

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
za gradbeništvo
in geodezijo



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

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

V zbirki je izvorna različica izdajatelja.

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

University
of Ljubljana
Faculty of
*Civil and Geodetic
Engineering*



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

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

This is a publisher's version PDF file.

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

Knapič, M. 2016. Vpliv spremembe gladinskega vrtišča v akumulacijskih bazenih na obratovanje hidroelektrarn. Magistrsko delo.= Impact of water level pivot point on operation of HPP reservoirs. M. Sc. Thesis. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 92 str. (mentor: prof. dr. Franc Steinman).

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
za gradbeništvo
in geodezijo

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



**MAGISTRSKI ŠTUDIJ
GRADBENIŠTVA
PROMETNA SMER**

Kandidat:

MATJAŽ KNAPIČ, univ. dipl. inž. grad.

**VPLIV SPREMEMBE GLADINSKEGA VRTIŠČA V
AKUMULACIJSKIH BAZENIH NA OBRATOVANJE
HIDROELEKTRARN**

Magistrsko delo števil.: 253

**IMPACT OF WATER LEVEL PIVOT POINT ON
OPERATION OF HPP RESERVOIRS**

Master of Science Thesis No.: 253

Mentor:
prof. dr. Franc Steinman

Predsednik in član komisije:
izr. prof. dr. Marijan Žura

Člani komisije:
doc. dr. Andrej Kryžanowski
doc. dr. Primož Banovec
doc. dr. Janja Kramer Stajanko

Ljubljana, 12. april 2016

STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako	Vrstica z napako	Namesto	Naj bo

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisani **MATJAŽ KNAPIČ**, univ. dipl. inž. grad., izjavljam, da sem avtor magistrskega dela z naslovom: **VPLIV SPREMEMBE GLADINSKEGA VRTIŠČA V AKUMULACIJSKIH BAZENIH NA OBRATOVANJE HIDROELEKTRARN**

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

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

Ljubljana, april 2016

.....

(podpis)

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	627.81:621.22:(043.3)
Avtor:	Matjaž Knapič
Mentor:	prof. dr. Franc Steinman
Naslov:	Vpliv spremembe gladinskega vrlišča v akumulacijskih bazenih na obratovanje hidroelektrarn
Obseg in oprema:	113 str., 22 ta., 60 sl., 16 en.
Ključne besede:	hidravlično modeliranje, hidroelektrarne, obratovanje hidroelektrarne, gladinsko vrlišče, denivelacijska krivulja

IZVLEČEK

Za zagotavljanje varnega delovanja v vseh razmerah imajo pretočne hidroelektrarne določen način obratovanja, ki velja za razmere ob zagonu objekta. Na podlagi izbranega načina delovanja je konstruirana denivelacijska krivulja, skladno s katero posamezni objekt deluje. Posledica izbranega načina obratovanja in denivelacijske krivulje je oblikovanje gladinskega vrlišča v akumulaciji. Vrlišče predstavlja tisto točko v akumulaciji, kjer gladina ostaja konstantna kljub povečanju oz. manjšanju pretoka v vodotoku in se pojavi samo v času, ko hidroelektrarna deluje skladno z denivelacijsko krivuljo. Z umestitvijo hidroelektrarne in s tem vzpostavitvijo zaježitve vodotoka se spremenijo hidravlične razmere na vodotoku. V akumulaciji se prične odlaganje sedimentov in s tem spreminjanje batimetrije akumulacije. V nalogi je s hidravličnim modeliranjem preverjen vpliv sedimentacije na začetno lokacijo gladinskega vrlišča in s tem na obratovanje hidroelektrarn. Najprej so izvedeni izračuni za teoretični primer hidroelektrarne z akumulacijo s poenostavljeno geometrijo, za katero je preverjen vpliv dvigovanja dna in spremembe hidravlične hrapavosti ter vpliv teh sprememb na predpisani način obratovanja. Z izvedbo izračunov so pridobljene osnovne ugotovitve, kako se ob različnih spremembah obnaša lokacija gladinskega vrlišča in kakšen vpliv ima to na samo obratovanje. Pridobljene ugotovitve so nato preverjene še z izdelavo hidravličnega modela območja hidroelektrarne HE Boštanj. Glede na rezultate izračunov iz obeh izdelanih primerov, je izvedena sinteza ugotovitev, ki nam pove, kako odlaganje/odnašanje plavin vpliva na lokacijo gladinskega vrlišča, kakšne so informacije, ki jih poda položaj vrlišča in na kakšen način lahko s spremljanjem položaja vrlišča izboljšamo obratovanje HE.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC: 627.81:621.22:(043.3)
Author: Matjaž Knapič
Supervisor: prof. Franc Steinman Ph.D.
Title: Impact of water level pivot point on operation of HPP reservoirs
Notes: 113 p., 22 tab., 60 fig., 16 eq.
Key words: hydraulic modeling, hydropowerplant, hydropowerplant operation, pivot point, operating curve

ABSTRACT

To ensure safe operation of hydropower plant (HPP) in all conditions, every HPP has to have defined operation concept. Operation concept is always defined for starting conditions in which HPP and its reservoir starts to operate. Based on the selected operation concept a set of operating rules is applied. As a result of the selected operating concept and designed set of operation rules a water level pivot point appears in HPP reservoir. Pivot point represents the point in the reservoir, where the water level remains constant, regardless the increase or decrease of the flow in the river. Pivot point appears only at times, when HPP operates in accordance with designed set of operation rules. But with the construction of HPP, hydraulic conditions of the river are altered. Consequently of that a process of sedimentation begins in the reservoir. In this assignment the impact of sedimentation on the initial location of water level pivot point and thus on starting operation concept is analyzed with methods of hydraulic modeling. Hydraulic calculations are performed for theoretical example of HPP in a reservoir with simplified geometry. Changes in reservoir's bottom and hydraulic roughness are observed and their impact on the starting operating concept is investigated. By performing calculations for this example, we obtaine basic knowledge regarding how the various changes influence the water level pivot point and the level of impact on operation concept. The results are later validated with calculations for the hydraulic model of HPP Boštanj. Based on the results from both calculations, the analysis were made. The analysis explains the impact of sedimentation on the location of water level pivot point, the implications on operation concept and how the effects can be mitigated.

ZAHVALA

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

Ravno tako se zahvaljujem družini za leta podpiranja na študijski poti.

KAZALO VSEBINE

1.0	UVOD	14
2.0	OPREDELITEV PROBLEMATIKE IN CILJI NALOGE.....	16
2.1	Opredelitev problematike in namen magistrskega dela	16
2.2	Hipoteza in cilji naloge.....	17
2.3	Metode in struktura dela	18
3.0	TEORETIČNA IZHODIŠČA	19
3.1	Splošne enačbe hidravlike odprtih vodotokov.....	19
3.1.1	Zakon o ohranitvi mase	19
3.1.2	Zakon o ohranitvi gibalne količine (dinamična enačba)	20
3.1.3	Zakon o ohranitvi energije.....	21
3.1.4	Tok s prosto gladino	22
3.1.5	Potek gladin pri stalnem neenakomernem toku.....	23
3.2	Hidravlika prelivnih objektov.....	23
3.2.1	Določitev prelivne sposobnosti prostega preliva.....	24
3.2.2	Določitev obratovalne krivulje pri gibljivih jezovih - denivelacijska krivulja.....	25
3.3	Pojav zviševanja dna in s tem zmanjšanja pretočnega prereza zaradi sedimentacije v akumulacijskih bazenih	27
3.3.1	Proces sedimentacije v akumulacijah.....	28
3.3.2	Viri plavin in vplivi človeka na sedimentacijo v akumulacijah	31
3.3.3	Posledice sedimentacije v akumulacijskih bazenih.....	32
3.4	Določanje hidravlične hrapavosti v odvisnosti od sestave dna vodotoka.....	33
3.5	Hidrotehnični sistemi	35
3.5.1	Kanalski sistemi.....	35
3.5.2	Načini obratovanja kanalskih sistemov	36
3.5.3	Hydroenergetski sistemi	40
3.5.3.1	Akumulacijske hidroelektrarne.....	41
3.5.3.2	Pretočne hidroelektrarne	43
3.5.3.3	Črpalne hidroelektrarne	44
3.5.3.4	Dovod vode do hidroelektrarne	45
3.5.3.5	Veriga hidroelektrarn.....	45
3.5.4	Način obratovanja hidroenergetskih sistemov.....	47
3.5.5	Problematika gladinskega vrtilišča	50

3.6	Uporabljena programska orodja.....	52
3.6.1	Način določitve lokacije gladinskega vrtilišča v tem dokumentu.....	53
3.6.2	Način določitve volumnov vode v tem dokumentu	54
4.0	PODATKOVNI VIRI	56
4.1	Primer s poenostavljeno geometrijo akumulacije HE.....	56
4.1.1	Poenostavljena geometrija v hidravličnem modelu akumulacije HE	56
4.1.2	Obratovalna gladina	58
4.1.3	Hidrološki podatki	58
4.2	Primer HE Boštanj	59
4.2.1	Opis objekta HE Boštanj.....	60
4.2.2	Geodetski podatki	61
4.2.3	Hidrološki podatki	63
4.2.4	Podatki o meritvah gladin	65
4.2.5	Zasnova matematičnega modela	67
4.2.6	Obratovanje HE Boštanj in HE Arto-Blanca	68
5.0	HIDRAVLIČNO MODELIRANJE AKUMULACIJE S POENOSTAVLJENO GEOMETRIJO.....	70
5.1	Izračuni za začetne analize o lastnostih lokacije gladinskega vrtilišča v akumulacijskih bazenih z enostavno geometrijo.....	70
5.1.1	Določitev gladinskega vrtilišča za osnovno stanje s stalnim tokom	70
5.1.2	Preverba ohranjanja konstantnega volumna za osnovni primer.....	72
5.1.3	Lastnosti gladinskega vrtilišča v primeru nestalnega toka.....	72
5.2	Izračun vpliva sprememb batimetrije v bazenih HE na gladinsko vrtilišče – stalni tok	74
5.2.1	Lastnosti gladinskega vrtilišča pri spremembah dna.....	74
5.2.2	Lastnosti gladinskega vrtilišča pri spremenjeni hidravlični hrapavosti	75
5.2.3	Določitev lastnosti gladinskega vrtilišča pri spremenjeni morfologiji bazena	76
5.2.4	Preverba ohranjanja konstantnega volumna v bazenu pri spremenjeni morfologiji bazena	78
5.2.5	Optimizacija denivelacijske krivulje.....	81
5.3	Lastnosti gladinskega vrtilišča za izbrani primer spremenjene morfologije – nestalni tok.....	84
6.0	HIDRAVLIČNO MODELIRANJE RAZMER HE BOŠTANJ	87
6.1	Umerjanje in verifikacija modela ter analiza računske negotovosti.....	87

6.1.1	Analiza merjenih podatkov.....	87
6.1.2	Umerjanje hidravličnega modela.....	89
6.1.3	Analiza računske negotovosti.....	94
6.2	Lastnosti gladinskega vrlišča za primere izračuna s stalnim tokom.....	95
6.3	Lastnosti gladinskega vrlišča za primere izračuna z nestalnim tokom.....	96
7.0	ANALIZA REZULTATOV IN POTRDITEV HIPOTEZE.....	100
7.1	Splošne zakonitosti obratovanja hidroenergetskih objektov	100
7.2	Analiza lastnosti lokacije gladinskega vrlišča v bazenih z enostavno geometrijo.....	101
7.2.1	Stalni tok.....	101
7.2.2	Nestalni tok.....	103
7.2.3	Izdelava brezdimenzijskih diagramov za določitev lokacije gladinskega vrlišča ..	104
7.3	Analiza lastnosti lokacije gladinskega vrlišča v bazenu HE Boštanj	106
7.3.1	Uporaba brezdimenzijskih diagramov	106
7.3.2	Stalni tok.....	107
7.3.3	Nestalni tok.....	109
7.4	Skupne ugotovitve in potrditev hipoteze	110
7.5	Smernice za nadaljnje analize	112
8.0	ZAKLJUČKI	113
VIRI IN LITERATURA.....		116
PRILOGE		120

KAZALO SLIK

Slika 1: M-krivulje pri stalnem neenakomernem toku v mirnem režimu toka.....	23
Slika 2: Shema variant prelivnih objektov	24
Slika 3: Primer pretočne krivulje z upoštevanjem vpliva spodnje vode.....	25
Slika 4: Prikaz obnašanja vodne gladine v akumulaciji pri obratovanju skladno z denivelacijsko krivuljo	26
Slika 5: Primer denivelacijske krivulje z navezavo na pretočno krivuljo	26
Slika 6: Razvoj odlaganja sedimentov v rezervoarjih (vir: Batuca, Jordan, 2000)	29
Slika 7: Shema odlaganja sedimentov po dnu akumulacijskega bazena	30
Slika 8: Odlaganje sedimentov v korenu zajeze na akumulaciji HE Vrhovo (vir: Tanja Košir, ZRSVN, september 2015)	30
Slika 9: Odlaganje sedimentov v sredini zajeze na akumulaciji HE Vrhovo (vir: Tanja Košir, ZRSVN, september 2015)	30
Slika 10: Odlaganje sedimentov pred pregrado HE Vrhovo (vir: Tanja Košir, ZRSVN, september 2015)	31
Slika 11: Shema obratovanja s konstantno dolvodno gladino v kanalu (vir: Buyalski et al, 1991).....	36
Slika 12: Shema obratovanja s konstantno gorvodno gladino v kanalu (vir: Buyalski et al, 1991).....	37
Slika 13: Shema obratovanja s konstantnim volumnom v kanalu (vir: Buyalski et al, 1991) .	39
Slika 14: Primer obratovanja s kontroliranim volumnom v kanalu (vir: Buyalski et al, 1991)	40
Slika 15: Prikaz osnovnih delov hidroelektrarne (vir: Howstuffworks, 2015).....	41
Slika 16: Primer akumulacijske HE – Hoover Dam, ZDA (vir: Hoover dam, 2015)	42
Slika 17: Primer akumulacijske HE – Tri soteske, Kitajska (vir: Three gorges, 2015)	42
Slika 18: Primer pretočne HE – Chief Joseph Dam, ZDA (vir: Chief Joseph Dam, 2015)	43
Slika 19: Primer pretočne HE – HE Boštanj, Slovenija (vir: HESS d.o.o.)	43
Slika 20: Primer črpalne HE (vir: Voith, 2015)	44
Slika 21: Prikaz delovanja črpalne HE (vir: Hyhowworks, 2015)	44
Slika 22: HE z dovodnim rovom ob pregradi in HE z derivacijskim rovom (vir: Ivcleantech, 2015; Csanyigroup, 2015)	45
Slika 23: Vzdolžni prerez sheme verige HE.....	46
Slika 24: Shema verige HE na spodnji Savi (vir HESS d.o.o.)	46
Slika 25: Shema oblikovanja gladinskega vrtilišča	51
Slika 26: Prikaz parametrov za določitev volumnov vode	54
Slika 27: Situacija hidravličnega matematičnega modela z enostavno geometrijo.....	57
Slika 28: Izbrani prečni profil na koncu pri pregradi (Opomba: merili nista enaki).....	57
Slika 29: Izbrani prečni profil na začetku bazena (Opomba: merili nista enaki)	58
Slika 30: Ozki in široki hidrogram visokovodnega vala uporabljen za izračune v enostavnem hidravličnem modelu	59
Slika 31: HE Boštanj (vir: HESS d.o.o.)	60
Slika 32: Izdelani DMT za podatke ob zaključku gradnje HE Boštanj in HE Arto-Blanca....	62
Slika 33: Razlika v spremembah dna akumulacije HE Boštanj in HE Arto-Blanca	62
Slika 34: Ozki in široki sintetični hidrogram visokovodnega vala Q100 uporabljen za izračune v hidravličnem modelu HE Boštanj	64
Slika 35: Izmerjeni hidrogrami poplavnih valov, uporabljeni za umerjanje hidravličnega modela HE Boštanj.....	65
Slika 36: Lokacije merilnih mest na akumulacijskih bazenih HE Boštanj in HE Arto-Blanca	66
Slika 37: Situacija hidravličnega matematičnega modela z vrisanimi prečnimi prerezi na območju HE Boštanj in HE Arto-Blanca	67

Slika 38: Pretočni in denivelacijski krivulji na objektu HE Boštanj (Ciuha, 2013)	68
Slika 39: Pretočni in denivelacijski krivulji na objektu HE Arto-Blanca (Ciuha, 2013).....	69
Slika 40: Pretočna in denivelacijska krivulja na pregradi za primer s poenostavljeno geometrijo	70
Slika 41: Oblikovanje gladinskega vrlišča za osnovni geometrijski primer za stalni tok za izbrane pretoke	71
Slika 42: Oblikovanje gladinskega vrlišča za primer nestalnega toka – ozki hidrogram	73
Slika 43: Volumen vode v akumulacijskem bazenu pri prehodu visokovodnega vala.....	74
Slika 44: Grafični prikaz sprememb volumnov vode v bazenu glede na spremembo pretoka in dviga dna pri konstantnem Manningovem koeficientu 0.03	79
Slika 45: Grafični prikaz sprememb volumnov vode v bazenu glede na spremembo pretoka in dviga dna pri konstantnem Manningovem koeficientu 0.025	80
Slika 46: Grafični prikaz sprememb volumnov vode v bazenu glede na spremembo pretoka in dviga dna pri konstantnem manningovem koeficientu 0.025 in optimiranih denivelacijskih krivuljah	83
Slika 47: Sprememba volumna vode v akumulaciji za različna primera hidravlične hrapavosti in različne primere denivelacijske krivulje – ozki hidrogram.....	84
Slika 48: Sprememba volumna vode v akumulaciji za različna primera hidravlične hrapavosti in različne primere denivelacijske krivulje – široki hidrogram	85
Slika 49: Analiza meritev nivojev spodnje vode HE Vrhovo	88
Slika 50: Analiza meritev zgornje vode HE Boštanj	88
Slika 51: Umerjanje modela HE Boštanj: lokacija spodnje vode HE Vrhovo – poplavni val december 2008	90
Slika 52: Umerjanje modela HE Boštanj: lokacija spodnje vode HE Boštanj – poplavni val december 2008	90
Slika 53: Umerjanje modela HE Boštanj – lokacija spodnje vode HE Vrhovo – poplavni val november 2013.....	91
Slika 54: Umerjanje modela HE Boštanj – lokacija spodnje vode HE Boštanj – poplavni val november 2013.....	92
Slika 55: Verifikacija izdelanih modelov na visoke vode september 2010 – lokacija spodnje vode HE Vrhovo	93
Slika 56: Verifikacija izdelanih modelov na visoke vode september 2010 – lokacija spodnje vode HE Boštanj	93
Slika 57: Grafični prikaz sprememb volumnov vode v bazenu HE Boštanj glede na spremembo batimetrije in denivelacijske krivulje	96
Slika 58: Sprememba volumna vode v akumulaciji HE Boštanj za osnovno stanje, novo stanje in novo stanje z optimirano denivelacijsko krivuljo – ozki hidrogram.....	97
Slika 59: Sprememba volumna vode v akumulaciji HE Boštanj za osnovno stanje, novo stanje in novo stanje z optimirano denivelacijsko krivuljo – ozki hidrogram.....	98
Slika 60: Brezdimenzijski diagram za koeficient lokacije gladinskega vrlišča v odvisnosti od dvig dna.....	105
Slika 61: Brezdimenzijski diagram za koeficient lokacije gladinskega vrlišča v odvisnosti na hidravlično hrapavost.....	105

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Nove konice poplavnih valov na odseku spodnje Save (Arso, 2011)	64
Preglednica 2: Naraščanja volumnov za izračun osnovnega stanja s stalnim tokom	72
Preglednica 3: Sprememba lokacije gladinskega vrlišča za različne primer dviga dna (negativna vrednost pove, da se je vrlišče pomaknilo k pregradi)	75
Preglednica 4: Sprememba lokacije gladinskega vrlišča za različne koeficiente hrapavosti ...	76
Preglednica 5: Sprememba lastnosti gladinskega vrlišča za primere dviga dna in $n_g = 0,02$..	77
Preglednica 6: Sprememba lastnosti gladinskega vrlišča za primere dviga dna in $n_g = 0,025$..	77
Preglednica 7: Sprememba lastnosti gladinskega vrlišča za primere dviga dna in $n_g = 0,035$..	77
Preglednica 8: Sprememba lastnosti gladinskega vrlišča za primere dviga dna in $n_g = 0,04$..	77
Preglednica 9: Volumen vode v akumulacijskem bazena za različne pretoke in različne dvige dna pri konstantnem Manningovem koeficientu 0,03	79
Preglednica 10: Volumen vode v akumulacijskem bazena za različne pretoke in različne dvige dna pri Manningovem koeficientu 0,025	80
Preglednica 11: Volumen vode v akumulacijskem bazena (m^3) za različne pretoke in različne dvige dna pri konstantnem Manningovem koeficientu 0,025 in optimiranih denivelacijskih krivuljah	82
Preglednica 12: Prikaz vtokov in iztokov iz akumulacijskega bazena za različna primera hidravlične hrapavosti in različna primera denivelacijske krivulje v izbranih časovnih korakih – ozki hidrogram	85
Preglednica 13: Prikaz vtokov in iztokov iz akumulacijskega bazena za različna primera hidravlične hrapavosti in različna primera denivelacijske krivulje v izbranih časovnih korakih – široki hidrogram	86
Preglednica 14: Prikaz odstopanja podatkov med meritvami gladin in podatkov, pridobljenih iz izračunov za primere umerjanja hidravličnega modela	94
Preglednica 15: Prikaz odstopanja podatkov med meritvami gladin in podatkov, pridobljenih iz izračunov za primer verifikacije hidravličnega modela	94
Preglednica 16: Izračunane lokacije gladinskega vrlišča za različne računske primere	97
Preglednica 17: Prikaz vtokov in iztokov iz akumulacijskega bazena HE Boštanj za različne primere geometrije in različne primere denivelacijske krivulje v izbranih časovnih korakih – ozki hidrogram	98
Preglednica 18: Prikaz vtokov in iztokov iz akumulacijskega bazena HE Boštanj za različne primere geometrije in različne primere denivelacijske krivulje v izbranih časovnih korakih – široki hidrogram	99
Preglednica 19: Primerjava lokacij oblikovanja gladinskega vrlišča za primer stalnega in nestalnega toka	103
Preglednica 20: Prikaz volumnov vode pri naraščanju pretokov v osnovnem in novem stanju akumulacijskega bazena HE Boštanj in pri obratovanju po osnovni denivelacijski krivulji .	108
Preglednica 21: Prikaz volumnov vode pri naraščanju pretokov v osnovnem in novem stanju akumulacijskega bazena HE Boštanj in pri obratovanju po osnovni in optimirani denivelacijski krivulji	109
Preglednica 22: Primerjava lokacij oblikovanja gladinskega vrlišča za primer stalnega in nestalnega toka – model HE Boštanj	109

LIST OF FIGURES

Figure 1: Gradually varied flow profiles for steady flow and mild slope - M curves	23
Figure 2: Representation of different spillways.....	24
Figure 3: Example of rating curve with impact of tail water level	25
Figure 4: Representation of water level in reservoir when operating according to operational curve.....	26
Figure 5: Operational curve with reference to rating curve.....	26
Figure 6: Evolution and interaction of various sediment deposits in reservoir (Batuca, Jordan,2000).....	29
Figure 7: Representation of sediments at the bottom of the reservoir	30
Figure 8: Disposal of sediment in tail water of HPP Vrhovo (Tanja Košir, ZRSVN, september 2015)	30
Figure 9: Disposal of sediment in reservoir of HPP Vrhovo (Tanja Košir, ZRSVN, september 2015)	30
Figure 10: Disposal of sediment in front of dam HPP Vrhovo (Tanja Košir, ZRSVN, september 2015).....	31
Figure 11: Method of operation with constant downstream depth (Buyalski et al, 1991).....	36
Figure 12: Method of operation with constant upstream depth (Buyalski et al, 1991).....	37
Figure 13: Method of operation with constant volume (Buyalski et al, 1991)	39
Figure 14: Method of operation with controlled volume (Buyalski et al, 1991)	40
Figure 15: Representation of basic parts of HPP (Howstuffworks, 2015).....	41
Figure 16: Example of storage HPP – Hoover Dam, USA (Hoover dam, 2015)	42
Figure 17: Example of storage HPP – Three Gorges Dam, China (Three gorges, 2015).....	42
Figure 18: Example of run of the river HPP – Chief Joseph Dam, USA (Chief Joseph Dam, 2015)	43
Figure 19: Example of run of the river HPP – HE Boštanj, Slovenia (HESS d.o.o.)	43
Figure 20: Example of pumped-storage HPP (Voith, 2015).....	44
Figure 21: Graphic display of operation of pumped-storage HPP (Hyhowworks, 2015).....	44
Figure 22: Examples of different HPP design (Ivcleantech, 2015; Csanyigroup, 2015).....	45
Figure 23: Profile plot for series of HPPs	46
Figure 24: Representation of lower Sava HPPs (HESS d.o.o.).....	46
Figure 25: Representation of water level pivot point.....	51
Figure 26: Display of parameters for calculations of water volume	54
Figure 27: Map of hydraulic model with simplified geometry	57
Figure 28: Cross section plot in front of dam	57
Figure 29: Cross section plot in tail water	58
Figure 30: Narrow and wide flood wave hydrograph used for calculations in a simple hydraulic model.....	59
Figure 31: HPP Boštanj (HESS d.o.o.)	60
Figure 32: DEM of HPP Boštanj and HPP Arto-Blanca at conclusion of projects	62
Figure 33: Difference in changes in the bottom of the reservoirs HPP Boštanj and HPP Arto-Blanca.....	62
Figure 34: Narrow and wide synthetic hydrograph flood wave Q100 used in hydraulic model HPP Boštanj	64
Figure 35: Measured hydrographs of flood waves used to calibrate the hydraulic model HPP Boštanj	65
Figure 36: Locations of water level measurement in HPP Boštanj and HPP Arto-Blanca reservoirs.....	66

Figure 37: Map of the hydraulic mathematical model with cross-sections in the area oh HPP Boštanj and HPP Arto-Blanca	67
Figure 38: Rating and operational curve for HPP Boštanj (Ciuha, 2013).....	68
Figure 39: Rating and operational curve for HPP Arto-Blanca (Ciuha, 2013)	69
Figure 40: Rating and operational curve for calculations in a simple hydraulic model	70
Figure 41: Representation of water level pivot point for steady flow calculations in a simple hydraulic model (initial state).....	71
Figure 42: Representation of water level pivot point for unsteady flow calculations – narrow hydrograph.....	73
Figure 43: Volume of water in the reservoir for unsteady flow calculations (initial state).....	74
Figure 44: Graphic display of changes in volume of water in reservoir for changes of flow and different states of river bed at a constant Manning coefficient 0,03	79
Figure 45: Graphic display of changes in volume of water in reservoir for changes of flow and different states of river bed at a constant Manning coefficient 0,025	80
Figure 46: Graphic display of changes in volume of water in reservoir for changes of flow and different states of river bed at a constant Manning coefficient 0,025 and optimized operationa curve	83
Figure 47: Changes of volume of water in reservoir for diffrent Manning coefficient and different operational curves - narrow hydrograph.....	84
Figure 48: Changes of volume of water in reservoir for diffrent Manning coefficient and different operational curves - wide hydrograph	85
Figure 49: Analysis of measurements of tail water levels for HPP Vrhovo.....	88
Figure 50: Analysis of measurements of head water levels for HPP Boštanj	88
Figure 51: Calibration of hydraulic model HPP Boštanj: at location of tail water HPP Vrhovo - flood wave in December 2008	90
Figure 52: Calibration of hydraulic model HPP Boštanj: at location of tail water HPP Boštanj - flood wave in December 2008	90
Figure 53: Calibration of hydraulic model HPP Boštanj: at location of tail water HPP Vrhovo - flood wave in November 2013	91
Figure 54: Calibration of hydraulic model HPP Boštanj: at location of tail water HPP Boštanj - flood wave in November 2013	92
Figure 55: Verification of hydraulic model HPP Boštanj for flood wave in September 2010 - at location of tail water HPP Vrhovo.....	93
Figure 56: Verification of hydraulic model HPP Boštanj for flood wave in September 2010 - at location of tail water HPP Boštanj.....	93
Figure 57: Graphic display of changes in volume of water in reservoir HPP Boštanj for changes of bathymetry and different operational curves.....	96
Figure 58: Changes of volume of water in reservoir HPP Boštanj for diffrent bathymetry states and different operational curves - narrow hydrograph	97
Figure 59: Changes of volume of water in reservoir HPP Boštanj for diffrent bathymetry states and different operational curves - wide hydrograph.....	98
Figure 60: Graph of water level pivot point coefficient vs. state of river bed.....	105
Figure 61: Graph of water level pivot point coefficient vs. Manning coefficient.....	105

LIST OF TABLES

Table 1: New flood wave peaks on lower Sava reach (Arso,2011)	64
Table 2: Increase in volumes in reservoir for stedy flow calculations.....	72
Table 3: Changes of water level pivot point for different river bed states (negative value represents moving of pivot point towards the dam).....	75
Table 4: Changes of water level pivot point for different Manning coefficient	76
Table 5: Changes of water level pivot point for different river bed states and $n_g = 0,02$	77
Table 6: Changes of water level pivot point for different river bed states and $n_g = 0,025$	77
Table 7: Changes of water level pivot point for different river bed states and $n_g = 0,035$	77
Table 8: Changes of water level pivot point for different river bed states and $n_g = 0,04$	77
Table 9: Volume of water in reservoir for different flows, different river bed states and Manning coefficient = 0,03.....	79
Table 10: Volume of water in reservoir for different flows, different river bed states and Manning coefficient = 0,025.....	80
Table 11: Volume of water in reservoir for different flows, different river bed states, Manning coefficient = 0,025 and optimized operational curve.....	82
Table 12: Inflow and outflow from reservoir for different Manning coefficient and different operational curves - narrow hydrograph	85
Table 13: Inflow and outflow from reservoir for different Manning coefficient and different operational curves - wide hydrograph.....	86
Table 14: Deviations of data between the measurements of water level and data derived from calculations with hydraulic model (calibration	94
Table 15: Deviations of data between the measurements of water level and data derived from calculations with hydraulic model (verification)	94
Table 16: Water level locations for different caluculations	97
Table 17: Inflow and outflow from reservoir HPP Boštanj for different bathymetry and different operational curves - wide hydrograph - narrow hydrograph.....	98
Table 18: Inflow and outflow from reservoir HPP Boštanj for different bathymetry and different operational curves - wide hydrograph - wide hydrograph	99
Table 19: Comparison of locations of water level location point for steady and unsteady flow	103
Table 20: Volume of water in reservoir for different bathymetry and normal operational curve	108
Table 21: Volume of water in reservoir for different bathymetry and normal and optimized operational curves	109
Table 22: Comparison of locations of water level location point for steady and unsteady flow calcaultions – hydraulic model HPP Boštanj	109

OKRAJŠAVE IN SIMBOLI

ARSO	Agencija Republike Slovenije za okolje
DK	denivelacijska krivulja
DMT	digitalni model terena
DEM	digital elevation model
ESRI	Environmental System Research Institute
HE	hidroelektrarna
LIDAR	Light Detection And Ranging (lasersko skeniranje)
VP	vodomerna postaja
VV	visokovodni val
IDP	idejni projekt
PGD	projekt za pridobitev gradbenega dovoljenja
PZI	projekt za izvedbo
PID	projekt izvedenih del

1.0 UVOD

Vodotoki zaradi svojih naravnih značilnosti predstavljajo enega izmed najzanimivejših prostorov za razvoj, na katerih človek širi svojo dejavnost. S širitvijo človeške dejavnosti na prostor vodotoka velikokrat posežemo na območja, ki so ob izrednih dogodkih lahko preplavljena z vodo. Zaradi tega prostor ob vodotokih običajno spreminjamo z izvedbo antropogenih posegov v prostor (gradnja hidrotehničnih sistemov), s katerimi poskušamo preprečiti škodljivo delovanje voda.

Hidrotehnični sistemi so zgrajeni za različne namene. Lahko so namenjeni zagotavljanju poplavne varnosti, zagotavljanju vode za namakanje, proizvodnji električne energije, plovbi, zagotavljanju pitne vode ... (Steinman insod, 2008) Vsi ti sistemi vključujejo objekte, ki so v prostor umeščeni za daljše časovno obdobje oz. trajno in morajo zato zagotavljati varno obratovanje v vseh možnih razmerah. Varno obratovanje vseh hidrotehničnih sistemov v vseh razmerah je možno le s primernim izborom obratovalnih pravil. Zaradi obsežnosti področja hidrotehničnih sistemov in z njimi povezanimi različnimi načini obratovanja se bomo v tem dokumentu osredotočili le na obratovanja pretočnih hidroenergetskih objektov (pretočne hidroelektrarne).

Gradnja pretočne hidroelektrarne na vodotoku predstavlja obsežen poseg v prostor, ki mora biti optimalno načrtovan za dano lokacijo. Za varno in učinkovito rabo objekta je poleg pregrade in strojnice potrebno na širšem območju zagotoviti tudi več spremljajočih ureditev (energetski nasip, različna infrastruktura, ureditve pritokov, visokovodni razbremenilnik ...). Gradnja objektov v obvodnem prostoru vpliva tudi na naravni pretočni režim vodotoka, ki se z umestitvijo novega objekta spremeni. Ob nizkih in srednjih pretokih to običajno ni problematično, posegi v obvodnem prostoru pa imajo lahko velik vpliv ob nastopu ekstremnih pretokov – visokih voda. Vplivi so lahko pozitivni (zadrževanje in manjšanje konice poplavnega vala) oziroma negativni (pohitritev in povečanje konice poplavnega vala) in se razlikujejo med posameznimi primeri.

S pravilnim izborom načina obratovanja moramo zagotoviti tak način delovanja objekta, ki bo v primeru visokih voda čez jezovne zgradbe zagotovil pretok, ki ne bo poslabšal razmer gornodolno in dolvodno od pregrade. To pomeni, da mora biti obratovanje zasnovano na način, da v akumulacijskem bazenu ne povzroči pretiranega dviga gladin in da dolvodno od pregrade ne povečujemo pretoka z dodajanjem predhodno akumulirane vode iz bazena. Določitev načina obratovanja je odvisna od območja, na katerem je postavljen objekt, in spremljajočih ureditev objekta. Določitev optimalnega načina obratovanja hidroenergetskega objekta je še posebno pomembno, kadar imamo na reki verigo več objektov, ki si sledijo (verigo hidroelektrarn). Za take sisteme je nujno potrebno zagotoviti način obratovanja, ki ne poslabšuje razmere dolvodno od posamezne pregrade, niti na koncu obratovalne verige. Taki sistemi so veliko ranljivejši, saj imajo manjšo možnost odpravljanja napak, ki lahko nastanejo pri nepravilnem obratovanju.

Buyalski in sodelavci (1991) ugotavljajo, da so metode obratovanja posameznih hidrotehničnih sistemov zasnovane na lokaciji gladinskega vrlišča. Gre za točko v sistemu, kjer globina vode ostaja konstantna, ko se spreminja naklon vodne gladine zaradi spremembe pretokov. Gladine vode gornodolno od vrliščne točke se dvigajo, dolvodno od vrliščne točke se nižajo. Z drugimi besedami, gladine v sistemu se vrtijo okrog konstantnega gladinskega vrlišča. Pri oblikovanju lokacije gladinskega vrlišča ima pomembno vlogo denivelacijska

krivulja, ki predpisuje uravnavanje višine zgornje vode akumulacijskega bazena ob različnih pretokih vodotoka in s tem zagotavlja varno obratovanje objekta. Za vsak objekt se krivulja določi ob pričetku delovanja in upošteva vse takrat znane karakteristike objekta in celotnega območja, v katerega je objekt umeščen. Za energetske sisteme – objekte hidroelektrarne podobno ugotovitev podaja tudi Ciuha (2005), ki ugotavlja, da računi gladin stalnega toka v posameznem bazenu HE pokažejo, da se vzpostavi odsek, v katerem je gladina na približno enakem nivoju ves čas zniževanja zgornje vode (denivelacije gladine). Omenjeni odsek Ciuha poimenuje kot »ravnotežno obratovalno točko« bazena oz. krajše »težišče« bazena. Enako ugotovitev podaj Zakrajšek (2005).

V življenjskem obdobju so hidrotehnični sistemi podvrženi naravnim procesom, kot so erozija in odlaganje sedimentov. V akumulacijskih bazenih hidroelektrarn zaradi zmanjšanja hitrosti vode prihaja predvsem do odlaganja sedimentov, manj pa do erozije. Ocenjeno je, da se volumen vseh akumulacijskih bazenov v svetovnem merilu zaradi sedimentacije manjša za več kot 1 odstotek na leto (Batuca, 2000). Proces sedimentacije je neizogiben in ohranjanje prvotnega stanja akumulacijskega bazena ni možno. Batuca in Jordan (2000) ugotavljata, da ko se proces zamuljevanja prične, ga ni možno preprečiti oziroma ustaviti. Proces povzroča spremembe v akumulacijskih bazenih, ki vplivajo tako na objekte hidroelektrarne, kot na njihovo obratovanje. Podobne ugotovitve je navedel tudi Senturk (1994), ki pravi da je izguba koristne prostornine akumulacijskega bazena zaradi odlaganja sedimentov dolgotrajen proces, ki ne poteka linearno. Zato se postavlja vprašanje, na kakšen način lahko za posamezni akumulacijski bazen zagotovimo, da bo celotno življenjsko dobo čim bolj služil svojemu namenu. Pri tem je treba zagotoviti tudi ekonomičnost in ekološkost ukrepov za ohranjanje akumulacijskega bazena, saj odstranjevanje sedimentov iz akumulacije in odlaganje le-teh na deponijah ni vedno sprejemljivo niti ekonomično, plavljenje sedimentov pa je lahko sporno z ekološkega vidika.

Denivelacijska krivulja, ki je bila konstruirana ob pričetku obratovanja objekta, praviloma ne upošteva sprememb, ki se dogajajo zaradi procesa sedimentacije. Ker je sedimentacija proces, ki traja daljše obdobje in posledice tega procesa niso lahko ugotovljive, tudi ne vemo, ali proces sedimentacije s tako mero vpliva na denivelacijsko krivuljo, da bi obratovanje pretočne hidroelektrarne po prvotno predpisani krivulji lahko postalo neprimerno s stališča zagotavljanja poplavne varnosti na vplivnem območju objekta. Ker ima denivelacijska krivulja tudi vpliv na lokacijo gladinskega vrlišča, predvidevamo, da je s spremljanjem lokacije gladinskega vrlišča možno tudi ugotavljanje stanja akumulacijskega bazena in s tem vpliva na varnost obratovanja objekta (zagotavljanja poplavne varnosti).

V sklopu te naloge je tako preverjen vpliv morfoloških sprememb v akumulacijskem bazenu pretočne hidroelektrarne na pojavljanja gladinskega vrlišča in s tem povezani vpliv na obratovanja. Pričakujemo, da bodo morfološke spremembe v akumulacijskem bazenu povzročile premik lokacije gladinskega vrlišča, ki je bil določen ob pričetku delovanja objekta, kar bo imelo posledice na predpisani način obratovanja. Če bodo ugotovljeni vplivi negativni, bo podan predlog rešitve te problematike.

2.0 OPREDELITEV PROBLEMATIKE IN CILJI NALOGE

Naloga obravnava vpliv spremembe lokacije gladinskega vrlišča v akumulacijskih bazenih pretočnih hidroelektrarn in s tem povezan vpliv na predpisano obratovanje objekta. Pričakovano je, da bo sprememba lokacije gladinskega vrlišča, ki je posledica morfoloških sprememb v akumulacijskem bazenu in s tem povezanimi spremembami gladinskih stanj, negativno vplivala na način obratovanja, ki je bil zasnovan ob postavitvi objekta.

2.1 Opredelitev problematike in namen magistrskega dela

V splošnem lahko hidrotehnični sistemi obratuje na več različnih načinov, ki se med seboj razlikujejo glede na zahteve, ki jih morajo dosegati. Buyalski in sodelavci (1991) za kanalske sisteme predlagajo uporabo enega izmed sledečih načinov obratovanja: konstantna dolvodna višina, konstantna gorvodna višina, konstantni volumen, kontrolni volumen. Vsak izmed teh načinov obratovanja ima svoje prednosti in slabosti, vsem načinom pa je skupno, da se pri prevajanju vode v kanalu oblikuje gladinsko vrlišče, okrog katerega se pri prevajanju vode suče vodna gladina. Za hidroenergetske sisteme pojav gladinskega vrlišča opisuje Ciuha (2005). Lokacija gladinskega vrlišča tako definira način obratovanja. Če se v akumulacijskem bazenu hidroelektrarne zgodijo morfološke spremembe in se zaradi tega spremeni lokacija gladinskega vrlišča, lahko tudi pričakujemo, da bo potrebno način obratovanja, ki je bil določen za posamezni objekt hidroelektrarne, optimizirati oz. spremeniti.

V Sloveniji je bila opisana problematika do zdaj delno obravnavana samo v projektni dokumentaciji, ki je bila izvedena za potrebe gradnje hidroelektrarn na odseku spodnje Save. Izdelanih je bilo več dokumentov, ki so podali podobne ugotovitve. V nadaljevanju je podano nekaj glavnih dokumentov, ki so najpodrobneje obravnavali predstavljeno problematiko:

- Raziskave problematike v zvezi s transportom (zaostajanjem in izpiranjem) voda in suspenzij na odseku med Zidanim Mostom in hrvaško mejo, med in po izgradnji verige; Vodnogospodarski inštitut Ljubljana; junij 1990;
- Študija varovalnih ukrepov za varovanje Radeč pred visokimi gladinami Save v akumulaciji HE Vrholc; Vodnogospodarski inštitut; 1993;
- HE na spodnji Savi – naloga C: visoko vodni valovi; IBE, d.d.; julij 2008;
- Obratovanje verige hidroelektrarn na spodnji Savi pri visokih vodah Save; IBE; 2013.

Glede predstavljene problematike Ciuha (2013) tako ugotavlja, da se s spremembami v strugi reke Save, kot je vzpostavitev zajeze, in pričetkom zapolnjevanja akumulacijskega bazena s plavinami, v akumulaciji pričnejo procesi staranja bazena. Staranje bazena zaobjema dva glavna procesa, ki nasprotujoče vplivata na potek gladin v bazenu. To sta zmanjšanje hidravlične hrapavosti in dvig dna akumulacijskega bazena.

Ciuha (2005 in 2013) prav tako ugotavlja, da je za spodnjesavsko verigo hidroelektrarn ugotovljeno, da za način obratovanja po pretoku s konstantnim volumnom v posameznem akumulacijskem bazenu obstaja karakteristična točka, v kateri ob denivelaciji zgornje vode zaradi prihajajočega visokovodnega vala ostaja nivo gladine približno konstanten. Gre torej za neke vrste vrlišče gladine v akumulaciji, ki pod to točko upada, nad njo pa z dotokom narašča.

Namen te naloge je z matematičnim modeliranjem preveriti obnašanje lokacije gladinskega vrlišča pri spreminjajočih se morfoloških pogojih v akumulacijah pretočnih hidroelektrarn in pri tem identificirati povezanost vrlišča s predpisanim obratovanjem objekta. S tem bomo ugotovili trende obnašanja akumulacijskega bazena in obratovanja, kar nam bo omogočilo

boljše spremljanje razmer na objektih. S spremljanjem lokacije gladinskega vrlišča in poznavanjem njegovih lastnosti lahko pridobimo informacijo o spremembah gladinskih stanj bazena in s tem zagotovimo, da bo objekt vseskozi deloval v območju varnega obratovanja.

2.2 Hipoteza in cilji naloge

Za posamezno akumulacijo je z zasnovano sistema in rabo oz. varovanjem obvodnega prostora določeno, v kakšnem razponu se lahko giblje potek visokovodnih gladin, da je obratovanje objekta varno oz. da se ne poveča poplavna nevarnost obvodnega prostora. Če grozi, da bodo te meje presežene, so potrebni ustrezni protiukrepi. Da bi se ocenilo, kdaj se razmere v akumulaciji približujejo tej meji, je v nalogi analiziran pristop z uporabo karakteristične točke v vzdolžnem poteku gladin. Zato je bila oblikovana naslednja hipoteza, ki je bila preverjena v tem magistrskem delu:

»S spremljanjem lokacije gladinskega vrlišča v akumulaciji HE je možno sklepati, kdaj bodo spremembe dna akumulacije in s tem povezan vpliv na pretočno sposobnost pri nastopu visoke vode v posameznih pretočnih prerezih takšne, da je treba pričeti z izvedbo ukrepov za ohranjanje ustreznih razmer v akumulaciji.«

Preverba postavljene hipoteze je izvedena z modeliranjem razmer na rečnem odseku (akumulaciji) s hidravličnim matematičnim modelom, ki nam omogoča preverbo različnih vplivov, ki vplivajo na lokacijo gladinskega vrlišča. Hipoteza bo potrjena, če se bo zaradi sedimentacije v akumulaciji (manjšanje volumna akumulacije, sprememba hidravlične hrapavosti) spreminjala lokacija gladinskega vrlišča v bazenu v dovolj zaznavnem obsegu, da zveza med spremembami v akumulaciji in premikov vrlišča omogoča določanje vpliva na ustrezno obratovanje HE.

Cilji naloge so naslednji:

- Podrobneje pojasniti določanje lokacije gladinskega vrlišča in podati teoretične podlage za uporabo tega načina pri spremljanju stanja v akumulaciji;
- Določiti glavne lastnosti vodnega telesa, ki vplivajo na lokacijo gladinskega vrlišča z izračuni za akumulacijo s predpostavljenimi enostavnimi geometrijami;
- Ugotoviti povezanost spremembe lokacije gladinskega vrlišča z obratovanjem akumulacij s predpostavljenimi enostavnimi geometrijami;
- Za praktični primer HE na Savi (HE Boštanj) preveriti in potrditi generalne ugotovitve, ki izhajajo iz obravnave akumulacij z enostavno geometrijo;
- Prikazati uporabnost analiziranega pristopa za presojo varnosti obratovanja na objektu HE Boštanj.

2.3 Metode in struktura dela

Problematika vpliva gladinskega vrlišča na obratovanje pretočnih hidroelektrarn je v nalogi preverjena z modeliranjem z 1D-hidravličnim matematičnim modelom. Najprej so za predpostavljene primer s poenostavljeno geometrijo akumulacijskega bazena analizirani glavni vplivni parametri pri določanju lokacije gladinskega vrlišča in njihovi trendi. Analizirane so lastnosti lokacije vrlišča, ki nam povejo, v kakšnem razponu se lahko giblje lokacija vrlišča brez dodatnega vpliva dejanske geometrije naravnih akumulacijskih prostorov in s poenostavljenimi posledicami sedimentacije. Izvedba izračunov s poenostavljenim hidravličnim modelom nam tako omogoča poljubno spreminjanje glavnih parametrov, ki sta posledica sedimentacije, in sicer spremembe hidravlične hrapavosti in dvig dna akumulacijskega bazena. To nam omogoča, da z izračuni preverimo, kakšen vpliv ima na lokacijo gladinskega vrlišča vsak posamezni parameter, in ali ima posamezni parameter prevladujoči vpliv.

Ugotovitve iz poenostavljene geometrije so nato testirane še za praktični primer. Za hidroelektrarno HE Boštanj, ki je v obratovanju na spodnji Savi, je z 1D-modelom preverjen vpliv morfoloških sprememb dna (sprememba hidravlične hrapavosti, sprememba nivoja dna bazena) na lokacijo gladinskega vrlišča v bazenu. Razpoložljive meritve so razdeljene na učni in na verifikacijski nabor vzdolžnih potekov gladin. Učni del je uporabljen za umerjanje hidravličnega modela. Verifikacija rezultatov je opravljena na podlagi niza opravljenih meritev, ki niso bile uporabljene za umerjanje. Na podlagi izračunov so analizirani dobljeni podatki, iz katerih so pridobljene ugotovitve o vplivu gladinskega vrlišča na obratovanje hidroelektrarne.

Naloga poda relevantne podatke o obravnavani problematiki. Obravnavanje problematike (poglavje 3) se prične s predstavitvijo in pregledom vseh pomembnejših teoretičnih izhodišč, kar nam omogoča celovito razumevanje, reševanje in analiziranje obravnavanega problema. Sledi predstavitev in prikaz vseh uporabljenih podatkov (poglavje 4), ki so bili potrebni za izdelavo hidravličnih matematičnih modelov. V naslednjih poglavjih (poglavji 5 in 6) so podrobno predstavljeni vsi rezultati, ki so bili pridobljeni s hidravličnim modeliranjem in so vplivali na lokacijo gladinskega vrlišča. Analiza rezultatov je podrobno predstavljena v poglavju 7, kjer so poleg predhodne trditve predstavljeni še druge glavne ugotovitve, ki smo jih dobili z izvedbo izračunov. V zaključku (poglavje 8) so povzete glavne ugotovitve naloge in opredelitev o veljavnosti postavljene hipoteze.

3.0 TEORETIČNA IZHODIŠČA

V nadaljevanju so predstavljene osnovne zakonitosti s področja hidravlike, ki so relevantne za področje, obravnavano v tej nalogi, in nam omogočajo celovito razumevanje, reševanje in analiziranje problematike. Podane so osnovne enačbe prostega toka in enačbe hidravlike prelivnih objektov, ki nam omogočajo izvedbo izračunov. Opisana je problematika morfoloških sprememb, hidravlične hrapavosti in obratovanja hidrotehničnih sistemov. Vsi predstavljeni parametri so na neki način upoštevani v enačbah, s katerimi se izvajajo izračuni in predstavljajo pomembne vhodne podatke za gradnjo hidravličnega matematičnega modela, ki je bil izdelan v sklopu te naloge. Na kratko je predstavljena tudi programska oprema, ki nam je služila za pripravo podatkov in izvedbo izračunov.

3.1 Splošne enačbe hidravlike odprtih vodotokov

Reševanje in opisovanje hidravličnih problemov vodotokov (tj. toka s prosto gladino) temelji na elementarnih zakonih o ohranitvi mase, ohranitvi gibalne količine in ohranitvi energije. Za splošno uporabo je možno osnovne enačbe poenostaviti za posamezne primere. Steinman (1999) tako ugotavlja: »Osnovne enačbe gibanja je možno izpeljati na več načinov, v različnih koordinatnih sistemih (kartezični, krivočrtni ortogonalni) in pri tem uporabiti različno zahtevne matematične pristope. Pri obravnavi praktičnih primerov, ko je treba upoštevati še robne in začetne pogoje ter dinamiko pojava, pa je običajno treba poiskati ustrezne poenostavitve, tj. domneve in povprečenja, da se lahko izračuna parametre toka oziroma dobijo posamezne rešitve za dane razmere.«

V nadaljevanju je podan pregled osnovnih enačb in njihovih poenostavljeni oblik, ki se uporabljajo za račun gibanja tekočine (povzeto po Steniman, 1999; Chanson, 1999; Agroskin, 1969).

3.1.1 Zakon o ohranitvi mase

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

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

kjer so:

- ρ gostota tekočine,
- \vec{v} vektor hitrosti,
- S sklenjena ploskev,
- t čas,
- V obravnavani volumen.

Za prostorski tok je oblika diferencialne kontinuitetne enačbe sledeča:

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

kjer pomeni:

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

Zapisano diferencialno kontinuitetno enačbo lahko z različnimi predpostavkami še naprej poenostavimo (za enodimenzijski tok). S poenostavitvami dobimo splošno kontinuitetno enačbo za tokovnico:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\rho}{v} \cdot \left(\frac{\partial Q}{\partial s} + \frac{\partial v}{\partial t} \right) = 0 \quad \text{(Enačba 3)}$$

kjer pomeni:

- ρ gostota tekočine,
 t čas,
 v hitrost,
 Q pretok,
 s smer naravne koordinate.

3.1.2 Zakon o ohranitvi gibalne količine (dinamična enačba)

Osnovno obliko dinamične enačbe zapišemo v obliki:

$$\iiint_V \frac{d\bar{v}}{dt} \cdot \rho \cdot dV = \iiint_V \bar{F} \cdot \rho \cdot dV + \iint_S [\sigma] \cdot d\bar{S} \quad \text{(Enačba 4)}$$

kjer pomeni:

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

Z upoštevanjem lastnosti tekočin in preoblikovanjem posameznih členov zgornje enačbe dobimo tako imenovano Navier-Stokesovo enačbo za realne tekočine, ki jo zapišemo v sledeči obliki:

$$\frac{d\bar{v}}{dt} = \bar{F} + \frac{1}{\rho} \cdot \text{div}[\sigma] = \bar{F} - \frac{1}{\rho} \cdot \text{grad}(p) + \nu \cdot \Delta \bar{v} + \frac{\nu}{3} \cdot \text{grad}(\text{div}(\bar{v})) \quad \text{(Enačba 5)}$$

kjer pomeni:

- ν koeficient kinematične viskoznosti,
 p tlak,
 \bar{F} rezultanta delujočih sil,
 $[\sigma]$ tenzor napetosti,
 \bar{v} vektor hitrosti.

Z upoštevanjem predpostavk o nestisljivosti tekočine ($\text{div}(\bar{v}) = 0$) in idealne tekočine ($\nu = 0$) dobi dinamična enačba za prostorski tok naslednjo obliko:

$$\frac{d\bar{v}}{dt} = \bar{F} - \frac{1}{\rho} \cdot \text{grad}(p) \quad (\text{Enačba 6})$$

3.1.3 Zakon o ohranitvi energije

Zakon o ohranitvi energije pove, da na spremembo celotne energije v sistemu vplivata dovedena (oziroma odvedena) toplota in sistemu odvzeta (oziroma dodana) energija zaradi dela, ki ga sistem opravi na okolico (Steinman, 1999).

Enačba zakona o ohranitvi energije ima sledečo obliko:

$$\frac{dE}{dt} = \frac{dQ}{dt} - \frac{dA}{dt} \quad (\text{Enačba 7})$$

kjer pomeni:

- E celotna energija sistema,
 Q energija dovedene toplote,
 A odvzeta (dodana) energija zaradi opravljenega dela.

Opravljenno delo lahko razčlenimo in tako dobimo obliko enačbe:

$$\frac{dE}{dt} = \frac{dQ}{dt} - \frac{dA_p}{dt} - \frac{dA_{tr}}{dt} - \frac{dA_m}{dt} \quad (\text{Enačba 8})$$

Kjer pomeni:

- A_p ... delo normalnih tlakov,
 A_{tr} ... delo strižnih sil,
 A_m ... mehansko delo.

Za primere enodimenzijskega in stacionarnega toka lahko privzamemo, da so količine parametrov enakomerno razporejene po prerezu vzdolž smeri toka, zato lahko operiramo z njihovimi povprečnimi vrednostmi. Enačba dobi sledečo obliko:

$$\frac{dQ}{dt} - \frac{dA_m}{dt} = \rho \cdot Q \cdot \left(e_{ir} + \frac{p}{\rho} + g \cdot h + \frac{v^2}{2} \right)_{izhodno} - \rho \cdot Q \cdot \left(e_{ir} + \frac{p}{\rho} + g \cdot h + \frac{v^2}{2} \right)_{vhodno} \quad (\text{Enačba 9})$$

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

V primeru hidravlike odprtih vodotokov sta leva člena v predhodni enačbi enaka 0. Razlike med dovedeno oziroma odvzeto energijo zaradi mehanskega dela ni. Energijsko bilanco med dvema prečnima prerezoma lahko zato predstavimo s pomočjo energijske enačbe. S preoblikovanjem členov dobijo sledečo enačbo:

$$\frac{P_1}{\rho \cdot g} + h_1 + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} = \frac{P_2}{\rho \cdot g} + h_2 + \frac{v_2^2}{2 \cdot g} + \Delta E_{ir} \quad (\text{Enačba 10})$$

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

3.1.4 Tok s prosto gladino

Steinman (1999) ugotavlja, da je osnovna lastnost toka s prosto gladino ($v > 0$), da ima vzdolž toka oblikovano prosto gladino in da lahko vsaj na del površine vodnega telesa (gladino) deluje atmosferski tlak okolice p_0 .

Enačbe stalnega enakomernega toka ali normalnega toka predstavljajo podlago za razumevanje in reševanje mnogih problemov v hidravliki odprtih vodotokov. Z njimi si pomagamo tudi pri obravnavi nestalnih in neenakomernih tokov, le da tedaj privzamemo, da veljajo enačbe stalnega enakomernega toka v dovolj majhnem časovnem koraku oz. da veljajo, če dovolj zgostimo izbrano mrežo, s katero opišemo prostor. Torej predvidimo, da v takih primerih upoštevamo stalni enakomerni tok v časovnem intervalu oz. na računskem odseku (Steinman, 1999).

Za praktične primere se povprečna hitrost enakomernega toka izračuna po eni izmed semi – empiričnih enačb. Vse enačbe imajo podobno obliko, in sicer:

$$\bar{u} = C \cdot R^x \cdot I_0^y \quad (\text{Enačba 11})$$

kjer je:

- \bar{u} povprečna hitrost po prerezu;
- R hidravlični radij;
- I_0 vzdolžni padec vodotoka oz. naklon ($I_0 = I_{dna} = I_{gladine} = I_E$);
- C koeficient;
- x,y eksponenta.

Za izračune sta se v praksi uveljavili predvsem dve enačbi, in sicer:

- De Chezyjeva enačba: $\bar{u} = C \cdot \sqrt{R \cdot I_0}$; (Enačba 12)

- Manningova enačba: $\bar{u} = \frac{1}{n_G} \cdot R^{2/3} \cdot \sqrt{I_0}$. (Enačba 13)

S pomočjo zgoraj zapisanih enačb lahko za primer stalnega enakomernega toka izračunamo gladinska stanja vodotoka. Za izračune gladinskih stanj je v praksi možnih več načinov, in

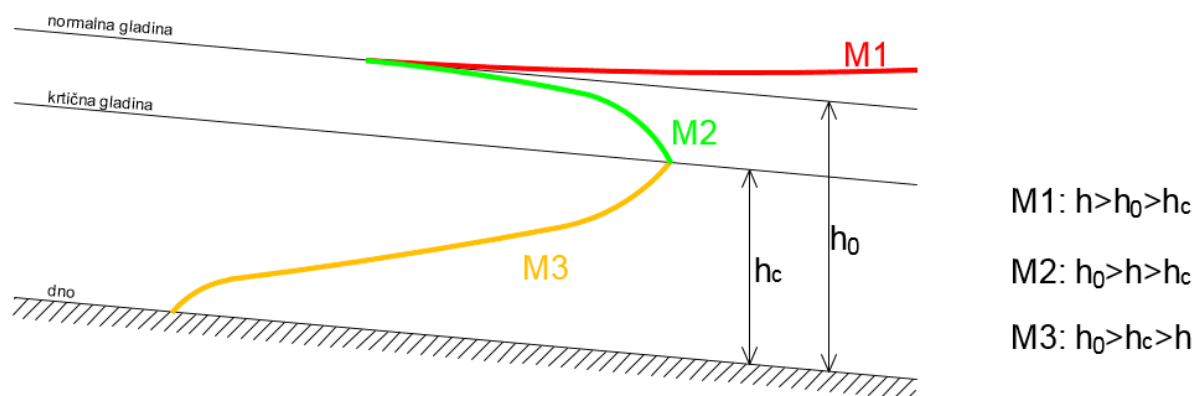
sicer grafični izračun s poskušanjem, uporaba brezdimenzijskih diagramov in uporaba numeričnih metod (programska oprema). V zadnjem času se gladinska stanja predvsem računa s pomočjo specializiranih računalniških programov, ki omogočajo hiter izračun gladinskih stanj v številnih prečnih prerezih za različne režime toka (mirni oz. deroči, stalni oz. nestalni tok).

3.1.5 Potek gladin pri stalnem neenakomernem toku

Za obravnavanje primerov stalnega neenakomernega toka, v katerega sodijo praktično vsi naravni vodotoki, je pomembno, da poznamo klasifikacijo tipov gladin, ki se lahko pojavljajo na obravnavanih območjih vodotokov. V tem dokumentu bomo samo kratko pregledali tipe gladin, ki se lahko pojavijo. Osredotočili se bomo predvsem na vodotoke z zmernim naklonom dna, ki se običajno pojavijo na območjih, kjer so urejene akumulacije in so relevantni za ta dokument.

V primeru stalnega neenakomernega toka se za vodotoke z zmernim naklonom dna vzpostavijo tako imenovane M-gladinske krivulje. Poznavanje krivulj nam omogoča napovedovanje poteka gladine na obravnavanem odseku. V vodotokih z zmernim naklonom dna se tako lahko pojavijo sledeče gladine (Steinman, 1999):

- Gladina M1 – zajezna krivulja: pojavi se pri dotoku k pregradi;
- Gladina M2 – depresijska krivulja: pojavi se v primeru neoviranega preliva, ali če se spremeni padec v vodotoku iz blagega v strmi naklon;
- Gladina M3 – pojavi se pri iztoku izpod zapornice, ali če se spremeni padec v vodotoku iz strmega v blagi naklon.



Slika 1: M-krivulje pri stalnem neenakomernem toku v mirnem režimu toka
Figure 1: Gradually varied flow profiles for steady flow and mild slope - M curves

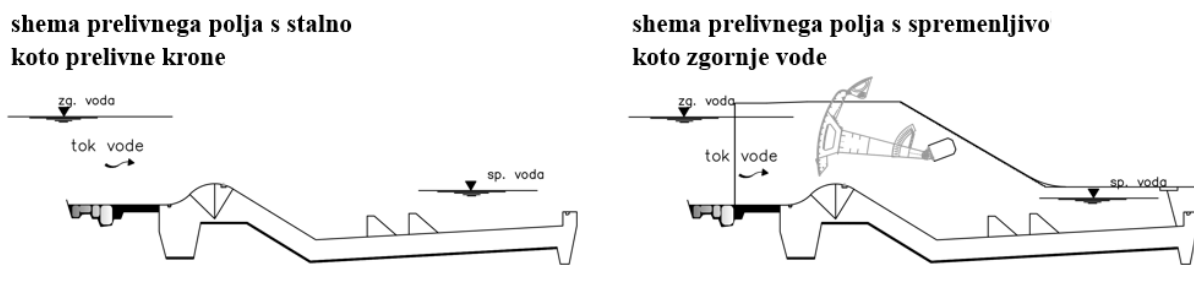
Na odsekih rek, kjer imamo vzpostavljene akumulacije in pregradne objekte, se gladinska stanja oblikujejo skladno s predhodno podanimi gladinami.

3.2 Hidravlika prelivnih objektov

S pregradami oziroma jezovnimi zgradbami ustvarimo lokalno zaježbo pri običajnih (nižjih, srednjih) pretokih. Pri nastopu visokih voda moramo zagotoviti odtok le-teh brez škodljivega (previsokega) dviga gladine na zaježenem gorvodnem odseku, hkrati pa preprečiti ogrožanje stabilnosti (porušitve) same jezovne zgradbe (Steinman, 1999).

V splošnem ločimo prelivne objekte na:

- fiksne jezove s stalno koto krone (brez hidromehanske opreme);
- gibljive jezove s spremenljivo koto zgornje vode (z zapornico, zaklopko ...).



Slika 2: Shema variant prelivnih objektov

Figure 2: Representation of different spillways

Prelivanje vode čez jezovne zgradbe (prelivnega polja) za oba tipa jezovne zgradbe predstavlja hidravlično kompleksen problem, ki ga težko opišemo z enačbami. Za standarde tipe prelivov lahko v različni literaturi najdemo že določene prelivne koeficiente, za nestandardne prelive, pa se za določitev prelivne sposobnosti običajno izdelava fizični model jezovne zgradbe. Fizični modeli se izdelujejo praktično za vsak tip jezovne zgradbe in predstavljajo nujen del načrtovanja jezovnih zgradb. Na podlagi raziskav, opravljenih na fizičnih modelih, dobimo prelivne koeficiente (koeficient preliva – m , vpliv spodnje vode – σ), ki se uporabijo v enačbah za izračun prelivne sposobnosti, pa tudi v numeričnih modelih rečnih odsekov z upoštevanjem zaježitve.

Pri pretočnih hidroelektrarnah je prevladujoč tip jezovne zgradbe kombinacija fiksnega prelivnega praga in gibljivih zapornic, s katerimi se uravnava gladina vode v akumulaciji. Pri običajnem obratovalnem režimu so zapornice v spuščeni legi in v akumulaciji se vzdržuje gladina vode, ki se prilagaja zahtevam glede na obratovanje elektrarne. V primeru visokih pretokov, ko je zaradi varnosti potrebno zagotoviti čim večjo pretočnost pa se zapornice dvignejo in s tem vzpostavi prosto prelivanje preko jezovne zgradbe (ob popolnem odprtju zapornice nimajo več vpliva na tok vode preko jezovne zgradbe). Za potrebe tega dokumenta je relevantna preveritev pretočne sposobnosti samo za primer prostega prelivanja preko jezovne zgradbe. V nadaljevanju so zato podane enačbe samo za ta primer.

3.2.1 Določitev prelivne sposobnosti prostega preliva

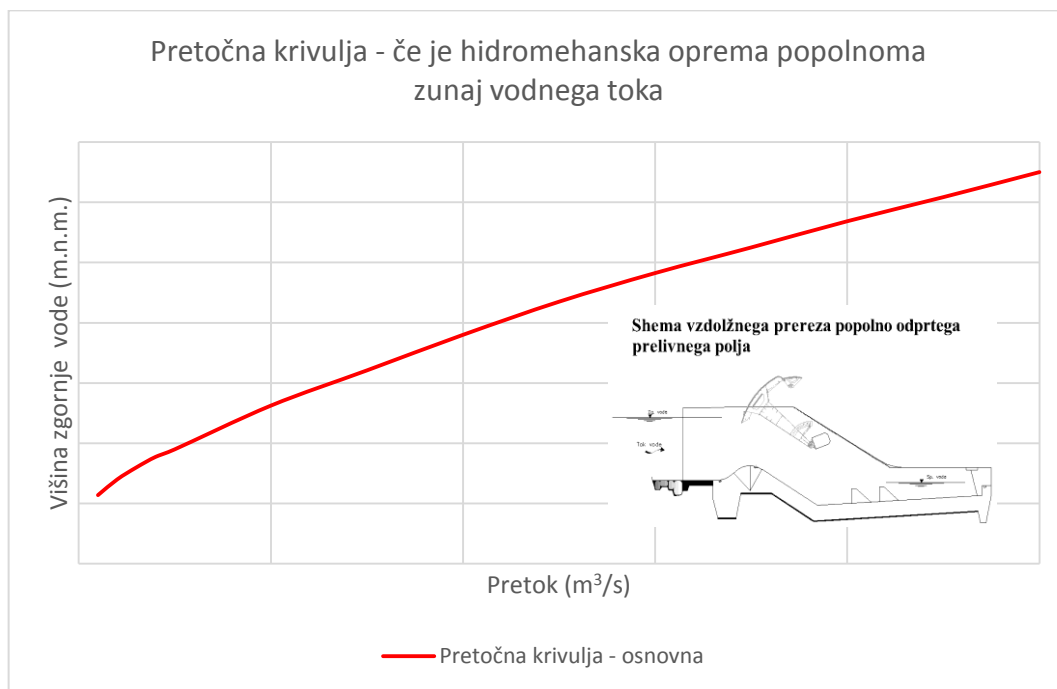
Za izračun prelivne sposobnosti pravokotnega prelivnega polja s stalno koto krone se uporablja splošna enačba za izračun pretoka:

$$Q = m_0 \cdot \sigma \cdot b \cdot \sqrt{2g} \cdot H^{\frac{3}{2}} \quad (\text{Enačba 14})$$

pri čemer je:

- Q pretok;
- m_0 koeficient preliva;
- σ koeficient vpliva spodnje vode;
- b širina pretočnega polja;
- g težnostni pospešek;
- H energijska višina zgornje vode nad temenom prelivnega pragu.

Na podlagi izračunov s predhodno enačbo se za posamezno prelivno polje jezovne zgradbe določi pretočna krivulja. Krivulja pove odvisnost med višino zgornje vode in pretokom čez jezovne zgradbe, če se voda prosto (brez vseh ovir) preliva čez jezovne zgradbe. V enačbi 14 glavni problem predstavljata določitev koeficienta preliva in koeficient vpliva spodnje vode. Če gre za standardne prelive lahko omenjena koeficienta pridobimo iz literature, drugače moramo izdelati fizični model s katerim določimo koeficienta. Primer krivulje prostega preliva je podan v nadaljevanju.



Slika 3: Primer pretočne krivulje z upoštevanjem vpliva spodnje vode

Figure 3: Example of rating curve with impact of tail water level

Pri načrtovanju pretočne krivulje vseh prelivnih polj na jezovni zgradbi je za varno obratovanje potrebno izpolniti dva pogoja za projektiranje. Prelivna polja na jezovni zgradbi rečnih HE (jezovne zgradbe s stalno koto krone) morajo biti načrtovana na način, da gladina zgornje vode ne preseže kote zaježitve oz. ne povzroči superzajezbe pri dveh kritičnih pogojih, in sicer:

- pri pretoku Q_{100} čez prelive in pri enem blokiranem polju;
- pri pretoku Q_{1000} čez prelive pri vseh odprtih poljih.

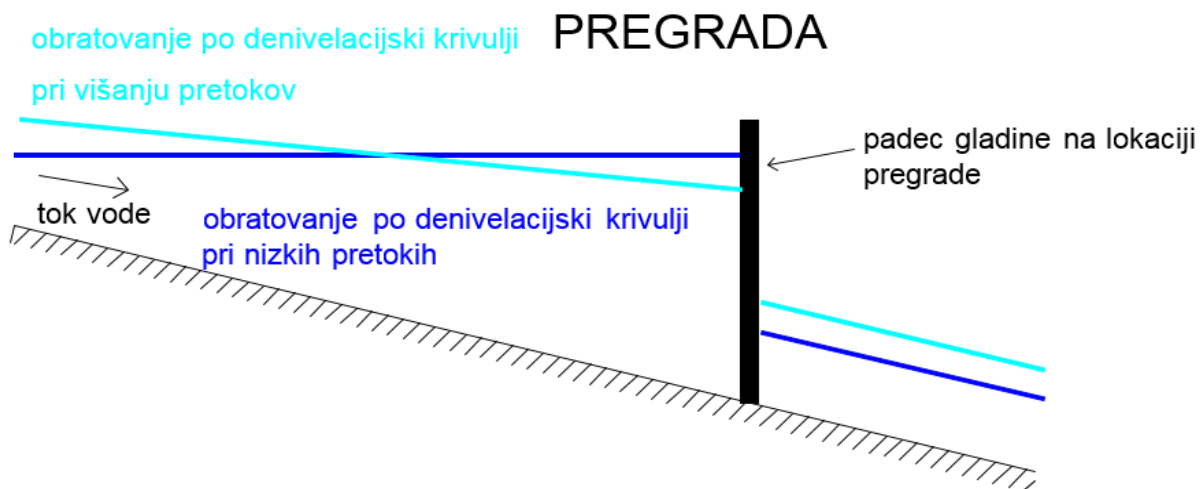
Pogoja predstavljata prakso načrtovanja prelivnih polj, ki se je uveljavila pri načrtovanju pregrad na Savi. Pregrade na Savi so zasnovane tako, da omogočajo prevajanje ekstremnih pretokov preko jezovne zgradbe brez kakršnega koli vpliva na pretočne razmere. V drugačnih primerih so lahko ti pogoji drugače definirani.

3.2.2 Določitev obratovalne krivulje pri gibljivih jezovih - denivelacijska krivulja

Kadar jezovna zgradba vzdržuje različna gladinska stanja v vodotoku gorvodno od pregrade s pomočjo hidromehanske opreme (na pregradi vgrajene zapornice), je potrebno določiti obratovalno krivuljo ali tako imenovano denivelacijsko krivuljo. Z izdelavo in obratovanjem pregrade po denivelacijski krivulji zagotovimo, da so gladinska stanja gorvodno od pregrade

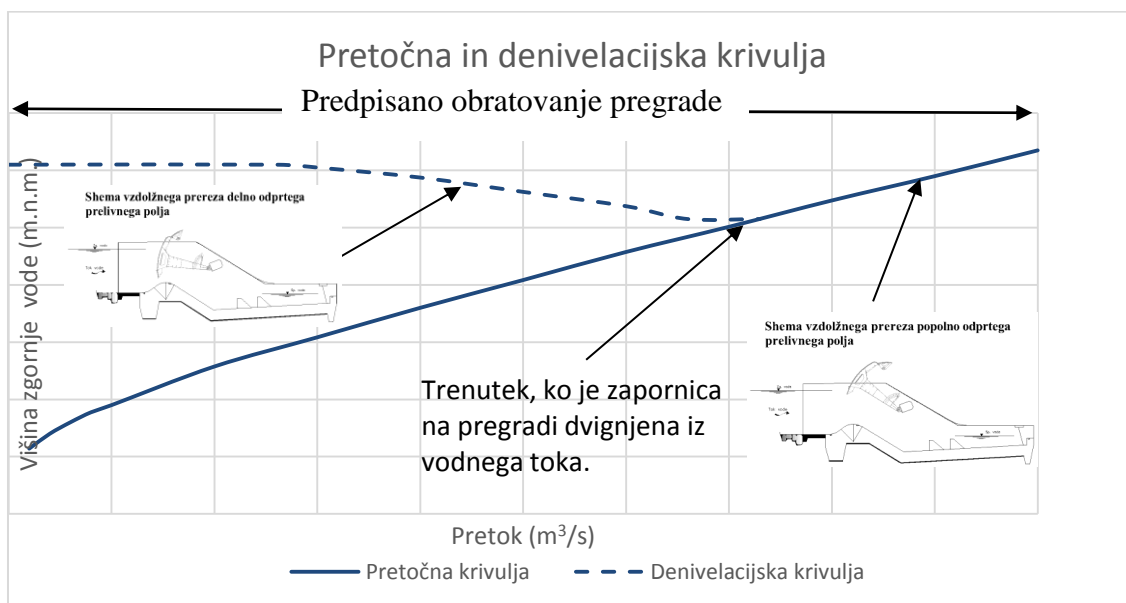
(v akumulacijskem bazenu) skladna z ukrepi pred škodljivim delovanjem voda in obratovanje pregrade na širšo okolico nima škodljivih učinkov.

Določitev denivelacijske krivulje je odvisna od načina obratovanja hidroelektrarne (glej poglavje 3.5) in morebitnih zahtev oz. pogojev v točkah vzdolž akumulacijskega bazena, ki jih je potrebno ščititi pred preplavitvijo (t. i. kritične točke). Za določitev denivelacijske krivulje ne obstajajo posebne enačbe. Krivulja se običajno določi na podlagi serije izračunov s stalnim tokom (Zakrajšek, 2005). Izračuni se običajno izvedejo s hidravličnim matematičnim modelom, kjer se preverja, ali je doseženo ustrezno stanje pri obratovanju v kritičnih točkah ali vzdolž akumulacijskega bazena (zagotavljanje potrebne varnosti pred visokimi vodami). Krivulja ima tudi zanimivo lastnost, saj z naraščanjem pretokov v akumulacijskem bazenu, gladina vode na odseku pred pregrado pada, kar ni intuitivno (slika 4).



Slika 4: Prikaz obnašanja vodne gladine v akumulaciji pri obratovanju skladno z denivelacijsko krivuljo

Figure 4: Representation of water level in reservoir when operating according to operational curve



Slika 5: Primer denivelacijske krivulje z navezavo na pretočno krivuljo

Figure 5: Operational curve with reference to rating curve

Denivelacijska krivulja nam pove, na kateri višini mora biti voda tik pred jezovno zgradbo, da se gorvodno v akumulacijskem bazenu vzpostavijo gladinska stanja, ki so v skladu z načrtovanimi ureditvami in ne povzročajo poplavne škode. Ko z manevriranjem z zapornicami za nižanje gladine na jezovni zgradbi ne moremo več zagotavljati ugodnih gladinskih stanj oz. varnega obratovanja, jezovna zgradba preide v prosto prelivanje (popolno odprtje zapornic). V tej točki se denivelacijska krivulja naveže na krivuljo prostega prelivanja (glej poglavje 3.2.1) med stebri prelivnih polj. Denivelacijska krivulja in krivulje prostega prelivanja sestavljata predpisano obratovanje pregrade.

Tako pretočna kot denivelacijska krivulja sta vedno podani za delovanje celotnega objekta, tj. za vso hidromehansko opremo skupaj. Krivulji nam povesta, kako je potrebno delovati z vsemi prelivnimi objekti, ki sestavljajo pregrado, pri tem pa je omogočeno obratovalcem, da se sami odločijo o manevriranju s posameznimi zapornicami. Enako velja za vse pretočne in denivelacijske krivulje, ki so del tega dokumenta.

3.3 Pojav zviševanja dna in s tem zmanjšanja pretočnega prereza zaradi sedimentacije v akumulacijskih bazenih

V vodotokih se pojavlja transport trdnih delcev (proda v obliki rinjenih plavin ali v vodnem toku suspendiranih plavin) in plavja (plavajočih ali lebdečih predmetov). Tekoča voda ima možnost erodiranja rečnega dna in brežin ter premeščanja in odlaganja plavin (naplavin). Rezultat tega procesa je spreminjanje rečne topografije (morfologije vodotoka), kar se odraža v spreminjanju oblike vzdolžnih in prečnih prerezov v vodotoku. Pojav se imenuje transport sedimentov, ki se v vodnih telesih z majhno hitrostjo pojavlja kot usedanje od vode težjih delcev oz. sedimentacija.

Transport sedimentov v vodotoku je kompleksen proces. Povedano poenostavljeno, pa je transport odvisen od premestitvene zmogljivosti vodotoka in velikosti delcev, ki se premeščajo. V vodotoku se premeščajo tako rinjene, kot lebdeče plavine. Rinjene plavine so od vode težji delci, ki se premeščajo ob dnu struge. Lebdeče plavine pa se premeščajo v obliki suspenzije s tokom vode. Meja med obema oblikama premeščanja ni stalna in je predvsem odvisna od hidravličnih razmer, ki so v danem trenutku v vodotoku. Običajno se rinjene plavine premeščajo le ob nastopu visoke vode, ko ima voda zadostno moč, da se transport rinjenih plavin lahko prične. Tako rinjene, kot del lebdečih plavin se odlaga na mestih, kjer premestitvena zmogljivost vodotoka pade pod referenčno vrednost za posamezni tip plavin.

Na spremembe rečne dinamike, ki je posledica hidravlično-morfoloških sprememb na vodotokih nakazujejo fenomeni, kot: poglobljanje struge, erozija brežin, dviganje dna, pojavitev prodišč ... Kadar vodotoki tečejo čez urbanizirano območje, spremembe struge vodotoka, ki bi zmanjšale pretočnost niso zaželeni. Spremembe vplivajo na območja, ki so namenjena določeni rabi (poslabšanje poplavne varnosti, rušenje brežin) oz. na inženirske objekte, ki so postavljeni na vodotoku (spodkopavanje opornikov, temeljev). Proces hidravlično-morfoloških sprememb se v vodotokih ne da preprečiti. Negativne posledice procesa poskušamo reševati z različnimi ukrepi (stabilizacija rečnega dna). Z ukrepi želimo zagotoviti tako obliko vzdolžnega in prečnega prereza vodotoka, da na posameznih odsekih ne bo prihajalo ne do odvzema in ne do odlaganja odvečnega materiala in s tem zagotoviti ravnovesno stanje, kjer sta prodonosnost in premestitvena zmogljivost enakovredni. Pri tem pa se je potrebno zavedati, da antropogeni posegi v vodotokih spremenijo lastnosti poplavnega vala, ki potuje po vodotoku (Mitkova in sod., 2008).

Posebno problematiko pri transportu sedimentov predstavljajo akumulacijski bazeni hidroelektrarn oz. večji zadrževalniki, v katerih se premestitvene zmogljivost vodnega toka bistveno zmanjšajo. Zaradi specifičnih lastnosti, ki so prisotne na teh inženirskih objektih, ima proces transporta sedimentov svoje zakonitosti in ga lahko obravnavamo kot poseben del širšega pojma transporta sedimentov.

3.3.1 Proces sedimentacije v akumulacijah

Sedimentacija v akumulacijskih bazenih je zelo kompleksen proces vstopanja in transporta plavin, ki izhaja iz vodozbirne površine do obravnavanega prereza vodotoka in se odlaga na območju bazena. Proces sedimentacije se v akumulacijskih bazenih prične, ko je vodotok zajezen, in se konča, ko je bazen v celoti zapolnjen s sedimentom. Je posledica naravnih vzrokov in je lahko vplivan od antropogenih dejavnikov. Procesu ne moremo preprečiti in ohranitev začetnega stanja akumulacijskega bazena ni mogoča brez vlaganja dodatne energije. Ko se proces sedimentacije enkrat prične, se ga ne more upočasniti ali ustaviti, se pa lahko zmanjša njegove posledice s preventivnimi ukrepi, predvsem z zadrževanjem zemljine na vodozbirnem območju (Batuca et al, 2000).

V akumulacijskih bazenih se med procesom sedimentacije usedajo mineralni, organski in umetni delci. Večina sedimentov je mineralnih (98 %), preostalo so organski in umetni delci (2 %). Mineralni sedimenti so kohezivni in nekohezivni. Kohezivne materiale sestavljajo fini in zelo fini delci (glina, melj). Nekohezivne materiale sestavlja mešanica peska, proda in delcev kamenine. Glavni viri sedimentov so porečje vodotoka, hidrografska mreža vodotoka (erozija) in človeške aktivnosti (Batuca et al, 2000).

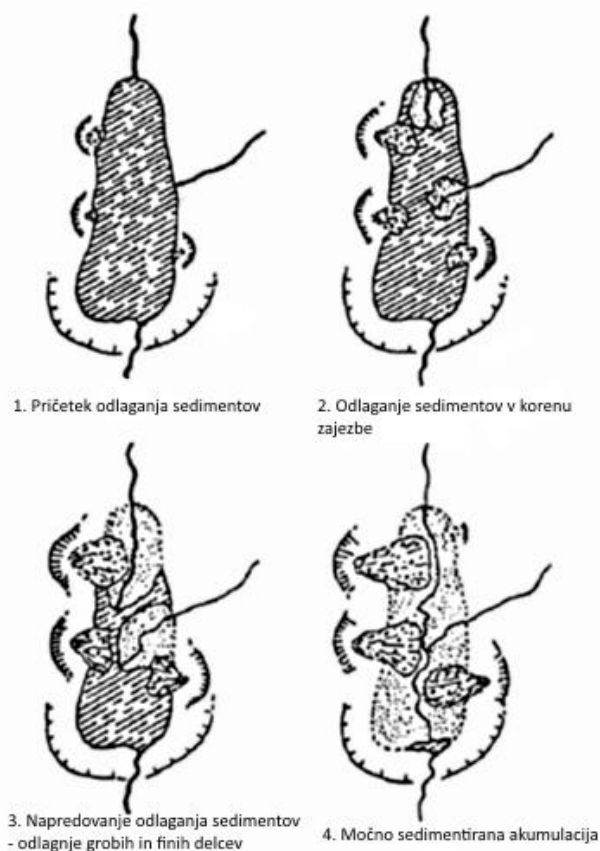
Batuca in Jordan (2000) sta podala več dejavnikov, od katerih je odvisna intenziteta sedimentacije:

- Geografski in klimatski pogoji lokacije rezervoarja in porečja vodotoka (geografska širina in dolžina, padavine, zrak, temperatura vode, veter, valovi);
- Geologija in hidrologija porečja vodotoka (vrsta in struktura zemljine, erozivnost, vegetacija, pretoki);
- Velikost zadrževalnika in konfiguracija porečja (volumen, globina, širina, dolžina, padec dna);
- Funkcija in obratovanje akumulacijskega bazena (poplavna varnost, zadrževanje vode za proizvodnjo električne energije, za zagotavljanje pitne vode);
- Tip jezovne pregrade (površinski preliv, talni izpust);
- Vzdrževalna dela (praznjenje in polnjene akumulacije, izpiranje sedimentov, izkopavanje sedimentov);
- Splošne hidravlične zakonitosti (režim valov, površinski in globinski tokovi, spremembe pretokov);
- Kakovost vode in sedimenta;
- Prisotnost različnih inženirskih objektov v akumulaciji in na porečju vodotoka (mostovi, odvzemi vode, prepreke).

V akumulacijskih bazenih lahko prepoznamo značilne tipe odlaganja plavin. Tipi odlaganja plavin so v različni literaturi (Batuca in Jordan, 2000; Chason, 1999; Senturk, 1994) določeni kot:

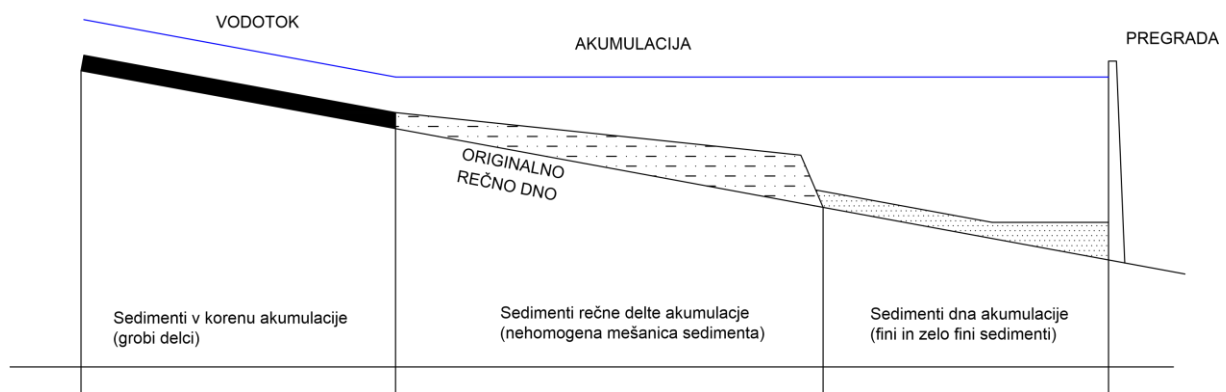
- a) Plavine v korenu akumulacije (backwater deposits)
Plavine se odlagajo v korenu akumulacijskega bazena in predstavljajo območje prehoda iz naravne reke v rečno delto (plavin), ki sega v akumulacijski bazen. Plavine so običajno sestavljeni iz grobega materiala in se v skrajnih primerih lahko odložijo tudi v višini, ki je višja od gladine akumulacijskega bazena.
- b) Plavine rečne delte akumulacije (delta deposits)
Plavine rečne delte se odlagajo na območju akumulacijskega bazena ob glavnem vodotoku in stranskih pritokih in se počasi širijo v notranjost bazena. Sestavljeni so iz nehomogene mešanice plavin, ki vključuje sedimente vseh velikosti, od najfinejših delcev (glina, melj) do večjih delcev (pesek, prod).
- c) Plavine dna akumulacije (bottom – set deposits)
Plavine se odlagajo v sredinskem delu akumulacijskega bazena (večji del bazena) in v bližini pregrade. Sestavljeni so iz finih in zelo finih delcev, ki se odlagajo kot suspenzije (glina, melj). Naklon plavin je neenakomerno razporejen po dnu in lahko postane nič (horizontalno dno).

Med procesom sedimentacije prihaja do različnih faz procesa. Zaradi sprememb vtoka vode in sedimentov, obratovanja rezervoarja, valovanja in razvejanih tokov, pa tudi vnosa plavin iz pritokov se plavine odlagajo v kompleksnem vzorcu v katerem se značilni tipi vzajemno vplivajo in prekrivajo druga druga. Na koncu se tako v akumulaciji oblikuje kompleksen vzorec sedimentov.



Slika 6: Razvoj odlaganja sedimentov v rezervoarjih (vir: Batuca, Jordan, 2000)

Figure 6: Evolution and interaction of various sediment deposits in reservoir (Batuca, Jordan,2000)



Slika 7: Shema odlaganja sedimentov po dnu akumulacijskega bazena

Figure 7: Representation of sediments at the bottom of the reservoir

V nadaljevanju so podane slike akumulacije HE Vrhovo, ki je bila delno izpraznjena septembra 2015. Iz podanih slik je razvidno odlaganje sedimentov po akumulaciji skladno s teoretičnimi izhodišči, ki so podana v tem poglavju.



Slika 8: Odlaganje sedimentov v korenu zajezbe na akumulaciji HE Vrhovo (vir: Tanja Košir, ZRSVN, september 2015)

Figure 8: Disposal of sediment in tail water of HPP Vrhovo (Tanja Košir, ZRSVN, september 2015)



Slika 9: Odlaganje sedimentov v sredini zajezbe na akumulaciji HE Vrhovo (vir: Tanja Košir, ZRSVN, september 2015)

Figure 9: Disposal of sediment in reservoir of HPP Vrhovo (Tanja Košir, ZRSVN, september 2015)



Slika 10: Odlaganje sedimentov pred pregrado HE Vrhovo (vir: Tanja Košir, ZRSVN, september 2015)

Figure 10: Disposal of sediment in front of dam HPP Vrhovo (Tanja Košir, ZRSVN, september 2015)

S predhodnih slik je lepo razviden razvoj sedimentacije v akumulacijskem jezeru. S slike 8 je tako razvidno, da se v korenu zajezbe odlagajo grobi sedimenti (backwater deposits), ki prehajajo – na sliki 9 – v mešanico finih in grobih delcev (delta deposits). V spodnjem delu akumulacije – slika 10 – se po dnu odlagajo samo še fini in zelo fini delci (bottom – set deposits).

3.3.2 Viri plavin in vplivi človeka na sedimentacijo v akumulacijah

Na proces usedanja plavin v akumulacijskih bazenih najbolj vplivajo naravni vzroki, ki se vršijo na porečju vodotoka in v območju bazena. Gre za erozijske procese, ki vplivajo na količino sedimenta, ki ga voda odnaša, in je na voljo za odlaganje v akumulacijskih bazenih. Evidentirani so sledeči naravni vzroki:

- transport sedimenta v hidrografske mreži (predstavlja največji vir materiala za odlaganje);
- erozija brežin in obale akumulacije (doda pomemben delež materiala, ki je na voljo za odlaganje);
- zdrsi brežin ob bazenih (dodatni vir sedimentov v akumulacijah, ki se občasno lahko pojavi);
- redki dogodki (naravne katastrofe – kot so poplave, tektonski premiki, veliki blatni tokovi, požari – lahko dodajo sedimente direktno ali indirektno k zapolnjevanju rezervoarjev).

Na proces sedimentacije v akumulacijskih bazenih lahko tudi močno vplivajo človeške dejavnosti. Delimo jih na tiste, ki pospešujejo proces sedimentacije (intenzivna eksploatacija naravnih virov, povečanja obdelovalne zemlje), in tiste, ki upočasnjujejo proces sedimentacije (pogozdovanje, vzdrževalna dela, utrjevanje brežin, zadrževanje grobega materiala). Največji vpliv na proces sedimentacije, ki ga ima človek, je način obratovanja, s katerim se upravlja akumulacijski bazen. Nepravilno obratovanje, predvsem v času visokovodnih dogodkov, namreč pospešuje proces sedimentacije. Po drugi strani lahko z izpiranjem sedimentov iz akumulacije upočasnimo proces sedimentacije, ki manjša koristno prostornino.

3.3.3 Posledice sedimentacije v akumulacijskih bazenih

Gradnja pregrade na vodotoku predstavlja znaten človeški poseg v rečni sistem in okolje ter ima drastične posledice na naravni tok in proces sedimentacije. Jordan in Batuca (2000) podajata vrsto posledic, ki jih ima sedimentacija na akumulacijske bazene. V nadaljevanju je narejen pregled teh posledic po posameznih delih bazena.

- a) Posledice gorvodno od akumulacijskega bazena:
 - Naraščanje gladin vode glavnega vodotoka in stranskih pritokov nad prejšnja (nezajezena) gladinska stanja, kar ima za posledico večjo poplavno ogroženost;
 - Naraščanje vode povzroča spremembo kakovosti vode in zemlje (slanost, vlažnost);
 - Odlaganje sedimentov vpliva na inženirske objekte;
 - Spremenijo se razmere za plovbo, rekreacijo in turizem.

- b) Posledice v akumulacijskem bazenu in ob pregradi:
 - Zmanjšanje uporabnosti in ekonomske dobe obratovanja zaradi hitre ali prehitre zapolnitve akumulacijskega bazena;
 - Zmanjšanje proizvodnje električne energije ali dobav vode, za katere je bil akumulacijski bazen načrtovan;
 - Zmanjšanje pretočnosti glavnega vodotoka in stranskih pritokov zaradi formiranja prodišč;
 - Zamašitev talnih izpustov, dovodov vode ali poslabšanja obratovanja hidromehanske opreme;
 - Abrazija in poškodovanje tunelov, galerij, utorov zapornic in druge opreme zaradi s sedimenti preobremenjenimi pretoki;
 - Dodatna obtežba na pregrado, ki jo povzroči odlaganje sedimentov ob pregradi;
 - Poslabšanje ribolova, turistične in rekreativne dejavnosti zaradi spremembe kakovosti vode.

- c) Posledice dolvodno od pregrade:
 - Zaradi odlaganja sedimentov se čez pregrade preliva predvsem bistra voda, ki ima dodatno energijo in s tem povzroča izpiranje materiala z dna in brežin reke. Fini delci so erodirani z dna in jih odnaša naprej po vodotoku, kar povzroča, da dno postaja vse bolj grobo. To povzroča poglobljanje struge pod pregrado, ki se lahko pojavlja tudi na veliki oddaljenosti od pregrade;
 - Nižanje gladin površinske in podzemne vode;
 - Preveliko dreniranje poplavnih površin;
 - Odnajanje nosilne podlage pod temelji inženirskih objektov;
 - Nižanje dna dolvodnih pritokov;
 - Poslabšanje možnosti za plovbo.

Naštete posledice je seveda potrebno primerjati s koristmi, zaradi katerih je bila gradnja pregrade prvotno potrebna (npr. oskrba s pitno vodo, proizvodnja električne energije, zaščita pred visokimi vodami ...).

3.4 Določanje hidravlične hrapavosti v odvisnosti od sestave dna vodotoka

V enačbah za določanje pretoka za primere toka s prosto gladino (glej poglavje 3.1) nastopa koeficient hrapavosti. Le-ta zajema tehnično hrapavost (hrapavost površine) in notranje trenje v tekočini. V izračunih toka s prosto gladino običajno uporabljamo Manningov koeficient hrapavosti – n_g . V splošnem lahko trdimo, da je koeficient hrapavosti odvisen od Reynoldsovega števila, hrapavosti na ostenju in oblike prečnega prereza struge. Za naravna korita, za katera običajno računamo pretoke in gladinska stanja, lahko upoštevamo določene poenostavitve, s katerimi si olajšamo določanje n_g .

Steinman (1999) ugotavlja, da v primeru velikih Reynoldsovih števil in velike hrapavosti, kar je običajen primer v naravnih koritih, postane koeficient hrapavosti neodvisen od Reynoldsovega števila in skoraj sorazmeren z $R^{-1/3}$ (R – hidravlični radij). Z upoštevanjem predpostavke, da je koeficient hrapavosti podan kar z $R^{-1/3}$ in s poenostavitvijo splošnih enačb, ugotovimo, da je za take pogoje n_g konstanten. Vrednost n_g je funkcija več spremenljivk, zato moramo pri praktični določitvi n_g zajeti več vplivov, od katerih je koeficient hrapavosti odvisen.

Po Steinmanu (1999) je koeficient hrapavosti n_g odvisen od sledečih vplivov, ki so bolj podrobno podani v nadaljevanju:

- a) Hrapavost ostenja: Predstavlja osnovni parameter za ocenitev vrednosti n_g . Če imamo na obodu kanala fini material, je vrednost n_g nizka in nanjo spremembe globine toka relativno malo vplivajo. Če obod sestavljajo gramoz ali prodniki, je vrednost n_g večja in lahko značilno variira s spreminjanjem globine toka. Veliki prodniki se običajno zbirajo na dnu takih vodotokov, zato dobimo visoko vrednost n_g pri nizkih vodostajih in relativno nizko vrednost pri visokih vodostajih.
- b) Rastlinstvo, zarast: Pri ocenjevanju n_g moramo upoštevati tudi vpliv zarasti, ki zaustavlja tok in s tem vpliva na povečanje koeficienta. V splošnem gre za velik vpliv, ki je odvisen od globine, višine vodnega toka, gostote, porazdelitve rastja in tipa rastja.
- c) Poljubna spremenljivost: Z izrazom je opisano spreminjanje prečnih prerezov, oblike in omočenega oboda vzdolž trase vodotoka. Postopne spremembe teh parametrov v vodotoku imajo skoraj neznamenit vpliv na n_g . Pri nenadnih spremembah parametrov pa je vpliv na vrednosti n_g večji.
- d) Prepreke, ovire: Prisotnost prepek ali ovir v vodotoku (padla drevesa, zasutje struge z materialom ...) bistveno vpliva na izbor n_g . Velikost vpliva je odvisna od števila in velikosti zaprek.
- e) Trasa vodotoka: Koeficient n_g je odvisen tudi od vijugavosti trase vodotoka. Postopni zavoji vodotoka imajo majhen odpor proti toku vode in s tem majhen vpliv na n_g . Ostri zavoji vodotoka znatno povečajo n_g .
- f) Transport plavin in izpodjedanje: Prisotnost teh dveh pojavov povzroča nenehno spreminjanje oblike korita, kar vpliva na n_g .
- g) Vodostaj in pretoki: Vrednost n_g je odvisna tudi od pretoka in vodostaja v vodotoku. S spreminjanjem pretoka in vodostaja se lahko v koritu vodotoka večja ali manjša vpliv nepravilnosti v koritu (skale), ki imajo vpliv na n_g . V splošnem lahko trdimo, da imajo večji pretoki oz. vodostaji manjši vpliv na vrednost n_g kot pa manjši.

Za računsko določitev koeficient n_g je Cowan leta 1956 podal enačbo, ki upošteva različne vplive. Vrednost n_g se tako določi (Arcement J. G. et al, 1989. cit po Cowan, 1956.):

$$n_g = (n_b + n_1 + n_2 + n_3 + n_4)m \quad \text{(Enačba 15)}$$

kjer je:

- n_b osnovna vrednost za raven, enoten, gladek kanal iz naravnih materialov;
- n_1 korekcijski faktor za vplive površinskih nepravilnosti;
- n_2 korekcijski faktor za variacije v obliki in velikosti prečnega prereza;
- n_3 korekcijski faktor za vpliv ovir;
- n_4 korekcijski faktor za vpliv rastja in pogojev pretoka;
- m korekcijski faktor za vpliv meandriranja vodotoka.

Vrednosti faktorjev je možno najti v preglednicah, ki jih je podal Cowan.

Iz enačbe izhaja, da ima na določitev faktorja n_g najpomembnejši vpliv:

- tip in velikost materiala, ki sestavlja posteljico in brežine vodotoka;
- oblika vodotoka.

Na podlagi predhodno podane enačbe lahko računsko določimo faktor n_g za odseke vodotokov, ki nas zanimajo. vzdolž vodotoka se razmere seveda lahko spreminjajo, zato se spreminja tudi faktor n_g . Pri tem je potrebno omeniti, da za določitev posameznih členov, ki nastopajo v predhodni enačbi ne obstaja natančna metodologija, ampak se členi določijo na podlagi osebne presoje pri ogledu terena. Zaradi tega je za točno določitev hidravlične hrapavosti potrebno dobro poznavanje celotne problematike in izkušnje. Kadar so na voljo meritve gladin, lahko koeficiente n_g določimo tudi s postopkom umerjanja.

Na posameznih odsekih vodotoka se lahko zaradi različnih vzrokov (vzpostavitev zaježitve, različni posegi v vodotok ...) prične spreminjati hidravlična hrapavost. Raziskave, ki so jih podali Maren in sod. (2014) potrjujejo, da na vodotokih, v katerih se v strugi odlagajo fini delci, prihaja do zmanjšanja hidravlične hrapavosti glede na začetno stanje. Te ugotovitve lahko prenesemo tudi v spremembe hidravlične hrapavosti, ki potekajo v akumulacijskih bazenih.

Ob gradnji akumulacijskega bazena se zaradi vzpostavitve zaježbe na vodotoku v splošnem hidravlična hrapavost zniža glede na naravno stanje vodotoka. Razlog je v tem, da v vodotoku dobimo večjo globino vode (relativni vpliv hrapavosti ostenja je manjši) in uredimo brežine (posek zarasti), kar vpliva na zmanjšanje hidravlične hrapavosti. Ob vzpostavitvi zaježbe v akumulacijskem bazenu še vedno ostaja enak material, iz katerega je sestavljena posteljica in brežine, kot je bilo v naravnem vodotoku.

Po začetku obratovanja akumulacije se zaradi procesa sedimentacije po akumulacijskem bazenu začnejo odlagati fini delci, ki s časom prekrijejo celotno dno in brežine akumulacije. To potrjujejo tudi ugotovitve Dolinarja in sod. (2008), ki so opravili meritve suspendiranega materiala v akumulacijskem bazenu HE Boštanj. Večino materiala, ki se odlaga v akumulacijah, sestavljajo lebdeče snovi, ki se v bazenu pričnejo usedati zaradi zmanjšanja hitrosti vode. Nov material, ki prekriva prej obstoječe dno in brežine, je finejši in ga sestavljajo manjši delci. V predhodnem poglavju (3.4.1) je bila podana splošna enačba za računsko določitev hidravlične hrapavosti. Iz podane enačbe sledi, da ima pomemben vpliv na faktor n_g tip in velikost materiala, ki sestavlja posteljico in brežine vodotoka. Zaradi tega dejstva lahko trdimo, da s potekom procesa sedimentacije v akumulacijskih bazenih pride do zmanjšanja hidravlične hrapavosti.

3.5 Hidrotehnični sistemi

Z vzpostavitvijo hidrotehničnih sistemov zagotavljamo urejanje, varovanje, gospodarjenje, smotrno rabo in izrabo voda. Hidrotehnične sisteme lahko zato običajno ločimo glede na namen. Pogosto hidrotehnični sistemi služijo več namenom istočasno in ležijo na obsežnih območjih. Za potrebe te naloge se bomo omejili predvsem na sisteme, kjer prevladuje tok s prosto gladino. V tak sistem lahko umestimo predvsem različne kanalske sisteme (sisteme za zagotavljanje oskrbe z vodo, sisteme za odvod odpadne vode, sisteme za namakanje kmetijskih površin) in hidroenergetske sisteme, ki so bolj podrobno obravnavani v tem dokumentu.

Za zagotavljanje optimalnega in varnega delovanja hidrotehničnih sistemov morajo imeti sistemi določene načine obratovanja, da je zagotovljeno doseganje ciljev, v skladu s katerimi delujejo. V strokovni literaturi problematika načinov obratovanja hidrotehničnih sistemov ni dobro obdelana, saj gre pogosto za unikatne sisteme z vrsto naravnih in antropogenih posebnosti. Načini obratovanja so obdelani za različne umetne kanalske sisteme, o obratovanju večjih hidroenergetskih sistemov pa ni bilo možno pridobiti nobene ustrezne literature. Ne glede na to, lahko trdimo, da v splošnem za umetne kanalske sisteme kot za hidroenergetske sisteme, ki so obdelani v tej nalogi, veljajo enake splošne zakonitosti, kar bo kasneje dokazano tudi z izračuni. Trditev potrjujejo tudi ugotovitve Ciuhe (2005) in Zakrajšek (2005), ki sta potrdila, da je v hidroenergetskih sistemih možno t.i. obratovanja s ohranjanjem konstantnega volumna.

3.5.1 Kanalski sistemi

Kanalski sistemi so umetni sistemi, ki jih zgradi človek in so namenjeni prevajanju vode od ene do druge točke. Sistemi so sestavljeni iz objektov (pregrade, preliivi) in kanala (struge vodotoka), po katerih se prevaja voda do končnega uporabnika oz. iztoka. Največkrat gre za sisteme, ki so namenjeni namakanju kmetijskih površin. Uporabljajo se tudi v druge namene, kot so: industrijski dovod vode, odvod padavinske vode, proizvodnja električne energije, plovba, obvodna struga za vodne organizme, rekreacija ... Za zagotavljanje zanesljivega delovanja sistemov ima vsak sistem določen način obratovanja. Obratovanje sistemov se ukvarja s premikom in obnašanjem vode v kanalskem sistemu in je odvisno od splošnih hidravličnih principov (tok s prosto gladino). Primarna funkcija obratovanja kanalskih sistemov je upravljanje s spremembami toka in globin vode vzdolž celotnega sistema.

Obsežno študijo avtomatizacije in obratovanja kanalskih sistemov je izdelala ameriška javna uprava (U.S. Department of Interior). Študija obravnava različne možne načine obratovanja v kanalskih sistemih. Za našo analizo je v omenjeni študiji pomembna naslednje ugotovitev: »Za zagotovitev optimalnega delovanja kanalskih sistemov so bile zasnovane različne metode obratovanja. Metode obratovanja so zasnovane na lokaciji gladinskega vrtilišča, ki predstavlja točko v sistemu, kjer globina vode ostaja konstantna, ko se spreminja naklon vodne gladine (Buyalski et al, 1991).«

3.5.2 Načini obratovanja kanalskih sistemov

Obratovanje kanalskih sistemov lahko razdelimo na:

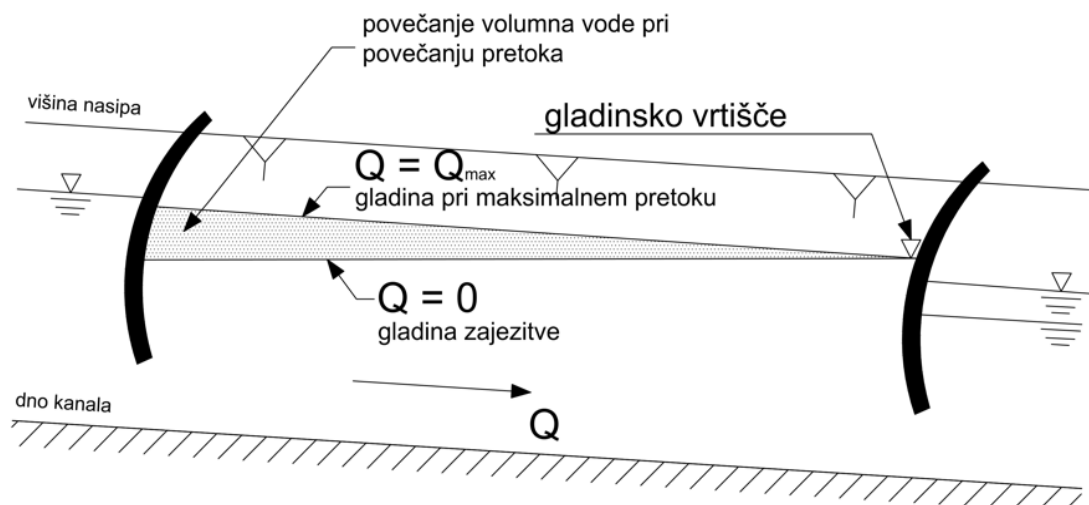
a) Obratovanje s konstantno dolvodno globino

Obratovanje s konstantno dolvodno globino predstavlja najobičajnejši način obratovanja v umetnih kanalskih sistemih. Manevriranje z zapornicami je skladno s tem načinom obratovanja, kadar se gladinsko vrlišče oblikuje dolvodno, tik nad pregradnim objektom. Glavni razlog za pogosto izbiro takega načina obratovanja je, da lahko enostavno oblikujemo kanal za prevajanje maksimalnega pretoka. Razmere stalnega toka v kanalu nikoli ne presežejo normalne globine za načrtovani (projektni) pretok. Zaradi tega so lahko dimenzije kanala in varnostno nadvišanje kanala minimalne.

Pri tem načinu obratovanja so običajno glavni odjemalci vode locirani v spodnjem delu kanala. To omogoča, da so odvzemi vode načrtovani za maksimalno in praktično konstantno globino vode v kanalu, kar preprečuje problematiko v zajetju za dovod vode zaradi spreminjajoče se vodne globine.

Kadar je konstantna gladina vzdrževana na spodnjem delu kanala, bo vodna gladina rotirala okrog gladinskega vrlišča, ko se bo spreminjal pretok vode v kanalu. Kadar se pretok poveča, se gradient vodne gladine spremeni in volumen vode v kanalu se poveča. Nasprotno se z zmanjšanjem pretoka volumen shranjene vode v kanalu zmanjša.

Glede na opisani način spremembe volumnov v sistemu je tak način obratovanja optimalen za kanalske sisteme, v katerih se sprememba pretoka najprej zgodi gorvodno (na začetku sistema). V kanalskem sistemu obstaja naravna tendenca, da se sprememba pretoka, ki se pojavi gorvodno, zgodi sprememba volumna vode, ki je potrebna, da se v dolvodnem delu sistema ohranja konstantna gladina vode. Take sisteme predstavljajo predvsem sistemi, ki odvajajo vodo (sistemi za odvod padavinske ali odpadne vode).



Slika 11: Shema obratovanja s konstantno dolvodno gladino v kanalu (vir: Buyalski et al, 1991)

Figure 11: Method of operation with constant downstream depth (Buyalski et al, 1991)

Obratovanje s konstantno dolvodno globino ne deluje najbolje v primeru, če hočemo iz sistema odvzemati vodo (sistemi za oskrbo z vodo, sistemi za namakanje). Pri odvzemu vode iz kanalskega sistema sprememba pretoka dolvodno povzroči spremembo gladine vode, ki se po sistemu širi v obratno smer. Zmanjšanje oz. povečanje pretoka na iztoku iz sistema povzroča, da se volumen vode večja oz. manjša z dolvodne smeri, kar otežuje vzpostavitev gladinskega vrlišča. Da v sistemih, iz katerih odvezemamo vodo, zagotovimo način obratovanja s konstantno dolvodno globino, moramo zato kompenzirati dovod vode v sistem gorvodno. Sprememba dovoda vode gorvodno mora biti večja kot sprememba pretoka dolvodno, dokler ni doseženo novo konstantno stanje.

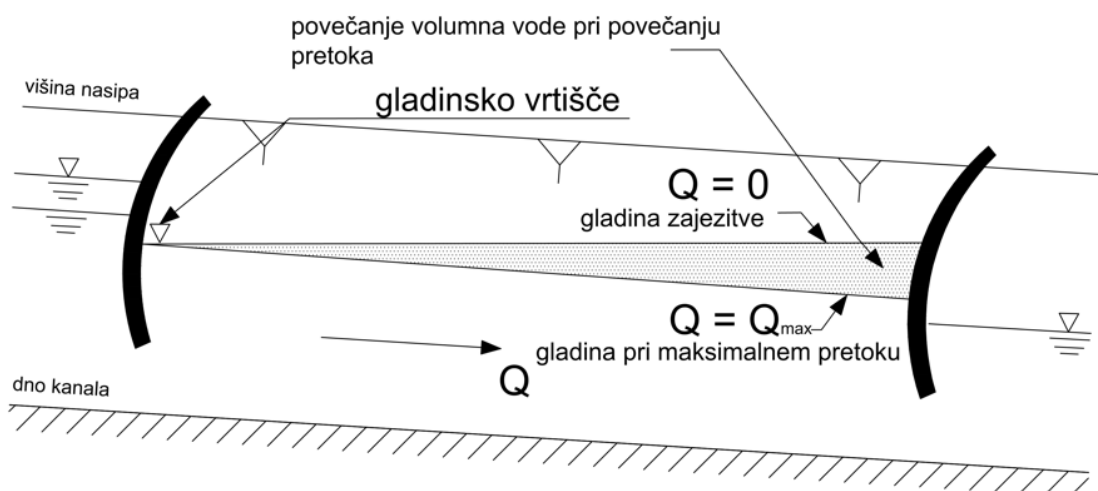
Torej, če kanalski sistem deluje s konstantno dolvodno globino, se spremembe odvzema vode iz sistema težje upravljajo kot spremembe dovoda vode. Kanalski sistem se lažje in hitreje odzove na dovod vode kot na odvzem vode. Spremembe pretoka vode, ki izvirajo gorvodno, so lahko razmeroma velike in ne povzročajo težav. Spremembe pretoka, ki izhajajo dolvodno, pa morajo biti majhne, da se izognemo prevelikim spremembam gladine vode.

b) Obratovanje s konstantno gorvodno globino

Obratovanje s konstantno gorvodno globino je doseženo z oblikovanjem gladinskega vrlišča na gorvodnem delu kanalskega sistema. Za tak način obratovanja je potrebno vzdolž celotnega sistema zagotoviti zadosti velik pretočni profil, ki vzdolž sistema omogoča prevajanje osnovnega pretoka.

Zagotovitev zadosti velikega pretočnega profila (izvedba visokih nasipov) je glavna slabost tega načina obratovanja. Zagotavljanje zadosti velikega pretočnega profila občutno zviša stroške izvedbe takega sistema.

Odjemalci vode so lahko locirani kjerkoli v sistemu, saj bo vodna gladina ves čas vsaj na nivoju kote zaježitve. Če odjemalci zahtevajo konstantno gladino vode, je bolje, če so locirani v gorvodnem delu sistema.



Slika 12: Shema obratovanja s konstantno gorvodno gladino v kanalu (vir: Buyalski et al, 1991)

Figure 12: Method of operation with constant upstream depth (Buyalski e tal, 1991)

Obratovanje s konstantno gorvodno globino je najefektivnejše, kadar imamo dolvodno v sistemu odjemalce vode (sistemi za oskrbo z vodo, sistemi za namakanje). Spremembe pretoka, ki izvirajo dolvodno, povzročijo, da se globina vode spreminja v smeri, ki je potrebna za zagotovitev novega konstantnega stanja.

Zmanjšanje pretoka dolvodno bo povzročilo povečanje gladine vode na tem mestu v sistemu. S tem se bo povečal volumen vode v sistemu, ki bo pospešil oblikovanje gladinskega vrlišča gorvodno v sistemu. Za povečanje pretoka dolvodno velja obratno.

Glavna prednost takega načina obratovanja je odlični odziv na odvzeme vode kjerkoli v sistemu, saj je v kanalskem sistemu zagotovljen kompenzacijski volumen, s katerim se lahko odzivamo na spremembe pretoka. Pri nizkih pretokih je v sistemu shranjen dodatni volumen vode, ki omogoča pokrivanje nenadnih povečanj potrebe vode. Pri visokih pretokih pa je v sistemu na voljo volumen, s katerim lahko kompenziramo nenadna zmanjšanja odvzema voda.

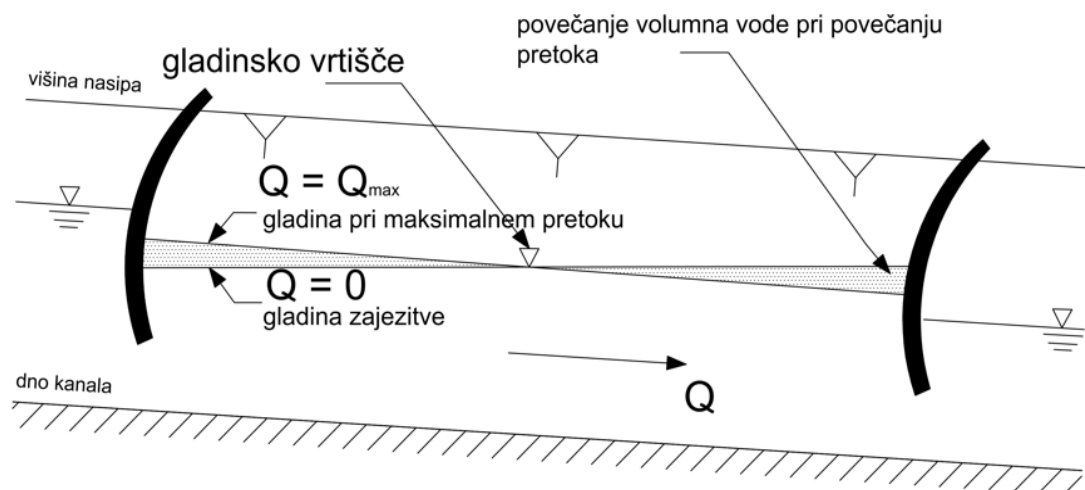
Obratovanje s konstantno gorvodno globino je neprimerno za sisteme, ki dovajajo vodo (sistemi za odvod padavinske ali odpadne vode). Obratovanje v sistemih za dovod vode bi bilo neefektivno, poleg tega pa bi bila zagotovitev zadosti velikega pretočnega profila dodatni neupravičeni strošek.

c) Obratovanje s konstantnim volumnom

Metoda obratovanja s konstantnim volumnom omogoča vzdrževanje relativno konstantne vodne gladine v celotnem sistemu. Voda rotira okrog gladinskega vrlišča, ki se pojavi v posameznem bazenu kanalskega sistema. Lokacija gladinskega vrlišča je odvisna od oblike prečnih prereзов kanalov. Pri enakih pravokotnih prečnih prerekih kanalov se gladinsko vrlišče pojavi približno na sredini sistema. Pri enakem trapeznem prečnem prerezu vzdolž kanalskega sistema se gladinsko vrlišče pomakne bolj gorvodno.

Dodatni volumen, ki je na voljo za shranjevanje ali razlivanje vode, se v sistemu pojavi na obeh straneh gladinskega vrlišča. Za vsako spremembo pretoka je zato sprememba volumna vode enaka in nasprotna. Ko se pretok v posameznem bazenu sistema zmanjša, se volumen vode v gorvodnem delu bazena zmanjša in poveča v dolvodnem delu bazena. Pri povečanju pretoka se zgodi obratno.

Kadar se gladinsko vrlišče pojavi na sredini kanalskega sistema (pravokotni prečni prerez), lahko s pravilnim obratovanjem zagotavljamo ves čas konstantni volumen vode v sistemu. Kadar se gladinsko vrlišče pojavi drugje kot na sredini (trapezni prečni profil, naravni prečni profili), pa pri spremembah pretokov ne moremo več ves čas zagotavljati konstantnosti volumna. Vseeno lahko trdimo, da sistem obratuje po načinu obratovanja s konstantnim volumnom, če so te spremembe volumna majhne in da volumen narašča.



Slika 13: Shema obratovanja s konstantnim volumnom v kanalu (vir: Buyalski et al, 1991)

Figure 13: Method of operation with constant volume (Buyalski e tal, 1991)

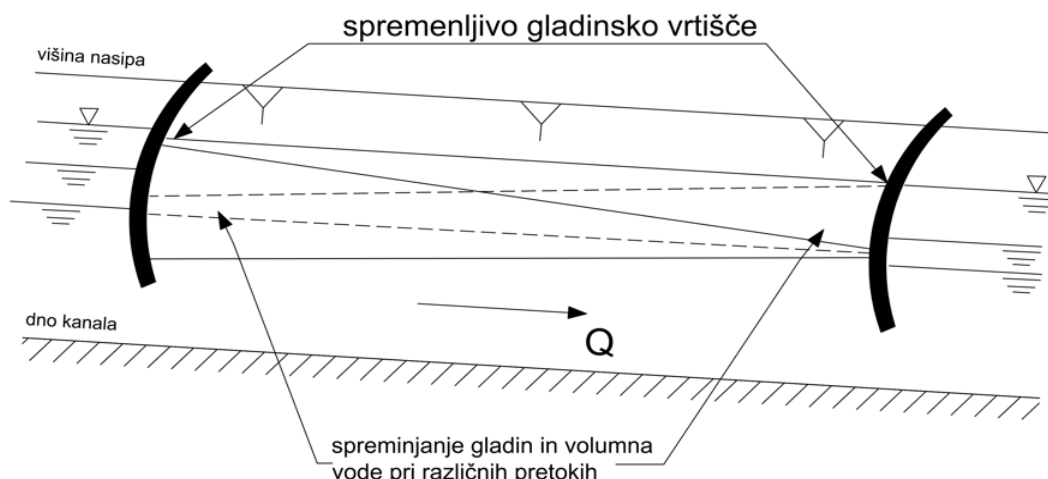
Glavna prednost obratovanja s konstantnim volumnom je zmožnost hitrih sprememb pogojev pretoka v celotnem sistemu, saj se skupni volumen vode v sistemu ne spreminja veliko, se pa spreminja. Pri načinu obratovanja s konstantno dolvodno globino ali konstantno gorvodno globino je potrebno veliko časa, da se pri spremembi pretokov volumen vode poveča ali zmanjša.

Slabost obratovanja s to metodo je v dodatnih stroških, ki nastanejo zaradi zagotovitve zadostnega pretočnega profila dolvodno. Vendar so stroški gradnje kanalskega sistema vseeno manjši kot za obratovanje s konstantno gorvodno globino. Slabost tega načina obratovanja je tudi, da morajo biti jezovni objekti vodeni s centralne lokacije, saj je drugače težko zagotoviti ustrezen način delovanja.

d) Obratovanje s kontroliranim volumnom

S kanalskim sistemom lahko upravljamo tudi na način, da kontroliramo volumen vode v enem ali več posameznih bazenih. Volumen vode in s tem lokacija gladinskega vrlišča se zato lahko spremeni z namenom, da se zadosti trenutnim obratovalnim kriterijem. Pri takem načinu obratovanja je gladinsko vrlišče skorajda nepomembno. Voda v posameznih bazenih se lahko zvišuje ali niža tudi brez oblikovanja gladinskega vrlišča.

Obratovanje s kontroliranim volumnom omogoča največjo fleksibilnost od vseh drugih načinov obratovanja. Kanalski sistem se lahko najlažje prilagaja vsem razmeram (normalnim, nenormalnim ali nujnim razmeram), saj obratovanje ni omejeno s potrebno konstantno gladino, ki bi morala biti dosežena. Vsi drugi načini obratovanja namreč za doseganje zelenega obratovanja potrebujejo potrebno gladino vode na določenem delu sistema, da zadostijo pogojem obratovanja.



Slika 14: Primer obratovanja s kontroliranim volumnom v kanalu (vir: Buyalski et al, 1991)

Figure 14: Method of operation with controlled volume (Buyalski e tal, 1991)

Kanalski sistem, ki obratuje z načinom obratovanja s kontroliranim volumnom, ima možnost, da se odziva na širok razpon različnih pretokov. Nenadne velike spremembe pretokov, ki drugače zahtevajo gradnjo dodatnih zadrževalnikov, se lahko uspešno kontrolirajo znotraj samega sistema. Tak način obratovanja je še posebej primeren, kadar obratovanje kanalskega sistema vključuje tudi uporabo vodnih črpalk za dobavo vode v sistem. Velika možnost shranjevanja vode omogoča, da se sistem napolni z vodo v času nizke cene električne energije in prazni v času visoke cene električne energije.

Slabost obratovanja opisanega načina je, da je nujno potrebno zagotoviti računalniško vodenje sistema. Brez računalniške pomoči bi kompleksnost obratovanja zahtevala prepogoste intervencije osebja, ki sistem uporablja. Obratovanje s kontroliranim volumnom zahteva tudi ustrezno načrtovane pretočne prereze kanalov, ki so običajno večjih dimenziji in tudi cenovno dražji.

3.5.3 Hidroenergetski sistemi

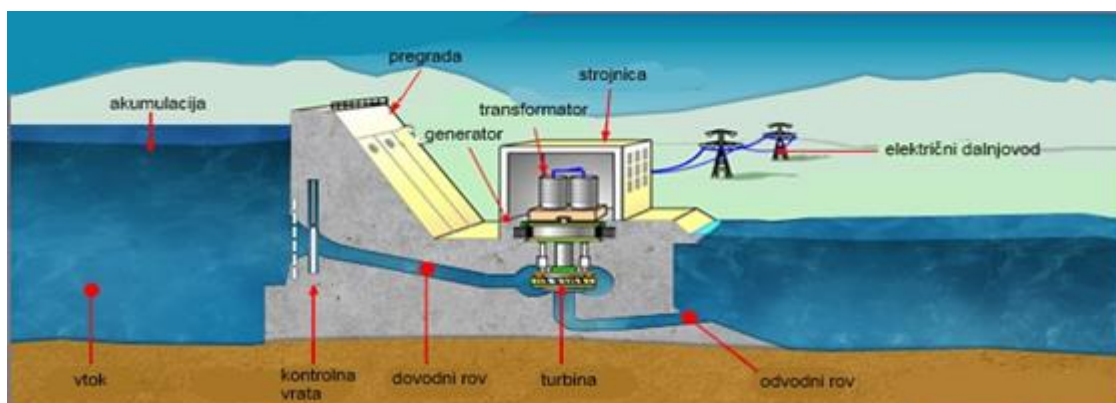
Hidroenergetski sistemi so po svoji definiciji primarno namenjeni proizvodnji električne energije. Vedno jih sestavlja en ali več objektov – hidroelektrarn. Posamezne HE so v splošnem vedno sestavljene iz pregrade, ki ustvari zaježbo vode, in strojnice, kjer se vrši proces proizvodnje električne energije. HE delimo na majhne in velike. Delijo se glede na proizvodnjo električne energije. Tako veljajo za majhne hidroelektrarne vse hidroelektrarne z močjo, manjšo od 10 MW (delitev glede na moč hidroelektrarne se lahko bistveno razlikuje v posameznih državah). Vse ostale hidroelektrarne, ki imajo večjo moč od 10 MW, obravnavamo kot velike hidroelektrarne.

Hidroelektrarne zaradi svojih lastnosti delovanja predstavljajo pomemben del elektroenergetskega sistema, saj z načinom svojega delovanja zagotavljajo stabilnost. Poraba električne energije vseskozi niha, kar pomeni, da je lahko v nekem trenutku električne energije preveč (noč), v določenem trenutku pa premalo (dan). Hidroelektrarne omogočajo zelo hitro, praktično trenutno povečanje proizvodnje električne energije in imajo pri tem

veliko prednost pred ostalimi viri energije. Poleg tega veljajo za edinega zanesljivega proizvajalca čiste zelene energije.

Zgradbe hidroelektrarne so večinoma sestavljene iz sledečih delov:

- pregrade – z zapornicami na pregradi vzpostavimo višinsko razliko med spodnjo in zgornjo vodo, ki jo uporabimo za proizvodnjo električne energije;
- dovodnega rova – omogoča dovod vode do strojnice;
- strojnice – mesto, kjer je nameščena turbina, ki proizvaja električno energijo;
- odvodnega rova – odvaja vodo, ki je bila izrabljena za proizvodnjo električne energije;
- elektro in strojnih inštalacij.



Slika 15: Prikaz osnovnih delov hidroelektrarne (vir: Howstuffworks, 2015)

Figure 15: Representation of basic parts of HPP (Howstuffworks, 2015)

Celoten sistem HE sestavljajo še akumulacija in druge spremljajoče ureditve, objekti in naprave. Zaradi kompleksnosti izvedbe projekta hidroelektrarne ni točno določenih tipov hidroelektrarn. Vsaka hidroelektrarna je optimalno prilagojena okolju, v katerega je postavljena in v katerem obratuje, zato se večkrat pojavljajo kombinacije tipov hidroelektrarn. Nikdar ne moremo kar privzeti, da bo tip in način obratovanja hidroelektrarne, ki deluje dobro v nekem drugem okolju, podobno delovala tudi v nekem novem (drugem) okolju. V nadaljevanju je podan osnovni pregled tipov hidroelektrarn, ki so najbolj značilni (Hočevar in sod., 2015).

3.5.3.1 Akumulacijske hidroelektrarne

Akumulacijske hidroelektrarne so elektrarne, pri katerih s pomočjo pregrade ustvarimo akumulacijsko jezero na vodotoku. S tem povzročimo dvig vodne gladine v akumulacijskem jezeru, kar nam omogoča, da razliko v potencialni energiji med višino vode v akumulacijskem jezeru in višino vode na iztoku izkoristimo za pretvorbo v električno energijo.



Slika 16: Primer akumulacijske HE – Hoover Dam, ZDA (vir: Hoover dam, 2015)

Figure 16: Example of storage HPP – Hoover Dam, USA (Hoover dam, 2015)

bistveno večje, kot na primer največji hidroelektrarne na svetu: HE Itaipu v Braziliji in HE Tri soteske na Kitajskem.

Akumulacijske hidroelektrarne so običajno večnamenski objekti in so namenjene še drugim funkcijam, ne samo za proizvodnjo električne energije. Pregrada, ki se jo zgradi za hidroelektrarno in akumulacijsko jezero, ki pri tem nastane, ima lahko še funkcijo varovanja pred poplavami, odvzema vode za namakanja, preskrbe s pitno vodo, zagotovitev vodnih poti za ladje... Velikokrat se akumulacijska jezera, ki nastanejo zaradi zajezbe na vodotoku uporabljajo tudi za turizem.

Slaba lastnost akumulacijskih hidroelektrarn je, da ima njihova gradnja velik vpliv na okolje. Zaradi potreb hidroelektrarn se poplavijo večja območja, kar trajno spremeni naravno okolje in tok reke. Pri večjih akumulacijah je potrebno preseliti tudi veliko število ljudi na nove lokacije. Trajno so uničene tudi arheološke in naravne znamenitosti.

Z gradnjo pregrade pri akumulacijskih hidroelektrarnah lahko zadržujemo tedenske, mesečne, sezonske ali večletne pretoke vodotoka. Hidroelektrarne delujejo po principu, da zadržujejo vodo, ko je to potrebno oz. je vode veliko, in jo izrabljajo za proizvodnjo električne energije, ko se le-ta potrebuje. Velike hidroelektrarne imajo možnost zadržati tudi večletne pretoke in jih za proizvodnjo električne energije izrabljajo, ko je to potrebno (sušna obdobja).

Zaradi svojega delovanja (zbiranja vode) potrebujejo akumulacijske hidroelektrarne veliko prostora (velika akumulacija), zato se lahko gradijo samo na primernih lokacijah. Velikokrat se take hidroelektrarne gradijo v rečnih kanjonih, kjer je pri gradnji pregrade dosežen optimum med zato porabljenim gradbenim materialom in velikostjo zadrževalnika, ki se ga izkoristi za proizvodnjo električne energije, na primer HE Hoover v ZDA. Lahko pa se akumulacijske hidroelektrarne gradi tudi v širših dolinah, kjer je območje pregraditve



Slika 17: Primer akumulacijske HE – Tri soteske, Kitajska (vir: Three gorges, 2015)

Figure 17: Example of storage HPP – Three Gorges Dam, China (Three gorges, 2015)

3.5.3.2 Pretočne hidroelektrarne

Pretočne hidroelektrarne se gradijo na vodotokih, kjer naravni pretok reke in padec terena to omogočata. Pogoj za gradnjo pretočne hidroelektrarne je, da je vodotok celotno leto zadosti vodnat in zaradi tega ves čas omogoča proizvodnjo električne energije.

Posegi v okolje pri pretočnih hidroelektrarnah so bistveno manjši, kot pri akumulacijskih HE. Pregrada, ki je zgrajena za potrebe pretočnih hidroelektrarn, je običajno bistveno manjših dimenzij in je potrebna samo za zagotovitev zadostnega padca vode do turbine. Pogonski objekt je običajno sestavni del pregrade, lahko se nahaja neposredno pod pregrado (slika 18) ali pa je strojnica tudi v funkciji pregradnega objekta – t.i. blokovna shema (slika 19). Voda

je na pregradi odvzeta z vodotoka in speljana do turbine. Nato se preko odvodnega rova vsa odvzeta voda takoj vrne nazaj v vodotok. Pretočne hidroelektrarne obratujejo glede na naravni pretok, akumulacija je potrebna zgolj za ustvarjanja zadostnega hidravličnega padca. Praviloma se v teh akumulacijskih jezerih ne zadržujejo večji pretoki od 48 urnih pretokov.



Slika 18: Primer pretočne HE – Chief Joseph Dam, ZDA (vir: Chief Joseph Dam, 2015)

Figure 18: Example of run of the river HPP – Chief Joseph Dam, USA (Chief Joseph Dam, 2015)

Pretočne hidroelektrarne delujejo po principu, da večinoma izkoriščajo samo razpoložljivi pretok vode v vodotoku. To pomeni, da ves čas proizvajajo električno energijo in s tem proizvajajo bazno energijo. Več kot je vode v vodotoku, več električne energije pretočna hidroelektrarna proizvede. Če imajo pretočne elektrarne tudi akumulacijsko jezero, lahko z zadrževanjem vode delno pokrivajo tudi dnevne konice. V tem primeru govorimo o pretočno-akumulacijskem tipu hidroelektrarn. S tem je pretočnim hidroelektrarnam omogočeno, da vsaj delno prenesejo proizvodnjo električne energije v obdobje, ko se le-ta potrebuje.



Slika 19: Primer pretočne HE – HE Boštanj, Slovenija (vir: HESS d.o.o.)

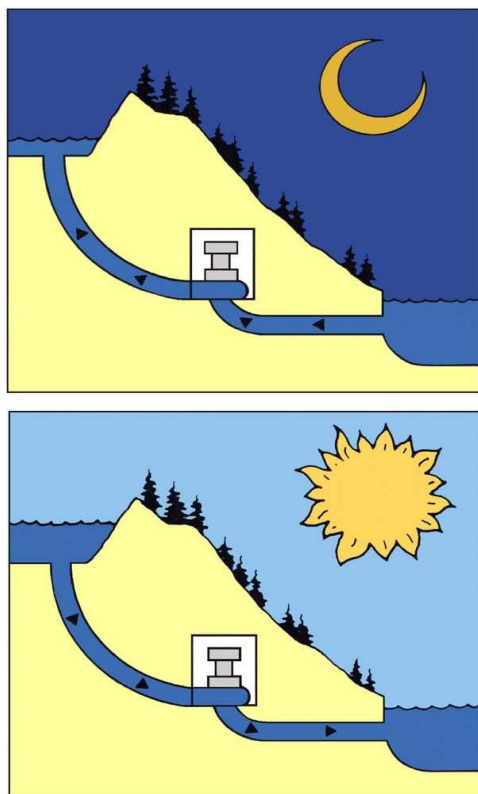
Figure 19: Example of run of the river HPP – HE Boštanj, Slovenia (HESS d.o.o.)

Pretočne HE imajo zaradi svojega načina delovanja manjši vpliv na tok in širše območje vodotoka. Zaradi njihovih potreb se tudi ne poplavlja večja območja. Pretočne HE imajo vseeno negativne vplive na vodne organizme in premeščanje plavin vodotoka. Kljub vsemu se pretočne HE obravnavajo kot okolju prijazni objekti.

3.5.3.3 Črpalne hidroelektrarne

Črpalne hidroelektrarne delujejo po principu shranjevanja odvečne električne energije v času, ko je le-te preveč in koriščenja te energije, ko je to potrebno. V obdobju nizke cene električne energije v črpalnih hidroelektrarnah črpajo vodo v višje ležeče akumulacijsko jezero. V obdobju visoke cene električne energije pa se prej prečrpana voda uporabi za proizvodnjo električne energije.

Črpalne hidroelektrarne za svoje delovanje uporabljajo višinsko razliko med dvema vodnima telesoma. Večja kot je višinska razlika med vodnima telesoma, več energije lahko črpalna hidroelektrarna proizvede. Kadar naravne danosti to omogočajo lahko izkoristimo višinsko razliko med spodnje ležečim jezerom ali vodotokom in višje ležečim jezerom. Če to ni mogoče, so možne tudi črpalne hidroelektrarne z zaprtimi sistemom. To pomeni, da za energetske izrabo izkoristimo naravne danosti z izgradnjo umetnih bazenov in se izkorišča padec med bazenoma. Delovanje črpalne hidroelektrarne je odvisno od sposobnosti akumuliranja vode v gornjem bazenu. Običajno pa črpalna hidroelektrarna obratuje nekaj ur na dan.



Zgoraj
Ponoči, ko je poraba električne energije nizka, se voda prečrpa v višje ležeči akumulacijski bazen.
Spodaj
Kadar je potreba po električni energiji velika, se vodo preko turbine spusti nazaj.

Slika 21: Prikaz delovanja črpalne HE
(vir: Hyhowworks, 2015)

Figure 21: Graphic display of operation of pumped-storage HPP (Hyhowworks, 2015)



Slika 20: Primer črpalne HE (vir: Voith, 2015)

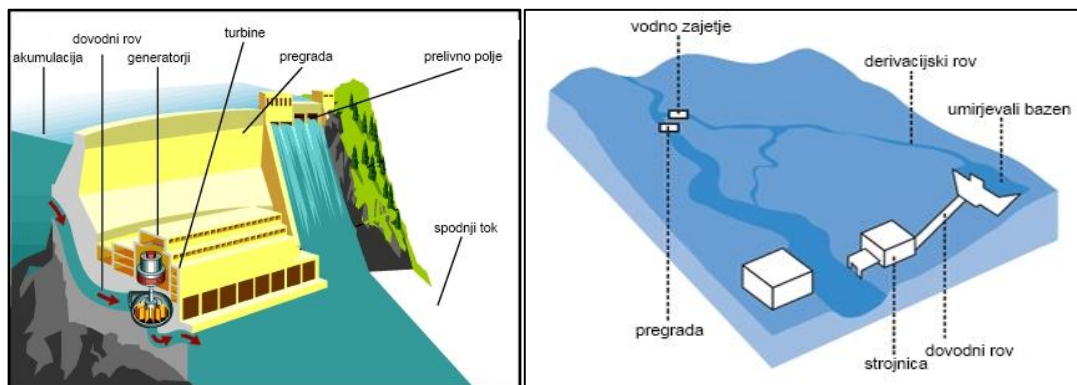
Figure 20: Example of pumped-storage HPP
(Voith, 2015)

Zaradi izgub pri prečrpavanju vode in zaradi izhlapevanja vode iz akumulacijskega bazena imajo črpalne HE negativno energijsko bilanco. To pomeni, da je pri prečrpavanju vode porabljen več energije kot pri proizvodnji. V črpalnih hidroelektrarnah dobimo nazaj od 70 do 85 odstotkov energije, ki se je porabila za prečrpavanje vode.

Kljub negativni energijski bilanci se gradnja črpalnih HE ekonomsko izplača. Cena električne energije v konicah je bistveno večja od cene električne energije, ki se porabi za prečrpavanje vode. To omogoča ekonomsko upravičenost gradnje črpalnih hidroelektrarn. Odločilni faktor za gradnjo črpalnih HE predstavljajo ustrezne geografske razmere in stroški gradnje. Pomembna lastnost črpalnih elektrarn je, da zaradi svojega načina delovanja in hitre odzivnosti pomagajo pokrivati obdobja največje porabe električne energije in omogočajo rezervo električne energije za čas, ko se ta najbolj potrebuje. Črpalne HE predstavljajo danes najcenejšo možnost shranjevanja velikih količin električne energije.

3.5.3.4 Dovod vode do hidroelektrarne

Hidroelektrarne se lahko med seboj bistveno razlikujejo tudi glede na dolžino dovoda vode do turbine. Če je strojnica postavljena pod pregrado ali je njen sestavni del je dovod vode speljan skozi pregrado (tlačni rov ali cevovod). V primerih, ko pa naravne razmere ne omogočajo izvedbo večje akumulacije pa hidravličnega padec ustvarimo z derivacijo vodotoka, ki ima padec manjši kakor je naklon naravne rečne struge. Derivacija vodotoka je lahko izvedena kot tlačni rov (rov, ki je predviden za derivacijo je popolnoma zapolnjen z vodo) oz. kanal s prosto gladino. Izvedba dovodnega rova je odvisna in smiselna samo takrat, kadar to omogočajo naravne danosti in optimizacija delovanja hidroelektrarne.



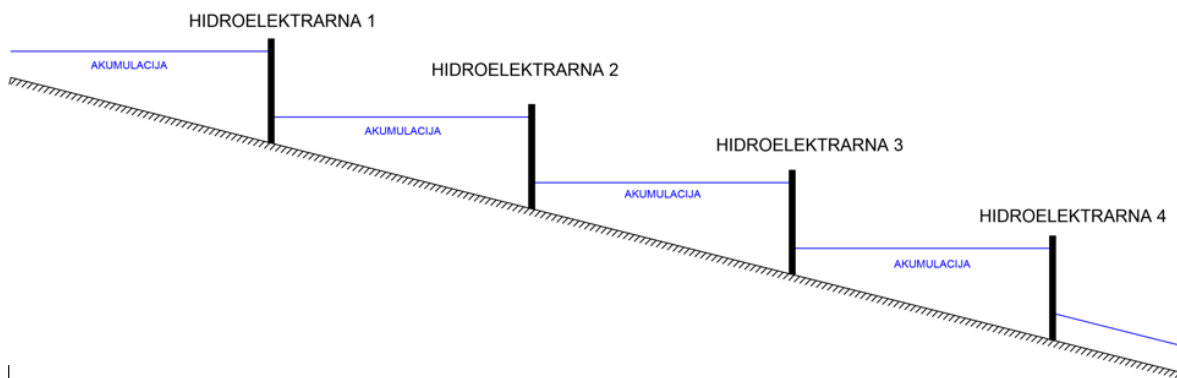
Slika 22: HE z dovodnim rovom ob pregradi in HE z derivacijskim rovom (vir: Ivcleantech, 2015; Csanyigroup, 2015)

Figure 22: Examples of different HPP design (Ivcleantech, 2015; Csanyigroup, 2015)

3.5.3.5 Veriga hidroelektrarn

Kadar imamo na enem vodotoku postavljenih več objektov HE, govorimo o verigi hidroelektrarn. V verigo HE so lahko vključeni vsi tipi HE, ki so bili predstavljeni predhodno, ni pa to nujno. Verigo HE lahko sestavljajo tudi samo recimo pretočne HE. Značilnost verige HE je, da se spodnja struga pod pregrado že nadaljuje v akumulacijo naslednjega objekta, kar nam omogoča izkoriščanje celotnega vodnega padca vodotoka za proizvodnjo električne energije. Večina hidroelektrarn v Sloveniji obratuje po principu pretočnih elektrarn v nizu:

- sklenjena verigo HE na slovenskem delu reke Drave, ki obratuje v taktu z elektrarnami na avstrijskem delu in hrvaškem delu verige;
- HE Mavčiče in HE Medvode na zgornji Savi, ki obratujeta v taktu z dnevno izravnavo pretokov;
- sklenjena veriga HE na spodnji Savi, ki je v gradnji in obratuje zgolj v pretočnem režimu z minimalno izravnavo pretokov;
- veriga HE na Soči, ki obratuje v taktu z dnevno izravnavo pretokov.



Slika 23: Vzdolžni prerez sheme verige HE

Figure 23: Profile plot for series of HPPs



Slika 24: Shema verige HE na spodnji Savi (vir HESS d.o.o.)

Figure 24: Representation of lower Sava HPPs (HESS d.o.o.)

V splošnem je zagotavljanje varnega delovanja veriga HE bolj problematično. Za optimalno delovanje sistema verige morajo biti zato obratovalna pravila usklajena po celotnem sistemu. Odstopanje od teh pravil oz. povzročitev napake delovanja ima lahko resne posledice na poplavno varnost območja, ob katerem je ta veriga zgrajena. Zaradi večjega števila objektov je tudi več možnosti, da se v verigi povzroči napaka v obratovanju (dodajanje pretokov iz akumulacije v času prehajanja visokovodnega vala). Zaradi povezanosti celotnega sistema verige je vsako napako običajno tudi težje odpraviti (majhna možnost zadrževanja volumnov vode v akumulacijskih bazenih).

3.5.4 Način obratovanja hidroenergetskih sistemov

V sklopu tega dokumenta trdimo, da lahko v hidroenergetskih sistemih (še posebej pri pretočni objektih HE) obratujemo na enak način kot v kanalskih sistemih (glej poglavje 3.5.2). Med kanalskimi in hidroenergetskimi sistemi ne obstajajo bistvene razlike (razen v določenih primerih – velike akumulacijske HE). Za oba sistema veljajo splošne hidravlične zakonitosti, ki jih uporabimo za določitev primerne načina obratovanja. Edina razlika med sistemoma je v tem, da naj bi bili kanalski sistemi umetno zgrajeni in namenjeni za enega izmed več možnih namenov (tudi proizvodnjo električne energije), medtem ko naj bi bili hidroenergetski sistemi namenjeni primarno proizvodnji električne energije in so umeščeni v naravni vodotok ali umetno strugo (derivacija). Ker gre pri obratovanja vseh sistemov predvsem za upravljanje s spremembami toka in globin vode vzdolž celotnega območja, ni razloga, da načinov obratovanja kanalskih sistemov ne bi mogli uporabiti pri hidroenergetskih sistemih, če le razmere na območju to dopuščajo. Možnost uporabe načinov obratovanja pretočnih hidroelektrarn (obratovanje s konstantnim volumnov), ki so podobni kot v kanalskih sistemih, predlagata tudi Ciuha (2005 in 2013) in Zakrajšek (2005).

Določitev načina obratovanja za vsak posamezni hidroenergetski objekt je odvisna od zasnove posameznih objektov, naravnih danosti terena, zahtevane poplavne varnosti območja, ekonomske upravičenosti ... Zaradi tega je način obratovanja določen za vsak hidroenergetski sistem posebej. Obratovanje hidroenergetskega objekta ja podano v obratovalnih navodilih. Del obratovalnih navodil sta tudi denivelacijska krivulja ter krivulja prostega preliva, ki sta obe sestavni del načina obratovanja.

Določitev načina obratovanja se razlikuje tudi, kadar imamo na območju posamezen hidroenergetski objekt – hidroelektrarno ali več hidroenergetskih objektov, ki si sledijo in sestavljajo t. i. verigo hidroelektrarn. Kadar je na vodotoku postavljena veriga hidroelektrarn, lahko posamezni objekti povzročajo različne motnje, ki lahko vplivajo na obratovanje drugih objektov v sistemu (Zakrajšek, 2005). Zaradi tega je določitev optimalnega obratovanja verige hidroelektrarn težje doseči kot za primere, ko imamo na vodotoku samo en objekt.

Ker je vseh možnih kombinacij objektov (en objekt, več objektov), zahtev za obratovanje teh objektov, različnih terenov in različnih načinov obratovanja preveč, se bomo v tem dokumentu omejili na primere, ki se pojavljajo v Sloveniji. V Sloveniji vse reke, na katerih so postavljene večje hidroelektrarne, tečejo po urbaniziranih dolinah (predvsem reka Drava in Sava, manj Soča), kjer ima zagotavljanje poplavne varnosti visoko prioriteto. Poleg tega akumulacijski bazeni posameznih hidroelektrarn nimajo možnosti zadrževanja velikih količin vode, da bi lahko pri nastopu poplavnega vala na reki pomembno vplivali na zmanjšanje konice poplavnega vala. Zato je na takih območjih problematično predvsem obratovanje hidroelektrarn pri prehodu visokovodnega vala, ki ne sme povzročiti poslabšanja naravnega stanja (oz. ga lahko izboljša). Obratovanje pri nizkih in srednjih pretokih običajno ni problematično.

V tem dokumentu so torej obravnavni hidroenergetski sistemi in njihovo obratovanje za primere, kjer je na vodotoku postavljenih več pretočnih hidroelektrarn, ki s svojim obratovanjem vplivajo druga na drugo – veriga HE. Poleg tega objekti ležijo na območju, kjer je zagotavljanje poplavne varnosti prioriteto (veliki stroški gradnje protipoplavne zaščite) in akumulacije hidroelektrarn nimajo velikih možnosti zadrževanja ali spreminjanja poplavnih valov. Zato je obratovanje hidroelektrarn predvsem problematično pri visokovodnih dogodkih. Tem zahtevam je tudi prilagojen način obratovanja.

Predlog obratovanja objektov HE po pretoku s konstantnim volumnom je podal Ciuha (2005), ki pravi da je mogoče doseči poenotenje obratovanja stopenj v verigi le s takim načinom obratovanja, pri katerem bo prevajanje visoke vode podrejeno »vodenju« pretoka in konstantnosti volumna vode v bazenu, kot časovno odvisnima spremenljivkama. Pri vzpostavitvi verige dveh ali več hidroelektrarn je torej nujna vzpostavitev obratovanja »po pretoku« in (vsaj) s konstantnim volumnom vode v bazenu v času naraščanja poplavnega vala. Pri tem načinu obratovanja ni pričakovati nepredvidenih povečanj pretoka, ki so reden spremljevalec obratovanja po gladini, saj sunkov pretoka v dolvodni stopnji tudi ni več mogoče zadovoljivo amortizirati, ker so velikosti akumulacijskih bazenov preskromne.

Po Josipoviču in sod. (2009) je z vidika aktivne zaščite obrežnega prostora in potrebe po ohranjanju oblike visokovodnega vala v verigi hidroelektrarn potrebno zagotoviti sledeče izhodiščne pogoje obratovanja (ki izhajajo iz ugotovitev, ki so jih avtorji pridobili z izkušnjami načrtovanja podobnih objektov in poznavanjem problematike):

1. Vodenje visokovodnega vala se vrši po načelu obratovanja po pretoku, ki je omogočeno z načelom vzdrževanja oz. ohranjanja konstantnega volumna vode v bazenu v obdobju prehoda visokovodnega vala. Predvsem to velja za čas, ko pretok narašča.
2. Predpisane omejitve obratovanja ne smejo biti prekoračene.
3. Odtok iz bazena oz. na pregradnem objektu ne sme prekoračiti vsote dotoka in pritokov v bazen.
4. Z načinom obratovanja pretočnih polj mora biti zagotovljena varna evakuacija kakršnega koli realnega visokovodnega vala.
5. Evakuacija visoke vode se pod nobenim pogojem ne podreja morebitnim ukrepom za protipoplavno zaščito obrežnega prostora.

Josipovič in sod. še ugotavljajo, da je od zapisanih izhodišč osnovno in najpomembnejše prvo izhodišče (ad. 1.) iz zgornjega nabora. S tem izhodiščem se v bistvu omogoča doseganje poenotenega načina obratovanja vseh stopenj HE za kakršen koli realen visokovodni val. V nadaljevanju teksta je po predhodno omenjenih avtorjih narejen še povzetek njihovih ugotovitev, ki je delno prirejen za potrebe te naloge, saj menimo, da gre za primerljivo problematiko.

Vsa predhodno postavljena izhodišča je za hidroenergetske sisteme, ki so obravnavani v tem dokumentu, mogoče zagotoviti le z obratovanjem »po pretoku«, ki upošteva načelo ohranjanja konstantnega volumna vode v akumulacijskem bazenu. Izpolnjevanje načela ohranjanja volumna je predvsem pomembno pri naraščanju pretoka, ko se pojavljajo relativno hitre spremembe pretočnih razmer. S pravilnim obratovanjem je potrebno zagotoviti, da je pretok na pregradnem objektu vedno nekaj manjši od vsote dotokov v bazen. Ta zahteva je izpolnjena le z obratovanjem s konstantnim volumnom vode v akumulacijskem bazenu. Torej povedano drugače, osnovni cilj obratovanja stopenj v verigi mora biti tak, da bo čim bolj ohranjena naravna oblika in velikost visokovodnih valov, ob tem pa je potrebno poudariti poenotenje načina obratovanja jezovnih zapornic na vseh hidroelektrarnah v verigi.

Z ohranjanjem konstantnega volumna v akumulacijskih bazenih verige HE je zagotovljeno, da se v času prehoda vala največji pretok vala vzdolž verige ne poveča. V primeru zmanjšanja volumna vode v akumulaciji bi to pomenilo, da se spremeni naravna oblika in velikosti vala, kar povzroči povišanje pretoka in gladine v dolvodnem odseku ter pospešitev vala. S stališča zagotavljanja varnosti obratovanja dolvodnih HE do takega primera nikakor ne sme priti. V

verigi HE je kompenzacija takšne motnje na dolvodnih stopnjah praktično nemogoča, saj velikosti akumulacijskih bazenov tega ne omogočajo.

Iz naštetih razlogov je v času prevajanja visokovodnega vala čez verigo HE najpomembnejše pravilno vodenje vala. To pomeni, da morajo vse stopnje v verigi neodvisno obratovati vsaka od vseh drugih dejavnosti, kot so: izpiranje usedlin, odplavljanje plavja, proizvodnja energije in drugo. Z obratovanjem s konstantnim volumnom tudi ni omogočeno varovanje morebitnih kritičnih točk ali odsekov v bazenu na način, ki zahteva manipulacijo z zapornicami zunaj predpisanega okvira obratovanja. Poselitev in infrastruktura morata biti s pasivnimi ukrepi varstva pred poplavami zaščitena do take mere, da obratovanje z zapornicami v času visoke vode ne vpliva na njihovo varnost. Poleg tega mora biti pri obratovanju prelivnih polj pri naraščanju pretoka nujno deniveliranje gladine zgornje vode pri pregradnem objektu do take mere, da je ob upoštevanju zgrajenosti pasivnih ukrepov zagotovljena načrtovana poplavna varnost območja.

Josipovič in sod. (2009) tako ugotavljajo, da najbolj kritično obratovalno obdobje nastopi v času hitrega naraščanja pretoka visokovodnega vala, ob deniveliranju zgornje vode in ob sočasnem morebitnem dotoku velikih količin plavja. V opisanem obdobju je odpiranje zapornic sorazmerno hitro, hitrost dviganja pa se povečuje z velikostjo pretoka tudi zaradi večje denivelacije zgornje vode. Ugotovljeno je bilo tudi, da je pri večjih dvigih zapornic večje tudi »dušenje« pretoka pod zapornicami, kar je bilo ugotovljeno z modelnimi raziskavami. Ta dejstva zahtevajo intenzivnejše odpiranje zapornic, s tem pa se povečuje tudi možnost napačnega obratovanja. Situacijo je možno obvladati s počasnejšo denivelacijo v območju višjih pretokov, kjer se obratovanje približuje spremembi pretočnega režima iz podlivanja pod segmenti v prosto prelivanje. V spodnjem delu denivelacijske krivulje je namreč neprimerno boljše delno upočasniti deniveliranje zgornje vode in s tem akumulirati del vode.

Za ustrezno vodenje vala visoke vode čez verigo HE je potrebno zagotoviti tudi ustrezno točnost spremenljivk za določanje pretočne sposobnosti prelivnih polj pri vseh možnih načinih obratovanja: prosto prelivanje, podlivanje pod segmentnimi zapornicami, prelivanje čez zaklopke, simetrično in nesimetrično obratovanje zapornic, vpliv višine spodnje vode na dušenje pretoka podlivanja. Pretočne sposobnosti za omenjene načine obratovanje so določene s hidravličnimi modelnimi raziskavami na fizikalnih prostorskih modelih.

Ohranjanje konstantnega volumna v akumulacijskih bazenih verige HE v času prehoda vala je zagotovljeno v območju obratovanja po denivelacijski krivulji. Takrat se v celotnem odseku verige pojavlja približno enak pretok istočasno na vseh stopnjah. Možna je delna zakasnitev vala le in samo ob povečevanju volumna vode v akumulacijskih bazenih v času naraščanja vala. Z obratovanjem po denivelacijski krivulji, ki je zasnovana, tako da se volumen v akumulaciji rahlo povečuje, je omogočeno sočasno izpolniti zahtevi po aktivni protipoplavni zaščiti in ohranitvi oblike naravnega visokovodnega vala. Pri naraščanju dotoka visoke vode v akumulacijo se z ukrepom zniževanja – denivelacijo nivoja zgornje vode v dolvodni polovici bazena volumen vode manjša, v gorvodni polovici pa se za približno enako vrednost povečuje. Zaradi te lastnosti se v akumulacijskem bazenu pojavi gladinsko vrtilišče, kjer je gladina ves čas prehoda poplavnega vala praktično stalna. Lokacija gladinskega vrtilišča je odvisna od obratovalnih zahtev, ki jih je potrebno izpolniti na posamezni hidroelektrarni. To pomeni, da je že v fazi načrtovanja določena lokacija gladinskega vrtilišča in imamo na izbor lokacije pojava gladinskega vrtilišča določen vpliv. Nimamo pa vpliva na morfološke

spremembe, ki se dogajajo v akumulacijskem bazenu in ki v dobi delovanja objekta vplivajo na spremembe lokacije gladinskega vrlišča.

Zavedati se je potrebno, da so akumulacije HE običajno umeščene v naravne vodotoke, kjer se prečni profili vodotoka spreminjajo skladno s terenom in niso enakomerni. Zaradi tega tudi je težko doseči, da bi se gladinsko vrlišče oblikovalo točno na sredini akumulacije (kar predvideva obratovanje kanalskih sistemov – poglavje 3.5.1). Zato tudi če obratujemo po pretoku s konstantnim volumnom, bo ves čas prehoda visokovodnega vala, težko zagotavljati konstantnosti prostornine vode v akumulaciji. Poleg tega pri tem načinu v času pričetka denivelacije povzročimo kratkotrajno povečanje naraščanja pretoka. Situacijo se izboljša, če dopustimo, da volumen v akumulaciji nekoliko narašča s pretokom. To nam omogoča, da lahko vsaj delno kompenziramo manjše morebitne nihaje pretokov in da imamo dosežemo vsaj delen časovni zamik tudi v območju denivelacijskih pretokov. Za objekte HE je zato bolj primerno obratovanje po pretoku s konstantnim volumnom, ki nam omogoča, da v akumulaciji prihaja do majhnega večanja volumna vode in s tem manjšanja pretoka dolvodno od pregrade (Zakrajšek, 2005).

Nikakor pa se ne sme dopustiti, da bi prišlo pri obratovanju do manjšanja volumna vode in s tem večanja pretokov dolvodno od pregrade, saj lahko s tem povzročimo povečanje poplaven ogroženosti dolvodnih območij, kar je nedopustno (Zakrajšek, 2005). Za HE, ki obratujejo po pretoku s konstantnim volumnom, torej velja, da je tak način obratovanja dosežen, če se v akumulaciji volumne ohranja oz. se povečuje (bolj ugodno), če to dopuščajo razmere na terenu.

3.5.5 Problematika gladinskega vrlišča

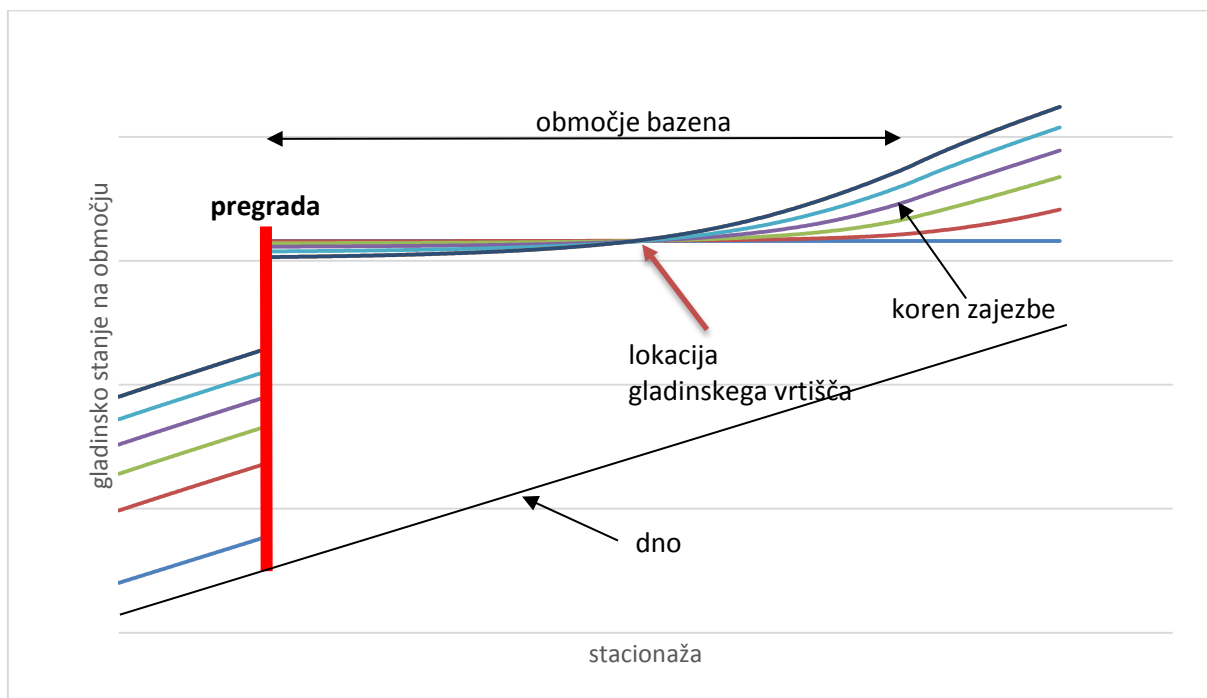
Z vzpostavitev zajeze dobimo na odseku vodotoka osnovno gladinsko stanje, ki ima obliko gladinske M1 krivulje (glej poglavje 3.1.5). Osnovno gladinsko stanje lahko vzdržujemo samo do določeno velikega pretoka, ki je odvisen od razmer na obravnavanem območju in skluden z denivelacijsko krivuljo, ki je podana za posamezni objekt (glej poglavje 3.2.2). Z višanjem pretokov moramo prilagajati nivo zajeze skladno z denivelacijsko krivuljo. Izračuni pokažejo, da se pri prilagajanju višine zajeze na pregradi vzdolž obravnavanega odseka oblikujejo nova gladinska stanja. Za vsa nova gladinska stanja obstaja presečišče gladin, v katerem imajo vse nove gladine enako višino vode kot osnovno gladinsko stanje. Presečišče gladinskih stanj pri vseh pretokih imenujemo »gladinsko vrlišče« (slika 25).

Na tem mestu je potrebno opozoriti, da v literaturi lahko najdemo tudi termin vrlišče sedimentov (Batuca et al, 2000; Petkovšek et al, 2014), ki se tudi pojavlja v akumulacijah. Pri vrlišču sedimentov in gladinskem vrlišču gre za dve različni pojma, ki ju med seboj ne sme mešati. Vrlišče sedimentov nam določa točko v kateri prehajajo plavine rečne delte v plavine dna akumulacije (poglavje 3.3.). Gladinsko vrlišče pa obravnava obnašanje gladinskih stanj v akumulacijskem bazenu.

Buyalski in sod. (1991) ugotavljajo, da so vse metode obratovanja hidrotehničnih sistemov zasnovane na lokaciji gladinskega vrlišča, ki predstavlja točko v sistemu, kjer globina vode ostaja konstantna, ko se spreminja naklon vodne gladine. Da se gladinsko vrlišče pojavlja tudi v hidroenergetskih sistemih pa potrjujeta tako Ciuha (2005, 2013) in Zakrajšek (2005).

Glede na predhodno zapisano trditev lokacija gladinskega vrlišča tako dobro opisuje način obratovanja, po katerem delujejo hidroenergetski sistemi. Sama lokacija gladinskega vrlišča je

pomembna s stališča načrtovanja protipoplavnih ukrepov. Pri prevajanju poplavnega vala skozi akumulacijski bazen bodo dolvodno od lokacije gladinskega vrlišča gladine enake oz. nižje od obratovne gladine objekta. Zaradi tega ta odsek akumulacijskega bazena ni poplavno ogrožen. Situacija se spremeni gorvodno od gladinskega vrlišča. Gladinska stanja v akumulacijskem bazenu so višja od obratovne gladine, zato je poplavna varnost zagotovljena samo z izvedbo protipoplavnih ukrepov (če je to seveda glede na teren potrebno).



Slika 25: Shema oblikovanja gladinskega vrlišča

Figure 25: Representation of water level pivot point

Ob načrtovanju hidroenergetskega objekta je glede na ogroženost območja, protipoplavne ukrepe, velikost akumulacije, okoliški teren ... zasnovano obratovanje objekta. Zasnovano obratovanje pogojuje pojavitev gladinskega vrlišča v akumulacijskem bazenu. Ob določitvi obratovanja in izpolnitvi vseh pogojev, ki tako obratovanje omogočajo, se obenem določi tudi lokacijo gladinskega vrlišča. Ta se v akumulacijskem bazenu ohranja samo v primeru ohranjanja enakih pogojev. V naravnih razmerah to seveda ne drži.

Vsi vodotoki imajo sposobnost prenašanja plavin. Plavine, ki se prenašajo, spreminjajo obliko struge, po kateri teče voda. Ta proces je še bolj intenziven v akumulacijskih bazenih, kjer se zaradi zajezitve hitrosti vode glede na naravno stanje bistveno upočasnijo. Zaradi tega se zmanjša transportna sposobnost vodotoka in se na dno akumulacijskega bazena začnejo usedati tudi majhni lebdeči delci (suspenzije), ki bi jih v naravnih razmerah odplavilo naprej. Posledica usedanja delcev je sprememba morfoloških lastnosti akumulacijskega bazena, ki se odraža v višanju dna in spremembi hidravlične hrapavosti. S tem se spreminjajo tudi parametri, ki vplivajo na pojavitev gladinskega vrlišča.

Ta proces Ciuha (2013) imenuje »staranje akumulacijskega bazena«. Ciuha ugotavlja, da staranje vodnogospodarskega sistema zaobjema dva nasprotujoča si procesa, ki vplivata na potek gladin v bazenu. Višanje dna akumulacijskega bazena privede do višanja gladin, istočasno se gladina bazena niža zaradi nižje hidravlične hrapavosti. Proces prideta do izraza

v različnih časovnih obdobjih. V prvih nekaj letih po vzpostavitvi zaježitve se gladinska stanja zaradi spremembe hidravlične hrapavosti znižajo. Do zvišanja gladin zaradi dvigovanja dna pa pride šele po nekaj desetletjih. Za posamezne pretoke se tako v prvih letih od vzpostavitve akumulacije gladinska stanja najprej znižajo, nato se postopoma začnejo zviševati.

Glede na predhodni zapis pričakujemo, da bodo spremembe v morfologiji akumulacijskega bazena povzročile spremembo gladinskih stanj. To bo povzročilo vpliv na lokacijo gladinskega vrlišča, ki se bo premaknilo. Glede na to, da oblikovanje gladinskega vrlišča določa način obratovanja, se bo to moralo na neki način odražati tudi na samem obratovanju hidroelektrarne. Poznavanje točne lokacije gladinskega vrlišča v vsakem trenutku nam tako omogoča ugotavljanja, ali je zasnovani način obratovanja objekta še veljaven. S tem bomo dobili informacijo, ali je obratovanje posamezne hidroelektrarne še v mejah varnosti, ki so bile določene med načrtovanjem objekta.

3.6 Uporabljeni programska orodja

Objekti hidroelektrarn pomembno vplivajo na območja, na katerih ležijo. Gre za obsežna območja, za katera moramo prepoznati vse vplive, da lahko načrtujemo ustrezne ukrepe, s katerimi se lahko odzovemo na morebitne neželene posledice. Pri določitvi vplivov, ki jih imajo hidroelektrarne na gladinska stanja vodotoka, si pomagamo z izdelavo hidravličnih modelov (matematični 1D-model, matematični 2D-model, povezani matematični 1D/2D-model, fizični model).

Werner (2004) ugotavlja, da so pri izdelavi hidravličnih modelov predvsem pomembni uporabljeni geodetski podatki in da mora biti izbor modela prilagojen podatkom, ki so na voljo. Primerjavo rezultatov med posameznimi modeli je preučil Jowett (2012), ki podaja ugotovitve, da so izračunane globine in hitrosti vode v 1D-hidravličnih modelih lahko enako ali celo bolj natančne kot v 2D modelih.

Za analize rečnih HE, kjer glavni procesi potekajo v vzdolžni smeri, smo se zato odločili za uporabo 1D-hidravličnega modela, saj obravnavani primer in razmere na območju dovoljujejo izbiro takega modela in bodo zato izračuni ustrezne natančnosti. Obravnavano območje oz. izdelani geometrijski modeli so v tej nalogi takšni (ozka soteska brez retenzijskih površin, po katerih bi se voda lahko v večjih količinah razlivala), da je upravičeno domnevati, da se voda praktično giblje le v eni dimenziji, kar dovoljuje uporabo 1D-hidravličnega matematičnega modela.

Za hidravlični matematični model, ki je izdelan v sklopu te naloge, je bil uporabljen računalniški program HEC-Ras verzija 4.1, ki ga razvija Hydrologic Engineering Center (vir: HEC, 2015). Orodje omogoča enodimenzionalno modeliranje s povprečenjem hitrosti po računskem prerezu za stalni in nestalni neenakomerni tok. Program uporablja enodimenzijsko rešitev energijske enačbe, pri tem pa so energijske izgube zajete z geometrijskimi karakteristikami vodotoka, Manningovim koficientom hrapavosti in koficientom razširitve in zožitve. Kadar v geometriji struge pride do nenadnih sprememb vodnega toka (mostne odprtine, prehod v deroči tok, prepusti ...), program v izračunih lahko tudi uporabi gibalno enačbo. Program v svetu in tudi v Sloveniji že dlje časa uporabljajo in je priznано orodje za izdelavo 1D-hidravličnih matematičnih analiz.

Priprava geometrijskih podatkov za uporabo v hidravličnih matematičnih modelih je zamudna in zahteva veliko dela. Za lažje delo so bili geometrijski podatki za prenos v HEC-Ras pripravljani s podpornim programom HEC-GeoRas (razvijalec Hydrologic Engineering Center, vir: HEC, 2015). Gre za modul programa ArcGis (razvijalec ESRI, vir: ESRI, 2015), ki omogoča zelo raznovrstno in kakovostno obdelavo prostorskih podatkov. Tudi ti programski orodji sta že velikokrat opisani v strokovni literaturi, zato jih tu podrobneje ne opisujemo.

3.6.1 Način določitve lokacije gladinskega vrlišča v tem dokumentu

Analizo vplivov sprememb gladinskega vrlišča smo v poglavju 3.5.3 omejili samo na podobne hidroenergetske sisteme, ki se pojavljajo v Sloveniji. Gre za verige hidroelektrarn, ki zaradi več različnih pogojev obratujejo po pretoku s konstantnim volumnom vode.

Iz teoretičnih izhodišč izhaja, da se lokacija gladinskega vrlišča za obratovanje s konstantnim volumnom vode v pravokotnih kanalskih sistemih oblikuje na sredini sistema. V zajezenih akumulacijskih bazenih pa se oblika struge spreminja. Zaradi tega ne moremo pričakovati, da se bo gladinsko vrlišče pojavilo na sredini akumulacije in je potrebno lokacijo gladinskega vrlišča računsko določiti (z izračuni v hidravličnem matematičnem modelu). Ker je oblika akumulacije za vsako hidroelektrarno drugačna, to pomeni, da se v vsaki akumulaciji gladinsko vrlišče pojavlja na drugi lokaciji.

Da bomo omogočili obratovanje po pretoku s konstantnim volumnom vode, je potrebno za pregradne objekte določiti (oz. povzeti) denivelacijsko krivuljo, pri kateri se pri različnih pretokih volumen vode v akumulacijskem bazenu ohranja. Izračun s hidravličnim matematičnim modelom, ki ima za robni pogoj denivelacijsko krivuljo, nam poda lokacijo gladinskega vrlišča. Lokacijo gladinskega vrlišča predstavlja tista točka, kjer gladinska stanja pri različnih pretokih ostajajo praktično na višini stalne zajezbe. Dolvodno od te točke se gladina niža, gorvodno od točke se gladina viša.

V sklopu te naloge je lokacija gladinskega vrlišča določena z izračunom s hidravličnim matematičnim modelom. Opravljeni so izračuni pri različnih pretokih, ki podajo gladinska stanja v akumulacijskem bazenu za posamezni pretok. Na podlagi gladinskih stanj je locirana točka, kjer je pri različnih pretokih ugotovljeno najmanjše odstopanje med gladinskimi stanji glede na gladino stalne zajezbe.

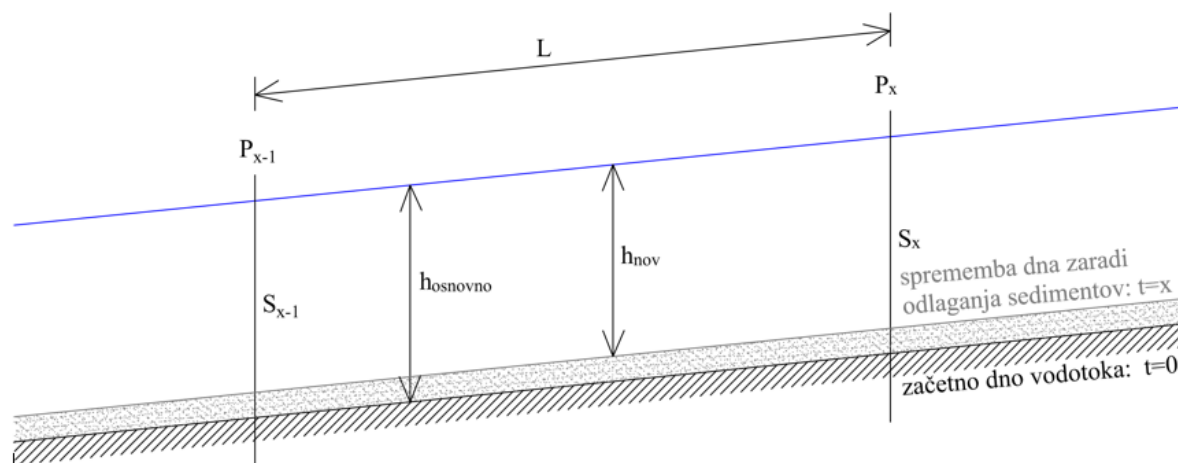
Lokacija gladinskega vrlišča je v tem dokumentu vedno podana v obliki stacionaže po osi vodotoka. Izdelani hidravlični matematični model v sklopu te naloge ima na najbolj dolvodni (robni) točki modela stacionažo 0. Od te točke stacionaža narašča gorvodno glede na oddaljenost od točke 0. Podatek o stacionaži tako predstavlja oddaljenost v metrih od najbolj dolvodne točke hidravličnega matematičnega modela (točke 0). Pri tem je ločljivost razdalje podana na 25 metrov. Gre za razdaljo med prečnimi profili, ki so vneseni v izdelani hidravlični matematični model.

Omeniti je potrebno še, da je lokacija gladinskega vrlišča v tem dokumentu vedno podana z enim podatkom o stacionaži. Glede na izračune, ki so opravljeni v sledečih poglavjih, bi bilo mogoče primerneje, da bi lokacijo gladinskega vrlišča podali z intervalom med dvema stacionažama numeričnih prečnih prerezov. Na lokaciji gladinskega vrlišča so razlike med posameznimi gladinskimi stanji zelo majhne (nekaj centimetrov), zato se lahko z majhno motnjo (npr. zaradi numerične negotovosti) lokacija gladinskega vrlišča po osi vodotoka hitro

pomakne za nekaj 10 metrov. Ocenjujemo, da bi bil za uporabo v praksi primerni interval 50 metrov na vsako stran od določene točke gladinskega vrlišča. Ne glede na to, smo se zaradi lažje primerjave vplivov na lokacijo gladinskega vrlišča pri nadaljnjih izračunih odločili za enoznačno določitev lokacije.

3.6.2 Način določitve volumnov vode v tem dokumentu

V sklopu te naloge so za posamezne izračune določeni volumni vode z izvedbo izračunov pri različnih pretokih oz. različnih hidrogramih. Izračun volumnov vode za vsak obravnavani geometrijski primer je avtomatsko omogočen že z izdelanim hidravličnim modelom v programu HEC-Ras. V modelu je za vsak prečni profil modeliranega vodotoka določena površina, ki je nato pomnožena z razdaljo med posameznimi prečnimi profili. Na tak način vedno dobimo dejanski volumen vode med dvema profiloma. Seštevek vseh volumnov med profili celotnega hidravličnega modela nam poda skupni volumen vode, ki se pojavi med dvema točkama (v akumulaciji).



Slika 26: Prikaz parametrov za določitve volumnov vode

Figure 26: Display of parameters for calculations of water volume

Volumni vode med prerezoma P_{x-1} in P_x se izračuna z enačbo:

$$\Delta V_x = \frac{S_{x-1} + S_x}{2} \cdot L \quad (\text{Enačba 16})$$

Pri tem je:

P_x, P_{x-1} – lokacija izbranih prečnih profilov;

S_x, S_{x-1} – prečni prerez v posameznem prečnem profilu;

L – razdalja med izbranimi prečnimi profiloma.

Volumen vode računamo za različna časovna stanja. Prvo stanje ($t=0$) predstavlja osnovno rečno dno. Takrat je višina do vodne gladine enaka $h_{osnovno}$. Po določenem preteku časa ($t=x$) so se po dnu vodotoka odložili sedimenti, ki so vplivali na gladinska stanja vodotoka. Takrat je višina vodne gladine h_{nov} . Izračun volumna vode je enak tako v osnovnem stanju kot v novem stanju (enačba 16). Razlika je samo to, da se za obe stanji spreminja prečni prerez posameznega profila, ki je v osnovnem stanju odvisen od $h_{osnovno}$ in novem stanju od h_{nov} .

Opisani način določitve volumna je primeren za ravne odseke. Na vijugastih odsekih pa je potrebno pravilno določiti prečne profile (zmanjšati razdaljo med profili), saj lahko drugače pride do napake izračuna volumna.

V sklopu te naloge smo analizirali volumne vode, ko se spreminja dno akumulacije (dno v posameznih prečnih profilih se dvigne). Zaradi načina izračuna volumna vode v programu HEC-Ras kakršno koli odštevanje volumna sedimentov, ki so se odložili po dnu in s tem vplivali na dvig dna, ni potrebno. Da smo dobili primerljiv volumen vode za vsak obravnavani primer, smo določili volumen vode samo med prečnimi profili od pregrade do korena zajezebe. Za tako območje smo se odločili zato, ker nas to območje zanima, poleg tega pa se akumulacijski bazenih HE v verigi nadaljujejo iz ene akumulacije v drugo.

4.0 PODATKOVNI VIRI

V pričujočem dokumentu je bilo izvedeno matematično modeliranje, s katerim so bile preverjene lastnosti gladinskega vrlišča. V izračunih je bil upoštevan vpliv sprememb morfologije akumulacijskega bazena in njihov vpliv na lokacijo gladinskega vrlišča in s tem na obratovanje hidroelektrarn. Izračuni so bili izvedeni za dva različna primera. Najprej so bile lastnosti vrlišča preverjene za primer z enostavno geometrijo akumulacijskega bazena in nato še za primer HE Boštanj.

4.1 Primer s poenostavljeno geometrijo akumulacije HE

4.1.1 Poenostavljena geometrija v hidravličnem modelu akumulacije HE

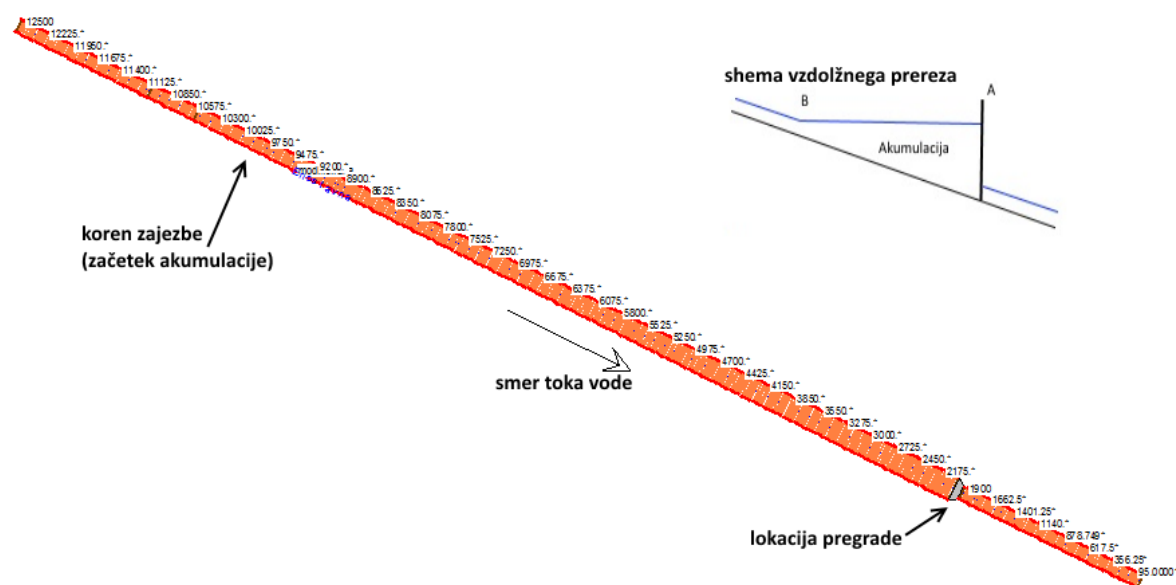
Določitev gladinskega vrlišča in parametri, ki vplivajo na lastnosti vrlišča, so bili najprej preverjeni z enostavnim geometrijskim modelom. V naravnem stanju je geometrija akumulacijskih bazenov podvržena kompleksnim procesom sedimentacije, ki glede na trenutne razmere pretoka odvzema in odlaga plavine vzdolž celotnega bazena. Spremembe dna akumulacije je zato težko napovedovati, saj gre za dolgotrajen proces, katerega spremembe se lahko opazijo šele po več letih.

Pri prehodu visoke vode skozi akumulacijo se voda razliva po poplavnih površinah, ki ležijo vzdolž vodotoka. Obsežne retenzijske površine ob akumulacijskih bazenih lahko s svojo sposobnostjo zadrževanja vode in oblikovanjem vzporednih tokov po retenziji pomembno vplivajo na gladinska stanja. Razlivanje vode po retenzijskih površinah povzroča nižja gladinska stanja na obravnavanem območju vodotoka, kar lahko vpliva na lokacijo gladinskega vrlišča.

Pojavitev gladinskega vrlišča pri prevajanju visokovodnih valov in lastnosti vrlišča so bile zato najprej preverjene na modelu z enostavno geometrijo, kjer sta bili zgoraj opisani problematiki poenostavljeni. Zasnovan je bil enostavni geometrijski prerez vodotoka, pri katerem so visoke vode ostale znotraj osnovne struge. Problematika spremembe dna akumulacijskega bazena je bila poenostavljena tako, da se je privzel dvig dna po celotni dolžini akumulacijskega bazena. Dimenzije enostavnih geometrijskih prečnih profilov so bile zasnovane na način, da se po strugi lahko prevajajo visoki pretoki (čez 4000 m³/s) in se voda ne razliva zunaj zasnovane struge.

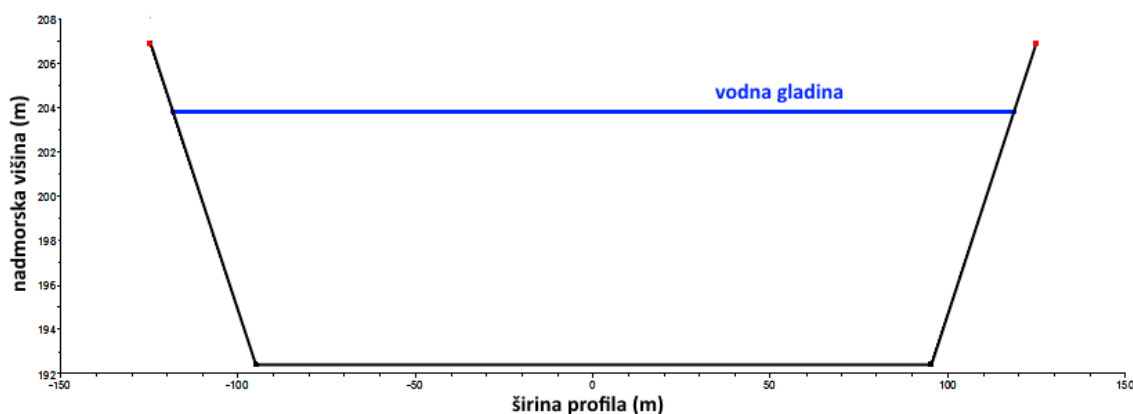
Prvotno je bil za enostavno geometrijo izbran trapezni prečni profil s širino struge v dnu 80 metrov, naklonom brežin 1:2 in višino profila cca 10 metrov. Padec struge reke je bil izbran z naklonom 1 ‰ in dolžina akumulacijskega bazena cca 8 kilometrov. Prvi izračuni so pokazali, da se je v tako izdelanem modelu oblikovalo gladinsko vrlišče, vendar je nadaljnja analiza dobljenih rezultatov pokazala, da na tak način zasnovana geometrija za nadaljnje izračune ne ustreza. Do tega problema pride zaradi izbrane trapezne oblike prečnega profila in dolžine obravnavanega odseka. Izbrana geometrija sistema enostavno nima zadosti velike prostornine, da bi lahko zagotovili konstantni volumne v sistemu. Višanje gladin vode v korenu zajezbe za tako vrednost povečuje volumen vode v sistemu, ki jo z nižanjem gladine na lokacije pregrade, za izbrano geometrijo, enostavno ne moremo doseči. Problem bi lahko rešili na način, da bi geometrijo prečnih profilov ustrezno prilagodili (povišanje prečnih profilov), vendar bi nova geometrija preveč odstopala od oblik akumulaciji, ki jih najdemo v Sloveniji.

Zaradi tega je bil model z enostavno geometrijo zasnovan po zgledu akumulacijskih bazenov spodnjesavskih HE. Izvedena je bila analiza akumulacijskih bazenov HE Boštanj, HE Arto Blanca in HE Krško. Na podlagi analize podatkov je bila zasnovana poenostavljena geometrija hidravličnega modela. Dolžina bazena je bila izbrana kot 8,5 kilometra s padcem 0,95 ‰ in izbranimi enostavnima prečnima profiloma s sledečimi dimenzijami. Prvi na začetku akumulacijskega bazena z dimenzijami 80 metrov v dnu struge in naklonom brežin 1:2. Drugi prečni profil pa na koncu akumulacijskega bazena tik pred objektom pregrade z dimenzijami okoli 200 metrov v dnu struge in naklonom brežin 1:2. Vmesni prečni profili so bili linearno interpolirani med določenima profiloma na vsakih 25 metrov. Razlog za gosto interpolacijo prečnih profilov je v tem, da se je med izračuni lažje spremljalo spremembe lokacije gladinskega vrlišča.



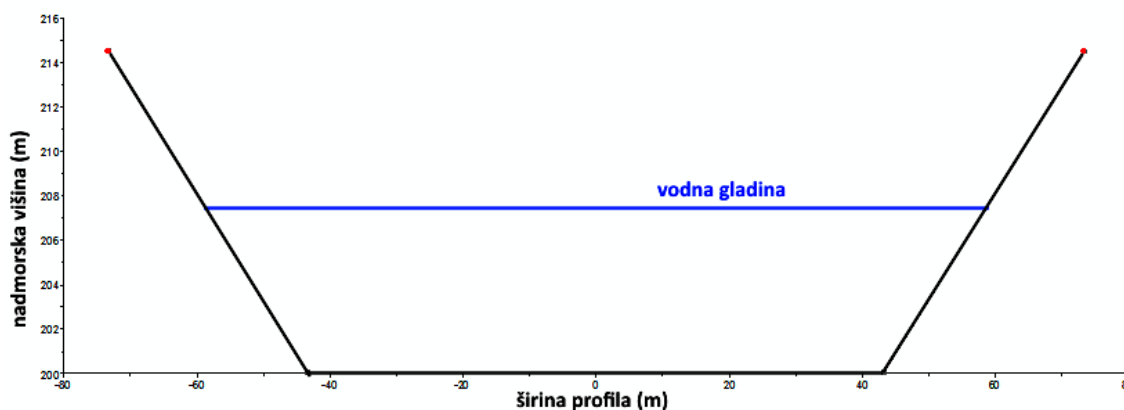
Slika 27: Situacija hidravličnega matematičnega modela z enostavno geometrijo

Figure 27: Map of hydraulic model with simplified geometry



Slika 28: Izbrani prečni profil na koncu pri pregradi (Opomba: merili nista enaki)

Figure 28: Cross section plot in front of dam



Slika 29: Izbrani prečni profil na začetku bazena (Opomba: merili nista enaki)

Figure 29: Cross section plot in tail water

V model je bil vnesen tudi pregradni objekt s podobno geometrijo pregrad, ki so zgrajene na odseku spodnje Save. Pregradni profil je bil sestavljen iz petih prelivnih polj svetle širine med stebri 15 metrov in višine okoli 13 metrov. Območje modeliranja enostavnega geometrijskega modela je bilo podaljšano še 2 kilometra dolvodno od pregrade in 2 kilometra gorvodno od zaključka korena akumulacijskega bazena zaradi zagotovitve ustreznih hidravličnih robnih pogojev in s tem boljše stabilnosti izračuna. Drugih objektov (mostovi, prepusti ...) v model ni bilo vnesenih, saj bi to vnašalo dodatne vplive na lokacijo vrlišča. Prikaz situacije, karakterističnih profilov in vzdolžnega profila je podan v Prilogi 1.

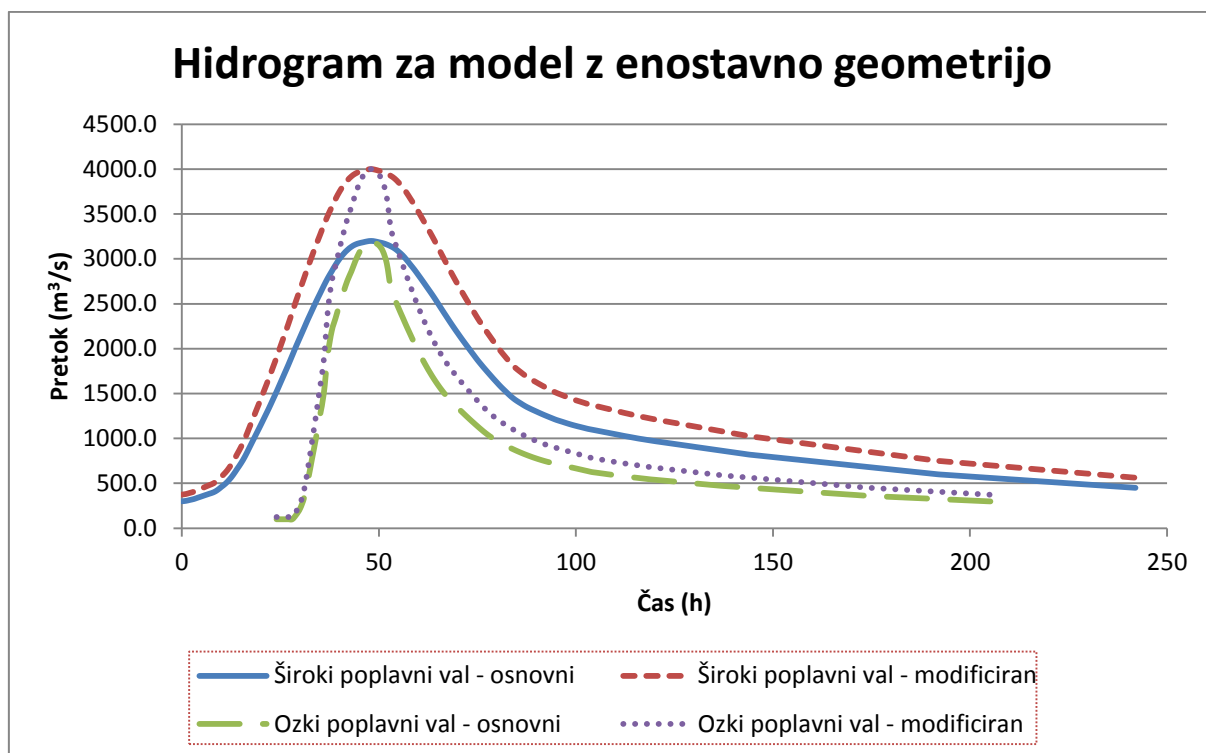
4.1.2 Obratovalna gladina

Kota obratovalne gladine je bila za pregradi izbrana na način, da smo dosegli, da se je pri pretoku $1 \text{ m}^3/\text{s}$ gladina akumulacijskega bazena izklinila približno na dolžini 8,5 kilometra. Na lokaciji pregrade je bila tako dosežena globina vode 11,9 metra (kota vode na 203,8 m.n.m. in kota dna akumulacije 191,9 m.n.m.), kar je primerljivo z objekti na spodnji Savi, s katerimi hočemo doseči podobnost analiziranih razmer.

Pretočna krivulja in denivelacijska krivulja pregrade, ki sta bili uporabljeni za hidravlično modeliranje, sta določeni v poglavju 5.1.

4.1.3 Hidrološki podatki

Z izdelanim hidravličnim modelom za primer z enostavno geometrijo je bilo predvideno, da se bodo lastnosti gladinskega vrlišča preverile tudi za primere nestalnega toka. Pri izračunih z nestalnim tokom zgornji robni pogoj predstavlja hidrogram dotekajočega poplavnega vala. Zaradi tega je bilo potrebno določiti hidrogram poplavnega vala, ki je bil uporabljen v izračunih. Osnovo za določitev hidrograma je predstavljala izdelana študija *Določitev sintetičnih poplavnih valov dolgih povratnih dob* (Fazarinc, 2005), ki je določila sintetične poplavne valove (hidrogame) na odseku spodnje Save.



Slika 30: Ozki in široki hidrogram visokovodnega vala uporabljen za izračune v enostavnem hidravličnem modelu

Figure 30: Narrow and wide flood wave hydrograph used for calculations in a simple hydraulic model

Za potrebe izračunov sta bila iz predhodno omenjene študije izbrana ozki in široki sintetični poplavni val s konico pretoka Q_{100} , ki sta bila ustrezno korigirana, da sta ustrezala izdelanemu hidravličnemu modelu enostavnega stanja. Hidrograma sta bila korigirana na način, da se je povečala konica poplavnega vala, saj smo med izvedbo izračunov želeli doseči tudi primerljivi začetek prostega preliivanja na pregradi. Iz določitve denivelacijske krivulje (glej poglavje 5.1.1) je izhajalo, da se prosto preliivanje začne pri pretokih cca $3350 \text{ m}^3/\text{s}$. Korigiranje hidrograma se je izvedlo s povečanjem vseh pretokov na način, da smo pretoke povečali za ustrezno konstantno ($c = 1,2578$), ki je ustrezala razmerju med staro ($3180 \text{ m}^3/\text{s}$) in novo konico pretoka ($4000 \text{ m}^3/\text{s}$). Čas trajanja hidrograma smo ohranili.

4.2 Primer HE Boštanj

Ugotovljene lastnosti gladinskega vrlišča so preverjene tudi na dejanskem primeru akumulacije HE Boštanj. Za reprezentativni primer obravnavanja sprememb gladinskega vrlišča je bilo izbrano območje spodnje Save. Zanj je bilo že predhodno izdelanih več študij, ki so se ukvarjale z določitvijo optimalnega obratovanja hidroelektrarn. V študijah (Ciuha, 2005 in 2013; Zakrajšek, 2005; Josipovič in sod, 2009) je bilo ugotovljeno, da je zaradi zagotovitve poplavne varnosti na območju optimalni način obratovanja v akumulacijskih bazenih hidroelektrarn po pretoku z zagotavljanjem konstantnega volumna. Prav tako je bila v prej omenjenih študijah že opisana pojavitev t. i. »vrliščne točke«, ki se pojavi pri prevajanju visokovodnega vala po objektih hidroelektrarn.

Za preverbo lastnosti gladinskega vrlišča je bil izbran akumulacijski bazen HE Boštanj. Razlog za preveritev sprememb gladinskega vrlišča na območju HE Boštanj je v tem, da gre

za objekt, ki je v obratovanju že od leta 2006, kar nam je omogočalo, da smo pridobili večje število podatkov, ki smo jih lahko uporabili za izdelavo hidravličnega matematičnega modela.

Druge hidroelektrarne na spodnjem delu Save so za preverbo obravnavanega primera manj primerne. Za dolvodne hidroelektrarne od HE Boštanj (HE Arto Blanca – v obratovanje predana 2009 in HE Krško – v obratovanje predana 2013) je na voljo manj podatkov. HE Vrhovo je bila sicer v obratovanje predana že leta 1996, vendar je obratovanje objekta HE Vrhovo specifično. HE Vrhovo namreč pri prevajanju visokih voda obratuje z načinom »zaščite kritičnih točk« v bazenu (zaščita ceste v Radeče). Pri tem primeru se zato gladinsko vrtilišče oblikuje drugače kot v primeru obratovanja obravnavanega v tem dokumentu.

4.2.1 Opis objekta HE Boštanj

Hidroelektrarna Boštanj predstavlja eno izmed stopenj v verigi HE na spodnji Savi, ki je zasnovana kot niz več pretočno akumulacijskih hidroelektrarn, ki bo potekal od HE Vrhovo do državne meje pri Mokricah. Objekt HE Boštanj leži okoli en kilometer gorvodno od Sevnice in za pregrado ustvari akumulacijsko jezero dolžine cca 8 kilometrov, ki se konča v spodnji vodi HE Vrhovo.

Jezovno zgradbo HE Boštanj, kjer se odvija tehnološki proces pretvorbe vodne energije v električno, sestavljajo strojnica in prelivna polja. V strojnici so postavljeni trije cevni agregati s pripadajočo opremo, transformator, stikališče in drugi prostori, ki so potrebni za delovanje objekta (pomožni prostori za osebje, TK-prostor, stikalnica ...). Strojnica se na desnem bregu priključi na energetske-vodnogospodarski nasip.

Preliv sestavlja pet prelivnih polj širine 15 metrov, ki so opremljeni s segmentnimi zapornicami in omogoča reguliranja gladine v akumulacijskem bazenu in pretokov reke Save. Prelivna polja so na levi breg Save priključena z nasutim platojem, ki se nadaljuje v energetske-vodnogospodarski nasip.



Slika 31: HE Boštanj (vir: HESS d.o.o.)

Figure 31: HPP Boštanj (HESS d.o.o.)

Bazen hidroelektrarne se nahaja praktično na celém odseku v nekdanji strugi reke Save. Celotna prostornina akumulacije HE Boštanj je $8.0 \times 10^6 \text{ m}^3$, od tega je koristna prostornina akumulacije $1.17 \times 10^6 \text{ m}^3$. Akumulacijski bazen HE Boštanj nima zadostne prostornine, da bi zadržal visokovodne valove, ki so prisotni na reki Savi. Visokovodni valovi, ki se pojavijo na tem območju, imajo bistveno večjo prostornino vode od prostornine, ki je na voljo v akumulacijskem bazenu. Prostornina visokovodnega vala na odseku HE Boštanj je ocenjena na nekaj sto milijonov m^3 vode. Volumen vode na v.p. Radeče (povprečni maksimalni pretoki) za široki 5-dnevni val s konico Q100 je $717 \times 10^6 \text{ m}^3$ in volumen 5-dnevnega vala s konico Q20 je $590 \times 10^6 \text{ m}^3$ (Fazarinc, 2005).

V spodnjem delu bazena od pregradnega profila gorvodno je zajezev reke Save ustvarjena z jezovno zgradbo in energetsko-vodnogospodarskim nasipom. Poleg zaščite pred dvigom gladine imajo na tem delu nasipi tudi zaščitno funkcijo, saj ščitijo zaledje pred posledicami visokih voda. V sklopu ureditev HE Boštanj je zagotovljena tudi dodatna varnost hiš v Kompolju pred 100-letno vodo Save in varnost objektov ob izlivnem odseku Podvinskega potoka v Bregu pred 20-letno vodo Save. V srednjem in zgornjem delu bazena zajezev ostaja v nekdanji strugi Save. Na območju so s skalometno oblogo zavarovane vse brežine, ki so podvržene erozijskemu delovanju voda zaradi nihanja vodne gladine pri obratovanju HE.

Tehnični podatki o objektu so bili pridobljeni iz izdelane projektne dokumentacije, ki je sestavljena iz idejnega projekta (IDP), projekta za pridobitev gradbenega dovoljenja (PGD), projekta za izvedbo (PIZ) in projekta izvedenih del (PID). Iz projektne dokumentacije so bili pridobljeni osnovni geometrijski podatki o prelivnih poljih in strojnici. Prav tako so bili iz projektne dokumentacije pridobljeni podatki o pretočni sposobnosti prelivnih polj (krivulja prostega preliva) in obratovanju objekta (denivelacijska krivulja).

4.2.2 Geodetski podatki

Za izdelavo matematičnega hidravličnega modela so potrebni kakovostni podatki, s katerimi lahko točno opišemo dejanske geometrijske razmere (topografija, batimetrija) na modeliranem območju. Pri izdelavi modela je bila uporabljena vsa razpoložljiva dokumentacija, ki je na voljo in je bila izdelana za potrebe gradnje, vzdrževanja in obratovanja HE Boštanj.

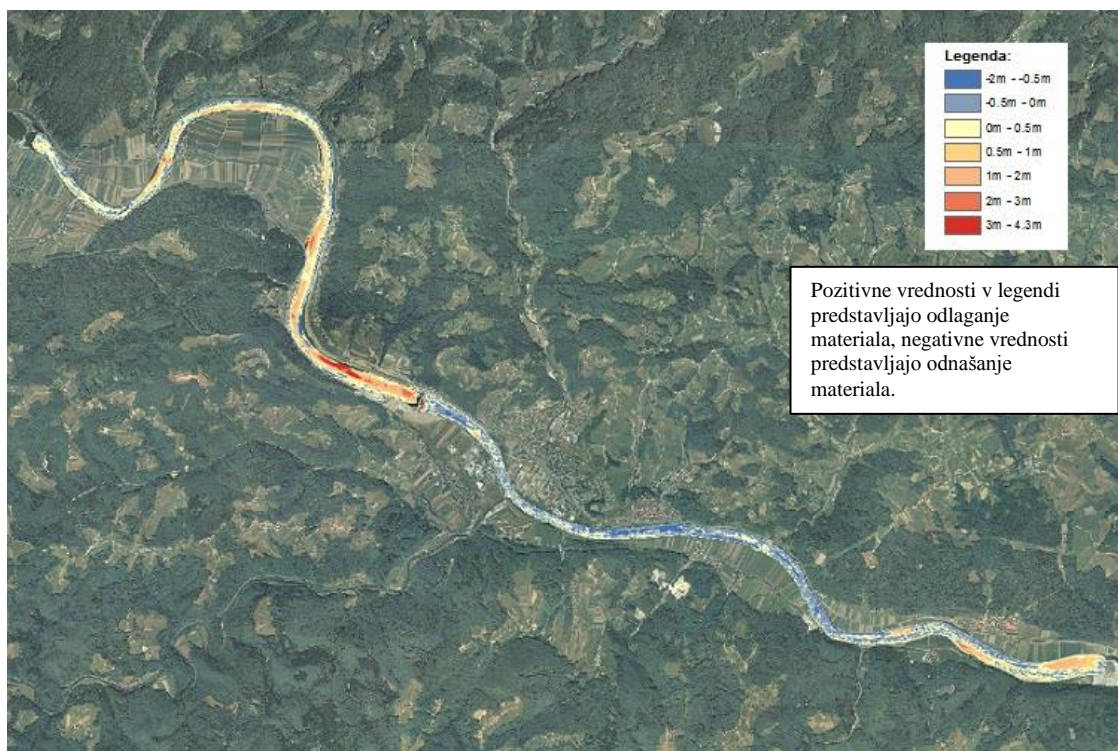
Geodetski podatki akumulacijskega bazena, ki so za izdelavo matematičnega hidravličnega modela zelo pomembni, so bili pridobljeni iz več virov. Teren bazena HE Boštanj in HE Arto-Blanca je bil pridobljen iz geodetskega posnetka, ki je bil izdelan ob zaključku gradnje. Od takrat na območju tudi ni bilo večjih posegov, ki bi povzročili večje spremembe terena. Ob zaključku gradnje akumulacijskega bazena, je bil izdelan posnetek batimetrije bazena za HE Boštanj (leto 2007) in HE Arto-Blanca (leto 2010). Vsi zgoraj naštetih podatki so bili uporabljeni za generiranje digitalnega modela terena (DMT), iz katerega je bila izdelana osnovna geometrija matematičnega hidravličnega modela.



Slika 32: Izdelani DMT za podatke ob zaključku gradnje HE Boštanj in HE Arto-Blanca

Figure 32: DEM of HPP Boštanj and HPP Arto-Blanca at conclusion of projects

V sklopu rednega vzdrževanja je obdobjno izdelan posnetek batimetrije za akumulacijska bazena HE Boštanj (2013) in HE Arto-Blanca (2012). Na podlagi novih podatkov, pridobljenih iz rednega vzdrževanja, je bil izdelan nov DMT – novo stanje. Zaradi procesa sedimentacije je v novem stanju terena že prišlo do sprememb dna akumulacijskih bazenov. Razlika v spremembi dna v akumulacijskih bazenih HE Boštanj in HE Arto-Blanca za osnovno stanje in novo stanje je prikazana na sliki 33.



Slika 33: Razlika v spremembah dna akumulacije HE Boštanj in HE Arto-Blanca

Figure 33: Difference in changes in the bottom of the reservoirs HPP Boštanj and HPP Arto-Blanca

Iz primerjave izdelanih DMT območja struge je razvidno, da se je od leta 2007 do leta 2013 dno struge reke Save na območju akumulacije HE Boštanj predvsem dvignilo (glej Priloga 3). Primerjava pokaže, da so se sedimenti večinoma odlagali v sredini struge, kar je tudi povzročilo dvig dna na tem območju. V akumulacijskem bazenu je v obravnavanem obdobju prišlo tudi do manjšega obsega erodiranja dna struge, ki se je večinoma dogajalo na robovih zdajšnje struge. Gre za pričakovan proces, saj se zaradi širitve struge reke Save ob gradnji HE Boštanj niso zaščitile vse brežine vzdolž akumulacijskega bazena, kar omogoča določen obseg erodiranja. Na območju akumulacijskega bazena HE Boštanj je tako pretežno prišlo do dviga dna v višini do enega metra. Se pa znotraj bazena pojavlja tudi nekaj območij, kjer je dvig dna večji od enega metra. Gre predvsem za območje pred pregrado HE Boštanj in drugih območij, kjer se je tok vode upočasnil oz. zaradi večje struge delno preusmeril. Vse ugotovitve glede sprememb dna v akumulaciji so tudi skladne s postavljenimi teoretičnimi izhodišči, ki so podana v poglavju 3.3.

Zanimiva je ugotovitev, da se v bazenu HE Arto-Blanca dno v večjem obsegu poglablja. Poglobitev dna je sicer večinoma majhna, do enega metra, vendar je območje poglabljanja vseeno večje kot območje dvigovanja dna. Razlog je verjetno v tem, da so za analizo upoštevani geodetski podatki v obdobju od 2010 do 2012. V tem obdobju se zaradi novih razmer na območju (vzpostavitev zajeze HE Arto-Blanca) struga očitno še ni uspela stabilizirati, zato na večjem območju prihaja do erodiranja dna. V obdobju (predvsem jeseni 2010) je bilo tudi nekaj izrazito visokih voda, ki so imele posledice za bazen. V akumulacijskem bazenu HE Arto-Blanca se že pojavljajo območja, kjer je dvig dna izrazitejši – območje pred pregrado HE Arto-Blanca.

V dokumentu je bila analizirana sprememba dna v akumulaciji HE Boštanj od pričetka obratovanja v letu 2007 do zadnjega pridobljenega podatka, ki je datiran v letu 2013 (glej sliko 32 in Prilogo 3). To pomeni, da je bilo analizirano obdobje prvih 7 let obratovanja HE Boštanj. Za HE Arto-Blanca je bilo analizirano obdobje krajše, in sicer samo za prva 3 leta od pričetka obratovanja. Prvi geodetski podatki za bazen HE Arto-Blanca izhajajo iz leta 2010 in zadnji iz leta 2012. Ker so hidroelektrarne inženirski objekti z zelo dolgo življenjsko dobo (lahko tudi več kot 100 let – npr. HE Fala na reki Dravi), je potrebno zapisati, da podatki, obdelani v tem dokumentu, prikazujejo samo razvoj sedimentacije v prvih letih po gradnji hidroelektrarne in vzpostavitvi zajeze. Za točno analizo sedimentacije v bazenih obeh hidroelektrarn bo potrebno še večletno spremljanje stanja in obdelava pridobljenih podatkov.

4.2.3 Hidrološki podatki

Osnovni podatki o hidrologiji reke Save na obravnavanem odseku spodnje Save so povzeti iz študij *Določitev sintetičnih poplavnih valov dolgih povratnih dob* (Fazarinc, 2005) in *Hidrološka študija reke Save na odseku HE Boštanj, HE Blanca, HE Krško, HE Brežice in HE Mokrice* (Anzeljc et al, 2002), ki sta bili izdelani v sklopu načrtovanja hidroenergetskih objektov na spodnji Savi. Iz študije so bili povzeti osnovni podatki o hidrologiji na odseku in podatki o obliki ter trajanju visokovodnega vala.

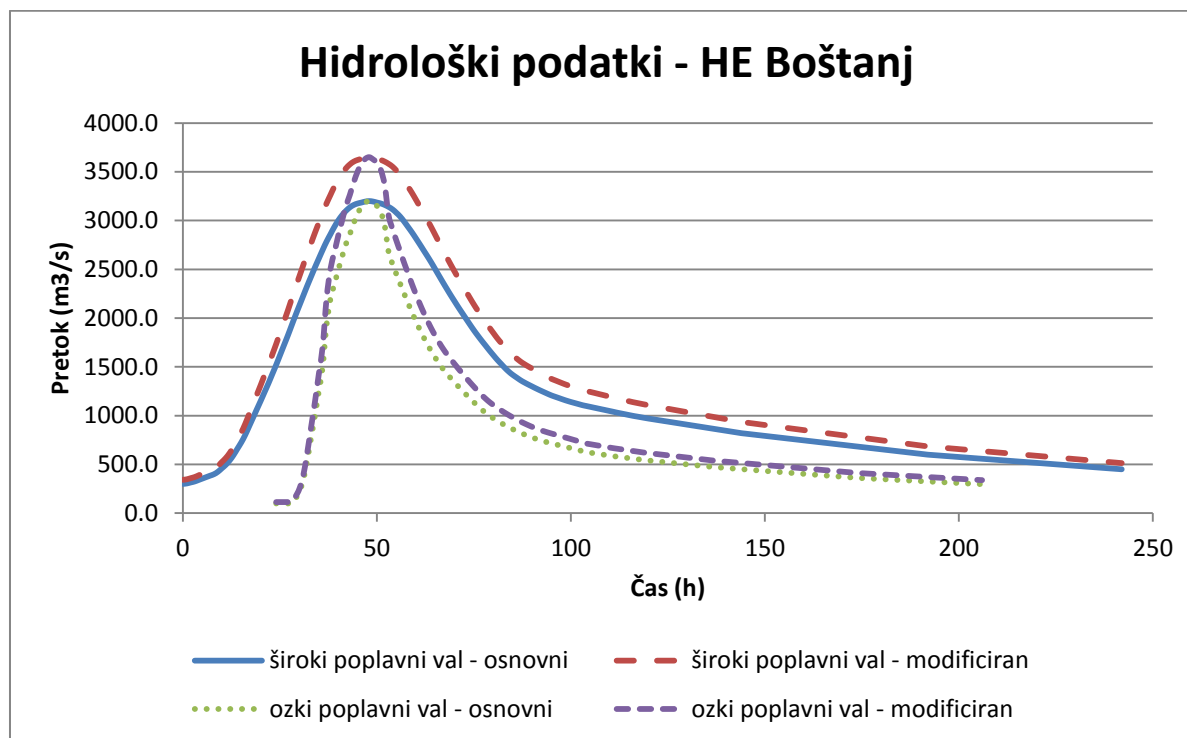
Konice pretokov za odsek spodnje Save so bile leta 2011 novelirane za potrebe načrtovanja spodnje savske verige HE (Arso, 2011). Novi podatki o konicah poplavnih valov za odsek spodnje Save so tako:

Preglednica 1: Nove konice poplavnih valov na odseku spodnje Save (Arso, 2011)

Table 1: New flood wave peaks on lower Sava reach (Arso,2011)

Visoki pretoki	v.p. Radeče	HE Krško
Q2 (m ³ /s)	1630	1675
Q5 (m ³ /s)	2140	2190
Q10 (m ³ /s)	2500	2560
Q20 (m ³ /s)	2830	2900
Q50 (m ³ /s)	3290	3365
Q100 (m ³ /s)	3650	3750
Q1000 (m ³ /s)	4740	4840
Q10000 (m ³ /s)	5900	6000

Na podlagi novih konic poplavnega vala sta bila ozki in široki poplavni val iz študije *Določitev sintetičnih poplavnih valov dolgih povratnih dob* (Fazarinc, 2005) korigirana, da je bila konica poplavnega vala skladna z novimi podatki. Uporabljeni so bili podatki o konicah na vodomerni postaji (VP) Radeče. Korigirana poplavna vala sta podana v nadaljevanju.



Slika 34: Ozki in široki sintetični hidrogram visokovodnega vala Q100 uporabljen za izračune v hidravličnem modelu HE Boštanj

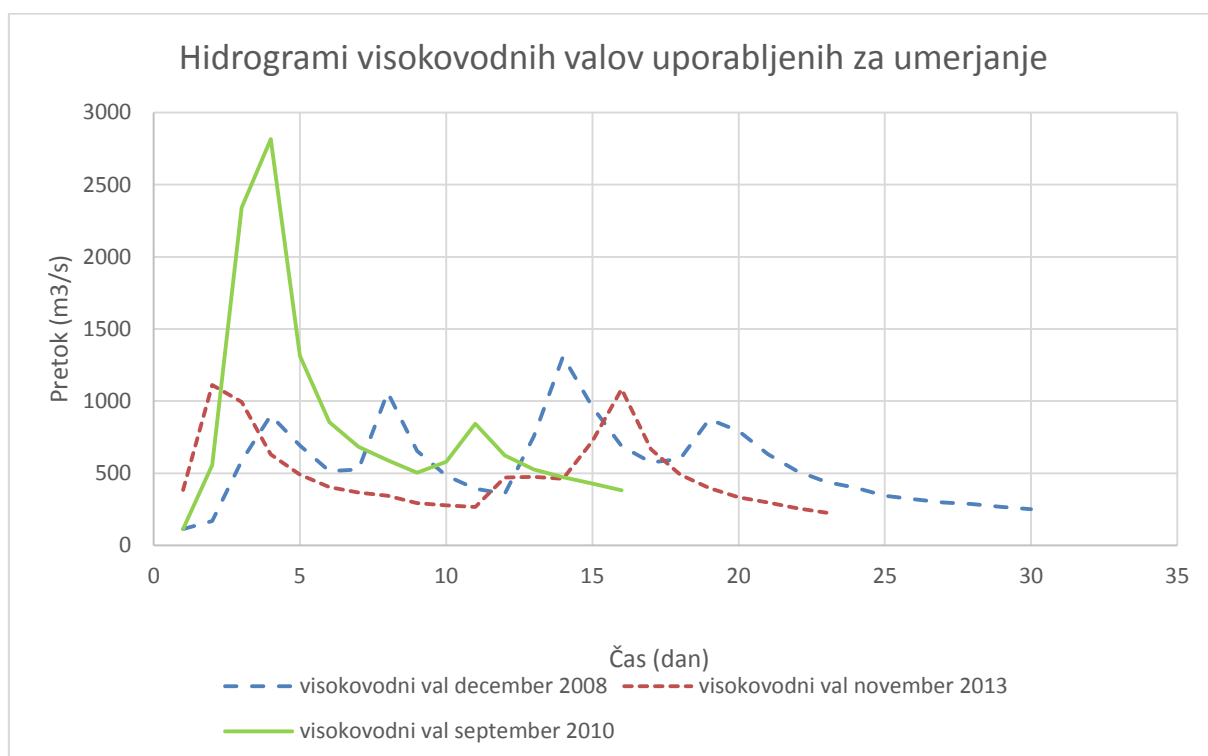
Figure 34: Narrow and wide synthetic hydrograph flood wave Q100 used in hydraulic model HPP Boštanj

Za umerjanje hidravličnega modela HE Boštanj so bili uporabljeni podatki iz hidrološkega arhiva Arso, ki je na voljo na njihovi spletni strani (vir: http://vode.arso.gov.si/hidarhiv/pov_arhiv_tab.php). Podatki o pretokih so v hidrološkem arhivu za vse vodomerne postaje podani kot dnevni povprečni pretoki. Za izdelavo hidrograma za obravnavani odsek spodnje Save so bili iz vrednoteni podatki z VP Hrastnik na reki Savi in VP Veliko Širje na reki Savinji.

Izbrani so bili trije poplavni valovi, in sicer:

- Poplavni val od 29. novembra 2008 do 28. decembra 2008 s povprečnim maksimalnim dnevним pretokom 1310 m³/s;
- Poplavni val od 9. novembra 2013 do 1. decembra 2013 s povprečnim maksimalnim dnevним pretokom 1110 m³/s;
- Poplavni val od 16. septembra 2010 do 28. septembra 2010 s povprečnim maksimalnim dnevним pretokom 2815 m³/s.

Na podlagi pridobljenih podatkov so bili konstruirani hidrogrami za vstopni prerez v akumulacijo, kot so podani v nadaljevanju:



Slika 35: Izmerjeni hidrogrami poplavnih valov, uporabljeni za umerjanje hidravličnega modela HE Boštanj

Figure 35: Measured hydrographs of flood waves used to calibrate the hydraulic model HPP Boštanj

Pri konstruiranju predhodnega hidrograma so bili uporabljeni dnevni povprečni pretoki z vodomernih postaj. Časovni koraki za posamezni podatek so veliki, zaradi tega ima linija pretokov hidrograma izrazito koničasto obliko. Boljših podatkov (manjši časovni korak) žal nismo uspeli pridobiti.

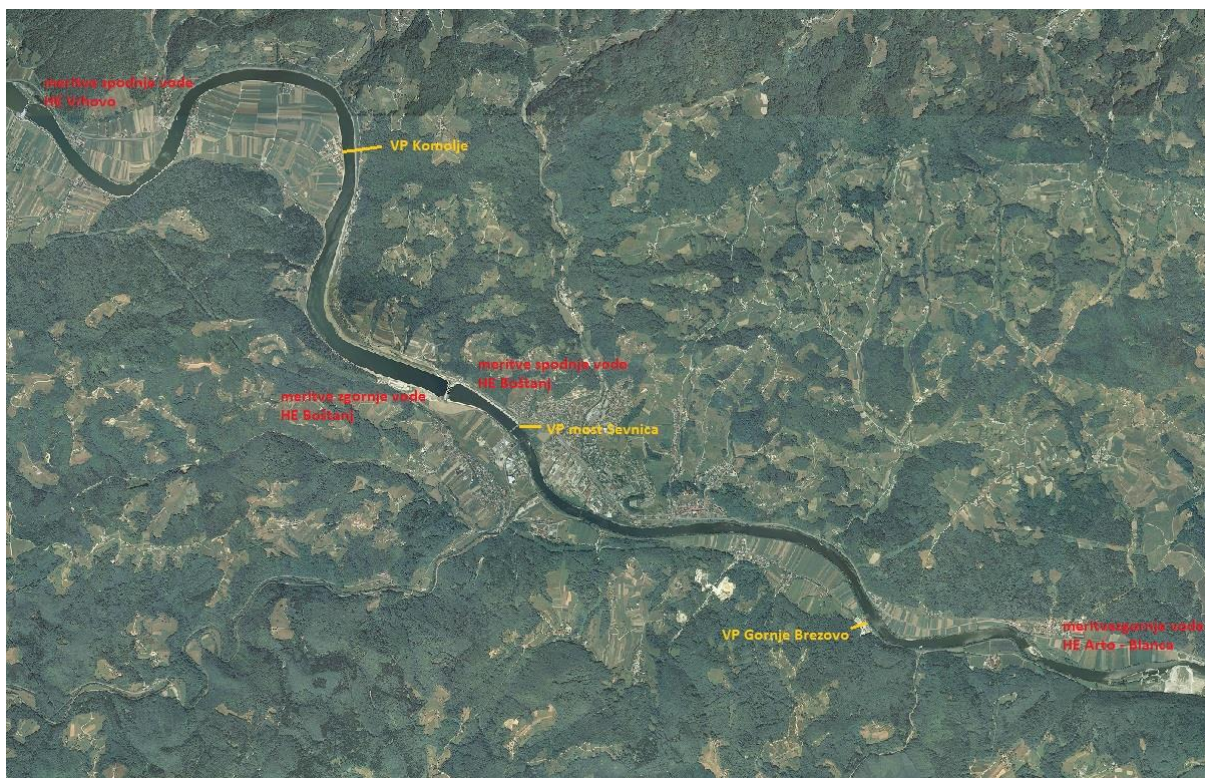
4.2.4 Podatki o meritvah gladin

Na bazenu HE Boštanj so postavljena tri merilna mesta. Prvo merilno mesto omogoča meritve na pregradi HE Vrhovo, kjer merijo gladino spodnje vode. Drugo merilno mesto je na betonskem zidu za zaščito vasi Kompolja na desnem bregu reku Save. Tretje merilno mesto omogoča meritve zgornje vode HE Boštanj. Meritve spodnje vode HE Vrhovo in meritve zgornje vode HE Boštanj se opravljajo z limnigrafii v realnem času, kar omogoča, da so podatki na voljo za poljubni časovni korak. Za merilno mesto na zidu Kompolje so bile pridobljene le meritve, ki se opravljajo z odčitavanjem z late enkrat na 14 dni. Ti podatki za

umerjanje hidravličnega modela zato niso najprimernejši. Na tej lokaciji je postavljen tudi avtomatski merilnik vodne gladine, s katerega žal podatkov ni bilo mogoče pridobiti.

Na bazenu HE Arto-Blanca so danes na voljo samo meritve na lokaciji spodnje vode HE Boštanj in zgornje vode HE Arto-Blanca. Meritve na teh lokacijah se izvajajo z limnigrafom, zato so podatki na voljo za poljubni časovni interval.

Jeseni 2007 je Hidroinštitut na območju bazena HE Arto-Blanca izvedel študijo z naslovom *Hidravlična modelna raziskave evakuacije plavja na pregradah HE na spodnji Savi in izvedba hidravličnih meritev gladin Save*. V tej študiji sta bili na lokaciji most Sevnica in Gornje Brezovo na bazenu HE Arto-Blanca postavljeni začasni vodomerni postaji, ki sta beležili nihanje gladin z namenom izdelave pretočne krivulje za izbrani postaji. Za lokacijo VP most Sevnica pretočna krivulja ni bila izvedena, pretočna krivulja za Gornje Brezovo pa tudi ni več aktualna. Razlog je v tem, da je bila pretočna krivulja izvedena za naravno strugo reke Save. Takrat je bilo dolvodno od vodomerne postaje obrežno prodišče, ki je bilo med gradnjo HE Arto-Blanca izkopano. Na voljo smo imeli samo geodetske podatke stanja, ko je bil poseg že izveden.



Slika 36: Lokacije merilnih mest na akumulacijskih bazenih HE Boštanj in HE Arto-Blanca

Figure 36: Locations of water level measurement in HPP Boštanj and HPP Arto-Blanca reservoirs

Za umerjanje hidravličnega modela smo zato lahko uporabili samo podatke o spodnji vodi HE Vrhovo, podatke o zgornji in spodnji vodi HE Boštanj ter podatke o zgornji vodi HE Arto-Blanca.

4.2.5 Zasnova matematičnega modela

Hidravlični matematični model je bil zasnovan v dveh variantah, kateri sta izhajali iz izdelanih primerov DMT (glej poglavje 4.2.2). V prvi varianti (geometrija osnovnega stanja), so bile v hidravličnem modelu preverjene lastnosti vodnega toka takoj po vzpostavitvi akumulacije HE Boštanj (v letu 2007). V drugi varianti (geometrijo novega stanja) so bile preverjen lastnosti vodnega toka po preteku nekaj let (obdobje 6 let), ko so se v bazenu HE Boštanj in tudi v bazenu HE Arto-Blanca že zgodile določene morfološke spremembe.



Slika 37: Situacija hidravličnega matematičnega modela z vrisanimi prečnimi prerezi v območju HE Boštanj in HE Arto-Blanca

Figure 37: Map of the hydraulic mathematical model with cross-sections in the area oh HPP Boštanj and HPP Arto-Blanca

Oba geometrijska modela obsegata območje akumulacijskega bazena HE Boštanj in HE Arto-Blanca in segata od spodnje vode HE Vrховo do pregrade HE Arto-Blanca. Dolžina obravnavanega odseka reke Save je 17,2 kilometra in jo opisuje 344 prečnih profilov.

Geometrija hidravličnega modela je sestavljena iz prečnih profilov, ki so medsebojno oddaljeni na dolžini 50 metrov. Prečni profili so bili izdelani na podlagi DMT, katerega osnova je bila batimetrija bazenov. V modelu je vstavljena samo pregrada HE Boštanj, saj ima samo ta pregrada vpliv na določitev hidravličnih lastnosti bazena HE Boštanj. Pregradi HE Vrховo in HE Arto-Blanca načeloma nimata večjih vplivov na hidravlične lastnosti akumulacijskega bazena HE Boštanj, zato sta v modelu upoštevana samo s podatki o merjenih gladinah (robni pogoj).

Manningovi koeficienti za tok zunaj struge so v modelu podani glede na sestavo tal, vrednost, ki je bila razbrana iz ortofoto posnetka terena. Za kmetijske površine je bila izbrana vrednost koeficienta 0,06, za grmičevje/redek gozd 0,08, za gozd 0,1 in za naselja 0,15. Določitev Manningovega koeficienta v strugi je podana v poglavju 6.1.2.

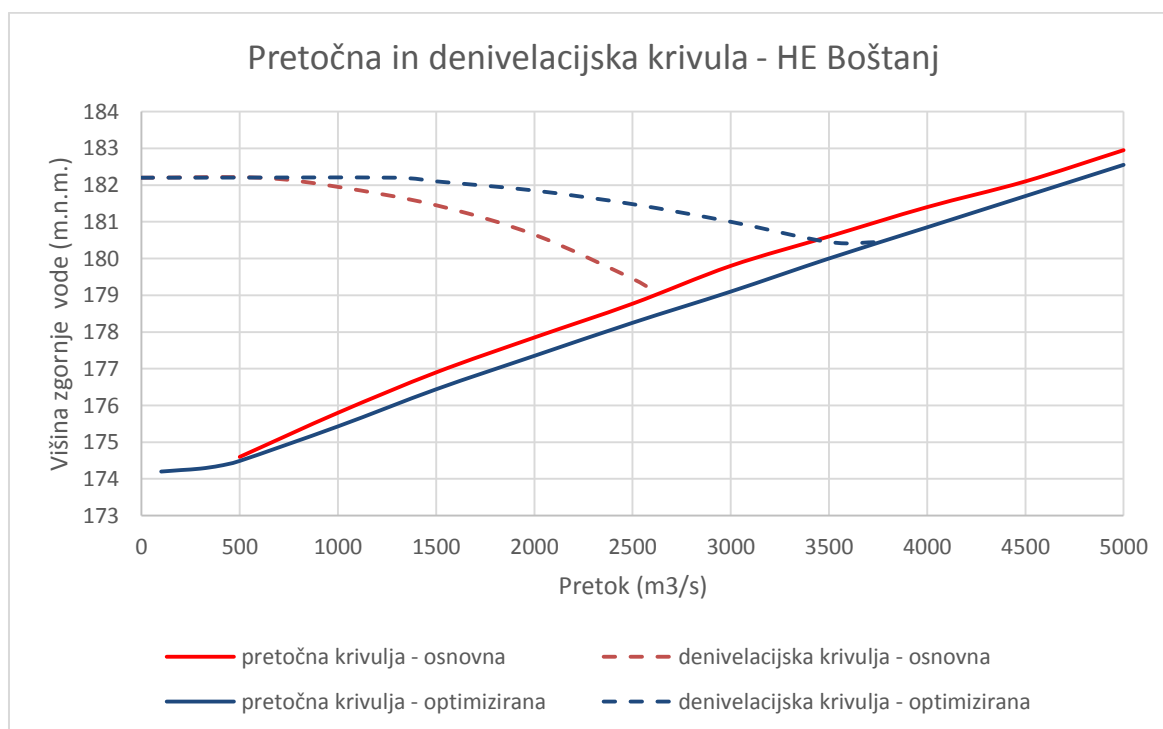
Na obravnavanem območju se nahajajo tudi štirje mostovi, ki so bili dodani v matematični hidravlični model. V akumulacijskem bazenu HE Arto-Blanca na območju Sevnice so trije mostovi. Gre za most na glavni cesti Sevnica–Krško, železniški most na progi Zidani Most–Krško in brv za prehod čez reko Savo. Ti mostovi so dodani v geometrijo osnovnega stanja akumulacije. V geometrijo modela novega stanja je dodana še brv Šmarčno–Breg v akumulacijskem bazenu HE Boštanj, ki je bila zgrajena konec leta 2007. Prikaz situacije, karakterističnih profilov in vzdolžnega profila je podan v Prilogi 2.

4.2.6 Obratovanje HE Boštanj in HE Arto-Blanca

Obratovanje HE Boštanj in HE Arto-Blanca je bilo zasnovano med izdelavo projektne dokumentacije, skladno s katero sta objekta izvedena. Na takrat znane podatke sta bili za vsako HE zasnovani krivulja prostega preliva in denivelacijska krivulja. Vse krivulje so bile zasnovane na način, da so na območju akumulacijskih bazenov HE Boštanj in HE Arto-Blanca omogočile varno obratovanje v primerih prehoda visokovodnega vala.

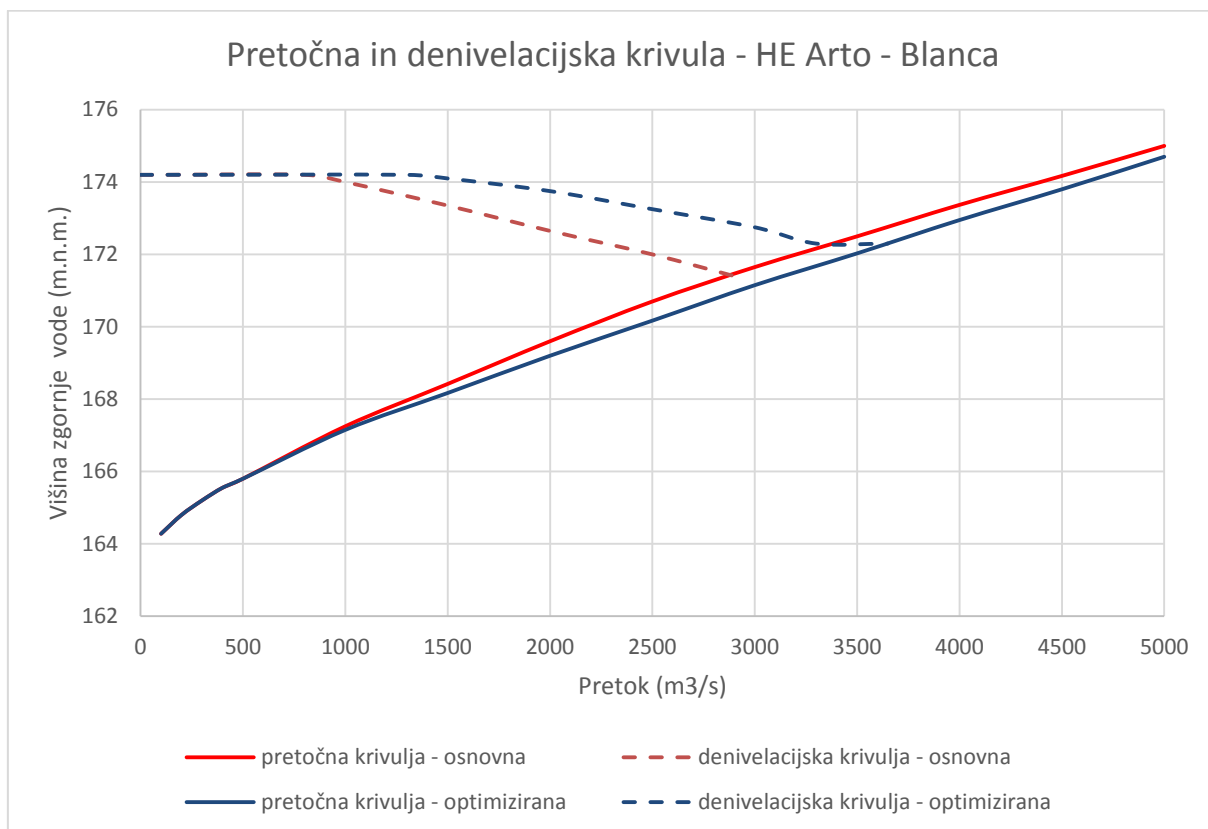
V letu 2013 je bila izvedena nova študija, ki je optimizirala obratovanje HE na odseku spodnje Save (Ciuha, 2013). V študiji je bilo ugotovljeno, da obstoječe prelivne in denivelacijske krivulje niso več ustrezne. Kot razlog za to, so navedena nižanja gladin v akumulacijah, kot posledica morfoloških sprememb. Zato so bile v študiji na novo določene prelivne in denivelacijske krivulje praktično za vse objekte (za tiste, za katere so bili na voljo novi podatki).

S hidravličnim modelom je bilo preverjeno obratovanje objekta HE Boštanj za stanje pred optimizacijo prelivnih in denivelacijskih krivulj in po njej. V nadaljevanju so prikazane krivulje, ki so bile uporabljene.



Slika 38: Pretočni in denivelacijski krivulji na objektu HE Boštanj (Ciuha, 2013)

Figure 38: Rating and operational curve for HPP Boštanj (Ciuha, 2013)



Slika 39: Pretočni in denivelacijski krivulji na objektu HE Arto-Blanca (Ciuha, 2013)

Figure 39: Rating and operational curve for HPP Arto-Blanca (Ciuha, 2013)

S tako pripravljenimi vhodnimi podatki so bile nato opravljene številne analize, da bi ugotovili oz. prikazali lastnosti gladinskega vrlišča.

5.0 HIDRAVLIČNO MODELIRANJE AKUMULACIJE S POENOSTAVLJENO GEOMETRIJO

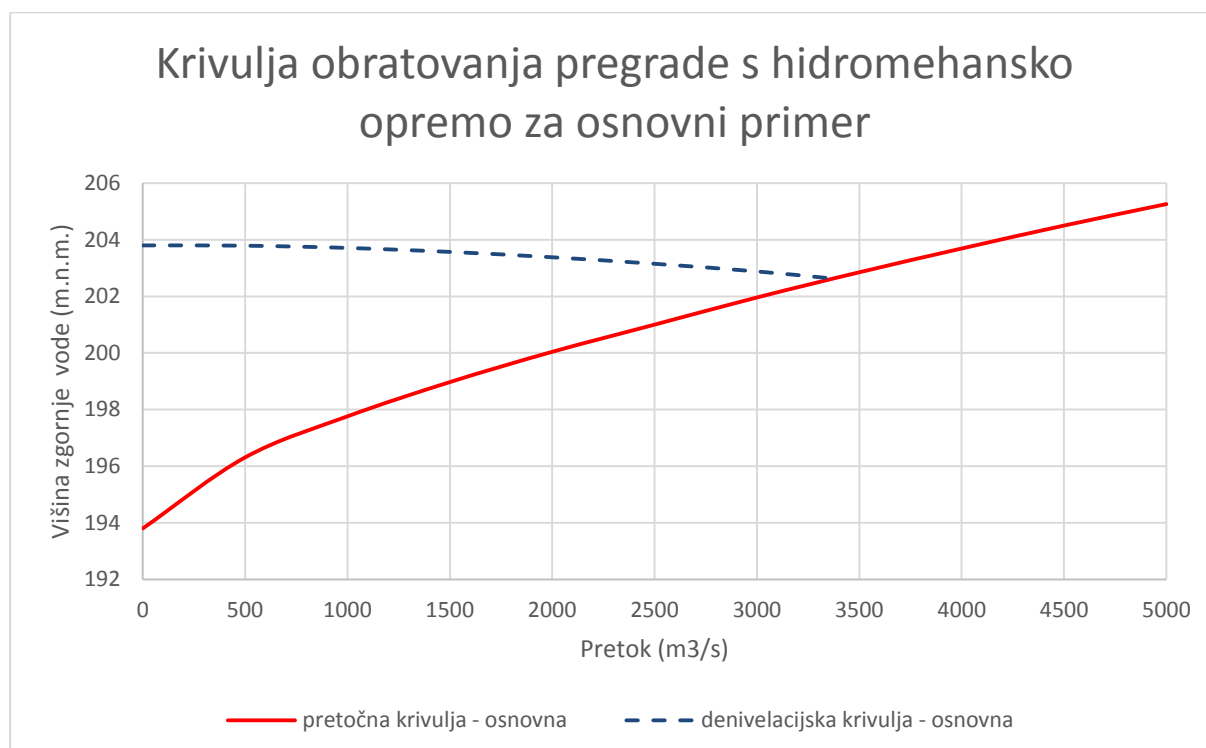
5.1 Izračuni za začetne analize o lastnostih lokacije gladinskega vrlišča v akumulacijskih bazenih z enostavno geometrijo

5.1.1 Določitev gladinskega vrlišča za osnovno stanje s stalnim tokom

Za določitev lastnosti gladinskega vrlišča za enostavni geometrijski primer je bilo potrebno najprej določiti denivelacijsko krivuljo, ki omogoča obratovanje po pretoku s konstantnim volumnom. V ta namen je bilo izvedenih več izračunov, s katerimi smo dosegli, da se pri prevajanju vode čez pregrade pri različnih pretokih v bazenu ohranja konstantni volumen vode.

Denivelacijska krivulja je določena za t. i. osnovno izhodiščno stanje. Pri osnovnem stanju predvidimo, da dno bazena še ni podvrženo nobenim spremembam (ni dviga dna). Koeficient hrapavosti je bil izbran kot Manningov koeficient velikosti 0,03.

Gladinsko vrlišče v bazenu se oblikuje samo, če z obratovanjem zapornic vzdržujemo določeno gladino v akumulacijskem bazenu. V trenutku, ko na objektu preidemo v prosto prelivanje (popolno odprtje zapornic), se v bazenu oblikuje naravni tok in gladinsko vrlišče ne obstaja več. Zato smo pri izračunu obravnavali več pretokov, pri katerih na objektu še ni potrebno preiti v prosti preliv. Z izračuni je bila obenem določena še krivulja prostega preliva pregrade.

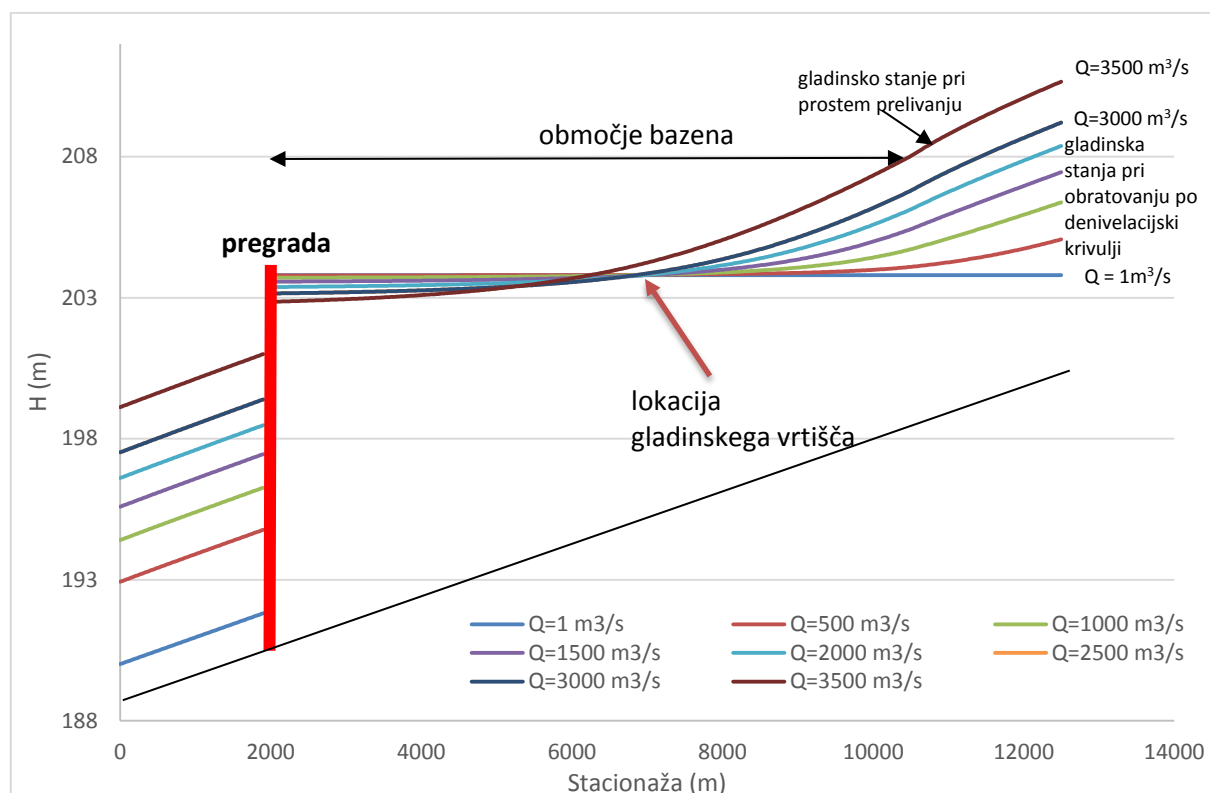


Slika 40: Pretočna in denivelacijska krivulja na pregradi za primer s poenostavljeno geometrijo

Figure 40: Rating and operational curve for calculations in a simple hydraulic model

Za pomembnejše pregradne objekte, kot so prelivna polja na hidroelektrarni, se običajno pretočne krivulje določa s fizičnimi modelnimi raziskavami, ki podajo točne prelivne koeficiente za obravnavane primere. Krivulja obratovanja pregrade je bila v tem primeru določena samo računsko. Določena je bila na podlagi serije izračunov s stalnim tokom in vgrajenimi prelivnimi enačbami v hidravličnem matematičnem modelu.

Z upoštevanjem predhodno določene krivulje obratovanja pregrade so bile preverjene lastnosti gladinskega vrlišča za osnovno stanje. Izračuni so bili izvedeni za razpon pretokov od $500 \text{ m}^3/\text{s}$ do začetka prostega prelivanja pri $3350 \text{ m}^3/\text{s}$ s korakom povečanja pretokov po $50 \text{ m}^3/\text{s}$. Vsi izračuni so bili izvedeni za primer stalnega toka.



Slika 41: Oblikovanje gladinskega vrlišča za osnovni geometrijski primer za stalni tok za izbrane pretoke

Figure 41: Representation of water level pivot point for steady flow calculations in a simple hydraulic model (initial state)

S slike 41 je razvidno, da smo z izračuni, v katerih smo upoštevali določeno denivelacijsko krivuljo, dosegli, da se v bazenu oblikuje gladinsko vrlišče (t. i. točka, v kateri gladina z naraščanjem pretoka ostaja praktično konstantna). Dodatni prikaz je narejen v Prilogi 4. V primeru pretoka $Q=3500 \text{ m}^3/\text{s}$ moramo na pregradi že preiti v prosti preliv, zato so gladinska stanja na mestu gladinskega vrlišča višja in gladina več ne sovpa z ostalimi gladinami.

Z obratovanjem prelivnih polj pregradnega objekta po izbrani denivelacijska krivulji se oblikuje gladinsko vrlišče v stacionaži akumulacijskega bazena 6675 m. Kot je bilo že povedano, denivelacijska krivulja zagotavlja, da so dosežene vse zahteve za varno obratovanje (ugodna gladinska stanja vzdolž bazena). Ta primer tako predstavlja začetni načrtovani način obratovanja objekta, s katerimi bodo primerjani vsi drugi izračuni.

5.1.2 Preverba ohranjanja konstantnega volumna za osnovni primer

Gladinsko vrlišče se v bazenu oblikuje pri vseh možnih način obratovanja. Obratovanje po pretoku s konstantnim volumnom pa je doseženo le v primeru, če se s spremembo toka v bazenu ohranja konstantni volumen oz. če volumen postopno narašča (majhno povečanje volumnov vode – glej poglavje 3.5.2 in 3.5.4).

Iz izračunov pretokov pri upoštevanju določeni denivelacijski krivulji (glej poglavje 5.1.1) na pregradi smo dobili sledeče volumne vode v bazenu, ki se spreminjajo s pretokom:

Preglednica 2: Naraščanja volumnov za izračun osnovnega stanja s stalnim tokom

Table 2: Increase in volumes in reservoir for steady flow calculations

Q (m ³ /s)	Volumen (m ³)	Razlika glede na prvotni volumen (%)
1	10.804.950	0.00 %
500	10.867.700	0.58 %
1000	10.869.240	0.60 %
1500	10.898.380	0.86 %
2000	10.919.650	1.06 %
2500	10.932.640	1.18 %
3000	10.931.970	1.18 %
3350	10.935.100	1.20 %

Iz prikazanih volumnov vode v preglednici 2 je razvidno, da je denivelacijska krivulja določena na način, da se z večanjem pretoka in nižanjem gladine na pregradi volumen vode v akumulaciji ohranja oz. se rahlo veča. S tem je bil dobljen želeni način obratovanja.

5.1.3 Lastnosti gladinskega vrlišča v primeru nestalnega toka

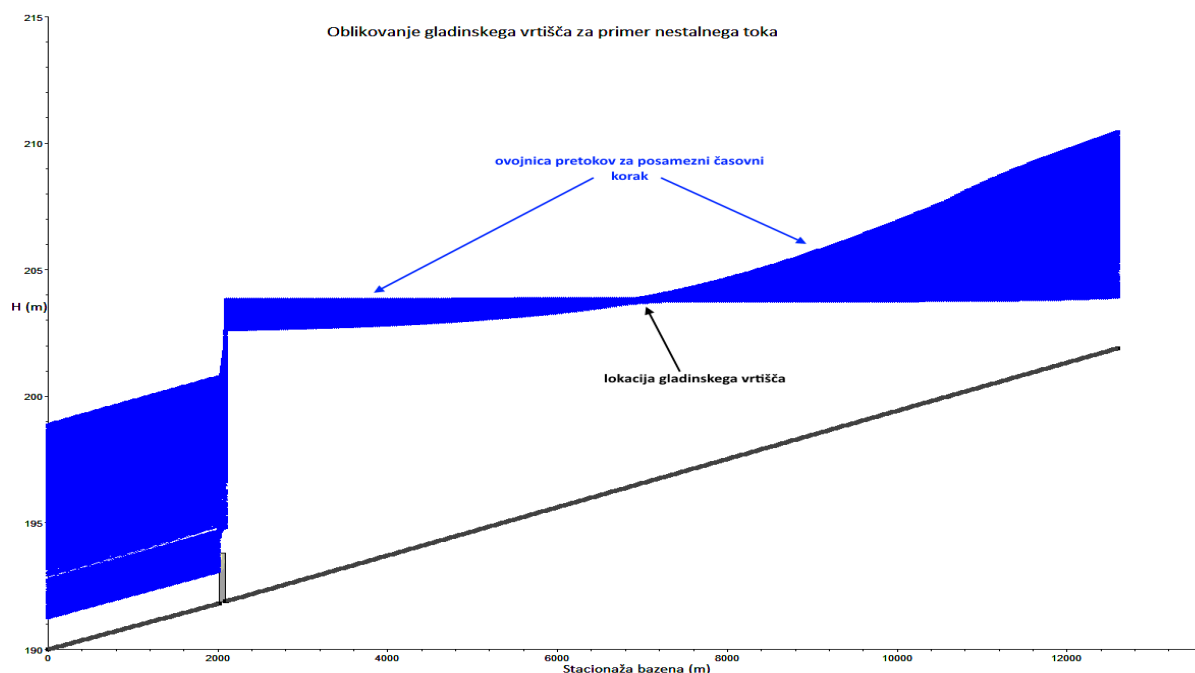
Oblikovanje gladinskega vrlišča je bilo preverjeno tudi za primer nestalnega toka. Izračun je bil izveden v izdelanem matematičnem hidravličnem modelu z enostavno geometrijo, ki je bil ustrezno dopolnjen s potrebnimi podatki za izračune za primere nestalnega toka (hidrogram poplavnega vala – poglavje 4.1.3, notranji robni pogoj na pregradi).

Izvedena sta bila izračuna za ozki in široki hidrogram poplavnega vala (glej poglavje 4.2). V obeh primerih je bilo potrebno na pregradi v nekem trenutku nujno preiti v obratovanja s prostim prelivanjem. Hidrograma sta bila na tak način določena tako, ker smo želeli preveriti, kaj se dogaja z volumnom vode v bazenu pred končanjem prostega prelivanja in po njem ter kako se volumni vode obnašajo v času prostega prelivanja. Konico hidrogramov je tako predstavljal pretok velikosti 4000 m³/s (začetek prostega prelivanja pri Q=3350 m³/s). Z izračuni smo hoteli preveriti tudi, ali bo imela oblika poplavnega vala kakšen vpliv na pojav oz. lokacijo gladinskega vrlišča. Ne glede na obliko hidrograma poplavnega vala bi morali z izračuni potrditi, da se lokacija gladinskega vrlišča ne spremeni.

Iz opravljenih izračunov smo dobili pričakovani rezultat. Pri potovanju poplavnega vala po akumulacijskem bazenu in obratovanjem s konstantnim volumnom se prav tako oblikuje gladinsko vrlišče v obeh primerih, tako za široki kot za ozki hidrogram poplavnega vala. V obeh primerih se prav tako oblikuje gladinsko vrlišče v isti lokaciji akumulacijskega bazena, in sicer v stacionaži 6825 (glej Priloga 5). Izračunana lokacija gladinskega vrlišča z nestalnim

tokom ne sovпада z izračunano lokacijo gladinskega vrlišča, ki je bila izračunana za primere stalnega toka. Do odstopanja prihaja zaradi različnih pretokov, ki v primeru nestalnega toka prehajajo po akumulaciji. Med prehajanjem visokovodnega vala je zaradi časovnega zamika drugačen pretok v akumulaciji in v korenu zajezbe. Ta razlika pretokov pa vpliva na lokacijo gladinskega vrlišča.

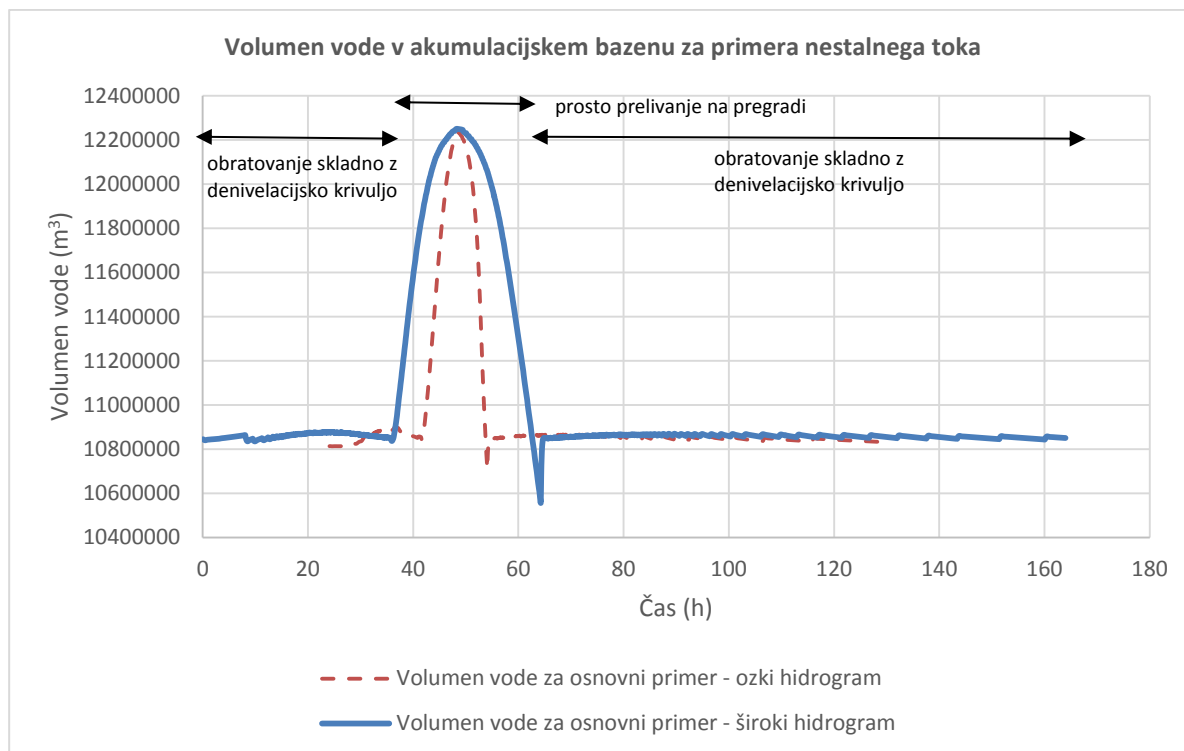
Pri določitvi gladinskega vrlišča za primere nestalnega toka so bili izločeni višji pretoki, ki so že zahtevali obratovanje s prostim prelivanjem vode. Razlog je v tem, da se gladinsko vrlišče oblikuje samo v času obratovanja po denivelacijski krivulji. V času prostega prelivanja se vzpostavi v akumulaciji prosti tok.



Slika 42: Oblikovanje gladinskega vrlišča za primer nestalnega toka – ozki hidrogram

Figure 42: Representation of water level pivot point for unsteady flow calculations – narrow hydrograph

Pri potovanju poplavnega vala po akumulacijskem bazenu se volumen vode spreminja in je odvisen od časa in trenutnega pretoka. Da obratujemo s konstantnim volumnom po pretoku, je tako potrebno ves čas, do trenutka prostega prelivanja, zagotavljati konstantni volumen v akumulacijskem bazenu. Spreminjanje volumna je podano na naslednji sliki 43.



Slika 43: Volumen vode v akumulacijskem bazenu pri prehodu visokovodnega vala

Figure 43: Volume of water in the reservoir for unsteady flow calculations (initial state)

Iz predhodne slike 43 je razvidno, da se celotni čas, ko na objektu obratujemo po denivelacijski krivulji, v akumulacijskem bazenu ohranja konstantni volumen ne glede na obliko visokovodnega vala. Volumen vode se v bazenu skokovito poveča v času, ko čez akumulacijski bazen prehaja konica visokovodnega vala, ki odteka po krivulji prostega preliva.

S prikazanimi izračuni smo dokazali, da se tudi v primeru nestalnega toka v akumulacijskem bazenu v času obratovanja po denivelacijski krivulji oblikuje gladinsko vrlišče. Zahteva po ohranjanju konstantnega volumna v akumulacijskem bazenu je bila prav tako izpolnjena.

5.2 Izračun vpliva sprememb batimetrije v bazenih HE na gladinsko vrlišče – stalni tok

Predvidevamo, da se bo lokacija gladinskega vrlišča v akumulacijskih bazenih spreminjala zaradi sprememb morfologije bazena. Povedano drugače, zaradi dviga dna in sprememb koeficienta hrapavosti pričakujemo spremembo lokacije gladinskega vrlišča.

5.2.1 Lastnosti gladinskega vrlišča pri spremembah dna

V izračunih z modelom z enostavno geometrijo smo preverili več različnih variant spremembe morfologije akumulacijskega bazena. Najprej smo preverili, kako se lokacija gladinskega vrlišča spreminja glede na dvig dna. Ker je sedimentacija in s tem povezano dvigovanje in erodiranje dna kompleksen naraven pojav, katerega posledice je težko določiti, je bila v izračunih z enostavno geometrijo prevzeta poenostavitev, da se dno

akumulacijskega bazena dviga za isto vrednost po celotni površini dna bazena. Lastnosti gladinskega vrlišča so bile preverjene za dvige dna 0,25 m, 0,5 m, 0,75 m, 1,0 m in 1,5 m.

Izračuni so bili izvedeni za razpon pretokov od 500 m³/s do začetka prostega prelivanja pri 3350 m³/s, s korakom povečanja pretokov po 50 m³/s. Pri izračunih je bilo upoštevano, da pri vseh računskih primerih uporabimo isto denivelacijsko krivuljo, ki je bila določena v poglavju 5.1.1.

Preglednica 3: Sprememba lokacije gladinskega vrlišča za različne primer dviga dna (negativna vrednost pove, da se je vrlišče pomaknilo k pregradi)

Table 3: Changes of water level pivot point for different river bed states (negative value represents moving of pivot point towards the dam)

Manningov koeficient - $n_g = 0.03$		
dvig dna (m)	stacionaža gladinskega vrlišča (m)	odstopanje od izhodišča (m)
Izhodišče: 0	6675	0,0
0,25	6475	- 200
0,5	6325	- 350
0,75	6150	- 525
1	5975	- 700
1,5	5625	- 1050

Iz opravljenih izračunov, ki so podani v preglednici 3, je razvidno, da se z dvigovanjem dna akumulacijskega bazena stacionaža gladinskega vrlišča spreminja, in sicer se gladinsko vrlišče približuje pregradnemu objektu (glej Priloga 6). Približevanje gladinskega vrlišča pregradi ima za posledico višje gladine vode v korenu akumulacije in lahko tako negativno vpliva na poplavno varnost na območju akumulacijskega bazena. Grafični prikaz lokacij gladinskega vrlišča je podan še v Prilogi 6.

5.2.2 Lastnosti gladinskega vrlišča pri spremenjeni hidravlični hrapavosti

S spremembo morfologije akumulacijskega bazena lahko pričakujemo tudi spremembo koeficienta hrapavosti vzdolž bazena. Za osnovni primer je bil izbran koeficient hrapavosti kot Manningov koeficient velikosti 0,03. Lastnosti gladinskega vrlišča so bile preverjene še za Manningove koeficiente velikosti 0,02, 0,025, 0,035 in 0,4. Zapisati je potrebno še, da se s spremembo morfologije pričakuje zmanjšanje Manningovega koeficienta, saj se v akumulaciji odlagajo pretežno majhni fini delci, ki povzročajo manjšo hrapavost in zato vzdolž toka nastajajo manjše energijske izgube. Povečanje Manningovega koeficienta v akumulaciji je zato bolj teoretično in je bolj namenjeno ugotovitvi, kaj se dogaja z gladinskim vrliščem ob spremembi osnovnih pogojev. Teoretično bi sicer v akumulaciji lahko prišlo do povečanja Manningovega koeficienta, ki bi se lahko zgodil ob vdoru večje količine grobega materiala v akumulacijski bazen (plaz) ali z nastajanjem sipin in njihovim zaraščanjem. Takim situacijam se je potrebno že predhodno izogniti s spremljanjem dogajanja v okolju in primernim ukrepom ter načrtovanjem akumulacijskega bazena.

Izračuni so bili izvedeni za razpon pretokov od 500 m³/s do začetka prostega prelivanja pri 3350 m³/s, s korakom povečanja pretokov po 50 m³/s. Pri izračunih je bilo upoštevano, da pri vseh računskih primerih uporabimo isto denivelacijsko krivuljo, ki je bila določena v poglavju 5.1.1.

Preglednica 4: Sprememba lokacije gladinskega vrlišča za različne koeficiente hrapavosti**Table 4: Changes of water level pivot point for different Manning coefficient**

Dvig dna = 0 m		
Manningov koeficient	stacionaža gladinskega vrlišča (m)	odstopanje od izhodišča (m)
0.02	8275	+ 1600
0.025	7325	+ 650
Izhodišče: 0.03	6675	+ 0,0
0.035	6075	- 600
0.04	5575	- 1100

Opomba: + predstavlja pomik vrlišča gorvodno in – pomik vrlišča dolvodno glede na začetno stanje

Izračuni so pokazali – glej preglednico 4, da ima sprememba hidravlične hrapavosti različne vplive na lokacijo gladinskega vrlišča, ki pa so pričakovani. Manjšanje koeficienta hidravlične hrapavosti povzroči nižanje gladin v akumulacijskem bazenu, zato se lokacija gladinskega vrlišča pomakne bolj gorvodno. Obenem ima to za posledico tudi povečanje varnosti obratovanj pregrade zaradi nižjih gladin vode v bazenu in korenu zaježbe. Povečanje koeficienta hrapavosti ima seveda nasprotni učinek. Gladine vode v bazenu se dvignejo in lokacija gladinskega vrlišča se zato pomakne bolj k pregradnemu objektu. Obenem se gladine vode vzdolž bazena dvignejo, kar povzroči zmanjšanje poplavne varnosti na območju (tako na območju akumulacije kot v korenu zaježbe). Grafični prikaz lokacij gladinskega vrlišča je podan še v Prilogi 7.

5.2.3 Določitev lastnosti gladinskega vrlišča pri spremenjeni morfologiji bazena

V naravnem okolju ne moremo pričakovati, da se bo s spremembami morfologije bazena spreminjala samo višina dna oz. hidravlična hrapavost. Spremembe morfologije bazena so posledice naravnega procesa sedimentacije, ki sočasno vpliva na spremembe dna in hidravlične hrapavosti vzdolž vodotoka.

Zaradi tega je bilo izvedenih tudi več izračunov, v katerih je bilo preverjeno, kako se spreminja lokacija gladinskega vrlišča, če obenem upoštevamo kombinaciji, tj. spremembo dna in spremembo hidravlične hrapavosti. Z izračuni so bile preverjene vse variante spremembe dviga dna in hidravlične hrapavosti, ki jih pričakujemo (glej poglavje 5.2.1). Menimo, da bomo s tako izbranimi variantami dobili ustrezn pregled, kako se obnaša lokacija gladinskega vrlišča ob morfoloških spremembah. Izračuni so bili izvedeni za razpon pretokov od 500 m³/s do začetka prostega prelivanja pri 3350 m³/s, s korakom povečanja pretokov po 50 m³/s.

V nadaljevanju so podane preglednice 5 do 8, ki pokažejo, kako se spreminja lokacija gladinskega vrlišča glede na izhodiščno stanje, ki je podano v poglavju 5.2.2 (preglednica 3). Vsaka izmed preglednic poda informacijo o spremembah vrlišča za izbrano hidravlično hrapavost in vse različne dvige dna. Grafični prikaz izračunov je narejen v Prilogi 8 do Priloge 11.

Preglednica 5: Sprememba lastnosti gladinskega vrtilišča za primere dviga dna in $n_g = 0,02$

Table 5: Changes of water level pivot point for different river bed states and $n_g = 0,02$

Manningov koeficient - $n_g = 0.02$		
dvig dna (m)	stacionaža gladinskega vrtilišča (m)	odstopanje od izhodišča (m) – glej preglednica 3
0	8275	+ 1600
0.25	8075	+ 1400
0.5	7900	+ 1225
0.75	7700	+ 1025
1	7500	+ 825
1.5	7100	+ 425

Preglednica 6: Sprememba lastnosti gladinskega vrtilišča za primere dviga dna in $n_g = 0,025$

Table 6: Changes of water level pivot point for different river bed states and $n_g = 0,025$

Manningov koeficient - $n_g = 0.025$		
dvig dna (m)	stacionaža gladinskega vrtilišča (m)	odstopanje od izhodišča (m) – glej preglednica 3
0	7325	+ 650
0.25	7200	+ 525
0.5	7025	+ 350
0.75	6850	+ 175
1	6650	- 25
1.5	6275	- 400

Preglednica 7: Sprememba lastnosti gladinskega vrtilišča za primere dviga dna in $n_g = 0,035$

Table 7: Changes of water level pivot point for different river bed states and $n_g = 0,035$

Manningov koeficient - $n_g = 0.035$		
dvig dna (m)	stacionaža gladinskega vrtilišča (m)	odstopanje od izhodišča (m) – glej preglednica 3
0	6075	- 600
0.25	5900	- 775
0.5	5750	- 975
0.75	5600	- 1075
1	5425	- 1250
1.5	5100	- 1575

Preglednica 8: Sprememba lastnosti gladinskega vrtilišča za primere dviga dna in $n_g = 0,04$

Table 8: Changes of water level pivot point for different river bed states and $n_g = 0,04$

Manningov koeficient - $n_g = 0.04$		
dvig dna (m)	stacionaža gladinskega vrtilišča (m)	odstopanje od izhodišča (m) – glej preglednica 3
0	5575	- 1100
0.25	5425	- 1250
0.5	5275	- 1400
0.75	5125	- 1550
1	4975	- 1700
1.5	4675	- 2000

Opomba: + predstavlja pomik vrtilišča gorvodno in – pomik vrtilišča dolvodno glede na začetno stanje

Iz opravljenih izračunov je za vse obravnavane primere razvidno, da imajo morfološke spremembe v akumulaciji vpliv na lokacijo gladinskega vrlišča. S spreminjanjem kote dna in hidravlične hrapavosti v izračunih je takoj prišlo do vpliva na lokacijo vrlišča, ki se je lahko spreminjal tako v pozitivni kot negativni smeri. Med izračunanimi rezultati sta zanimiva predvsem primera, kjer je bil Manningov koeficient izbran manjši kot 0,03. Iz izračunov je razvidno, da zmanjšanje koeficienta hrapavosti povzroči večjo pretočnost in s tem nižje globine pri istem pretoku v bazenu, zato se lokacija gladinskega vrlišča pomakne bolj gorvodno. Medtem ko ima dvig dna nasprotni vpliv in povzroča pomik lokacije gladinskega vrlišča proti pregradi. Gre za dva nasprotujoča si vpliva, ki se lahko medsebojno izenačita. Tako je recimo lokacija gladinskega vrlišča pri Manningovem koeficientu 0,025 in dvigu dna za 1 meter na enaki lokaciji, kot je bila določena za osnovni geometrijski primer (poglavje 5.1.1). S tem smo tudi potrdili pričakovan vpliv procesa staranja akumulacijskega bazena (glej poglavje 3.5.4).

V primerih, kjer je izbrani Manningov koeficient višji od 0,03, ima sprememba Manningovega koeficienta enak vpliv kot dvig dna. Zato je pomik lokacije gladinskega vrlišča proti pregradi še izrazitejši.

5.2.4 Preverba ohranjanja konstantnega volumna v bazenu pri spremenjeni morfologiji bazena

Ker v nalogi preverjamo, kakšen vpliv ima premik lokacije gladinskega vrlišča na način obratovanja s konstantnim volumnom, je bilo z izračuni preverjeno tudi ohranjanje konstantnega volumna vode v primeru morfoloških sprememb v akumulacijskem bazenu. V tem trenutku moramo še enkrat poudariti, da obratovanje po pretoku s konstantnim volumnom ne pomeni, da moramo ves čas v akumulaciji ohranjati enak volumen vode. Zaradi neenakomernosti prečnih profilov naravnih strug to žal ni možno. Zato predvidimo, da bomo obratovali po pretoku s konstantnim volumnom takrat, ko bomo dosegli, da se volumen vode v akumulaciji ohranja oz. bo volumen vode naraščal (glej poglavje 3.5.2).

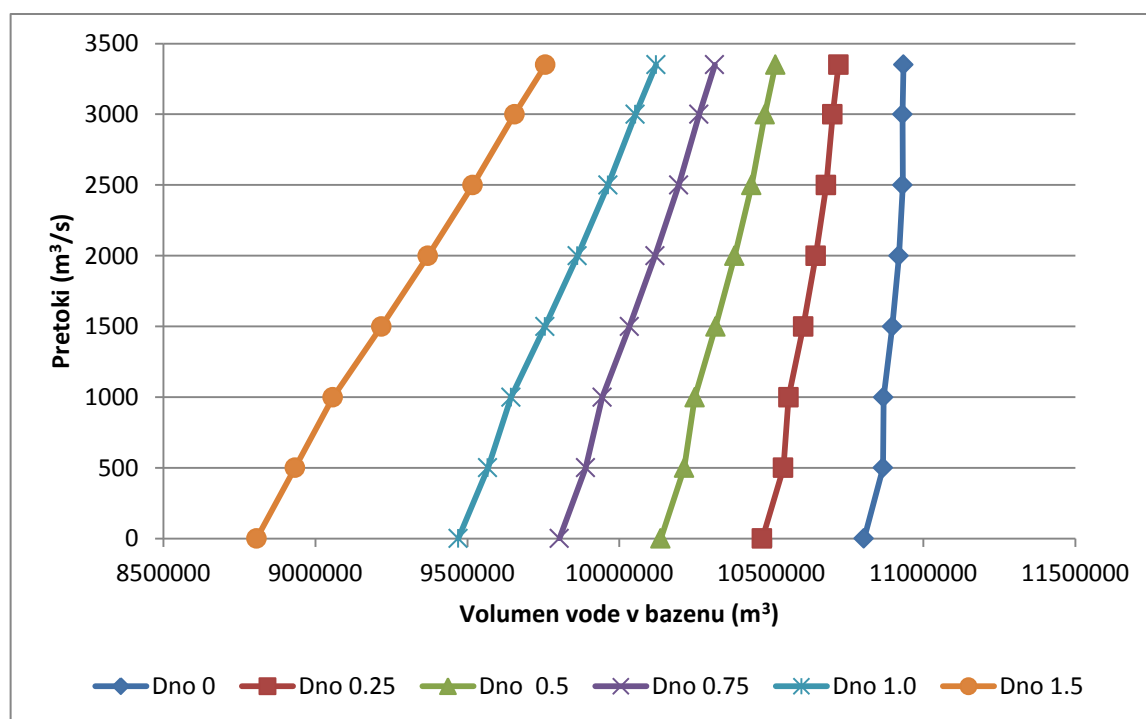
V normalnih okoliščinah se v bazenu sočasno spreminja nivo dna in hidravlična hrapavost. Pričakujemo lahko, da se bo v splošnem dno bazena zaradi odlaganja sedimentov dvigovalo, obenem pa se bo zaradi odlaganja finih delcev na dno bazena hidravlična hrapavost zmanjšala. Zaradi opisane domneve je bil izveden izračun volumna vode v bazenu samo za dva različna primera hidravlične hrapavosti (za Manningov koeficient 0,025 in 0,03) in vse privzete spremembe dviga dna. Ocenjeno je bilo, da sta tako izbrana primera najbolj reprezentativna in lahko tako najbolj prikažemo dogajanje v bazenu v naravnih razmerah, ki nas tudi najbolj zanimajo. Pri vseh izračunih je bila upoštevana osnovna denivelacijska krivulja, ki je bila določena v poglavju 5.1.1.

Izračunani podatki so podani v nadaljevanju. Dodatna analiza volumnov vode je podana še v Prilogi 13.

Preglednica 9: Volumen vode v akumulacijskem bazenu za različne pretoke in različne dvige dna pri konstantnem Manningovem koeficientu 0,03

Table 9: Volume of water in reservoir for different flows, different river bed states and Manning coefficient = 0,03

Manningov koeficient - $n_g = 0.03$						
Q (m ³ /s)	Volumen (m ³) (Dvig dna 0 m)	Volumen (m ³) (Dvig dna 0.25m)	Volumen (m ³) (Dvig dna 0.5m)	Volumen (m ³) (Dvig dna 0.75m)	Volumen (m ³) (Dvig dna 1.0m)	Volumen (m ³) (Dvig dna 1.5m)
0	10.804.950	10.470.350	10.136.330	9.802.880	9.470.080	8.806.450
500	10.867.700	10.539.660	10.213.540	9.889.330	9.567.580	8.933.190
1000	10.869.240	10.557.050	10.248.570	9.943.930	9.643.750	9.057.920
1500	10.898.380	10.605.210	10.316.850	10.033.530	9.755.600	9.217.340
2000	10.919.650	10.646.760	10.379.460	10.117.800	9.862.330	9.370.630
2500	10.932.640	10.680.800	10.435.210	10.195.840	9.963.060	9.517.830
3000	10.931.970	10.702.010	10.478.990	10.262.410	10.052.900	9.655.300
3350	10.935.100	10.721.140	10.514.050	10.314.070	10.121.000	9.757.170

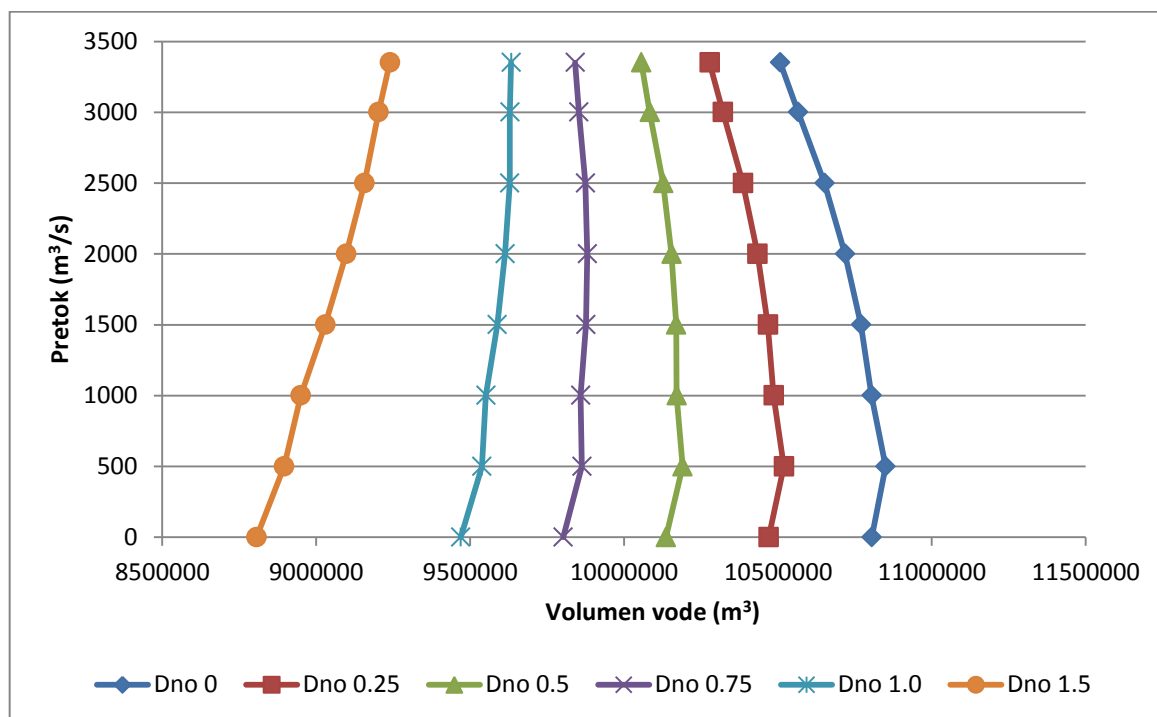


Slika 44: Grafični prikaz sprememb volumnov vode v bazenu glede na spremembo pretoka in dviga dna pri konstantnem Manningovem koeficientu 0.03

Figure 44: Graphic display of changes in volume of water in reservoir for changes of flow and different states of river bed at a constant Manning coefficient 0,03

Preglednica 10: Volumen vode v akumulacijskem bazenu za različne pretoke in različne dvige dna pri Manningovem koeficientu 0,025**Table 10: Volume of water in reservoir for different flows, different river bed states and Manning coefficient = 0,025**

Manningov koeficient – $n_g = 0.025$						
Q (m ³ /s)	Volumen (m ³) (Dvig dna 0 m)	Volumen (m ³) (Dvig dna 0.25m)	Volumen (m ³) (Dvig dna 0.5m)	Volumen (m ³) (Dvig dna 0.75m)	Volumen (m ³) (Dvig dna 1.0m)	Volumen (m ³) (Dvig dna 1.5m)
0	10.804.950	10.470.350	10.136.330	9.802.880	9.470.080	8.806.450
500	10.849.910	10.519.590	10.190.780	9.863.650	9.538.650	8.896.040
1000	10.804.700	10.486.290	10.171.110	9.859.370	9.551.640	8.949.730
1500	10.770.200	10.467.790	10.169.770	9.876.470	9.588.490	9.029.180
2000	10.718.190	10.433.960	10.154.720	9.881.310	9.613.900	9.097.690
2500	10.651.790	10.386.760	10.127.840	9.875.000	9.628.840	9.156.580
3000	10.566.050	10.321.740	10.084.160	9.853.370	9.629.360	9.202.840
3350	10.507.590	10.278.560	10.056.570	9.841.620	9.633.440	9.239.750

**Slika 45: Grafični prikaz sprememb volumnov vode v bazenu glede na spremembo pretoka in dviga dna pri konstantnem Manningovem koeficientu 0.025****Figure 45: Graphic display of changes in volume of water in reservoir for changes of flow and different states of river bed at a constant Manning coefficient 0,025**

Izračuni pokažejo, da se v primeru samo dviga dna v bazenu način obratovanja po principu pretoka s stalnim volumnom ohranja. Zanimivo je, da se z višanjem pretokov v bazenu volumen vode ohranja oz. rahlo narašča (slika 44). Izračuni pokažejo, da če bi se v akumulaciji pojavil samo dvig dna, brez spremembe hidravlične hrapavosti, se način izbranega obratovanja ohranja. Menimo, da gre za bolj teoretični primer, saj odlaganje sedimentov poleg dviga dna vedno povzroči tudi spremembo hidravlične hrapavosti.

Drugačno situacijo imamo v drugem primeru, ko smo poleg sprememb dna bazena upoštevali tudi spremembe koeficienta hrapavosti. Ugotovljeno je, da pri upoštevanju obeh sprememb volumni vode pri manjših dvigih dna pričnejo padati in se konstantni volumen vode v bazenu ne ohranja več (slika 45). Razlog je v prevladujočem vplivu koeficienta hrapavosti, ki zniža gladine vode vzdolž celotnega bazena. Od določenega stanja dna naprej je vpliv dviga dna v bazenu spet prevladujoč (dvig dna višji od 1 metra) in zopet pride do ohranjanja konstantnega volumna vode v bazenu. Iz izračunov je torej razvidno, da se konstantni volumen s pojavom morfoloških sprememb v bazenu ves čas ne ohranja več. Gre za primer, ki ga lahko pričakujemo tudi v naravnih razmerah. Da se bomo prilagodili spremembam, moramo zato pristopiti k iskanju rešitve, s katero bomo zagotovili ohranjanje izbranega načina obratovanja.

5.2.5 Optimizacija denivelacijske krivulje

Z izračuni v predhodnih poglavjih smo ugotovili, da se zaradi morfoloških sprememb v akumulacijskih bazenih spreminja lokacija gladinskega vrtilišča. Sama sprememba lokacije gladinskega vrtilišča ni kritična, vendar smo ugotovili, da ima lahko premik lokacije gladinskega vrtilišča vpliv na gladinska stanja in bolj pomembno na zmožnost ohranjanja konstantnega volumna v akumulaciji. Ob morfoloških spremembah ni več možno zagotoviti načina obratovanja po pretoku s konstantnim volumnom, če še vedno obratujemo po osnovni denivelacijski krivulji (glej poglavje 5.1.1). Kombinacija spremembe hidravlične hrapavosti in manjšega dviga dna povzroči padec gladinskih stanj in s tem padec volumna vode v akumulacijskem bazenu, kar pomeni, da se način obratovanja po pretoku s konstantnim volumnom ne ohranja več. Trdimo lahko tudi, da manjšanje volumna vode v akumulacijskem bazenu celo poslabšuje razmere dolvodno od pregrade. Zaradi manjšanja volumna v akumulacijskem bazenu se med prehodom visokovodnega vala pojavi dodaten iztok iz akumulacije, ki se doda k pretokom vala, kar lahko izrazito negativno vpliva na poplavno varnost dolvodnih območij (glej 3.5.4).

Da bi lahko kljub morfološkim spremembam v akumulacijskem bazenu zagotovili ustrezno poplavno varnost in obenem način obratovanja po pretoku s konstantnim volumnom, je potrebno izvesti optimizacijo obratovanja. Optimizacija obratovanja je izvedena s posodobitvijo denivelacijske krivulje. Nova krivulja mora biti določena na način, da se bo kljub nižanju gladin, ki so posledica spremembe koeficienta hrapavosti, ohranjal volumen vode v bazenu, kar nam omogoča ohranjanje predpisanega načina obratovanja.

Optimizacija denivelacijske krivulje (glej Priloga 12) je izdelana z izvedbo serije izračunov s stalnim tokom pri kateri višamo koto zgornje vode pri višjih pretokih na pregradi in pri tem preverjamo, kako se obnašajo gladinska stanja v akumulaciji (postopek optimizacije denivelacijske krivulje je enak postopku določitve nove DK – glej poglavje 3.2.2). Zaradi zmanjšanja hidravlične hrapavosti v akumulaciji se v splošnem zmanjšajo gladinska stanja na območju celotne akumulacije, kar nam omogoča višanje kote zgornje vode pri višjih pretokih. Pri tem seveda ne moremo preseči začetne višine zgornje vode na pregradi

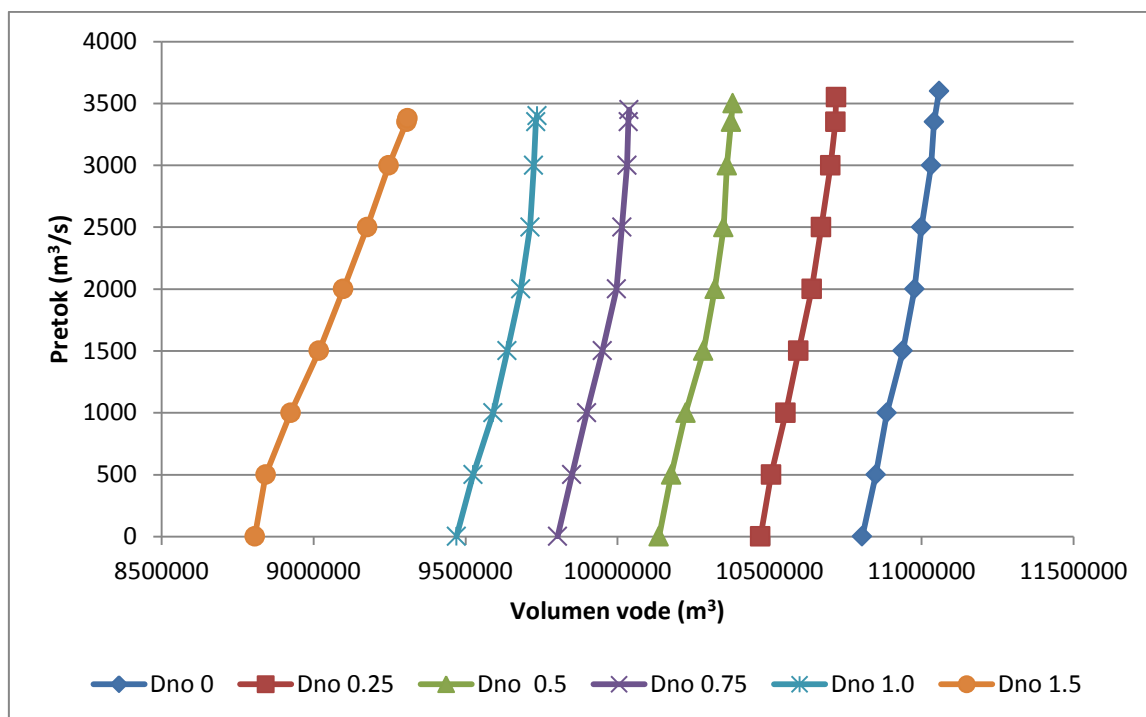
(normalne obratovalne višine). S poizkušanjem se nato določijo takšna gladinska stanja, ki omogočajo ohranjanje konstantnega volumna. Ker smo omejeni z začetno višino zgornje vode, se nam seveda lahko zgodi, da na lokaciji pregrade ne bomo uspeli dvigniti kote zgornje vode na tako višino, ki bi omogočala, da bi se gladinsko vrtilišče pomaknilo v prvotno lokacijo.

Za potrebe izračunov je bilo izdelanih več denivelacijskih krivulj, ki so za vsak računski primer (sprememba hidravlične hrapavosti in določen dvig dna) zagotavljale ohranjanje konstantnega volumna v akumulacijskem bazenu. Izračuni so prikazani v nadaljevanju.

Preglednica 11: Volumen vode v akumulacijskem bazenu (m^3) za različne pretoke in različne dvige dna pri konstantnem Manningovem koeficientu 0,025 in optimiranih denivelacijskih krivuljah

Table 11: Volume of water in reservoir for different flows, different river bed states, Manning coefficient = 0,025 and optimized operational curve

Q (m^3/s)	Volumen (m^3) (Dvig dna 0 m)	Q (m^3/s)	Volumen (m^3) (Dvig dna 0.25 m)	Q (m^3/s)	Volumen (m^3) (Dvig dna 0.5 m)
0	10.804.950	0	10.470.350	0	10.136.330
500	10.849.910	500	10.505.590	500	10.176.870
1000	10.886.220	1000	10.553.430	1000	10.224.080
1500	10.938.910	1500	10.595.710	1500	10.282.900
2000	10.977.040	2000	10.639.250	2000	10.320.300
2500	11.000.030	2500	10.670.220	2500	10.348.910
3000	11.031.860	3000	10.700.970	3000	10.359.850
3350	11.041.730	3350	10.717.160	3350	10.373.740
3600	11.058.300	3550	10.719.300	3500	10.378.790
Q (m^3/s)	Volumen (m^3) (Dvig dna 0.75 m)	Q (m^3/s)	Volumen (m^3) (Dvig dna 1.0 m)	Q (m^3/s)	Volumen (m^3) (Dvig dna 1.5 m)
0	9.802.880	0	9.470.080	0	8.806.450
500	9.849.840	500	9.524.890	500	8.842.620
1000	9.898.970	1000	9.590.700	1000	8.924.670
1500	9.950.320	1500	9.636.810	1500	9.017.510
2000	9.996.940	2000	9.681.670	2000	9.097.690
2500	10.014.760	2500	9.712.410	2500	9.176.320
3000	10.031.210	3000	9.724.530	3000	9.247.250
3350	10.035.500	3350	9.731.400	3350	9.305.910
3450	10.038.320	3400	9.735.540	3380	9.309.300



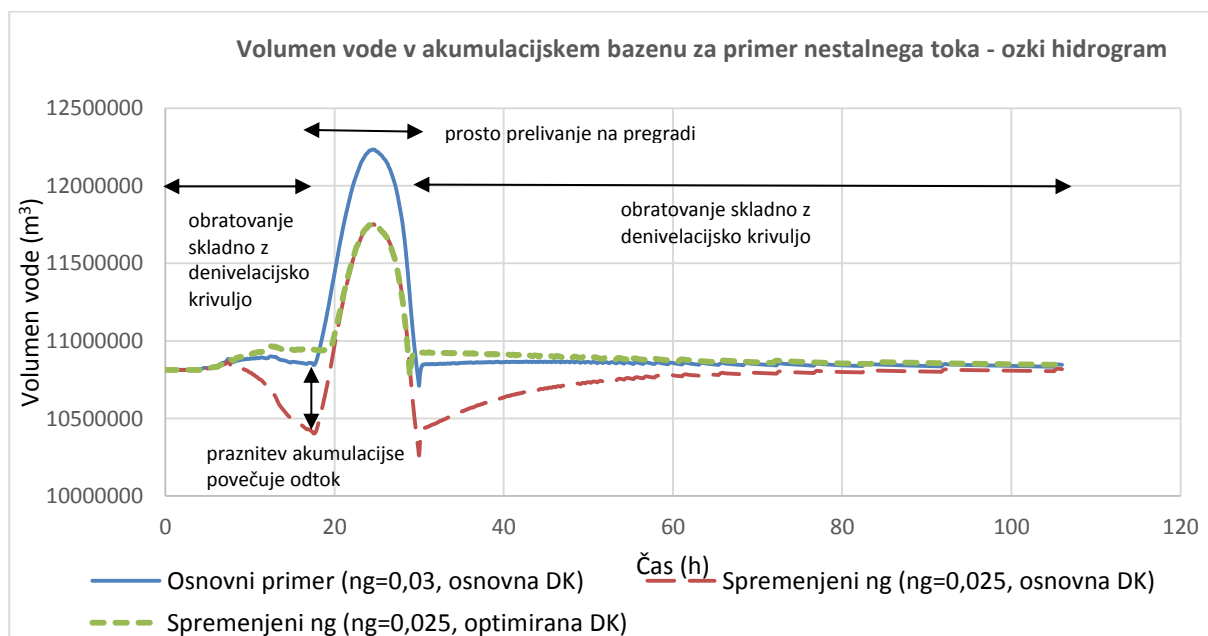
5.3 Lastnosti gladinskega vrlišča za izbrani primer spremenjene morfologije – nestalni tok

Opravljeni izračuni za primere stalnega toka so pokazali, da ima sprememba hidravlične hrapavosti bolj prevladujoč vpliv kot dvig dna akumulacijskega bazena. Za primer nestalnega toka so bili zato opravljeni še izračuni s spremenjeno hidravlično hrapavostjo ($n_g = 0,025$) in brez dviga dna v akumulacijskem bazenu. Izračuni so bili opravljeni tako za način obratovanja po osnovni denivelacijski krivulji kot za način obratovanja po optimirani denivelacijski krivulji. Tak način dela je bil izbran zaradi lažje primerjave rezultatov med posameznimi izračuni.

Z opravljenimi izračuni smo želeli preveriti, kaj se dogaja z volumnom vode in pretoki na vhodu in iztoku iz akumulacijskega bazena med prehodom poplavnega vala po akumulaciji z različno hidravlično hrapavostjo in pri različnem obratovanju (osnovni in optimirani denivelacijski krivulji). Izvedeni so bili izračuni za dva primera oblike poplavnega vala, in sicer za široki in ozki hidrogram (glej poglavje 5.1.3).

Z izračuni je bila najprej preverjena lokacija oblikovanja gladinskega vrlišča. Za primer s spremenjeno hidravlično hrapavostjo v akumulacijskem bazenu in obratovanjem po osnovni denivelacijski krivulji se lokacija tako za ozki in široki hidrogram oblikuje v stacionaži 6825 m (glej poglavje 5.1.3). V primeru, ko v izračunih upoštevamo optimirano denivelacijsko krivuljo, se gladinsko vrlišče za ozki hidrogram oblikuje v stacionaži 7000 m, za široki hidrogram pa v stacionaži 6950 m (glej Priloga 14).

Neujemanje lokacije vrlišča je delno posledica določitve optimizirane denivelacijske krivulje, delno pa različnih pretokov, ki v primeru nestalnega toka prehajajo po akumulaciji. Med prehajanjem visokovodnega vala je zaradi časovnega zamika drugačen pretok v akumulaciji in v korenu zajeze. Ta razlika pretokov pa vpliva na lokacijo gladinskega vrlišča.



Slika 47: Sprememba volumna vode v akumulaciji za različna primera hidravlične hrapavosti in različne primere denivelacijske krivulje – ozki hidrogram

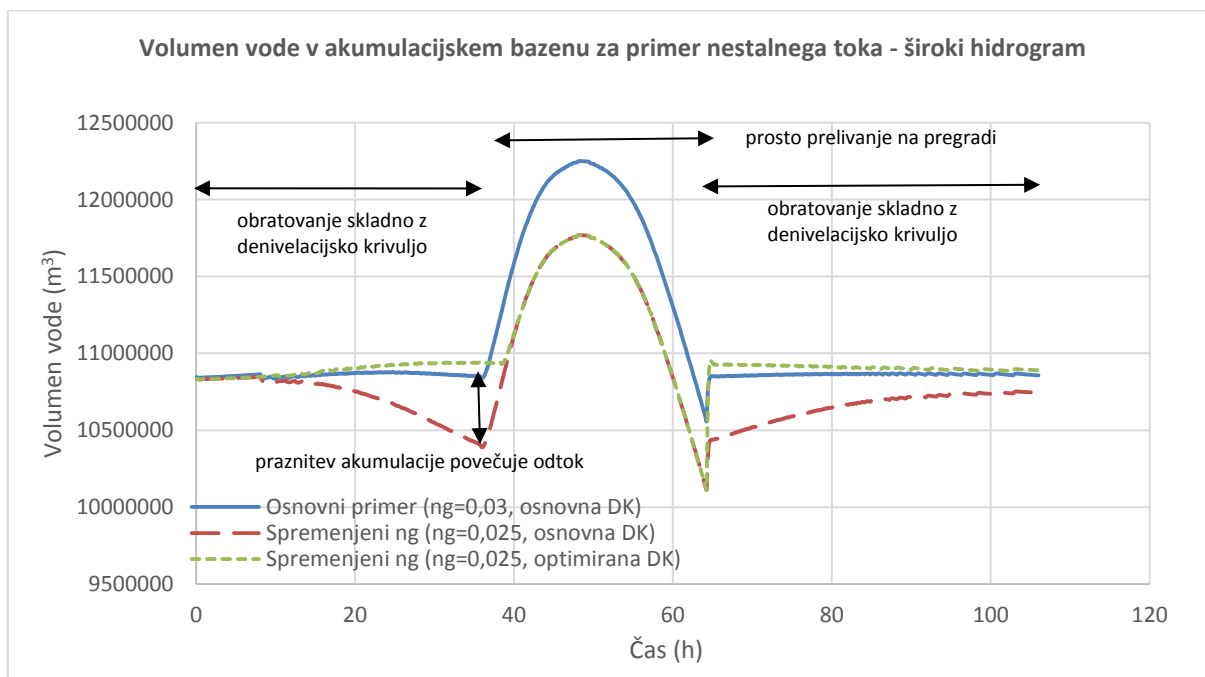
Figure 47: Changes of volume of water in reservoir for different Manning coefficient and different operational curves - narrow hydrograph

Preglednica 12: Prikaz vtokov in iztokov iz akumulacijskega bazena za različna primerja hidravlične hrapavosti in različna primerja denivelacijske krivulje v izbranih časovnih korakih – ozki hidrogram

Table 12: Inflow and outflow from reservoir for different Manning coefficient and different operational curves - narrow hydrograph

Čas (h)	Osnovni primer (ng=0,03, osnovna DK)		Spremenjeni ng (ng=0,025, osnovna DK)		Spremenjeni ng (ng=0,025, optimirana DK)	
	vtok (m ³ /s)	iztok (m ³ /s)	vtok (m ³ /s)	iztok (m ³ /s)	vtok (m ³ /s)	iztok (m ³ /s)
0	125,69	124,78	125,73	124,81	125,73	124,81
8	650,37	658,33	653,03	667,2	652,18	657,05
10	1220,32	1224,47	1222,36	1236,78	1222,22	1219,16
12,8	2229,2	2234,23	2231,45	2262,43	2231,75	2234,48
15	2912,63	2907,92	2913,32	2917,07	2913,39	2917,26
20	3706,72	3624,14	3707,38	3622,01	3707,48	3650,69
24	3998,5	3985,58	3998,64	3986,31	3998,64	3974,83
25	3976,91	3985,74	3976,83	3982,89	3976,83	3981,15
30	3206,7	3319,87	3205,83	3325,09	3205,46	3211,01
35	2585,34	2589,73	2584,91	2583,48	2584,88	2584,93
40	2083,15	2088,04	2082,77	2083,63	2082,73	2079,27
45	1736,71	1739,75	1736,44	1736,96	1736,5	1741,6
50	1473,76	1475,11	1473,49	1472,63	1473,6	1477,95
55	1252,73	1257,39	1252,49	1256,28	1252,47	1254,77
60	1103,9	1107,06	1103,72	1106,27	1103,89	1105,31
105	630,55	630,83	630,5	630,66	630,5	630,66

LEGENDA: - obratovanje skladno z DK, - prosto prelivanje



Slika 48: Sprememba volumna vode v akumulaciji za različna primerja hidravlične hrapavosti in različne primere denivelacijske krivulje – široki hidrogram

Figure 48: Changes of volume of water in reservoir for different Manning coefficient and different operational curves - wide hydrograph

Preglednica 13: Prikaz vtokov in iztokov iz akumulacijskega bazena za različna primerja hidravlične hrapavosti in različna primerja denivelacijske krivulje v izbranih časovnih korakih – široki hidrogram

Table 13: Inflow and outflow from reservoir for different Manning coefficient and different operational curves - wide hydrograph

Čas (h)	Osnovni primer (ng=0,03, osnovna DK)		Spremenjeni ng (ng=0,025, osnovna DK)		Spremenjeni ng (ng=0,025, optimirana DK)	
	vtok (m ³ /s)	iztok (m ³ /s)	vtok (m ³ /s)	iztok (m ³ /s)	vtok (m ³ /s)	iztok (m ³ /s)
0	378,58	376,8	378,36	376,77	378,58	376,8
10	571,5	570,6	570,99	569,15	570,82	569,83
15	898,28	903,66	897,54	900,27	898,3	909,13
20	1427,05	1439,23	1426,36	1434,23	1427,13	1422,02
25	2013,86	2028,6	2013,33	2022,07	2013,89	2022,47
30	2652,15	2651,82	2651,67	2645,55	2652,17	2646,18
34,25	3168,81	3176,81	3169,23	3183,62	3169,25	3162,62
35	3253,72	3261,32	3253,34	3255,24	3253,75	3259,58
40	3743,83	3694,35	3743,42	3682,91	3743,85	3699,71
45	3967,35	3948,04	3967,24	3946,33	3967,35	3948,04
49	3994,2	3994,9	3994,22	3995,18	3994,2	3994,9
50	3982,17	3983,48	3982,23	3984,23	3982,17	3983,49
55	3853,28	3870,81	3853,48	3871,86	3853,29	3870,81
60	3530,8	3573,88	3531,17	3575,33	3530,8	3573,88
65	3134,07	3130,26	3134,18	3130,41	3133,74	3156,51
70	2721,49	2710,77	2721,77	2715,1	2721,47	2728,47
80	2030,37	2018,32	2030,61	2021,37	2030,31	2033,63
100	1426,47	1427,55	1426,57	1428,18	1426,45	1427,46
120	1213,38	1213,91	1213,44	1214,28	1213,37	1213,88
164	911	911,27	911,05	911,49	911	911,26

LEGENDA: - obratovanje skladno z DK, - prosto prelivanje

Opravljeni izračuni za primer nestalnega toka so potrdili izračune, opravljene za primer stalnega toka. Sprememba hidravlične hrapavosti v akumulacijskem bazenu in obratovanje po nespremenjeni denivelacijski krivulji (osnovni DK) v bazenu povzroči manjšanje volumna vode. Dotok vode iz bazena se zato v naraščajočem delu hidrograma poplavnega vala še poveča in že k tako visokim pretokom še dodaja dodatni pretok. Povečanje pretoka sicer ni veliko (do cca 30 m³/s pri ozkem hidrogramu in cca 15 m³/s pri širokem hidrogramu), vendar je zaradi zagotavljanja poplavnega varnosti dolvodno od pregrade vsako dodajanje pretoka v naraščajoči veji poplavnega vala nedopustno. Problematično je predvsem to, da iz akumulacijskega bazena spuščamo več vode, kot pa jo v akumulacijo doteka.

Situacija se spremeni, ko v izračunih uporabimo optimirano denivelacijsko krivuljo, ki je upoštevala spremembo hidravlične hrapavosti. S tem dosežemo, da se v akumulacijskem bazenu še vedno ohranja konstantni volumen vode oz. volumen rahlo narašča (glej slika 47 in 48). Z optimizacijo tudi zagotovimo, da izenačimo vtoke in iztoke iz akumulacijskega bazena, kar nam zagotovi, da k visokovodnemu valu ne dodajamo več dodatnih pretokov. Negativna posledica tega je pohitritev konice visokovodnega vala, ki jo povzročimo z izenačitvijo pretokov na vtoku in iztoku iz bazena.

6.0 HIDRAVLIČNO MODELIRANJE RAZMER HE BOŠTANJ

6.1 Umerjanje in verifikacija modela ter analiza računske negotovosti

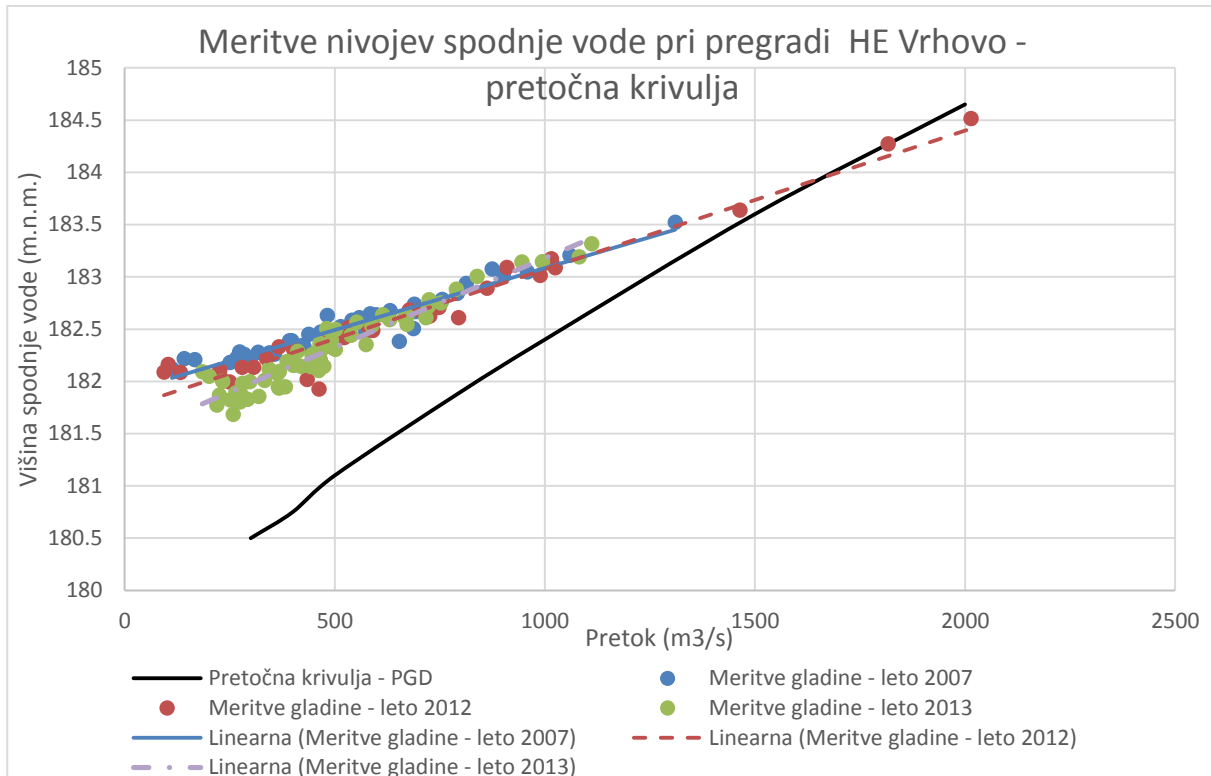
6.1.1 Analiza merjenih podatkov

V poglavju 4.3.5 so opisana merilna mesta, na katerih se na območju modela HE Boštanj izvajajo meritve gladin. Vsekakor lahko trdimo, da imamo za dobro izvedbo umerjanja na voljo premalo kakovostnih podatkov. Problematično je tudi to, da so meritve gladin spodnje in zgornje vode podvržene vplivom, ki izhajajo iz rednega obratovanja hidroelektrarn (proizvodnji električne energije) in niso odvisne samo od pretoka, ki prihaja v akumulacijski bazen. Teoretično bi se kota gladine zgornje in spodnje vode pred pregrado ohranjala ves čas, če bi objekt obratoval na način, da bi vso vodo, ki priteče do pregrade čez turbine oz. prelivnega polja, prevajal naprej. Zaradi potreb pri proizvodnji električne energije to ni možno. Zato gladina zgornje vode pred pregrado in spodnje vode pod pregrado nihata skladno s pretokom, ki teče čez turbine, in ne s pretokom, ki prihaja v akumulacijski bazen.

Ker ima redno obratovanje hidroelektrarn lahko velik vpliv na gladinska stanja v akumulacijskih bazenih, je bil opravljen razgovor z obratovalci hidroelektrarn na spodnji Savi. Glede na pridobljene podatke je bilo obratovanje v vseh letih od leta 2007 do leta 2013 identično. Obratovalci so potrdili, da se v bazenu HE Boštanj gladina vode v zaporednih letih pri enakih pretokih niža. Iz tega sklepajo, da so se morala v akumulacijskem bazenu HE Boštanj zgoditi določene spremembe, ki so povzročile spremembo gladinskih stanj. Menimo, da gre za spremembe, ki izhajajo iz morfoloških sprememb.

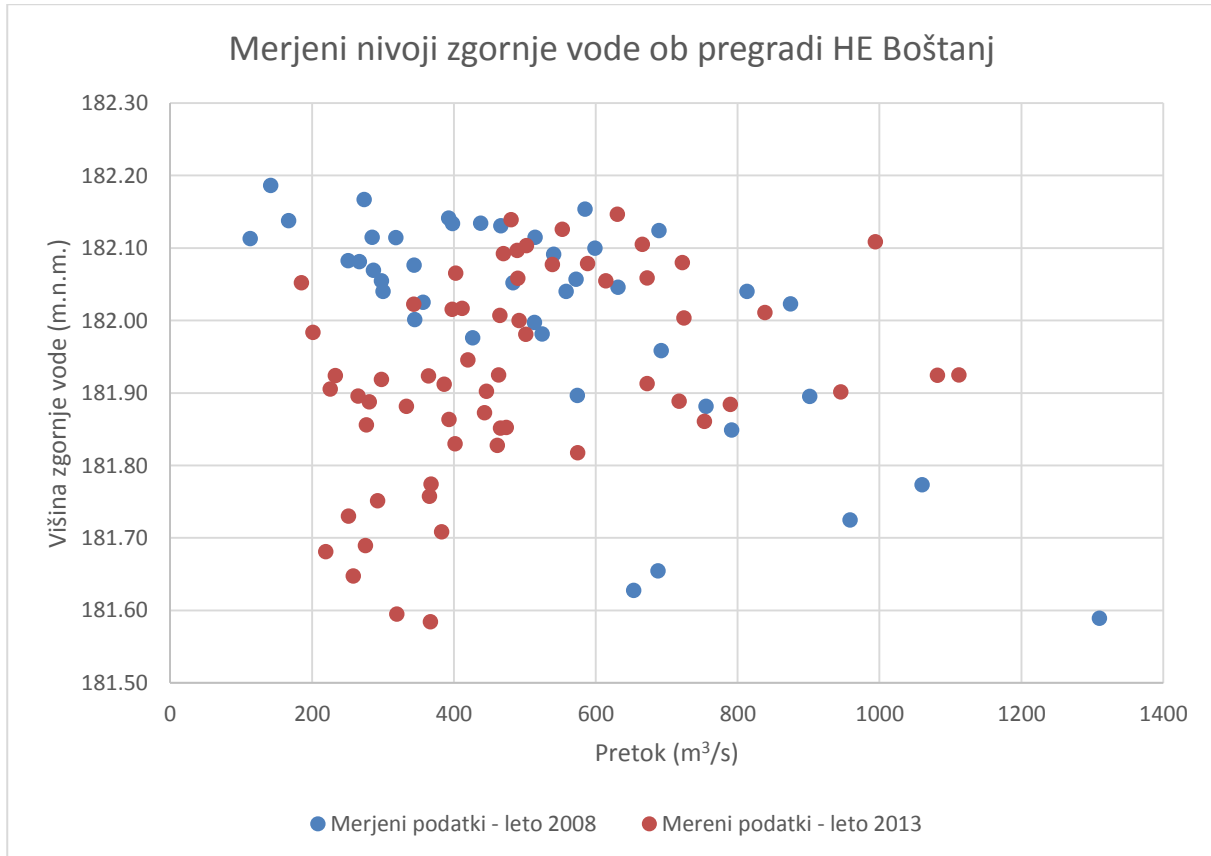
Zaradi tega je bila iz pridobljenih merjenih nivojev spodnje vode HE Vrhovo in zgornje vode HE Boštanj izvedena analiza meritev. Analiza je bila izvedena z namenom, da smo poizkusili že predhodno ugotoviti, kako se gladinska stanja v akumulacijskem bazenu HE Boštanj spreminjajo s časom (glede na morfološke spremembe v bazenu). Analizirani so bili podatki o merjenih gladinah iz leta 2008 in leta 2013. Gre za podatke, ki so časovno najbolj narazen.

Analiza nivojev spodnje vode HE Vrhovo pokaže (slika 49), da so nizki pretoki merjeni leta 2007 višji kot merjeni nizki pretoki iz leta 2012 in 2013. Nižanje gladinskih stanj je verjetno posledica morfoloških sprememb v bazenu HE Boštanj. Glede na primerjavo batimetrije iz leta 2007 in 2013 (glej poglavje 4.3.3) se je v tem času praktično v večjem delu bazena HE Boštanj dno dvignilo (glej Priloga 3). Nižanje gladin je zato lahko posledica le zmanjšanja hidravlične hrapavosti. Pri pretokih višjih od cca 800 m³/s so v letu 2012 in 2013 merjeni podatki sicer višji od merjenih podatkov leta 2007. Razlog za višanje gladin v letu 2012 in 2013 je verjetno posledica gradnje nove brvi okoli 2 kilometra dolvodno od HE Vrhovo (brv Breg–Šmarčna). Brv je bila zgrajena na nasipu, ki je posegel v strugo reke Save in pri višjih pretokih deluje kot prag, ki viša gladinska stanja gorvodno od objekta. Podatek so potrdili tudi upravljavci objekta HE Vrhovo.



Slika 49: Analiza meritev nivojev spodnje vode HE Vrhovo

Figure 49: Analysis of measurements of tail water levels for HPP Vrhovo



Slika 50: Analiza meritev zgornje vode HE Boštanj

Figure 50: Analysis of measurements of head water levels for HPP Boštanj

Podatki o zgornji vodi HE Boštanj (slika 50) so zelo podvrženi proizvodnemu režimu hidroelektrarne. Zaradi tega nimajo neke večje veljave, da bi na podlagi analize lahko sklepali o morfoloških spremembah v akumulacijskem bazenu. Analiza podatkov vseeno kaže trend padanja gladine pri nizkih pretokih. Iz predhodnega grafa (slika 50) je razvidno, da so nivoji vode pri enakih nizkih pretokih (do $600 \text{ m}^3/\text{s}$) leta 2013 nižji kot leta 2008. Sklepamo, da je to tudi posledica spremembe hidravlične hrapavosti in ne samo proizvodnega režima objekta, kar so potrdile tudi informacije obratovalcev HE Boštanj.

Iz izvedene analize merjenih podatkov in glede na pridobljene informacije lahko torej trdimo, da so se v akumulacijskem bazenu HE Boštanj zgodile nekatere morfološke spremembe, ki so znižale gladinska stanja. Trditev bo v nadaljevanju preverjena še z izračuni z izdelanim hidravličnim modelom.

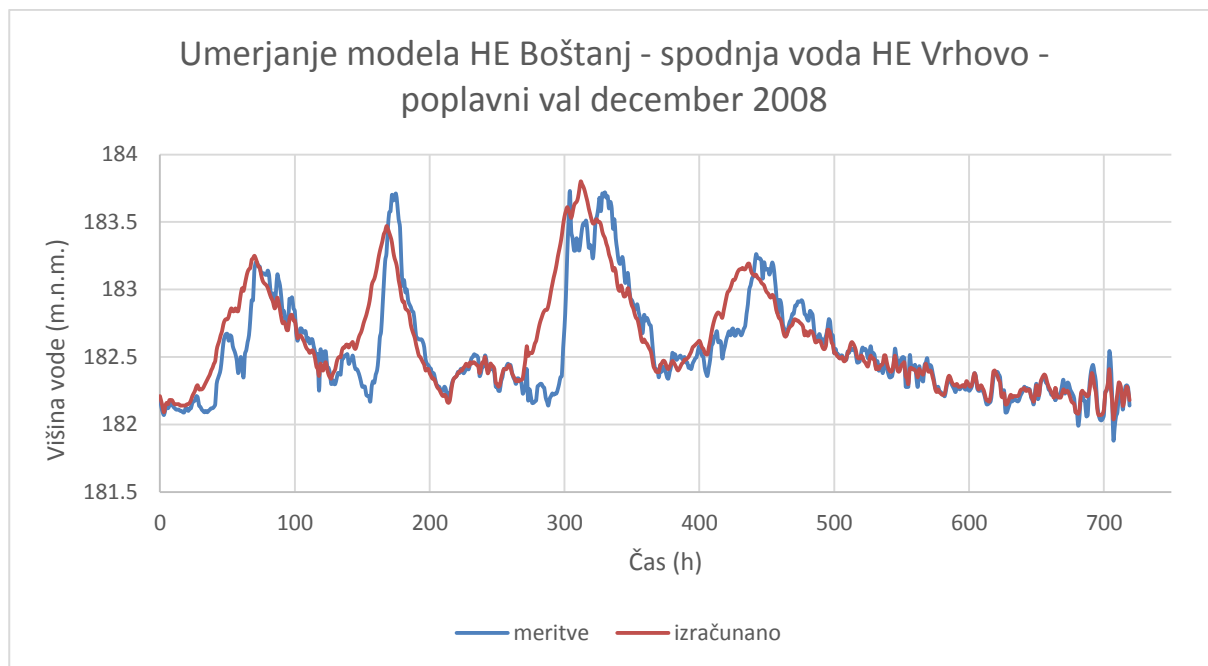
6.1.2 Umerjanje hidravličnega modela

Za hidravlični model HE Boštanj sta bili izdelani dve različni geometriji modela. Opis razlik med posameznima geometrijama je podan v poglavju 4.2.2. V splošnem sta bili obe geometriji umerjeni glede na poplavne valove, ki so bili izmerjeni časovno čim bližje meritvam batimetrije. Na tak način smo poizkušali dobiti čim bolj točne podatke o hidravlični hrapavosti v bazenu ob pričetku obratovanja HE Boštanj in po 5 letih obratovanja.

Zaradi slabih podatkov za umerjanje hidravličnega modela smo se odločili, da bomo umerjanje izvedli z izračunom nestalnega toka za različne visokovodne dogodke. Takoj je potrebno omeniti dve stvari. Za umerjanje hidravličnega modela smo imeli na voljo le arhivske podatke o merjenih pretokih z VP Hrastnik na Savi in VP Veliko Širje na Savinji. Arhivski podatki so podani kot povprečne dnevne vrednosti pretokov (en podatek za 24 ur). Podatki o meritvah gladin, ki so bili pridobljeni od obratovalcev objektov, so podani za manjši časovni korak (HE Vrhovo – merjene gladine na 1 uro, HE Boštanj in HE Arto-Blanca – merjene gladine na 15 minut). Zaradi tega lahko pričakujemo, da se pri hitrih spremembah pretokov podatki ne bodo najbolje ujemali. Poleg tega se je potrebno zavedati, da je prevajanje vode čez pregrade delno podvrženo tudi osebni presoji obratovalca, ki takrat upravlja z objektom. Zaradi tega lahko tudi s tega naslova pride do določenih odstopanj med merjenimi podatki in izračunanimi podatki.

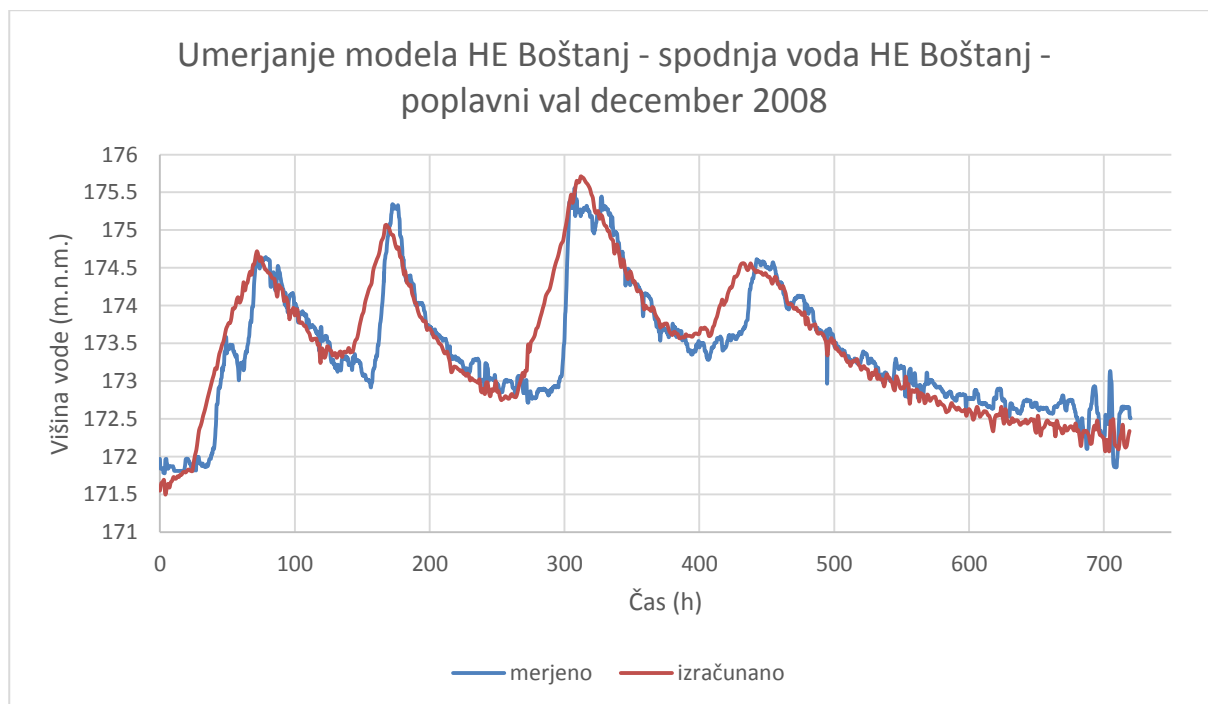
- a) Osnovno stanje HE Boštanj – umerjanje na poplavni val od 29. novembra 2008 do 28. decembra 2008

Osnovno stanje HE Boštanj predstavlja stanje takoj po gradnji objekta, ko se morfološki procesi v akumulacijskem bazenu še niso mogli zgoditi. Pregrada HE Arto-Blanca še ni bila zgrajena in zato z zaježbo ne vpliva na spodnjo vodo HE Boštanj. Kot zgornji robni pogoj se je uporabil hidrogram poplavnega vala in kot spodnji robni pogoj normalni tok dolvodno. Notranji robni pogoj so bile merjene gladine zgornje vode na pregradi HE Boštanj. Z umerjanjem se je želelo doseči čim boljše ujemanje izračunov in meritev na lokaciji spodnje vode HE Vrhovo in HE Boštanj. Primerjave med meritvami in izračunani so podani v nadaljevanju.



Slika 51: Umerjanje modela HE Boštanj: lokacija spodnje vode HE Vrholovo – poplavni val december 2008

Figure 51: Calibration of hydraulic model HPP Boštanj: at location of tail water HPP Vrholovo - flood wave in December 2008



Slika 52: Umerjanje modela HE Boštanj: lokacija spodnje vode HE Boštanj – poplavni val december 2008

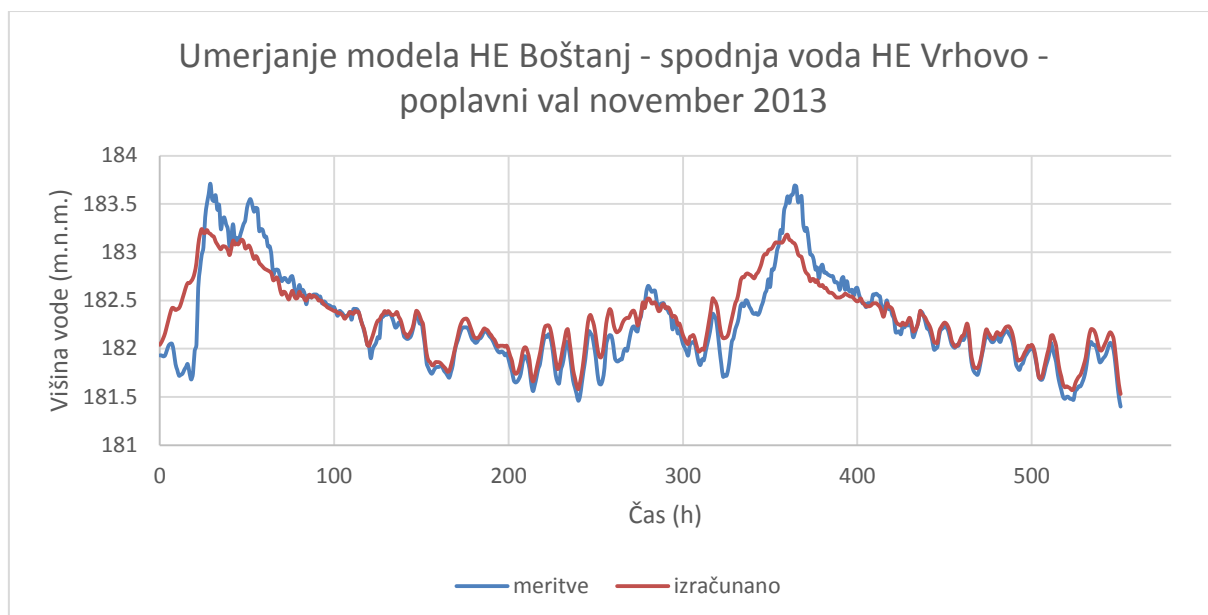
Figure 52: Calibration of hydraulic model HPP Boštanj: at location of tail water HPP Boštanj - flood wave in December 2008

Iz slike 51 in 52 je razvidno, da se merjeni in izračunani podatki na posameznih časovnih odsekih ujemajo zadovoljivo, na drugih pa ne. Problematične so predvsem konice visokovodnega vala. Menimo, da je glede na problematiko umerjanja podatkov na območju dosežena primerna podobnost meritev in izračunov. Iz umerjanja je izhajalo, da je Manningov

koeficient na območju bazena HE Boštanj 0,035 in območju bazena HE Arto-Blanca 0,04. Komentar ustreznosti podatkov je podan v poglavju 6.1.3.

- b) Novo stanje HE Boštanj – umerjanje na poplavni val od 9. novembra 2013 do 1. decembra 2013

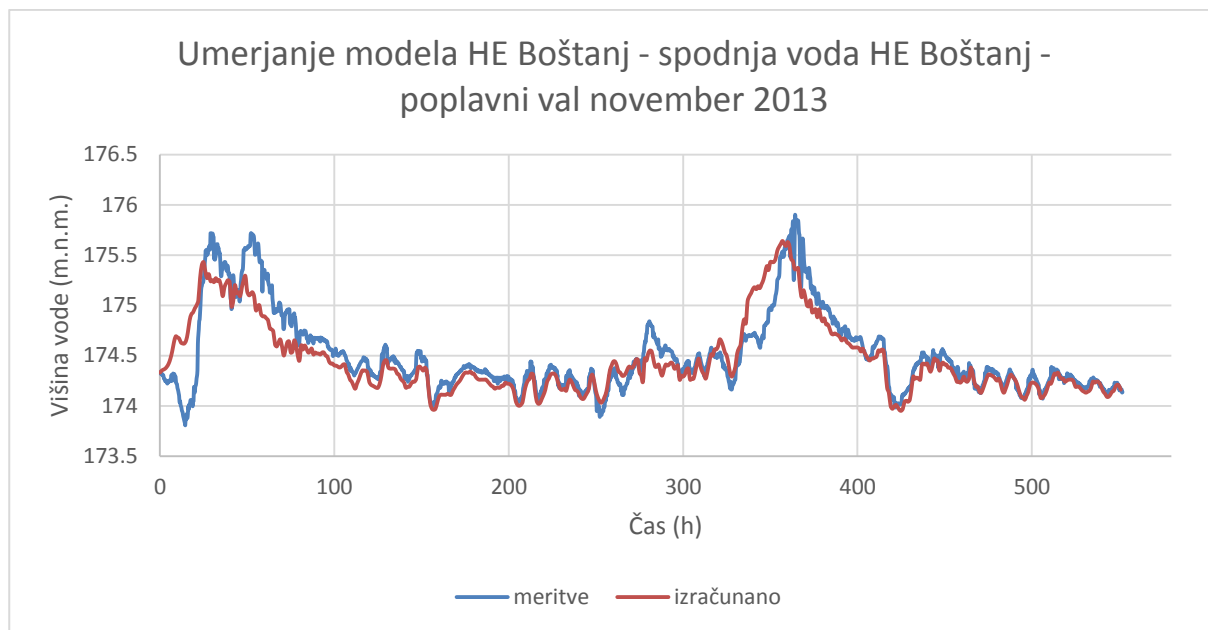
Novo stanje HE Boštanj predstavlja stanje po 5 letih obratovanja hidroelektrarne HE Boštanj. V tem času se je dolvodno zaključila gradnja HE Arto-Blanca, ki ima določene vplive na spodnjo vodo HE Boštanj. Poleg tega je bil v bazenu HE Boštanj zgrajena nova brv čez reko Savo, ki ima pri višjih pretokih zelo negativen vpliv na spodnjo vodo HE Vrhovo. V času od pričetka obratovanja HE Boštanj do posnetka batimetrije v letu 2013 so se v bazenu že zgodile določene morfološke spremembe, kar je razvidno tako s primerjave geodetskih posnetkov (poglavje 4.3.3) kot iz analiz podatkov meritev (poglavje 6.1.1).



Slika 53: Umerjanje modela HE Boštanj – lokacija spodnje vode HE Vrhovo – poplavni val november 2013

Figure 53: Calibration of hydraulic model HPP Boštanj: at location of tail water HPP Vrhovo - flood wave in November 2013

Pri izvedbi izračunov je bil kot zgornji robni pogoj uporabljen hidrogram poplavnega vala in kot spodnji robni pogoj meritve gladin zgornje vode HE Arto-Blanca. Notranji robni pogoj so bile merjene gladine zgornje vode na pregradi HE Boštanj. Z umerjanjem se je preverilo meritve na lokaciji spodnje vode HE Vrhovo in HE Boštanj, ki je hkrati nivo vode v korenu akumulacije Arto-Blanca. Izračunani podatki so podani v nadaljevanju.



Slika 54: Umerjanje modela HE Boštanj – lokacija spodnje vode HE Boštanj – poplavni val november 2013

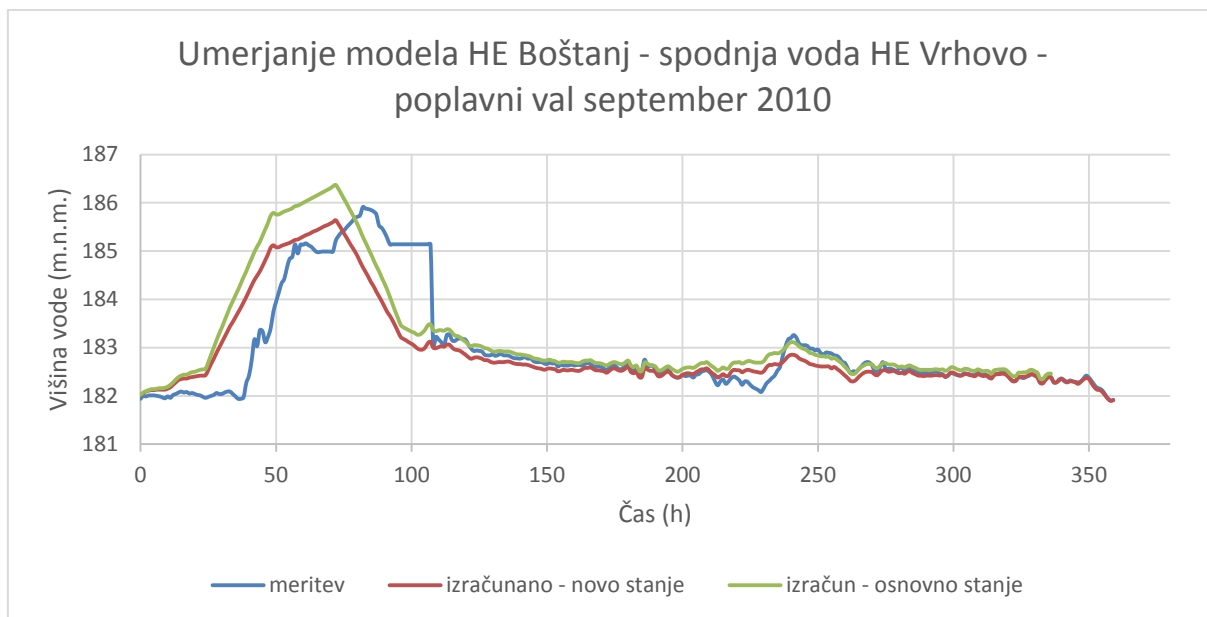
Figure 54: Calibration of hydraulic model HPP Boštanj: at location of tail water HPP Boštanj - flood wave in November 2013

Z izvedenimi izračuni je bilo doseženo zadovoljivo ujemanje merjenih in izračunanih gladin. Na območju bazena HE Boštanj je bil umerjen Manningov koeficient 0,027 in na območju bazena HE Arto-Blanca 0,035. Komentar ustreznosti podatkov je podan v poglavju 6.1.3.

- c) Verifikacija umerjanja modelov glede na poplavni val od 16. septembra 2010 do 28. septembra 2010

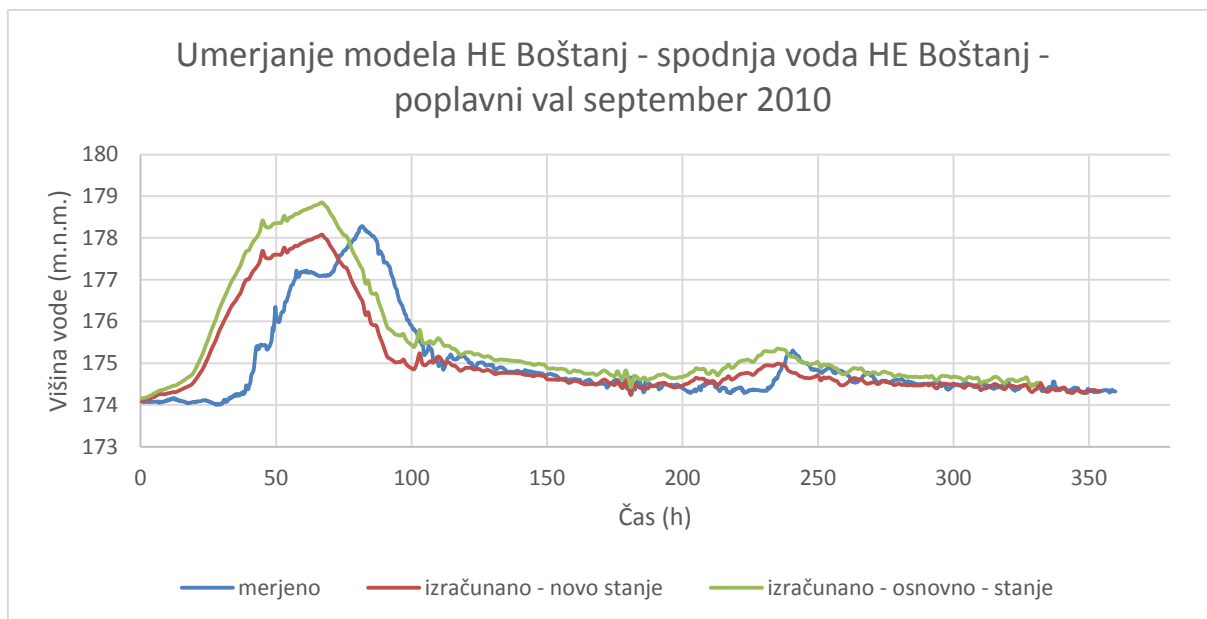
Obe izdelani geometriji sta bili preverjeni še glede na podatke meritev, ki so bili merjeni pri poplavnem valu septembra 2010. Takrat je bil na reki Savi dosežen povprečni dnevni pretok $2341 \text{ m}^3/\text{s}$, kar predstavlja največji pretok od začetka obratovanja HE Boštanj. Izračun je bil izveden za obe geometriji, saj se je poplavni val 2010 časovno zgodil nekje na sredini med obravnavanima stanjema. Pričakujemo lahko, da bodo morali biti merjeni podatki umeščeni nekje med izračunane podatke za osnovni model in model novega stanja.

Pri izvedbi izračunov je bil kot zgornji robni pogoj uporabljen hidrogram dotekajočega poplavnega vala in kot spodnji robni pogoj meritve gladin zgornje vode HE Arto-Blanca. Notranji robni pogoj so bile merjene gladine zgornje vode na pregradi HE Boštanj. Z verifikacijo se je želelo preveriti, ali izračunane gladine in meritve na lokaciji spodnje vode HE Vrhovo in HE Boštanj sovpadajo. Rezultati izračunov so podani v nadaljevanju.



Slika 55: Verifikacija izdelanih modelov na visoke vode september 2010 – lokacija spodnje vode HE Vrhovo

Figure 55: Verification of hydraulic model HPP Boštanj for flood wave in September 2010 - at location of tail water HPP Vrhovo



Slika 56: Verifikacija izdelanih modelov na visoke vode september 2010 – lokacija spodnje vode HE Boštanj

Figure 56: Verification of hydraulic model HPP Boštanj for flood wave in September 2010 - at location of tail water HPP Boštanj

Z izvedenimi izračuni smo dobili pričakovane rezultate. Merjeni podatki se gibajo nekje med izračunanimi podatki za osnovno in novo stanje, kar nam pove, da se je stanje v akumulacijskem bazenu s časom spreminjalo, vendar je očitno hidravlična hrapavost različna kot v obravnavanem primeru a (HE Boštanj $n_g = 0,035$, HE Arto-Blanca $n_g = 0,04$) oz. primeru b (HE Boštanj $n_g = 0,027$, HE Arto-Blanca $n_g = 0,035$). Pri izvedenih izračunih je

tudi razvidno, da je problematična časovna usklajenost konice poplavnega vala med merjenimi in izračunanimi podatki. To je posledica uporabljenih podatkov hidrograma in načina obratovanj posamezne HE. Ne glede na to, so merjeni in izračunani podatki v zadovoljivem podobnem velikostnem razredu. Glede na primerjavo merjenih in izračunanih podatkov lahko trdimo, da so podatki verificirani in da sta oba modela uspešno umerjena.

6.1.3 Analiza računske negotovosti

Iz primerjave izračunanih podatkov s hidravličnim modelom in izvedenih meritev na pregradah je razvidno, da se izračunani in merjeni podatki v celotnem obravnavanem časovnem obdobje ne ujemajo najboljše. Iz umerjanja in verifikacije hidravličnega modela je razvidno, da posamezna izračunana gladinska stanja občutno odstopajo od merjenih podatkov.

Kot je bilo že predhodno omenjeno (poglavje 6.1.2), večje odstopanje merjenih in izračunanih podatkov povzročijo različni časovni intervali podatkov. Arhivski podatki o pretokih, ki so uporabljeni za izračune, so podani kot povprečne dnevne vrednosti pretokov (en podatek na 24 ur). Podatki o meritvah gladin spodnje vode na objektih so podani za manjše časovne korake. Zaradi različnega časovnega intervala podatkov tako pri hitrih spremembah pretokov prihaja do večje računske napake. Za izvedbo analize računske občutljivosti smo iz nadaljnje obdelave izločili sklope podatkov, izračunanih s hidravličnim modelom, za katere upravičeno sklepamo, da jih z izračunom ne moremo modelirati dobro.

Preglednica 14: Prikaz odstopanja podatkov med meritvami gladin in podatkov, pridobljenih iz izračunov za primere umerjanja hidravličnega modela

Table 14: Deviations of data between the measurements of water level and data derived from calculations with hydraulic model (calibration)

	leto 2008		leto 2013	
	spodnja voda HE Vrhovo (m)	spodnja voda HE Boštanj (m)	spodnja voda HE Vrhovo (m)	spodnja voda HE Boštanj (m)
zgornja meja odstopanje	0,25	0,75	0,21	0,60
spodnja meja odstopanja	-0,16	-0,57	-0,36	-0,21
poprečno odstopanje	0,02	0,11	-0,05	0,09

Preglednica 15: Prikaz odstopanja podatkov med meritvami gladin in podatkov, pridobljenih iz izračunov za primer verifikacije hidravličnega modela

Table 15: Deviations of data between the measurements of water level and data derived from calculations with hydraulic model (verification)

	leto 2010 / geometrija 2008		leto 2010 / geometrija 2013	
	spodnja voda HE Vrhovo (m)	spodnja voda HE Boštanj (m)	spodnja voda HE Vrhovo (m)	spodnja voda HE Boštanj (m)
zgornja meja odstopanje	0,15	-0,07	0,41	0,29
spodnja meja odstopanja	-0,61	-0,75	-0,40	-0,43
poprečno odstopanje	-0,10	-0,25	0,06	-0,003

Analiza računskih odstopanj pokaže, da se v povprečju izračunane gladine ustrezno ujemajo z izmerjenimi podatki. Kot je razvidno iz preglednic 14 in 15, se povprečno odstopanje med merjenimi in izračunanimi gladinami giblje v intervalu razlik med -0,25 cm do +0,11 cm. Glede na pomanjkanje podatkov, na katere bi lahko bolj ustrezno umerili izdelani hidravlični

model in problematiko, ki izhaja iz obratovanja (prevajanje vode čez pregrade delno podvrženo osebni presoji obratovalca), lahko trdimo, da je model dobro umerjen in verificiran ter je ustrezen za nadaljnjo uporabo.

6.2 Lastnosti gladinskega vrlišča za primere izračuna s stalnim tokom

Lastnosti gladinskega vrlišča so za območje HE Boštanj najprej preverjene z izračunom za stalni tok. Izvedeni so izračuni za pretoke od pričetka denivelacije do začetka prostega preliva. Za obratovanje po osnovni denivelacijski krivulji so tako izvedeni izračuni za pretoke od $600 \text{ m}^3/\text{s}$ do $2600 \text{ m}^3/\text{s}$ (pričetek prostega prelivanja) s korakom po $50 \text{ m}^3/\text{s}$. Za optimirano denivelacijsko krivuljo so izvedeni izračuni za pretoke od $600 \text{ m}^3/\text{s}$ do $3600 \text{ m}^3/\text{s}$ (pričetek prostega prelivanja šele pri $3760 \text{ m}^3/\text{s}$) s korakom po $50 \text{ m}^3/\text{s}$.

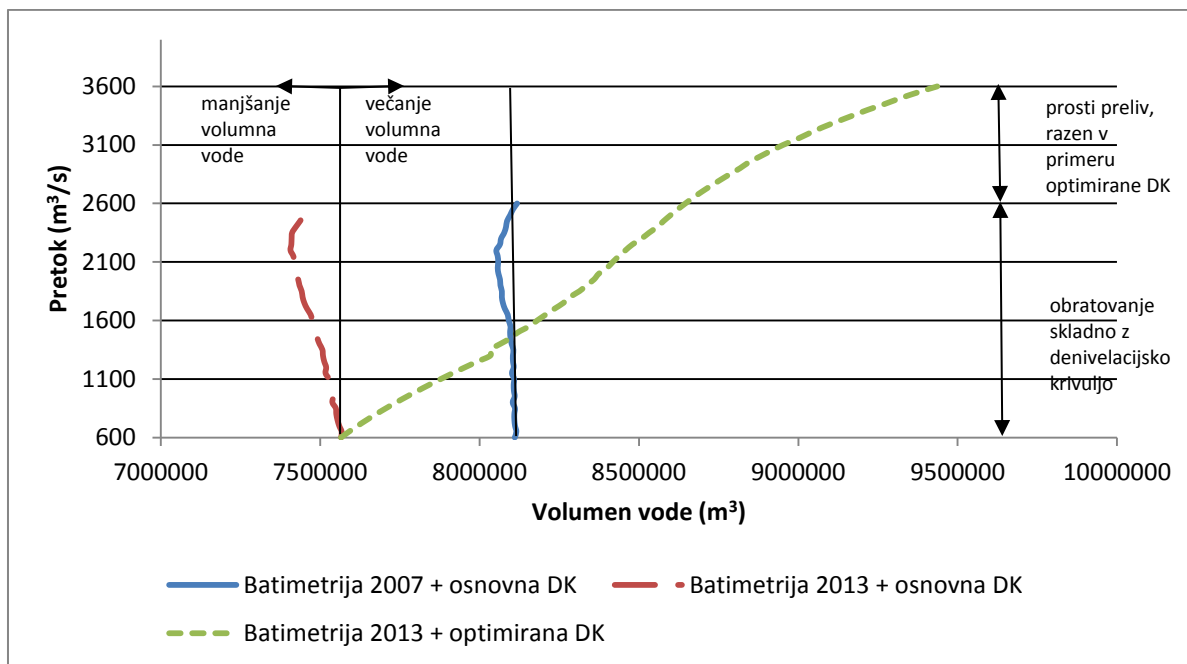
Za vse izračunane primere se je na območju akumulacijskega bazena HE Boštanj oblikovalo gladinsko vrlišče. Lokacija gladinskega vrlišča se je oblikovala:

- a) geometrija 2007 + osnovna denivelacijska krivulja: relativna stacionaža 12950 m;
- b) geometrija 2013 + osnovna denivelacijska krivulja: relativna stacionaža 13050 m;
- c) geometrija 2013 + optimirana denivelacijska krivulja: relativna stacionaža 11350 m.

Grafični prikaz oblikovanja gladinskega vrlišča je podan v Prilogi 15.

Lokacija gladinskega vrlišča se med izračuni spreminja. V primeru a) gre za osnovno stanje ob začetku obratovanja objekta. S časom je zaradi morfoloških sprememb prišlo do spremembe lokacije gladinskega vrlišča, kar je izračunano v primeru b). Premik lokacije gladinskega vrlišča pomeni, da bi se moral spremeniti tudi predpisani načina obratovanja. Z izračuni je nato preverjeno še stanje z novo denivelacijsko krivuljo (glej poglavje 4.2.6). Izračuni z optimizacijo denivelacijske krivulje – primer c) pokažejo, da je možno v akumulaciji zagotavljati bistveno višje nivoje vode in s tem višje volumne vode, kot je bilo to zahtevano ob pričetku obratovanja primera. Zaradi tega je bila lokacija gladinskega vrlišča maksimalno pomaknjena proti pregradi, kot je bilo to možno. Se pravi, možen je ugoden namenski pomik lokacije vrlišča proti pregradi, ker to dopuščajo razmere (zgrajeni energetski in protipoplavni nasipi).

Izračuni volumna vode v akumulaciji HE Boštanj potrjujejo, da sprememba lokacije gladinskega vrlišča vpliva na obratovanje objekta. Iz izračunov, katerih rezultati so prikazani v sliki 57, je razvidno, da je ob pričetku obratovanja HE Boštanj načeloma objekt obratoval po pretoku s konstantnim volumnom (definicija obratovanja – glej poglavje 3.5.2). Pri večjih pretokih (od 1600 do $2200 \text{ m}^3/\text{s}$) je sicer prišlo do manjšega padca volumna vode v bazenu, vendar zmanjšanje volumna vode ni veliko.



Slika 57: Grafični prikaz sprememb volumnov vode v bazenu HE Boštanj glede na spremembo batimetrije in denivelacijske krivulje

Figure 57: Graphic display of changes in volume of water in reservoir HPP Boštanj for changes of bathymetry and different operational curves

Morfološke razmere v bazenu HE Boštanj in delovanje po osnovni denivelacijski krivulji so povzročili poslabšanje razmer. Obratovanje po osnovni denivelacijski krivulji povzroča stalno manjšanje volumnov v bazenu, kar povzroča dodajanje k pretoku dolvodno od pregrade. Z upoštevanjem optimirane denivelacijske krivulje v izračunih so se občutno popravile razmere obratovanja. Na tak način je bilo zagotovljeno, da z večanjem pretoka volumen vode v bazenu HE Boštanj narašča, kar nam omogoča varno prevajanje vode po akumulacijskem bazenu.

6.3 Lastnosti gladinskega vrlišča za primere izračuna z nestalnim tokom

Cilj izračunov je bil potrditi ugotovitve za izračune s stalnim tokom in preveriti obnašanje lokacije gladinskega vrlišča za primere nestalnega toka. Izračuni so bili izvedeni za dva primera geometrije akumulacijskega bazena HE Boštanj (osnovna geometrija 2008, nova geometrija 2013 – glej poglavje 4.3.6) in dva različna poplavna vala Q100 (ozki in široki hidrogram – glej poglavje 4.3.4). Pričakujemo, da se bo gladinsko vrlišče in izračunani volumni vode obnašali podobno kot v predhodnih poglavjih.

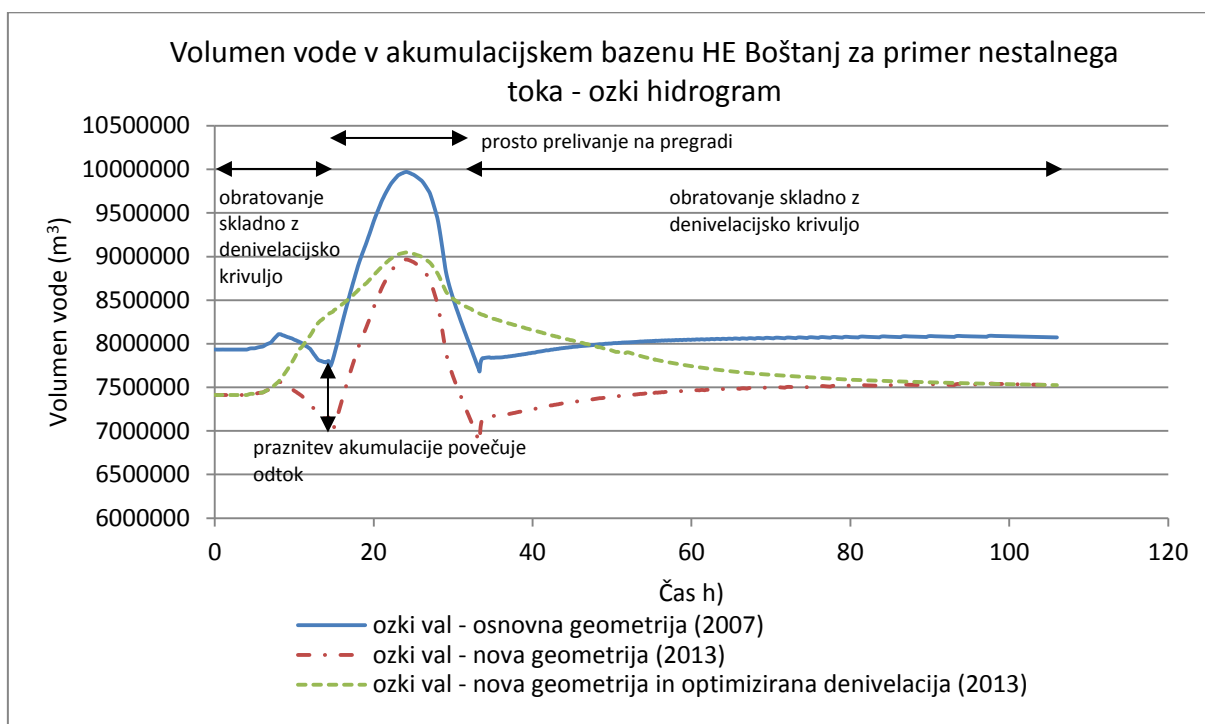
Z izračuni je bila najprej preverjena lokacija gladinskega vrlišča za vsak posamezni računski primer. Rezultati so podani v preglednici 18. Enako kot za izračune v poglavju 5.3 prihaja do neujemanja lokacije gladinskega vrlišča. Razlog za neujemanje je enak, in sicer zaradi različnih pretokov, ki v primeru nestalnega toka prehajajo po akumulaciji, je zaradi časovnega zamika drugačen pretok v akumulaciji in v korenu zajezebe. Ta razlika pretokov vpliva na lokacijo gladinskega vrlišča. Grafični prikaz lokacije gladinskega vrlišča je podan v Prilogi 16.

Preglednica 16: Izračunane lokacije gladinskega vrlišča za različne računске primere

Table 16: Water level locations for different calculations

poplavni val	lokacija gladinskega vrlišča – stacionaža (m)		
	geometrija 2008 + osnovna DK	geometrija 2013 + osnovna DK	geometrija 2013 + optimirana DK
ozki val	13250	13450	11500
široki val	13100	13300	11500

Izračuni za nestalni tok potrdijo ugotovitev, da že osnovna denivelacijska krivulja, po kateri je ob pričetku delovanja obratoval HE Boštanj (geometrija 2008), ni omogočala obratovanja s konstantnim volumnom. To je potrjeno z manjšanjem volumna vode v akumulaciji med prehodom visokovodnega vala. Premik lokacije gladinskega vrlišča gorvodno (med primeroma geometrije 2008 in geometrije 2013) povzroči manjšanje volumna vode in s tem dodajanje pretokov k visokovodnemu valu v času naraščanja pretokov ter tako vpliva na določen način obratovanja HE Boštanj. Z uporabo optimirane denivelacijske krivulje so se razmere bistveno popravile. V nadaljevanju so podani izračunani volumni in pretoki za ozki hidrogram.



Slika 58: Sprememba volumna vode v akumulaciji HE Boštanj za osnovno stanje, novo stanje in novo stanje z optimirano denivelacijsko krivuljo – ozki hidrogram

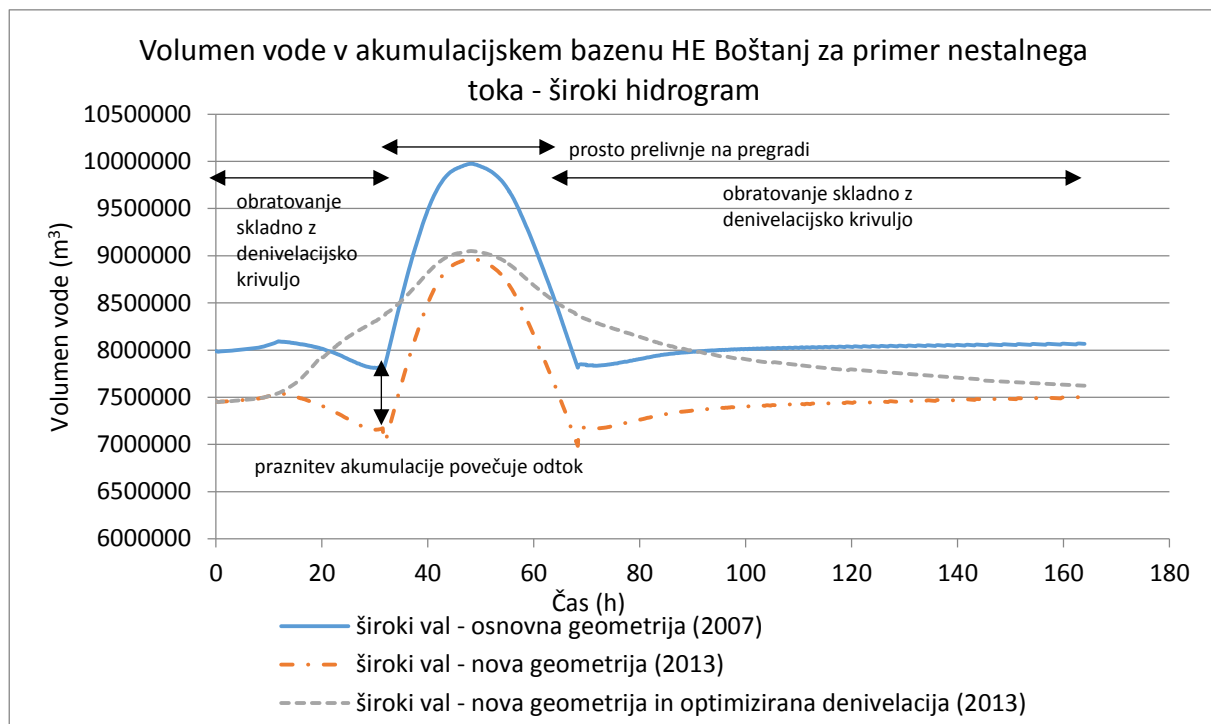
Figure 58: Changes of volume of water in reservoir HPP Boštanj for different bathymetry states and different operational curves - narrow hydrograph

Preglednica 17: Prikaz vtokov in iztokov iz akumulacijskega bazena HE Boštanj za različne primere geometrije in različne primere denivelacijske krivulje v izbranih časovnih korakih – ozki hidrogram

Table 17: Inflow and outflow from reservoir HPP Boštanj for different bathymetry and different operational curves - wide hydrograph - narrow hydrograph

čas (h)	osnovni primer (geometrija 2007)		nov primer (geometrija 2013)		nov primer (geometrija 2013 + optimirana DK)	
	vtok (m ³ /s)	iztok (m ³ /s)	vtok (m ³ /s)	iztok (m ³ /s)	vtok (m ³ /s)	iztok (m ³ /s)
0	114,06	114,44	114,06	114,5	114,06	114,5
8	615,93	589,66	615,93	594,12	615,93	594,12
10	1140,62	1162,33	1140,62	1167,45	1140,62	1097,68
12,9	2119,65	2155,31	2119,65	2177,98	2119,65	2094,75
15	2672,01	2586,52	2672,01	2608,95	2672,01	2650,2
20	3392,89	3317,57	3392,89	3324,44	3392,89	3367,51
24	3649,99	3635,21	3649,99	3639,83	3649,99	3644,46
25	3627,17	3635,5	3627,17	3636,66	3627,17	3634,37
30	2914,29	3001,02	2914,29	2994,65	2914,29	2931,38
35	2349,68	2350,74	2349,68	2351,19	2349,68	2355,49
40	1893,43	1891,04	1893,43	1889,68	1893,43	1905,23
45	1579,76	1580,05	1579,76	1579,02	1579,76	1589,53
50	1340,23	1339,3	1340,23	1338,33	1340,23	1349,19
55	1139,48	1140,86	1139,48	1140,01	1139,48	1145,48
60	1004,89	1007,51	1004,89	1006,63	1004,89	1008,76
105	579,43	579,91	579,43	579,64	579,43	579,92

LEGENDA: - obratovanje skladno z DK, - prosto prelivanje



Slika 59: Sprememba volumna vode v akumulaciji HE Boštanj za osnovno stanje, novo stanje in novo stanje z optimirano denivelacijsko krivuljo – ozki hidrogram

Figure 59: Changes of volume of water in reservoir HPP Boštanj for different bathymetry states and different operational curves - wide hydrograph

Preglednica 18: Prikaz vtokov in iztokov iz akumulacijskega bazena HE Boštanj za različne primere geometrije in različne primere denivelacijske krivulje v izbranih časovnih korakih – široki hidrogram

Table 18: Inflow and outflow from reservoir HPP Boštanj for different bathymetry and different operational curves - wide hydrograph - wide hydrograph

čas (h)	osnovni primer (geometrija 2007)		nov primer (geometrija 2013)		nov primer (geometrija 2013 + optimirana DK)	
	vtok (m ³ /s)	iztok (m ³ /s)	vtok (m ³ /s)	iztok (m ³ /s)	vtok (m ³ /s)	iztok (m ³ /s)
0	342,19	346,16	342,19	346,33	342,19	346,33
10	524,69	520,32	524,69	521,14	524,69	521,14
15	826,95	833,15	826,95	834,61	826,95	816,8
20	1311,71	1312,82	1311,71	1315,24	1311,71	1333,89
25	1847,8	1857,05	1847,8	1858,35	1847,8	1833,89
27,1	2095,89	2108,93	2095,89	2109,75	2095,89	2091,77
30	2429,52	2429,33	2429,52	2428,5	2429,52	2423,04
35	2977,02	2919,11	2977,02	2925,25	2977,02	2961,04
40	3421,86	3377,02	3421,86	3383,12	3421,86	3401,56
45	3621,47	3607,49	3621,47	3614,11	3621,47	3615,97
49	3644,28	3647,44	3644,28	3646,12	3644,28	3646,08
50	3632,87	3644,28	3632,87	3637,29	3632,87	3636,57
55	3513,11	3533,38	3513,11	3535,96	3513,11	3519,5
60	3216,55	3255,54	3216,55	3251,55	3216,55	3231,93
65	2853,83	2897,46	2853,83	2893,02	2853,83	2867,11
70	2477,43	2482,85	2477,43	2482,22	2477,43	2478,46
80	1847,8	1846,18	1847,8	1845,21	1847,8	1847,43
100	1300,31	1300,4	1300,31	1299,78	1300,31	1303,05
120	1106,4	1108,17	1106,4	1108,01	1106,4	1106,98
164	830,75	831,6	830,75	831,42	830,75	831,49

LEGENDA: - obratovanje skladno z DK, - prosto prelivanje

Sprememba hidravlične hrapavosti v akumulacijskem bazenu in obratovanje po osnovni denivelacijski krivulji sta v bazenu povzročili manjšanje volumna vode. Zaradi tega je v naraščajočem delu poplavnega vala prišlo do dodajanja še dodatnega pretoka (praznjenje akumulacije). Dolvodno od pregrade se je tako pretok lahko povečal za cca 60 m³/s za ozki val in za cca 15 m³/s za široki val. Situacija se je izboljšala z upoštevanjem optimirane denivelacijske krivulje v izračunih. Lokacija gladinskega vrlišča se je stabilizirala, obratovanje po optimirani denivelacijski krivulji pa je omogočilo postopno naraščanje in padanje volumna vode v akumulacijskem bazenu pri prehodu poplavnega vala, brez dodajanja vode k pretokom visokovodnega vala. Je pa zaradi uporabe optimirane DK prišlo do majhne pohitritve visokovodnega vala zaradi izenačitve pretoka na vtoku in iztoku iz akumulacije.

7.0 ANALIZA REZULTATOV IN POTRDITEV HIPOTEZE

Na tem mestu je potrebno še enkrat poudariti, da vsi opravljeni izračuni obravnavajo primer pretočne hidroelektrarne z razmeroma majhnim akumulacijskim bazenom, ki ne omogoča zadrževanja visokovodnega vala in ki ležijo na gosto urbaniziranem območju, kjer je zagotavljanje poplavne varnosti večjega pomena. Tak način delovanja ima svoje specifične zahteve, ki so podrobneje pojasnjene v poglavju 3.5. Drugačni objekti (akumulacijske hidroelektrarne z večjimi akumulacijskimi bazeni, objekti na neposeljenih območjih) imajo lahko drugačne zahteve glede prevajanja poplavnih voda čez pregrado. Na svetu lahko najdemo tudi hidroenergetske objekte, ki so v akumulaciji sposobni zajeti celotni volumen poplavnega vala. Način obratovanja in pojav lokacije gladinskega vrlišča ima pri takih objektih drugačne specifične lastnosti. Rezultati izračunov so tudi podobni ugotovitvam, ki so bile za podobne objekte, obdelana že v predhodno izdelani literaturi (Ciuha, 2005; Zakrajšek, 2005). Analizo rezultatov je zato potrebno razumeti glede na postavljena predvidevanja.

7.1 Splošne zakonitosti obratovanja hidroenergetskih objektov

V poglavju 3.5.2 so predstavljeni načini obratovanja, ki so v splošnem predpisani za grajene kanalske sisteme in jih lahko najdemo v literaturi. Za hidroenergetske objekte nam v literaturi ni uspelo najti nobenih predpisanih načinov obratovanja, ki bi jih lahko povzeli v tej nalogi. Razlog za to je verjetno v specifičnih lastnostih hidroenergetskih objektov, kjer je način obratovanja za vsak objekt določen posebej, glede na karakteristike objekta in terena. To obenem verjetno tudi onemogoča zasnovo splošnih veljavnih teoretičnih ugotovitev.

Ker gre pri obratovanju objektov predvsem za upravljanje s prilagajanjem na spremembo toka in globin vode vzdolž celotnega območja, ni razloga, da načina obratovanja kanalskih sistemov ne bi mogli uporabiti pri hidroenergetskih sistemih. V tej nalogi je bila zato uporabljena domneva, da lahko hidroenergetski sistemi tudi obratujejo skladno z načini obratovanja, predvidenimi v poglavju 3.5.2.

Opravljeni izračuni v poglavju 5 in 6 te naloge to domnevo tudi potrjujejo. Z izbranim načinom obratovanja objektov (obratovanja s konstantnim volumnom) smo dosegli, da se je v akumulacijah oblikovalo gladinsko vrlišče in obenem ohranjal konstantni volumen, kar je skladno z usmeritvami za obratovanje kanalskih sistemov. Pri tem je potrebno poudariti, da smo to dosegli, čeprav obravnavani primeri v tej nalogi odstopajo od običajnih oblik kanalskih sistemov, saj se vzdolž toka prečni prerezi vodotoka spreminjajo, kar za kanalske sisteme v splošnem naj ne bi veljalo (ohranjanje enakega prereza v celotnem sistemu). Posledica spremenljivih prečnih prerezov se je pokazala v tem, da se lokacija gladinskega vrlišča ni oblikovala na sredini vodotoka, kar sicer velja za kanalske sisteme.

Izračuni, ki bi potrdili, da lahko hidroenergetski objekti obratujejo tudi z načini s konstantno dolvodno gladino, konstantno gorvodno gladino in kontroliranim volumnom, niso bili izvedeni, saj to za to nalogo ni bilo potrebno. Vendar glede na izkušnje, pridobljene pri izdelavi te naloge, lahko trdimo, da bi v splošnem na hidroenergetskih objektih lahko zagotovili tudi vse te načine obratovanja, če bi le razmere na terenu to dopuščale (zadosti visoki energetske in visokovodni nasipi).

7.2 Analiza lastnosti lokacije gladinskega vrlišča v bazenih z enostavno geometrijo

Z izračuni smo preverili, na kakšen način sprememba lokacije gladinskega vrlišča vpliva na predpisani način obratovanja hidroelektrarne. Izračuni so bili najprej izvedeni na akumulaciji z enostavno geometrijo. S tem načinom smo želeli pridobiti splošne ugotovitve obnašanja gladinskega vrlišča in s tem vpliv na obratovanje. Z opravljenimi izračuni smo preverili še:

- kako gladinsko vrlišče določimo;
- kateri so glavni parametri, ki vplivajo na oblikovanje gladinskega vrlišča;
- kakšen vpliv ima sprememba lokacije gladinskega vrlišča na obratovanje;
- kako lahko vpliv morfoloških sprememb na obratovanje odpravimo.

S tem smo želeli odgovoriti na cilje, ki smo si jih zastavili v sklopu izdelave te naloge (poglavje 2.2).

7.2.1 Stalni tok

Za določitev splošnih ugotovitev oblikovanja gladinskega vrlišča je bil izdelan hidravlični matematični model, s katerim so bili izvedeni izračuni za primer stalnega toka za akumulacijo z enostavno geometrijo. Potrjeno je bilo (poglavje 5.1), da se pri načinu obratovanja po pretoku s konstantnim volumnom v akumulacijskem bazenu oblikuje gladinsko vrlišče.

S pričetkom sedimentacije se v akumulacijah začne spreminjati nivo dna akumulacije in hidravlična hrapavost. Gre za dva parametra, ki sta najbolj podvržena spremembam in na njiju zelo težko vplivamo. Z izračuni smo raziskali, kako spremembe teh parametrov vplivajo na položaj gladinskega vrlišča. Izračuni so bili izvedeni za primer samo spremembe nivojev dna, samo spremembe hidravlične hrapavosti in kombinacije spremembe obeh parametrov (glej poglavje 5.2). Ugotovljeno je, da se s spremembami obeh parametrov začne spreminjati lokacija gladinskega vrlišča. Samo spremembe nivoja dna povzročajo pomik gladinskega vrlišča dolvodno glede na začetno lokacijo. Samo sprememba hidravlične hrapavosti ima različen vpliv na lokacijo gladinskega vrlišča. Manjšanje hidravlične hrapavosti povzroči pomik lokacije gladinskega vrlišča bolj gorvodno od začetne lokacije. Večanje hidravlične hrapavosti ima enak vpliv kot dvigovanje dna akumulacijskega bazena (pomik dolvodno glede na začetno lokacijo).

V naravnih razmerah ne moremo pričakovati, da se bo v akumulacijskem bazenu zgodil samo proces dviga dna oz. spremembe hidravlične hrapavosti. Oba procesa se dogajata istočasno. Gre za tako imenovan proces staranja akumulacijskega bazena. Za primere, ko se hidravlična hrapavost glede na osnovno stanje zniža in se obenem dno dvigne, je iz izračunov razvidno, da gre pravzaprav za dva nasprotujoča si vpliva. Nižanje hidravlične hrapavosti niža gladinska stanja v akumulacijskem bazenu in pomika gladinsko vrlišče gorvodno. Medtem ko dvig dna bazena viša gladinska stanja in pomika gladinsko vrlišče dolvodno. Potrjeno je tudi, da se v nekem trenutku vpliva medsebojno izničita. V primeru, ko se v akumulacijskem bazenu obenem dviga dno in se hidravlična hrapavost viša, se pokaže, da imata obe spremembi enak vpliv in pomikata lokacijo gladinskega vrlišča dolvodno. Vsekakor je tak scenarij v naravnih strugah manj verjeten oz. ni pričakovan, zato smo tem primerom posvetili tudi manj pozornosti.

Izenačitev vplivov dviga nivoja dna in hidravlične hrapavosti je odvisna od samega procesa sedimentacije in fizičnih lastnosti sedimenta v vodi. V obravnavanem primeru enostavne geometrije se je izenačitev vplivov na lokacijo gladinskega vrlišča glede na osnovno stanje (hidravlična hrapavost $n_g = 0,03$ in dvig dna = 0 m) zgodila, ko se je v izračunih upošteval

dvig dna za en meter po celotni dolžini akumulacijskega bazena in hidravlično hrapavost $n_g = 0,025$ (glej poglavje 5.2.4). Pri izračunih s še manjšo hidravlično hrapavostjo ($n_g = 0,02$) za obravnavane dvige dna izenačitve nismo dosegli. Vsekakor lahko trdimo, da bi tudi za primere z manjšo hidravlično hrapavostjo lahko poiskali dvige dna, s katerimi bi se dosegla izenačitve vplivov.

Trdimo lahko tudi, da ima sprememba hidravlične hrapavosti prevladujoči vpliv na lokacijo gladinskega vrlišča kot dvig dna. Parametra dvig dna in hidravlično hrapavost sicer težko primerjamo med seboj, vendar je iz izračunov razvidno, da spremembe hidravlične hrapavosti bistveno bolj vplivajo na lokacijo gladinskega vrlišča kot spremembe dna. To trditev lahko podkrepimo tudi z analizo podatkov (glej poglavje 6.1) o gladinskih stanjih obstoječih hidroelektrarn, kjer so se v prvih letih po pričetku obratovanja gladinska stanja v akumulacijskih bazenih znižala. Iz izvedenih posnetkov dna struge in primerjave posnetkov (poglavje 4.4.3) je razvidno, da se je na območju akumulacijskega bazena dno večinoma dvignilo, ker pa so merjene gladine padle, lahko sklepamo, da se je na območju spremenila tudi hidravlična hrapavost, ki je znižala gladine vzdolž akumulacijskega bazena.

Z ugotovljenim premikom lokacije gladinskega vrlišča se lahko pokažejo vplivi na zasnovano delovanje hidroelektrarne. Določena sta bila dva vpliva, in sicer sprememba gladinskih stanj in sprememba volumnov vode v akumulaciji. Izračuni pokažejo, da vsak pomik lokacije dolvodno od začetne točke povzroča višanje gladinskih stanj v korenu zajezbe. S tem vplivom se na območju ob akumulaciji zmanjša poplavna varnost. Pomik gladinskega vrlišča gorvodno po drugi strani zniža gladinska stanja v akumulaciji in s tem ugodno vpliva na poplavno varnost na območju ob akumulaciji. Za zagotavljanje obratovanja po pretoku s konstantnim volumnom moramo v akumulaciji doseči, da se volumen vode ves čas spreminjanja pretokov ohranja. S premikom gladinskega vrlišča dolvodno se razmerje volumnov pri različnih pretokih ohranja, kar nam še vedno omogoča delovanje po predpisanem načinu obratovanja. S pomikom gladinskega vrlišča gorvodno se pri večanju pretokov začne manjšati volumen akumulacije. To pomeni, da se pretokom, ki potujejo po akumulaciji, dodaja del vode, ki je v akumulaciji. S stališča zagotavljanja poplavne varnosti na območju pod hidroelektrarno je to nedopustno (glej poglavje 3.5.4).

Z izračuni za enostavno geometrijo akumulacijskega bazena in pomikom gladinskega vrlišča gorvodno je bilo ugotovljeno, da je pri pretoku $Q=3350 \text{ m}^3/\text{s}$ razlika v volumnih vode cca 400.000 m^3 , kar predstavlja cca 4 odstotke celotnega volumna akumulacijskega bazena. V primeru samo enega objekta na vodotoku in dodajanjem takega dodatnega volumna vode ob prehodu poplavnega vala razmere dolvodno od pregrade še lahko kontroliramo, saj dodani volumen vode ni tako velik (do $30 \text{ m}^3/\text{s}$ – podatek iz izračunov za nestalni tok) in se voda dodaja dlje časa (več ur). Situacija je seveda bistveno bolj kritična, če imamo na vodotoku več objektov – verigo hidroelektrarn. Če zaradi spremenjenega obratovanja zaradi morfoloških sprememb vsak objekt doda še 4 odstotke volumna akumulacijskega bazena k poplavnemu valu, lahko razmere dolvodno od pregrad bistveno poslabšamo.

Za zagotavljanje varnega obratovanja pregradnih objektov v celotni njihovi življenjski dobi moramo zato slediti usmeritvi, da gladinsko vrlišče ves čas ohranjamo na isti lokaciji. S tem bomo dosegli, da bodo gladinska stanja v akumulaciji taka, da bo ves čas zagotovljena ustrezna poplavna varnost. Obenem bomo z ohranjanjem konstantnega volumna vode v akumulaciji tudi preprečili dodajanje dodatnih pretokov v času prehajanja visokovodnega vala. Možna ukrepa, s katerima lahko vplivamo na lokacijo gladinskega vrlišča, sta izkop odvečnih sedimentov iz akumulacijskega bazena in optimizacija denivelacijske krivulje, po

kateri obratuje objekt (in s tem zagotavlja obratovanje po izbranem načinu). V tej nalogi smo se osredotočili samo na ukrep z optimizacijo denivelacijske krivulje. Pri tem smo več pozornosti namenili primerom, ko se lokacija gladinskega vrlišča pomakne gorvodno. Gre za primere, ki se najprej pojavijo v akumulacijah HE. Optimizacijo denivelacijske krivulje izvedemo po principu, da povišamo gladinska stanja pri večjih pretokih na mestu pregrade. Tako zagotovimo, da bo lokacija gladinskega vrlišča ostala oz. se bo vrnila v začetno stanje, kar nam omogoča ohranjanje načrtovanega obratovanja pregrade (glej poglavje 5.2.5). Z upoštevanjem optimirane denivelacijske krivulje v izračunih smo dosegli, da se je lokacija gladinskega vrlišča vrnila nazaj na prvotno lokacijo in da se je pri večanju pretokov ohranil volumen vode v akumulacijskem bazenu.

7.2.2 Nestalni tok

Opravljeni izračuni z nestalnim tokom so večinoma potrdili rezultate, izračunane za primere stalnega toka z nekaj pomembnimi ugotovitvami. V izračunih je bil obravnavan samo primer spremembe hidravlične hrupavosti (zmanjšanje n_g). Menimo, da nam tak primer omogoča izračun zadosti kakovostnih podatkov in predstavlja transparenten prikaz vplivov na lokacijo gladinskega vrlišča.

Pri potovanju poplavnega vala po akumulacijskem bazenu in z obratovanjem tako po osnovni kot po optimirani denivelacijski krivulji se je oblikovalo gladinsko vrlišče. Gladinsko vrlišče se je oblikovalo v sledečih stacionazah akumulacijskega bazena:

Preglednica 19: Primerjava lokacij oblikovanja gladinskega vrlišča za primer stalnega in nestalnega toka

Table 19: Comparison of locations of water level location point for steady and unsteady flow

izračun:	osnovno stanje (dvig dna=0m, $n_g=0.03$, osnovna DK)	spremenjeno stanje (dvig dna=0m, $n_g=0.025$, osnovna DK)	optimirano stanje (dvig dna=0m, $n_g=0.025$, optimirana DK)
stalni tok	6675 m	7475 m	6725 m
nestalni tok – ozki hidrogram	6825 m	7625 m	7000 m
nestalni tok – široki hidrogram	6825 m	7625 m	6950 m

Iz dobljenih rezultatov lahko vidimo, da se je v vseh primerih nestalnega toka lokacija gladinskega vrlišča glede na izračune opravljene s stalnim tokom pomaknila bolj gorvodno. Razlog za pomik gladinskega vrlišča bolj gorvodno je v tem, da pretoki pri izračunih za nestalni tok niso enakomerni v vseh računskih prečnih profilih in istem časovnem koraku. Višji pretoki, ki prihajajo po akumulacijskem bazenu, zato pomikajo gladinsko vrlišče bolj gorvodno. Del razlike verjetno izhaja tudi iz računske negotovosti. Zavedati se moramo, da se bo zaradi drugačnega poteka računa lokacija gladinskega vrlišča v izračunih z nestalnim tokom oblikovala cca od 100 do 150 metrov bolj gorvodno kot za izračune s stalnim tokom.

Z opravljenimi izračuni smo tudi pokazali, da oblikovanje gladinskega vrlišča nikakor ni odvisno od oblike poplavnega vala, kar je bilo pravzaprav pričakovano. Opozoriti je potrebno še na sledeče. Za izračuna z nestalnim tokom in optimirano DK se lokaciji gladinskega vrlišča razlikujeta. Pri analizi razloga, zakaj je do tega odstopanja prišlo, je bilo ugotovljeno, da se računski gladinska stanja v bližnji okolici gladinskega vrlišča zelo malo razlikujejo – nekaj centimetrov. Zato je težko podati točno lokacijo. Verjetno bi bilo bolj smiselno, da se lokacija gladinskega vrlišča opiše z intervalom, kjer se vrlišče lahko pojavi, kot pa s točko.

Iz rezultatov – sliki 47 in 48 – je potrjeno, da se pri prehodu poplavnega vala po akumulacijskem bazenu pri obravnavanih primerih spreminja volumen vode v bazenu. S spremembo hidravlične hrapavosti in obratovanjem po osnovni denivelacijski krivulji se volumen vode v akumulacijskem bazenu začne manjšati. Voda iz akumulacijskega bazena tako povečuje poplavni val, ki potuje po akumulaciji. Dodatni volumen vode se k poplavnemu valu ne doda hipno, ampak se dodaja dlje časa. Čas trajanja je odvisen od oblike hidrograma in se spreminja pri različnih oblikah poplavnih valov. Izkaže se, da je pri hitrem naraščanju pretokov pri ozkem poplavnem valu potrebno hitreje nižati gladino na lokaciji pregrade, kar ima za posledico, da k poplavnemu valu dodajamo večje pretoke. Pri ozkem hidrogramu dodajamo v naraščajočem delu poplavnega vala do 30 m³/s, medtem ko pri širokem poplavnem valu dodajamo samo do 15 m³/s. Povedano drugače, s stališča poplavne varnosti dolvodno od pregrade je manjšanje volumna v akumulacijskem bazenu pri ozkem hidrogramu neugodnejše. Velikostni razred pretoka, ki se dodaja visokovodnemu valu, na prvi pogled ni problematičen. Visokovodni val ima pretok nekaj tisoč m³/s, pri tem pa se k valu dodatno dodaja samo nekaj deset m³/s vode. Bolj problematično je to, da iztok iz bazena ni enak vtoku v bazen, kar je posledica manjšanja volumna vode v akumulaciji.

Morfološke spremembe v akumulaciji tako povzročijo, da osnovna denivelacijska krivulja ni več ustrezna. Pri določenem vtoku vode v akumulacijo in temu prilagojeni višini zgornje vode na lokaciji pregrade (skladno z denivelacijsko krivuljo) bi morali čez pregrado prevajati tako količino vode, ki vteka v akumulacijo. Izračuni pokažejo, da to ne drži, saj iz akumulacije izteka večja količina vode. V primeru več objektov na vodotoku tako nimamo pravega podatka, koliko vode vteka v posamezno akumulacijo. To vsekakor poveča možnost neustreznega obratovanja (preveliko odprtje zapornic in s tem dodajanje pretoka k visokovodnem valu).

S slik 47 in 48 je tudi razvidno, da smo z optimizacijo denivelacijske krivulje dosegli ohranjanje konstantnega volumna ves čas trajanja obratovanja po denivelacijski krivulji in še bolj pomembno, zagotovili, da so pretoki na vtoku in iztoku iz bazena ves čas prehajanja visokovodnega vala enaki. To ima za posledico pohitritev visokovodnega vala, ki pa je ne moremo preprečiti, razen če bi imeli na voljo zadosti veliko akumulacijo, kar v obravnavanem primeru ne drži. Z optimiranjem DK smo zagotovili, da v vsakem trenutku poznamo razmere na vodotoku in da smo ohranili predpisano obratovanje.

7.2.3 Izdelava brezdimenzijskih diagramov za določitev lokacije gladinskega vrlišča

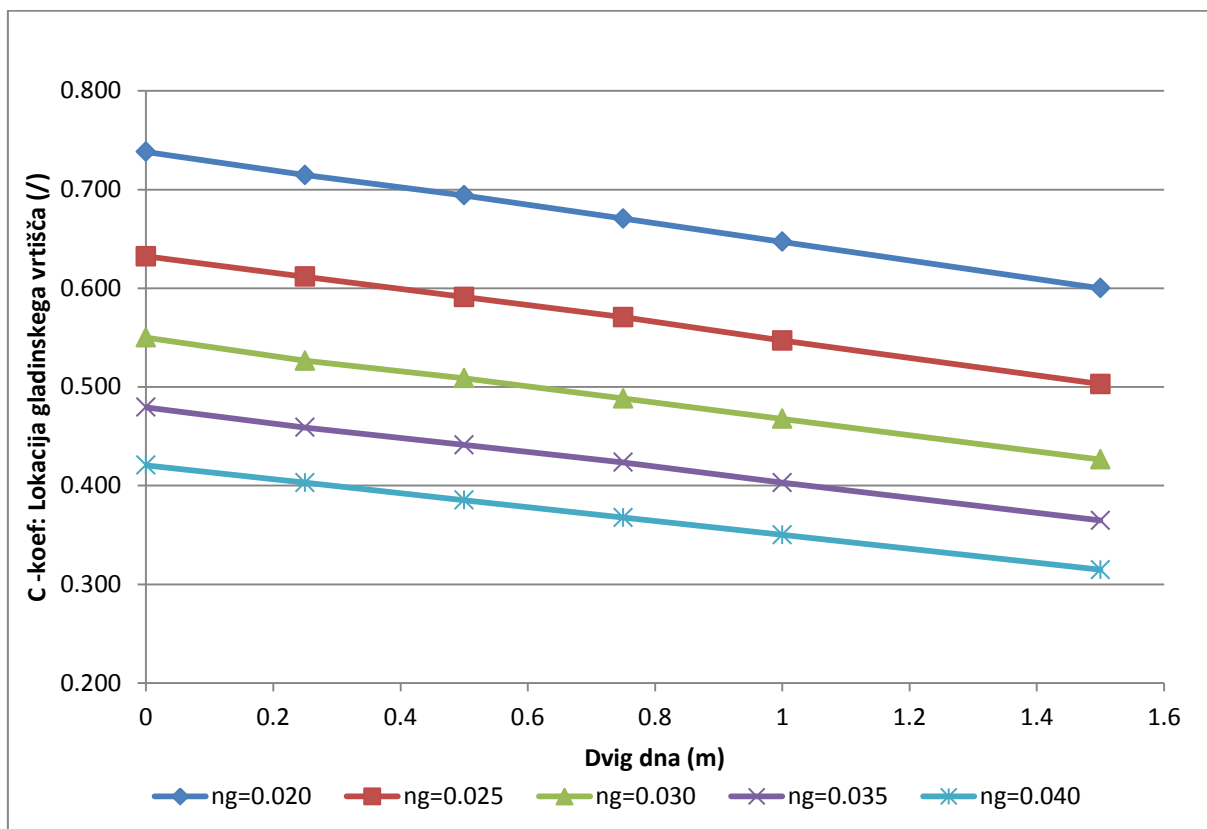
Na podlagi opravljenih izračunov sta bila izdelana brezdimenzijska diagrama (slika 60 in 61), ki prikazujeta odvisnost med koeficientoma hidravlične hrapavosti oziroma znanim dvigom kote dna, lokacijo gladinskega vrlišča v akumulacijskem bazenu (merjeno od pregrade gorvodno) in osnovno denivelacijsko krivuljo! Diagrama nam omogočata ocenitev spremembe lokacije gladinskega vrlišča v akumulaciji glede na znano spremembo dna oz. spremembo hidravlične hrapavosti. Pri tem predlagamo uporabo enačbe:

$$T = C \cdot L \quad [\text{m}] \quad \text{Enačba 17}$$

T – lokacija gladinskega vrlišča

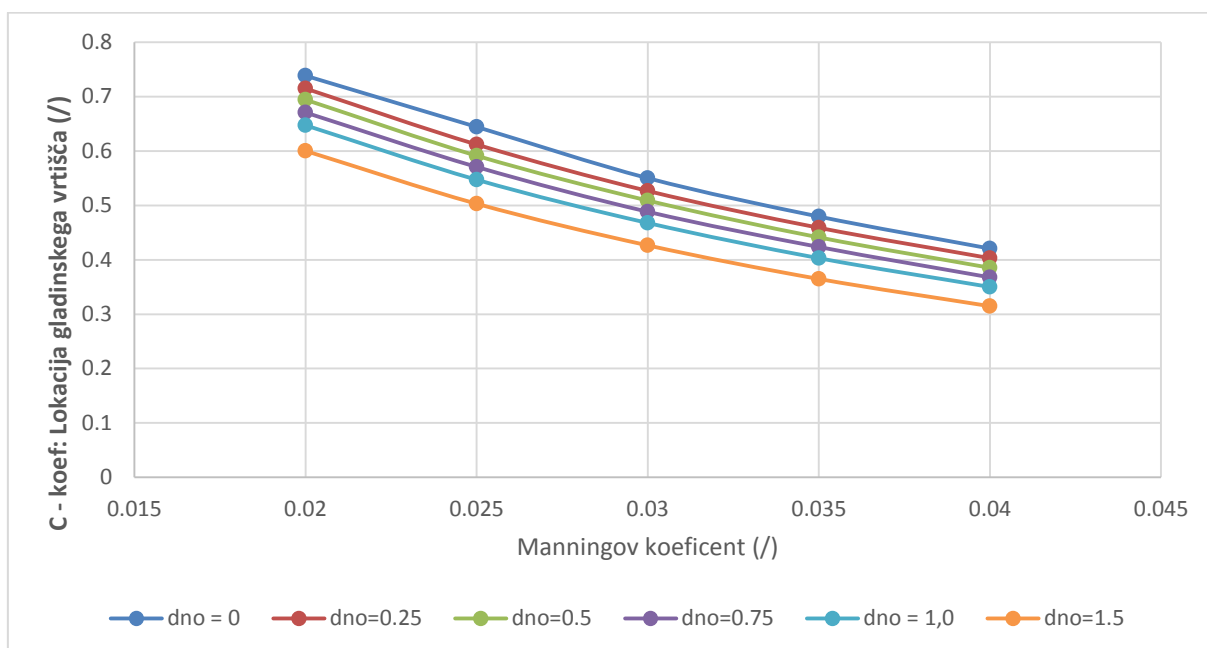
C – koeficient, ki ga dobimo na podlagi ocenjenega dviga dna (slika 60) oz. spremembe hidravlične hrapavosti v akumulaciji z brezdimenzijskih diagramov (slika 61);

L – dolžina akumulacije



Slika 60: Brezdimenzijski diagram za koeficient lokacije gladinskega vrlišča v odvisnosti od dvig dna

Figure 60: Graph of water level pivot point coefficient vs. state of river bed



Slika 61: Brezdimenzijski diagram za koeficient lokacije gladinskega vrlišča v odvisnosti na hidravlično hrapavost

Figure 61: Graph of water level pivot point coefficient vs. Manning coefficient

Izdelana brezdimenzijska diagrama imata slabost, in sicer sta izdelana s poenostavitvijo, da se sprememba dna bazena dogaja vzdolž celotnega dna. V naravnih razmerah se sedimenti nikoli ne odlagajo na tak način. Sedimenti se v vsakem akumulacijskem bazenu odlagajo na način, ki je odvisen od hidravličnih lastnosti, lastnosti vode, lastnosti sedimentov, oblike bazena, denivelacijske krivulje ... Za točno določitev lokacije gladinskega vrlišča bi torej verjetno vsak akumulacijski bazen moral imeti določena svoja brezdimenzijska diagrama, ki bi natančneje med seboj povezala morfološke spremembe in lokacijo gladinskega vrlišča. Ne glede na to pa lahko trdimo, da sta izračunana brezdimenzijska diagrama zadosti točna, da podata načelno lokacijo gladinskega vrlišča za vse podobne akumulacijske bazene, pri katerih imamo dvig dna po celotni dolžine enak.

7.3 Analiza lastnosti lokacije gladinskega vrlišča v bazenu HE Boštanj

Ugotovitve, pridobljene v hidravličnem modelu z enostavno geometrijo, so bile preverjene še na območju akumulacije HE Boštanj. Najprej je bila preverjena uporabnost izdelanih brezdimenzijskih diagramov. Izračuni so bili nato izvedeni še za hidravlični model, ki je bil umerjen in verificiran glede na pridobljene podatke s terena. Izračuni večinoma potrjujejo ugotovitve, ki so bile pridobljene z izračuni z modelom z enostavno geometrijo.

7.3.1 Uporaba brezdimenzijskih diagramov

Preverjena je bila uporabnost izdelanih brezdimenzijskih diagramov (poglavje 7.2.3). Z uporabo diagramov in enačbe 16 so bile določene sledeče lokacije gladinskega vrlišča:

- a) Osnovno stanje (geometrija 2008):
 $n_g=0,035$, dvig dne = 0m $\rightarrow C=0,48$

$$T = 0,48 \cdot 8215 = 3940m$$

Glede na izračun se gladinsko vrlišče oblikuje v stacionaži 3940 m akumulacije HE Boštanj. Da bomo dobili lokacijo, ki jo bomo lahko primerjali glede na hidravlični model, moramo dobljenemu rezultatu prišteti še stacionažo do pregrade HE Boštanj (8985 m). Tako dobimo končni rezultat oblikovanja gladinskega vrlišča v stacionaži 12928 m.

- b) Novo stanje (geometrija 2013):
 $n_g=0,027$, dvig dna = 0,60m – ocena* $\rightarrow C=0,548$

* dvig dna je ocenjen na podlagi povprečne spremembe dna v celotni akumulaciji brez upoštevanja brežin. Na brežinah prihaja lokalno do erodiranja, kar manjša povprečno spremembo dna, zato smo brežine iz računa izločili. Poleg tega tudi izdelani brezdimenzijski diagrami upoštevajo samo spremembo dna brez brežin.

$$T = 0,548 \cdot 8215 = 4501m$$

Glede na izračun se gladinsko vrlišče oblikuje v stacionaži 4501 m akumulacije HE Boštanj. Da bomo dobili lokacijo, ki jo bomo lahko primerjali glede na hidravlični model, moramo dobljenemu rezultatu prišteti še stacionažo do pregrade HE Boštanj (8985 m). Tako dobimo končni rezultat oblikovanja gladinskega vrlišča v stacionaži 13487 m.

Lokacija gladinskega vrlišča, določena z brezdimenzijskimi diagrami za osnovno stanje, zelo dobro sovпада z lokacijo, določeno s hidravličnimi izračuni (poglavje 6.2). Razlika je minimalna – 22 metrov. Slabši rezultat smo dobili, ko smo poizkusili določiti še lokacijo, ki se je oblikovala v spremenjeni morfologiji. Razlika med določenima lokacijama namreč znaša 437 m. Vseeno smo dobili pričakovani pomik lokacije gladinskega vrlišča gorvodno glede na osnovno lokacijo, kar smo tudi pričakovali.

Očitno je, da spremembe dviga dna v celotni akumulaciji težko določimo samo z enim podatkom o stanju akumulacije, kar nam že poda določeno napako. Možno je, da na lokacijo gladinskega vrlišča vpliva tudi nova brv Šmarčna–Breg, ki je spemila razmere pri višjih pretokih v akumulaciji HE Boštanj. Za preverbo točnosti izdelanih brezdimenzijskih diagramov bi bilo potrebno opraviti še več izračunov za različne primere akumulacijskih bazenov in po potrebi izdelane brezdimenzijske diagrame še optimizirati. Pri tem bi morali pozornost posvetiti predvsem upoštevanju neenakomernosti odlaganja sedimentov po akumulacijskem bazenu.

Določanje gladinskega vrlišča s pomočjo brezdimezijskih diagramov za osnovno stanje akumulacije se je izkazalo za dobro, kar delno potrjuje uporabnost izdelanih diagramov.

7.3.2 Stalni tok

Na podlagi izračunov z izdelanim hidravličnim modelom je bilo potrjeno, da se pri prevajanju visokovodnih valov (oz. spremembah pretokov in obratovanja skladno z DK) na območju akumulacije HE Boštanj oblikuje gladinsko vrlišče. Lokacija gladinskega vrlišča je bila preverjena za osnovno stanje (glej poglavje 4.3.6), ki predstavlja stanje takoj po gradnji objekta HE Boštanj in za stanje po nekaj letih obratovanja. V osnovnem stanju se je gladinsko vrlišče oblikovalo v stacionaži 12950 m.

V stanju izmerjenem leta 2013 je v akumulaciji že prišlo do morfoloških sprememb, kar potrjujeta tako umerjanje modela (poglavje 6.1) in primerjava pridobljene batimetrije struge akumulacije (glej Priloga 3). Vrlišče v novem stanju se je oblikovalo v stacionaži 13050 m. Zaradi zmanjšanja hidravlične hrapavosti in majhnega dviga dna je pričakovano, da se je gladinsko vrlišče pomaknilo gorvodno. Gre za razmeroma majhen premik gladinskega vrlišča za 100 metrov glede na ugotovljene spremembe hidravlične hrapavosti. Glede na opravljene izračune z enostavnim hidravličnim modelom bi pričakovali večji pomik gladinskega vrlišča gorvodno. Možni vzroki za to so neenakomernost prečnih profilov, neenakomerne spremembe dna, vpliv nove brvi v akumulaciji ... Tej problematiki bi bilo potrebno posvetiti še nekaj več pozornosti.

Z oblikovanjem gladinskega vrlišča v stacionaži 12950 m v osnovnem stanju akumulacijskega bazena izračuni pokažejo, da že v osnovi ni doseženo obratovanje po pretoku s konstantnim volumnom (glej slika 57). Analiza volumna pretokov pokaže, da z naraščanjem pretokov volumni v bazenu rahlo padajo. Za zagotovitev pravilnega obratovanja po pretoku s konstantnim volumnom bi morali doseči, da bi se lokacija gladinskega vrlišča pomaknila dolvodno, bližje pregradi.

Pomik gladinskega vrlišča gorvodno kaže, da v akumulacijskem bazenu v novem stanju ne moremo več ohranjati konstantnega volumna, kar pokaže tudi preglednica 20.

Preglednica 20: Prikaz volumnov vode pri naraščanju pretokov v osnovnem in novem stanju akumulacijskega bazena HE Boštanj in pri obratovanju po osnovni denivelacijski krivulji

Table 20: Volume of water in reservoir for different bathymetry and normal operational curve

Q (m ³ /s)	volumen (m ³) - osnovno stanje	volumen (m ³) - novo stanje	razlika (m ³)
600	8.110.380	7.565.470	544.910
750	8.109.180	7.554.140	555.040
1000	8.107.560	7.534.100	573.460
1250	8.104.700	7.512.560	592.140
1500	8.095.680	7.486.290	609.390
1750	8.073.110	7.450.120	622.990
2000	8.059.090	7.423.210	635.880
2250	8.063.880	7.409.400	654.480
2500	8.095.910	7.448.330	647.580
2600	8.117.710	7.478.830	638.880

Zaradi morfoloških sprememb in s tem povezanim znižanjem gladin v akumulacijskem bazenu v novem stanju volumen vode v bazenu pada. Dolvodno od pregrade HE Boštanj tako dodajamo še cca od 540.000 do 640.000 m³ dodatnega volumna vode pri vsakem pretoku. Dodatni volumen vode se dodaja v času višanja pretokov, kar neugodno vpliva na razmere dolvodno od pregrade.

Poslabšanje razmer obratovanja in novo morfološko stanje bazena zahteva posodobitev denivelacijske krivulje. S posodobitvijo denivelacijske krivulje je bilo zagotovljeno, da zaradi obratovanja pregrade HE Boštanj ne bo negativnih posledic na širšem območju objekta (gorvodno in dolvodno od pregrade).

Nova denivelacijska krivulja je bila določena v dokumentu *Obratovanje verige hidroelektrarna na spodnji Savi pri visokih vodah Save*; IBE; 2013. Z obratovanjem, skladno z novo denivelacijsko krivuljo, se gladinsko vrlišče pomakne v stacionažo 11350 m za primer izračuna s stalnim tokom. Gre za izrazit premik dolvodno proti pregradi, ki je glede na ostale izračune v tej nalogi dokaj presenetljiv. Razlog za tako velik premik gladinskega vrlišča dolvodno je možen zaradi oblike akumulacijskega bazena HE Boštanj. S pomikom gladinskega vrlišča dolvodno proti pregradi se višajo gladinska stanja v korenu zajezbe. Če oblika akumulacijskega bazena (ali izvedba visokovodnih ukrepov) to omogoča, je s stališča obratovanja zaželeno, da se gladinsko vrlišče oblikuje na lokaciji pregrade. To pomeni, da bi lahko v akumulacijskem bazenu zajeli maksimalno količino vode in s tem ugodno vplivali na poplavni val, ki prehaja po bazenu. Seveda pomik gladinskega vrlišča na lokacijo pregrade zahteva, da morajo biti vsi ukrepi vzdolž bazena načrtovani na način, da višanje gladin gorvodno v akumulaciji ne povzroči škodljivega delovanja vode (oz. je na lokaciji akumulacije tak teren, ki prenese višanje gladin). Običajno premaknitev gladinskega vrlišča na lokacijo pregrade iz ekonomskih razlogov zaradi velikosti objektov ni izvedljiva, saj bi za zagotovitev premaknitve bili potrebni višji visokovodni nasipi v korenu zajezbe. Tak način obratovanja predstavlja »obratovanje s konstantno dolvodno globino«, katerega značilnosti so bolj podrobno predstavljene v poglavju 3.5.2.

Analiza volumna vode v akumulacijskem bazenu pokaže (preglednica 22), da se z obratovanjem po optimirani denivelacijski krivulji volumen vode v bazenu povečuje. Pri

pretoku 2600 m³/s, ki za obratovanje po osnovni denivelacijski krivulji predstavlja začetek prostega prelivanja na pregradi, se volumen vode v akumulacijskem bazenu poveča za 528.000 m³ (osnovno stanje + osnovna DK) ali 1.166.780 m³ (novo stanje + osnovna DK). S tega stališča lahko govorimo o pozitivnem vplivu, ki ga ima optimizacija denivelacijske krivulje na obratovanje.

Preglednica 21: Prikaz volumnov vode pri naraščanju pretokov v osnovnem in novem stanju akumulacijskega bazena HE Boštanj in pri obratovanju po osnovni in optimirani denivelacijski krivulji

Table 21: Volume of water in reservoir for different bathymetry and normal and optimized operational curves

Q (m ³ /s)	volumen (m ³) - osnovno stanje	volumen (m ³) - novo stanje	volumen (m ³) - novo stanje + optimirana DK
600	8.110.380	7.565.470	7.565.020
750	8.109.180	7.554.140	7.645.660
1000	8.107.560	7.534.100	7.806.260
1250	8.104.700	7.512.560	7.993.740
1500	8.095.680	7.486.290	8.121.020
1750	8.073.110	7.450.120	8.262.970
2000	8.059.090	7.423.210	8.374.270
2250	8.063.880	7.409.400	8.479.770
2500	8.095.910	7.448.330	8.599.220
2600	8.117.710	7.478.830	8.645.610
2750	prosti preliv	prosti preliv	8.725.620
3000	prosti preliv	prosti preliv	8.878.850
3250	prosti preliv	prosti preliv	9.075.720
3500	prosti preliv	prosti preliv	9.320.900
3600	prosti preliv	prosti preliv	9.435.880

Z obratovanjem po novi optimirani denivelacijski krivulji je določeno tudi, da se prosto prelivanje po prelivnih poljih vzpostavi šele pri pretokih večjih od 3600 m³/s, kar predstavlja pretoke Q100 za ta odsek reke Save.

7.3.3 Nestalni tok

Z izračuni za nestalni tok je bila za vse primere določena lokacija gladinskega vrlišča, ki je podana v naslednji preglednici:

Preglednica 22: Primerjava lokacij oblikovanja gladinskega vrlišča za primer stalnega in nestalnega toka – model HE Boštanj

Table 22: Comparison of locations of water level location point for steady and unsteady flow calculations – hydraulic model HPP Boštanj

izračun:	osnovno stanje (geometrija 2008, osnovna DK)	novo stanje (geometrija 2013, osnovna DK)	optimirano stanje (geometrija 2013, optimirana DK)
stalni tok	12950 m	13050 m	11350 m
nestalni tok – ozki hidrogram	13250 m	13450 m	11500 m
nestalni tok – široki hidrogram	13100 m	13300 m	11500 m

V izračunih z nestalnim tokom prav tako pride do pomika lokacije gladinskega vrlišča gorvodno kot v izračunih z nestalnim tokom za primer z enostavno geometrijo. Obrazložitev razloga je podana v poglavju 7.2.2.

Volumni vode v bazenu (glej poglavje 6.3) se pri izračunih z nestalnim tokom obnašajo pričakovano. Volumen vode se v novem stanju akumulacijskega bazena in z obratovanjem po osnovni denivelacijski krivulji občutno znižajo glede na osnovno stanje bazena. Z obratovanjem po optimirani denivelacijski krivulji pa volumni vode v akumulaciji začnejo postopoma naraščati in na ta način dosežemo obratovanje po pretoku s konstantnim volumnom.

Enako velja za pretoke. Sprememba morfologije akumulacije povzroči, da se v naraščajočem delu visokovodnega vala dodaja k pretokom cca $58 \text{ m}^3/\text{s}$ za ozki hidrogram oz. cca $13 \text{ m}^3/\text{s}$ za široki hidrogram, kar je s stališča zagotavljanja poplavne varnosti nedopustno. Z obratovanjem po denivelacijski krivulji izenačimo vtok in iztok iz akumulacije, kar nam omogoča bolj varno obratovanje objekta. Optimizacija denivelacijske krivulje sicer povzroči majhno pohitritev visokovodnega vala na območju HE, vendar z optimizacijo DK dosežemo, da enak pretok, ki teče v akumulacijo, obenem tudi izteka iz akumulacije (skozi profil pregrade).

7.4 Skupne ugotovitve in potrditev hipoteze

Z izvedbo izračunov je bilo tako potrjeno, da lahko s spremljanjem lokacije gladinskega vrlišča sklepamo, ali je obratovanje hidroenergetskega objekta še v mejah ustreznega delovanja, zasnovanega ob zagonu objekta. Vsak odklik od začetne lokacije gladinskega vrlišča povzroča posledice, ki poslabšujejo delovanje hidroenergetskega objekta. Spremljanje lokacije gladinskega vrlišča nam tako omogoča enostavno metodo, kako ugotoviti, ali so morfološke spremembe akumulacijskega bazena že na taki stopnji, da je potrebno sprejeti ustrezne ukrepe za odpravo vplivov. S to ugotovitvijo nam je tudi uspelo potrditi zastavljeno hipotezo v poglavju 2.2.

S spremljanjem lokacije gladinskega vrlišča je bilo ugotovljeno, da se poleg spremembe gladinskih stanj spreminjajo tudi volumni vode v bazenu, kar vpliva na predpisani način obratovanja po pretoku s konstantnim volumnom. Ugotovljeno je, da je s stališča obratovanja celo bolj kritičen primer, ko se gladinsko vrlišče pomakne gorvodno (ko prevladuje vpliv hidravlične hrapavosti). Na prvi pogled je zaradi nižjih gladin v akumulacijskem bazenu pomik gladinskega vrlišča gorvodno zaželen, vendar izračuni z nestalnim tokom pokažejo, da se pri tem primeru (z obratovanjem po osnovni denivelacijski krivulji!) v akumulacijskem bazenu začne nižati volumen akumulirane vode. Voda se iz akumulacije dodaja v naraščajoči veji poplavnega vala, kar je še posebej neugodno (glej poglavje 3.5.4). S stališča obratovanja več objektov v verigi in zagotavljanja varnega delovanja je to nesprejemljivo. Pomik gladinskega vrlišča dolvodno (ko prevladuje vpliv dviga dna) je problematičen predvsem zaradi povišanih gladinskih stanj, ki lahko povzročajo poplave vzdolž akumulacijskega bazena. Zanimivo je, da se v takem primeru še vedno ohranja način obratovanja po pretoku s konstantnim volumnom, čeprav se akumulirana količina vode zmanjša. Izračuni so torej pokazali, da so morfološke spremembe v akumulacijskem bazenu povzročile spremembe lokacije gladinskega vrlišča.

Glavni problem premika lokacije gladinskega vrlišča je v tem, da denivelacijska krivulja, izdelana ob pričetku delovanja objekta, ni več ustrezna, kar se lahko kaže v spremenjenih gladinskih stanjih, spremembi volumna vode v bazenu in spremembi pretokov čez pregrado. Nadaljnja uporaba te krivulje kljub spremenjenim izhodiščem se lahko odraža predvsem v večji verjetnosti napačne odločitve obratovalcev objekta ob vodenju visokovodnega vala. Obratovalci v kritičnem času vodijo visokovodni val skladno s predpisano krivuljo, katera, kot so pokazali izračuni, po določenem času ne ustreza več. Obratovanje po denivelacijski krivulji, ki ne ustreza več, lahko povzroči nepravilni odziv obratovalcev na prihajajoči visokovodni val, kar se lahko odraža kot prepočasno spuščanje gladine na pregradi (povzročitev poplave v korenu zajezbe) oz. prehitro spuščanje gladine na pregradi (dodajanje vode h konici vala in povzročitev poplave dolvodno od pregrade). V primeru več objektov HE na vodotoku (veriga HE) je možnost povzročitve napake še toliko večja, obenem se zmanjša tudi možnost korekcije napake obratovanja.

Varno obratovanje objektov HE, predvsem v času visokih voda, je tako možno le s poznavanjem vseh dejanskih razmer na območju akumulacijskega bazena in ustrezno uporabo teh podatkov. Da bi se zmanjšala možnost napake, ki lahko izhaja iz obratovanja, je vsekakor nujno, da imajo obratovalci na voljo točne podatke o obnašanju gladinskih stanj v akumulacijskem bazenu. To zahteva, da je denivelacijska krivulja, po kateri obratuje objekt HE, ves čas življenjske dobe objekta ustrezna. Predhodno zahtevo lahko izpolnimo le na način, da periodično posodabljammo denivelacijsko in tudi pretočno krivuljo. Primeren čas, ko moramo posodobiti denivelacijsko krivuljo, nam pokaže spremljanje odstopanja gladinskega vrlišča od prvotne lokacije. Zato bi bilo koristno, da se zahteva po periodičnem spremljanju lokacije gladinskega vrlišča zapiše tudi v obratovalna navodila hidroelektrarn. Tako bi se obratovalce zavezalo k temu, da spremljajo ustreznost denivelacijske in pretočne krivulje in se s tem možnost napake obratovanja še dodatno zmanjša.

Vplivi, ki jih kažejo premiki gladinskega vrlišča, načeloma ne povzročijo drastičnih sprememb, ki bi vplivale na poplavno varnost območja gorvodno ali dolvodno od objekta HE. Gre za majhne spremembe na obratovanje, ki se pojavljajo postopoma v daljšem časovnem obdobju (več let). Zaradi tega problematiki sprememb obratovanja ni posvečeno veliko pozornosti oz. se obratovalci HE tega problema praviloma ne zavedajo. Zaradi tega se tudi postavlja vprašanje, kdaj so vplivi morfoloških sprememb tako veliki, da je potrebno pristopiti k optimizaciji denivelacijske krivulje.

Iz izkušenj, ki smo jih pridobili v sklopu izdelave te naloge, menimo, da bi morali za ugotavljanje, kdaj je potrebno pristopiti k optimizaciji obratovanja, spremljati, kako se obnaša gladinsko vrlišče z izvedbo izračunov gladinskih stanj v posamezni akumulaciji HE. Pri tem bi bilo potrebno hidravlični model, ki omogoča izračune, redno posodabljati z novimi posnetki dna akumulacije. Kadar bi ugotovili, da je prišlo do spremembe lokacije gladinskega vrlišča za vsaj 50 metrov, bi morali analizirati obratovanje. Če bi analiza pokazala odstopanje od osnovnega načina obratovanja, bi bilo potrebno pristopiti k optimizaciji denivelacijske krivulje.

V skladu z določili koncesijskih pogodb, ki jih koncesionarjem podeljujejo za proizvodnjo električne energije na vodotokih v Sloveniji, je predpisana zahteva, da je potrebno vsaj enkrat na tri leta izvesti posnetek dna akumulacije velikih hidroelektrarn. Z izvedbo te meritve koncesionar pridobi osnovni podatek za določitev lokacije gladinskega vrlišča in s tem možnost, da z minimalnimi stroški pridobi ugotovitve o spremembah obratovanja, kar mu

zagotavlja nadaljnje ohranjanje varnega delovanja objektov. Torej ta naloga podaja metodologijo, kako interpretirati izmerjeno spremenjeno stanje v akumulaciji.

7.5 Smernice za nadaljnje analize

Za potrditev vseh ugotovitev pridobljenih v sklopu te naloge bi vsekakor bilo potrebno izvesti še več izračunov na različnih akumulacijah in še tam analizirati, kako se obnaša gladinsko vrlišče. Za podobne akumulacije, kot so bile obravnavane v sklopu te naloge, bi osnovne zakonitosti, ki smo jih ugotovili, morale v splošnem veljati, vendar lahko to z gotovostjo potrdijo le dodatni izračuni, hkrati pa pokažejo še kakšne posebnosti v drugih akumulacijah.

Pri izvedbi osnovnih izračunov (poglavje 5) sta bili privzeti domnevi, da se gladina dna in hidravlična hrapavost po celotni akumulaciji spreminjata enakomerno, kar je povzročilo določen vpliv na obnašanje gladinskega vrlišča. V naravnih vodotokih upoštevani domnevi seveda ne držita. To je bilo potrjeno z analizo in izračuni za primer HE Boštanj. Splošne zakonitosti vplivov na gladinsko vrlišče so bile sicer ugotovljene, vendar niso bile čisto take, kot bi pričakovali glede na ugotovitve iz osnovnih izračunov. Pri spremembi hidravlične hrapavosti in dvigu dna je prišlo do manjših sprememb lokacije gladinskega vrlišča, kot bi pričakovali. Menimo, da je to posledica neenakomernosti odlaganja sedimentov po dnu in verjetno tudi oblike akumulacije (neenakomernost prečnih profilov vodotoka).

Z nadaljnjimi analizami bi se tako morali predvsem usmeriti v obdelavo več primerov različnih akumulaciji pretočnih HE in še dodatno preveriti vpliv oblike akumulacije ter na neki način bolje upoštevati neenakomernost odlaganja sedimentov po dnu akumulacije. Eden izmed možnih načinov, kako to doseči, bi bil lahko z ugotavljanjem odstotka manjšanja pretočnega prereza v izbranih prečnih profilih akumulacije. V tem odstotku bi bilo zajeto tako spreminjanje prereza zaradi odlaganja oz. odnašanja sedimentov tako po brežinah kot po dnu akumulacije. S takšnimi raziskavami bi lahko povečali zanesljivost izračunov za naravne, različne oblike akumulacije z upoštevanjem vzdolžnih procesov transporta sedimentov v akumulacijah HE.

8.0 ZAKLJUČKI

Ob pričetku delovanja pretočnih hidroelektrarn je zasnovano obratovanje objekta, ki omogoča, da so vplivi novega objekta v prostoru minimalni in je obratovanje varno. Na podlagi oblike prečnih prereзов vodotoka, vzdolžnega naklona dna vodotoka, hidravlične hrapavosti vzdolž vodotoka, varovalnih ukrepov pred škodljivim delovanjem voda itd. so določena gladinska stanja v akumulacijskem bazenu in identificirane kritične toče v bazenu (če obstajajo). Glede na upoštevanje predhodno naštetih dejavnikov je izbran način obratovanja objekta in zasnovana denivelacijska krivulja pregrade, ki tak način varnega in proizvodno učinkovitega obratovanja omogoča.

Pri delovanju pretočnih hidroelektrarn, ki obratujejo po pretoku s konstantnim volumnom (in temu prirejeno denivelacijsko krivuljo), se pri prevajanju visokih voda v akumulacijskem bazenu oblikuje gladinsko vrlišče. Gladinsko vrlišče predstavlja tisto točko v bazenu, kjer globina vode ostaja konstantna, ko se spreminja vzdolžni naklon vodne gladine (oz. pretoki).

Z vzpostavitvijo akumulacijskega bazena se prične proces sedimentacije, ki prične povzročati spremembe. V akumulacijskem bazenu se prične odlagati grobi, fini in fini lebdeči delci, ki spreminjajo obliko in sestavo dna. Glavni spremembi sta sprememba hidravlične hrapavosti in dvig dna, kar potrjujejo tudi izvedene meritve v obstoječih bazenih hidroelektrarn. Enako je bilo ugotovljeno v sklopu izdelave tega dokumenta (poglavje 4.3.3 in 5.2.1). S spremembami, ki nastanejo pri procesu sedimentacije, je vprašljivo, ali hidroelektrarne še lahko zagotavljajo enak način obratovanja, kot je bil določen ob pričetku delovanja objekta.

Sprememba hidravlične hrapavosti in dvig dna v akumulacijskem bazenu povzročita vpliv na gladinska stanja in s tem tudi vplivata na lokacijo gladinskega vrlišča. Ker je lokacija gladinskega vrlišča odraz načina obratovanja, to pomeni, da bo zaradi spremembe lokacije vrlišča prišlo tudi do spremembe začetnega predpisanega načina obratovanja. Trditev je bila preverjena z izdelavo matematičnega hidravličnega modela, v katerem sta bila obravnavana dva primera. Izvedeni so bili izračuni za primer z enostavno geometrijo akumulacije in za primer obstoječe hidroelektrarne Boštanj. Izračuni za primer z enostavno geometrijo so omogočili preveritev teoretičnih vplivov in posledic spremembe v akumulaciji na lokacijo gladinskega vrlišča. Na primeru HE Boštanj so predhodno pridobljene ugotovitve preverjene.

Iz opravljenih izračunov izhaja, da tako hidravlična hrapavost kot dvig dna vplivata na spremembo lokacije gladinskega vrlišča. Za različna stanja sprememb bazena se lokacija lahko po vzdolžni osi premika tudi po več 100 metrov glede na prvotno lokacijo. Ugotovljeno je, da ima sprememba hidravlične hrapavosti prevladujoč vpliv. Potrjeno je tudi, da gre v naravnih razmerah običajno za dva nasprotujoča si vpliva. Zmanjšanje hidravlične hrapavosti niža gladinska stanja, medtem ko dvig dna povzroči dvig gladine v bazenu. V naravnih razmerah se zaradi prevladujočega vpliva hrapavosti običajno v prvih letih obratovanja gladinsko vrlišče pomakne gorvodno. Tak premik vrlišča ima na prvi pogled pozitiven vpliv, saj se gladinska stanja v akumulacijskem bazenu znižajo, kar pomeni večjo poplavno varnost pri nastopu visokih voda. Vendar za primere nastopa visokih voda izračuni pokažejo, da se s pomikom lokacije gladinskega vrlišča gorvodno način obratovanja po pretoku s konstantnim volumnom v akumulacijskem bazenu ne more več ohranjati. Z večanjem pretoka v akumulacijskem bazenu se prične manjšanje volumna vode, ki je akumuliran v bazenu. Zaradi dodatnega praznjenja bazena nenačrtovano prihaja do dodajanja vode k pretokom v naraščajoči konici poplavnega vala.

Dodajanje vode med naraščanjem poplavnega vala je nesprejemljivo s stališča zagotavljanja varnosti obratovanja, saj se s tem lahko dolvodno povzroči povečanje konice poplavnega vala. Če imamo samo en objekt na vodotoku, to še ni tako kritično. Če imamo več zaporednih objektov (veriga hidroelektrarn), je kakršno koli večanje pretokov nesprejemljivo. Če vsak objekt v naraščajoči veji poplavnega vala k pretoku doda še neko količino vode iz lastne akumulacije, lahko na dolvodnih območjih povzročimo tako povečane pretoke, da voda prestopi bregove. Ker objekti običajno ležijo na urbaniziranem območju (primer spodnja Sava), lahko s tem povzročimo katastrofo.

Sprememba lokacije gladinskega vrlišča je tako dober indikator, kdaj zasnovano obratovanje posamezne hidroelektrarne ni več v skladu s prvotno postavljenimi izhodišči. Da bi zagotovili enake pogoje, kot so bili ob pričetku delovanja objekta, moramo težiti k temu, da bi ohranili lokacijo gladinskega vrlišča ves čas delovanja objekta na enakem mestu. Ker poteka sedimentacije ne moremo preprečiti, moramo zagotoviti, da se lokacija gladinskega vrlišča obdrži na prvotni lokaciji z drugimi metodami. Učinkovita metoda je optimizacija denivelacijske krivulje, s katero se za različne pretoke določijo nove višine obratovalne gladine. Z izračuni z izdelanim hidravličnim matematičnim modelom je bilo preverjeno obnašanje gladinskega vrlišča, kadar so upoštevane optimirane denivelacijske krivulje. Z delovanjem objekta po optimirani denivelacijski krivulji je gladinsko vrlišče za spremenjene morfološke razmere ostalo na lokaciji, ki je bila določena ob pričetku delovanja objekta. S tem je bilo zagotovljeno tudi ohranjanje obratovanja po pretoku s konstantnim volumnom vode v bazenu. Denivelacijsko krivuljo lahko optimiziramo samo končno mnogokrat. S časom bo sedimentacija tako spremenila obliko akumulacijskega bazena, da samo z optimizacijo denivelacijske krivulje ne bo več mogoče zagotavljati ohranjanja lokacije gladinskega vrlišča. Takrat nam na voljo ostanejo samo še invazivnejše metode, s katerimi dosežemo odstranjevanje sedimentov z območja akumulacijskega bazena. V takih primerih običajno lahko uporabimo izpiranje sedimentov iz bazena (flushing) in hidravlično (sediment syphoning) ali mehansko odstranitev sedimentov.

Spremljanje lokacije gladinskega vrlišča nam tako omogoča razmeroma enostaven način spremljanja, ali posamezna pretočna hidroelektrarna še obratuje v okvirjih, ki so bili zastavljeni ob zagonu objekta. Na tem mestu je vseeno potrebno omeniti, da je spremljanje lokacije gladinskega vrlišča verjetno možno le s periodično izvedbo izračunov. Vzpostavitev takega sistema meritev gladin akumulacijskih bazenov, ki bi spremljal, ali se lokacija vrlišča spreminja, verjetno ni možno z dovolj majhno merilno negotovostjo. Prav tako je malo verjetno, da bi upravljavci objektov spremljali lokacijo vrlišča. Gladinsko vrlišče se v bazenu pojavi med prevajanjem vala visoke vode, takrat pa imajo upravljavci dosti drugih zadolžitev, ki se jim morajo posvetiti. Lokacijo vrlišča pa je med dogodkom na terenu verjetno tudi težko zaznati. Vseeno pa bi bilo koristno, da se v obratovalna navodila za posamezne objekte HE doda, da je potrebno periodično preverjati lokacijo gladinskega vrlišča (računsko).

Opravljeni izračuni podajajo ugotovitve, na kakšen način morfološke spremembe vplivajo na lokacijo gladinskega vrlišča in s tem na zasnovano obratovanje pretočne hidroelektrarne. V dokumentu so podane splošne ugotovitve obnašanja gladinskega vrlišča v primeru morfoloških sprememb, ki jih ne moremo neposredno uporabiti v vseh primerih. Težava pri določanju lastnosti gladinskega vrlišča je, da se akumulacijski bazeni pretočnih hidroelektrarn med seboj lahko bistveno razlikujejo. Za potrditev veljavnosti ugotovitev tudi za akumulacijske bazene bistveno drugačnih oblik bi bilo potrebno izvesti še več izračunov za različne primere bazena. Problematično je tudi napovedovanje obsega in lokacije sedimentacije, saj se sedimenti po bazenu odlagajo bolj neenakomerno, kot je bilo

predvideno v tej nalogi. Za ugotavljanje, ali obstajajo kakšne lastnosti gladinskega vrlišča, ki so značilne za vse akumulacijske bazene, bi tako verjetno morali opraviti hidravlične izračune za vrsto različnih dejanskih bazenov hidroelektrarn. Na tak način bi dobili zanesljiv vzorec podatkov, iz katerega bi lahko sklepali na splošno veljavne lastnosti vrlišča.

Vsekakor je bilo z nalogo potrjeno, da upravljanje s pretočnimi hidroelektrarnami zahteva prilagajanje delovanja skozi celotno življenjsko dobo objekta. K optimizacijam delovanja je potrebno pristopiti že razmeroma kmalu po začetku obratovanja (po nekaj letih), ko spremembe gladinskih stanj in prelivne sposobnosti pregradnih objektov morda še niso opazne. Ena izmed možnosti, da bi spremljali delovanje pretočnih hidroelektrarn, je vsekakor z izdelavo matematičnih hidravličnih modelov, ki bi se morali obdobjno posodabljati z novimi podatki (meritve gladin, batimetrija). Tako bi na podlagi vsakokratnih meritev batimetrije lahko izračunali še lokacije gladinskega vrlišča kot del analiz obratovalnega monitoringa. Na tak način bi lahko spremljali lokacijo gladinskega vrlišča in gladinska stanja v akumulacijskem bazenu, kar bi upravljavcu omogočalo, da se odzove na morebitne spremembe v bazenu, ki bi lahko vplivale na varnost obratovanja objekta. Obenem bi izračuni opravljeni z modelom predstavljali arhivske podatke upravljavcu, ki bi na ta način pridobil vpogled v hidravlične razmere na območju posameznega objekta za celotno (ali del) življenjsko dobo objekta.

VIRI IN LITERATURA

Monografije:

Batucă D. G., Jordaan J. M. 2000. Silting and Desilting of Reservoirs. Rotterdam, A.A. Balkema: 353 str.

Senturk F. 1994. Hydraulics of dams and reservoirs. USA, Colorado, Water Resources Publications: 788 str.

Chanson H. 1999. The hydraulics of open channel flow. Australia, University of Queensland: 495 str.

Steinman F. 1999. Hidravlika. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 295 str.

Steinman F., Banovec P. 2008. Hidrotehnika – Vodne zgradbe I. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 147 str.

Agroskin I.I., Dmitrijev G.T., Pikalov F.I. 1969. Hidraulika. Zagreb, Tehnička knjiga: 331 str.

Mikoš M. 2000. Urejanje vodotokov – skripta. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 182 str.

Hočevar M., Dular M. 2015. Uvod v hidroenergetske sisteme. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo: 142 str.

Članki:

Jowett, I.G., 2012. 2D or not 2D, that is the question. 9th International Symposium on Ecohydraulics.

Werner, M.G.F. 2004. A comparison of flood extent modelling approaches through constraining uncertainties on gauge data. Hydrology and Earth system science: 1141-1152.

Mitkova, V., Pekarova, P., Miklanek, P., Pekar, J. 2005. Analysis of flood propagation changes in the Kienstock–Bratislava reach of the Danube River. Hydrological Sciences. Journal des Sciences Hydrologiques: 655-668.

Ciuha D., 2005. Prevajanje valov visokih voda vzdolž verige hidroelektrarn na spodnji Savi. Zbornik Mišičevih vodarskih dni 2005: 96-102.

Zakrajšek M., Četina M., 2005. Dinamično analiziranje denivelacije kot ukrepa za prevajanje poplavnih valov preko verige HE na spodnji Savi. Zbornik Mišičevih vodarskih dni 2005: 103-110.

Petkovšek G., Roca M., 2014. Impact of reservoir operation on sediment deposition. Water management 167: 557-584.

Maren D., Winterwerp J. C., Vroom J., 2015. Fine sediment transport in to the hyper-turbid lower Ems River: the role of channel deepening and sediment-induced drag reduction. *Ocean Dynamics* 65: 589-605.

Dolar B., Kovačič B., Kramer J., Kamnik R., 2008. Meritve vsebnosti suspendiranega materiala v akumulacijskem jezeru HE Boštanj. *Zbornik Mišičevih vodarskih dni 2008*: 211-218.

Elaborati, študije, projektna dokumentacija:

Ciuha D. 2013. Obratovanje verige hidroelektrarn na spodnji Savi pri visokih vodah Save. *Elaborat*. Brežice, HESS d.o.o.: 81 f

Haller T. 1993. Študija varovalnih ukrepov za varovanje Radeč pred visokimi gladinami Save v akumulaciji HE Vrhovo. *Študija*. Ljubljana, Vodnogospodarski inštitut Ljubljana: 17 f

Čehovin I., Buh M., Gorenc A., Jocič M. 1990. Raziskave problematike v zvezi s transportom (zaostajanjem in izpiranjem) proda in suspenzij na odseku med Zidanim Mostom in hrvaško mejo, med in po izgradnji verige; Poročilo. Ljubljana, Vodnogospodarski inštitut Ljubljana; 20 f

Ciuha D., Brenčič M., Goršak D., 2008. Medsebojni vplivi infrastrukturnih in energetskih ureditev na spodnji Savi v času izrednih hidroloških dogodkov: visoko vodni valovi; *Študija*. IBE d.d.: 156 f

Fazarinc R., 2005. Medsebojni vplivi infrastrukturnih in energetskih ureditev na spodnji Savi v času izrednih hidroloških dogodkov – Določitev sintetičnih poplavnih valov dolgih povratnih dob; *študija*. Brežice, HESS d.o.o.: 262 f

Anzeljc D., Burja D., Fazarinc R., 2002. Hidrološka študija reke Save na odseku HE Boštanj, HE Blanca, HE Krško, HE Brežice in HE Mokrice; *študija*. Ljubljana, IBE d.d.: 66 f

Buyalski C. P., Ehler D. G., Falvey H. T., Rogers D. C., Serfozo E. A. 1991. *Canal system optimization manual*. U.S. Department of interior, Bureau of reclamation: 128 f

Parrish J. 1997. *A methodology for automated control of sloping canals*. The University of Iowa, College of Engineering, Iowa Institute of Hydraulic Research: 111 f

Arcement J. G., Schneider V. R., 1989. *Guide for selecting Manning's roughness coefficients for natural channels and flood plains*. U.S. Geological survey. Department of interior: 44 f

Phillips J.V., Tadayon S., 2007. *Selection of Manning's Roughness Coefficient for Natural and Constructed Vegetated and Non-Vegetated Channels, and Vegetation Maintenance Plan Guidelines for Vegetated Channels in Central Arizona*. Virginia, U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey: 49 f

Mlačnik J. 2008, Hidravlična modelna raziskava evakuacije plavja na pregradah HE na spodnji Savi in izvedba hidravličnih meritev gladin Save; *študija*, Brežice, HESS d.o.o.: 11 f

Josipovič Z., Kvaternik K., Ciuha D., Brenčič M. 2009, HE Blanca – Navodilo za hidravlično obratovanje prelivnih polj pri nominalni zaježitvi na koti 174,20 m n.m.; PZI dokumentacija, Brežice, HESS d.o.o.:

Josipovič Z., Širca A., Brenčič M. 2005, HE Blanca – Hidravlični izračun; IDP dokumentacija, Brežice, HESS d.o.o.: 29 f

Josipovič Z., Kvaternik K., Širca A. 2002, HE Boštanj – Hidravlični izračun, IDP dokumentacija, Brežice, HESS d.o.o.: 24 f

Zadnik B., 2012. Smernice za zagotavljanje varnosti pregradnih objektov - elektronska knjiga. Ljubljana, Inženirska zbornica Slovenije.

Elektronski viri:

HE na spodnji Savi – statistični hidrološki podatki za reko Savo, za profil Radeče, HE Krško, HE Brežice in v.p. Čatež, ARSO, dopis številka 35921-5/2011; 29.3.2011

Spletna stran ARSO – arhiv hidroloških podatkov,
http://vode.arso.gov.si/hidarhiv/pov_arhiv_tab.php (maj 2015)

Košar T. HE Vrhovo – slike akumulacije, elektronsko sporočilo, 20. oktober 2015. Osebna komunikacija.

Howstuffworks.com – spletna stran,
<http://science.howstuffworks.com/environmental/energy/10-hydropower-innovations.htm/printable>, (14.12.2015)

Hover dam – spletna stran,
<http://www.bestourism.com/items/di/1184?title=Hoover-Dam-in-USA&b=184>, (14.12.2015)

Three gorges dam – spletna stran,
<http://www.ohunbelieve.com/three-gorges-dam-is-the-worlds-largest-power-station/>,
(14.12.2015)

Chief Joseph dam – spletna stran,
<http://www.cbr.washington.edu/hydro/chiefjoseph>, (14.12.2015)

HE Boštanj – spletna stran,
<http://www.he-ss.si/he-bostanj-splosno.html>, (14.12.2015)

Voith – spletna stran,
http://voith.com/en/markets-industries/industries/hydro-power/pumped-storage-plants/goldisthal_main-9879-9879.html#, (14.12.2015)

Hyhowworks – spletna stran,
<http://water.usgs.gov/edu/hyhowworks.html>, (14.12.2015)

Ivcleantech – spletna stran,
http://www.ivcleantech.com/2011_09_01_archive.html, (14.12.2015)

Cysanyigroup – spletna stran,
<http://www.csanyigroup.com/introduction-to-micro-hydropower>, (14.12.2015)

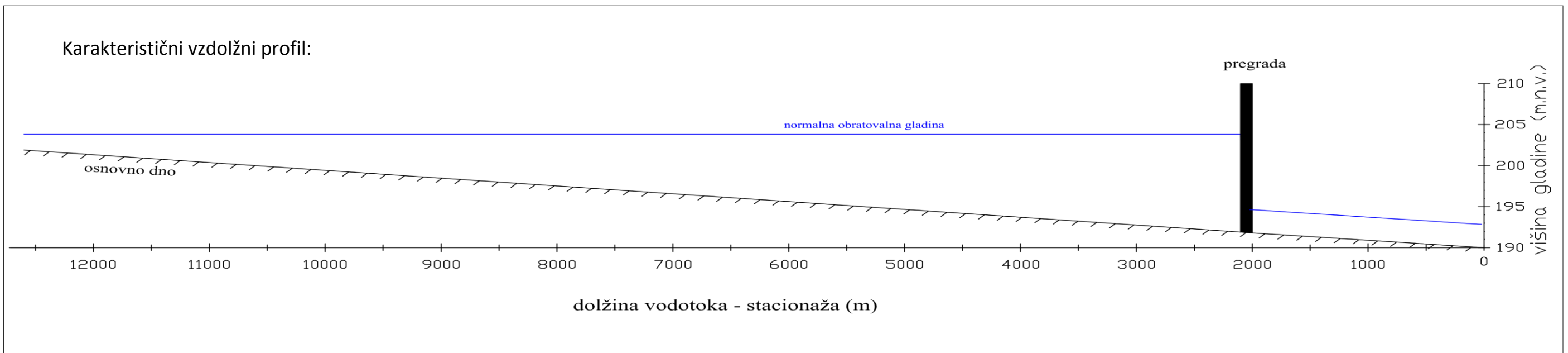
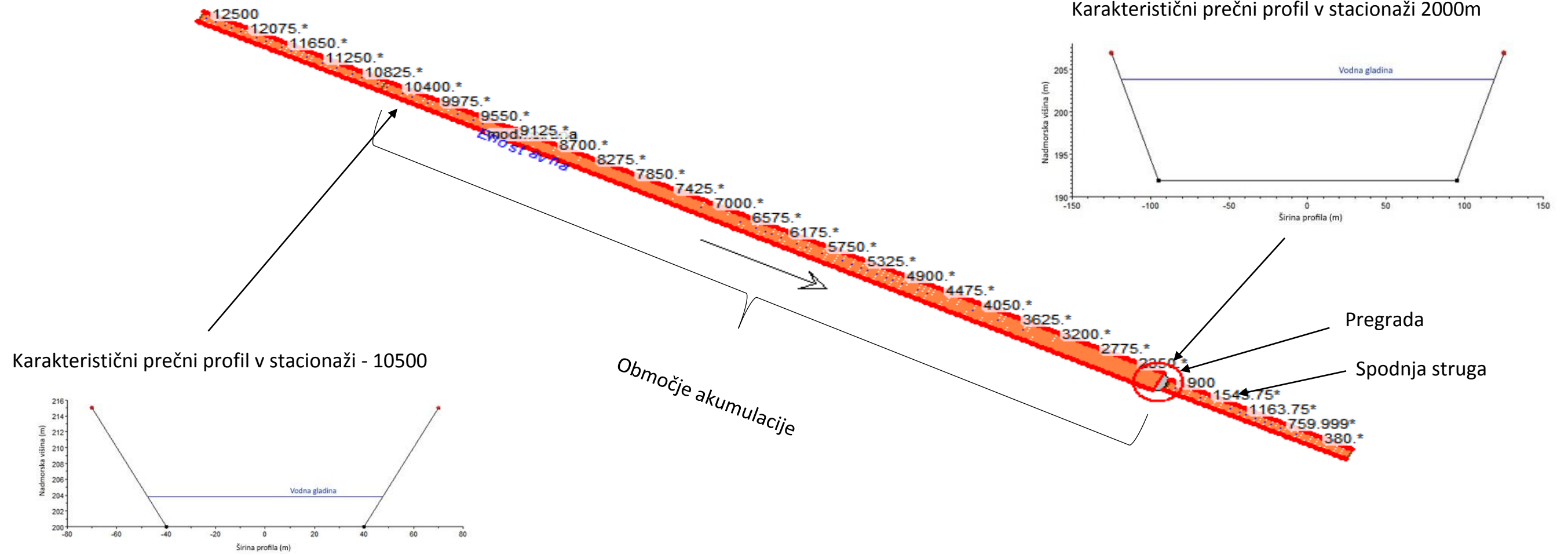
HEC – spletna stran,
<http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/> (maj 2015)
<http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-georas/> (maj 2015)

ESRI – spletna stran,
<http://www.esri.com/software/arcgis/arcgis-for-desktop>, (maj 2015)

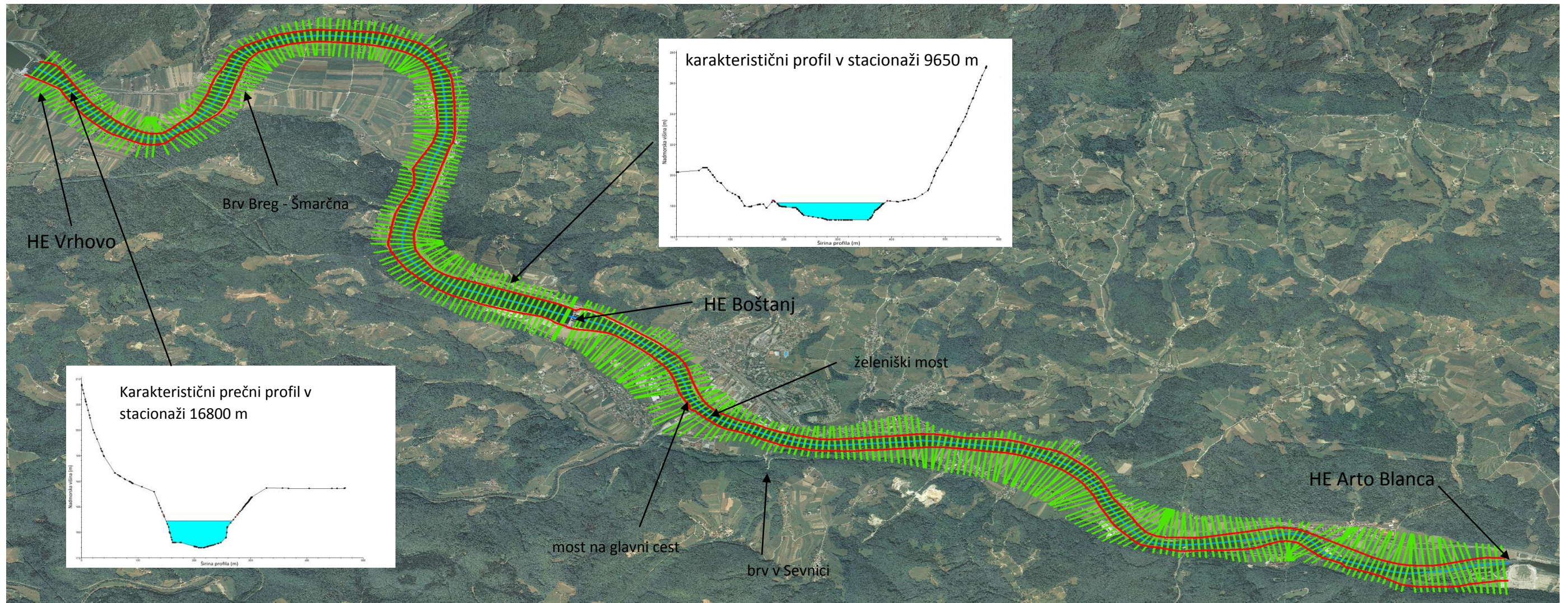
PRILOGE

- Priloga A – Situacija, prečni in vzdolžni karakteristični profili enostavnega hidravličnega modela**
- Priloga B – Situacija, prečni in vzdolžni karakteristični profili hidravličnega modela HE Boštanj**
- Priloga C – Primerjava osnovne in nove geometrije hidravličnega modela HE Boštanj – spremembe batimetrije (odlaganje/odnašanje plavin)**
- Priloga D – Enostavni hidravlični model, osnovni primer, stalni tok: vzdolžni prerez oblikovanje gladinskega vrlišča**
- Priloga E – Enostavni hidravlični model, osnovni primer, nestalni tok: vzdolžni prerez - oblikovanje gladinskega vrlišča**
- Priloga F – Enostavni hidravlični model, spremembe dna, stalni tok: vzdolžni prerez - oblikovanje gladinskega vrlišča**
- Priloga G – Enostavni hidravlični model, spremembe hidravlične hrapavosti, stalni tok: vzdolžni prerez - oblikovanje gladinskega vrlišča**
- Priloga H – Enostavni hidravlični model, spremembe dna in hidravlične hrapavosti ($n_g=0,02$), stalni tok: vzdolžni prerez - oblikovanje gladinskega vrlišča**
- Priloga I – Enostavni hidravlični model, spremembe dna in hidravlične hrapavosti ($n_g=0,025$), stalni tok: vzdolžni prerez - oblikovanje gladinskega vrlišča**
- Priloga J – Enostavni hidravlični model, spremembe dna in hidravlične hrapavosti ($n_g=0,035$), stalni tok: vzdolžni prerez - oblikovanje gladinskega vrlišča**
- Priloga K – Enostavni hidravlični model, spremembe dna in hidravlične hrapavosti ($n_g=0,04$), stalni tok: vzdolžni prerez - oblikovanje gladinskega vrlišča**
- Priloga L – Prikaz optimiranih denivelacijskih krivulj uporabljenih v izračunih**
- Priloga M – Enostavni hidravlični model, nestalni tok: vzdolžni prerez - oblikovanje gladinskega vrlišča za obravnavne primere izračuna**
- Priloga N – Model HE Boštanj, stalni tok: vzdolžni prerez - oblikovanje gladinskega vrlišča za obravnavne primere izračuna – stalni tok**
- Priloga O – Model HE Boštanj, nestalni tok: vzdolžni prerez - oblikovanje gladinskega vrlišča za obravnavne primere izračuna – nestalni tok**
- Priloga P - Spremembe volumnov vode za izračunane primere - enostavni hidravlični model, stalni tok**

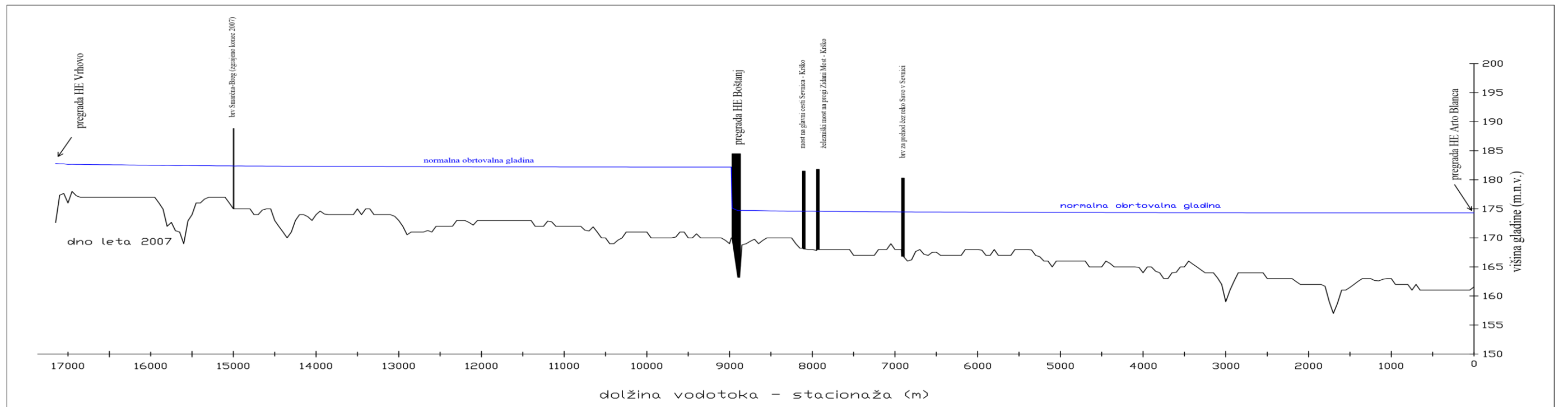
PRILOGA A: Situacija, prečni in vzdolžni karakteristični profili enostavnega hidravličnega modela



PRILOGA B: Situacija in vzdolžni karakteristični profili hidravličnega modela HE Boštanj



Vzdolžni profil:

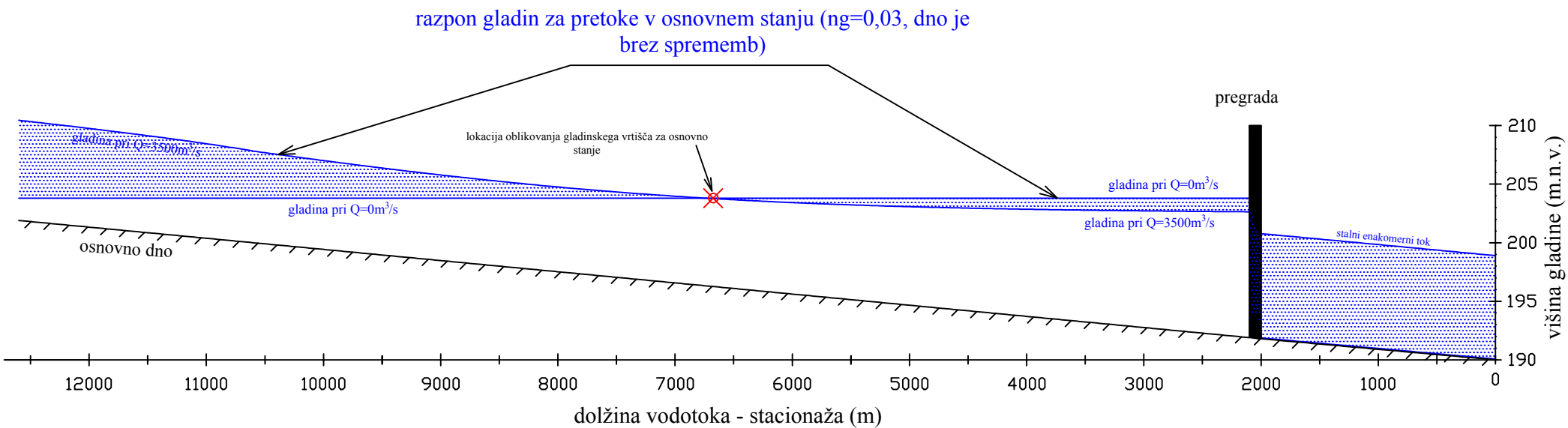


Priloga C: Primerjava osnovne in nove geometrije za hidravličnega modela HE Boštanj



PRILOGA D:

Enostavni hidravlični model, osnovni primer, stalni tok: vzdolžni prerez - oblikovanje gladinskega vrtišča



LEGENDA:

gladina pri osnovnem stanju

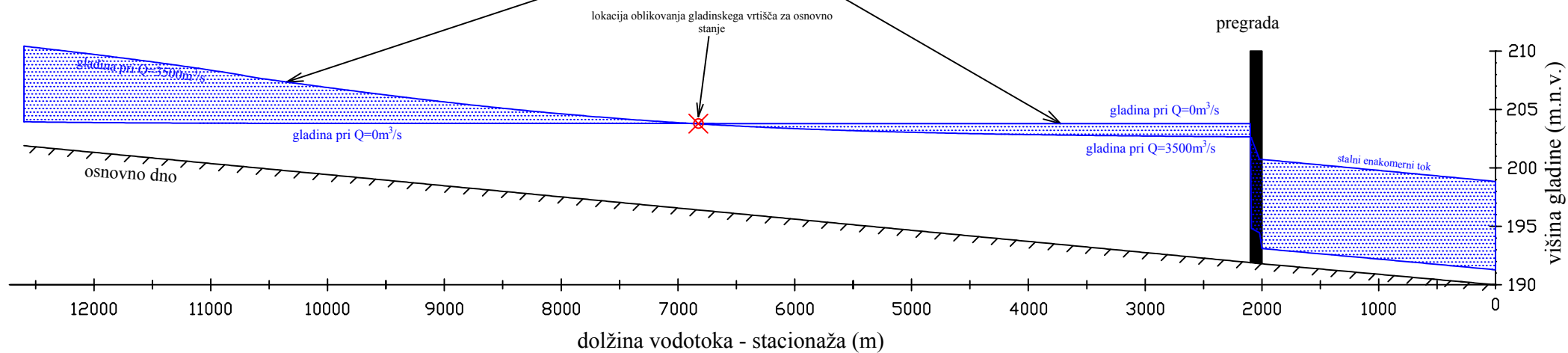
lokacija gladinskega vrtišča



PRILOGA E:

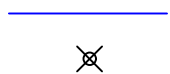
Enostavni hidravlični model, osnovni primer, nestalni tok: vzdolžni prerez - oblikovanje gladinskega vrlišča

razpon gladin za pretoke v osnovnem stanju ($n_g=0,03$, dno je brez sprememb, široki in ozki hidrogram)



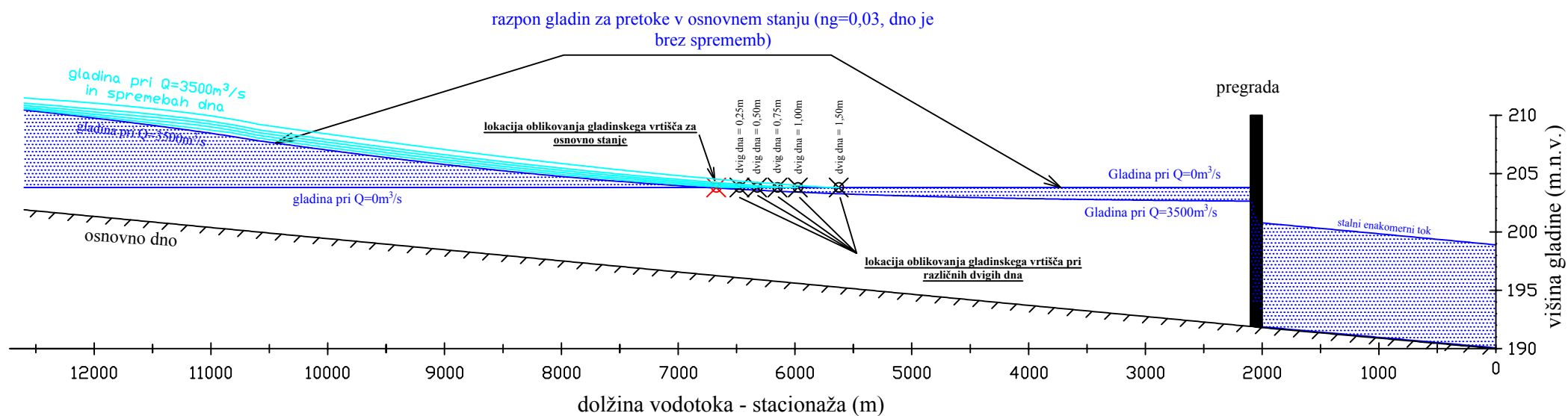
LEGENDA:

gladina pri osnovnem stanju
lokacija gladinskega vrlišča



PRILOGA F:

Enostavni hidravlični model, spremembe dna, stalni tok: vzdolžni prerez - oblikovanje gladinskega vrtilišča

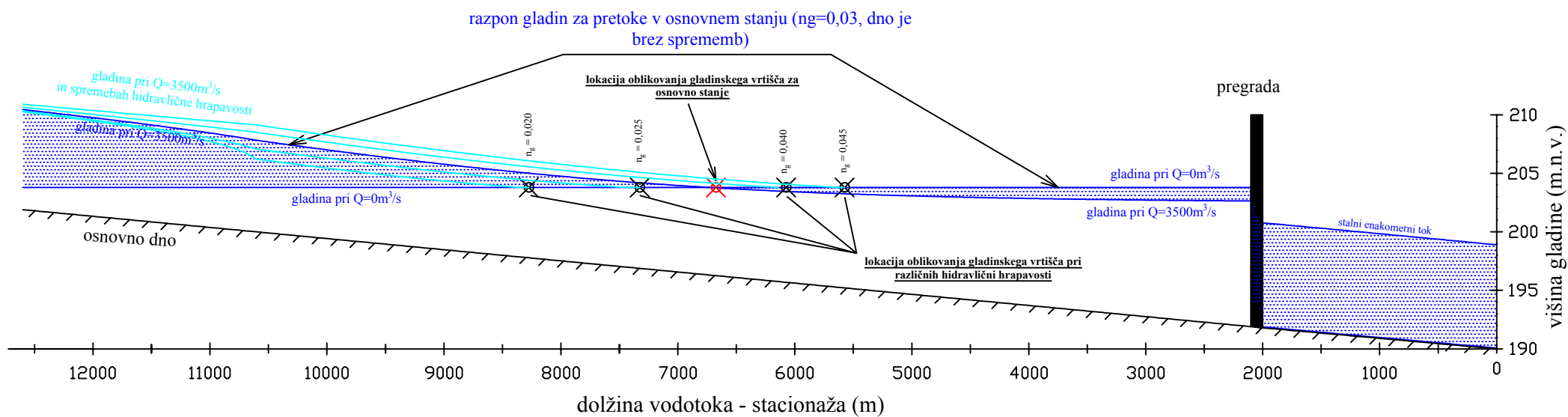


LEGENDA:

- gladina pri osnovnem stanju
- gladine pri spremembah dna
- lokacija gladinskega vrtilišča X

PRILOGA G:

Enostavni hidravlični model, spremembe hidravlične hrapavosti, stalni tok: vzdolžni prerez - oblikovanje gladinskega vrtilišča

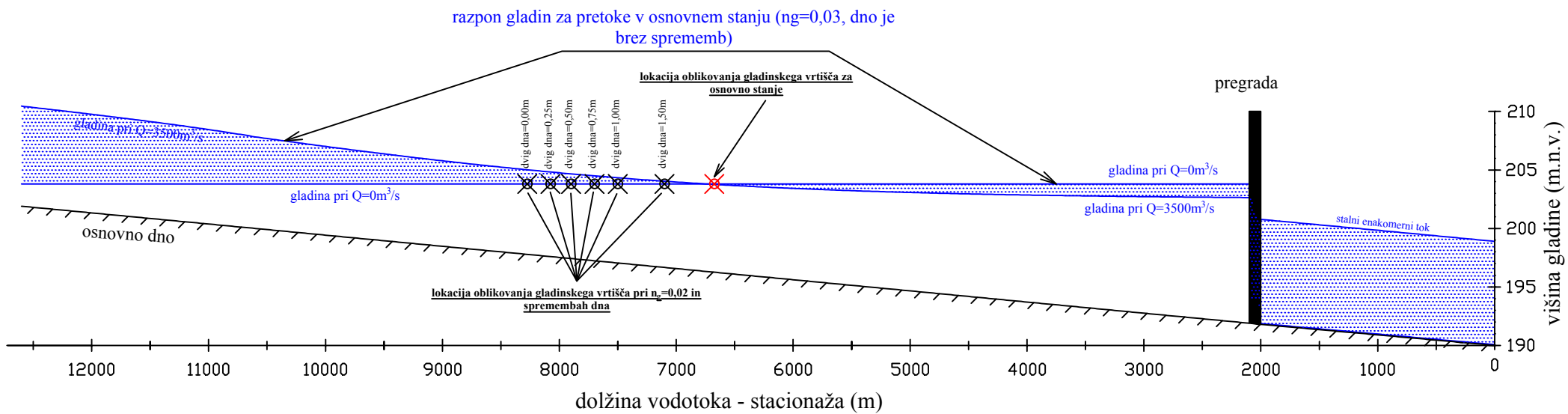


LEGENDA:

- gladina pri osnovnem stanju
- gladine pri spremembah dna
- lokacija gladinskega vrtilišča X

PRILOGA H:

Enostavni hidravlični model, spremembe dna in hidravlične hrapavosti ($n_g=0,02$), stalni tok: vzdolžni prerez - oblikovanje gladinskega vrtišča



LEGENDA:

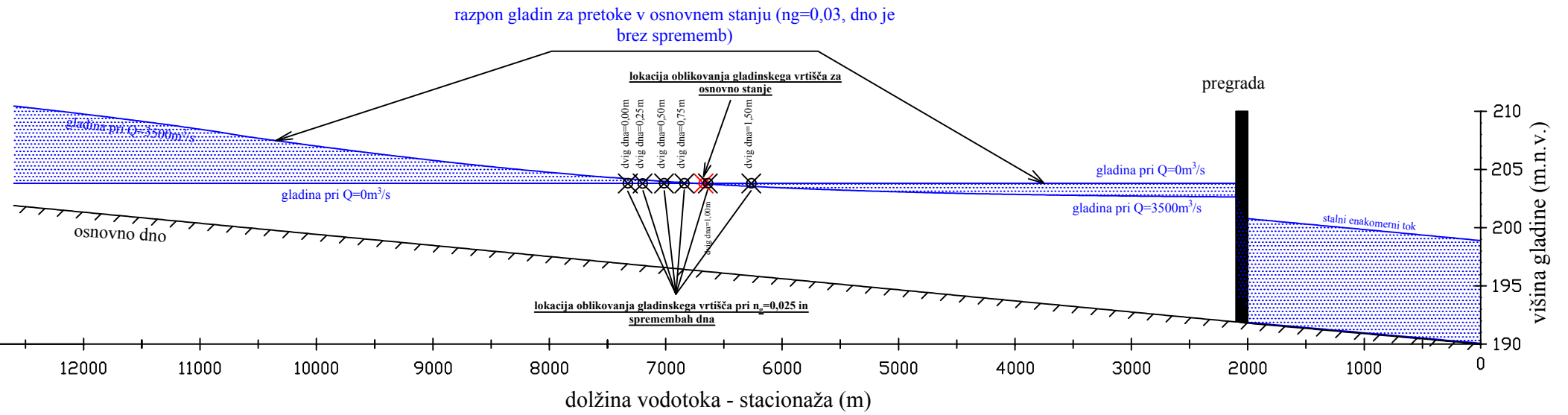
gladina pri osnovnem stanju

lokacija gladinskega vrtišča



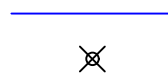
PRILOGA I:

Enostavni hidravlični model, spremembe dna in hidravlične hrapavosti ($n_g=0,025$), stalni tok: vzdolžni prerez - oblikovanje gladinskega vrtišča



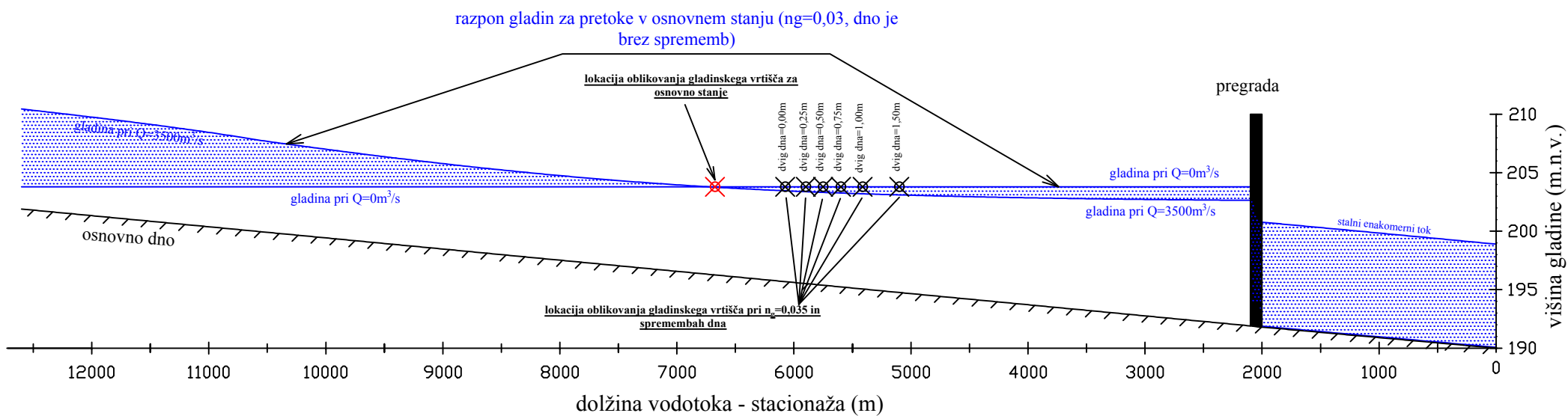
LEGENDA:

gladina pri osnovnem stanju
lokacija gladinskega vrtišča



PRILOGA J:

Enostavni hidravlični model, spremembe dna in hidravlične hrapavosti ($n_g=0,035$), stalni tok: vzdolžni prerez - oblikovanje gladinskega vrtišča



LEGENDA:

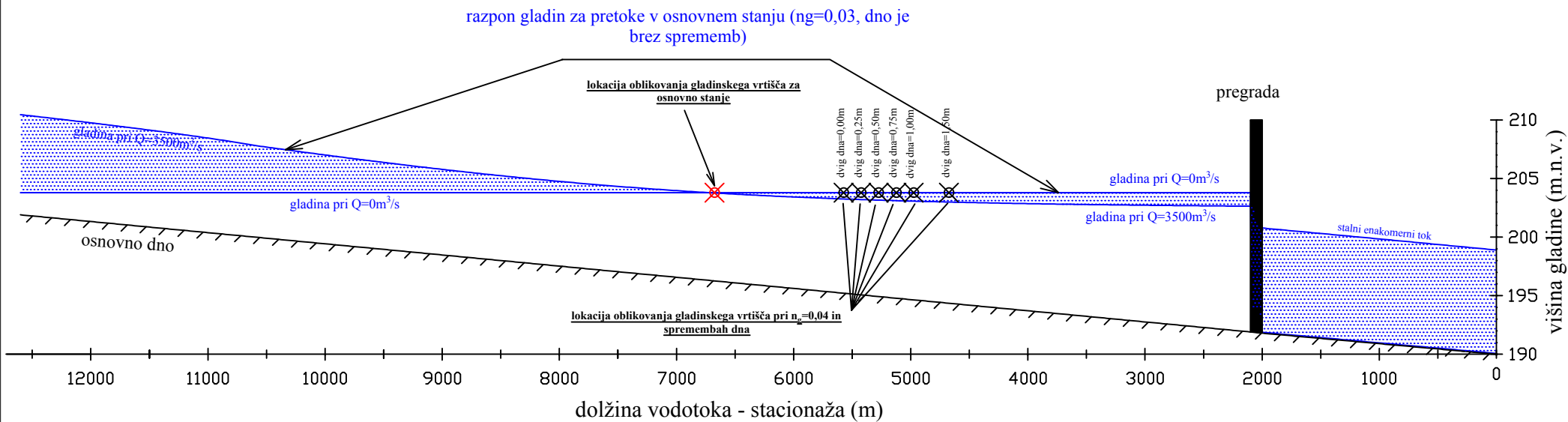
gladina pri osnovnem stanju

lokacija gladinskega vrtišča



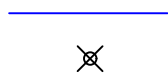
PRILOGA K:

Enostavni hidravlični model, spremembe dna in hidravlične hrapavosti ($n_g=0,04$), stalni tok: vzdolžni prerez- oblikovanje gladinskega vrtišča

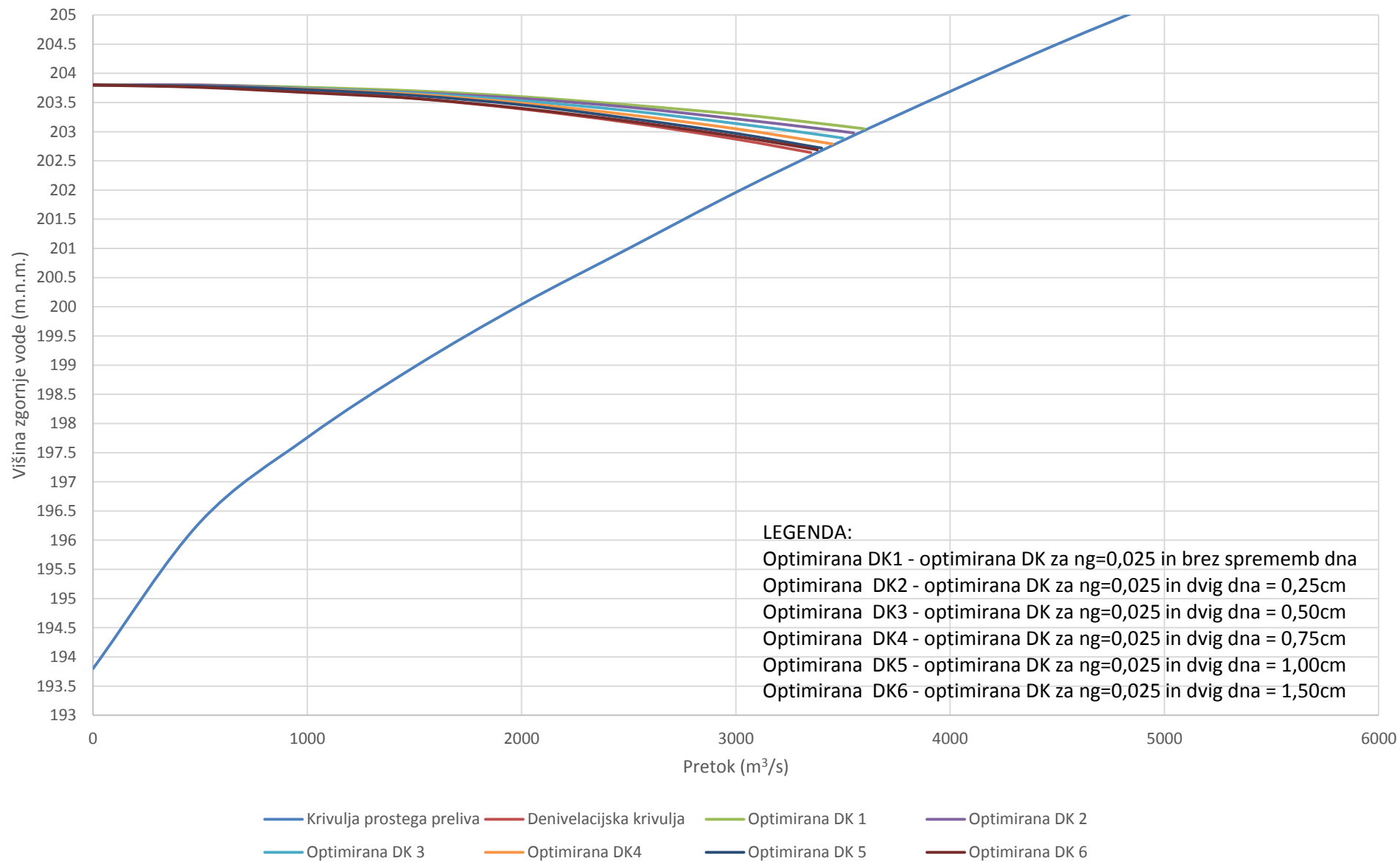


LEGENDA:

gladina pri osnovnem stanju
lokacija gladinskega vrtišča

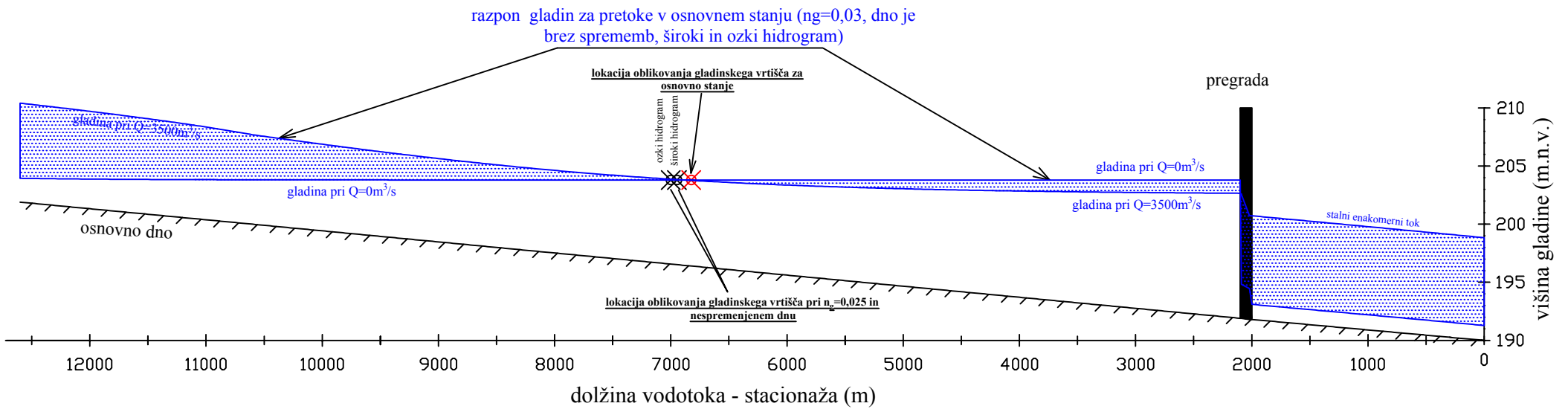


PRILOGA L: Prikaz optimiranih denivelacijskih krivulj uporabljenih v izračunih



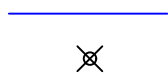
PRILOGA M:

Enostavni hidravlični model, nestalni tok: vzdolžni prerez oblikovanje gladinskega vrlišča za obravnavne primere izračuna

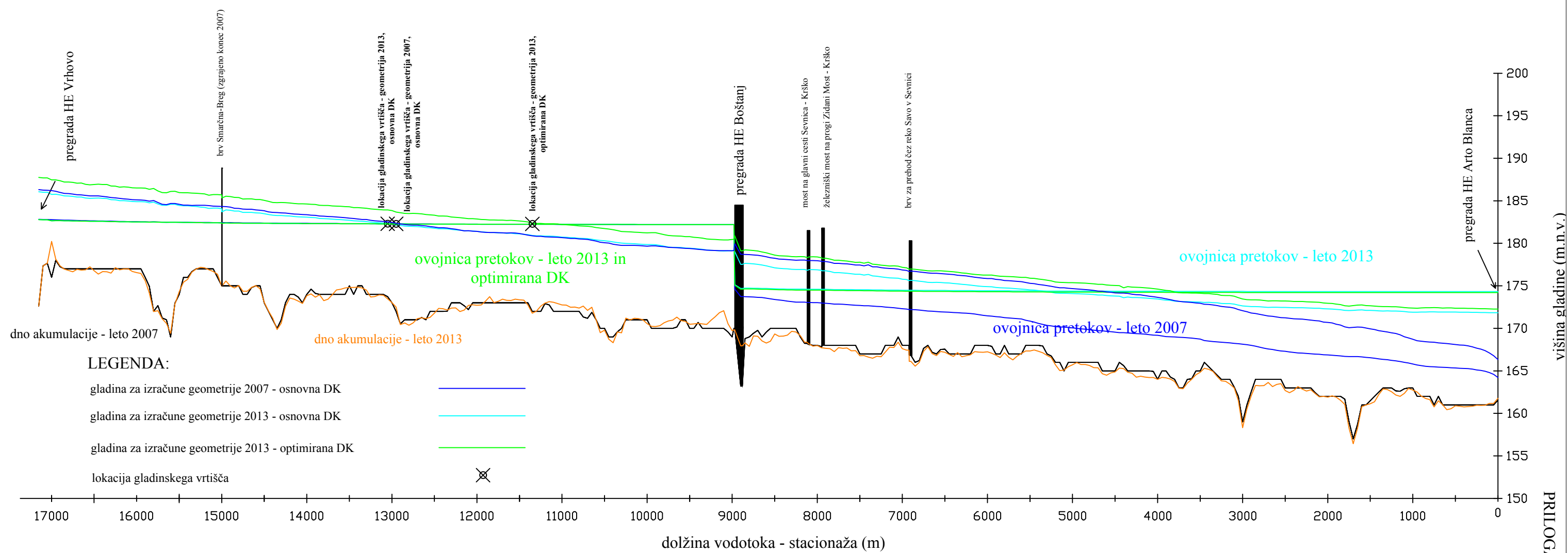


LEGENDA:

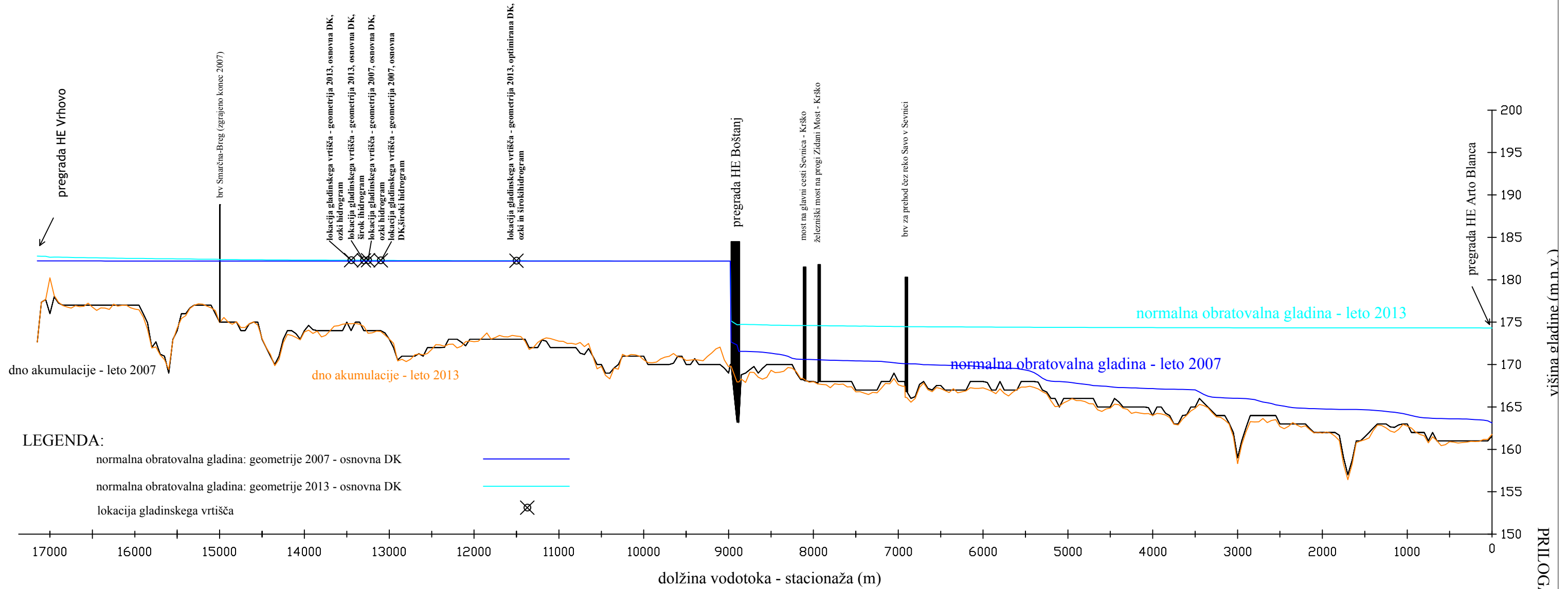
gladina pri osnovnem stanju
lokacija gladinskega vrlišča



PRILOGA N:
 Model HE Boštanj, stalni tok: vzdolžni prerez oblikovanje gladinskega vrlišča za obravnavne primere izračuna - stalni tok



PRILOGA O:
 Model HE Boštanj, nestalni tok: vzdolžni prerez oblikovanje gladinskega vrtišča za obravnavne primere izračuna - nestalni tok



PRILOGA P : Spremembe volumna vode za izračunane primere - enostavni hidravlični model, stalni tok

Tabela A: Prikaza volumna vode in odstopanja volumnov vode glede na osnovno stanje - izračun s hidravlično hrapavostjo $n_g=0.030$, različni dvigi dna in obratovanje po osnovni DK.

Q (m ³ /s)	Volumen vode (10 ³ m ³) Dvig dna (0 m)	Sprememba glede na osnovno stanje	Volumen vode (10 ³ m ³) Dvig dna (0.25 m)	Sprememba glede na osnovno stanje	Volumen vode (10 ³ m ³) Dvig dna (0.50 m)	Sprememba glede na osnovno stanje	Volumen vode (10 ³ m ³) Dvig dna (0.75 m)	Sprememba glede na osnovno stanje	Volumen vode (10 ³ m ³) Dvig dna (1.00 m)	Sprememba glede na osnovno stanje	Volumen vode (10 ³ m ³) Dvig dna (1.50 m)	Sprememba glede na osnovno stanje
0	10804950	OSNOVNO STANJE	10470350	-3.10%	10136330	-6.19%	9802880	-9.27%	9470080	-12.35%	8806450	-18.50%
500	10867700		10539660	-3.02%	10213540	-6.02%	9889330	-9.00%	9567580	-11.96%	8933190	-17.80%
1000	10869240		10557050	-2.87%	10248570	-5.71%	9943930	-8.51%	9643750	-11.27%	9057920	-16.66%
1500	10898380		10605210	-2.69%	10316850	-5.34%	10033530	-7.94%	9755600	-10.49%	9217340	-15.42%
2000	10919650		10646760	-2.50%	10379460	-4.95%	10117800	-7.34%	9862330	-9.68%	9370630	-14.19%
2500	10932640		10680800	-2.30%	10435210	-4.55%	10195840	-6.74%	9963060	-8.87%	9517830	-12.94%
3000	10931970		10702010	-2.10%	10478990	-4.14%	10262410	-6.12%	10052900	-8.04%	9655300	-11.68%
3350	10935100		10721140	-1.96%	10514050	-3.85%	10314070	-5.68%	10121000	-7.44%	9757170	-10.77%

Tabela B: Prikaza volumna vode in odstopanja volumnov vode glede na osnovno stanje - izračun s hidravlično hrapavostjo $n_g=0.025$, različni dvigi dna in obratovanje po osnovni DK.

Q (m ³ /s)	Volumen vode (10 ³ m ³) Dvig dna (0 m)	Sprememba glede na osnovno stanje	Volumen vode (10 ³ m ³) Dvig dna (0.25 m)	Sprememba glede na osnovno stanje	Volumen vode (10 ³ m ³) Dvig dna (0.50 m)	Sprememba glede na osnovno stanje	Volumen vode (10 ³ m ³) Dvig dna (0.75 m)	Sprememba glede na osnovno stanje	Volumen vode (10 ³ m ³) Dvig dna (1.00 m)	Sprememba glede na osnovno stanje	Volumen vode (10 ³ m ³) Dvig dna (1.50 m)	Sprememba glede na osnovno stanje
0	10804950	0.00%	10470350	-3.10%	10136330	-6.19%	9802880	-9.27%	9470080	-12.35%	8806450	-18.50%
500	10849910	-0.16%	10519590	-3.20%	10190780	-6.23%	9863650	-9.24%	9538650	-12.23%	8896040	-18.14%
1000	10804700	-0.59%	10486290	-3.52%	10171110	-6.42%	9859370	-9.29%	9551640	-12.12%	8949730	-17.66%
1500	10770200	-1.18%	10467790	-3.95%	10169770	-6.69%	9876470	-9.38%	9588490	-12.02%	9029180	-17.15%
2000	10718190	-1.84%	10433960	-4.45%	10154720	-7.01%	9881310	-9.51%	9613900	-11.96%	9097690	-16.69%
2500	10651790	-2.57%	10386760	-4.99%	10127840	-7.36%	9875000	-9.67%	9628840	-11.93%	9156580	-16.25%
3000	10566050	-3.35%	10321740	-5.58%	10084160	-7.76%	9853370	-9.87%	9629360	-11.92%	9202840	-15.82%
3350	10507590	-3.91%	10278560	-6.00%	10056570	-8.03%	9841620	-10.00%	9633440	-11.90%	9239750	-15.50%

Tabela C: Prikaza volumna vode in odstopanja volumnov vode glede na osnovno stanje - izračun s hidravlično hrapavostjo $n_g=0.025$, različni dvigi dna in obratovanje po optimirani DK

Q (m ³ /s)	Volumen vode (10 ³ m ³) Dvig dna (0 m)	Sprememba glede na osnovno stanje	Volumen vode (10 ³ m ³) Dvig dna (0.25 m)	Sprememba glede na osnovno stanje	Volumen vode (10 ³ m ³) Dvig dna (0.50 m)	Sprememba glede na osnovno stanje	Volumen vode (10 ³ m ³) Dvig dna (0.75 m)	Sprememba glede na osnovno stanje	Volumen vode (10 ³ m ³) Dvig dna (1.00 m)	Sprememba glede na osnovno stanje	Volumen vode (10 ³ m ³) Dvig dna (1.50 m)	Sprememba glede na osnovno stanje
0	10804950	0.00%	10470350	-3.10%	10136330	-6.19%	9802880	-9.27%	9470080	-12.35%	8806450	-18.50%
500	10849910	0.16%	10505590	-3.33%	10176870	-6.36%	9849840	-9.37%	9524890	-12.36%	8842620	-18.63%
1000	10886220	0.16%	10553430	-2.91%	10224080	-5.94%	9898970	-8.93%	9590700	-11.76%	8924670	-17.89%
1500	10938910	0.37%	10595710	-2.78%	10282900	-5.65%	9950320	-8.70%	9636810	-11.58%	9017510	-17.26%
2000	10977040	0.53%	10639250	-2.57%	10320300	-5.49%	9996940	-8.45%	9681670	-11.34%	9097690	-16.69%
2500	11000030	0.62%	10670220	-2.40%	10348910	-5.34%	10014760	-8.40%	9712410	-11.16%	9176320	-16.06%
3000	11031860	0.91%	10700970	-2.11%	10359850	-5.23%	10031210	-8.24%	9724530	-11.05%	9247250	-15.41%
3350	11041730	0.98%	10717160	-1.99%	10373740	-5.13%	10035500	-8.23%	9731400	-11.01%	9305910	-14.90%

Opomba: V tabeli C so zaradi lažje primerjave prikazani samo volumni vode v akumulaciji do pretoka 3350 m³/s, čeprav optimirana krivulja določa zadrževanje do višjih pretokov.