo enovito srednjo zrno d_{50} , druga razvrstitev je v obliki ploskovno porazdeljene vrednosti srednjega zrna ali tretja kot za način podajanja zrnivosti v obliki do 16 razredov enovite zrnivosti. Morfološki modul omogoča račun premestitvene zmogljivosti enega razreda s kohezivnimi karakteristikami (DHI, 2016).

Morfološke spremembe dna in brežin lahko program simulira v okviru več podmodulov. Erozijo brežin simulira morfološki modul, ki omogoča račun ob spreminjanju dna v času simulacije, in modul aluvialne hrapavosti, ki omogoča upoštevanje tvorb in vpliv oblik dna (dine, antidine, rebra) na pretočne karakteristike in posledično morfološke spremembe na obravnavanem območju.

V praktičnem primeru uporabe programskega paketa z morfološkim modulom na AK Pernica smo uporabili samo del programskih kapacitet. Za celostno spoznavanje in izdelavo kvalitetnih morfoloških modelov z rezultati ustrezne kakovosti potrebujemo dolgoletne izkušnje in poglobljeno znanje s področja uporabe numeričnih modelov za modeliranje hidravlike in morfoloških sprememb. V nalogi smo predstavili samo osnovni primer uporabe tovrstnega matematičnega modela.

2.3.3 Dolgotrajne meritve vhodnih parametrov za spremljanje morfoloških sprememb na vodotokih in akumulacijah

Za izvedbo natančnih in umerjenih numeričnih modelov je treba izvesti natančne meritve na akumulaciji, ki za relativno majhen obseg povečanja stroškov študije bistveno prispevajo k natančnosti umerjenega modela. Pomembno je, da imamo kvalitetne podatke za umerjanje hidrodinamičnega dela modela, saj nam služi kot vhodna simulacija za morfološki del simulacije.

Geometrijski podatki o topografiji terena (dna in brežin) akumulacijskega bazena so bistveni za vrednotenje vpliva na zadrževalni volumen, namenjen preprečevanju poplav. Zaradi relativno hitrih morfoloških sprememb naplavnega vršaja predlagamo, da se ob meritvah dna akumulacije (batimetrije) hkrati izvedejo geodetske meritve območij, kjer so vidne spremembe topografije nad koto gladine. Slednje vključuje tudi meritve dna na vtočnem vršaju kakor tudi meritve suhega dela naplavnega vršaja. Samo meritve, ki vključujejo celoten obseg sprememb na obravnavanem področju akumulacijskega bazena v enem časovnem obdobju, lahko služijo kot kvalitetna podlaga za nadaljnje raziskave in primerjave topografije iz različnih časovnih obdobj.

Koncesionar na obravnavanem vodnem območju je ob gradnji avtocestnega kraka opozoril, da je zaradi večjega števila odprtih gradbišč z erozijsko izpostavljeno zemljinu prihajalo do povečanega spiranja sedimenta v vodotoke in posledično v akumulacije na območju Pesniške doline (Bukovnik & Ivanuša, 2009). Vsled predvidene gradnje železniškega tira na relaciji Maribor - Šentilj in v primeru nezadostnih protierozijskih ukrepov (*angl. sediment traps*) se lahko pričakuje ponovno povečanje vnosa sedimenta v rečno mrežo. Le-ta se bo najverjetneje odložil na območju AK Pernica I, saj je to prva akumulacija dolvodno od območja predvidenih posegov. Za izboljšanje spremljanja uspešnosti ukrepov Kmetijske okoljske politike (KOP) in vpliva sproščanja sedimenta zaradi gradnje železniškega tira bi bilo smiselno spremljanje vsebnosti suspendiranih snovi na reki Pesnici v območju med vtokom Cirknice in AK Pernica. Z merjenimi podatki bi lahko ovrednotili vplive iz zaledja na akumulacijo Pernica, hkrati pa bi to predstavljalo novelacijo vhodnih parametrov morfološkega modela na aktualne razmere v prispevnem področju akumulacije.

Za morfološki model je potrebno pridobiti podatke o lastnostih odloženega sedimenta. Podatke o lastnostih moramo pridobiti iz dveh virov. Prvi je analiza odloženega sedimenta na akumulaciji iz prostorsko razporejenih točk na območju akumulaciji glede. Z izvedbo sejalne

analize tako pridobimo podatke o vrsti in velikosti plavin, na podlagi katere identificiramo enačbo za določitev transportne sposobnosti vodotoka. Drugi vir podatkov pa je zvezno spremljanje vsebnosti suspendiranih snovi na lokaciji, ki je čim bližje vtoku v zaradi sedimentacije ogroženo akumulacijo.

3 MODELIRANJE MORFOLOŠKIH SPREMEMB V AK PERNICA I

Akumulacijo Pernica I smo izbrali kot primerno vodno telo za praktični primer analize v sklopu magistrskega dela. Akumulacija je večnamenski mokri zadrževalnik, kjer se sediment zaradi vnosa z vtokom reke Pesnice odlaga na vtočnem vršaju akumulacije. Za območje akumulacije smo pridobili podatke meritev batimetrije, ki so se izvajale v razmaku cca 4 let, hidrološke podatke in meritve kalnosti v sedemdesetih letih, ki smo jih dopolnili z odvzemom vzorcev sedimenta na štirih točkah znotraj ojezeritve v letu 2016.

3.1 REKA PESNICA IN AKUMULACIJA PERNICA I

Reka Pesnica je največji levi pritok reke Drave na slovenskem ozemlju. Izvira v Avstriji med Lučami in Jurijem na koti 430 m. n. v. ter se po 66 km struge pred Ormožem izliva v reko Dravo na nadmorski višini 194 m. Reka Pesnica je osrednji vodotok gričevja Slovenskih goric, ki se nahajajo med Muro in Dravo v smeri severozahod-jugovzhod. Prispevno območje, ki obsega cca 556 km², je v zgornjem toku nad Zgornjo Kungoto široko do 800 m, v spodnjem ravninskem delu pa je široko tudi do 3 km. Vsi večji pritoki prihajajo z leve strani, kjer so ustvarili ozke dolge doline, vzporedne z Goričkimi slemenami. Za reko je značilno, da skoraj v celoti odvajava vode iz območja Slovenskih goric, le del se izteka z območja Kozjaka (VGI, 1999).

Reka se deli v zgornji in spodnji del, vsak s svojimi značilnostmi. V zgornjem toku so do profila Hrastovec večji nakloni. Od profila Hrastovec, v spodnjem toku, pa reka teče v malih naklonih. V spodnjem toku je reka v preteklosti obširno meandrirala in posledično ob višjih vodah tudi poplavljala. Vsled temu so v letih 1966–1969 izgradili HMS Pesnica. Hidrogeografske značilnosti reke so se z izgradnjo hidromelioracijskega sistema hidromorfološko močno spremenile, saj se je izgradilo:

- 56 km regulacije reke Pesnice,
- 89 km ureditev pritokov reke Pesnice,
- 101 km melioracijskih jarkov,
- 8000 ha osuševalnih sistemov (drenaže),
- 7 večnamenskih vodnih zadrževalnikov (Juvan, 2009b).

Cilj izgradnje HMS Pesnica je bil zadrževanje visokovodnih pretokov do 50-letnih povratnih dob v polvkopanem sistemu. Ureditev odvodnje v tako imenovan polvkopanem sistemu je način regulacije, kjer se ustrezen pretočni profil zagotavlja z visokovodnimi nasipi. Pri tem sistemu je višina gladine vode v strugi (koritu) občutno višja od okoliškega terena, ki ga s temi ukrepi ščitimo pred poplavami. Za neoviran odtok notranjih in zalednih vod je bilo potrebno še zgraditi dodaten sistem odvodnje z melioracijskimi jarki in s sistemom zadrževalnikov, katerih osnovni namen je zadrževanje visokovodnih konic (VGI, 1999). V mokrih zadrževalnikih pa bi se akumulirana voda uporabljala za potrebe ribogojstva in namakanja kmetijskih površin (Klaneček, 2008). V porečju Pesnice je 7 akumulacij s pritoki: Pernica I (Pesnica), Pernica II (Vukovski in Jareninski potok), Pristava (Pesnica), Komarnik (Partijski potok), Radehova (Globovnica), Gradišče (Velka) in Savci (Sejanski potok).

HMS ni bil nikoli dokončno zgrajen, zato nikoli ni zadrževal pretokov prvotno predvidenih povratnih dob. Ob izgradnji avtocestnega odseka od Maribora do Lenarta je bil na odsekih med Dragučovo in Močno izločen velik del poplavnih retencij, kar bi lahko povzročilo povečanje visokih pretokov v dolvodnem delu povodnja. Za ublažitev poslabšanih razmer sta bili predvideni rekonstrukciji akumulacij AK Pernica I in AK Pristava. AK Pernica I je bila

rekonstruirana leta 2009, rekonstrukcija druge akumulacije na reki (AK Pristava) pa je bila končana v letu 2016. Rekonstruirani akumulaciji bosta skupaj omogočali zadrževanje visokovodnih valov 100-letne povratne dobe (Juvan, 2009b).

Sistem ima zaradi zelo velike mreže jarkov in nasipov visoke stroške vzdrževanja, ki bi jih rešili z ukrepom rekonstrukcije pretočnega profila v vkopan sistem. Takšna rekonstrukcija bi omogočala nižje stroške vzdrževanja in bolj sonaravno urejeno območje struge in brežin (Klaneček, 2008).

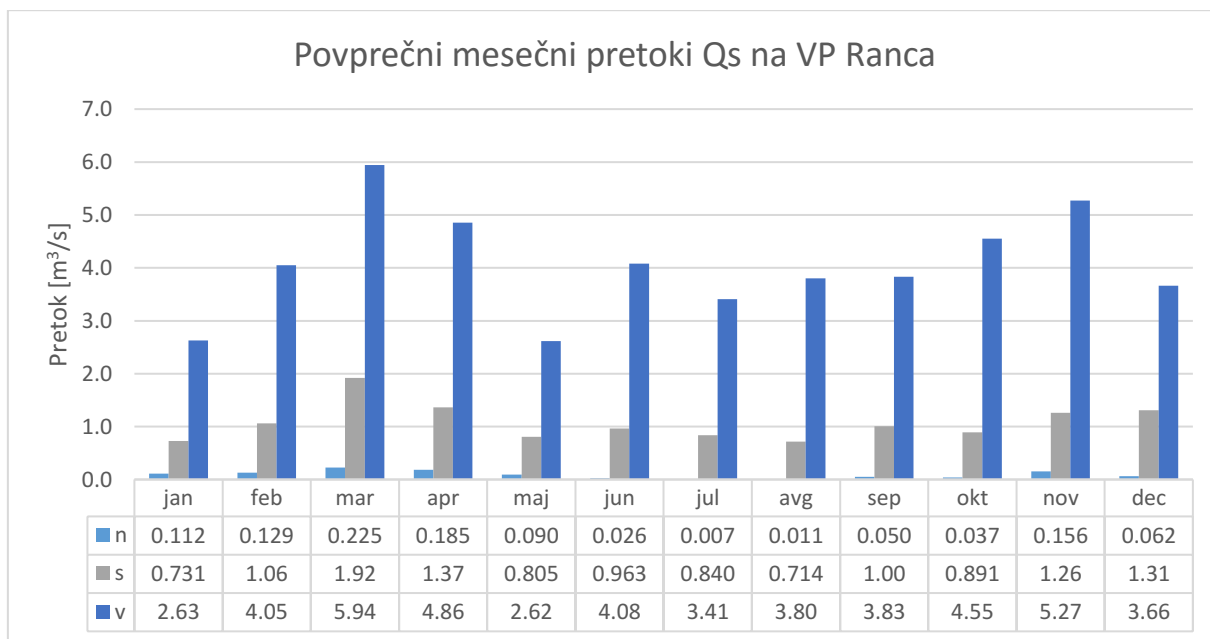
3.1.1 Hidrologija reke Pesnica

Hidrološki parametri na povodju reke Pesnice se spremljajo na treh vodomernih postajah. Vodomerna postaja Ranca, ki deluje že od leta 1954, je najbolj gorvodna in je tudi reprezentativna za našo analizo hidroloških razmer v povodju gorvodno od AK Pernica I. V srednjem delu reke Pesnica je vodomerna postaja Gočova ter v dolvodnem delu, pri izlivu v reko Dravo, vodomerna postaja Zamušani I.

Preglednica 9: Seznam vodomernih postaj na reki Pesnica (ARSO, 2013) * (Leitinger, 2012)

Postaja	Stacionaža [km]	F [km ²]	GKX [m]	GKY [m]	Kota "0" [m. n. v.]	Začetek opazovanja*
Ranca	50.87	83.80	161940	552580	250.270	1954
Gočova	32.42	281.14	157341	566968	224.460	1970
Zamušani I	9.86	477.80	141640	579855	201.856	1960

Dolgoletna opazovanja nam omogočajo analizo pretokov na vodotoku. Srednji povprečni pretok reke Pesnica na VP Ranca znaša 1,07 m³/s, kar jo uvršča daleč pod slovensko povprečje, ki znaša cca 20 m³/s (Leitinger, 2012). Pri tem je potrebno izpostaviti zelo nizko vodnatost v poletnih mesecih, kar povzroča veliko dovzetnost za eutrofikacijo vodotoka.



Slika 17: Povprečni mesečni pretoki na VP Ranca v obdobju 1959 –2013 (vir: ARSO, 2015)

Na podlagi izrednotenih srednjih mesečnih pretokov na VP Ranca je razvidno, da so poprečni najnižji pretoki v mesecu juliju in avgustu na izredno nizki ravni. Najnižji povprečni srednji mesečni pretoki so bili zabeleženi v mesecu januarju, najvišji pa v mesecu marcu. V mesecu marcu imamo prav tako zabeležene najvišje povprečne visoke pretoke. Iz meritev na vodomerni postaji so v hidroloških študijah izrednoteni karakteristični projektni pretoki za reko Pesnico na vtoku v AK Pernica in Vukovskega ter Jareninskega potoka v AK Pernica II.

Preglednica 10: Projektni pretoki karakterističnih povratnih dob na AK Pernica (vir: (VGB Maribor, 2012), *obstoječi iztok po *Pravilniku o obratovanju* (Juvan, 2009a)).

Akumulacija		Vodotok	F [km ²]	Q ₁₀ [m ³ /s]	Q ₁₀₀ [m ³ /s]	Q ₅₀₀ [m ³ /s]
Pernica II	Vtok	Vukovski in Jareninski potok	17,5	13	29	44
		Skupaj Pernica II	18,9	14	31	46
	Iztok:		18,9	4,1	9,5	14
Pernica I	Vtok	Pernica II	18,9	4,1	9,5	14
		Pesnica	109,8	56	124	190
		Skupaj Pernica I	129,9	58	128	196
	Iztok:		129,9	52	52	171
					84*	

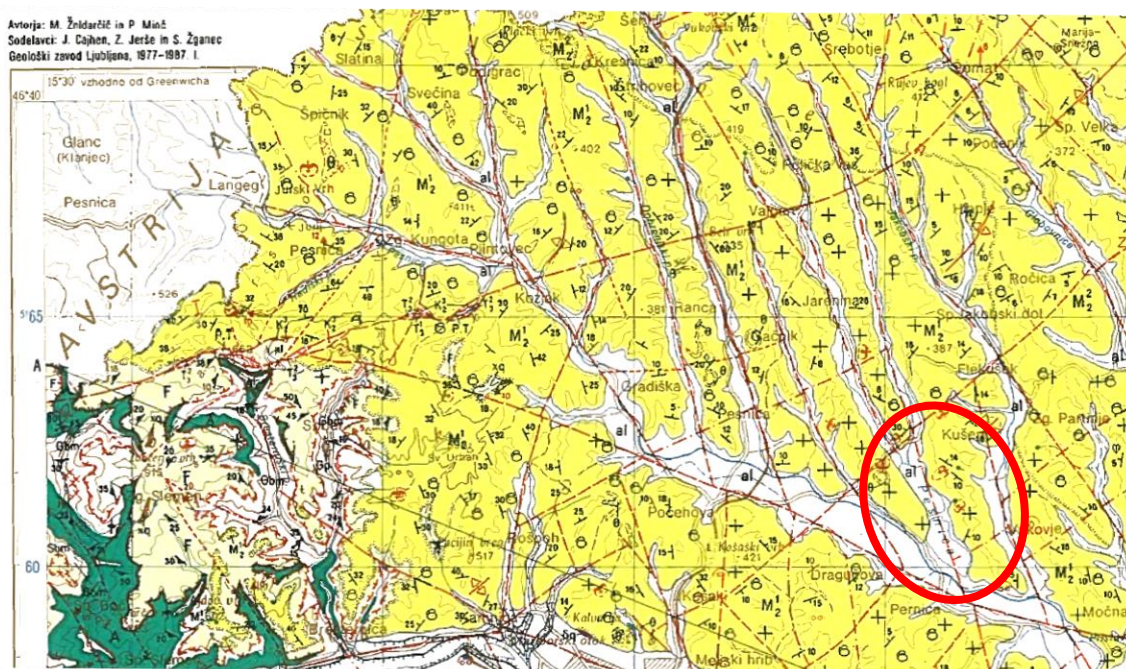
Reka ima tako velika nihanja med nizkimi in visokimi vodostaji, saj lahko hitro preide iz nizkih, skoraj ničlih pretokov v poplavne vode, ki prelijejo velika območja dolinskega dna. Temu močno prispevajo visoki nakloni v povodju in relativno nizki padci z neprepustno geološko podlago v dolinskem dnu, ki onemogočajo ponikanje vode, ter antropogeno močno preoblikovana rečna mreža.

3.1.2 Geologija doline reke Pesnice kot vir sedimenta

Proces erozije in količina erodiranega materiala, ki se premešča v vodotoke, sta odvisna od geoloških lastnosti v prispevnem območju akumulacije. Akumulacija Pernica je locirana v zgornjem toku reke Pesnice, zato bomo v nadaljevanju predstavili tektonske, geološke in pedološke lastnosti prispevnega območja ter rabo tal po CLC-Corine klasifikaciji.

Geološko področje Pesniške doline spada k Podravju, ki ga delimo na Vzhodne Alpe in Panonski bazen. Prispevni področje Pesniške doline pripada geotektonski enoti Panonskega bazena in tektonski enoti Slovenske gorice, slednji pripada prispevno področje Perniškega jezera. Morfologija terena je posledica več tektonskih ciklusov, ki so se na tem območju odvili v preteklosti. Depresijsko področje Panonskega bazena je nastalo s pogrezanjem starejše podlage (Vzhodne Alpe, Pohorje), v katero so se odlagali sedimenti, iz katerih so zgrajene Slovenske gorice. Teren lahko razdelimo na podenote mariborskega bloka, ki gradi gričevje med Pesniško dolino na severu in Dravsko dolino na jugu in na Jareninski blok, ki gradi pobočja severno od Pesniške doline med Mariborom in dolino Globevnice. Mariborski in jareninski blok razmejuje Pesniški prelom, ob katerem se je oblikovala dolina, ki je zasuta z do 16 m debelim slojem poplavno zaježitvenih sedimentov (Vodpreg, 2012).

Za geološko območje Pesniške doline je značilno, da je sestavljeno iz pliocenskih usedlin (peski, ilovice) reke Pesnice in manjših pritokov. Kvartalne (diluvijalne in aluvijalne) naplavine (prod, pesek, peščena glina) pa so zapolnile doline vodotokov doline Pesnice z njene leve strani (Partijski potok, Globovnica, Velka, Drvanja z Ročico). Gričevje je sestavljeno iz silikatnih tercialnih jezerskih morskih usedlin peska, gline, ilovic in laporja. Ti ob erozijskih procesih razpadajo in se spirajo v vodotoke predvsem kot suspendiran material oziroma del naravne kalnosti. Silikati iz morskih usedlin povzročajo nizek pH, ki je vzrok za kisle prste (Markoli, 2012). Analiza suspendiranih snovi na vtoku reke Pesnice v akumulacijo Pernica I v letu 2016 je pokazala, da so le-te sestavljene iz alumosilikatov s kalijem (K), z magnezijem (Mg) in s kalcijem (Ca), ki so posledica biogeokemičnih procesov v povodju (razgradnja organske snovi, raztapljanja karbonatov in biološka aktivnost) (Kanduč, et al., 2016).

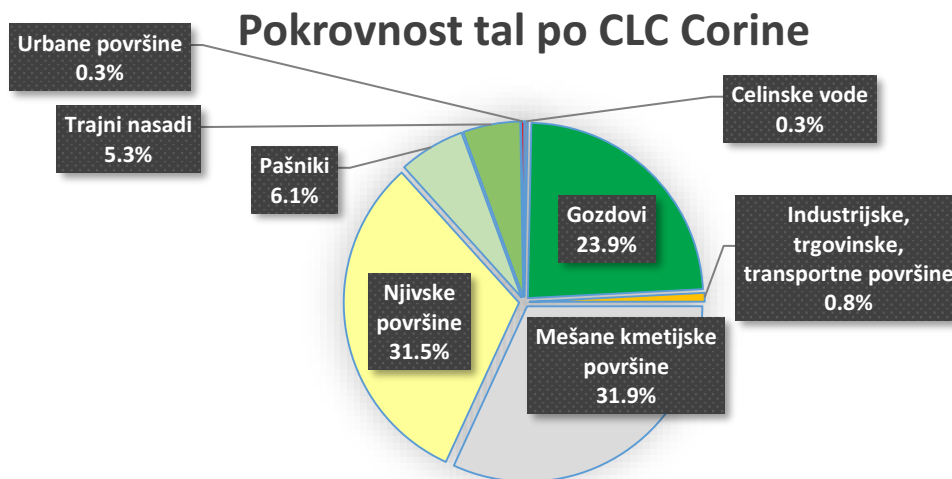


Slika 18: Geološka karta prispevnega območja AK Pernica, kjer vidimo prevladujoče območje laporjev iz obdobja krede, ki je obarvano z rumeno barvo, ter z belo obarvana aluvialna dna dolin. Z rdečim okvirjem je označeno območje akumulacije Pernica (vir: (Žnidarčič & Miač, 1987)).

Rezultat razpada kamnin, erozije in sedimentacije je prst, ki je eden najpomembnejših dejavnikov v pokrajini, saj pogojuje rabo tal in s tem vpliva na življenje ljudi. Prsti Slovenskih goric so zelo raznolike, saj so se razvile pod vplivom številnih naravnih in antropogenih dejavnikov (Markoli, 2012).

Glede na vpliv vode so prsti avtomorfne in hidromorfne. Na avtomorfne vpliva padavinska voda in ležijo v odcednih dolinah, nižinah, kotlinah in na vzpetem svetu, na hidromorfne pa talna, površinska in poplavna voda ter pokrivajo ravne ali vbočene dele površja. Na območju Slovenskih goric so med avtomorfnimi prstmi zastopane humusno akumulativne prsti, kambične prsti in antropogene prsti. Med naravnimi dejavniki, ki določajo tip prsti, so najpomembnejše kamnine. Velik del ozemlja pokrivajo laporji, gline in peski, ki dobro preperevajo in se razvijajo v evtrične karbonatne prsti. Peščenjaki preperevajo počasneje, ob tem pa se izlužijo karbonatne primesi in prst dobi kisle lastnosti. Zaradi odplakovanja imajo prsti na strmih pobočjih manj rastlinskih hranil kot tiste na položnejših. Dolinska tla so navadno

dobro oskrbljena s kalcijem, kalijem in fosforjem, vendar pretirano vlažna ali slabo zračna. Rjava karbonatno-lapornata prst nastaja na miocenskih laporjih, glinah in peskih, ki vsebujejo dovolj karbonatov (Markoli, 2012).



Slika 19: Deleži pokrovnosti zemljišč po klasifikaciji CLC Corine v porečju reke Pesnice do AK Pernica v Sloveniji (vir: (Atlas okolja, 2016))

Slika 19 prikazuje klasifikacijo rabe tal po skupni evropski metodologiji CLC (*angl. Corine-Land-Cover*) za območje porečja reke Pesnice do AK Pernica na območju Republike Slovenije. V porečju prevladujejo kmetijske površine različnih oblik, med njimi bi izpostavil 31,5% delež njivskih in mešanih kmetijskih površin, kjer je zemljina najbolj izpostavljena erozijskim procesom. Pri tem moramo biti pozorni na relativno nizek delež gozdnih površin, ki so v obsegu 23,9 %, kar vpliva tako na povečanje odtočnega koeficienta in posledično povečanje visokovodnih konic kakor tudi na posledične erozijske aktivnosti v povodju.

Karta erozijskih območij – opozorilna karta erozije in karta verjetnosti pojavljanja plazov so podlage, ki opozarjajo, da je prispevno področje AK Pernica med najbolj erozijsko ogroženimi območji v regiji. Na opozorilni karti erozije je večinski del prispevnega območja v območju strogega varovanja (območje prepovedi) obvodnega prostora. Na karti verjetnosti pojavljanja plazov je območje prav tako med bolj ogroženimi v regiji (Atlas okolja, 2016). Podatke na kartah erozije in plazljivih območjih potrjujejo tudi vizualni pregledi širšega območja in okolice akumulacije, kjer je bilo vidno veliko površinskih zdrsov in nagubanosti površja.

3.1.3 Akumulacija Pernica

Akumulacija se nahaja severovzhodno od mesta Maribor v občini Pesnica in severno od naselja Pernica. Akumulacija je sestavljena iz zgornje in spodnje akumulacije, katere ojezeritev imenujemo Perniško jezero. AK Pernica je mokri zadrževalnik za zadrževanje visokih vod v sklopu HMS Pesnica. Prvotna akumulacija, zgrajena med leti 1966–1968, je locirana na lokaciji bajerja, ki je služil kot naravna retenzijska površina za visoke vode, v smislu rabe pa kot pašnik za živino (Arhiv RS, 2016). Vsled tem naravnim topografskim dejavnikom ravninskega dna doline sta posledično obe akumulacijski ojezeritvi plitvi (obsegata veliko vodno površino in plitvo povprečno globino). Osnovna funkcija akumulacije je zmanjšanje visokovodnih valov in akumuliranje vode za sekundarne rabe. Akumulacija torej v smislu rabe vode služi

intenzivnemu ribištvu in ribogojstvu ter v manjši meri za potrebe namakanja v kmetijstvu. Vodni in obvodni prostor služita kot nadomestni habitat (Juvan, 2009a).

Značilnost sistema AK Pernica oziroma Perniškega jezera je, da je akumulacijski prostor ločen z vmesnim 420 m dolgo zemeljsko pregrado. Tako ločimo zgornjo (AK Pernica II) in spodnjo akumulacijo (AK Pernica I) (Juvan, 2009a). Akumulaciji sta v direktni medsebojni soodvisnosti, saj sta povezani z dvema betonskima objektoma – s prelivom in prepustom (Vodpreg, 2012). Zgornja akumulacija je pretočnega tipa in se imenuje Pernica II. Zadržuje poplavne vode Jareninskega in Vukovskega potoka s skupno 18,9 km² prispevnih površin in z zadrževalnim volumnom cca 1,4 hm³. Spodnja akumulacija je prav tako pretočnega tipa, saj se na njenem vzhodnem delu vanjo izliva reka Pesnica s 129,9 km² velikem prispevnim območjem in na severu skozi prepust in preliv višek iz akumulacije Pernica II. Volumen pri maksimalni zajezi znaša 2,18 hm³ (IZVRS, 2014).

Spodnja akumulacija Pernica I je bila leta 2006–2009 rekonstruirana v sklopu izgradnje avtoceste Maribor–Lendava–madžarska meja. Del pododseka avtoceste od km 2+500 do km 5+000 je bil delno predviden v območju obstoječe akumulacije, zato je bil izveden nov pregradni nasip, nov prelivni objekt s pripadajočo hidromehansko opremo in z varnostnim prelivom s podslapjem, urejen je bil odvzem in dovod vode za napajanje ribnikov, zavarovane in urejene so bile brežine ter očiščen del mulja iz dna akumulacije (Juvan, 2009a).



Slika 20: Fotografija zapornično-pregradnega objekta in pomožnih objektov spomladi leta 2016 (lasten vir)

3.1.3.1 Opis tehničnih karakteristik pregrade Pernica I

Ob rekonstrukciji AK Pernica I se je odstranil obstoječi fiksni preliv s projektirano koto stalne ojezeritve na 246,40 m. n. v. Projektirana stalna ojezeritev je bila nepooblaščno zvišana na koto 247,20 m. n. v., kar je še dodatno zmanjšalo zadrževalni volumen, namenjen zniževanju protipoplavnih konic (Juvan, 2007). Rekonstruiran zadrževalnik je tako prešel iz nenadzorovanega v nadzorovan iztok iz akumulacijskega bazena z ustrezno pregrado s pripadajočimi objekti in z napravami za optimalno obratovanje in zadrževanje visokovodnih dogodkov (Juvan, 2009a; Vodpreg, 2012). AK Pernica je sestavljena iz sledečih vodnogospodarskih objektov v splošni rabi:

Pregrada Pernica I, ki leži na južnem delu akumulacije, ima funkcijo regulacije pretokov in nivojev gladin v akumulaciji. Konstrukcijska višina pregrade je 9 m, kjer je krona pregrade na 250,50 m. n. v., dno pa na 241,50 m. n. v. Pregrada je sestavljena iz prelivnega dela v

armiranobetonski izvedbi, utrjenega s prelivnim pragom na levem bregu in s priključnim nasipom na visokovodni nasip na desnem bregu akumulacije.

Prelivni objekt ima funkcijo regulacije gladine v akumulaciji in iztoka iz akumulacije. Izveden je kot armirana betonska konstrukcija s širino 24 m in s čelno polkrožno steno z rešetkami na vtoku, ki služijo kot prepreka za ribe in zadržujejo plavje. Prelivni prag je na koti 244,50 m. n. v. Preliv je razdeljen na 2 pretočni polji širine 10,50 m, ki sta opremljeni s segmentnima zapornicama z višino 4 m na hidravlični pogon. Prelivni objekt se nadaljuje v podslapje, ki je hkrati tudi podslapje varnostnega preliva in izlovna jama za ribe.

Varnostni preliv, obložen s protierozijsko oblogo iz kamna v betonu, je lociran ob levem boku prelivnega objekta kot znižan del visokovodnega nasipa. Kota krone 25 m širokega varnostnega preliva znaša 249,00 m. n. v.



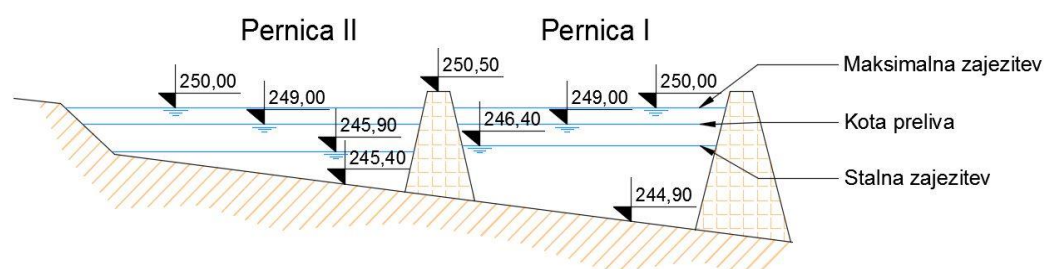
Slika 21: Popolnoma zaprti segmentni zapornici dne 1. aprila 2016 na pregradi Pernica I (lasten vir)

Visokovodni nasip, ki poteka vzporedno s potekom avtoceste, je homogen in simetrične trapezne oblike (naklon brežin 1:2,5) ter izveden z zemeljskim materialom (iz lokalnih koherentnih zemljin). Funkcija nasipa je omejitev zadrževalnika na jugozahodni strani in hkrati predstavlja zaščito avtocestnega odseka. Nasip je v centralnem delu visok 6 m, širina krone znaša 4 m in ni povozna. Kota krone nasipa je na 250,5 m. n. v. z varnostno višino 1,5 m glede na nivo maksimalne ojezeritve, ki znaša 249,0 m. n. v.

Proti vodni strani je izveden **varovalni nasip**, ki hkrati služi kot nadomestni habitat z bujno vegetacijo. Krona varovalnega nasipa je na koti 248 m. n. v. Varovalni nasip sestoji iz dveh lesenih pilotnih sten z vrbovim popletom, ki sta na medsebojni razdalji 12 m. V vmesni prostor med pilotnimi stenami je položen geosintetik (filc) in nato zapolnjen z izkopanim muljem, tj. sedimentom iz poglobitve akumulacije v času rekonstrukcije. Muljni zasip je izveden tudi na severni brežini akumulacije z leseno pilotno steno in s popletom, ki ima funkcijo protierozijske zaščite, ter na umetnem otoku na severno-vzhodnem delu akumulacije.

Preglednica 11: Pregled osnovnih karakteristike akumulacije Pernica (IZVRS, 2014)

Akumulacija	Pernica I	Pernica II
Vodotok	Pesnica	Vukovski in Jareninski potok
Leto izgradnje/rekonstrukcije	1968/2009	1968
Pripevna površina [km ²]	129,9	18,9
Volumen akumulacije [m ³]	2.178.000	1.400.000
Površina pri maks. zaježitvi [ha]	68	55
Površina pri osnovni gladini [ha]	40	35
Višina pregrade [m]	9	5
Dolžina pregrade [m]	1750	421
Kota vrha pregrade [m. n. v.]	250,5	250,5
Kota maks. zaježitve [m. n. v.]	250	249
Kota zaježitve - preliv [m. n. v.]	249	248
Kota stalne gladine [m. n. v.]	246,4	245,75
Kota dna akumulacije [m. n. v.]	244,9	245,4
Dejavnost/raba	zadrževanje v. v., ribogojstvo, namakanje	zadrževanje v. v., ribogojstvo



Slika 22: Karakteristični prerez Perniškega jezera s ključnimi višinskimi kotami v metrih nadmorske višine (prirejeno po (Blažeka & Petkovšek, 2014))

Obratovanje akumulacije

Obratovanje je definirano po *Pravilniku o obratovanju ...* (Juvan, 2009a) za sledeča tri stanja:

a) Obratovanje pri visokih vodah

Osnovna funkcija zadrževalnika Pernica I je zadrževanje visokih vod Pesnice, ko je dotok v akumulacijo večji od 84 m³/s, kar predstavlja prevodnost prelivnega objekta pri popolnoma dvignjenih zapornicah in gladini v akumulaciji na koti stalne ojezeritve 246,40 m. n. v.:

- Ob normalnih pogojih regulacija zapornic zadržuje gladino na koti 246,4 m. n. v.
- Ko dotok visoke vode doseže pretok $84 \text{ m}^3/\text{s}$, so zapornice v gornjem položaju, gladina na prelivu pa je enaka stalni koti gladine na 246,4 m. n. v.
- Če dotok v akumulacijo še narašča, se zapornice postopno spuščajo, tako da odtok ne presega maksimalnega pretoka. Če gladina še nadalje narašča nad koto 249,0 m. n. v., ostaja odprte zapornice enako kot pri koti 249,0 m. n. v., prične se prelivanje čez zgornji rob zapornic in preko varnostnega preliva na koti 249,0 m. n. v.
- Ko se pretok manjša in gladina upada, se zapornice zopet postopoma dvigujejo glede na koto gladine v akumulaciji in s tem vzdržujejo stalni odtočni režim pri $84 \text{ m}^3/\text{s}$.
- Ko je zopet dosežena gladina v akumulaciji na koti 246,4 m. n. v., se pričnejo zapornice spuščati z uravnavanjem gladine na stalni koti.

b) Obratovanje pri nizkih vodah

Pri nizkih vodah Pesnice in Vukovskega ter Jareninskega potoka (odtok iz Pernica II) se z zapornicami na prelivnem objektu vzdržuje stalna ojezeritev na koti 246,40 m. n. v.; odtok iz akumulacije je enak dotoku. Po stari strugi Pesnice se na odvzemnem objektu nad akumulacijo zagotavlja ekološko sprejemljivi pretok po strugi stare Pesnice v količini $Q_{ES}=140 \text{ l/s}$ (v marcu, aprilu in maju) oziroma $Q_{ES}=80 \text{ l/s}$ (v ostalih mesecih).

c) Polnjenje – praznjenje akumulacije

Za potrebe izlova rib je predvideno praznjenje akumulacije v pozno jesenskem času (oktober). Dovoljena dinamika praznjenja akumulacije je $0,3 \text{ m/dan}$.

3.1.3.2 Vzdrževanje in opazovanje AK Pernica

Za obratovanje in vzdrževanje objekta je zadolžen izvajalec, ki ima sklenjeno pogodbo za izvajanje obvezne gospodarske javne službe na področju urejanja voda. Odgovoren je tudi za izvajanje vzdrževalnih del in nadzor nad njimi (Vodpreg, 2012).

Vzdrževanje po *Pravilnik o obratovanju ...* (Juvan, 2009a) akumulacijskega bazena obsega:

- redno nego in redčenje zarasti na brežinah akumulacije,
- vzdrževanje protierozijskega zavarovanja brežine in sanacije erozijskih zajed,
- spremljanje zamuljevanja akumulacijskega bazena z izvedbo periodičnega geodetskega posnetka bazena (10 let),
- odstranjevanje plavja, ki se nabira v zatokih bazena ter na vtoku in prelivnih ali odvzemnih objektih, z odvozom v deponijo.

Vzdrževanje visokovodnega nasipa obsega predvsem košnjo, sečnjo zarasti, sanacijo poškodb in opreme. Vzdrževanje pregrade obsega vzdrževanje konstrukcijskega dela preliva s podslapjem in hidromehanske opreme. Za vzdrževanje objektov za rabo vode so zadolženi uporabniki vode (ribogojstvo, namakanje).

Opazovanje in nadzor objekta akumulacije Pernica vrši rečno nadzorna služba upravljavca objekta, ki ima sklenjeno pogodbo za izvajanje obvezne gospodarske javne službe na področju urejanja voda. V okviru opazovanja objekta je potrebno (Juvan, 2009a):

- izvajati kontrolo stanja nasipa in posameznih objektov akumulacije,
- kontrolirati eventualne pojave mokrotnih mest v peti nasipa,
- periodično, na vsakih 5 let, z geodetskimi meritvami evidentirati eventualne deformacije in posedanje pregradnega nasipa in prelivnega objekta,
- periodično, na vsakih 10 let, z geodetskim posnetkom dna akumulacije evidentirati

zamuljevanje akumulacijskega bazena,

- kontrolirati stanje kote gladine v akumulaciji,
- po vsakokratnem nastopu pojava visokih vod in ostalih izrednih dogodkih (potres, nedovoljen poseg v območja objektov, itd.) pregledati stanje objekta in eventualne poškodbe (Vodpreg, 2012).

3.1.3.3 Upravno zakonska ureditev in klasifikacija pregrade

V Sloveniji se za klasifikacijo pregrad in jezov uporabljata dve uradni evidenci:

- a) Po *Zakon o vodah* (Ur. l. RS, 67/02) je akumulacija klasificirana v Seznam obstoječe vodne infrastrukture (Ur. l. RS, 63/06). V Seznamu vodne infrastrukture so objekti razvrščeni v dve skupini, kjer Skupina I predstavlja seznam 28 pregrad in jezov z zadrževalnikom s stalno ojezeritvijo ter Skupina II seznam 9 suhih zadrževalnikov.
- b) Uradna evidenca Slovenskega nacionalnega komiteja za velike pregrade SLOCOLD, ki zajema 41 pregrad, ki ustrezajo klasifikacijskim kriterijem združenja ICOLD (*angl. International Committee On Large Dams*) za velike pregrade:
 - višina med najnižjo točko temeljev in kono pregrade je več kot 15 m,
 - kono jezovne zgradbe je daljša od 500 m,
 - volumen zadrževalnika je večji od 1 hm³,
 - pretok čez jezovni profil je večji od 2000 m³/s,
 - posebni pogoji temeljenja in izvedbe pregrade,
 - objekti, ki so višji od 5 m in zajemajo volumen akumulacije večji od 3 hm³ (Vodpreg, 2012).

Akumulacije Pernica I je uvrščena po Seznamu vodne infrastrukture (Ur. l. RS, 63/06) v Skupino I z inventarno številko 12523056072. Po klasifikaciji ICOLD akumulaciji ne ustreza kriterijem za uvrstitev med velike pregrade. V projektu VODPREG (Vodpreg, 2012) je AK Pernica glede na tveganje klasificirana v razred srednjega tveganja na 5 stopenjski porazdelitvi v razrede. Prav tako je uvrščena v razred srednjega tveganja na 4 področjih ocenjevanja (osnovni parametri pregrade, stanje projektne in obratovalne dokumentacije, obratovanje, tveganja) ter v razred malega tveganja na področju stanja objektov in opreme.

3.1.3.4 Problemi na AK Pernica

Vodna infrastruktura je močno podvržena vplivom okolice na objekt in njegovo delovanje. Tudi na AK Pernica so se pojavile številne pomanjkljivosti za upravljalce oziroma za njegove lastnike in uporabnike. V sklopu Projektne naloge: »Analiza obstoječega stanja na AK Pernica« (MOP, 2015) je bodoči upravljalec na podlagi izkušenj ugotovil in izpostavil problematiko na akumulaciji:

a) Ekološko stanje vodnega telesa

Ekološko stanje površinskih voda se ocenjuje na podlagi bioloških, fizikalno-kemijskih in hidromorfoloških elementov ter posebnih onesnaževal. Akumulacija Perniško jezero je po določbah okvirne Vodne direktive (Direktiva, 2000/60/EC) klasificirana kot hidromorfološko močno preoblikovano vodno telo (MPVT) (MOP, 2016). To je vodno telo, za katerega je značilno, da ima zaradi antropogenega fizičnega delovanja močno spremenjene značilnosti. Hidromorfološke obremenitve so posledica izgradnje pregradnega objekta in s tem vpliv na hidrološke in morfološke lastnosti vodnega telesa.

Legenda: VTJ – vodno telo – naravno jezero, MPVT – močno preoblikovano vodno telo, UVT – umetno vodno telo
* ni ustreznih metodologij za oceno ekološkega stanja oziroma potenciala za MPVT

Šifra VT	Ime VT	BIOLOŠKI ELEMENTI				SPLOŠNI FIZIKALNO-KEMIJSKI ELEMENTI				POSEBNA ONESNAŽEVALA	HIDROMORFOLOŠKI ELEMENTI	EKOLOŠKO STANJE / EKOLOŠKI POTENCIAL	RAVEN ZAUPANJA
		FITOPLANKTON	FITOBENTOS in MAKROFITI	BENTOSKI NEVRETNČARJI	RIBE	PROSOJNOST (secchijska globina)	HRANILA (Celotni fosfor µg P/L)	ZAKISANOST (pH)	KISIKOVE RAZMERE (nasičenost O ₂ v hipolimniju)				
SI38VT34	MPVT zadrževalnik Perniško jezero	SLABO	*	*	*	ZMerno	ZMerno	ZELO DOBRO	*	DOBRO	ocena ni potrebna	SLAB ali slabši	srednja

Slika 23: Ocena ekološkega potenciala za akumulacijo Perniško jezero (ARSO, 2017)

V okviru mreže merilnih mest državnega monitoringa kakovosti površinskih voda po zahtevah Vodne direktive (Direktiva, 2000/60/EC) se na Perniškem jezeru od leta 2007 izvaja vrednotenje kemijskega in ekološkega stanja vodnega telesa. Akumulacija ne dosega dobrega ekološkega stanja, saj nima ustreznega biološkega in hidromorfološkega stanja.

Cilj po Vodni direktivi (Direktiva, 2000/60/EC) in aktualnega Načrta upravljanja voda NUV II (MOP, 2016) je izboljšanje, torej doseganje ciljnega dobrega ekološkega stanja akumulacije do konca 2027.

b) Visoke vode, problematika plavja

Zapornice oziroma grablje na vtoku v prelivni del, ki so namenjene za preprečevanje uhajanje rib iz akumulacije, predstavljajo sorazmerno veliko hidravlično oviro. Vsled temu se pred rešetkami nabira lesno plavje, ki lahko ob visokih vodah povzroči zamašitev in ustvarjanje dodatne zajeze. Prav tako predstavlja čiščenje plavja znaten strošek, saj se mora izvajati s plovnim bagrom. V projektu VODPREG (Vodpreg, 2012) predlagajo možnost dviga rešetak ob visokih vodah.

c) Dolgotrajna sušna obdobja

V času dolgotrajnih poletnih sušnih obdobjih prihaja zaradi specifičnih hidroloških razmer ob zelo nizkih pretokih reke Pesnice in veliki površini plitve akumulacije ter posledično dolgih zadrževalnih časov. Posledično prihaja do intenzivnega »cvetenja« fitoplanktona – cianobakterij (*lat. Aphanizomenon flos aquae*) oziroma eutrofikacije (prekomerna akumulacija hranilnih snovi). V avgustu leta 2010, 2013 in 2017 je prišlo do pomanjkanja kisika v vodi in pogina več kot 20 ton rib (Spletni portal Siol, 2013). Razloga za pojav sta predvsem plitvost akumulacije in preobremenjenost s shranili iz kmetijskega zaledja.

d) Stabilnost pregrade med akumulacijama in vzhodne brežine

Pregrada med akumulacijo Pernica I in II, je zaradi dotrajanosti potrebna ustrezne sanacije (Blažeka & Petkovšek, 2014). Lesena pilotna stena je zaradi nižjega vodostaja spodnje akumulacije po rekonstrukciji izpostavljena nihanju gladin in posledično preperevanju.

e) Kemijsko stanje sedimenta

V sklopu analize vpliva kmetijstva na kemijsko in ekološko stanje voda so se izvedle kemijske analize sedimenta, ki so pokazale, da so koncentracije pesticidov pod vrednostjo 0,005 mg/kg suhe snovi. Atrazin in desetilatrazin nista bila zaznana, zaznane pa so bile neznatne vsebnosti metolaklora. Iz rezultatov lahko sklepamo, da se v sedimentu ne kopičijo pesticidi (ERICo in Limnos, 2008).

Pomembno dejstvo je klasifikacija sedimenta glede na vsebnost hranil, kar je zelo pomembno ob morebitnemu odvzemu sedimenta iz akumulacije. Sediment zaradi previsoke vsebnosti

celotnega dušika in fosforja ni primeren za nasipavanje stavbnih zemljišč in nasipavanja območij mineralnih surovin za zapolnitev tal po izkopu. Sediment pa ima ustrezne parametre za uporabo pri rekultivaciji tal in nasipavanja spodnjih plasti kmetijskih zemljišč za globino vnosa do 2 m. Vzorec pri rečnem ustju bi bilo potrebno dodatno obdelati, saj so bile vrednosti celotnega fosforja presežene (ERICo in Limnos, 2008).

f) Zaplavljanje akumulacijskega prostora in sedimentacija na akumulaciji

Na območju vtoka reke Pesnice v akumulacijo se tvori naplavni vršaj, ki posega v volumen akumulacije in osnovno pretočnost reke Pesnice. Ta problematika predstavlja osnovno izhodišče za temo te magistrske naloge, saj veliko zgoraj naštetih problemov izhaja iz vzroka zamuljevanje akumulacije. V *Pravilniku o obratovanju ...* (Juvan, 2009a) je predvideno periodično čiščenje mulja, vendar so stroški odstranitve in deponiranje mulja (sedimenta) zelo veliki.

V zaključkih projekta VODPREG (Vodpreg, 2012) avtorji navajajo:

»V akumulaciji se nahaja velika količina sedimenta, ki negativno vpliva na pretočnost, zmanjšuje akumulacijski volumen in posledično poplavno varnost, v poletnih mesecih povzroča smrad, vpliva na zdravje živali v njem ter vpliva na kakovost življenja okoliških prebivalcev. V sedimentih so odložena hranila, ki prehranjujejo rastlinski del biocenoze, v primernih termičnih pogojih je prisotno cvetenje modrozelenih alg.«

3.2 SISTEM – VHODNI PODATKI

Analiza in priprava vhodnih podatkov je bistvena v procesu modeliranja poteka morfoloških sprememb. Ti nam predstavljajo robne pogoje in pogoje za uspešno izdelavo ter kasnejšo kalibracijo in validacijo matematično-hidravličnega modela. Pri sedimentacijskih modelih so predvsem potrebni večletni periodični ali zvezni sklopi podatkov z visoko zanesljivostjo. V modelu sedimentacije izhajamo iz treh sklopov podatkov – hidrološki podatki, topografski podatki in lastnosti sedimenta.

Model spremembe morfologije akumulacije bo simuliral obdobje med leti 2009 in 2013, v katerih je bila posneta batimetrija akumulacije. Za to obdobje smo pridobili tudi hidrološko-hidravlične parametre. Hidrološki podatki so pridobljeni iz gorvodno od akumulacije, ležeče vodomerne postaje Ranca, kjer smo pridobili urne vrednosti gladin in pretokov reke Pesnice (Kobold, 2016). Od podjetja VGP Drava Ptuj d. o. o. (Ivanuša, 2016) smo pridobili podatke meritev gladin pred in za rešetko ter zvezne podatke o višini posamezne segmentne zapornice na pregradi Pernica I. Podatke o kalnosti smo privzeli po dnevnih meritvah kalnosti na vodomerni postaji Ranca v obdobju 1967–1973 ter meritve v letih 1975 in 1978, saj novejših meritev ni bilo (ARSO, 2016). Karakteristike sedimenta oziroma mulja v akumulaciji smo pridobili iz terenskega vzorčenja na akumulaciji in laboratorijskih analiz (KMTal, 2016).

Časovni obseg hidrološkega dogodka je definiran s časovnim obsegom pridobljenih iz obstoječih podatkov. Začetni pogoj simulacije nam predstavlja podatek batimetrije dna akumulacije iz leta 2009, vendar so se meritve gladin na akumulaciji pričele izvajati z dnem 1. 6. 2010. Končni podatki simulacije so podani z meritvami batimetrije v oktobru leta 2013.

Zaradi navedenega smo za časovno obdobje simulacije izbrali obdobje med meritvami batimetrije dna od 1. avgust 2009 do 30. oktobra 2013.

3.2.1 Topografski podatki in batimetrija na območju akumulacije

Za natančno modeliranje morfoloških sprememb moramo imeti ustrezno pripravljene geometrijske podatke območja obdelave za vsaj dve časovni obdobji. Topografske podatke za obravnavano območje akumulacije smo pridobili iz več virov, saj smo za potrebe modela morali izdelati digitalni model višin celotnega območja razlivanja v akumulaciji Pernica I. Podatke smo pridobili iz sledečih virov:

- **Meritve batimetrije in brežin po rekonstrukciji**

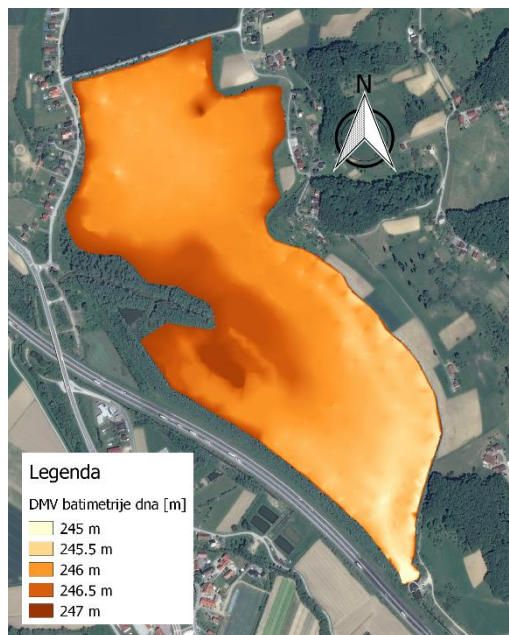
Meritve batimetrije so bile opravljene v sklopu Projekta izvedenih del po rekonstrukciji med leti 2006 in 2009. Z uporabo ultrazvočnim globinomerom Odom Hydrotrack se je izmerila batimetrija akumulacija. Brežine so se izmerile z uporabo klasične geodetske izmere (Krajnc, 2009; Slatinšek, 2016). V sklopu meritev ni bilo izvedenih meritev na območju pregrade, kakor tudi dna vtočnega dela reke Pesnica južno od mostu regionalne ceste do osrednjega območja naplavnega vršaja. Pridobljeni podatki so bili v obliki 3D točk v .xyz formatu v Gauß-Krügerjevem koordinatnem sistemu D48.

- **Meritve prečnih profilov reke Pesnice nad območjem akumulacije**

K meritvam smo dodali tudi meritve prečnih profilov reke Pesnice nad izlivom v AK Pernica do stacionaže 47+259.51 (VGB d. o. o., 2010). Podatki so bili v obliki grafičnih prečnih profilov in tlorisne situacije v AutoCAD (.dwg) formatu in starem koordinatnem sistemu D48.

- **Meritve batimetrije akumulacije v letu 2013**

V oktobru 2013 so se izvedle meritve batimetrije vodnega dela akumulacije z uporabo hidrografske enosnopnega sonarja Furuno FCV 667. Meritve so bile omejene na območje omočenega dela akumulacije, natančnost izmere pa je pod 1 dm. Podatki so v rastrskem podatkovnem formatu (GeoTIFF) v velikosti celic 2x2m (Harpha Sea d. o. o., 2013), v novem koordinatnem sistemu Transverse Mercator D96.



Slika 24: Vizualiziran izsek izmere batimetrije AK Pernica v letu 2013 (Harpha Sea d. o. o., 2013)

- **Podatki brežin iz podatkov LIDAR iz leta 2011**

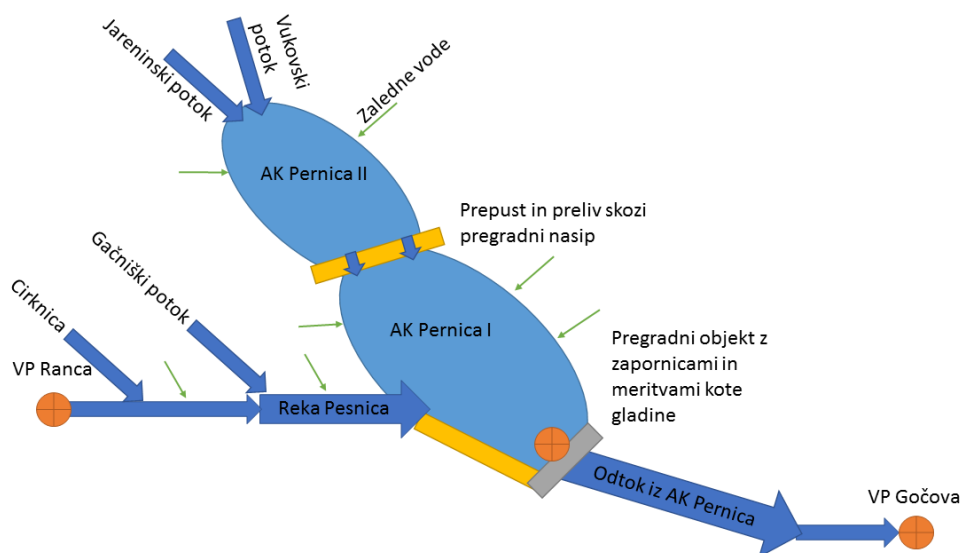
Za izdelavo digitalnega modela terena celotne akumulacije (do kote 250 m. n. v) smo pridobili in obdelali podatke brežin in suhega dela akumulacije iz laserskega skeniranja LIDAR iz leta 2011 v obliki blokov v velikosti 1 km² višinske natančnosti do 15 cm. Podatki so v vektorski obliki kot klasificiran oblak točk, ki so bile klasificirane kot tla v .zlas formatu, v starem in novem koordinatnem sistemu (GEOIN, 2011).

3.2.2 Hidrološki podatki in hidravlični robni pogoji

Osnovni vhodni podatki pri modeliranju hidravličnih pojavov v vodotokih so izmerjeni pretoki na vodomernih postajah, rezultati izračunov odtoka iz prispevnih površin ali pa statistično določeni pretoki karakterističnih (projektnih) povratnih dob. Hidravlične izračune lahko v odvisnosti od kompleksnosti modela izvedemo z uporabo stalnega toka s konstantnim pretokom ali za nestalni tok, kjer se pretok v hidrogramu spreminja v odvisnosti od časa (Steinman, 2010).

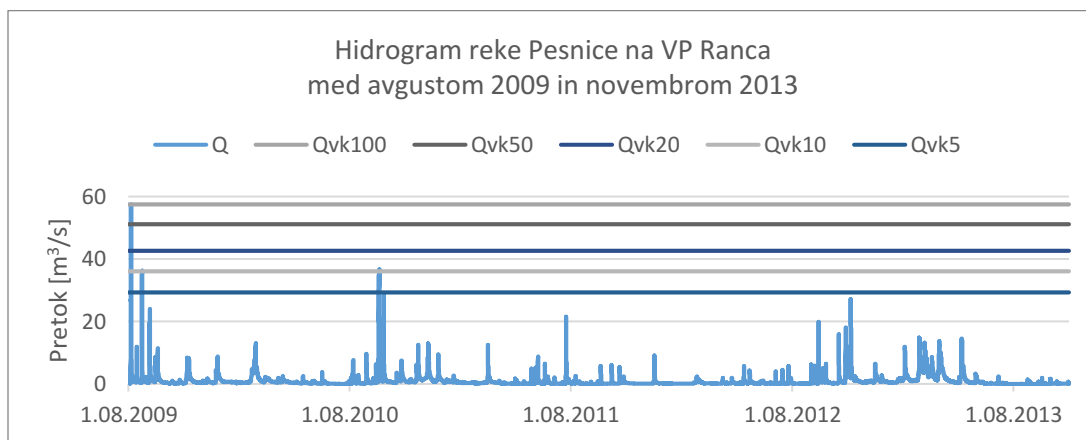
Za potrebe hidravličnega modela AK Pernica smo uporabili podatke, pridobljene na vodomerni postaji Ranca, ki leži gorvodno od akumulacije. V simulaciji bomo uporabili urne podatke pretokov na vodomerni postaji Ranca med avgustom 2009 in oktobrom 2013. Iz hidrograma in

krivulje trajanja pretokov vidimo, da so pretoki reke Pesnice zelo nizki, saj se 95 % odtoka odvija pod cca $4 \text{ m}^3/\text{s}$. Relativni visoki nakloni v zgornjem delu povodja se izražajo v izrazitih ozkih konicah visokovodnih valov. Povprečni pretok v obravnavanem obdobju je bil $0,987 \text{ m}^3/\text{s}$ s standardno deviacijo $2,43 \text{ m}^3/\text{s}$. Najvišji pretok $57,5 \text{ m}^3/\text{s}$ je bil izmerjen 3. avgusta 2009, minimalni pretok pa $0,007 \text{ m}^3/\text{s}$ v sušnem obdobju 23.–29. julija 2010.



Slika 25: Odtočna shema obravnavanega območja AK Pernica I

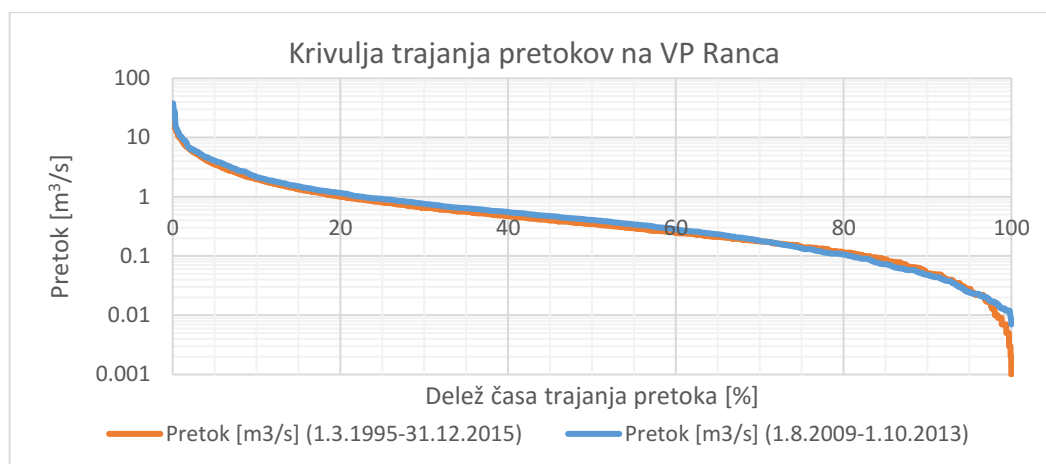
V obravnavanem obdobju je bil en dogodek s pretoki, ki so imeli 50-letno povratno dobo in dva dogodka, ki sta preseгла pretoke 10-letnih povratnih dob. Za reko Pesnico je značilen dežno-snežni režim. Za ta tip režima je značilno, da je mešani tip režima, njegovi značilnosti pa sta po dva letna maksimuma in minimuma. Glavni maksimum nastopi v zgodnji pomladi, ki v obravnavanem obdobju ni tako izrazit, sledi mu drugi maksimum v septembru, medtem ko glavni minimum nastopi poleti, sekundarni pa pozimi. Sezonskost obdobja višjih pretokov je jasno razvidna iz hidrograma opazovanega obdobja.



Slika 26: Hidrogram pretoka in karakteristični pretoki na VP Ranca (Kobold, 2016)

V primerjavi krivulj trajanja pretokov na VP Ranca za obdobje simulacije (1. 8. 2009–1. 10. 2013) in krivulje trajanja pretokov na skoraj 20-letnem nizu (1995–2015) lahko prepoznamo odstopanja obravnavanega obdobja od dolgoletnega povprečja. Razlike se pojavljajo na celotnem spektru pretokov; zaradi kratkega intervala izbranega obdobja nismo zabeležili veliko

visokovodnih dogodkov, zato krivulja daljšega časovnega obdobja izkazuje višje vrednosti velikih pretokov pri enakem deležu trajanja. V območju srednjih pretokov izkazuje izbrano opazovano štiriletno obdobje višje povprečne pretoke. V območju nizkih pretokov je dolgoletno opazovanje obsegalo pretoke, ki se približujejo območju stoječe vode.



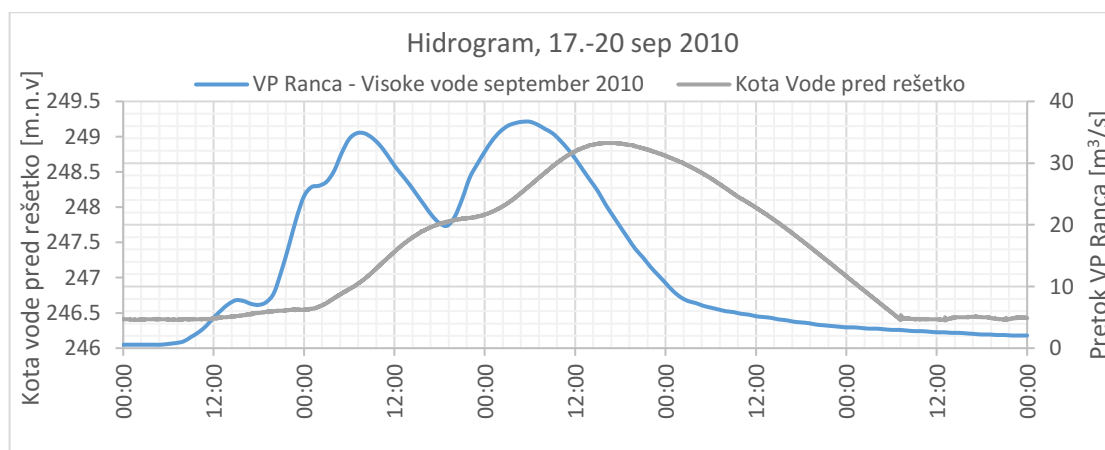
Slika 27: Krivulja trajanja pretokov reke Pesnice na VP Ranca za obdobje 1995–2015 in obdobje med meritvami dna akumulacije 2009–2013 (ARSO, 2016)

Pri določitvi vtoka iz AK Pernica II v spodnjo AK Pernica I preko betonskega prepusta in preliva se srečujemo s problemom določitve odtočnih količin v odvisnosti od časa, saj nimamo niti meritev niti pretokov na vodotokih niti meritev gladin na akumulaciji.

Za potrebe hidravlično matematičnega modela smo predpostavili, da se zaradi relativno malega zaledja ($19,8 \text{ km}^2$) in usedanja sedimenta v zgornji akumulaciji vtok iz AK Pernica II v spodnjo akumulacijo zanemari.

3.2.2.1 Določitev hidrograma za poskusno simulacijo

Zaradi kompleksnosti modela se računski časi zelo podaljšujejo. Posledično smo za potrebe spoznavanja hidravličnega in morfološkega dela simulacije privzeli krajše obdobje poplavnega dogodka na reki Pesnica v obdobju simulacije. Uporabili smo poplavni dogodek, ki se je zgodil po obilnih padavinah v septembru leta 2010. Pretoki so dosegli 20-letno povratno dobo.



Slika 28: Pretoki na VP Ranca in višina gladine v AK Pernica (Ivanuša, 2016)

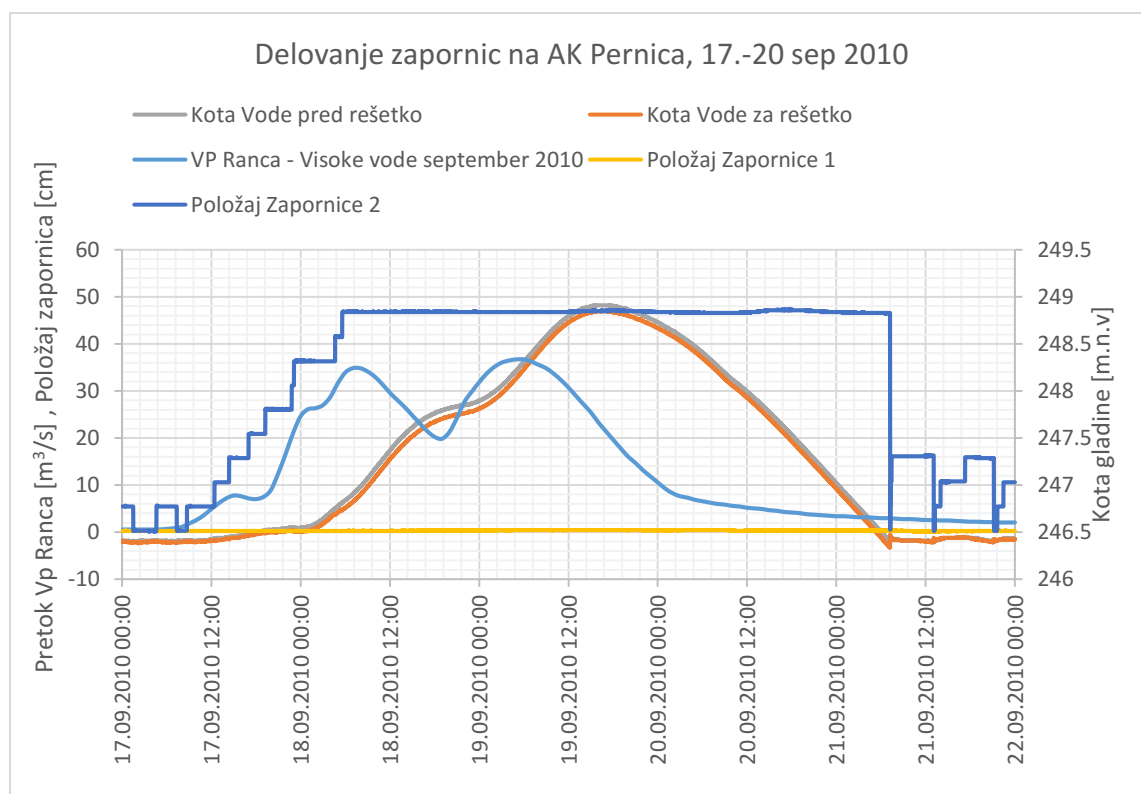
Na grafu je opazen časovni zamik pri vrhu konice hidrograma na vodomerni postaji in točka dosega najvišje kote na akumulaciji. Časovni zamik je posledica razdalje med VP Ranca in AK Pernica, prav tako pa ne upošteva pritoka reke Cirknice in Gačniškega potoka.

3.2.2.2 Delovanje zapornic na pregradi Pernica

Za spremljanje in nadzor nad delovanjem akumulacije se pri pregradnem objektu zvezno spremlja in meri podatke štirih točk; dva niza podatkov predstavljajo meritve višine dviga glavnih segmentnih zapornic, druga dva niza pa sta podatka višine vode v akumulaciji, ki se merijo pred in za rešetkami za plavje. V primeru velike višinske razlike upravljalec zazna, da se je nakopičila večja količina plavja na rešetkah in da ga je za zagotavljanje pretočne sposobnosti rešetk potrebno odstraniti.

Zapornice na akumulaciji delujejo z uporabo hidravličnega pogona. V opazovanem obdobju so se delno upravljale avtomatsko in delno ročno. Po *Pravilniku o obratovanju ...* (Juvan, 2009a) je predvidena avtomatska regulacija, vendar se ta ni izvajala, saj še ni bila izgrajena rekonstrukcija dolvodne akumulacije Pristava.

Pridobljeni podatki meritev z območja zapornic ne obsegajo podatkov za prvih 10 mesecev, saj se merjeni niz pridobljenih podatkov prične s 1. junijem 2010. Prav tako prihaja do odstopanj zaradi fizičnega prestavljanja sond zaradi vandalizma. V nizu meritev se pojavljajo napake tudi zaradi okvar merilne sonde, do izmerjenih napačnih nihanj gladine prihaja predvsem v zadnjih 3 mesecih opazovalnega obdobja..



Slika 29: Manipulacija zapornic na pregradi Pernica v drugi polovici septembra 2010 (Ivanuš, 2016)

3.2.3 Razpoložljivi podatki o lastnostih sedimenta

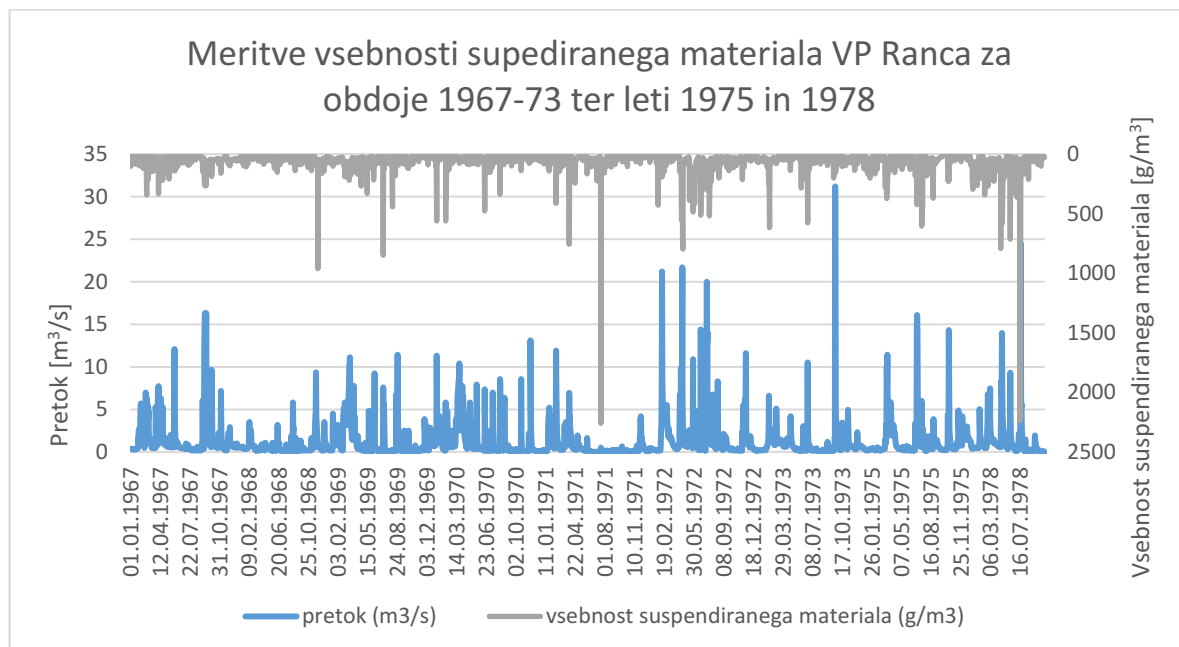
Glavna vira podatkov o poteku sedimentacije smo pridobili iz dveh virov. Prvi vir so meritve vsebnosti suspendiranega materiala na vodomerni postaji Ranca. Podatkov meritev rinjenih plavin na tem vodotoku nismo pridobili. Vsled temu smo opravili terenski odvzem in laboratorijsko analizo zgornjega sloja odloženega sedimenta na 4 točkah znotraj AK Pernica I, kjer smo pridobili geomehanske karakteristike sedimenta.

3.2.3.1 *Meritve kalnosti reke Pesnica na vodomerni postaji Ranca*

Meritve kalnosti so se izvajale na vodomerni postaji Ranca, ki se nahaja gorvodno od akumulacije Pernica. Potekale so vsakodnevno v obdobju od 1967 do 1973 in v letih 1975 ter 1978. Vzorci so bili odvzeti točkovno v eni vertikali merilnega prečnega prereza ob hkratnem merjenju vodostaja na merilni letvi. V tem obdobju je bil povprečen dnevni pretok $1,1 \text{ m}^3/\text{s}$ in povprečna dnevna koncentracija suspendiranega materiala $55,1 \text{ g/m}^3$ (Bezak, et al., 2013).

Ocenjujemo letni povprečni transport suspendiranih snovi na pretočnem profilu VP Ranca v velikostnem razredu cca 1900 ton. Meritve kalnosti oziroma suspendiranega materiala v vodotokih so pokazale, da se približno 70 % vsega materiala prenese v nekaj visokovodnih situacijah (Ulaga 2005), zato je zelo pomembno, da se ob teh dogodkih odvezemajo vzorci.

Za opazovano obdobje je značilna slaba soodvisnost med pretokom in vsebnostjo suspendiranega materiala, kar je razvidno tudi iz pripadajočega grafa. Prav tako nismo pridobili točnih podatkov o načinu odvzema vzorcev, vertikalni globini ali zveznosti odvzema in točni lokaciji odvzema (sredina ali breg vodotoka). Glede na časovno obdobje se predvideva, da je bila uporabljena metoda vzorčenja s stekleničenjem.

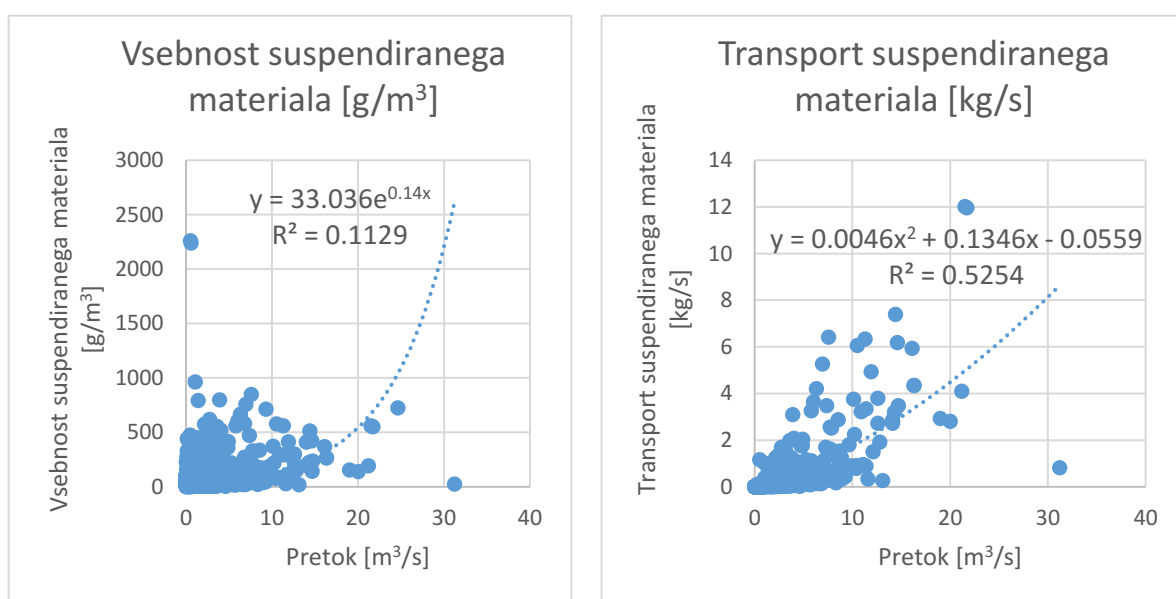


Slika 30: Meritve suspendiranega materiala na VP Ranca v drugi polovici sedemdesetih let (ARSO, 2016)

Na podlagi meritev vsebnosti suspendiranega materiala na VP Ranca smo z uporabo regresijske analize določili odvisnost koncentracije premeščenega suspendiranega materiala C od pretoka reke Pesnica Q .

$$C = 33.036e^{0.14Q} \quad (45)$$

Zaradi občasno izvedenih meritev suspendiranega materiala dobimo zelo slabo korelacijo med pretokom in koncentracijo suspendiranih snovi (Krzyk, 1996). Za pridobljene podatke je bila izračunana slaba korelacija ($R^2 = 0,11$), saj na kalnost poleg pretoka reke Pesnice vplivajo številni drugi dejavniki. Korelacija med transportom suspendiranega materiala in pretoka pa je pričakovano boljša ($R^2 = 0,53$), saj je transport suspendiranega materiala definiran kot produkt vsebnosti suspendiranega materiala in pretoka na opazovanem prečnem profilu ((Ulaga 2005), (Bezak, et al., 2013)).



Slika 31: Soodvisnost pretoka in vsebnosti in transporta suspendiranega materiala na VP Ranca za obdobje 1967–73 ter letih 1975 in 1978 (ARSO, 2016)

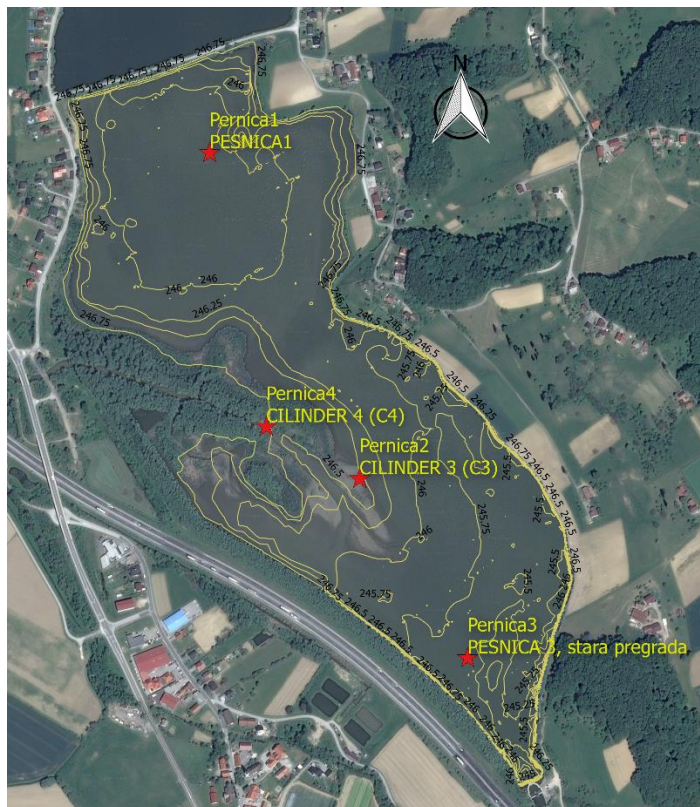
Opozoriti moramo, da so podatki pridobljeni v drugem časovnem obdobju, kjer sta bila raba tal in onesnaževanje vodotokov bistveno drugačna od današnjega stanja. Za natančnejše analize bi bilo potrebno imeti dolgoletni monitoring vsebnosti suspendiranih snovi, ki bi služil za določitev stopnje erozije in količino premeščenega suspendiranega materiala iz porečja reke Pesnice.

V naravi prihaja do konice premeščanja suspendiranega materiala malo pred konico odtočnega hidrograma (Bezak, 2016). Takšnega procesa zaradi poenostavitve meritev iz drugega časovnega obdobja s korelacijsko enačbo nismo mogli ponazoriti. Prav tako nimamo podatka, ali prihaja na tem povodju do histerezne krivulje premeščanja suspendiranih snovi v odvisnosti od pretoka, saj ni ustreznih zveznih meritev premeščanja materiala.

3.2.3.2 Analiza sedimenta iz akumulacije

Odloženi sediment na območju akumulacije je eden od bistvenih vhodnih parametrov pri modeliranju odlaganja in erodiranja le-tega. Na akumulaciji Pernica I so se izvedle raziskave z odvzemom točkovnih vzorcev zgornjega sloja sedimenta. Odvzem je bil izvršen v marcu 2016 na štirih točkah, ki predstavljajo karakteristična območja odlaganja sedimenta.

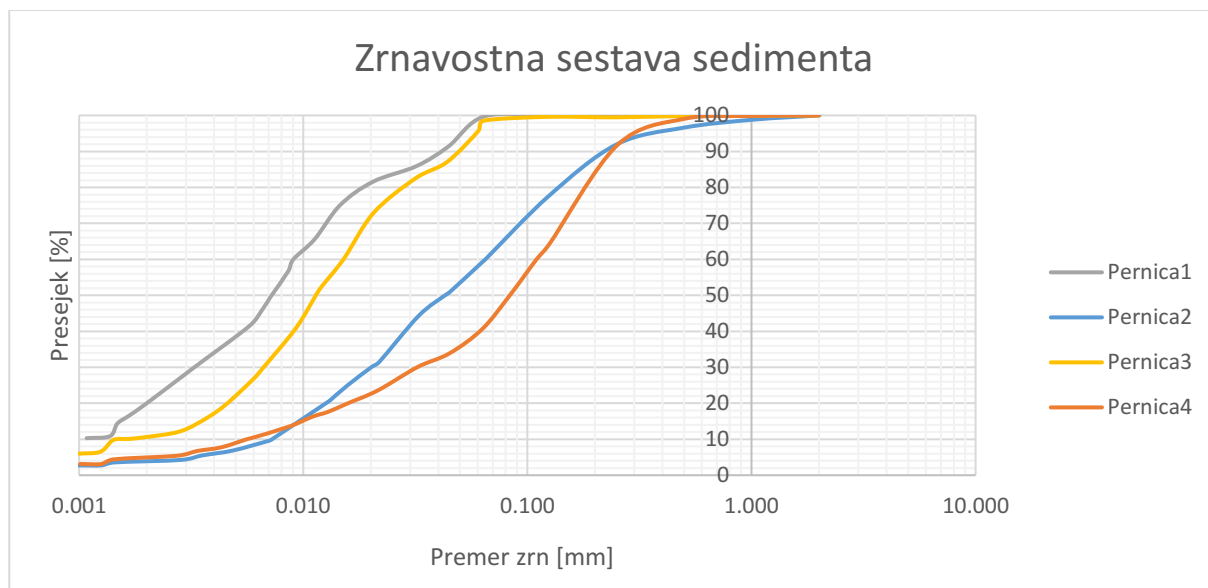
Lokacije odvzema vzorcev so bile izbrane na podlagi zajema karakterističnega vzorca za izbrano območje akumulacije. Tako smo v točkah »Pernica1« in »Pernica3« na podlagi literature in terenskega ogleda predvideli drobnejše frakcije kot na točkah »Pernica4« in »Pernica3«. Točne lokacije odvzema vzorcev so prikazane na sledeči sliki.



Slika 32: Lokacije odvzetih vzorcev na akumulaciji Pernica I

Vzorci sedimenta so bili odvzeti po dveh metodah: dva vzorca sta bila odvzeta z grabežem (angl. *van Veen grab sampler*) in dva vzorca z uporabo cilindra oziroma valja. Izbira metode vzorčevanja je bila odvisna od globine vode na posamezni odzemni točki. Na lokaciji (C4 in C2), kjer je bila gladina vode nizka, smo vzorce odvzeli z uporabo cilindra, na ostalih dveh lokacijah pa smo zaradi večjih globin uporabili grabež.

Vzorci so bili analizirani v laboratoriju Katedre za mehaniko tal, UL FGG (KMTal, 2016; IJS, 2016). Iz rezultatov geomehanskih preiskav smo ugotovili, da lahko odloženi sediment razdelimo v dve skupini. Na območju vtočnega vršaja so bolj grobe frakcije oziroma lastnosti nizkoplastičnega melja/zaglinjenega do zameljenega peska (ML-SM-SC), na območju, ki je v smeri proti pregradnemu nasipu med akumulacijama in na območju proti pregradnemu objektu, kjer ima sediment lastnosti mastne gline (CH). Vzorci, odvzeti z grabežem, niso izkazovali lastnosti zemljin s strukturo, ampak so imeli lastnosti suspenzije z reološkimi lastnostmi. V sedimentu tudi ni velike vsebnosti organskih snovi, kar je v nasprotju z našimi pričakovanji (KMTal, 2016).



Slika 33: Rezultati analize zrnnavostne sestave sedimenta na AK Pernica I (prirejeno po (KMTal, 2016))

Iz rezultatov sejalne analize (Slika 33) je razvidno, da se krivulje zrnnavosti pomikajo v desno sorazmerno z oddaljenosti od vtoka v akumulacijo. To dejstvo potrjuje tezo, da se z oddaljenostjo od vtoka reke Pesnice povprečno odloženo zrno zmanjšuje. Največja zrna ima vzorec na točki »Pernica4«, ki je bil odvzet na območju naplavnega vršaja, najmanjša pa vzorec »Pernica1«, ki je bil odvzet na območju severnega dela akumulacijskega bazena, kjer so pretočne hitrosti najnižje.

Preglednica 12: Povzetek rezultatov geomehanske analize sedimenta (KMTal, 2016)

Vzorec	Pernica1	Pernica2	Pernica3	Pernica4	Povprečna vrednost
Vzorčenje	grabež (<i>angl. van Veen grab sampler</i>)	cilinder	grabež (<i>van Veen grab sampler</i>)	cilinder	
Imenovanje FGG	PESNICA1	CILINDER 3 (C3)	PESNICA 3, stara pregrada	CILINDER 4 (C4)	
X_D96TM	555695.449	555963.6976	556156.0063	555799.336	
Y_D96TM	161363.4981	160795.0506	160482.6687	160884.7316	
Datum	02.03.2016	02.03.2016	02.03.2016	02.03.2016	
Karakteristike					
Gostota ρ [t/m³]	1.23	1.60	1.26	1.61	1.425
Suha gostota ρ_d [t/m³]	0.413	0.989	0.477	1.03	0.727
Ned. strižna trdnost c_u [Pa]	181.6-191.2	-	186.4-225.6	-	
Zrnnavostna sestava					
<0.063 mm	99.4 %	58.9 %	98.6 %	40.6 %	74.4 %
d₁₀ [mm]	/	0.007	0.002	0.006	0.005
d₃₀ [mm]	0.003	0.020	0.007	0.032	0.016
d₅₀ [mm]	0.007	0.043	0.011	0.084	0.036
d₆₀ [mm]	0.009	0.066	0.015	0.111	0.050
d₉₀ [mm]	0.042	0.250	0.050	0.250	0.148

Iz rezultatov laboratorijske analize sedimenta smo izvednotili dodatne lastnosti odvzetega sedimenta za potrebe morfološkega modela. Po enačbi 43 smo določili povprečno poroznost odvzetih vzorcev z uporabo izmerjenih gostot sedimenta in po enačbi 44 relativno gostoto sedimenta G , ki je kvocient gostote sedimenta ρ posameznega vzorca i in gostote vode $\rho_w=1.0$ v tonah na kubični meter.

$$n = \left(1 - \frac{\rho_s}{\rho}\right) \quad (46)$$

$$s_i = \frac{\rho_i}{\rho_w} \quad (47)$$

Preglednica 13: Dodatno izvednoteni parametri sedimenta za potrebe morfološkega modela

Vzorec	Pernica1	Pernica2	Pernica3	Pernica4	Povprečna vrednost
Poroznost n [-]	0.66	0.38	0.62	0.36	0.51
Relativna gostota s [-]	1.23	1.6	1.26	1.61	1.425

Brezdimenzijski Shieldsov parameter za potrebe morfološkega modela smo določili z uporabo empirično pridobljenih vrednosti soodvisnosti kritične strižne napetosti τ_c in brezdimenzijskega Shielsovega parametra θ , ki soprikazane v sledeči preglednici z linearno interpolacijo vrednosti.

Preglednica 14: Kritična strižna napetost in Shieldsov brezdimenzijski parameter v odvisnosti od velikosti zrn pri 20 stopinjah Celzija (vir: (USGS, 2013))

Premer zrna [mm]	Shieldsov brezdim. parameter θ [-]	Kritična strižna napetost τ_c [N/m ²]
128–256	0.054–0.054	112–223
64–128	0.052–0.054	53.8–112
32–64	0.05–0.052	25.9–53.8
16–32	0.047–0.05	12.2–25.9
8–16	0.044–0.047	5.7–12.2
4–8	0.042–0.044	2.7–5.7
2–4	0.039–0.042	1.3–2.7
1–2	0.029–0.039	0.47–1.3
0.5–1	0.033–0.029	0.27–0.47
0.25–0.5	0.048–0.033	0.194–0.27
0.125–0.25	0.072–0.048	0.145–0.194
0.0625–0.125	0.109–0.072	0.110–0.145
0.0310–0.0625	0.165–0.109	0.0826–0.110
0.0156–0.0310	0.25–0.165	0.0630–0.0826
0.0078–0.0156	0.3–0.25	0.0378–0.0630

4 IZRAČUNI IN UGOTOVITVE

Matematično modeliranje naravnih procesov pomeni poustvarjanje naravnih zakonitosti na podlagi numerično-empiričnih zvez. V procesu modeliranja je nemogoče upoštevati vse vplivne spremenljivke, prav tako pa velikokrat nimamo ustreznih kvaliteten vhodnih podatkov. V procesu priprave ustreznih vhodnih podatkov smo izbrali nekatere inženirske poenostavitve. Zaradi tega se zavedamo relativne napake, ki nastaja pri končnih rešitvah modela, saj tudi pri modeliranju velja učinek »smeti noter – smeti ven« (angl. *garbage in, garbage out!*).

Osnovne podatke smo obdelali s pomočjo GIS programskih orodij in prišli do prvih ugotovitev o spremembah morfologije v opazovanem obdobju. Za natančnejše spoznavanje s procesom odlaganja in erodiranja sedimenta v odvisnosti od hidroloških dogodkov smo uporabili razširjen matematično-hidravlični model z morfološkim modulom, tj. programsko orodje MIKE 21C. Delovanje in stabilnost matematičnega modela smo podrobneje spoznavali v procesu vnosa pridobljenih in obdelanih vhodnih parametrov v matematični model. Matematični model smo nato uporabili za modeliranje procesa morfoloških sprememb med leti 2009 in 2013. Cilj umerjene simulacije je modeliranje poteka naravnega procesa glede na zadnje meritve za ocenjevanje vpliva morfoloških sprememb v prihodnjem vpliva na namensko rabo akumulacije (predvsem zadrževanje visokovodnih pretokov).

Na podlagi pridobljenih znanj o procesu sedimentacije smo iz obstoječih študij povzeli scenarije z različnimi ukrepi ravnanja s sedimentom na akumulaciji Pernica. Tu smo kot izhodišče uporabili znanja o morfoloških vplivih na akumulaciji med leti 2009 in 2013 kot ključnem parametru za načrtovanje in simulacijo ukrepov v prihodnje.

4.1 KONCEPT PRIPRAVE VHODNIH PODATKOV

Vhodne podatke smo pripravili z uporabo več poenostavitev. Pri tem smo poskušali slediti dobri inženirski oceni, ki opravičuje razmerje med stroški, časom pridobivanja in ustrezno natančnostjo podatkov z željeno končno natančnostjo rezultatov.

4.1.1 Topografija akumulacijskega bazena

Topografske podatke o razgibanosti geometrije na območju akumulacijskega bazena za leti 2009 in 2013 smo pridobili iz različnih virov meritev. Osnovni in najpomembnejši vhodni podatek predstavljajo meritve batimetrije v letih 2009 in 2013. Ker pa meritve dna niso vključevale meritev brežin in območja naplavnega vršaja, smo te podatke pridobili iz dodatnih virov, ki se časovno najbolj približujejo obdobju meritev dna. Pridobljene podatke smo obdelali z uporabo različne programske opreme in kot končni rezultat pridobili digitalna modela višin akumulacijskega bazena AK Pernica I. Za obdelavo geometrijskih podatkov smo uporabili predvsem GIS programska orodja. Kvalitetna priprava geometrijskih podatkov je pri spremljanju morfoloških sprememb s pomočjo hidravličnega modela bistvena, saj lahko že manjše deviacije topografije povzročajo spremembo tokovnih razmer in posledično nepravilne morfološke spremembe.

4.1.1.1 *Digitalni model višin akumulacije za leto 2009*

Digitalni model višin (DMV) je rastrski podatkovni sloj, sestavljen iz geolociranih mrežnih celic z dodeljenim podatkom o povprečni višini reliefa na območju posamezne celice. Območje akumulacije so v letih 2006–2009 v sklopu rekonstrukcije pregrade detajlno izmerili z uporabo

ultrazvočnih globinomerov in klasične geodetske izmere. Za izdelavo DMV za leto 2009 smo uporabili sledeče vire podatkov:

- batimetrijo iz leta 2006, dopolnjeno z meritvami v letu 2009 (Slatinšek, 2016),
- meritve brežin akumulacije v letu 2009 (Slatinšek, 2016),
- prečni profili struge reke Pesnice nad AK Pernica (VGB d. o. o., 2010),
- batimetrijo AK Pernica I iz leta 2013 (Harpha Sea d. o. o., 2013).

Pri obdelavi podatkov smo uporabili odprtokodni geografski informacijski sistem QGIS in Autodesk AutoCAD Civil 3D.

Izdelava DMV območja AK Pernica I je bila zaradi nepopolnosti celotnih meritev sestavljena iz različnih virov podatkov in predvsem iz različnih časovnih obdobj. Meritve v letu 2009 niso obsegale območja struge na dotočnem delu v akumulacijo in dna reke Pesnica, spodnjega dela akumulacije pri pregradnem objektu in umetnega otoka, ki je bil zgrajen ob rekonstrukciji na jugozahodnem delu akumulacije. Podatke o geometriji struge smo pridobili s prečnih profilov struge reke Pesnica in jih do območja meritev batimetrije dna na območju naplavnega vršaja linearno interpolirali. Za območje dna akumulacije pri pregradnem objektu in otoka smo dodali podatke iz meritev dna iz leta 2013 in jih dopolnili z ročnimi popravki na podlagi ortofoto posnetkov in terenskega ogleda. Sklepamo, da lahko uporabimo takšne poenostavitve, saj gre za omejeno območje znotraj akumulacije, kjer zaradi stalne kote praga na pregradnem objektu ne pričakujemo večjih sprememb dna.

Vektorske točkovne podatke smo združili in obdelali s pomočjo triangulacije ter izdelali TIN mrežo. TIN mrežo smo nato z uporabo programske opreme izvozili v obliki GeoTIFF formata v rastru 2x2 m. DMV smo vizualno obdelali z barvno lestvico glede na nadmorsko višino celic in plastnicami v višinskem razmaku 0,2 m. Podatke smo izvozili v starem Gauß-Krügerjevem koordinatnem sistemu D48.

4.1.1.2 Digitalni model višin akumulacije za leto 2013

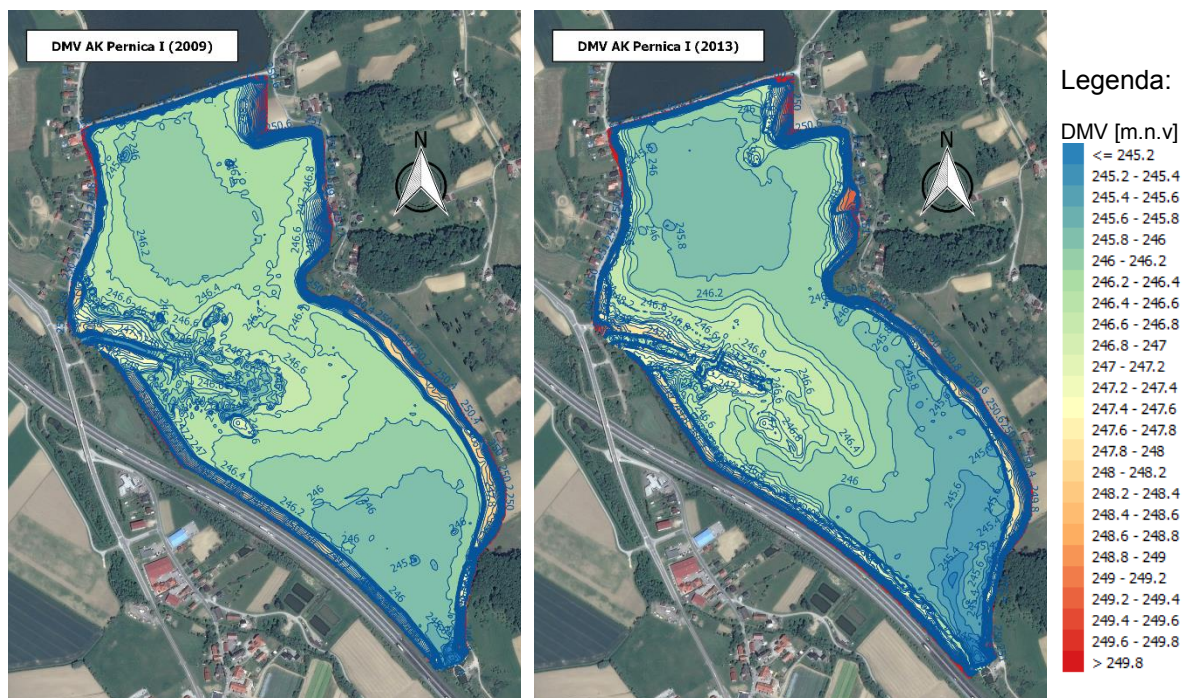
Pri izdelavi DMV AK Pernica I za leto 2013 smo izhajali iz dveh sklopov podatkov:

- batimetrija akumulacije, oktober 2013 (Harpha Sea d. o. o., 2013),
- rezultati LIDAR skeniranja v letu 2011 (GEOIN, 2011).

Za obdelavo podatkov smo uporabili odprtokodni geografski informacijski sistem QGIS, Global Mapper in Autodesk AutoCAD Civil 3D.

LIDAR podatke smo z uporabo triangulacije pretvorili v TIN mrežo in jo nato izvozili v GeoTIFF formatu velikosti celic 2x2 m. LIDAR snemanje ne vključuje meritev brežin akumulacije, zato smo na območju, kjer so bili pridobljeni podatki iz meritve batimetrije te podatke nadomestili z meritvami batimetrije iz leta 2013. Zaradi velikosti rastra meritev dna (2x2 m) je nastal nov združen sloj z enako velikostjo celic – 2x2 m. Pri tem smo bili pozorni na »suhe dele«, ki so v obliki otokov višji od meritev dna akumulacije in jih po potrebi ročno korigirali glede na ortofoto posnetke iz obravnavanega obdobja.

Podatke smo obdelali in združili v skupnem rastrskem formatu (.GeoTIFF) v velikosti rastrskih celic 2x2 m. Model višin smo vizualno obdelali z barvno lestvico glede na nadmorsko višino celic in plastnicami v razmaku 0,2 m ter v Gauß-Krügerjevem koordinatnem sistemu D48.



Slika 34: Izdelan digitalni model višin akumulacijskega bazena za leti 2009 (leva slika) in leto 2013 (desna slika)

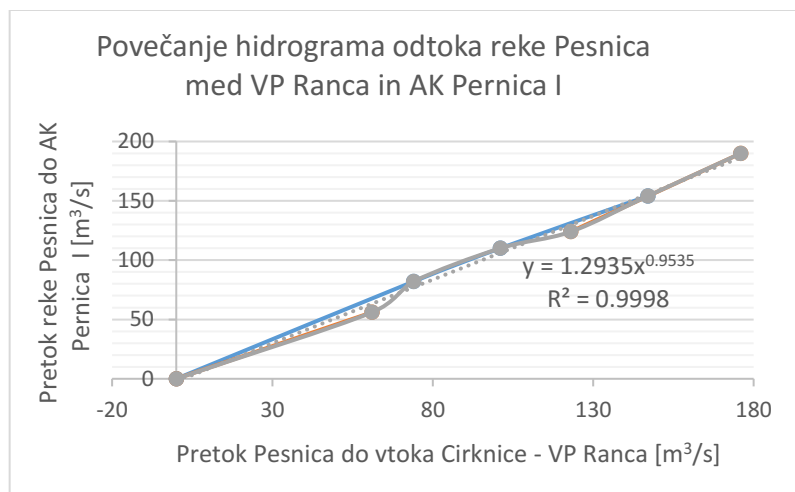
4.1.2 Hidrološki podatki

Hidrološki podatki na reki Pesnici so merjeni na cca 4 km gorvodno od akumulacije oddaljeni vodomerni postaji Ranca. Reka Pesnica ima pri VP Ranca 84 km² veliko prispevno površino. Reka Pesnica ima do vtoka v AK Pernica I še dva levi pritoka – reko Cirknico in Gačniški potok ter lateralni dotok na celotnem odseku. Reka Pesnica ima na vtoku v akumulacijo 110 km² veliko prispevno območje.

Zaradi pomanjkanja zveznih meritev na vtoku smo povečali pretok z VP Ranca skladno z razmerjem visokih projektnih pretokov iz dveh hidroloških študij reke Pesnice na obravnavanem območju (VGI, 1980; VGB Maribor, 2012). Prav tako smo zaradi časovnega zamika potovanja poplavnega vala do AK Pernica I in posledično usklajenosti z obratovanjem zapornic dodali konstanten časovni zamik vsem meritvam, ki so se izvedle na vodomerni postaji na reki Pesnici - VP Ranca.

4.1.2.1 Povečanje pretokov reke Pesnice med VP Ranca in vtokom v AK Pernica 1

Pretok reke Pesnice na vtoku v AK Pernica smo predpostavili z uporabo regresijske krivulje iz podatkov projektnih pretokov na VP Ranca in vtokom v AK Pernica na podlagi hidroloških študij iz leta 1999 (VGI, 1999) in 2012 (VGB Maribor, 2012).



Slika 35: Hidrogram povečanja pretoka reke Pesnice na vtoku v akumulacijo

Na podlagi pridobljenih umerjenih podatkov smo predpostavili povečanje pretokov reke Pesnice na vtoku v AK Pernica I z uporabo sledeče enačbe

$$Q_{P1} = 1.2935 \cdot Q_R^{0.9535}, \quad (48)$$

kjer predstavlja Q_R pretok na VP Ranca in Q_{P1} pretok na vtoku v akumulacijo Pernica I. Metoda opravičuje predpostavljeno poenostavitev zaradi velikega ujemanja koeficienta korelacije $R^2=0,99$ iz dveh različnih hidroloških študij, umerjenih na dolvodni vodomerni postaji Gočova.

4.1.2.2 Zakasnitev hidrograma iz meritev na VP Ranca

VP Ranca je po strugi reke Pesnice od vtoka v akumulacijo oddaljena cca 4 km, predpostavili smo čas potovanja poplavnega vala povprečne hitrosti 1,1 m/s. Povprečno hitrost smo pridobili iz vrednosti izračunanih povprečnih hitrosti na posameznem prečnem profilu znotraj hidravličnega modela za potrebe izdelave kart razredov poplavne nevarnosti gorvodnega odseka od akumulacije Pernica I (VGB d. o. o., 2010). Za časovno zakasnitev poplavnega vala smo izbrali konstanten zamik 1,0 ure.

4.1.2.3 Kota gladine v odvisnosti od vtočnega pretoka

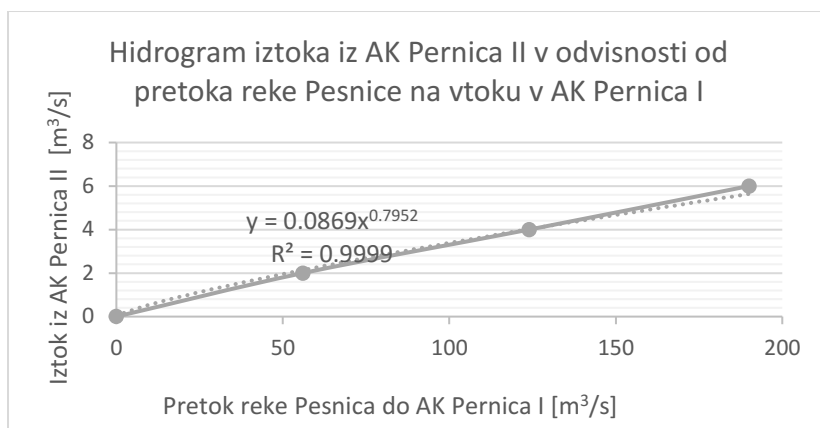
Pomanjkanje podatkov in neustreznost podatkov zaradi okvar na merilni sondi so povzročili, da smo morali za ta obdobja sprejeti predpostavke za določitev kote gladine na AK Pernica I. Kota gladine akumulacije predstavlja spodnji robni pogoj hidrodinamičnega dela hidravličnega modela. Zaradi histereznosti in posledično ročnega upravljanja ter naključnega nihanja nivojev v akumulaciji smo predpostavili linearno zvezo med vtočnim pretokom in gladino v akumulaciji na podlagi enomesečnega niza podatkov v septembru 2010:

$$H_{P1} = 0.0338 \cdot Q_{P1} + 246.47 \quad (49)$$

kjer H_{P1} predstavlja koto gladine v akumulaciji na merilnem mestu pred rešetkami in Q_{P1} vtočni pretok v akumulacijo, ki smo ga iz vrednotili po postopkih predstavljenih v prejšnjih točkah.

4.1.2.4 Vtok iz AK Pernica II v AK Pernica I

Podobno kot za povečanje pretoka med meritvami na vtoku v akumulacijo smo predpostavili z uporabo korelacije tudi vrednost skupnega iztoka iz zgornje AK Pernica II v spodnjo AK Pernica I. Korelacijo smo izdelali na podlagi vrednosti projektnih pretokov iz hidrološke študije (VGI, 1999) in na podlagi predpostavke, da je pretok v soodvisnosti od pretoka reke Pesnice.

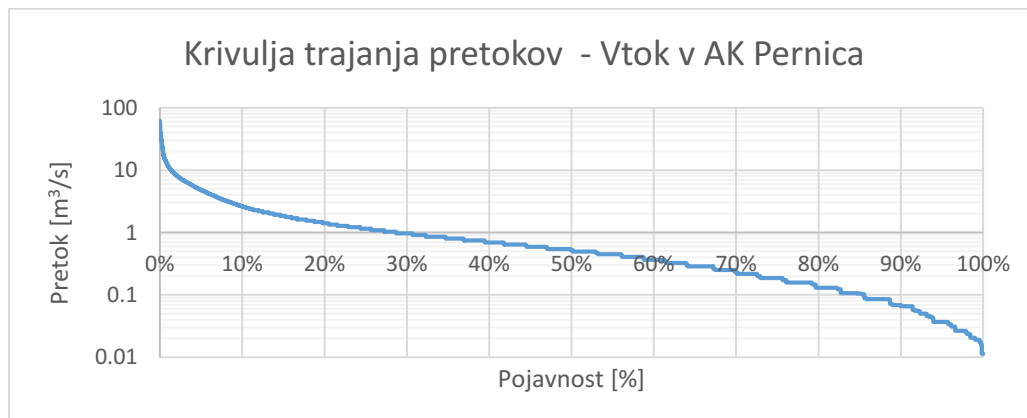


Slika 36: Predpostavljena soodvisnost hidrograma iztoka iz AK Pernica II v spodnjo AK Pernica I

Pridobljenih pretokov za potrebe simulacije nismo uporabili, saj ni znano razmerje pretokov iz akumulacije med talnim izpustom in prelivom. Prav tako ni meritev pretokov Vukovskega in Jareninskega potoka, ki sta pritoka akumulacije Pernica II. Pri terenskem ogledu smo opazili, da so bile na rešetke talnega izpusta in preliva nameščena dodatne lesene ovire. Akumulacija deluje kot mokri zadrževalnik in zmanjša vtočne konice višjih pretokov v odvisnosti od kote zapolnitve akumulacijskega prostora. Ker podatkov o zakasnitvi in spremembi hidrograma odtoka nismo pridobili, smo iztok iz zgornje akumulacije za naše simulacije zanemarili.

4.1.2.5 Krivulja trajanja pretokov na vtoku v akumulacijo

Iz korigiranih vrednosti meritev pretoka na VP Ranca za vtočni profil v AK Pernica smo simulirali vrednosti vtočnega pretoka za celotno opazovano obdobje. Iz korigirane vrednosti pretokov za opazovano obdobje smo izvednotili krivuljo trajanja pretokov za opazovano obdobje. Korigirane urne vrednosti pretokov smo po enačbah, predstavljenih v prejšnjih točkah, uporabili kot osnovo za vrednotenje kote gladine akumulacije na manjkajočih oziroma pomanjkljivih časovnih odsekih in za določitev vsebnosti suspendiranih snovi.



Slika 37: Krivulja trajanja za korigirane pretoke na vtoku v AK Pernica I

Na podlagi krivulje trajanja pretokov smo iz vrednotili mejne vrednosti pretokov glede na pojavnost pretoka. Meje vrednosti so predstavljene v preglednici v nadaljevanju.

Preglednica 15: Vrednoteni pretoki iz krivulje trajanja modificiranih pretokov na vtoku v AK Pernica

Pojavnost Q [%]	Pretok [m ³ /s]	Pojavnost Q [%]	Pretok [m ³ /s]	Pojavnost Q [%]	Pretok [m ³ /s]
0.50 %	16.57	5.00 %	4.77	50 %	0.52
1.00 %	11.75	10.0 %	2.64	60 %	0.36
1.50 %	9.51	15.0 %	1.84	70 %	0.23
2.00 %	8.29	20 %	1.40	80 %	0.13
3.00 %	6.66	30 %	0.96	90 %	0.06
4.00 %	5.61	40 %	0.69	95 %	0.03

Na podlagi teh mejnih vrednosti smo za izbrane pojavnosti izločili vse vrednosti, ki so vsebovale pretoke manjše vrednosti od izbrane. Iz izbranih vrednosti pretokov smo izdelali nov časovni niz podatkov, ki smo ga uporabili v simulaciji. Iz obravnavanega obdobja med meritvami batimetrije cca dveh let smo prešli na simulacijo dolgo cca 1 mesec.

K vrednostim izbranih pretokov smo pripojili tudi pripadajoče vrednosti gladine akumulacije in vsebnosti suspendiranih snovi v odvisnosti od časa. Z uporabo te metode smo izločili nizke vrednosti pretokov ter skrajšali časovno obdobje dogodka v simulaciji in posledično računski čas simulacije.

Pri poteku izločitve podatkov na podlagi krivulje trajanja pretokov smo bili pozorni na zveznost zniževanja gladine v akumulaciji. Nezveznost se je pojavila, ker se pretok na vtočnem delu zniža pod mejno vrednost, gladina akumulacije pa se zaradi zadrževanja poplavnega vala znižuje počasneje. Ob pripojitvi vrednosti gladine iz kasnejših časovnih nizov pa je nastal »prag« med vrednostmi kote gladin akumulacije v odvisnosti od časa, saj je bila gladina ob kasnejšem nizu podatkov izrazito nižja.

Napaka, ki se je pri tem pojavila, bi brez korigiranja s podaljšanjem časovnega niza vseh treh sklopov podatkov povzročila v hidravličnem modelu hipno denivelacijo gladine oziroma hipno delno izpraznitev akumulacije, kar bi posledično povečalo pretočne hitrosti in spremenilo transportno sposobnost v akumulaciji.

4.1.3 Vhodni podatki za morfološki model

Osnovni vhodni podatki za morfološki model so rezultati umerjenega hidrodinamičnega dela matematičnega modela na območju obdelave. Morfološki model uporablja sproti izračunane vrednosti velikosti in smeri pretokov ter ostale vrednosti (npr. horizontalni sekundarni tok) v posamezni računski celici za določevanje premestitvene zmogljivosti sedimenta. Za določitev premeščanja plavin so zelo pomembni podatki o lastnostih, časovnem vnosu in razporeditvi sedimenta na območju akumulacijskega bazena.

Pri tem delu izhajamo iz rezultatov odvzetih vzorcev iz akumulacije Pernica I v marcu 2016, ki so bili analizirani na Katedri za mehaniko tal z laboratorijem, meritev vsebnosti suspendiranih snovi v sedemdesetih letih na VP Ranca in meritev dna akumulacije iz oktobra 2013, ki nam bodo služile kot podatek za kalibracijo izbranih parametrov morfološkega modela.

4.1.3.1 Zrnava sestava in lastnosti sedimenta

Programsko orodje MIKE 21C nam omogoča upoštevanje zrnivosti sedimenta v akumulaciji na več načinov. Zaradi točkovno pridobljenih podatkov in izrazitega prostorsko razporejenega premera zrn sedimenta smo pri testiranju morfološkega modela pripravili vhodne podatke za tri načine vnosa podatkov o lastnostih sedimenta:

a) Enovito srednje zrno d_{50} za celotno območje obdelave

Kot reprezentativen vhodni podatek o lastnostih sedimenta na akumulaciji za potrebe modeliranja premeščanja plavin smo izbrali povprečno zrno vseh odvzetih vzorcev. V osnovni simulaciji enojne velikosti zrna smo izbrali povprečni presejek 50 % oziroma velikost reprezentativnega zrna $d_{50}=0,036$ mm. Pri tem smo uporabili poroznost zemljine $n=0,51$, relativno gostoto $s=1,425$ in Shieldsov brezdimenzijski parameter $\theta=0,048$.

Preglednica 16: Povprečno enovito zrno s pripadajočimi lastnostmi

Srednje zrno d_{50} [mm]	Poroznost n [-]	Rel. gostota s [-]	Brezdim. Shieldsov koef. θ [-]
0.036	0.51	1.425	0.048

Srednje zrno se tako po klasifikaciji zemljin po velikosti zrn uvršča med debele melje (0,02–0,063 mm). Vsebnost zrn pod 0,063 mm je v večinskem deležu, zato govorimo o kohezivnem sedimentu. To lastnost bomo upoštevali ločeno v procesu kalibracije modela v morfološkem modelu.

b) Ploskovna porazdelitev vrednosti srednjega zrna d_{50}

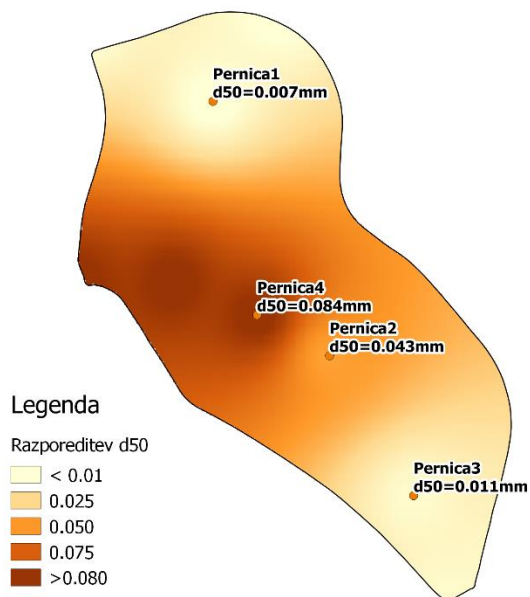
Na podlagi sejalne analize sedimenta na izbranih mestih vzorčenja smo izdelali ploskovno porazdelitev srednjega zrna za območje obdelave na akumulacijskem bazenu AK Pernica I. Srednje zrno d_{50} za vsak posamezen vzorec smo razbrali iz grafikona sejalne krivulje. Za interpolacijo smo uporabili GIS programska orodja z možnostjo interpolacije podatkov po metodi inverzne utežne razdalje.

Iz rezultatov GIS analize, ki smo jo izdelali na podlagi rezultatov analize sedimenta in terenskega ogleda, smo ocenili razporeditev sedimenta glede na srednje zrno d_{50} . Izdelan rastrski sloj območja smo prav tako aproksimirali na krivočrtno mrežo in jo uporabili kot vhodni podatek pri simulaciji s ploskovno porazdeljeno vrednostjo srednjega zrna d_{50} .

Preglednica 17: Lastnosti sedimenta pri ploskovni porazdelitvi srednjega zrna

Srednje zrno d_{50} [mm]	Poroznost n [-]	Rel. gostota s [-]	Brezdim. Shieldsov koef. θ [-]
Ploskovna porazdelitev	0.51	1.425	0.048

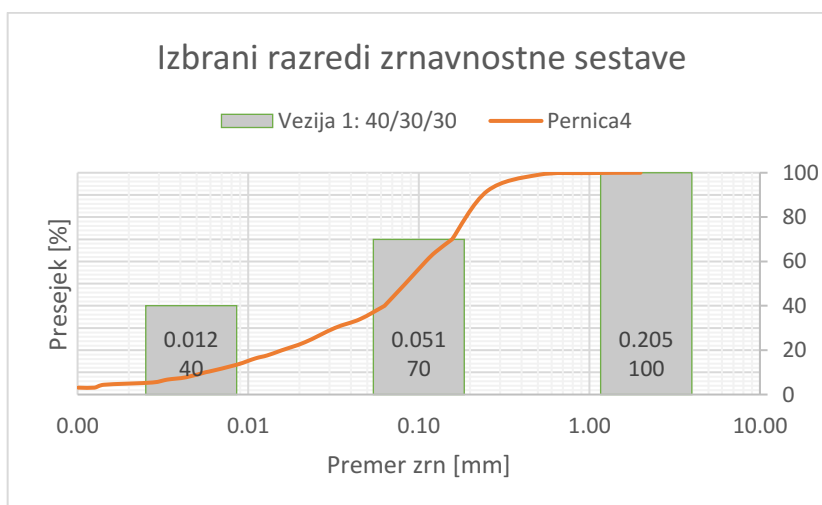
Grafična predstavitev razporeditve srednjega zrna d_{50} na območju obravnavane akumulacije je prikazana v naslednji sliki. Območje je razdeljeno v tri sklope značilnih premerov zrn. Na območju naplavnega vršaja imamo najbolj groba zrna, v območju severnega dela in pri pregradnem objektu najbolj fine frakcije. Povprečna zrna na vmesnih območjih prehajajo med opisanimi območji v razporeditvi, predstavljeni na naslednji sliki.



Slika 38: Interpolirana razporeditev srednjega zrna d_{50} [mm] za celotno območje akumulacije z vrisanimi vrednostmi srednjega zrna na lokacijah odvzetih vzorcev sedimenta

c) Enoviti razredi velikosti zrna iz povprečne zrnastostne krivulje za celotno območje akumulacije

V nadaljevanju smo uporabili modul z izbiro treh reprezentivnih vzorcev iz zrnastostne krivulje, ki predstavlja povprečje vseh analiziranih vzorcev na akumulaciji. V procesu izdelave razredov smo se odločili za izdelavo treh razredov. Prvi razred predstavlja kohezivni del sedimenta in obsega 40 % presejek, ostala dva razreda pa predstavljata preostalih 60 % z vsak po 30 % deležem presejka. Z izbiro treh razredov smo izdelali relativno dober opis poprečne zrnastostne krivulje vzorcev na akumulaciji in pridobili malo število razredov zaradi zmanjšanja potrebnega računskega časa.



Slika 39: Izbrani trije razredi (v razmerju 40/30/30) sedimenta kot povprečni vzorec odvzetih vzorcev

Za morfološki model smo na podlagi izračunanih vrednosti premera zrna za posamezen razred določili ostale karakteristične lastnosti razreda. Za izbirani razred srednjega zrna smo izbrali

lastnosti tistega vzorca (Pernica1, Pernica 2, Pernica3, Pernica4), ki je imel najbolj podoben povprečen premer kot izbrani razred. Razredu 1 smo pri premeru zrn pripisali lastnosti vzorca »Pernica3«, razredu 2 lastnosti vzorca »Pernica2« ter tretjemu razredu z največjim premerom zrn lastnosti vzorca »Pernica4«. Shieldsov brezdimenzijski parameter za vsak posamezen razred smo določili na podlagi linearne interpolacije vrednosti odvisnosti Shieldsovega brezdimenzijskega parametra od velikosti zrna plavin iz Preglednice 10.

Preglednica 18: Vhodni podatki za posamezne razrede sedimenta

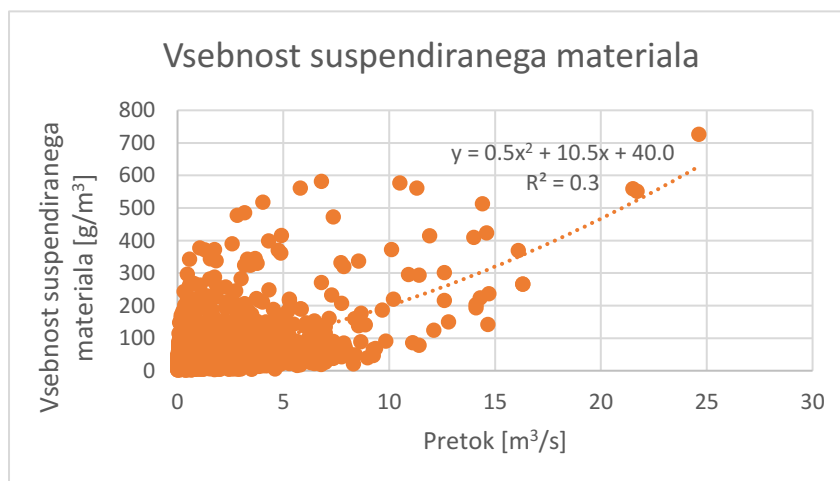
Presejek [%]	Delež [%]	Premer zrn [mm]	Kohezivnost sedimenta	Poroznost n [-]	Rel. gostota s [-]	Shieldsov koef. [-]
40	40	0.012	koheziven	0.62	1.26	0.22
70	30	0.051	nekoheziven	0.38	1.60	0.13
100	30	0.205	nekoheziven	0.64	1.61	0.055

4.1.3.2 Vsebnost suspendiranih snovi v odvisnosti od pretoka

Kot zgornji robni pogoj morfološkega modela smo v vseh simulacijah uporabili poenostavljeno vrednost suspendiranih snovi v odvisnosti od pretoka. Vrednost smo izvednotili iz pridobljenih podatkov iz časovnega niza meritev v sedemdesetih letih prejšnjega stoletja. Vzorec smo obdelali z metodo izločitve najbolj odstopajočih meritev do cilja korelacije $R^2=0,3$.

$$K_{P1} = 0.5 \cdot Q_{P1}^2 + 10.5 \cdot Q_{P1} + 40.0 \quad (50)$$

Iz pridobljene regresijske polinomske krivulje smo ocenili količino premeščenih suspendiranih snovi v akumulacijo K_{P1} v odvisnosti od vtočnega pretoka reke Pesnice Q_{P1} .



Slika 40: Modificirana soodvisnost pretoka in vsebnosti suspendiranih snovi, ki smo jo uporabili za določanje vsebnosti suspendiranih snovi v opazovanem obdobju 2009–2013

Kot spodnji robni pogoj morfološkega modela smo uporabili model brez spremembe dna, saj je kot spodnji rob upoštevan prag zapornic pregradnega objekta.

4.1.4 Vpeljane poenostavitve v modelu

Pri izdelavi hidravličnega modela smo uporabili več poenostavitev. Poenostavitve so bile potrebne zaradi neustreznih vhodnih podatkov ali pomanjkanja meritev. Poenostavitve obsegajo različne pristope. Za vsak posamezen modul morfološkega modela so predstavljene po sklopih:

Hidrodinamični del:

- predpostavljena gladina akumulacije na območju zapornic za obdobje poskusnega obratovanja od 2009 do 2010,
- ni upoštevanega vtoka in vpliva zgornje AK Pernica II,
- zanemarijene so padavine na prispevnem območju akumulacije in na površino vodnega dela akumulacije,
- pretok reke Pesnica na vtoku v AK Pernica smo predpostavili z uporabo regresijske krivulje iz podatkov projektnih pretokov na VP Ranca in vtokom v AK Pernica na podlagi hidroloških študij iz leta 1999 (VGI, 1980) in 2012 (VGB Maribor, 2012).

Topografija:

- Topografija območja je sestavljena iz več virov meritev dna in brežin akumulacijskega bazena. Podatki izhajajo iz različnih časovnih obdobj in so različne natančnosti, zato prihaja do manjših odstopanj.
- Vtočni del dna na območju naplavnega vršaja ni bil izmerjen, zato smo ga predpostavili na podlagi interpolacije z višjeležečimi meritvami dna in terenskega oglada.

Sediment/plavine:

- ni upoštewane histereze in sezonskih sprememb pri pretoku suspendiranega materiala,
- uporabili smo meritve suspendiranega materiala izpred 30 let, saj drugih ni bilo na razpolago, zato sta natančnost in metoda meritev vprašljiva, prav tako se je spremenila raba tal, vnos onesnažil iz kanalizacijskih sistemov, kmetijske prakse ipd.
- predpostavili smo, da je celotni deponiran sediment po lastnostih enak kot na površini, kjer so bili odvzeti vzorci za analizo vzorcev mulja (KMTal, 2016).

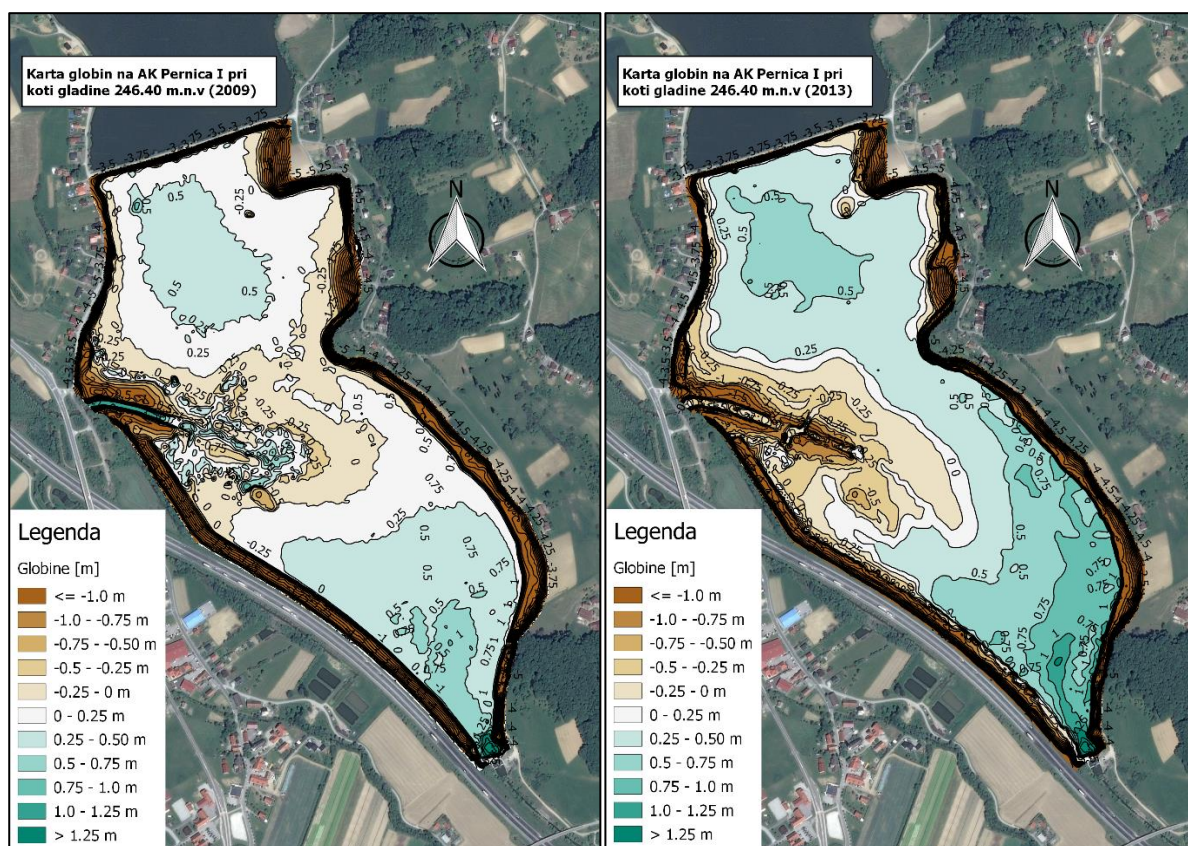
4.2 MORFOLOŠKE SPREMEMBE V AKUMULACIJI

GIS programska orodja nam omogočajo združevanje prostorskih podatkov iz več različnih virov. Pri tem moramo biti pozorni na poenotenje geografskega koordinatnega sistema. V našem primeru smo vse podatke poenotili v Gauß-Krügerjevem koordinatnem sistemu D48.

Za obdelavo pridobljenih podatkov smo uporabili odprtokodno GIS programsko okolje QGIS. S prepoznavanjem in z branjem različnih formatov vhodnih podatkov je programsko okolje omogočilo nadaljnje združevanje in poenotenje topografskih meritev, kar smo predstavili v prejšnjem poglavju. Za podrobnejše analize in pripravo različnih kart smo uporabili osnovne funkcije obdelave rastrskih slojev, nadgradili pa z vektorskim slojem, ki prikazuje izobate oziroma različne izohipse na območju obdelave.

4.2.1 Izdelava digitalnega modela globin akumulacijskega bazena AK Pernica I

Z nadaljnjo obdelavo DMV-ja iz leta 2009 in 2013 smo izdelali Karte globin pri karakterističnih gladinah v akumulaciji. Na podlagi DMV akumulacije v letu 2009 pri ekstremni zajezi (250,00 m. n. v.) znaša povprečna globina vode 2,46 m, pri maksimalni gladini (249,00 m. n. v.) 2,54 m ter pri stalni obratovalni gladini (246,40 m. n. v.) zgolj 0,27 m. Rezultati analize povprečnih globin akumulacije za leto 2013 znašajo 0,48 m pri stalni gladini ojezeritve (246,40 m.n.v.), 2,66 m pri maksimalni gladini (249,00 m. n. v.) in 3,56 m pri ekstremni zajezi akumulacijskega bazena AK Pernica I (250,00 m.n.v.).



Slika 41: Primer izdelane Karte globin z vrisanimi hidrobatami na akumulaciji Pernica I v letu 2009 in 2013 pri stalni gladini (246,40 m. n. v.)

Karte globin služijo kot vhodni podatek za nadaljnje analize in so lahko podpora za dejavnosti na akumulaciji. Iz karte globin lahko prepoznamo tudi območja polojev – plitvin pri stalni

obratovalni gladini. Na karti globin so ta območja prikazana v sloju nad koto stalne ojezeritve. Grafično je to prva rjava površina na karti. Za natančnejšo analizo skladnosti rastja polojev s topografijo akumulacije bi bile potrebne dodatne terenske raziskave. Izdelana karta globin izkazuje premik plitvih območij iz osrednjevzhodnega v jugozahodni del akumulacije. Sklepamo, da se je s spremembo pregradnega objekta in z ukrepi izkopavanja sedimenta ter tvorjenja osrednjega kanala pretočna razporeditev spremenila v smeri jugozahodnega odcepnega kanala na območju naplavnega vršaja. Na osrednjevzhodnem in vzhodnem delu pa se je zaradi pretoka iz zgornje akumulacije in izrazite poglobitve v smeri pregradnega objekta odložen sediment iz starega tipa akumulacije uspešno erodiral. Na karti globin za leto 2013 tako prepoznamo območje plitvin – polojev na jugovzhodnoosrednjem delu s tvorbo naplavnega vršaja oziroma delte v smeri proti pregradnemu objektu. Prav tako prepoznamo območje poglobljanja na jugovzhodnem delu akumulacije. Na teh odsekih tako lahko pričakujemo dva pojava: na območju plitvin uspeva vegetacija in biota, na območju poglobljanja pa se bo pojavila erozija brežin. Iz sprememb dna lahko predpostavimo nadaljnjo širjenje naplavnega vršaja oziroma delte v smeri osrednjega dela akumulacijskega bazena in proti pregradnemu objektu.

4.2.2 Analiza spreminjanja volumna akumulacije med leti 2009 in 2013

Prvotni akumulaciji sta pred rekonstrukcijo skupaj zadrževali 3,74 hm³ vode (VGI, 1980). Akumulacija Pernica I je imela do leta 2006 ojezeritev na stalni koti gladine pri 247,20 m. n. v., ki jo je vzdrževal fiksni preliv z dodatnimi finimi rešetkami. Volumen za zadrževanje visokih vod do maksimalne gladine na koti 249,00 m. n. v. je obsegal 1,05 hm³, namesto po prvotnem projektu predvidenih 1,515 hm³ od kote fiksnega preliva pri 246,40 m. n. v. do kote maksimalne zaježitve akumulacijskega bazena Pernica I (Juvan, 2007).

Med rekonstrukcijo, kjer je del avtocestnega odseka posegel v območje obstoječe akumulacije, prav tako pa je bilo potrebno nadomestiti izgubljene retencijske površine zaradi izgradnje avtoceste v Pesniški dolini, je bil odstranjen del mulja iz zadrževalnika. Rekonstrukcija je posegala v volumne obstoječe akumulacije. S spremembo geometrije akumulacije in z vzpostavitev hidromehanske opreme na zapornem objektu se je volumen pri koti 250 m. n. v. (ekstremna zaježba) zmanjšal za 7,2 % oziroma 171 000 m³. Volumen za zadrževanje visokovodnih konic pa se je povečal za 39 % na 1,46 hm³.

Leta 2013 se je zaradi intenzivnega odlaganja plavin na območju akumulacije izvedla meritev batimetrije (Harpha Sea d. o. o., 2013). Iz primerjave volumnov med leti 2009 in 2013 je razvidno, da se je prostornina akumulacijske ojezeritve pri maksimalni gladini (249 m. n. v.) povečala za 4,5 % na 1,636 hm³.

Preglednica 19: Spremembe ocenjenega volumna akumulacije Pernica I (Vir: (VGI, 1980), (Krajnc, 2009), (Harpha Sea d. o. o., 2013), (Kračun, 2017)).

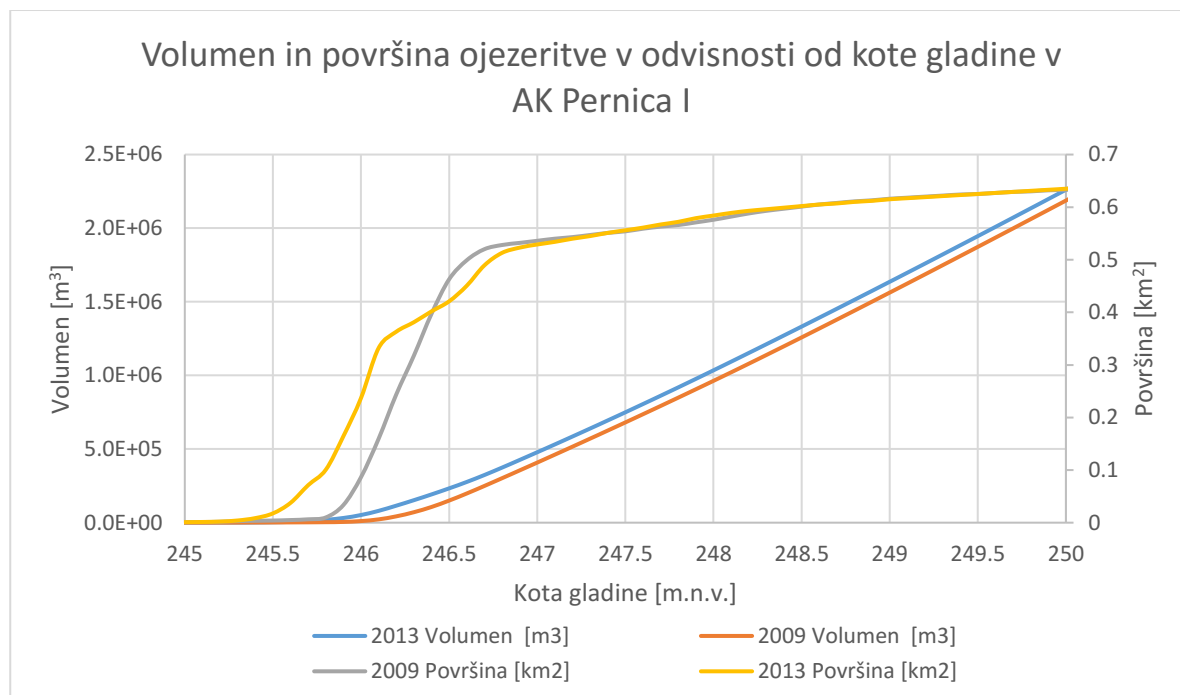
Nadmorska višina gladine H [m. n. v.]	Leto			
	1980	2006	2009	2013
250,00	2.300.000	2.359.000	2.187.550	2.226.980
249,00	1.540.000	2.300.000	1.562.550	1.635.800
246,40	Ni podatka	785.000	106.650	191.910

Podatkov batimetrije in volumnov za zgornjo akumulacijo Pernica II nimamo. Zasledili smo samo oceno iz leta 1982 (VGI, 1980) in oceno v dokumentu IZVRS iz leta 2014. Na podlagi DOF posnetkov iz različnih časovnih obdobj je razvidno, da se volumen akumulacije Pernica II zmanjšuje in da je vsako leto plitvejša. Na območja vtoka Vukovskega in Jareninskega potoka se je razvil naplavni vršaj z mokriščem in raznolikim živalskim svetom ter s habitatnim okoljem, zato je območje tudi zaščiteno kot zoološki naravni spomenik (*Atlas okolja*, 2016).

Preglednica 20: Spremembe ocenjenega volumna akumulacije Pernica II (IZVRS, 2014; VGI, 1980).

Nadmorska višina gladine H [m. n. v.]	VGI Ljubljana [m ³]	DRSV in IzVRS [m ³]
	1982	2010
250,00	1.440.000	1.420.000
249,00	810.000	Ni podatka

Iz GIS analiz smo izvednotili soodvisnost volumna in površine omočenega dela akumulacijskega bazena v odvisnosti od nadmorske višine gladine vode. Krivulja volumen/kota gladine in krivulja površine ojezeritve/kota gladine lahko služita kot izhodiščna podatka za nadaljnje študije ali kot pripomoček pri upravljanju z akumulacijskim prostorom (npr. hidrološke študije, manipulacijo z zapornicami ipd.).



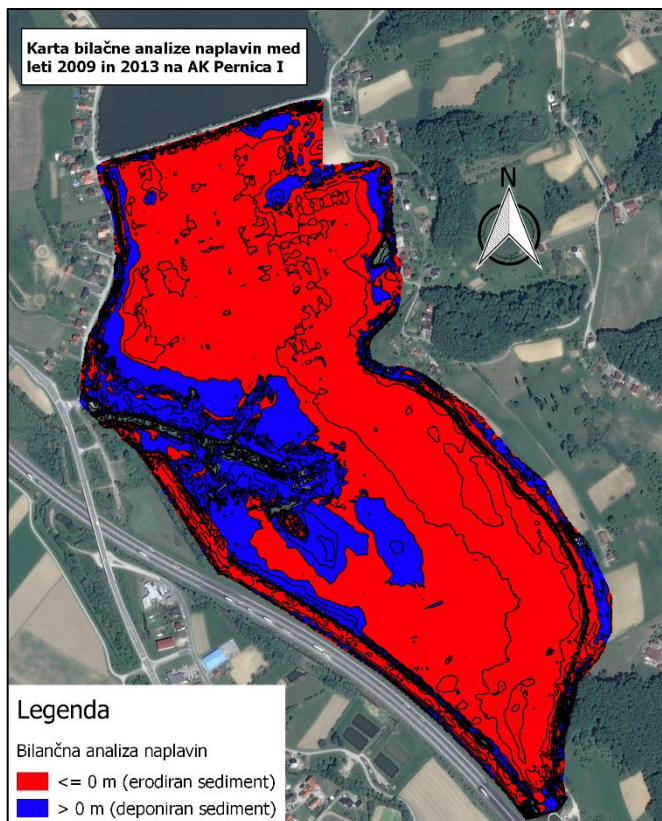
Slika 42: Grafikon volumna in površine ojezeritve AK Pernica I v odvisnosti od kote gladine v letih 2009 in 2013.

4.2.3 Bilančna analiza morfoloških sprememb med leti 2009 in 2013

Spreminjanje volumna akumulacije in zamuljevanje sta tesno povezana pojava na AK Pernica I in II. Celoten volumen sedimenta v akumulaciji je bil v letu 2014, kljub delni odstranitvi med rekonstrukcijo, ocenjen na 370.000 m³ (Blažeka & Petkovšek, 2014).

Nadaljnja analiza v GIS okolju je bila izdelava morfološke bilančne analize (*angl. cut-fill analysis*) iz razlike nadmorskih višin dna akumulacije med letoma 2009 in 2013, ki je rezultat

razlike rastrskih slojev za posamezno batimetrijo. Bilančna karta (Slika 43) prikazuje območja erodiranja in odlaganja sedimenta. Na karti razlike batimetrije so s pozitivnimi vrednostmi prikazana območja odlaganja sedimenta (modro obarvano območje), z negativnimi vrednostmi pa območja erodiranja le-tega (rdeče obarvano območje). Slika v nadaljevanju prikazuje rezultate bilančne analize, podrobna bilančna karta je prikazana v Prilogi B.

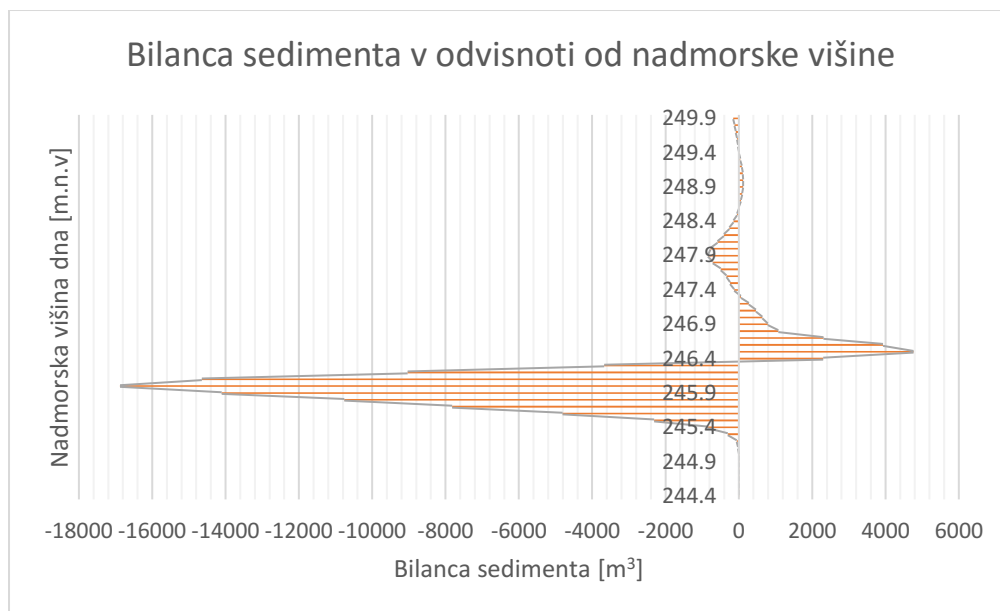


Slika 43: Bilančna analiza naplavin na AK Pernica I

V večjem delu akumulacijskega bazena AK Pernica I so območja erodiranja sedimenta, ki je posledica rekonstrukcije pregradnega objekta iz jezusa s fiksnim prelivom v pregradni objekt s segmentnimi zapornicami. Območja erozije sedimenta so na osrednjem delu med zemeljsko pregrado na severnem delu in območjem vtočnega vršaja ter ob vzhodnem delu akumulacije do pregradnega objekta. Erozijska oziroma odnašanje sedimenta zelo finih frakcij z dna akumulacije se je pojavila na območju, kjer se je zaradi spremembe pregradno-zapornega objekta, oblike akumulacije in odlaganja sedimenta na območju odtočnega vršaja spremenila razporeditev hitrostno-pretočnega polja v akumulaciji. K izpiranju sedimenta z dna prav tako prispeva dotok iz prepusta in preliva iz AK Pernica II ter v omejenem obsegu vsakoletno praznjenje akumulacije za potrebe izlova rib. Predpisana omejitev hitrosti zniževanja gladine vode v akumulaciji je 30 centimetrov na dan.

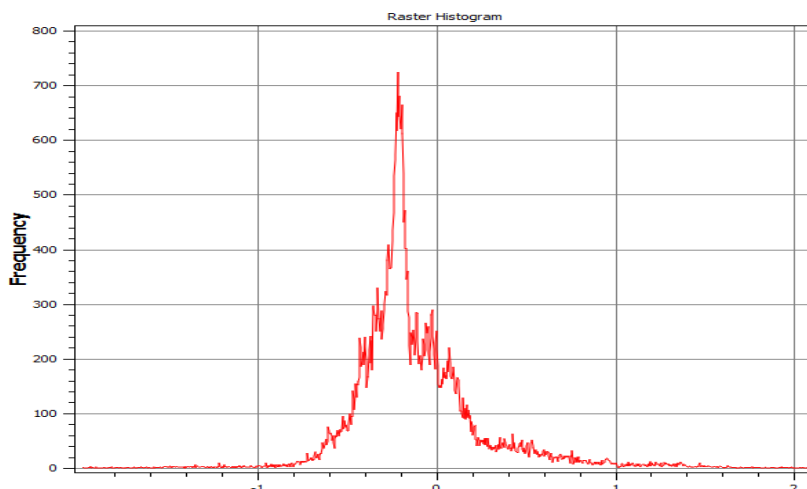
Odlaganje plavin se je pojavilo na območju vtočnega vršaja oziroma delte reke Pesnice. Reka na tem območju zaradi spremenjenih hidrodinamičnih pogojev (hitrosti in globine) odlaga sediment ter ga po treh kanalih na območju naplavnega vršaja razporeja po območju akumulacijskega bazena AK Pernica I. Odlaganje sedimenta je najbolj prisotno v jugozahodnem delu in v območju med naplavnim vršajem in pregradnim objektom. Jugozahodni del akumulacije je tako zapolnjen s polji, kjer bujno uspeva vegetacija, ki dodatno pospešuje deponiranje sedimenta.

Iz grafične ponazoritve bilančne analize je razvidno, da se je v času med letom 2009 in 2013 po rekonstrukciji pregradnega objekta in posledičnim naravnim erozijskim procesom premeščanja plavin, volumen akumulacije povečal predvsem zaradi odnašanja finih frakcij na globokih predelih akumulacije. Na območju naplavnega vršaja pa je razvidno odlaganje plavin v smeri jugozahodnega dela akumulacije Pernica I.



Slika 44: Bilančna razlika sedimenta po višinskih pasovih izračunana kot razlika v batimetriji akumulacije Pernica I med leti 2009 in 2013

Primerjava bilančne analize prostornine sedimenta po višinskih pasovih izkazuje, da se je največji delež sedimenta erodiral na območju med najnižjim točkam akumulacije in koto stalne ojezeritve (246,40 m. n. v.). Največjo stopnjo erozije tako beležimo na območju višinskih pasov na koti 246,00 metrov nadmorske višine, kjer se je v deset centimeterskem višinskem pasu erodiralo več kot 16 000 m³ sedimenta. Bilančni pasovi nad koto stalne ojezeritve pa izkazujejo odlaganje sedimenta (do kote 247.40 m. n. v.), ki je posledica odlaganja sedimenta ob višjih vodostajih v akumulaciji.



Slika 45: Histogram rastrskega sloja razlike, ki prikazuje število celic glede na erozijo (negativne vrednosti) in deponiranje (pozitivne vrednosti)

Iz bilančne analize rastrskih slojev razlike DMV lahko določimo skupni volumen erodiranih in deponiranih območij v AK Pernica I. Skupno zmanjšanje volumna sedimenta znaša $73\,440\text{ m}^3$, pri tem je erodiran del znašal $129\,180\text{ m}^3$ ter deponiran del $55\,740\text{ m}^3$. Iz bilančne analize rastrskih slojev je razvidno, da je erozija najpogostejše odlašala sediment v debelini med 20 in 30 cm, območja odlaganja pa obsega predvsem debeline odloženega materiala do 20 cm.

Povečanje volumna akumulacije je posledica uspešnih ukrepov ravnanja s sedimentom v akumulaciji. Predvsem ukrep spremembe zaporno-pregradnega objekta je bistveno podaljšal življenjsko dobo akumulacije. Zamuljevanje akumulacije, količina mulja (sedimenta), ki se je odložila v akumulaciji, in večanje naplavnega vršaja kaže, da izvedeni ukrepi niso zadostni za preprečevanje odlaganja sedimenta. Potrebno je poudariti, da se proces erozije odloženih muljev, ki so bili posledica prejšnjega pregradnega objekta, najverjetneje zaključuje. Volumen deponiranega sedimenta in sukcesije v obdobju 4 let kažeta na trend odlaganja dodatnih cca. $14\,000\text{ m}^3$ sedimenta na leto, ki je odvisen predvsem od večjih hidroloških dogodkov.

Volumen, namenjen za zadrževanje visokih voda, to je nad koto stalne ojezeritve (246,40 m. n. v.) do maksimalne gladine (249,00 m. n. v.), zaradi procesa zamuljevanja ni bistveno ogrožen, saj se je v tem obdobju zmanjšal z $1,456\text{ hm}^3$ na $1,444\text{ hm}^3$ oziroma za 0.81 %. Ostaja pa nerešeno vprašanje vpliva na zaježno krivuljo reke Pesnice in posledično povišanje gladine v gorvodnem odseku reke.

4.3 MODELIRANJE MORFOLOŠKIH SPREMEMB

Z izdelavo matematično-hidravličnega modela morfoloških sprememb želimo podrobneje spoznati potek in najpomembnejše zunanje parametre, ki vplivajo na spremembe morfologije v akumulaciji. Za potek modeliranja smo izbrali uveljavljeno programsko okolje DHI MIKE 21C. Za izdelavo končnih rezultatov smo v procesu izdelave matematičnega modela uporabili vhodne podatke, predstavljene v prejšnjem poglavju.

Uporabljen računalnik:

Procesor: Intel® Core™ i7-4790K 4.00 GHz

Notranji pomnilnik (RAM): 16.0 GB

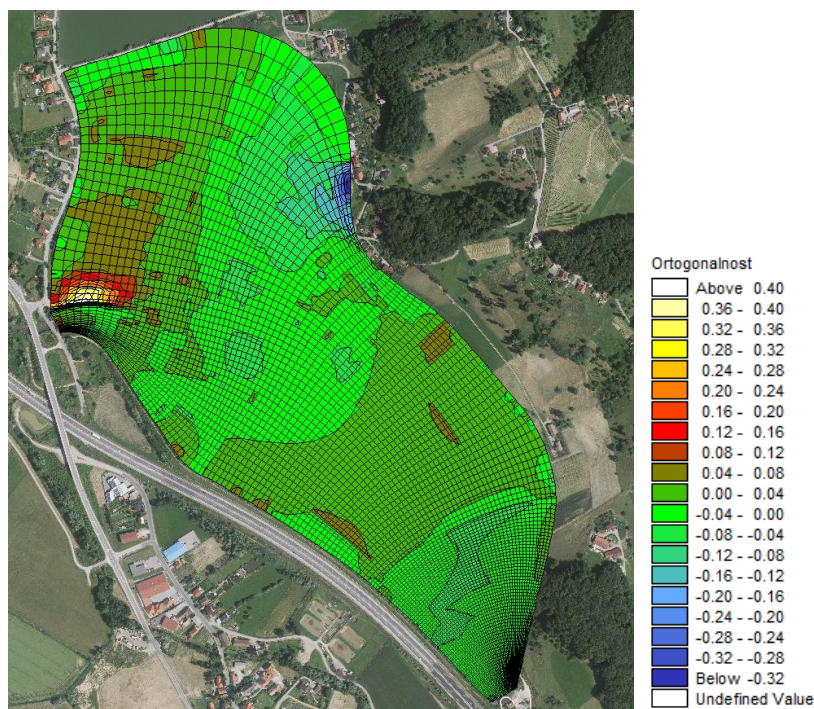
Grafična kartica: Nvidia GeForce GTX 960

4.3.1 Izdelava krivočrtne računske mreže

Za izdelavo krivočrtne nepravokotne numerične mreže smo uporabili modul Grid Generator, ki je del programskega paketa MIKE 21C. Obliko in razporeditev računskih celic smo oblikovali na podlagi batimetrije, terenskega ogleda in ortofoto posnetkov območja obdelave. Cilj pri izdelavi računske mreže je, da poskušamo zagotavljati pravokotnost računskih celic in smeri dejanskega pretoka, hkrati pa zagotavljati ustrezno stopnjo ortogonalnosti računskih celic. Proces izdelave računske mreže je primarno razvit za vodotoke, zato so razvejana območja, kot je naše, zelo zahtevna za izdelavo ustrezne računske mreže.

Mreža je sestavljena iz 49 celic v K-koordinatni smeri in 138 v J-koordinatni smeri lokalnega koordinatnega sistema. Z J-koordinatno smer smo v postopku izdelave mreže poskusili postaviti v predpostavljene smeri toka vode, K-smer pa leži pravokotno na tok vode. Za ponazoritev računske mreže, ki na lokalnih območjih zagotavlja ustrezno usmeritev računskih celic glede na predpostavljene smeri toka vode, smo območje akumulacije razdelili na 7 podobmočij. Podobmočja s predpostavljeno strukturo usmeritve računskih celic v programskem okolju združujemo v večje sklope, pri tem pa moramo biti pozorni na usklajeno število robnih računskih celic sosednjih podobmočij. Proces izdelave krivočrtne računske mreže je zato dolgotrajen postopek, kjer z iterativnim pristopom izdelamo računsko mrežo ustreznih lastnosti. Parametri, ki predstavljajo ustreznost računske mreže za uporabo pri simulaciji, so ortogonalnost, prostorsko razporejen gradient računskih celic v obeh horizontalnih smereh in razmerje med dolžino in širino celice. Za izvedenost ustreznosti izdelane računske mreže so v priročniku programske opreme priporočene vrednosti za posamezen parameter.

Na naslednji sliki je prikazana izdelana računska mreža s prikazanimi vrednostmi koeficienta ortogonalnosti. Optimalna vrednosti ortogonalnosti je vrednost 0, priporočene vrednosti pa so v mejah med - 0,05 in 0,05. Pri izdelani računski mreži smo v večjem delu računskega območja uspeli izdelati mrežo ustreznih karakteristik, vendar v nekaterih odsekih zaradi kompleksne geometrije obravnavanega območja in vsled zgoščene mreže na območju vtoka reke Pesnice ter naplavnega vršaja, nismo dosegli ustreznih vrednosti računske mreže. Območja neustreznih karakteristik se nahajajo v stranskih predelih računske mreže, ki bodo predstavljala neaktivna območja in območja manjših hidrodinamičnih ter morfoloških sprememb.



Slika 46: Izdelana krivočrtna računska mreža na barvni podlagi koeficienta ortogonalnosti, ki smo jo uporabili v računskem modelu in izdelali v modulu Grid Generator

Skupno je v izdelani krivočrtni numerični mreži 6762 računskih celic. Računsko območje obsega površino 65,6 ha, kar znaša povprečno površino računske celice 97 m² in povprečne dimenzije 9,8 x 9,8 m. Pri izdelavi velikosti računskih celic smo bili omejeni s topografskimi karakteristikami obravnavanega terena (npr. širina kanalov na območju naplavnega vršaja) in številom računskih celic, ki povzročajo povečanje računskih časov. Z uporabo relativno majhnih računskih celic smo natančneje aproksimirali DMV na računsko mrežo, pri tem pa smo posledično potrebovali daljše računske čase in krajši računski korak.

Krivočrtna nepravokotna računska mreža omogoča prilagoditev robovom obravnavanega področja. Območje krivočrtna računske mreže obsega področje akumulacijskega bazena od opuščenega mostu regionalne ceste na vtočnem delu reke Pesnice v akumulacijo. Na vzhodni in severni strani pa do krone nasipa oziroma do cestišča ter do območja brežine do nadmorske višine cca 451 m smo uporabili gibljiv rob za lažje oblikovanje pravokotnosti računskih celic znotraj akumulacijskega bazena. Robne celice so v računskem modulu neaktivne. Na jugu se računska mreža zaključi na območju cca 10 m pred pregradnim objektom oziroma zapornicami, saj je območje zapornic posebej zajeto v matematičnem modelu.

Ustrezno izdelano krivočrtno računsko mrežo pretvorimo z uporabo GIS programskega okolja v zapis digitalnega modela terena, ki ga uporablja programsko okolje MIKE (.dfs2 datoteka). V GIS programskem okolju na podlagi batimetrije (DMV) z metodo aproksimacije vsaki točki krivočrtna mreže določimo višinsko koto dna. Izdelana višinska mreža nam služi kot osnovni vhodni podatek pri hidrodinamičnem in kasneje morfološkem delu hidravličnega modela.

4.3.2 Hidrodinamični model

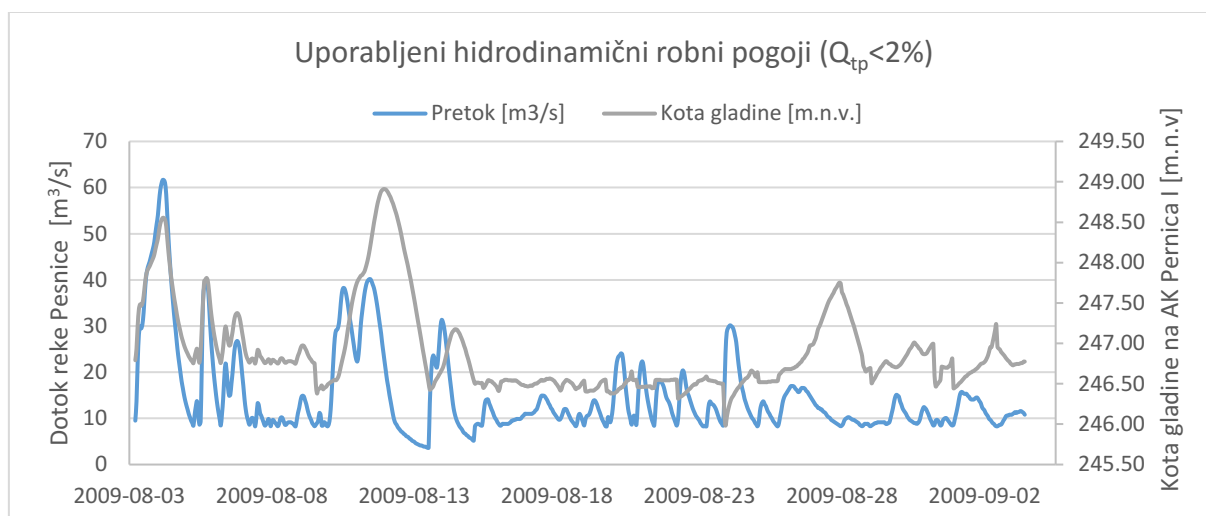
Za osnovno hidrodinamično simulacijo smo izbrali 2 % najvišjih pretokov v opazovanem obdobju s popravki za gladkost prehoda podatkov o vodostajih gladine v akumulaciji. Hidrodinamična simulacija je tako obsegala:

Preglednica 21: Glavni vhodni podatki hidrodinamičnega modela

Spremenljivka	Vrednost
Izbrano obdobje	avg 2009 – nov 2013
Pojavnost pretokov	<2 % v opazovanem obdobju
Obdobje simuliranih dogodkov	32,75 dni
Časovni korak	0.1 s
Topografija	DMV območja AK Pernica za leto 2009
Zgornji robni pogoj	Modificiran pretok reke Pesnice na vtoku v AK Pernica I
Spodnji robni pogoj	Kota gladine pred zapornicami na AK Pernica v odvisnosti od časa
Manningov koef. hrapavosti [$m^{0,33}/s$]	30 (konstantna vrednost za celotno območje AK Pernica I)
Koef. turbulentne viskoznosti [m^2/s]	Po enačbi Smagorinsky ($f(v)$) – Konstantna vrednost brezdimenzionalnega faktorja: 0,5

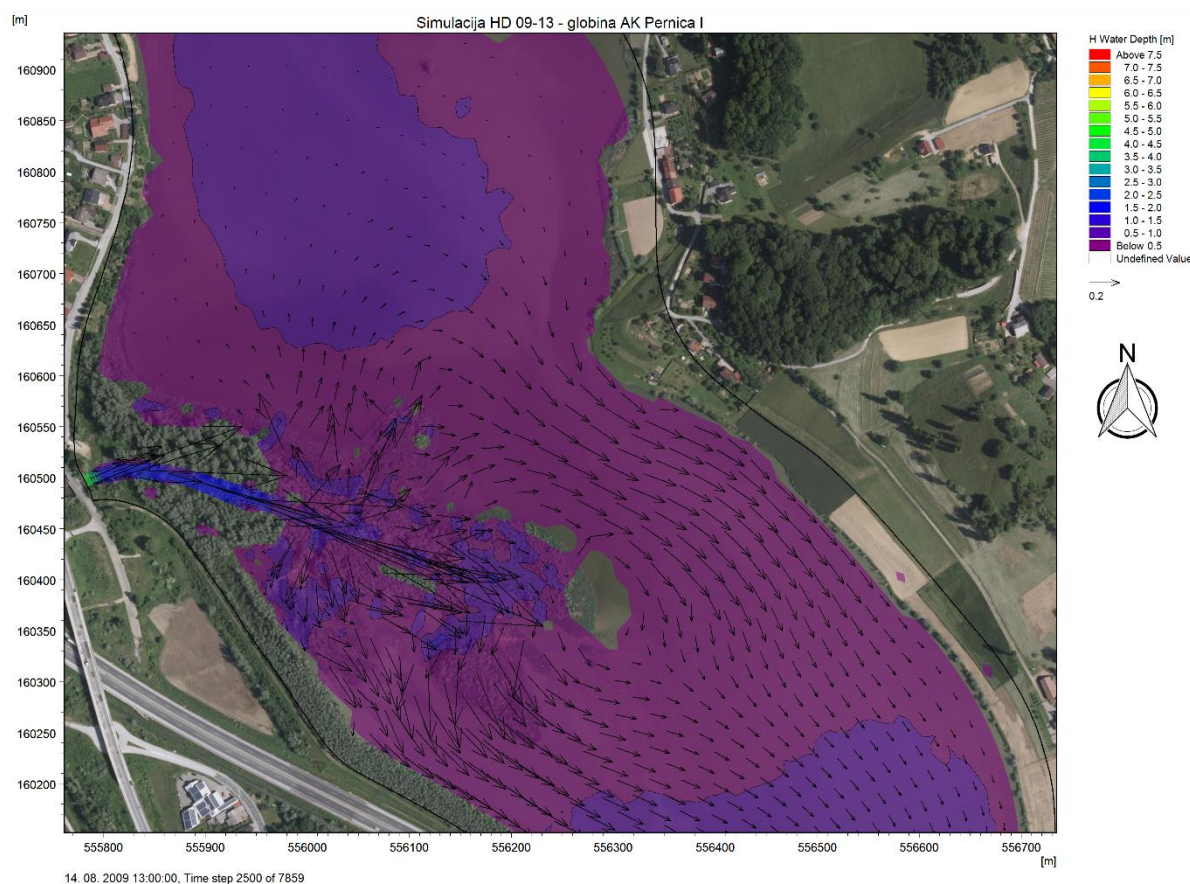
Hidrodinamičnega dela modela zaradi omejenega obsega vhodnih podatkov ni bilo mogoče kalibrirati, prav tako pa tudi ne validirati. Za potrebe kalibracije bi bilo potrebno izvesti meritve pretočnih hitrosti v nekaj točkah na območju akumulacije. Z uporabo pridobljenih podatkov bi s spreminjanjem vrednosti koeficienta hrapavosti (prostorsko in vrednostno) dosegli ustrezne računske vrednosti hitrosti. Z enakimi (podobnimi) vrednosti merjenih in simuliranih hitrosti bi pridobili umerjene vrednosti koeficientov hrapavosti na območju akumulacije.

Poudariti je potrebno, da se koeficient hrapavost v času simulacije lahko prostorsko spreminja, saj se zaradi dolgega obdobja opazovanja v akumulaciji pojavljajo območja s sezonskim spreminjanjem vegetacije. V simulaciji smo upoštevali enotno hrapavost za celotno opazovano obdobje. Koeficient turbulentne viskoznosti [m^2/s] je bil izračunan v sklopu programskega okolja in sicer po metodi Smagorinsky osnovani na hitrostni porazdelitvi s koeficientom 0,5.



Slika 47: Uporabljeni hidrodinamični zgornji in spodnji robni pogoji v simulaciji pretokov, ki imajo na krivulji trajanja pretokov krajše trajanje kot 2 % leta

Rezultati hidrodinamičnega dela modela nam nudijo vpogled v tokovno sliko na območju akumulacijskega bazena zaradi nihanja pretokov in gladine, ki je posledica stopnje odprtosti segmentnih zapornic. Rezultati hidrodinamičnega dela modela nam prikažejo porazdelitev hitrosti, pretok, nihanje gladine in pretočne razmere znotraj akumulacije v času simulacije.

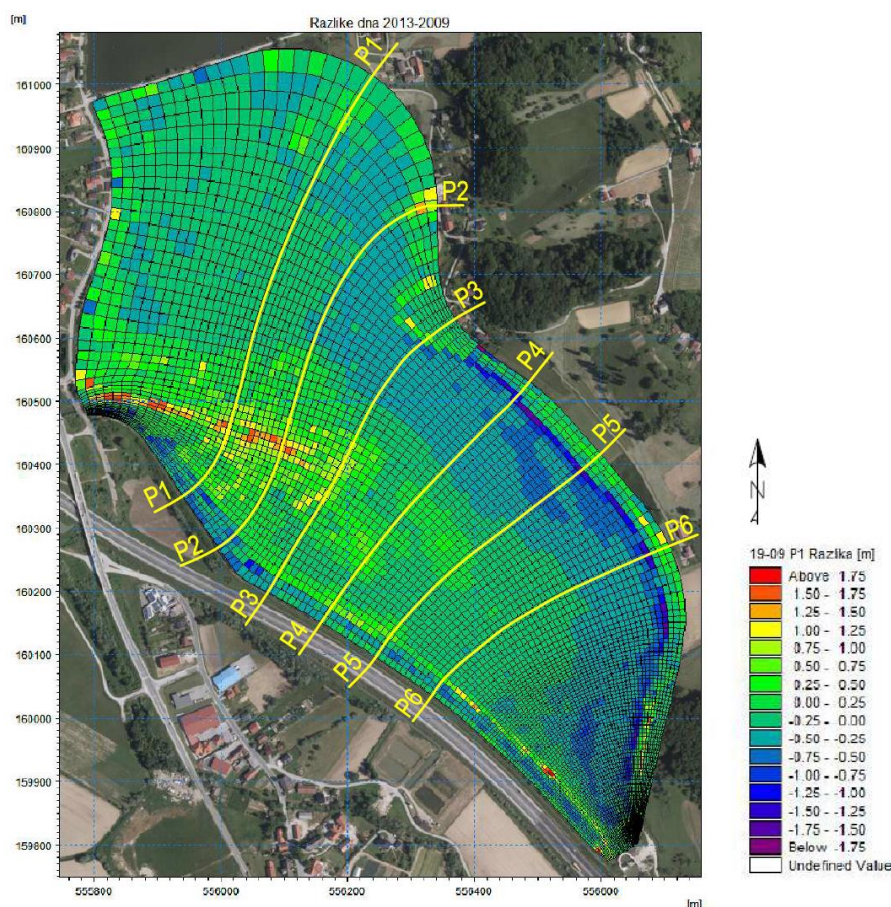


Slika 48: Primer izračunanega hitrostnega polja izbranega območja akumulacije, kjer je jasno razvidna pretočna razporeditev vektorjev lokalnih hitrosti na območju akumulacije Pernica I

4.3.3 Model morfoloških sprememb

Na podlagi izdelanega hidravličnega modela smo z vključitvijo morfološkega modula v programskem orodju nadaljevali s testiranjem in z umerjanjem morfološkega modela. V sklopu testiranja in umerjanja morfološkega modela smo postopoma izbirali metodologijo in parametre. Za potrebe umerjanja modela in testiranja vhodnih parametrov smo izbrali 6 prečnih profilov, sestavljenih iz 47 točk, ki predstavljajo vrednosti v posamezni računski celici krivočrtne numerične mreže. Z uporabo primerjave računskih celic, ki so direkten rezultat simulacije, smo preprečili morebitna odstopanja, ki so posledica interpolacije računskih točk pri izoblikovanju DMV rezultatov simulacije.

Opazovalne profile smo umestili v območje AK Pernica na podlagi pričakovanih največjih razlik batimetrije iz predhodnih analiz v GIS programskem okolju. Profil P6 se nahaja na območju naplavnega vršaja ter profil P1 na območju odvzema vzorca »Pernica3« v JV delu akumulacije. Vmesni profili so enakomerno razporejeni po krivočrtni računski mreži med tema dvema profiloma. Opazovalnih profilov nismo umestili v območje SZ dela akumulacije in JV dela, saj so na tem območju zaradi vpliva robnih pogojev pričakovana računska odstopanja. Opazovalni profili so zakrivljeni skladno s krivočrtno računsko mrežo. S primerjavo izračunanih in merjenih vrednosti geometrije dna akumulacijskega bazena iz leta 2013 smo za vsak posamezen profil in za vsako simulacijo določili štiri parametre skladnosti rezultatov simulacije z meritvami.



Slika 49: Opazovalni prečni profili (P1-P6) za statistično analizo rezultatov računske simulacije in grafični prikaz razlik batimetrije med leti 2009 in 2013 na aproksimirani krivočrtni mreži za računsko območje na AK Pernica I (pozitivne vrednosti - območja odlaganja, negativne vrednosti – območja erodiranja).

Za določanje maksimalnega in minimalnega odstopanja smo izvedli točko (računsko celico) največjega odstopanja v negativni vrednosti in pozitivni vrednosti. Pozitivne vrednosti izkazujejo deponiranje materiala, negativne vrednosti pa odnašanje materiala v primerjavi z meritvami v letu 2013.

Za vsak posamezen profil in simulacijo smo določili tudi povprečno odstopanje od merjenih vrednosti Δz . Boljšo predstavitev soodvisnosti rezultatov simulacije in meritev smo dosegli z določitvijo standardne deviacije za vsak posamezen profil ter iz teh vrednosti povprečno standardno deviacijo za vsako posamezno simulacijo $\Delta \sigma$. Z upoštevanjem standardne deviacije rezultatov simulacije v vseh točkah smo identificirali raztros izračunanih vrednosti v vsakem opazovalnem profilu – manjši, kot je raztros odstopanja rezultatov simulacije od meritev, boljši so rezultati simulacije.

Statistični obdelavi prečnih profilov smo za vrednotenje uspešnosti rezultatov simulacije pri kalibraciji dodali še vizualno oceno skladnosti izračuna z merjenimi vrednostmi dna iz leta 2013. Z upoštevanjem obeh načinov vrednotenja smo izbrali ustrežnejšo in jo uporabili v nadaljnjem postopku kalibracije. Postopek kalibracije morfološkega modela razširjenega matematičnega hidravličnega modela je predstavljen v nadaljevanju po korakih.

Pri modeliranju smo zaradi lažje primerjave, sledenju in preglednosti kombinacij vhodnih parametrov simulacije vzpostavili sistem označevanja simulacij. Simulacije imajo sledečo oznako:

XY_AB_CD_EF

Kjer je:

XY ... oznaka avtorja enačbe premestitvene zmogljivosti:

- VR - Van Rijn,
- EH - Engelund - Hansen,
- EF - Engelund-Fredsoe.

AB ... oznaka načina vnosa lastnosti sedimenta:

- 01 - enovito srednje zrno d_{50} za celotno območje obdelave,
- 02 - ploskovna porazdelitev vrednosti srednjega zrna d_{50} ,
- 03 - enoviti razredi velikosti zrna iz povprečne zrnastostne krivulje za celotno območje akumulacije.

CD ... oznaka načina računanja simulacije glede simulacijsko obdobje (zgornji in spodnji hidrodinamični robni pogoj):

- 01 - visoke vode v septembru 2010 (poskusne simulacije),
- 02 - modificirani pretoki, kota gladine in kalnost za opazovano obdobje avgust 2009 - november 2013,
- 03 - modificirani pretoki, kota gladine in kalnost za opazovano obdobje november 2013 - januar 2020.

EF ... zaporedna številka simulacije glede na kombinacijo vhodnih parametrov lastnosti sedimenta. Številčno naraščajoče vrednosti celih števil od 01.

4.3.3.1 Korak 1: Izbira načina računanja premestitvene zmogljivosti

V prvem koraku smo testirali enačbe za izračun premestitvene zmogljivosti. Za simulacijo smo uporabili enačbe Van Rijna in enačbi Engelund-Hansen, z enotnim premerom povprečnega srednjega zrna $d_{50}=0.036$ mm. S primerjavo rezultatov simulacije za celotno premestitveno zmogljivost (*angl. total load*) in z modulom premestitvene zmogljivosti za lebdeče plavine (*angl. suspended load*) smo preverili obseg premeščanja rinjenih plavin (*angl. bed load*) v modelu.

Preglednica 22: Izbrane spremenljivke morfološkega modula M21C

Simulacija	VR_01.02.03	EH_01.02.03	VR_01.02.04	EH_01.02.04
Enačba	Van Rijn	Engelund-Hansen	Van Rijn	Engelund-Hansen
Transport	skupna	skupna	lebdeče	lebdeče
Sediment	$d_{50}=0.036$ mm	$d_{50}=0.036$ mm	$d_{50}=0.036$ mm	$d_{50}=0.036$ mm
ΔZ [m]	0.156	0.150	0.156	0.150
$\Delta \sigma$ [m]	0.227	0.239	0.227	0.239

Po prvih poskusnih simulacijah, ki so prikazane v Preglednici 21, smo ugotovili, da rinjene plavine na morfološke spremembe v akumulaciji nimajo vpliva. V nadaljnjih simulacijah smo zato uporabili samo modul za premeščanje lebdečih plavin.

4.3.3.2 Korak 2: Izbira enačbe premestitvene zmogljivosti

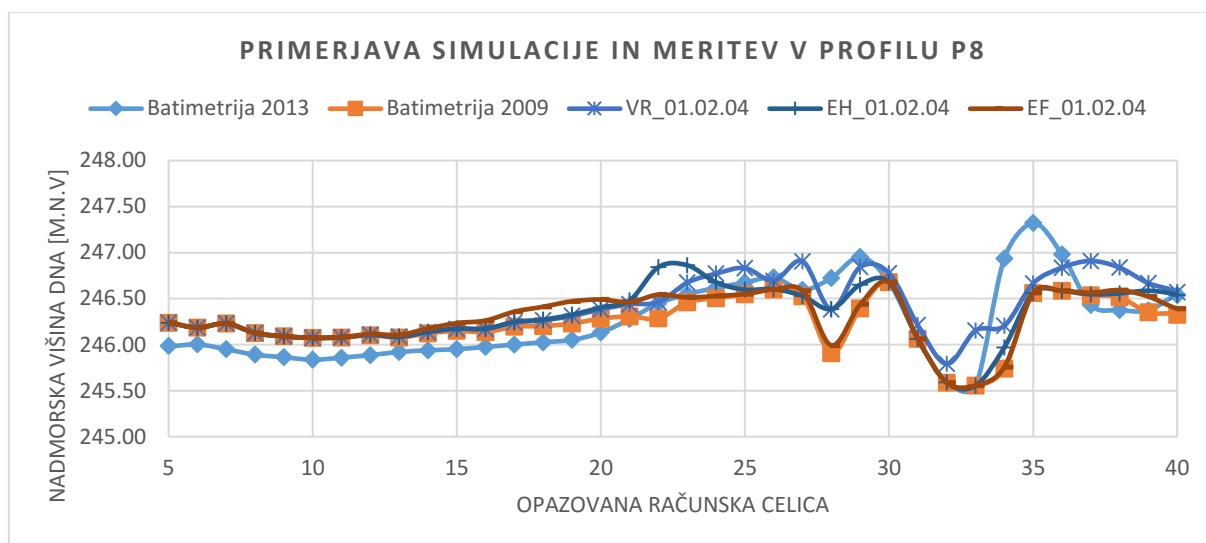
Pri izbiri enačbe premestitvene zmogljivosti smo testirali tri enačbe po različnih avtorjih: Van Rijn, Engelund-Hansen in Engelund-Fredsøe. Rezultate izračunov morfološkega modela po različnih avtorjih smo primerjali z meritvami iz leta 2013 po dveh metodah. Prva metoda je vključevala statistično primerjavo, druga pa vizualno primerjavo prečnih profilov. Za vse enačbe smo predpostavili enotne lastnosti sedimenta iz Preglednice 16.

Preglednica 23: Rezultati simulacije za izbiro enačbe premestitvene zmogljivosti

Simulacija	VR_01.02.04	EH_01.02.04	EF_01.02.04
Enačba	Van Rijn	Engelund Hansen	Engelund - Fredsøe
Sediment	$d_{50}=0.036$ mm	$d_{50}=0.036$ mm	$d_{50}=0.036$ mm
ΔZ [m]	0.156	0.150	0.134
$\Delta \sigma$ [m]	0.227	0.239	0.261

Rezultati morfoloških sprememb so se v statistični obdelavi relativno malo razlikovali. Pri vizualni primerjavi prečnih profilov so bile razlike izračunanih vrednosti očitne. Za izbiro ustrezne enačbe za nadaljnjo delo smo zato sistematično upoštevali razlike v odlaganju in erodiranju in usklajenost izračunanih vrednosti z izmerjenimi v letu 2013.

Najmanjše povprečno odstopanje je imela enačba premestitvene zmogljivosti Engelund-Fredsøe, ki pa je hkrati imela najvišjo vrednost povprečne standardne deviacije v opazovanih prečnih profilih.



Slika 50: Vizualna primerjava izračunanih vrednosti v koraku 2 v prečnem profilu P8

Vizualna analiza pokaže, da sta simulaciji z uporabo enačbe premestitvene zmogljivosti po Engelund-Hansen (EH_01.02.04) in Engelund-Fredsoe (EF_01.02.04) podcenili odlaganje na območju naplavnega vršaja in precenili odlaganje na območju izven vršaja. Rezultati simulacije po Van Rijn (VR_01.02.04) izkazujejo ustrezno odlaganje na območju bregov naplavnega vršaja in tvorjenje poplavnih nadvodnih naravnih nasipov. Simulacija po tej enačbi ima povečano odlaganje na območju vtočnega kanala, ki pa je lahko posledica nenatačnosti vhodnih podatkov, saj smo za območje vtočnega kanala zaradi pomanjkanja meritev predpostavili potek dna.

Na podlagi statistične in vizualne analize smo za nadaljnje izračune izbrali metodo premestitvene zmogljivosti po enačbi Van Rijna. Rezultati po tej enačbi so imeli po statistični primerjavi največje povprečno odstopanje, vendar pa po vizualni analizi in standardni deviaciji najboljše ujemanje z merjenimi vrednostmi dna iz leta 2013.

4.3.3.3 Korak 3: Izbira načina vnosa lastnosti sedimenta v model

Programsko okolje morfološkega hidravličnega modela MIKE21C omogoča vnos lastnosti sedimenta po treh metodah. Podatke smo pripravili v poglavju 4.1.3. Izračunane vrednosti smo primerjali po enaki metodi kot v prejšnjih točkah. Za testiranje tretje metode vnosa sedimenta po združenih razredih enotne zrnivosti se v pripravi naloge nismo odločili zaradi preobsežnosti priprave različnih sklopov razredov in kompleksnosti pri nadaljnjem testiranju.

Preglednica 24: Rezultati simulacije za izbiro načina vnosa podatkov o lastnostih sedimenta v morfološki model

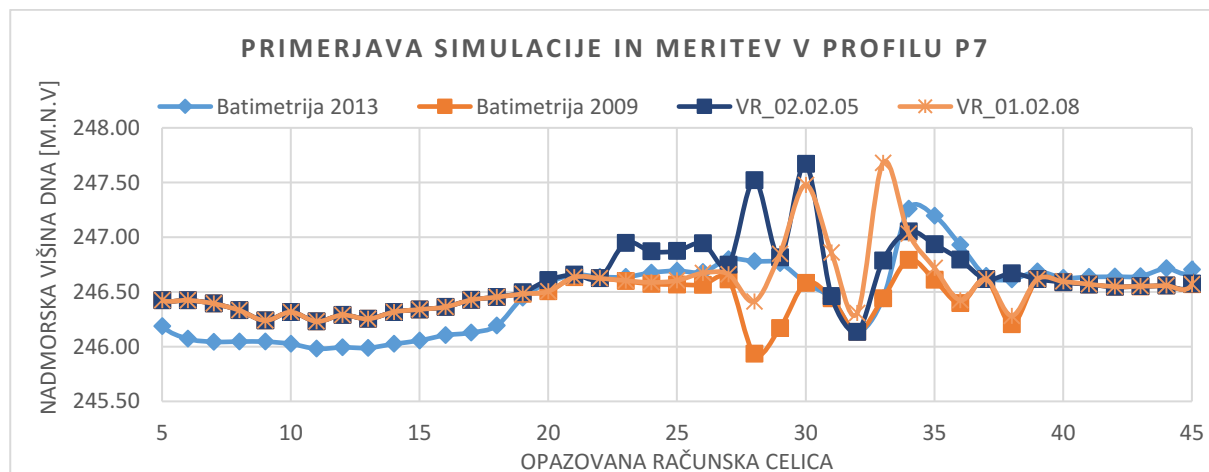
Simulacija	VR_01.02.04	VR_02.02.04
Enačba	Van Rijn	Van Rijn
Sediment	Enovito srednje zrno $d_{50}=0.036$ mm	Ploskovna porazdelitev d_{50}
ΔZ [m]	0.156	0.152
$\Delta \sigma$ [m]	0.227	0.270

Pri statistični in vizualni analizi je pri izračunanih vrednostih za morfološki model s ploskovno razdelitvijo povprečnega premera srednjega zrna izstopalo območje s prekomernim odlaganjem na območju naplavnega vršaja. Vsled temu in zaradi hitrejšega spreminjanja vrednosti povprečnega zrna za vnos v programsko okolje smo za nadaljnjo delo uporabili metodo z enovitim premerom zrna za celotno območje d_{50} .

4.3.3.4 Korak 4: Preverjanje rezultatov morfološkega modela s spreminjanjem parametrov sedimenta

V tem koraku smo za preverjanje rezultatov morfološkega modela spreminjali upoštevane lastnosti sedimenta. Vzorci sedimenta so bili odvzeti točkovno v samo štirih točkah na območju celotnega akumulacijskega bazena, zato nam povprečne vrednosti laboratorijsko določenih parametrov sedimenta podajo samo okvir za oceno dejanske porazdelitve sedimenta znotraj akumulacijskega bazena. V prvi simulaciji četrtega koraka smo izvedli simulacijo z vključenim modulom za kohezivni sediment. Simulacija z vključenim modulom za koherentnost sedimenta je izkazala statistično in predvsem vizualno izboljšanje ustreznosti rezultatov simulacije, zato smo jo uporabili v nadaljnjih simulacijah.

V naslednjih simulacijah smo spreminjali velikost srednjega zrna in pripadajočih lastnosti. Za simulacije smo uporabili vrednosti srednjega zrna s pripadajočimi lastnostmi vzorcev, ki smo jih odvzeli na akumulaciji. Vzorec »Pernica4« s srednjim zrnem $d_{50}=0.084$ mm je predstavljal simulacijo z največjim premerom enovitega srednjega zrna, vzorec »Pernica3« pa simulacijo z najmanjšim srednjim zrnem. Srednjega zrna iz lokacije vzorca »Pernica1« v simulaciji nismo testirali, saj se območje odvzetega vzorca nahaja v stranskem predelu akumulacijskega bazena. Domnevo smo potrdili z uspešno simulacijo z uporabo karakteristik sedimenta vzorca »Pernica3«, ki je izkazoval neustrezno odlaganje v primeru manjših frakcij srednjega zrna. Odstopanja rezultatov simulacije od merjenih podatkov batimetrije za leto 2013 je razvidno na sledeči sliki.



Slika 51: Prikaz odstopanja izračunanih vrednosti za simulacijo z velikim ($d_{50}=0.084$ mm) in manjšim ($d_{50}=0.011$ mm) povprečnim srednjim premerom enovitega zrna plavin

V procesu testiranja odzivnosti morfološkega modela simulacije smo spoznali, da je model v primeru podajanja večjih frakcij povprečnega zrna prekomerno odlagal sediment na območju naplavnega vršaja. Večje, kot so bile frakcije, večja in višja je bila količina odloženega

materiala. V primeru drobnejših frakcij pa so rezultati simulacij prav tako predvideli prekomerno odlaganje na območju naplavnega vršaja, vendar so bila največja območja odlaganja sedimenta pomaknjena v smeri proti pregradnemu objektu.

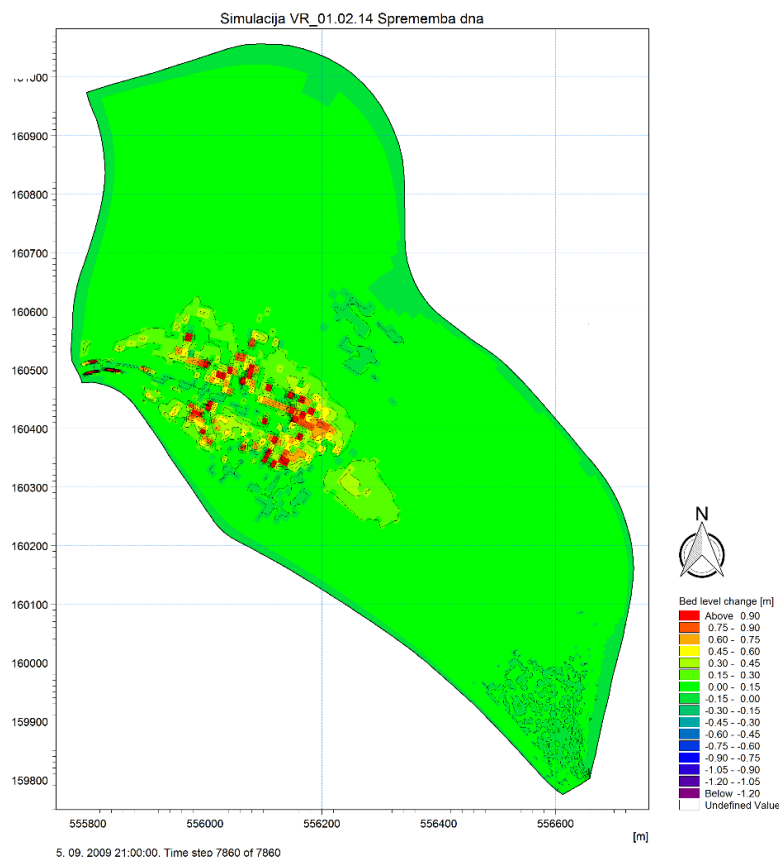
4.3.4 Rezultati modeliranja morfoloških sprememb 2009-2013

Vhodni umerjeni parametri končne izbrane simulacije VR_01.02.14 tako obsegajo podatke hidrodinamične simulacije, predstavljene v prejšnjem poglavju (4.3.2) in umerjene parametre morfološke simulacije. Izbrana simulacija je bila izvedena z modulom za upoštevanja kohezivnosti plavin ter (kot določeno v prejšnjih korakih) po enačbi za premeščanja suspendiranih plavin Van Rijn in z enovitim srednjim zrnem $d_{50}=0.04$ mm.

Preglednica 25: Pregled umerjenih parametrov pri simulaciji morfoloških sprememb 2009–2013

Spremenljivka	Vrednost
Izbrano obdobje	avg 2009–nov 2013
Pojavnost pretokov	<2 % v opazovanem obdobju
Topografija	DMV območja AK Pernica za leto 2009
Zgornji robni pogoj	Modificiran pretok lebdečih plavin na vtoku v AK Pernica I iz obdobja 2009-2013
Spodnji robni pogoj	Brez spremembe dna na spodnjem robu obravnavanega območja (prag pregrade)
Transport	Samo lebdeče plavine
Enačba premestitvene zmogljivosti	Van Rijn
Modul kohezije	Da
Način vnosa lastnosti plavin	Enovito povprečno zrno $d_{50}=0.04$ mm
Poroznost [-]	0,445
Relativna gostota [-]	1,513
Shieldsov brezdim. parameter [-]	0.089
Začetna koncentracija susp. plavin	50 g/m ³

V postopku umerjanja smo stremeli k spreminjanju parametrov plavin v mejah naravnih vrednosti. Predvsem smo spreminjali velikosti srednjega zrna in na le-te dodali ostale lastnosti iz rezultatov laboratorijske analize vzorcev, ki so imeli podobno velikost srednjega zrna d_{50} . Simulacija VR_01.02.14 vsebuje lastnosti sedimenta, ki so povprečna vrednost med lastnostmi sedimenta vzorca »Pernica2« ($d_{50}=0,043$ mm) in povprečnimi srednjimi vrednostmi vseh odvzetih vzorcev, ki so predstavljeni v Preglednici 16 ($d_{50}=0,036$ mm).



Slika 52: Grafični prikaz spremembe dna na območju AK Pernica I v izbrani končni simulaciji VR_01.02.14

Pri preverjanju ustreznosti izbranih nastavitev morfološkega modela smo primerjali karto bilančne analize območja AK Pernica I med leti 2009 in 2013, ki smo jo izdelali v poglavju 4.2. Območja spremembe dna akumulacije se relativno dobro ujemajo z območji računskega odlaganja sedimenta v bilančni analizi (Slika 43 in Priloga B). Po pričakovanih simulacija ni predvidela erodiranja naplavin iz prejšnjih obdobj, saj bi morali za ta območja predvideti zelo fine frakcije oziroma v hidrodinamičnem obsegu simulacije upoštevati deviacije gladine pri pretokih višje pojavnosti (nižji pretoki) in obdobja praznjenja akumulacije za potrebe izlova rib.

4.3.4.1 Analiza skladnosti rezultatov modela in meritev leta 2013

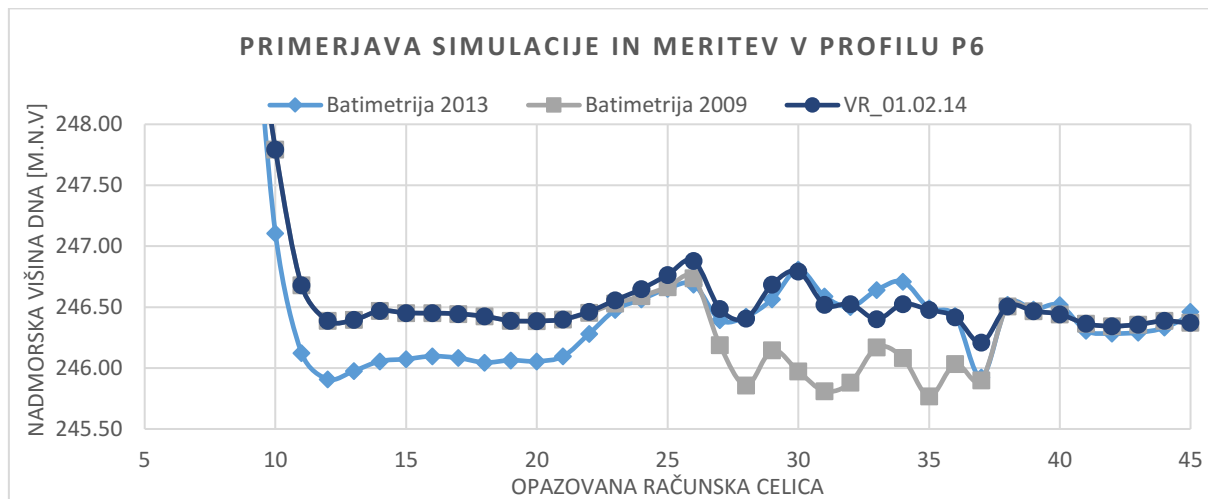
Za preverjanje ustreznosti rezultatov simulacije dvorazsežnostnega morfološkega modela smo uporabili meritve batimetrije iz leta 2013, kjer smo določili 6 opazovalnih prerezov.

Simulacija VR_01.02.14 je po statističnih kazalnikih pokazala najnižje razmerje med povprečnim odstopanjem in standardno deviacijo odstopanja rezultatov simulacije od meritev dna v letu 2013. Statistični kazalniki so predstavljeni v sledeči preglednici, rezultati vizualne primerjave izračunanih prečnih profilov pa v Sliki 53.

Preglednica 26: Statistični kazalniki končne umerjene simulacije morfološkega modela za obdobje 2009–2013

Simulacija	Povzetek	Profil	P6	P5	P4	P3	P2	P1
		Stolpec	20	30	40	50	60	70
VR_01.02.14 Van Rijn susp (k) $d_{50}=0.04$ mm	0.722	Max	0.722	0.515	0.687	0.511	0.620	0.599
	0.145	Povprečna	0.112	0.073	0.121	0.167	0.186	0.208
	-0.760	Min	-0.760	-0.398	-0.436	-0.531	-0.420	-0.393
	0.224	St. dev	0.282	0.206	0.221	0.233	0.232	0.173

Do razlik je prihajalo na območju brežin, kjer pa je razlika v terenu lahko nastopila tudi zaradi drugih naravnih procesov, kot je npr. posedanje brežine. V območju brežin prihaja tudi do računskega odstopanja pri interpolaciji DMV-ja na krivočrtno računsko mrežo.



Slika 53: Primerjava rezultatov simulacije VR_01.02.14 v profilu P6 z meritvami leta 2009 in 2013

Morfološki model prav tako ne upošteva sprememb v preusmeritvi toka zaradi zastajanja plavja, antropogenih vplivov v območje naplavnega vršaja ipd. Razlika v porazdelitvi dna, ki je ostala tudi po obširnem postopku preverjanja, je tudi posledica spremembe procesa odlaganja na akumulaciji s spremembo pregradnega objekta. Velikost povprečnega zrna na območju akumulacije je bila leta 2009 najverjetneje bistveno manjša kot pa v leto 2016, ko so bili odvzeti vzorci za laboratorijsko analizo.

V območju spodnjega dela akumulacije pri rezultatih simulacije prihaja do premajhnega obsega erozijskega procesa. K tej razliki lahko tudi prispevajo pretoki, ki so imeli večjo pojavnost v opazovanem obdobju kot izbrana mejna pojavnost pod 2 %. Prav tako nismo upoštevali pretoka iz zgornje akumulacije Pernica II, ki k deležu odloženih plavin ne prispeva, prinaša pa lebdeče snovi in prispeva k sedimentnim procesom na akumulaciji ob nizkih gladinskih stanjih ojezeritve. Upoštevali nismo antropogeno povzročenih pretokov, ki nastanejo v nekaterih odsekih ob nizkem nivoju gladine ter ob vsakoletnem izlovu rib, ko akumulacijo popolnoma izpraznijo, in lahko povzročijo dodatno erodiranje odloženega materiala, ki ga morfološki model ni vključil.

Za preverjanje morfološkega modela smo uporabili inženirske poenostavitve, vendar menimo, da so le-te znotraj naravnih in spremljivih mej. Relativno majhna razlika med umerjenim srednjim zrnem plavin morfološkega numeričnega modela $d_{50}=0.04$ mm in povprečnega srednjega zrna odvzetih vzorcev sedimenta $d_{50}=0.036$ mm dokazuje, da smo za odvzem vzorcev izbrali ustrezne reprezentativne lokacije. Tako pripravljen morfološki model bi bilo potrebno verficirati z novimi meritvami dna vsaj v posameznih točkah na akumulaciji. Tako bi preverili, ali so bile naše predpostavke in poenostavitve ustrezne in jih po potrebi korigirali. Izbrane vhodne parametre bomo uporabili za nadaljnje simulacije s predpostavko, da se vplivni faktorji na morfološke spremembe niso spremenili.

Sedimentacijski procesi so predvsem posledica spremenjenih hidrodinamičnih razmer ob uvedbi nadzorovanega iztoka s pomočjo hidromehanske opreme in nižje obratovalne gladine

ojezeritve. Umerjeni morfološki model iz obdobja 2009–2013 bomo uporabili za simulacijo kar bi se lahko zgodilo v obdobju 2013–2020. Pri tem ne predvidevamo poglobitve dna, saj predvidevamo, da v obdobju po letu 2013 obratovanje akumulacije in zapornično-pregradnega objekta ostaja enako kot v opazovanem obdobju med leti 2009 in 2013.

4.3.5 Simulacija sedimentacije za leto 2020

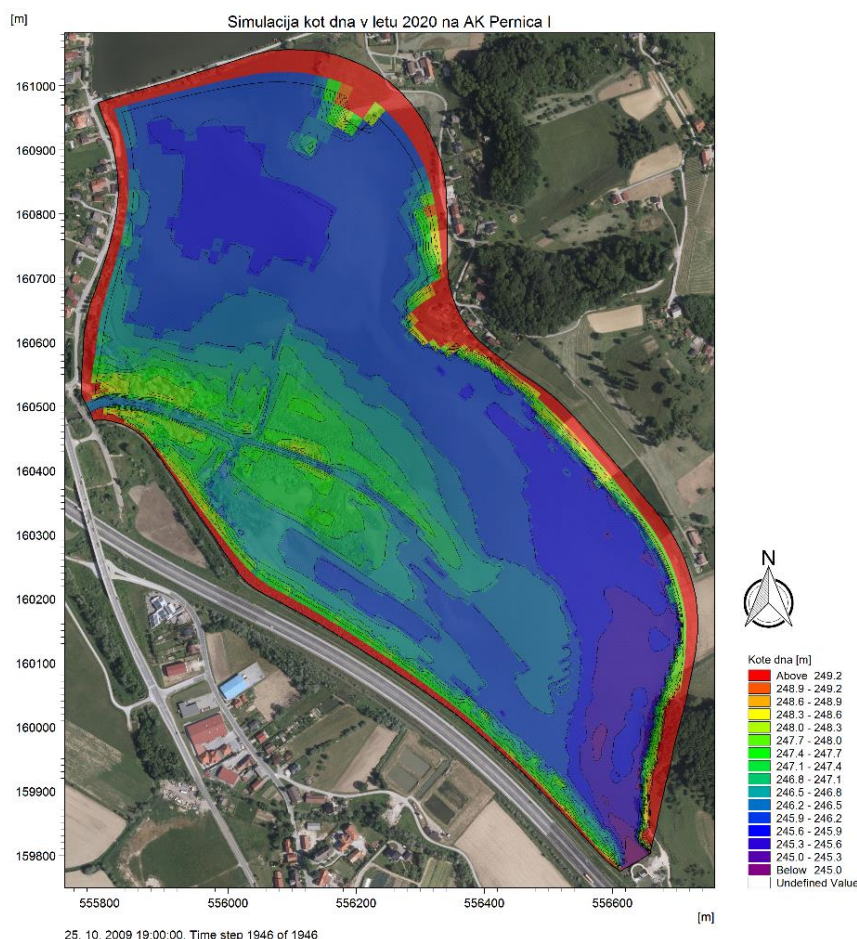
Končni cilj naše naloge je na podlagi umerjenega razširjenega hidravličnega matematičnega modela z morfološkim modulom za vrednotenje premestitvene zmogljivosti oceniti, kakšno bi naj bilo stanje na akumulaciji Pernica I v letu 2020, če se na njej ne izvede ukrepov upravljanja s sedimentom ter iz izračunanih vrednosti oceniti vpliv na osnovno namembnost, tj. zagotavljanje poplavne varnosti kot mokri zadrževalnik visokovodnih valov.

Ugotovljene parametre iz morfološke simulacije obdobja 2010–2013 smo uporabili pri za simulacijo morfoloških sprememb do leta 2020. Pri tem smo za vtočni hidrogram uporabili ponovitev skrajšanega hidrograma na podlagi krivulje trajanja pretokov s pripadajočimi vrednostmi kalnosti in podatkov kote gladine na akumulaciji iz obdobja 2009–2013 (pretoki pojavnosti do 2 %). Zavedamo se, da obstajajo možnosti, da se v tem opazovanem obdobju ne bo zgodil dogodek z višjimi pretoki kot v obdobju 2009–2013 oziroma, da se pojavijo še kakšni višji dogodki. Menimo, da simulacija z višjimi pretoki, kot so umerjeni, predstavlja večje tveganje za napačno napoved kot umerjeni parametri simulacije. Začetek simulacije je tako november 2013, konec pa v januarju 2020.

Preglednica 27: Pregled umerjenih parametrov pri simulaciji morfoloških sprememb 2013–2020

Spremenljivka	Vrednost
Izbrano obdobje	november 2013–januar 2020
Pojavnost pretokov	<2 % v opazovanem obdobju
Topografija	DMV območja AK Pernica za leto 2013
Zgornji robni pogoj	Modificiran pretok lebdečih plavin na vtoku v AK Pernica I iz obdobja 2009–2013
Spodnji robni pogoj	Brez spremembe dna na spodnjem robu obravnavanega območja (prag pregrade)
Transport	Samo lebdeče plavine
Enačba premestitvene zmogljivosti	Van Rijn
Modul kohezije	Da
Način vnosa lastnosti plavin	Enovito povprečno zrno $d_{50}=0.04$ mm
Poroznost [-]	0,445
Relativna gostota [-]	1,513
Shieldsov brezdim. parameter [-]	0.089
Začetna koncentracija susp. plavin	50 g/m ³

Rezultati simulacije morfoloških sprememb so grafično prikazani v sledeči sliki z izračunanimi nadmorskimi višinami dna akumulacijskega bazena v letu 2020, natančneje pa so podani v Prilogi C:



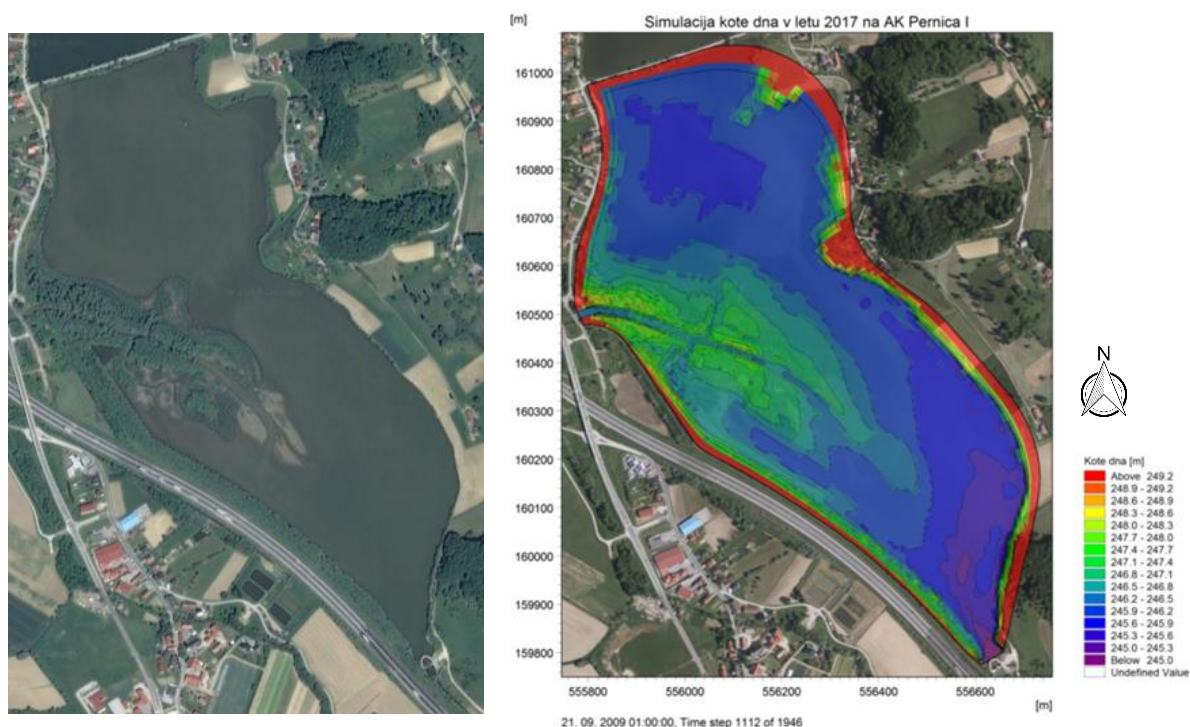
Slika 54: Grafična ponazoritev simulirane morfologije dna na AK Pernica v letu 2020

Rezultati simulacije morfoloških sprememb na AK Pernica I do leta 2020 nakazujejo, da se bo v primeru obratovanja pod enakimi pogoji kot v obdobju 2009–2013 na območju akumulacijskega bazena še naprej odlagal sediment. Zaradi odlaganja sedimenta se bo koristen volumen akumulacije nadaljno zmanjševal. Predvidenega ravnotežnega stanja med erozijo in deponiranjem sedimenta in s tem stabilizacijo volumna akumulacije v simulaciji do 2020 ni mogoče pričakovati.

V vizualnem umerjanju morfološkega modela z uporabo ortofoto posnetkov obravnavanega območja je mogoče zaslediti dobro ujemanje rezultatov morfološke simulacije in dejanskega stanja v letošnjem letu (2017). Na območju akumulacije se odlaga sediment predvsem od vtočnega dela proti pregradnemu objektu, kjer je razvidno podaljšanje naplavnega vršaja zaradi nodlaganja materiala. Na območju naplavnega vršaja se tvori glavni odtočni kanal, ki ob nizkem vodostaju gladine deluje kot glavni prevodnik reke Pesnice na območju ojezeritve. Ob kanalu se pojavljajo naravni naplavni nasipi, ki se v poplavnih dogodkih in višjih gladinah v akumulaciji dodatno zvišujejo in dosegajo kote nad stalno ojezeritev (246,40 m. n. v.). Zelo dobro je ujemanje rezultatov modela na območju jugozahodnega dela akumulacijskega

bazena. Na tem območju se v začetnem delu odlagajo plavine, kasneje pa se ohranja poglobljeni del ob varovalnem nasipu.

Na območju severno od naplavnega vršaja simulacija ni predvidela morfoloških sprememb, prav tako model ni predvidel večjih območij erodiranja materiala. Manjša območja se pojavljajo samo na območju naplavnega vršaja, ki pa bistveno ne vplivajo na tokovne razmere in bilančno stanje odloženega sedimenta.

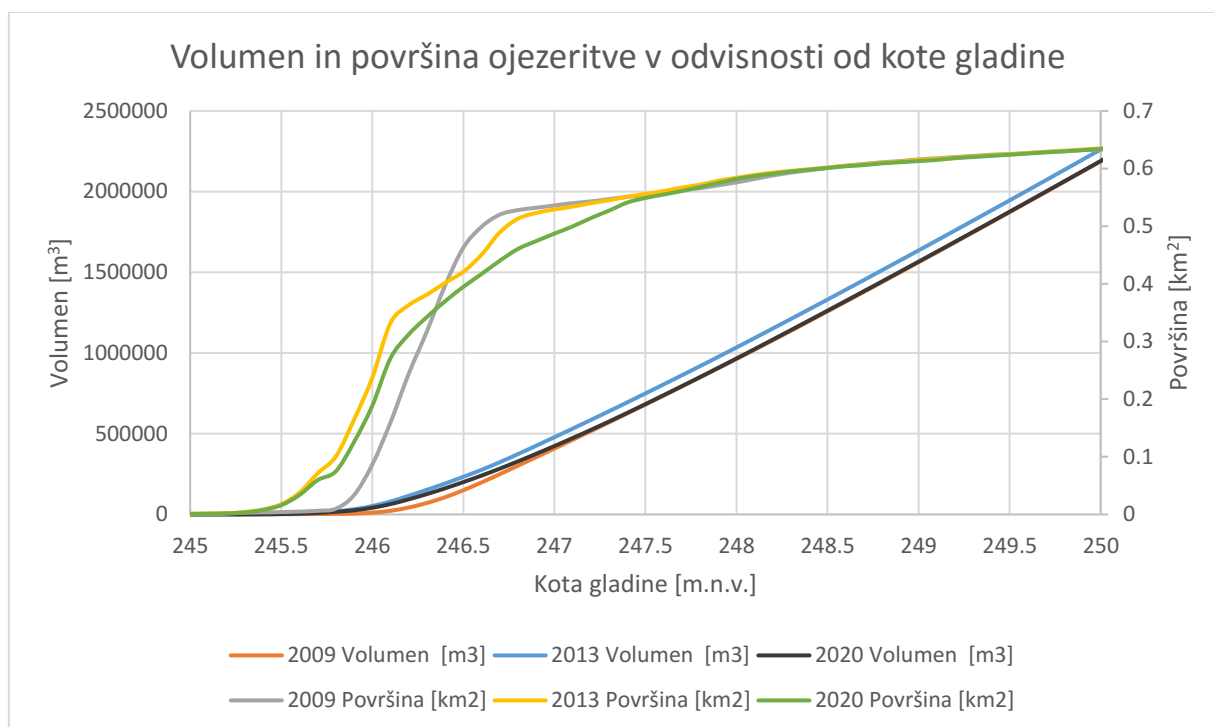


Slika 55: Primerjava obstoječega stanja na ortofoto posnetku (Google Earth, 2017) in rezultati simulacije morfoloških sprememb z uporabo modela MIKE 21C za leto 2017 na AK Pernica I

Ta primerjava v Sliki 55 pokaže zelo dobro ujemanje in potrjuje dobro zasnovo nastavitvev in umerjenih vhodnih parametrov morfološkega modela, saj so vidni ključni procesi na istih lokacijah.

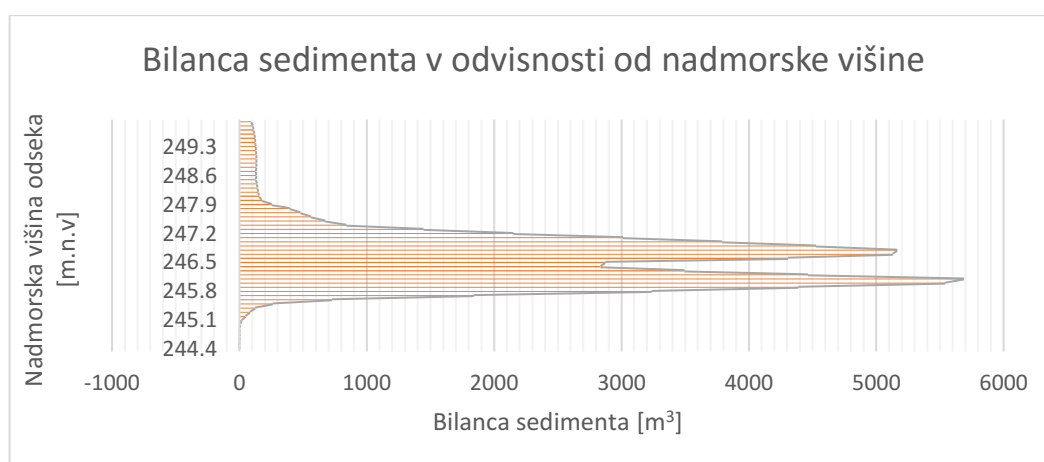
4.3.5.1 Vpliv na zadrževanje visokih voda

Na podlagi simulacije sprememb dna akumulacijskega bazena AK Pernica I smo z uporabo GIS programskih orodij izdelali DMV akumulacijskega bazena za leto 2020. Po postopku opisanem v poglavju 2.2.6 smo izdelali grafikon soodvisnosti volumna in površine ojezeritve od nadmorske višine gladine. Na grafikonu (Slika 56) je opazno zmanjšanje površine ojezeritve kakor tudi zmanjšanje volumna pri enakih nadmorskih višinah gladine kot v letu 2013.



Slika 56: Primerjava grafikonov volumen – kota gladine in površina ojezeritve – kota gladin z vključenimi linijami rezultatov simulacije 2020

V drugem delu smo ovrednotili količino odloženega materiala in njegovo razporeditev po višinskih pasovih. Iz grafikona bilančne analize (Slika 57) po višinskih pasovih v odvisnosti od nadmorske višine je razvidno, da se je večina sedimenta odložila v dveh višinskih območjih, in sicer na območju pod koto stalne ojezeritve in na območju nad stalno ojezeritvijo do kote ca. 247,5 m. n. v. V posameznem višinskem pasu se je tako odložilo do 5 500 m³ materiala. Skupno bi se na območju akumulacijskega bazena odložilo več kot 71 000 m³ naplavin, kar pomeni 11 300 m³ na leto.



Slika 57: Bilančna analiza odloženega sedimenta v simulaciji med leti 2013 in 2020

Iz rezultatov morfološkega modela (Slika 57) je razvidno, da bo v primeru obratovanja pod enakimi pogoji kot v obdobju 2013–2020 v prihodnosti prihajalo do pomanjkanja ustreznega volumna za sekundarno rabo, predvsem za intenzivno ribogojstvo. Pri tem se iz analize rezultatov morfološkega modela lahko sklepa, da se je poslabšala poplavna varnost gorvodno

od akumulacije, saj se dno vtočne dela struge reke Pesnice struge zapolnjuje s sedimentom in s tem dviguje gladino reke Pesnice po strugi gorvodno od obravnavanega območja. Na terenskem ogledu v letu 2016 je bila na območju pod mostom regionalne ceste opazna sipina, ki zmanjšuje pretočni profil mostu.

Iz analize sprememb volumnov akumulacije pri karakterističnih kotah gladine je razvidno zmanjšanje volumnov akumulacijskega bazena. Odložilo se je okvirno toliko materiala, kolikor se ga je zaradi spremenjenega pregradnega objekta odstranilo. Zmanjšanje volumna pri stalni obratovalni gladini za 30 000 m³, na območju med obratovalno gladino do kote preliva se je odložilo dodatnih 39 800 m³, skupno zmanjšanje za 69 800 m³ ter zmanjšanje volumna ojezeritve pri maksimalni zajezi za 71 000 m³ oziroma odloženega 41 000 m³ sedimenta na območju med koto stalne ojezeritve in koto maksimalne zajeze.

Preglednica 28: Spremembe ocenjenega volumna akumulacije Pernica I med letoma 2013 in 2020 v m³

Nadmorska višina gladine H [m.n.v.]	Leto	
	2013	2020 (simulacija)
250,00	2 226 980	2 190 023
249,00	1 635 800	1 566 042
246,40	191 910	161 985.6

Iz vrednotili smo zmanjšanje volumna za zadrževanje visokih voda v obdobju do leta 2020 in ugotovili da obsega 3 % zadrževalnega volumna celotne akumulacije oziroma 3,4 % zapolnitev zadrževalnega volumna nad koto stalne ojezeritve. Ocenjena letna stopnja zapolnjevanja akumulacijskega prostora obsega 0,5 % celotnega zadrževalnega volumna pri maksimalni zajezi in letno zmanjševanje zadrževalnega volumna nad koto stalne ojezeritve do maksimalne kote na 250 m. n. v. v obsegu 6 500 m³ oziroma 0,3 %.

Na podlagi simulacije morfoloških sprememb lahko sklepamo, da se bo akumulacija v prihodnjih letih še dodatno zapolnjevala s sedimentom iz zgornjega dela porečja reke Pesnice. Za učinkovitejše dolgoročno izvajanje aktualnih namenskih rab bo v potrebno izvesti ukrepe ravnanja s sedimentom, ki bodo obsegali ukrepe v prispevnem območju kakor tudi na sami akumulaciji.

4.4 NEKATERI MOŽNI UKREPI IN PREDLOGI UPRAVLJANJA S SEDIMENTOM V PLITVI AKUMULACIJI ZA ZAGOTOVITEV NJENEGA NAMENA

Ukrepe za ravnanje s sedimentom na akumulacijah, ki so predstavljeni v točki 2.2.7, smo preučili za primer AK Pernica I. Izbrali smo ukrepe, ki so bili predlagani v obstoječih strokovnih podlag ali raziskovalnih projektih na področju akumulacije Pernica. Omejili smo se na ukrepe, ki vplivajo na morfološke spremembe zaradi zamuljevanja akumulacije. Predlagane ukrepe smo preučili tudi glede vpliva na osnovno namensko rabo akumulacije – zadrževanje visokih vod reke Pesnice.

Možne omilitvene ukrepe za ohranjanje zadrževalne sposobnosti akumulacije smo razdelili v štiri scenarije. Prvi scenarij predvideva, da ne bo izvedenih nobenih ukrepov, ker bi se naj v akumulaciji vzpostavilo ravnovesno stanje med odloženim in erodiranim materialom. Drugi ukrep predvideva obratovanje zapornic akumulacije skladno s *Pravilnikom o obratovanju*, saj se je v tem času že rekonstruirala dolvodna akumulacija Pristava. Tretji scenarij predvideva odstranitev deponiranega sedimenta iz akumulacije za zagotavljanje volumna pod nivojem obratovalne gladine. Četrty scenarij obsega ukrepe izvajanja ekoremediacij (ERM) na prispevnem področju AK Pernica I in s tem vpliv na zmanjšanje suspendiranih dotoka snovi na reki Pesnici.

Za vse predvidene ukrepe se lahko z uporabo pripravljenega morfološkega modela preveri dolgoročni vpliv le-teh na morfološke spremembe v akumulaciji, vendar tega v nalogi zaradi preobsežnosti nismo izvedli. Navedli oz. analizirali smo samo, katere vhodne parametre morfološkega modela bi za preverjanje posameznega ukrepa bilo potrebno spremeniti oz. dodatno pridobiti.

4.4.1 Scenarij 1: »Brez ukrepov«

Osnovni predlagani scenarij je: »Nič ne naredimo,«, ki pomeni ohranjanje trenutnih rab in trenutno raven vzdrževalnih ukrepov. S simulacijo matematično-hidravličnega modela z morfološkim modulom smo preverili potek zapolnjevanja akumulacije do leta 2020.

Za ta scenarij je bila izvedena tudi simulacija, katere rezultati so podrobneje predstavljeni v prejšnjem poglavju (Slika 54).

4.4.2 Scenarij 1: Obratovanje skladno s *Pravilnikom o obratovanju*

Zapornično pregradni objekt je po *Pravilniku o obratovanju* (Juvan, 2009a) dimenzioniran na hidravlično prevodnost $84 \text{ m}^3/\text{s}$ pri popolnoma dvignjenih zapornicah in gladini akumulacije 246.40 m. n. v. Avtomatska regulacija hidromehanske opreme bi z obratovanjem zapornic do pretoka $84 \text{ m}^3/\text{s}$ zagotavljala stalno obratovalno gladino.

Zaradi ročnega reguliranja obratovanja segmentnih zapornic v času našega opazovanega obdobja med leti 2009 in 2013 je prihajalo do neoptimalnega zadrževanja poplavnih valov, hkrati pa se je zadrževalo pretoke pri bistveno nižjih vrednostih. Posledica takšnega obratovanja je bila dvig gladine na akumulaciji in zmanjšana pretočnost skozi akumulacijo, kar je povzročilo dodatno odlaganje sedimenta. V primeru ustrežnejšega prevajanja visokih voda (praktično vseh pretokov v opazovanem obdobju) pri stalni obratovalni gladini 246,40 m.n.v. bi se morfološka slika v akumulaciji spremenila v smeri zmanjšanja količin odloženega materiala.

Za simulacijo obratovanja hidromehanske opreme po predvidenem avtomatskem protokolu bi bilo potrebno spremeniti časovni niz podatkov v odvisnosti od vtočnega pretoka in krivulje

volumen – kota nadmorske gladine akumulacije. Če bi za simulacijo uporabili pretoke iz opazovanega obdobje (2009–2013) bi morali nastaviti konstanten spodnji robni pogoj kote gladine na akumulaciji na 249,40 m. n. v.

V primeru spremembe obratovalnega pravilnika na projektirane vrednosti bi lahko z uporabo morfološkega modela preverili količine premeščenega materiala na območje akumulacije in količino erodiranega materiala iz območja akumulacije, ki bi lahko povzročil spremembe morfologije dolvodnih odsekov reke Pesnice.

4.4.3 Scenarij 2: »Odstranitev sedimenta«

Ta ukrep spada v med ukrepe, ki se glede na lokacijo izvajajo na območju akumulacijskega bazena. Ukrep je bil predviden v sklopu raziskovalnih projektov kot ustrezna rešitev za zagotavljanje zadostnih volumnov za ohranjanje obstoječih namenskih rab na akumulaciji (ERICo in Limnos, 2008). V tem scenariju je predvidena odstranitev sedimenta s suhim izkopom ali z »mokrim izkopom« oziroma s plovnim bagrom.

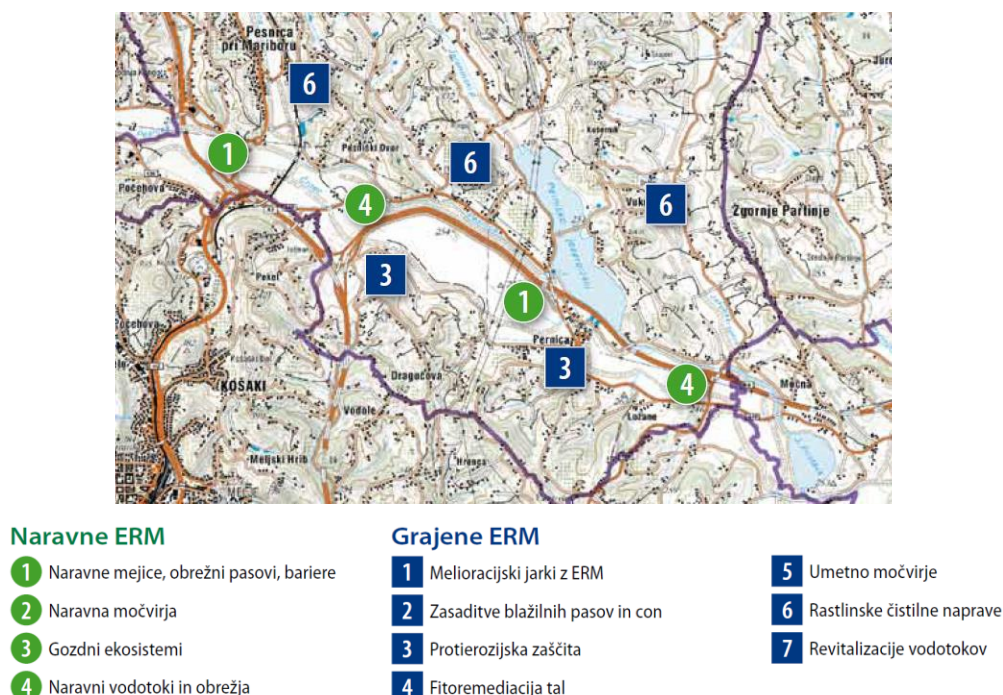
Odstranjen material se lahko uporabi za tvorbo novih habitatnih otokov (kar vpliva na tokovno sliko) ali z nasipom na brežine, kot je bilo to izvedeno ob rekonstrukciji leta 2009. Odlaganje sedimenta na območju akumulacije lahko tako prispeva k zmanjšanju poplavnega volumna, vendar je tak način bistveno cenejši, saj ni potrebno iskati novih lokacij za sušenje, odlaganje ter morebitno stabilizacijo materiala. V primeru odstranitve muljev izven akumulacije bi bilo potrebno izvesti dodatne raziskavo o lastnostih sedimenta.

Zaradi visokih stroškov odstranitve sedimenta je zelo pomembno izbrati ustrezne lokacije odstranitve sedimenta in primerne zatišne lege za odlaganje, ki najmanj spremenijo tokovno sliko. Dolgoročno zagotavljanje učinkovitosti izvedenih izkopov za morfološko izboljšanje dna akumulacije za preprečevanje odlaganja plavin je mogoče preveriti z morfološkim modelom. Z izdelavo simulacij variantnih rešitev izkopa sedimenta na različnih lokacijah bi preverili dolgoročno najustreznejšo rešitev.

Simulacija za ta scenarij bi se izvedla za spremenjeno batimetrijo iz leta 2013, kjer smo predvideli izdelavo variantnih ukrepov odstranitve sedimenta in izdelave otokov, nasipov. Pri tem scenariju moramo poudariti, da je to samo začasna rešitev, saj imamo še naprej stalen dotok plavin v akumulacijo. Ob predpostavki o nespremenjenem dotoku plavin, bodo le-te v relativno kratkem času (tako kot na sedanjem primeru od leta 2009 do 2013) zmanjšale volumen na volumen pred ukrepom »odstranitve sedimenta«.

4.4.4 Scenarij 3: »Izvedba ekoremediacijskih v povodju«

V tem scenariju je predlagan ukrep, ki se izvaja na območju gorvodno od akumulacije. Z izvedbo ekoremediacij, ki so bile predlagane v dveh študijah (ERICo in Limnos, 2008; ERM, 2011) bi se preprečil oziroma bistveno zmanjšal dodaten vnos snovi v rečno mrežo in posledično v akumulacijo. Z izvedbo ERM ukrepov vplivamo predvsem na količino vnosa suspendiranih snovi, ki so glavni vir sedimenta, ki se odlaga na območju akumulacije Pernica. Z uspešno izvedbo ERM ukrepov bi se zmanjšal vnos le-teh.



Slika 58: Predvideni ERM ukrepi na območju AK Pernica v občini Pesnica (ERM, 2011)

Za izvedbo simulacije uspešnosti ERM ukrepov bi bilo potrebno izvesti simulacijo za obdobje 2013–2010 z zmanjšanim parametrom kalnosti. Z zmanjšano vsebnostjo lebdečih plavin bi se spremenil potek in obseg morfoloških sprememb v obravnavanem časovnem obdobju v akumulaciji. Iz rezultatov simulacije bi tako ovrednotili stopnjo zmanjšanja volumna zaradi odlaganja sedimenta ter lokacijo odlaganja le-tega na območju akumulacije.

Za zagotavljanje dolgoročno uspešnega reševanja problema zapolnjevanja akumulacij je potrebno uporabiti več ukrepov hkrati, predvsem pa so najbolj pomembni pristopi, s katerimi zajamemo in preusmerimo ali nadzorovano prenesemo s plavinami zasičene pretoke skozi ali mimo akumulacijskega bazena ter tehnologije odstranitve sedimenta na ob izgradnji akumulacije predvidene deponije (Kondolf, et al., 2014; Morris & Fan, 2010). Kot ukrep omilitve stopnje odlaganja sedimenta lahko v veliki meri pripomoremo z denivelacijami ob visokih pretokih, ki jih izvedemo na podlagi denivelacijskih krivulj, ki so izdelane na podlagi morfoloških modelov (Javornik, 2015). Seveda pa s tem prenesemo problem sedimentov na dolvodne rečne odseke oziroma morebitne akumulacije dolvodno.

4.5 REZULTATI PREVERJANJA HIPOTEZ

Pregradni objekti s spreminjanjem kontinuitete pretoka plavin spreminjajo hidromorfološko stanje vodnih teles. Manjše plitve akumulacije, ki zajezujejo vodotoke z veliko transportno sposobnostjo rinjenih in lebdečih plavin, so podvržene zasipavanju zaradi sedimentacije. Posledično so v času nizkih pretokov in zaradi drugih vplivov na kvaliteto vode podvržene evtrofikaciji. V nalogi smo preučili vpliv zasipavanja obravnava akumulacije Pernica I na osnovno rabo tj. zadrževanje visokih voda. Pri tem smo iz različnih virov meritev in analiz vplivnih parametrov z uporabo dveh različnih programskih orodij izdelali analizo vpliva morfoloških sprememb na osnovno rabo. Na podlagi predhodnih raziskav o obravnavani akumulaciji in strokovni literaturi smo potrdili naslednje hipoteze:

- **Iz meritev dna akumulacije lahko spremljamo spremembe dna akumulacije. Identificiramo lahko območja odlaganja in erodiranja sedimenta. Iz spremembe volumna akumulacije v času med meritvami lahko določimo volumen odloženega oziroma erodiranega materiala.**

Sklep: V nalogi smo iz več različnih virov, predvsem pa iz meritev dna, izdelali dva digitalna modela višin dna in brežin akumulacije Pernica I iz leta 2009 in leta 2013. Izdelana modela smo uporabili za prostorsko analizo morfoloških sprememb na akumulaciji v programskem okolju GIS. Iz izdelanega sloja smo na Karti bilančne analize pridobili informacijo o območjih odlaganja in erodiranja sedimenta na območju akumulacije v opazovanem obdobju. S tem smo potrdili Hipotezo H1.

- **Z uporabo hidravlično-matematičnega modela lahko za opazovano časovno obdobje simuliramo morfološke spremembe v akumulaciji.**

Sklep: Matematično-hidravlični morfološki model MIKE 21C z modulom transportne sposobnosti premeščanja plavin smo uporabili za časovno simulacijo morfoloških sprememb na akumulaciji Pernica I v odvisnosti od vhodnih parametrov. Kot vhodne parametre smo uporabili topografske, hidrološke in podatke o lastnostih sedimenta ter količini suspendiranih snovi. Z modelom smo ugotovili, da je spreminjanje – deponiranje sedimenta v akumulaciji odvisno predvsem od vsebnosti suspendiranih snovi, ki dotekajo iz porečja. S statistično in vizualno primerjavo opazovalnih točk v prečnih profilih smo lahko umerili morfološko simulacijo. Ustreznost izbranih vhodnih parametrov simulacije smo potrdili z vizualno primerjavo morfoloških sprememb do leta 2017 in z dejanskim stanjem akumulacijskega bazena na podlagi ortofoto posnetka.

- **Z razširjenim matematično-hidravličnim modelom lahko ocenimo vpliv morfoloških sprememb na sposobnost akumulacije za zadrževanje visokih vod.**

Sklep: Z uporabi GIS orodij in razširjenega matematično-hidravličnega modela smo preverili vpliv morfoloških sprememb na primarno rabo na akumulaciji – zadrževanje visokih vod reke Pesnice. Dinamična prostorsko časovna analiza je dokazala, da se zaradi procesa sedimentacije suspendiranih plavin iz prispevnega področja na akumulaciji osnovna namembnost, tj. zmanjšanje poplavne nevarnosti dolvodno ogroža z letno stopnjo zmanjševanja zadrževanja volumna za visoke vode v obsegu 0,3 % na leto, pri čemer se večinski delež sedimenta odloži na območju pod koto stalne ojezeritve.

5 ZAKLUČEK

Antropogeni posegi v rečni sistem povzročajo spremembe v naravnem krogu spreminjanja rečne struge zaradi procesa odlaganja in erodiranja plavin. Z izgradnjo pregradnih objektov, ki zarado drugih ciljev upočasnijo in zadržujejo vodni tok, se spremenijo hidromorfološke lastnosti vodotoka. Na območju doline reke Pesnice so z izgradnjo HMS Pesnica in nadaljnjimi posegi ob izgradnji transportnih poti prisotni sledovi obširnih vplivov človeških dejavnosti na rečni sistem in krajino. Reka Pesnica s premeščanjem suspendiranega materiala iz zgornjega dela porečja po večjem delu regulirani strugi odlaga le-tega na območju čelne AK Pernica I.

Akumulacija Pernica I predstavlja primer večnamenskega mokrega zadrževalnika, na katerem se zaradi odlaganja in erodiranja sedimenta srečujemo s problemom kako izbrati optimalnih ukrepov za nadaljnje obratovanje kot večnamenska akumulacija. Na procesih te akumulacije smo kot praktični problem podrobneje predstavili akumulacijo in vplivne dejavnike na morfološke spremembe v akumulaciji.

S statično analizo meritev dna v GIS programskem okolju smo dokazali, da se je s spremembo pregradno-zapornega objekta v letu 2009 skupna količina odloženega materiala na območju zmanjšala. Z morfološkim modelom pa smo dokazali, da se ob nespremenjenem ravnanju s sedimentom na območju AK Pernica I pričakuje zmanjšanje volumnov, ki ne bodo vplivali na zagotavljanje poplavne varnosti. Pričakujemo pa lahko vplive na izvajanje ostalih namembnosti, predvsem na intenzivno ribištvo. Z uporabo GIS analiz in numeričnih modelov lahko na podlagi meritev vplivnih parametrov določimo in predvidimo učinke potrebnih ukrepov za dolgoročno zmanjšanje negativnih morfoloških sprememb na akumulaciji.

Magistrsko delo smo razdelili v štiri osnovna poglavja. V prvem delu smo preučili teoretična izhodišča o visokovodnih zadrževalnikih iz upravljalškega in tehničnega vidika. Na podlagi virov iz literature smo preučili rabo in trend spreminjanja rab na večnamenskih zadrževalnikih v slovenskem prostoru. Prav tako smo preučili klasifikacijo zadrževalnikov glede na funkcijo v sklopu protipoplavnih ukrepov in načinov tehničnih izvedb za optimalno prostorsko umestitev v prostor.

V drugem delu poglavja smo se podrobneje seznanili z morfološkimi vplivi na rečnih akumulacijskih bazenih zaradi odlaganja in erodiranja sedimenta. Povzeli smo osnovna izhodišča premeščanja plavin, načine spremljanja dinamike sproščanja in odlaganja le-teh ter spoznali načine upravljanja na akumulacijah, ki so podvržene zmanjševanju uporabne prostornine zaradi odlaganja sedimenta. Opisali smo tri primere uporabe podobnih numeričnih modelov v slovenskem prostoru. Podrobneje smo predstavili metodologijo analize morfoloških sprememb z uporabo GIS programskih orodij na podlagi podatkov terenskih meritev sprememb batimetrije akumulacijskega bazena. V tretji točki smo spoznali primernost uporabe numeričnih morfoloških modelov in podrobneje dvorazsežnosti matematično-hidravlični model z modulom morfoloških sprememb MIKE 21C, ki smo ga uporabili v nalogi.

V tretjem poglavju smo predstavili obravnavano AK Pernica in lastnosti vodozbirnega zaledja, ki vplivajo na morfološke procese v akumulaciji. Podrobneje smo predstavili iz različnih virov terenskih meritev pridobljene vplivne parametre. Podatke iz pridobljenih meritev in analiz smo pripravili in obdelali za nadaljnjo obdelavo.

Zadnje poglavje je obsegalo pripravo in vpeljavo poenostavitev, ki so omogočile izračune z uporabo GIS analiz in študijo morfoloških procesov na AK Pernica v obdobju 2009–2013. V

zadnjem delu poglavja smo predstavili pregled nekaterih že predlaganih ukrepov na akumulaciji za zmanjševanje negativnih vplivov vsled morfoloških procesov. Z analizo in obdelavo pridobljenih podatkov smo v četrtem poglavju primerjali dve metodi analize morfoloških sprememb na obravnavani akumulaciji. Zaradi pomanjkanja ustreznih vhodnih podatkov smo uvedli serijo poenostavitev, ki smo jih podrobneje predstavili. Na podlagi razlike meritev dna z različnih časovnih obdobij z uporabo GIS analize smo določili območja erodiranja in odlaganja sedimenta na območju akumulacijskega bazena. V drugem delu smo z umerjanjem morfološkega modela na podlagi merjenih podatkov izdelali simulacijo obratovanja in morfoloških sprememb na akumulaciji do leta 2020 ter rezultate podrobneje analizirali z GIS orodji. V zadnjem delu naloge smo s pregledom izbranih variant ukrepov za preprečevanje zmanjševanja volumna akumulacije ocenili in predstavili uporabnost vzpostavljenega morfološkega modela ter potrebne dodatne podatke oziroma spremembe vhodnih parametrov za modeliranje posameznega ukrepa. S predstavitvijo smo dokazali, da lahko služi izdelan in umerjen morfološki model kot orodje za podporo odločanju odločevalcem pri izvajanju ukrepov na vplivnem območju kakor tudi na sami akumulaciji. S programskim orodjem lahko preverimo različne rešitve in z rezultati modela določimo dolgoročne morfološke spremembe zaradi predlaganih rešitev.

V nalogi smo prikazali, da za spremljanje in načrtovanje namensnosti na večnamenskih akumulacijah, ki je kompleksen medsektorski problem, lahko s pomočjo analize predvidenih ukrepov, podprte z dovršenimi razširjenimi hidravlično-matematičnimi modeli predvidimo srednjeročne in dolgoročne hidromorfološke spremembe na akumulaciji zaradi izvedenih posegov.

Z uporabo GIS orodij smo preverili predvsem stanje in statične spremembe med meritvami. Z GIS analizami morfoloških sprememb lahko s pripravljenimi podlagami iz prejšnjih obdobij hitro preverimo trend in obseg morfoloških sprememb na akumulaciji. Rezultati iz GIS analiz z grafično predstavitvijo v obliki kart služijo za lažjo komunikacijo z deležniki in kot podlaga za načrtovanje dejavnosti in rab na akumulaciji. Iz izdelane bilančne analize in primerjave izvrednotenih krivulj kota gladine – volumne in kota gladine – površine smo ugotovili, da je sprememba zaporničnega sistema pregradnega objekta ob rekonstrukciji ugodno vplivala na volumne akumulacijskega bazena. Predvsem se je z erozijo najbolj finih frakcij povečal volumen ob nizkem vodostaju gladine, kar ugodno vpliva na sekundarne rabe. Ugotovili smo, da se je na območju naplavnega vršaja v obdobju štirih let letno odložilo cca 14.000 m³ sedimenta, ki pa ni bistveno zmanjšal volumnov namenjenih za zadrževanje visokih voda.

Z izdelavo dvorazsežnega hidravličnega modela smo preverili prostorsko-časovno razporeditev spreminjanja tokovnih razmer in morfologijo na akumulaciji v odvisnosti od vtočnega pretoka in gladinskega stanja ojezeritve zaradi manipulacije z zapornicami. Proces premeščanja plavin in posledičnih morfoloških sprememb je kompleksen, zato smo v tej fazi raziskav uporabili umerjanje z enovitim srednjim zrnem, visokovodne dogodke in njihove hidrološke podatke pa smo omejili na najvišjih 2 % pretokov iz opazovanega obdobja. Rezultati morfološkega modela predvidevajo nadaljno zapolnjevanje akumulacijskega bazena in 0,5 % letno zapolnjevanje volumna celotne akumulacije ter letno 0,3% zmanjševanje volumna za zadrževanje visokih voda.

Umerjen morfološki model lahko uporabimo in nadgradimo za nadaljnje analize in študije variant ukrepov na akumulacijskem bazenu. Sprememba topografije ali obratovalnega

pravilnika lahko na akumulaciji povzroči različne vplive. S simulacijo izbranega scenarija ali spremenjenega obratovanja lahko hitro in stroškovno učinkovito preverimo ustreznost predlagane rešitve, jo po potrebi korigiramo in ponovno testiramo. S tem pristopom lahko upoštevamo in predstavimo večji obseg predlaganih rešitev in jih predstavimo deležnikom in določimo vpliv na rabo na akumulaciji v prihodnje. Gospodarjenje z vodnimi telesi je kompleksen proces. Z uporabo rešitev iz umerjenih simulacij na podlagi numeričnih modelov lahko zmanjšamo tveganja za neustrezne posege v prostor in obratovanje grajenih vodnih teles.

Numerični modeli se lahko tudi dopolnijo z analizo kemijskih in bioloških parametrov ali dopolnijo z ekonomskimi modeli in tako služijo kot dodatna podpora odločevalcem, vzdrževalcem in uporabnikom večnamenskih akumulacij. Logično nadaljevanje raziskav na akumulaciji bi bilo usmerjeno pridobivanje novih podatkov o vhodnih parametrih za uporabo morfološkega modela, predvsem novih meritev batimetrije dna in brežin ter podaljšanje časovnega niza do dosega poplne zapolnitve akumulacije. Z umerjenim morfološkim modelom bi se preverili predlagani ukrepi in oblikovale ustrezne rešitve za zagotavljanje ustreznih volumnov, ki pogojujejo izvajanje namenskih rab na akumulaciji. Za uspešno dolgoročno obratovanje akumulacije in izvajanje vseh namembnosti je potrebno dobro poznavanje naravnih procesov, ki vplivajo na spremembe v akumulaciji. GIS analize in dvorazsežnosti morfološki modeli na podlagi kvalitetnih meritev omogočajo učinkovito spremljanje in upravljanje večnamenskih akumulacij kot je AK Pernica.

Cilj naloge je bil podrobneje spoznati osnove premeščanje plavin in primerna programska orodja za vrednotenje in upravljanje s plavinami na akumulacijah. Pri tem lahko pridobljena znanja uporabimo in nadgradimo v nadaljnjih projektih na področju modeliranja hidravlike odprtih vodotokov in akumulacij.

VIRI

Arhiv RS, 2016. Franciscejski kataster dežele Štajerske 1820-1825. Arhiv Republike Slovenije. Ministrstvo za kulturo.

ARSO, 2013. Povratne dobe velikih in malih pretokov za merilna mesta državnega hidrološkega monitoringa površinskih voda. Ljubljana: Sektor za analize in prognoze površinskih voda. Urad za hidrologijo in stanje voda. Agencija Republike Slovenija za okolje (ARSO). Ministrstvo za kmetijstvo in okolje (MKO).

ARSO, 2016. Meritve kalnosti na vodomerni postaji Ranca na reki Pesnica. http://vode.arso.gov.si/hidarhiv/pov_arhiv_tab.php?p_vodotok=Pesnica&p_postaja=2830 (Pridobljeno 30. 10. 2016.).

ARSO, 2017. Ocena ekološkega stanja jezer za obdobje 2009-2015, 2016. Ljubljana: Agencija Republike Slovenije za okolje (ARSO).

Atlas okolja, 2016. Spletni pregledovalnik, Ljubljana: Ministrstvo za okolje in prostor (MOP). Agencija republike Slovenija za okolje (ARSO). http://gis.arso.gov.si/atlasokolja/profile.aspx?id=Atlas_Okolja_AXL@Arso (Pridobljeno 15. 3. 2016).

Banovec, P. 2003. Vrednotenje poplavnih škod ter analiza preventivnih ukrepov - končno poročilo. Projekt: d-61, št. 3311-01-828 527. Ljubljana, Univerza v Ljubljani. Fakulteta za gradbeštvo in geodezijo: 166 str.

Basson, G. & Rooseboom, A. 1997. Dealing with Reservoir Sedimentation. Water Research Commission Report N. TT 91/97.

Bezak, N. 2016. Povezanost fluvialnega premeščanja suspendiranih snovi z drugimi hidrološkimi procesi. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba N. Bezak): 155 str.

Bezak, N. Šraj, M. Mikoš, M. 2013. Pregled meritev vsebnosti suspendiranega materiala v Sloveniji in primer analize podatkov. Gradbeni vestnik letnik 62, številka 12, 274-280.

Blažeka, Ž. Petkovšek, A. 2014. Izračun sedimenta v akumulaciji Pernica I. Poročilo, Maribor: Institut za ekološki inženiring d.o.o.

Bukovnik, S. Ivanuša, B. 2009. Presoja poplavne varnosti in analiza vzrokov poplav v Pesniški dolini avgusta 2009. Maribor, V: Mišičev vodarski dan 2009: Zbornik del: 22-29.

Camis, 2015. Zgodbe Soče: Izbrane vsebine projekta Camis, Usklajene aktivnosti za upravljanje Soče. Kobarid, Posoški razvojni center: 31 str.

Cvejić, R. Tratnik, M. Meljo, J. Bizjak, A. Prešeren, T. Kompare, K. Steinman, F. Mezga, K. Urbanc, J. Pintar, M. 2012. Trajno varovana kmetijska zemljišča in bližina vodnih virov, primernih za namakanje = Permanently protected agricultural land and the location of water sources suitable for irrigation. Ljubljana, Geodetski vestnik, letnik 56, 308-324.

De Villiers, J. 2006. 2D modelling of turbulent transport of cohesive sediments in shallow reservoirs. Stellenbosch. Republic of South Africa, University of Stellenbosch. Department of Civil Engineering: 239 str.

Defra, 2008. Sediment transport and alluvial resistance in rivers - R&D Technical report W5i 609. Bristol, UK: Joint Defra / Environment Agency Flood and Coastal Erosion Risk Managementa R&D Programme: 187 str.

DHI, 2004. MIKE 21C River Morphology - A Short Description.
http://www.dhigroup.com/upload/dhisoftwarearchive/shortdescriptions/wr/m21c_short_2004.pdf (Pridobljeno 15. 1. 2016).

DHI, 2016. MIKE 21C. Curvilinear model. Scientific Documentation. Horsholm, DHI: 98 str.

Direktiva, 2000/60/EC. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy. Brussels: Official journal of the European Communities: 327 str.

Direktiva, 2004/35/ES. Direktiva 2004/35/ES Evropskega parlamenta in Sveta z dne 21. aprila 2004 o okoljski odgovornosti v zvezi s preprečevanjem in sanacijo okoljske škode. s.l.:<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/SL/TXT/PDF/?uri=CELEX:32004L0035&from=SL> (Pridobljeno 30.6.2016.).

Duhovnik, R. 2007. Ureditev suhega zadrževalnika ob reki Savinji v Malih Braslovčah - diplomska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba R. Duhovnik): 59 str.

Engi, Z. 2016. Hidravlično modeliranje poplavne nevarnosti na izlivnih odsekih vodotokov, oprto na procese zamuljevanja. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba Z, Engi): 159 str.

ERICo in Limnos, 2008. Vrednotenje potencialnega vpliva kmetijstva na kemijsko in ekološko stanje voda v Pomurju s predlogi stroškovno učinkovitih ukrepov za njegovo preprečevanje: Velenje, ERICo d.o.o. in Limnos d.o.o.: 237 str.

ERM, 2011. Oblikovanje meril za izbiro pilotnih območij za uporabo ekoremediacij (ERM) - za uravnavanje podnebnih sprememb. Maribor, Univerza v Mariboru, Filozofska fakulteta, Mednarodni center za ekoremediacije: 117 str.

GEOIN, 2011. Lasersko skeniranje in aerofotografiranje 2011 - Blok B25. Spletni GIS pregledovalnik Atlas voda, ARSO.
http://gis.arso.gov.si/evode/profile.aspx?id=atlas_voda_Lidar@Arso (Pridobljeno dne 12. 7. 2016.).

Globevnik, L. 2010. Realnost nadzora in ukrepanja na večnamenskih pregradah v Sloveniji. Krško, 12. Posvetovanje SLOCOLD: Varnost pregrad v Sloveniji: 85 str.

Harpha Sea d.o.o., 2013. Izmera akumulacije Pernica I - Poročilo. Koper, Harpha Sea d.o.o.

Hočurščak, M. 2016. Vodnogospodarske podlage za nadzor obratovanja in vzdrževanja manjših zadrževalnikov. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Hočurščak): 116 str.

Hojnik, T. 2010. 2D model transporta plavin v akumulacijskih bazenih NEK in HE Brežice. Maribor. V: Mišičev vodarski dan 2010, Zbornik del: 112-119.

ICOLD, 2009. Sedimentation and Sustainable Use of Reservoirs and River Systems - Draft ICOLD Bulletin. Sedimentation Committee. ICOLD - International Commission on Large Dams: 187 str.

IJS. 2016. Primerjalna študija ekosistemskih storitev in upravljanja v kontrastnih rečnih sistemih Slovenije - Comparative study of ecosystem management and services in contrasting Slovenian freshwater systems. Aplikativni projekt ARRS. Ljubljana, Institut "Jožef Stefan", Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Nacionalni inštitut za biologijo, Institut za ekološki inženiring, d. o. o.

Ivanuša, B. 2016. Meritve gladin na AK Pernica. Osebna komunikacija po elektronski pošti (25. 1. 2016).

IZVRS, 2014. Poročilo o delu Inštituta za vode Republike Slovenije za leto 2014. Programski sklop I Skupina EU politika do voda - I/1 Izvajanje Vodne direktive: DDU19 Ureditev primarne in sekundarnih rab vode v večnamenskih akumulacijah. Ljubljana, Ministrstvo za okolje in prostor (MOP), Direkcija za vode Republike Slovenije (DRSV): 35 str.

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 (samozaložba L. Javornik): 126 str.

Julien Y., P. 2010. Erosion and Sedimentation. 2nd Edition. Cambridge, Colorado State University, Cambridge University Press: 390 str.

Juvan, S. 2007. Rekonstrukcija AK Pernica kot nadomestni ukrep za zmanjšanje poplavne ogroženosti po izgradnji AC v Pesniški dolini. Ljubljana, Zbornik 7. Dneva inženirjev. Inženirska zbornica Slovenije: 19-22.

Juvan, S. 2009a. Pravilnik o obratovanju in vzdrževanju objektov akumulacije Pernica, št. 3188/09. Maribor, Vodnogospodarski biro Maribor d.o.o.

Juvan, S. 2009b. Ali so bile poplave Pesnice avgusta 2009 posledica posegov ob izgradnji avtoceste v Pesniški dolini. Maribor, Mišičev vodarski dan 2009, Zbornik del: str. 30-32.

Kanduč, T. Samardžija, Z. Mori, N. Levačič, I. Kračun, M. Robinson, J. Žigon, S. Blažeka, Ž. Kocman, D. 2016. Hydrogeochemical and isotropic characterization of Pesnica River, Slovenia. Geologija, Izvod 59/2, pp. 179-192.

Klaneček, M. 2008. Presoja vodogospodarske urejenosti povodja. Magistrsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Klaneček): 127 str.

KMTal, 2016. Poročilo o geomehanskih laboratorijskih preiskavah vzorcev mulja na reki Pesnici. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za mehaniko tal z laboratorijem (KMTal).

Kobold, M. 2016. Hidrološki podatki za vodomerno postajo Ranca. Osebna komunikacija po elektronski pošti (29. 2. 2016).

Kocjan, M. 2009. Zadrževalniki voda in vodni režim. Ljubljana, Univerza v Ljubljani. Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.

Kolenc, R. 2005. Hidrografske meritve. Ljubljana, Geodetski vestnik, letnik 49, 18-28.

Kondolf, M. Gao, Y. Annandale, G. Morris, G. Jiang, E. Zhang, J. Cao, Y. Carling, P.; Fu, K. Guo, Q. Hotchkiss, R. Peteuil, C. Sumi, T. Wang, H.; Wang, Z. Wei, Z. Wu, B. Wu, C. Yang, C. 2014. Sustainable sediment management in reservoirs and regulated rivers: Experiences from five continents. *Earth's Future*, Izvod 2, pp. 256-280.

Kračun, M. 2017. Analiza zamuljevanja akumulacije Pernica iz vidika njenega namena. Podčetrtek, Drugi slovenski kongres o vodah. DVS - Društvo vodarjev Slovenije, SLOCOLD - Slovenski nacionalni komite za velike pregrade: 129-133 .

Krajnc, U. 2006. Hidrografske meritve in 3D modeliranje rečnega korita s programsko opremo Hypack. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba U. Krajnc): 84 str.

Krajnc, U. 2009. Izračun volumna Perniškega jezera. Poročilo. Ljubljana, Geodetski biro Iztok Slatinšek s.p.

Krzyk, M. 1996. Določanje parametrov, potrebnih za matematično modeliranje zasipavanja akumulacij. Maribor, V: Mišičev vodarski dan 1996. Zbornik del: 130-137.

Krzyk, M. Četina, M. 2003. Dvodimenzijski matematični model transporta lebdečih plavin. Ljubljana, Strojniški vestnik, letnik 03-3, 172-183.

Leitinger, V. 2012. Hidrogeografske značilnosti porečja reke Pesnice s poudarkom na vodnogospodarskih ureditvah. Diplomsko naloga. Koper, Univerza na Primorskem (samozaložba V. Leitinger): 90 str.

Markoli, T. 2012. Kvaliteta vode v akumulacijskih jezerih na reki Pesnica. Diplomsko naloga. Maribor, Univerza Maribor, Filozofska fakulteta, Oddelek za geografijo (samozaložba T. Markoli): 81 str.

Mikoš, M. 2007. Urejanje vodotokov. Skripta. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za splošno hidrotehniko: 187 str.

Mikoš, M. 2012a. Kalnost v rekah kot del erozijsko-sedimentacijskega kroga. Ljubljana, Gradbeni vestnik, letnik 61, 129-136.

Mikoš, M. 2012b. Metode terenskih meritev suspendiranih sedimentov v rekah. Ljubljana, Gradbeni vestnik, letnik 61, 151-158.

Mikoš, M. 2012c. Predlog obratovalnega hidrološkega monitoringa kalnosti na spodnji Savi. Ljubljana, Gradbeni vestnik, letnik 61, 170-176.

MOP, 2011. Načrt upravljanja voda za vodni območji Donave in Jadranskega morja 2009-2015. Ljubljana, Ministrstvo za okolje in prostor (MOP).

MOP, 2015. Analiza obstoječega stanja sistema AK Pernica - Projektna naloga. Ministrstvo za okolje in prostor (MOP).

MOP, 2016. Načrt upravljanja voda na vodnem območju Donave za obdobje 2016-2021- NUV II za vodno območje Donave. Ljubljana, Ministrstvo za okolje in prostor (MOP).

Morris, G. Fan, J. 2010. Reservoir Sedimentation Handbook. New York, McGraw-Hill Book Co: 784 str.

Ojsteršek Zorčič, P. 2015. Izbira in umeščanje ekoremediacijskih ukrepov v vodozbirno območje akumulacijskih jezer. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani. Biotehniška fakulteta (samozaložba P. Ojsteršek Zorčič): 188 str.

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

Repnik Mah, P. 2016. Ukrepi za izboljšanje hidromorfološkega stanja voda v programu ukrepov upravljanja voda. Maribor, V: Mišičev vodarski dan 2016: Zbornik del: 19-24.

Rusjan, S. Mikoš, M. 2006. Dinamika premeščanja lebdečih plavin v porečjih. Ljubljana, Acta hydrotehnica, letnik 24, 1-20.

Shahid Mashriqui, H. 2003. Hydrodynamic and sediment transport modeling of deltaic sediment processes. Doctor dissertation. The Department of Civil and Environmental Engineering, Luisiana State University: 146 str.

Slatinšek, I. 2016. Meritve akumulacije Percnica I po rekonstrukciji. Osebna komunikacija po elektronski pošti (3. 2. 2016).

Spletni portal Siol, 2013. Vzrok za pogin rib v Perniškem jezeru visoke temperature - Novica. <http://siol.net/novice/slovenija/vzrok-za-pogin-rib-v-verniskem-jezeru-visoke-temperature-373045> (Pridobljeno 13.7.2016).

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

Steinman, F. Banovec, P. 2008. Hidrotehnika - Vodne zgradne I, Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, KMTe- Katedra za mehaniko tekočin z laboratorijem: 147 str.

Tigrek, S. Gobeze, O. Aras, T. 2009. Sustainable management of reservoirs and preservation of water quality. Bari: CIHEAM: Options Mediterraneennes. Technological perspectives for rational use of water resources in the Mediterranean region: 41-53.

Trobec, T. 2011. Vodogradbeni protipoplavni ukrepi za varstvo pred škodljivim delovanjem hudourniških poplav kot sestavni del poplavnega tveganja. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Univerza v Ljubljani, Oddelek za geografijo, Filozofska fakulteta: 103-124.

UL RS 39/06, 2006. Zakon o varstvu okolja (ZVO-1H). Uradni list RS, št. 39/06 – uradno prečiščeno besedilo, 49/06 – ZMetD, 66/06 – odl. US, 33/07 – ZPNačrt, 57/08 – ZFO-1A, 70/08, 108/09, 108/09 – ZPNačrt-A, 48/12, 57/12, 92/13, 56/15, 102/15 in 30/16.

UL RS 67/02, 2002. Zakon o vodah (ZV-1). Uradni list RS, št. 67/02, 2/04 – ZZdrI-A, 41/04 – ZVO-1, 57/08, 57/12, 100/13, 40/14 in 56/15.

USBR, 2006. Erosion and Sedimentation Manual. Denver. Colorado: Bureau of Reclamation, Technical Service Center, Sedimentation and River Hydraulics Group: 600 str.

USGS, 2013. U.S. Geological survey: Scientific Investigations Report 2008–5093. <https://pubs.usgs.gov/sir/2008/5093/table7.html> (Pridobljeno 20. 6. 2017.).

Van Rijn, L. C. 2013. Sedimentation of sand and mud reservoirs in rivers.

<http://www.leovanrijn-sediment.com/papers/Reservoirsiltation2013.pdf>: (Pridobljeno 20. 3. 2016).

VGB d.o.o., 2010. Hidrološko hidravlična presoja vodnega režima Pesnice nad AK Pernica na območju načrtovanega doljnovoda od ČHE na Dravi do RTP Maribor, št.: 3258/10. Maribor, VGB Maribor d.o.o.

VGB d.o.o., 2012. Hidrološko hidravlična študija na območju AK Pristava na AC odseku Maribor-Lenart - št. proj. 3378/12. Maribor, VGB Maribor d.o.o.

VGI, 1999. Hidrološka študija Pesnice - novelacija. Ljubljana, Vodnogospodarski inštitut d.o.o.

VGI, 1980. Hidrološka študija Pesnice (do profila Hrastovec), št. C-1006. Ljubljana, Vodnogospodarski inštitut d.o.o.

Vodpreg, 2012. Zemeljske in betonske vodne pregrade strateškega pomena v RS VODPREG. Ljubljana, Ministrstvo za obrambo RS: 161 str.

Žnidarčič, M. Miač, P. 1987. Geološke karte Slovenije. Ljubljana, Geološki zavod Ljubljana.