Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
za gradbeništvo
in geodezijo

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

Univerzitetni študij vodarstva in komunalnega inženirstva

Kandidatka:
Andreja Žerjav

Račun obratovalnih valov v delni verigi HE na spodnji Savi

Diplomska naloga št.: 150

Mentor:
prof. dr. Matjaž Četina

Somentor:
dr. Andrej Širca

Ljubljana, 2010

STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako	Vrstica z napako	Namesto	Naj bo

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisana **ANDREJA ŽERJAV** izjavljam, da sem avtorica diplomske naloge z naslovom: »**RAČUN OBRATOVALNIH VALOV V DELNI VERIGI HE NA SPODNJI SAVI**«.

Izjavljam, da se odpovedujem vsem materialnim pravicam iz dela za potrebe elektronske separatoteke FGG.

Ljubljana, 15. 10. 2010

IZJAVE O PREGLEDU NALOGE

Nalogo so si ogledali učitelji študija Vodarstva in komunalnega inženirstva:

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK: 627.8(282.243.743)(043.2)
Avtor: Andreja Žerjav
Mentor: prof. dr. Matjaž Četina
Somentor: dr. Andrej Širca, zn. sod.
Naslov: Račun obratovalnih valov v delni verigi HE na spodnji Savi
Obseg in oprema: 67 str., 15 pregl., 41 sl., 3 en.
Ključne besede: obratovalni valovi, reka Sava, veriga spodnjesavskih hidroelektrarn, HEC-RAS, hidroelektrarna Brežice, hidroelektrarna Mokrice, nestalni tok

Izvleček

Diplomska naloga obravnava obratovanje delne verige spodnjesavskih hidroelektrarn, ki za proizvodnjo energije izkoriščajo potencialno energijo vode s porabo koristnega volumna akumulacije tekom dneva. Med obratovanjem nastanejo obratovalni valovi, ki povzročajo različne hitrosti spremembe gladine. Pri odpiranju pretoka skozi turbine nastanejo negativni protitočni valovi gorvodno od hidroelektrarne in pozitivni sotočni valovi dolvodno od hidroelektrarne. Pri zapiranju pretoka skozi turbine pa nastanejo pozitivni protitočni valovi gorvodno od hidroelektrarne in negativni sotočni valovi dolvodno od hidroelektrarne. Simulirali smo različne načine obratovanja na HE Brežice in HE Mokrice in ob tem analizirali dogajanje v načrtovanem akumulacijskem bazenu HE Brežice in načrtovanem akumulacijskem bazenu HE Mokrice ter v naravni strugi pod HE Mokrice do vodomerne postaje Jesenice na Dolenjskem. Raziskali smo tri načine obratovanja. Vzporedno obratovanje, ko vse hidroelektrarne na spodnji Savi hkrati odprejo pretok skozi turbine ter zaporedno obratovanje, ko spodnja hidroelektrarna pretok skozi turbine odpre v trenutku, ko jo doseže val iz gorvodne hidroelektrarne. Tretji obravnavani način obratovanja je bil optimirano zaporedno obratovanje, ko spodnja hidroelektrarna odpre pretok skozi turbine ravno pravi čas, da izkoristi celoten val iz gorvodne hidroelektrarne in ne povzroči prelivanja skozi zapornice ter drži gladino čim bližje nominalni koti, tako da je proizvodnja energije v danih razmerah maksimalna. Sam izračun proizvodnje energije v diplomskem delu ni obravnavan. Simulacijo treh načinov obratovanja smo izvedli s programom HEC-RAS in na podlagi analize rezultatov utemeljili najprimernejši način obratovanja.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC: **627.8(282.243.743)(043.2)**

Author: **Andreja Žerjav**

Supervisor: **Prof. Matjaž Četina, Ph.D.**

Co-supervisor: **Andrej Širca, Ph.D.**

Title: **A computation of waves due to power plants operation in the partial chain of the HPP on the lower part of the Sava River**

Notes: **67 p., 15 tab., 41 fig., 3 eq.**

Key words: **waves due to power plant operation, the Sava River, a chain of hydroelectric power plants on the lower part of the Sava River, HEC-RAS, Hydroelectric Power Plant Brežice, Hydroelectric Power Plant Mokrice, unsteady flow**

Abstract

In the thesis the operation in partial chain of Hydroelectric Power Plants on the lower part of the Sava River is discussed. For energy production potential water energy is exploited with the use of useful volume of a reservoir during the day. During the power plant operation waves are created that cause a different speed of water level changes. When the discharge through turbines increases, it creates a negative wave above the power plant and a positive wave below the power plant. When the discharge through turbines is closing, it creates a positive wave above the hydro plant and a negative wave below the hydro plant. We simulated the operations on the hydro plant Brežice and hydro plant Mokrice and analysed the activity in the designed Brežice and Mokrice reservoir and also in the natural channel below the power plant Mokrice. We simulated three different types of operations: a parallel operation, when all power plants on the lower part of the Sava River open the discharge through the turbines at the same time; a sequential operation, when the lower hydro plant opens a discharge through turbines in the moment a wave from the upper hydro plant reaches it; and an optimal sequential operation, when the lower hydro plant opens a discharge through the turbines in the moment before the wave from the upper hydro plant reaches it and in the right moment that it does not create a rise of the water level. In the thesis the power production is not addressed. A simulation of the three types of operations was performed with the computer program HEC-RAS and with the analysis of results we established the most suitable type of operation.

ZAHVALA

Za vso pomoč pri izdelavi te diplomske naloge se zahvaljujem mentorju prof. dr. Matjažu Četini in somentorju dr. Andreju Širci.

Še posebej bi se zahvalila Majdi Zakrajšek za ves trud in pomoč pri nastajanju te naloge.

Posebna zahvala gre tudi staršem za vso podporo in razumevanje tekom študija. Zahvalila bi se tudi fantu in vsem ostalim, ki so me spodbujali in mi pomagali.

KAZALO VSEBINE

1 UVOD 1
1.1 Cilji naloge 2

2 OBRATOVALNI VALOVI – PROBLEMATIKA IN NAČIN REŠEVANJA 4
2.1 Obratovalni valovi 4
2.2 Matematični model in metoda reševanja 7
2.2.1 Osnovne enačbe 7
2.2.2 Začetni, interni in robni pogoji 8
2.2.3 Metode reševanja 10
2.3 Uporabljeni računalniški program – HEC-RAS 11

3 PODATKI 17
3.1 Geometrijski podatki 17
3.2 Hidravlični podatki 19
3.2.1 HE Brežice 19
3.2.2 HE Mokrice 20

4 RAČUNSKI PRIMERI 21
4.1 Vzporedno obratovanje 21
4.2 Zaporedno obratovanje 22
4.3 Optimirano zaporedno obratovanje 22

5 REZULTATI 24
5.1 Vzporedno obratovanje 24
5.2 Zaporedno obratovanje 34
5.3 Optimirano zaporedno obratovanje 47

6 PRIMERJAVA MED OBRATOVANJI 59

7 ZAKLJUČKI 64

LITERATURA 66

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Čas, ko posamezna HE odpre in zapre pretok skozi turbine od začetka vzporednega obratovanja vseh HE 24
Preglednica 2: Časovna preglednica odpiranja pretoka 26
Preglednica 3: Časovna preglednica zapiranja pretoka 26
Preglednica 4: Maksimalna hitrost spreminjanja gladine pri odpiranju pretoka skozi turbine (vzporedno obratovanje) 27
Preglednica 5: Maksimalna hitrost spreminjanja gladine po začetku zapiranju pretoka na HE Krško (vzporedno obratovanje) 28
Preglednica 6: Čas, ko posamezna HE odpre in zapre pretok skozi turbine po začetku obratovanja HE Vrhovo 34
Preglednica 7: Časovna preglednica odpiranja pretoka 37
Preglednica 8: Časovna preglednica zapiranja pretoka 38
Preglednica 9: Maksimalna hitrost spreminjanja gladine pri odpiranju pretoka skozi turbine (zaporedno obratovanje) 39
Preglednica 10: Maksimalna hitrost spreminjanja gladine po začetku zapiranja pretoka na HE Krško (zaporedno obratovanje) 40
Preglednica 11: Čas, ko posamezna HE odpre in zapre pretok skozi turbine po začetku obratovanja HE Vrhovo 47
Preglednica 12: Časovna preglednica odpiranja pretoka 49
Preglednica 13: Časovna preglednica zapiranja pretoka 50
Preglednica 14: Maksimalna hitrost spreminjanja gladine pri odpiranju pretoka skozi turbine (optimirano zaporedno obratovanje) 51
Preglednica 15: Hitrost spreminjanja gladine po začetku zapiranja pretoka na HE Krško (optimirano zaporedno obratovanje) 52

KAZALO SLIK

Slika 1: Obratovalni val v prostoru x, t, h 4
Slika 2: Tipični obratovalni valovi v primeru odpiranja pretoka na levi HE in nastanek povratnega (odbitega) vala s sekundarnim valovanjem nad desno HE, če je hitrost spremembe pretoka na desni HE enaka 0 5
Slika 3: Sekundarno valovanje 6
Slika 4: Tipični obratovalni valovi v primeru zapiranja pretoka na levi HE, hitrost spremembe pretoka na desni HE je enaka 0 7
Slika 5: Levi robni pogoj: iztočna hidrograma iz HE Krško, ki sta rezultat ustreznega načina obratovanja štirih gorvodnih HE 9
Slika 6: Desni robni pogoj: pretočna krivulja do pretoka 1000 m^3/s 10
Slika 7: Implicitna metoda končnih razlik 11
Slika 8: Grafični vmesnik programa HEC-RAS 12
Slika 9: Prikaz tlorisne situacije v programu 13
Slika 10: Prečni prerez v HEC-RAS 13
Slika 11: Prikaz jezu z zapornicami na HE Brežice 15
Slika 12: Prikaz jezu z zapornicami na HE Mokrice 15
Slika 13: Merjeni prečni profili v akumulacijskem bazenu HE Brežice 18
Slika 14: Merjeni prečni profili v akumulacijskem bazenu HE Mokrice 19
Slika 15: Podolžni profil z maksimalno gladino pri vzporednem obratovanju in vrisanimi nasipi 25
Slika 16: Nivogrami v bazenu HE Brežice pri vzporednem obratovanju 29
Slika 17: Hidrogrami v bazenu HE Brežice pri vzporednem obratovanju 30
Slika 18: Nivogrami v bazenu HE Mokrice pri vzporednem obratovanju 31
Slika 19: Hidrogrami v bazenu HE Mokrice pri vzporednem obratovanju 32
Slika 20: Nivogrami v naravni strugi pod HE Mokrice pri vzporednem obratovanju 33
Slika 21: Hidrogrami v naravni strugi pod HE Mokrice pri vzporednem obratovanju 34
Slika 22: Podolžni profil z maksimalno gladino pri zaporednem obratovanju in vrisanimi nasipi 36
Slika 23: Nivogrami v bazenu HE Brežice pri zaporednem obratovanju 41

Slika 24: Hidrogrami v bazenu HE Brežice pri zaporednem obratovanju 42
Slika 25: Nivogrami v bazenu HE Mokrice pri zaporednem obratovanju 43
Slika 26: Hidrogrami v bazenu HE Mokrice pri zaporednem obratovanju 44
Slika 27: Nivogrami v naravni strugi pod HE Mokrice pri zaporednem obratovanju 45
Slika 28: Hidrogrami v naravni strugi pod HE Mokrice pri zaporednem obratovanju 46
Slika 29: Podolžni profil z maksimalno gladino pri optimiranem zaporednem obratovanju in vrisanimi nasipi 48
Slika 30: Nivogrami v bazenu HE Brežice pri optimiranem zaporednem obratovanju 53
Slika 31: Hidrogrami v bazenu HE Brežice pri optimiranem zaporednem obratovanju 54
Slika 32: Nivogrami v bazenu HE Mokrice pri optimiranem zaporednem obratovanju 55
Slika 33: Hidrogrami v bazenu HE Mokrice pri optimiranem zaporednem obratovanju 56
Slika 34: Nivogrami v naravni strugi pod HE Mokrice pri optimiranem zaporednem obratovanju 57
Slika 35: Hidrogrami v naravni strugi pod HE Mokrice pri optimiranem zaporednem obratovanju 58
Slika 36: Primerjava hidrogramov nad HE Brežice pri vzporednem, zaporednem in optimiranem zaporednem načinu obratovanja 60
Slika 37: Primerjava hidrogramov nad HE Mokrice pri vzporednem, zaporednem in optimiranem zaporednem načinu obratovanja 61
Slika 38: Primerjava nivogramov nad HE Brežice pri vzporednem in optimiranem zaporednem načinu obratovanja 62
Slika 39: Primerjava nivogramov nad HE Mokrice pri vzporednem in optimiranem zaporednem načinu obratovanja 63

KAZALO ENAČB

Enačba 1: Pogoj nastanka sekundarnega valovanja 6
Enačba 2: Kontinuitetna enačba 7
Enačba 3: Dinamična enačba 7

1 UVOD

S projektom izgradnje šestih spodnjesavskih hidroelektrarn (Vrhovo, Boštanj, Blanca, Krško, Brežice in Mokrice) so želeli izkoristiti energetski potencial spodnje Save. HE Vrhovo, HE Boštanj in HE Blanca že obratujejo, vrši se gradnja HE Krško. HE Brežice in HE Mokrice sta še v fazi načrtovanja.

Hidroelektrarne proizvajajo električno energijo z izkoriščanjem potencialne energije zajezene vode. Pri naravnem dotoku, ki je manjši od trenutnega turbinskega, izrabljajo koristni volumen akumulacije. Sama proizvodnja energije v diplomski nalogi ni obravnavana.

Diplomska naloga obsega simulacije obratovanja na HE Brežice in HE Mokrice ter analize obratovalnih valov v akumulacijskih bazenih obeh HE in v naravni strugi pod HE Mokrice. Pri tem je upoštevan tudi vpliv preostalih gorvodnih hidroelektrarn v verigi, ki se prenaša na obravnavani spodnji del verige HE v obliki izhodnega hidrograma iz HE Krško, ki je uporabljen kot vhodni hidrogram na začetku bazena Brežice.

Pri obratovanju hidrocentral nastajajo gorvodno in dolvodno od hidroelektrarne obratovalni valovi. Pri odpiranju pretoka skozi turbine se tvorijo negativni protitočni valovi gorvodno od hidroelektrarne in pozitivni sotočni valovi dolvodno od hidroelektrarne. Pri zapiranju pretoka pa se tvorijo pozitivni protitočni valovi gorvodno od hidroelektrarne in negativni sotočni valovi dolvodno od hidroelektrarne.

Osnovni namen simulacije obratovalnih valov je bila predvsem preveritev, če je pri maksimalnih dovoljenih spremembah turbinskega pretoka hitrost naraščanja oz. upadanja gladine v mejah, ki še zagotavljajo varnost brežin. Ob tem pa smo iskali tudi način obratovanja, ki omogoča čim daljše obratovanje z maksimalnim turbinskim pretokom pri čim višji gladini v bazenu HE.

V koncesijski pogodbi za spodnjo Savo je predpisana maksimalna hitrost spremembe pretoka skozi turbine zaradi zagotavljanja varnosti v vplivnem območju HE in znaša 200 $m^3/s/h$. Omejitev je potrebna tako zaradi nevarnosti prelivanja brežin kot tudi zaradi varovanja brežin pred erozijskimi poškodbami. Pri tej hitrosti spremembe pretoka bomo preverili hitrost spremembe gladine v načrtovanih bazenih HE Brežice in HE Mokrice ter v naravni strugi pod HE Mokrice do vodomerne postaje Jesenice na Dolenjskem. Dovoljena hitrost spremembe gladine v akumulacijskem bazenu je 1 m/h, v naravni strugi pa 0,5 m/h.

Hidroelektrarne na spodnji Savi med obratovanjem spreminjajo pretok med 100 in 500 m^3/s, saj imajo predpisan minimalen konstanten pretok 100 m^3/s zaradi hlajenja kondenzatorja parne turbine NE Krško. V primeru, da je naravni dotok manjši od 100 m^3/s, so HE dolžne prepuščati ves naravni dotok. Svoje akumulacijske prostore (koristni volumen) lahko polnijo šele pri naravnih dotokih, večjih od 100 m^3/s in to zgolj s presežkom nad 100 m^3/s. Pri naravnem dotoku, ki je večji od trenutnega turbinskega pretoka ali od maksimalne požiralnosti turbin in je gladina pri tem že na nominalni koti zajezbe (Z_{nom}), pa HE presežek vode prepuščajo preko prelivnih polj. Zapornice na HE spodnjesavske verige so sestavljene iz spodnjih segmentnih zapornic in zaklopk, ki so nameščene na vrhu segmenta. Prelivanje viška vode se do ca. 500 m^3/s vrši s spuščanjem zaklopk, pri večjem naravnem dotoku pa začno dvigati tudi segmente.

1.1 Cilji naloge

Simulacijo obratovanja spodnjesavske verige HE bomo izvedli s programom HEC-RAS.

Zanimajo nas trije načini obratovanja : vzporedno obratovanje, zaporedno obratovanje in optimirano zaporedno obratovanje.

- Pri vzporednem načinu obratovanju vse spodnjesavske hidroelektrarne istočasno odprejo pretok skozi turbine in obratujejo toliko časa, da porabijo vso razpoložljivo

vodo (lastni koristni volumen in koristni volumen gornjih HE), pri tem pa se gladina v akumulaciji ne sme znižati pod minimalno obratovalno gladino.

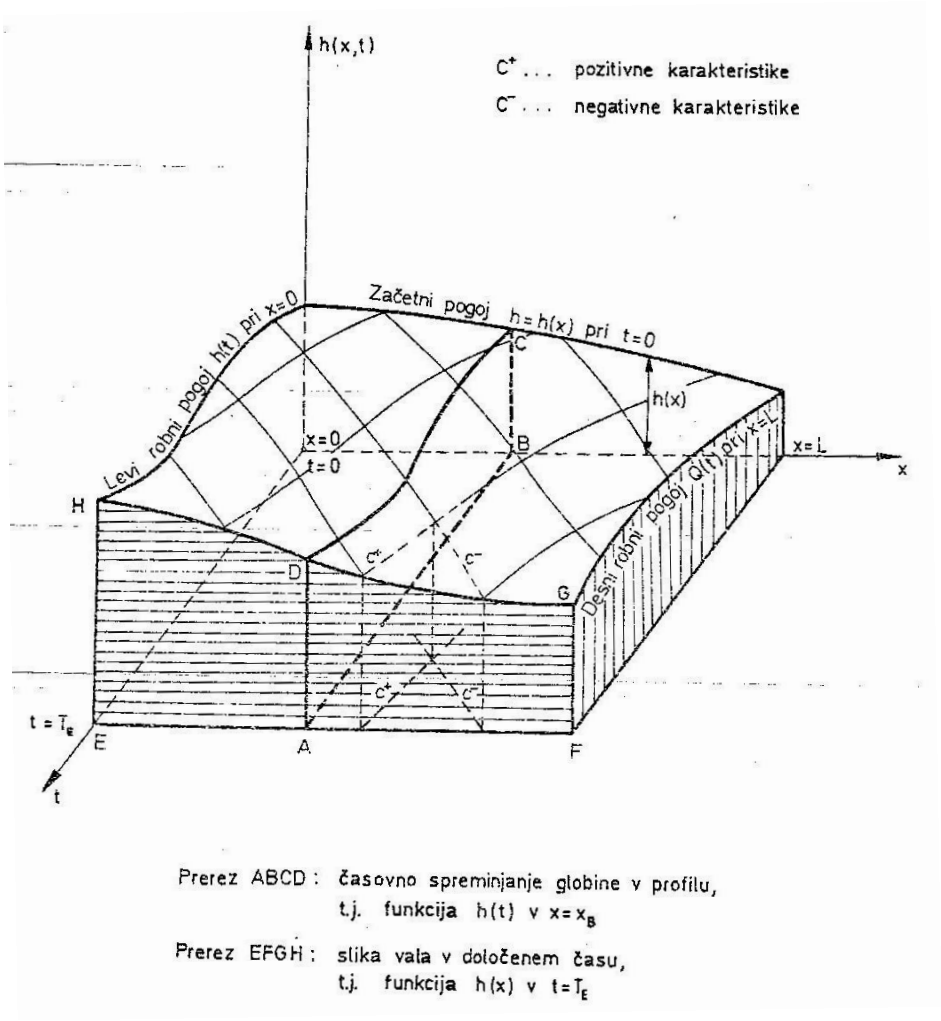
- Pri zaporednem načinu obratovanja spodnja hidroelektrarna odpre pretok skozi turbine v trenutku, ko jo doseže val iz gorvodne hidroelektrarne. Ker se gladina nad HE ne sme dvigniti nad Z_{nom}, je potrebno višek dotoka nad požiralnostjo turbin preliti preko prelivnih polj.

- Pri optimiranem zaporednem načinu obratovanja spodnja hidroelektrarna odpre pretok skozi turbine nekoliko prej, preden jo doseže val iz gorvodne hidroelektrarne, tako da ravno 'ulovi' koristni volumen gorvodnih HE in ne povzroči prelivanje skozi zapornice ter hkrati čim dlje drži gladino vode čim bližje nominalni koti. Tako je proizvodnja energije v danih razmerah maksimalna.

2 OBRATOVALNI VALOVI – PROBLEMATIKA IN NAČIN REŠEVANJA

2.1 Obratovalni valovi

Pri obratovanju hidrocentral zaradi sprememb pretoka na turbinah nastanejo gorvodno in dolvodno od HE pozitivni ali negativni valovi, to so tako imenovani obratovalni valovi (slika 1).



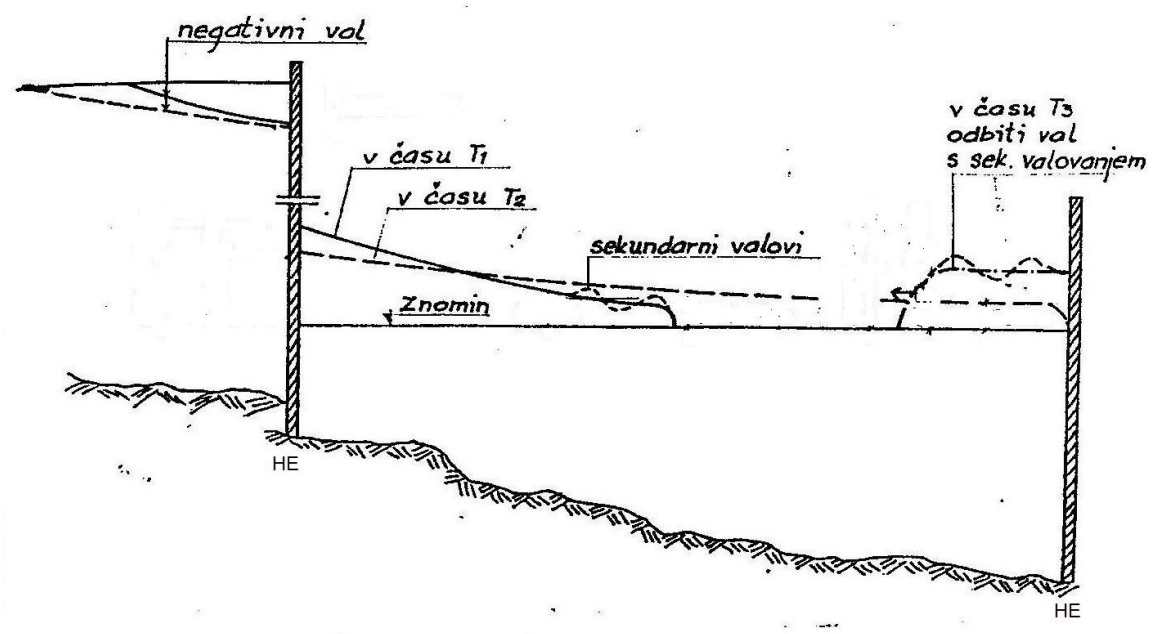
Slika 1: Obratovalni val v prostoru x, t, h
(povzeto po: Rajar, R. 1980, str. 45)

Za varno obratovanje hidroelektrarn je potrebno poznati višino in hitrost potovanja teh valov, saj pri prevelikem naraščanju gladine ob nastanku pozitivnega vala lahko pride do prelivanja nasipov ali erozije brežin v strugi dolvodno od HE, ob nastanku negativnega vala pa obstaja nevarnost, da se pojavi prevelika hitrost upadanja gladine, kar lahko povzroči erozijo brežine v bazenu HE zaradi prevelikega in prehitrega izcejanja vode iz brežin.

Pri HE je potrebno poiskati takšno časovno spreminjanje pretoka in gladine v bazenu glede na vhodne hidrološke parametre, da je zagotovljena varnost in da dobimo optimirano proizvodnjo energije. Slednje ne spada v obseg te diplomske naloge.

Nastajanje valov pri obratovanju:

1. Pri odpiranju pretoka skozi turbine nastanejo negativni protitočni valovi gorvodno od hidroelektrarne in pozitivni sotočni valovi dolvodno od hidroelektrarne.

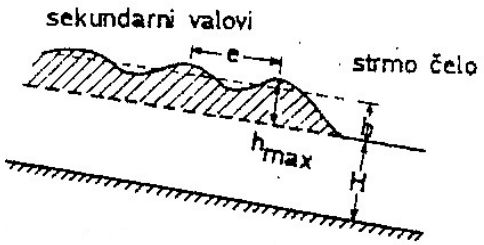


Slika 2: Tipični obratovalni valovi v primeru odpiranja pretoka na levi HE in nastanek povratnega (odbitega) vala s sekundarnim valovanjem nad desno HE, če je hitrost spremembe pretoka na desni HE enaka 0

(Povzeto po: Rajar, R., Zakrajšek, M., Četina, M. 1984, str. 25)

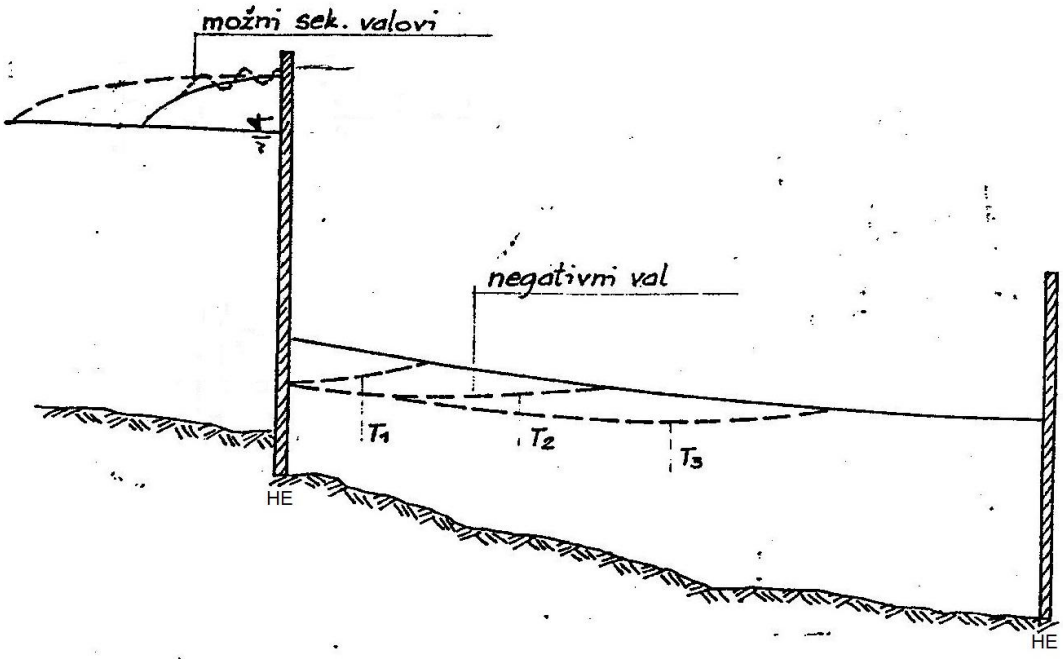
Sekundarno valovanje nastane na telesu (pozitivnega) osnovnega vala tako, da še povečuje maksimalne višine vode. Tako valovanje nastane navadno pri valu s strmim čelom. Pri valu z navpičnim čelom je neizrazito, pri valu brez strmega čela pa ga navadno ni. Ker nam sekundarni valovi lahko maksimalno višino vala povečajo tudi do 100 % ali več (na sliki 3 je torej lahko h_{max} = 2 h), so lahko v določenih primerih nevarni. Razni avtorji so s poskusi določili, da sekundarnega valovanja ni, če je izpolnjen pogoj (enačba 1):

$$\frac{h}{H} > 0{,}51 \qquad (1)$$



Slika 3: Sekundarno valovanje
(povzeto po: Rajar, R. 1980, str. 8)

2. Pri zapiranju pretoka skozi turbine nastajajo pozitivni protitočni valovi gorvodno od hidroelektrarne in negativni sotočni valovi dolvodno od hidroelektrarne.



Slika 4: Tipični obratovalni valovi v primeru zapiranja pretoka na levi HE, hitrost spremembe pretoka na desni HE je enaka 0

(Povzeto po: Rajar, R., Zakrajšek, M., Četina, M. 1984, str. 27)

2.2 Matematični model in metode reševanja

2.2.1 Osnovne enačbe

Nestalni tok s prosto gladino opišemo s sistemom dveh enodimenzijskih parcialnih diferencialnih enačb: kontinuitetne (2) in dinamične enačbe (3):

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \tag{2}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + v\frac{\partial v}{\partial x} + g\frac{\partial h}{\partial x} = g(I_0 - I) \tag{3}$$

kjer je:

Q	pretok
S	prečni presek
t	čas
v	hitrost
x	odsek
h	globina
g	gravitacijski pospešek
I_0	'naklon dna'
I	naklon energijske črte

Poleg obeh enačb, s katerimi opišemo dogajanje znotraj računskega področja (v vseh notranjih profilih), pa potrebujemo še začetni in dva robna pogoja.

2.2.2 Začetni, interni in robni pogoji

Začetni pogoj. Z njim podamo stanje na računskem področju v času t = 0, torej tik pred nastopom nestalnega toka vode. Za pretok, ki teče v tem času po obravnavanem odseku reke, moramo poznati globine vode v vseh prečnih profilih.

V naših računskih primerih je kot začetni pretok privzet naravni dotok v velikosti 100 m^3/s. S tem pretokom se začne tudi vhodni hidrogram pod HE Krško.

Interni pogoj. Na vseh lokacijah, kjer so podani objekti (npr. mostovi ali jezovi), je potrebno podati vse geometrijske in hidravlične podatke teh objektov.

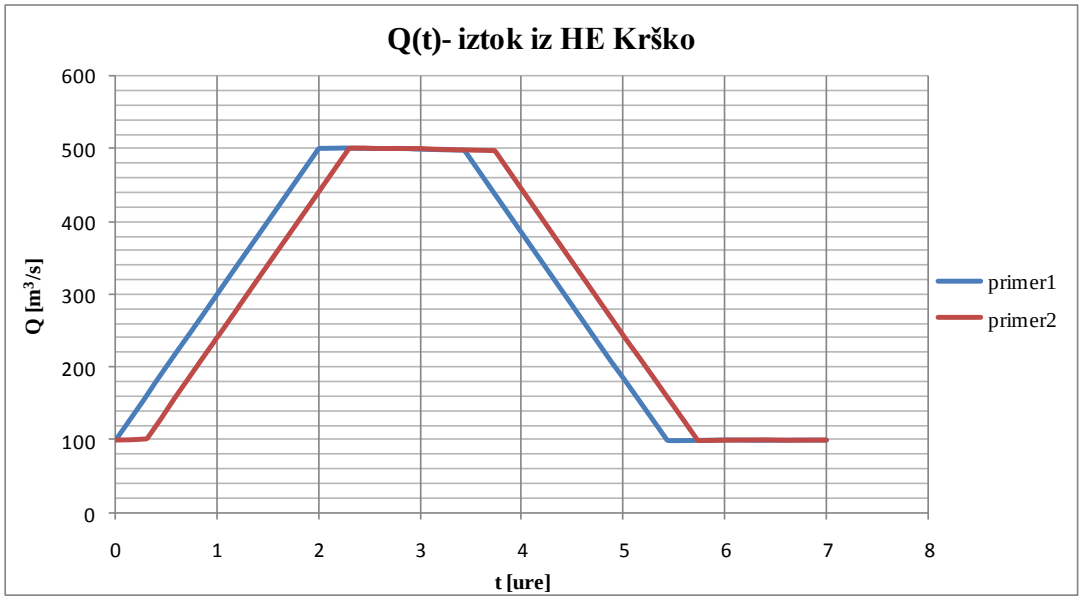
Robni pogoj. Na levem in desnem robu moramo poznati bodisi časovni potek gladine (Z(t)) ali pretoka (Q(t)), bodisi povezavo med njima (Q(z)).

1. V naših računskih primerih je bil kot levi robni pogoj podan iztočni hidrogram iz HE Krško, ki je rezultat ustreznega načina obratovanja štirih gorvodnih HE.

- Rezultate smo povzeli iz študije: Četina, M., Zakrajšek, M. 2006. Določitev ukrepov ob prehodu poplavnih valov, račun obratovalnih valov in opredelitev načina obratovanja v verigi – HE Krško. Študija. 2006

➢ Primer 1 (vzporedno obratovanje): odpiranje pretoka na vseh gorvodnih HE istočasno s hitrostjo spreminjanja pretoka 200 m^3/s/h.

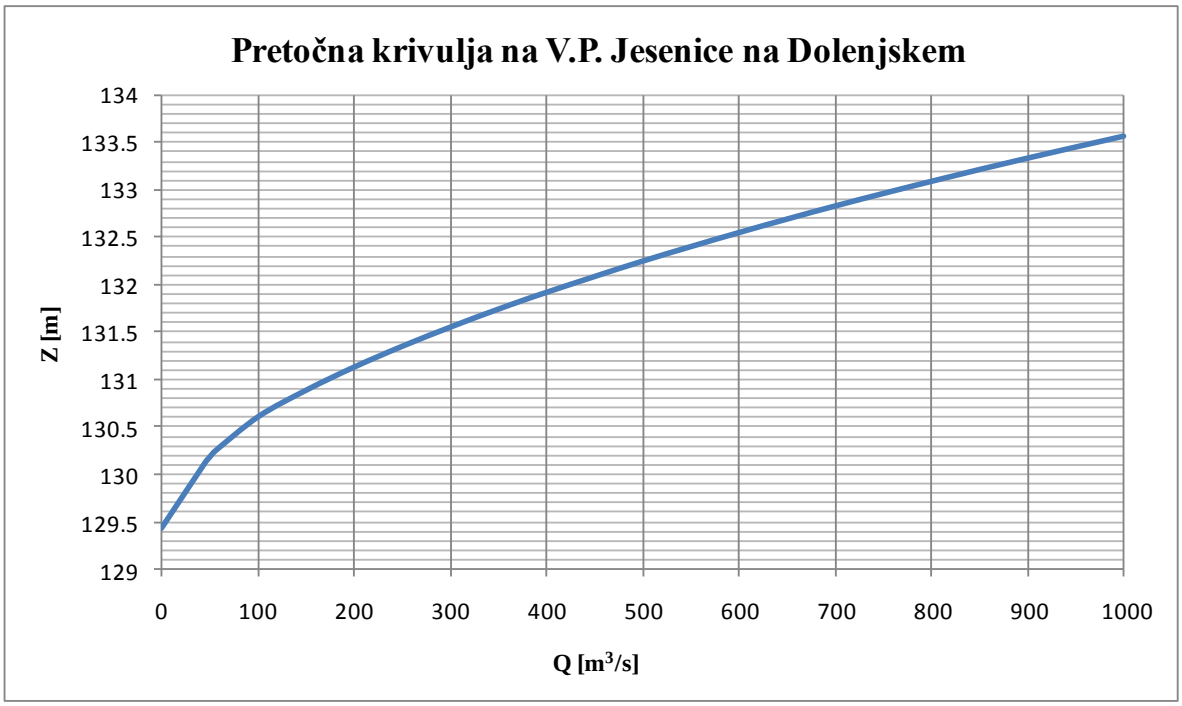
➢ Primer 2 (zaporedno obratovanje): odpiranje s časovnim zamikom in sicer HE Boštanj 5 min, HE Blanca 10 min in HE Krško 18 min za HE Vrhovo s hitrostjo spreminjanja pretoka 200 m^3/s/h.



Slika 5: Levi robni pogoj: iztočna hidrograma iz HE Krško, ki sta rezultat ustreznega načina obratovanja štirih gorvodnih HE

2. Kot desni robni pogoj je bila podana pretočna krivulja vodomerne postaje Jesenice na Dolenjskem (priloga A).

Za potrebe računa obratovalnih valov je bilo dovolj določiti pretočno krivuljo do pretoka 1000 m^3/s (slika 6). Ničelna kota vodomera je 129,433 m.



Slika 6: Desni robni pogoj: pretočna krivulja do pretoka 1000 m^3/s

2.2.3 Metode reševanja

Za reševanje sistema enačb 2 in 3 se uporabljajo različne numerične sheme, ki se v osnovi delijo na metodo karakteristik, metode končnih razlik in metodo končnih elementov.

Najpogosteje se uporabljajo metode končnih razlik, ki se nadalje delijo na implicitne in eksplicitne metode. Pri metodah končnih razlik (tako implicitnih kot eksplicitnih) že v osnovnih parcialnih enačbah izrazimo odvode s končnimi razlikami in na ta način iz diferencialnih enačb dobimo algebrajske enačbe, iz katerih lahko izračunamo neznane vrednosti funkcij v posameznih točkah diagrama x, t.

Razlika med implicitno in eksplicitno shemo je predvsem v tem, da pri eksplicitni shemi neznane vrednosti funkcij, ki jih iščemo, lahko preprosto eksplicitno izrazimo in za vsako neznanko dobimo posebno enačbo, pri implicitnih shemah pa so neznanke povezane v sistem enačb in je potrebno ves sistem reševati istočasno.

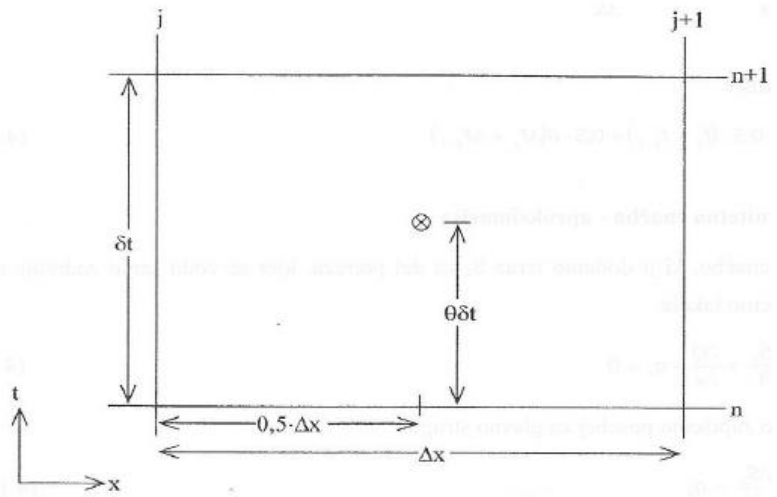
2.3 Uporabljeni računalniški program – HEC-RAS

Uporabili smo program HEC-RAS, s katerim lahko simuliramo nestalni tok (Hydrologic Engineering Center River Analysis System (HEC-RAS) web site: http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras).

Program HEC-RAS za reševanje parcialnih diferencialnih enačb nestalnega toka uporablja 4 – točkovno implicitno shemo končnih razlik (slika 7).

Pri tej shemi se vrednosti funkcij računajo v 'notranjih' točkah $(n + \theta)\ \Delta t$.

Za odsek reke tako dobimo sistem vezanih enačb. Povezava je pomembna, ker dovoljuje vpliv 'informacije' s celotnega rečnega odseka na rezultat v katerikoli točki. Zaradi tega je časovni korak lahko precej daljši kot pri eksplicitnih numeričnih shemah. Seveda pa je pogojen z naravo problema, ki ga simuliramo.



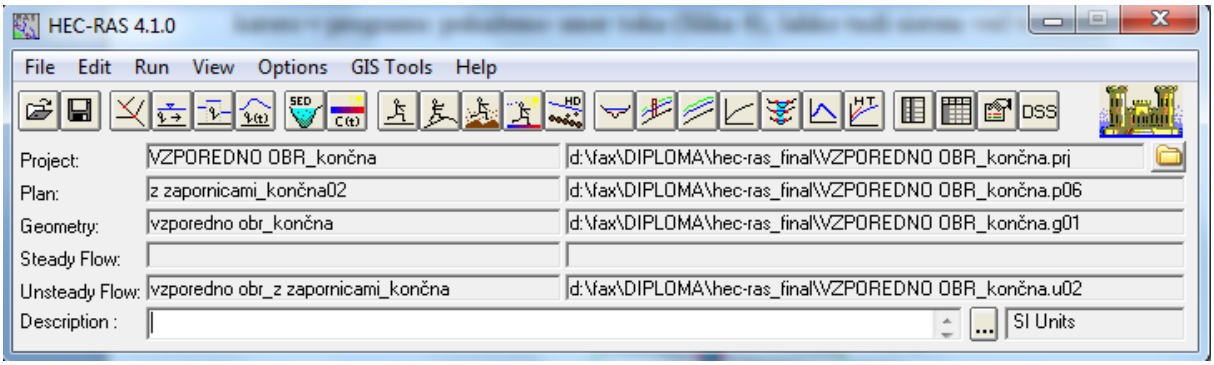
Slika 7: Implicitna metoda končnih razlik
(Povzeto po: Lukavečki B. 2010, str. 17)

Računalniški program HEC – RAS (Hydrologic Engineering Center's River Analysis System) je zasnovala skupina raziskovalcev pod okriljem ameriške vojske (US Department of Defence, Army Corps of Engineers).

HEC – RAS omogoča izvedbo:

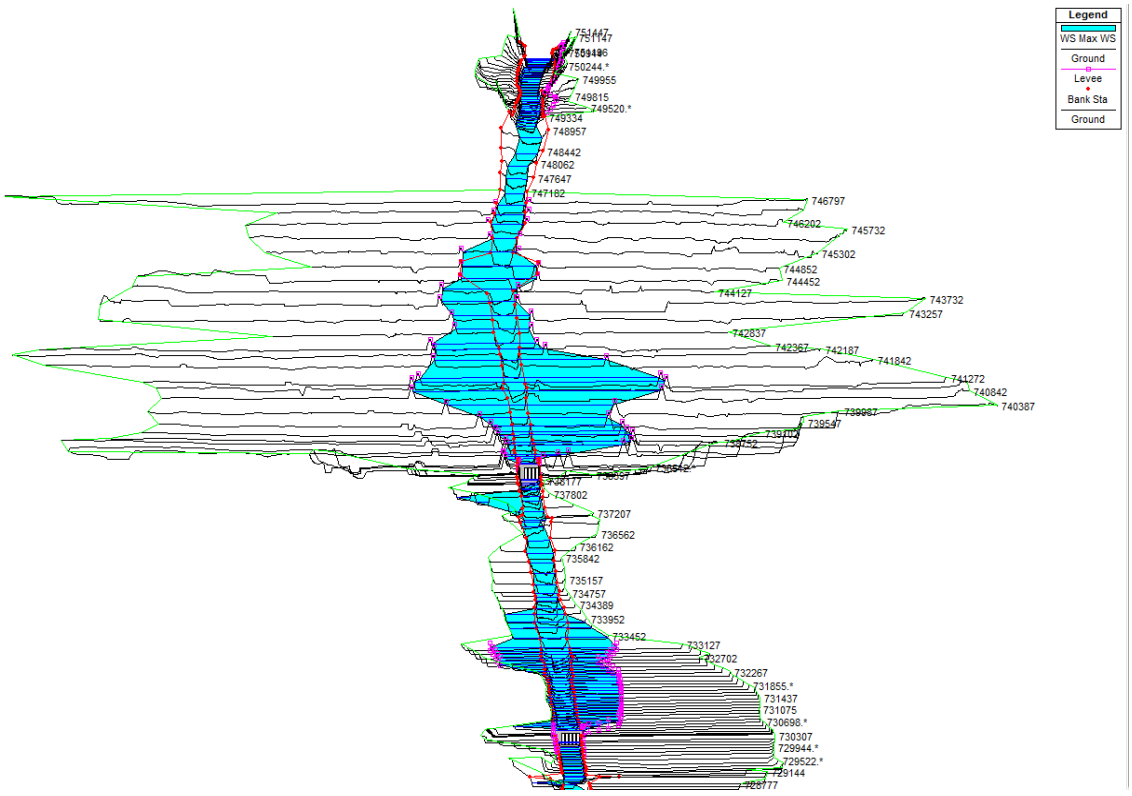
- Hidravličnega izračuna enodimenzionalnega stalnega toka
- Hidravličnega izračuna enodimenzionalnega nestalnega toka
- Izračune transporta plavin
- Analize vplivov zmanjšanja poplavnih območij

Osnovni modul je grafični vmesnik (slika 8), iz katerega dostopamo do vseh vhodnih podatkov, zagonov simulacij, analiz pretokov in poteka gladin, tabel in grafičnih prikazov.



Slika 8: Grafični vmesnik programa HEC-RAS

Uporabnik mora podati geometrijske podatke in pri teh najprej podati shemo – situacijo, s katero v programu pokažemo smer toka (slika 9), lahko tudi sistem več vodotokov.



Slika 9: Prikaz tlorisne situacije v programu

Prerezi v programu HEC-RAS se vnašajo z leve proti desni gledano dolvodno (slika 10).

Slika 10: Prečni prerez v HEC-RAS

Prečni prerezi so razvrščeni glede na posamezen odsek od najvišje do najnižje stacionaže v dolvodni smeri.

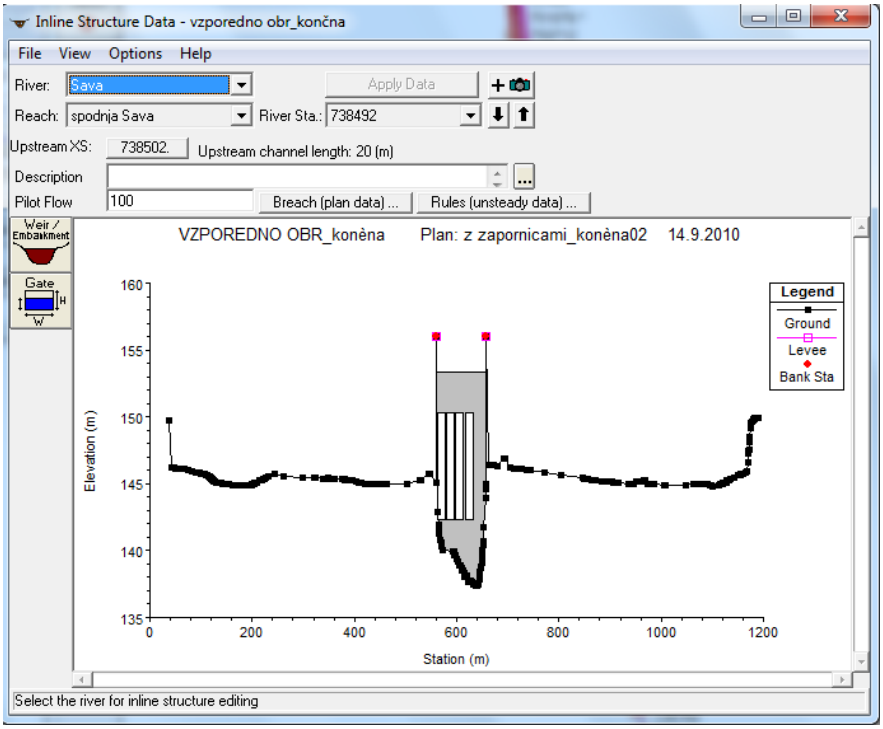
HEC-RAS nima vseh potrebnih opcij za simulacijo obratovanja HE na spodnji Savi, zato smo način simuliranja priredili njegovim zmožnostim. Problem se je pojavil pri dveh detajlih in sicer zaradi:

1. drugačnega tipa zaporničnih objektov in
2. neobstoječe opcije upoštevanja turbinskega pretoka

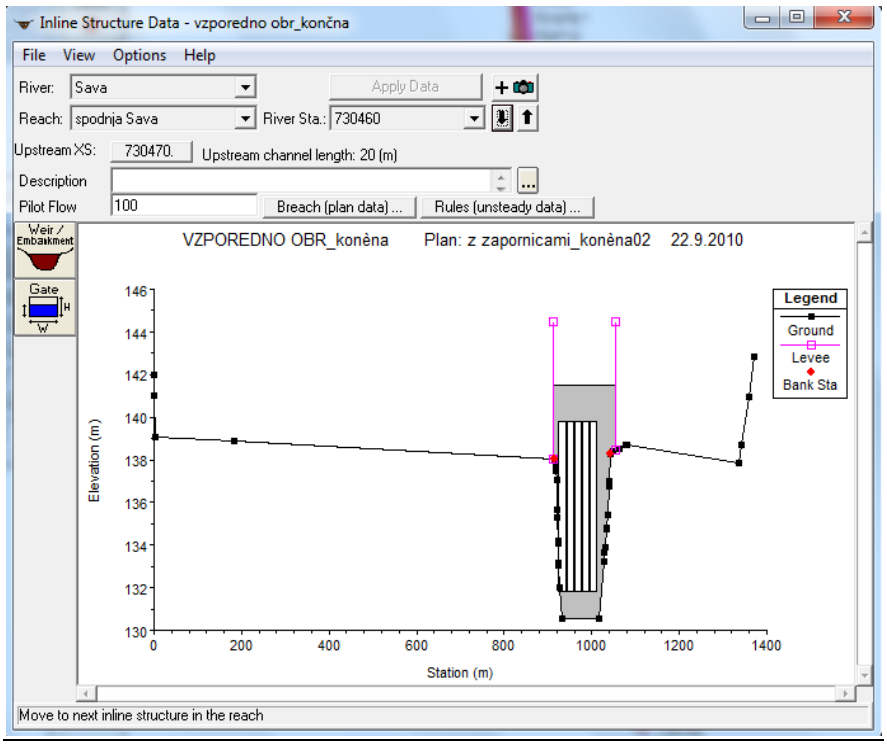
1. Zapornice

Hidroelektrarne na spodnji Savi imajo sestavljene zapornice in sicer segmentne radialne zapornice z dodatno zaklopko nad njimi. Z zaklopkami se gladina vode vzdržuje na Z_{nom}, dokler so naravni dotoki večji od turbinskega pretoka za ca. 500 m^3/s. Pri večjih dotokih pa je potrebno dvigovati segmente. Ker HEC-RAS ne ponuja te možnosti upoštevanja sestavljenih zapornic, smo regulacijo gladine izvajali z dvigom segmentov, čeprav smo simulirali obratovalne valove v območju pretokov, pri katerih se vzdrževanje gladine na Z_{nom} dejansko vrši s spuščanjem zaklopk. Postavili smo dve meji: zapornice se začno dvigovati, ko preseže gladina Z_{nom} + 1 cm in zapirati, ko gladina doseže Z_{nom}. Tako smo dosegli vzdrževanje gladine na koti Z_{nom} z odstopanjem 1 cm.

Privzeta hitrost odpiranja in zapiranja zapornic je 0,4 m/min.



Slika 11: Prikaz jezu z zapornicami na HE Brežice



Slika 12: Prikaz jezu z zapornicami na HE Mokrice

2. Turbinski pretoki

Ker HEC-RAS ne omogoča upoštevanja turbinskih pretokov pri jezovnih zgradbah, smo morali za turbinski pretok urediti stranski iztok in stranski dotok. Tako smo pred jezovno zgradbo HE uredili stranski odtok vode v obliki hidrograma privzetega turbinskega pretoka, pod jezom pa smo identično uredili stranski dotok v enako obliko hidrograma turbinskega pretoka.

Tako odtok kot dotok sta podana v drugem profilu nad oz. pod vsako HE, v prvem profilu nad HE pa je definirana začetna kota zajezbe, to je Z_{nom}. Da odseka med profiloma HE ter profili dotoka in odtoka niso suhi, smo definirali t.i. 'pilot flow', ki je vseskozi konstanten in znaša 100 m^3/s. Preostali turbinski pretok, to je spremembo med 100 m^3/s in 500 m^3/s, pa smo podali kot stranski odtok in pritok. Pri tem smo upoštevali že omenjeno zahtevo po omejitvi hitrosti spremembe pretoka, kar pomeni, da polni turbinski pretok nastopi šele 2 uri po začetku odpiranja pretoka.

3 PODATKI

3.1 Geometrijski podatki

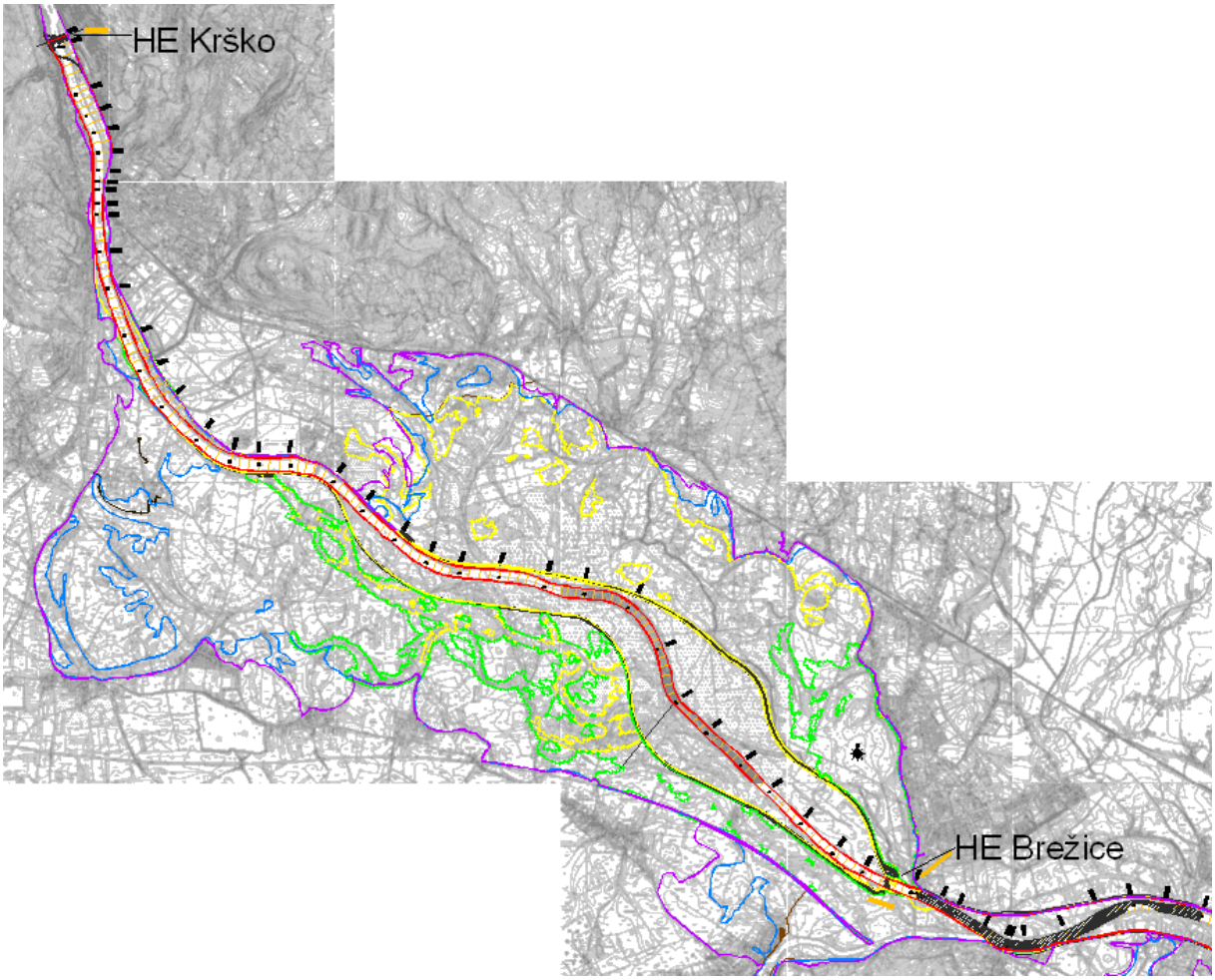
Geometrija struge in poplavnih področij je bila podana s prečnimi profili, ki so bili geodetsko izmerjeni na medsebojni razdalji približno 400 m.

Vseh prečnih profilov je 141, od tega je 97 merjenih in 44 interpoliranih. Na sliki 13 in 14 je prikaz prečnih profilov v akumulacijskih bazenih HE Brežice in HE Mokrice, pregledni karti bazenov v večjem merilu pa sta na prilogi B in C.

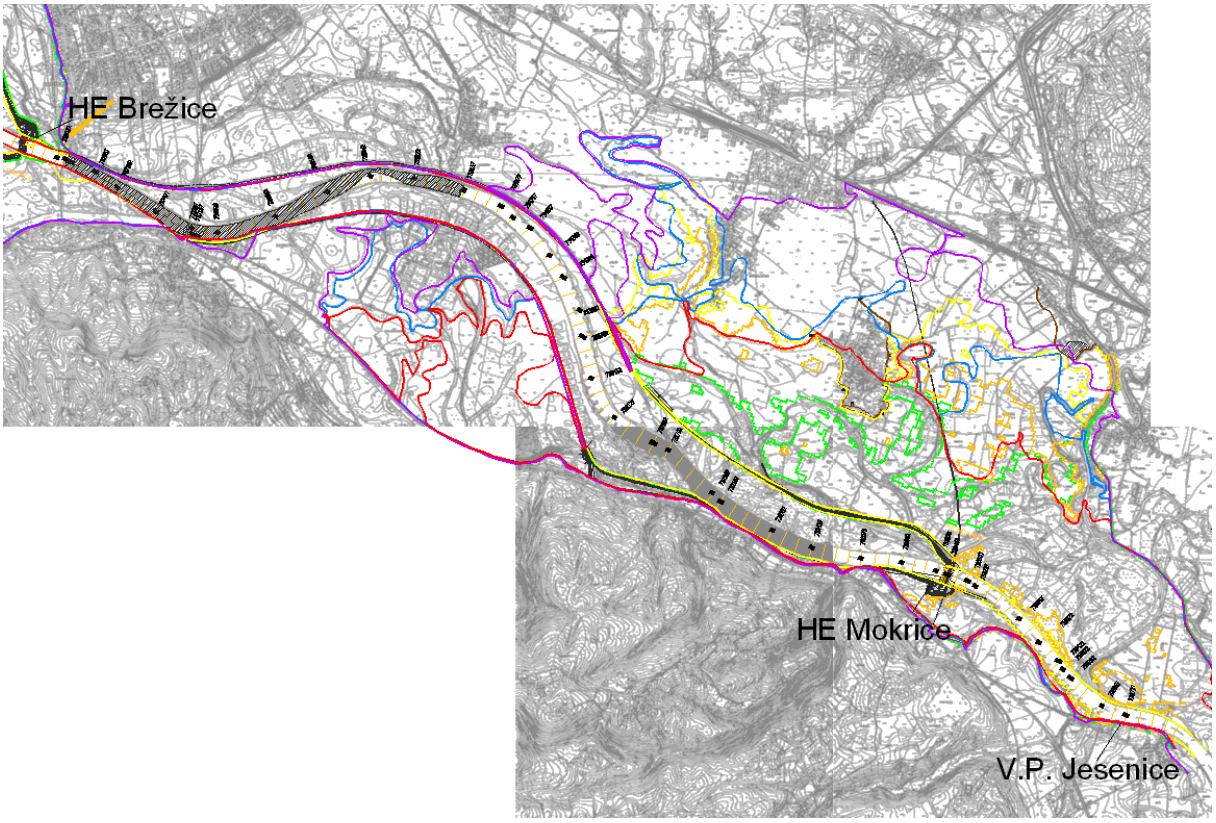
Zlasti je bilo nujno zgostiti profile tik nad in tik pod vsako HE tako zaradi potrebe računanja samega programa kot tudi zaradi načina obravnave našega specifičnega primera, kar je opisano na koncu poglavja 2.2.2.

Prečni profil je v računu upoštevan kot sestavljeni profil in sicer iz struge in levega ter desnega poplavnega področja. V območju nasipov so poplavna področja upoštevana do le teh.

Podatki o prečnih profilih izvirajo iz arhiva IBE (Inženirski biro Elektro projekt Ljubljana).



Slika 13: Merjeni prečni profili v akumulacijskem bazenu HE Brežice



Slika 14: Merjeni prečni profili v akumulacijskem bazenu HE Mokrice

3.2 Hidravlični podatki

3.2.1 HE Brežice

<u>Tehnični in obratovalni parametri pregradnega objekta:</u>

Levi breg – strojnica

- število agregatov: 3
- nazivni pretok turbine: 166,67 m^3/s
- instalirani pretok Q_{inst}: 500 m^3/s
- instalirana moč: (3 x nazivna moč turbine) 45,96 MW
- tip turbin: Kaplanova vertikalna
- nazivni neto padec turbine: 10,12 m

Struga – osrednji del - jezovna zgradba s prelivnimi polji

- število pretočnih polj: 4
- širina pretočnega polja: 15 m
- širina stebrov: 3 m
- kota prelivnega praga: 142,3 m
- kota zajezitve: 153 m n.m.
- največja obratovalna denivelacija: 1,1 m
- prelivna višina H_0 = 10,7 m
- dolžina s podslapjem: 55 m

3.2.2 HE Mokrice

Tehnični in obratovalni parametri pregradnega objekta:

Levi breg – strojnica

- število agregatov: 3
- nazivni pretok turbine: 166,67 m^3/s
- instalirani pretok Q_{inst}: 500 m^3/s
- instalirana moč: (3 x nazivna moč turbine) 45,96 MW
- tip turbin: Kaplanova vertikalna
- nazivni neto padec turbine: 10,12 m

Struga – osrednji del - jezovna zgradba s prelivnimi polji

- število pretočnih polj: 5
- širina pretočnega polja: 15 m
- širina stebrov: 3 m
- kota prelivnega praga: 131,8 m
- kota zajezitve: 141,5 m n.m.
- največja obratovalna denivelacija: 1,3 m
- prelivna višina H_0 = 9,7 m
- dolžina s podslapjem: 55 m

4 RAČUNSKI PRIMERI

Kot je navedeno že v uvodu, smo simulirali tri različne načine obratovanja. Simulacija obratovanja je bila izvršena le na zadnjih dveh HE v verigi, to je na HE Brežice in HE Mokrice, vendar se vpliv obratovanja vseh gorvodnih HE (Vrhovo, Blanca, Boštanj, Krško) upošteva preko ustreznega vhodnega hidrograma v prvem gorvodnem profilu obravnavanega odseka, ki je enak izhodnemu hidrogramu iz HE Krško. Pri obratovanju HE Mokrice upoštevamo obratovanje brez izravnave na naravni pretok v mejnem profilu, kar bi bilo korektno v primeru že izgrajene HE Podsused na Hrvaškem.

4.1 Vzporedno obratovanje

Pri tem načinu obratovanja se pretok na vseh HE odpre istočasno z enako (predpisano) hitrostjo naraščanja. Začetni pretok je 100 m^3/s (naravni dotok v času obratovanja), nato pa se turbinski pretok na vseh HE odpre na 500 m^3/s (maksimalni turbinski pretok) v dveh urah. S turbinskim pretokom, večjim od naravnega dotoka, obratujemo toliko časa, da porabimo ves razpoložljiv koristni volumen akumulacije.

Pretok skozi turbine je potrebno zmanjševati, še preden gladina doseže minimalno obratovalno koto bazena.

Naša naloga je bila ugotoviti, koliko časa lahko obratujemo z maksimalnim turbinskim pretokom in kdaj moramo na posamezni HE začeti s pripiranjem turbinskega pretoka, da porabimo ravno ves koristni volumen (ne manj, ne več). Istočasno je bilo potrebno izvesti tudi kontrolo hitrosti naraščanja in upadanja gladine v obeh bazenih in v strugi dolvodno od HE Mokrice.

4.2 Zaporedno obratovanje

Pri tem načinu obratovanja se turbinski pretok na dolvodni HE odpre s predpisano hitrostjo naraščanja pretoka v trenutku, ko jo doseže val iz gorvodne HE. Začetni pretok je 100 m^3/s (naravni dotok v času obratovanja), nato pa se turbinski pretok na zgornji HE odpre na 500 m^3/s (maksimalni turbinski pretok) v dveh urah in ko spodnjo HE doseže val iz zgornje HE , tudi spodnja HE odpre turbinski pretok na 500 m^3/s v dveh urah.
Ker se gladina nad HE ne sme dvigniti nad Z_{nom}, je potrebno višek dotoka preliti preko prelivnih polj. Ko gladina vode preseže Z_{nom} + 1 cm, se zapornice odprejo s hitrostjo 0,4 m/min in odvečen dotok spustijo skozi. S tem del volumna, pomembnega za proizvodnjo energije, izgubimo, v nevarnosti pa je tudi dolvodni odsek zaradi povečane hitrosti spremembe gladine.

S turbinskim dotokom, večjim od 100 m^3/s, obratujemo toliko časa, da porabimo ves koristni volumen gorvodnih HE in lastne akumulacije. Pretok skozi turbine je potrebno zmanjševati, še predno gladina doseže minimalno obratovalno koto bazena.

Naša naloga je bila ugotoviti, s kolikšnim zamikom začnemo z obratovanjem na HE Brežice in HE Mokrice, koliko časa lahko obratujemo z maksimalnim turbinskim pretokom in kdaj moramo na posamezni HE začeti s pripiranjem turbinskega pretoka, da porabimo ravno ves koristni volumen. Istočasno je bilo potrebno izvesti tudi kontrolo hitrosti naraščanja in upadanja gladine v obeh bazenih in v strugi dolvodno od HE Mokrice.

4.3 Optimirano zaporedno obratovanje

Pri optimiranem zaporednem obratovanju začne dolvodna HE obratovati za gorvodno HE s tolikšnim zamikom, da pravočasno 'ulovi' val iz gorvodne HE, s tem ne povzroči dviga gladine nad Z_{nom}, ne povzroči prelivanja skozi zapornice in drži gladino vode čim dlje na nominalni koti. Začetni pretok zgornje HE je 100 m^3/s (naravni dotok v času obratovanja), nato pa se turbinski pretok odpre na 500 m^3/s (maksimalni turbinski pretok) v dveh urah. Ko

val doseže spodnjo HE, ta začne z odpiranjem turbinskega pretoka na 500 m^3/s (maksimalni turbinski pretok) v dveh urah. S turbinskim dotokom, večjim od 100 m^3/s, obratujemo toliko časa, da porabimo ves koristni volumen gorvodnih HE in lastne akumulacije. Pretok skozi turbine je potrebno zmanjševati, še preden gladina doseže minimalno obratovalno koto bazena.

Naša naloga je bila ugotoviti, s kolikšnim zamikom za gorvodnimi HE začnemo z obratovanjem na HE Brežice in HE Mokrice, koliko časa lahko obratujemo z maksimalnim turbinskim pretokom in kdaj moramo na posamezni HE začeti s pripiranjem turbinskega pretoka, da porabimo ravno ves koristni volumen. Istočasno je bilo potrebno izvesti tudi kontrolo hitrosti naraščanja in upadanja gladine v obeh bazenih in v strugi dolvodno od HE Mokrice.

5 REZULTATI

Simulacije vzporednega, zaporednega in optimiranega zaporednega obratovanja so bile izvedene s časovnim korakom 10 sekund.

5.1 Vzporedno obratovanje

Obratovanje, ko vse HE na spodnji Savi istočasno povečajo turbinski pretok s 100 na 500 m^3/s s hitrostjo naraščanja 200 $m^3/s/h$.

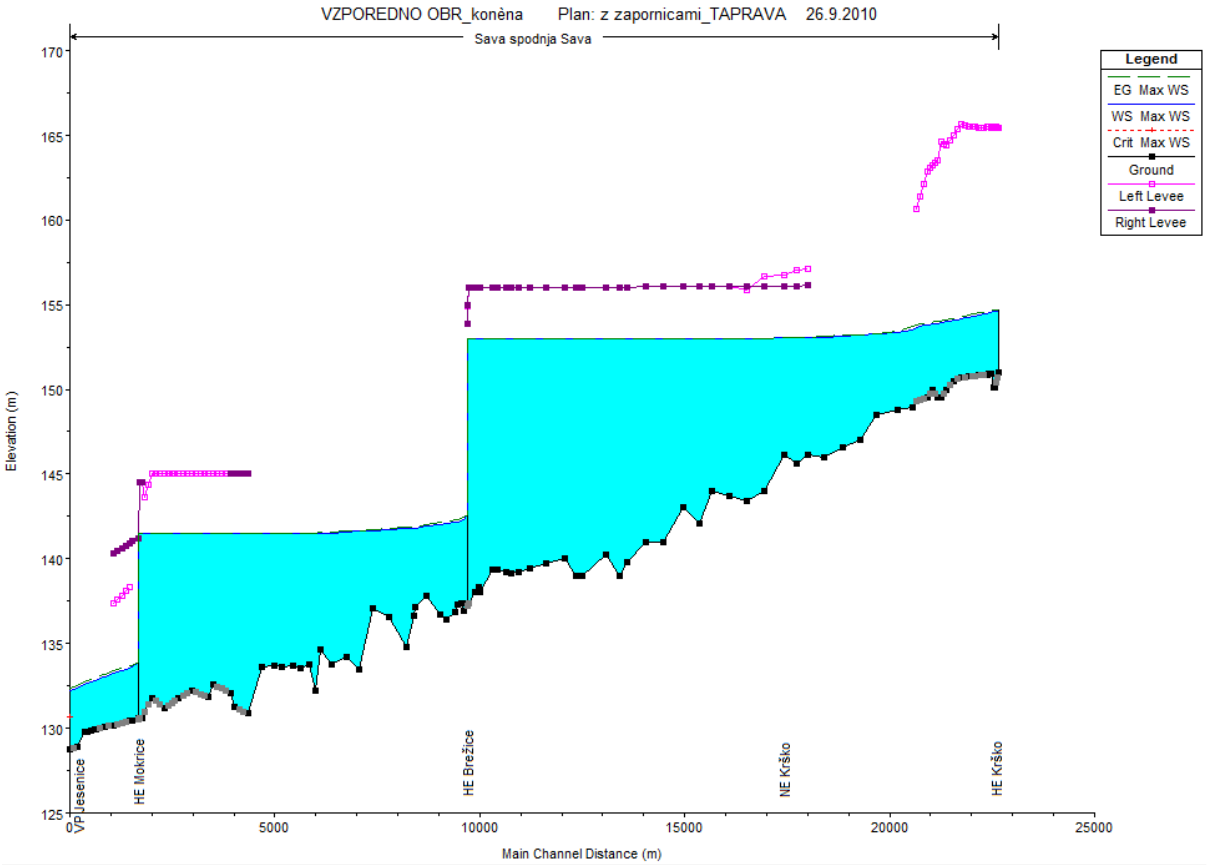
Preglednica 1: Čas, ko posamezna HE odpre in zapre pretok skozi turbine od začetka vzporednega obratovanja vseh HE

	Odpiranje pretoka [h]	Zapiranje pretoka [h]
HE Krško	0:00 - 2:00	3:25 - 5:25
HE Brežice	0:00 - 2:00	6:47 - 8:47
HE Mokrice	0:00 - 2:00	8:24 - 10:24

Iz preglednice 1 je razviden dopustni čas obratovanja, ki smo ga določiti za HE Brežice in Mokrice:

- HE Brežice
  Dopustni čas obratovanja je 8 ur in 47 min.
  - Dopustni čas obratovanja z maksimalnim turbinskim pretokom je 4 ure in 47 min.
- HE Mokrice
  Dopustni čas obratovanja je 10 ur in 24 min.
  - Dopustni čas obratovanja z maksimalnim turbinskim pretokom je 6 ur in 24 min.

Na sliki 15 je prikazan potek maksimalne gladine vode in linija krone nasipov ob NE Krško, HE Brežice in HE Mokrice.



Slika 15: Podolžni profil z maksimalno gladino pri vzporednem obratovanju in vrisanimi nasipi

Opazovali smo spreminjanje nivoja gladine v bazenih HE Brežice, HE Mokrice in v naravni strugi pod HE Mokrice do vodomerne postaje Jesenice na Dolenjskem v različnih časih po začetku obratovanja HE Krško.

Nivo gladine se najprej intenzivno spreminja v fazi odpiranja pretoka na vseh HE, nato pa spet v času po začetku zapiranja pretoka na HE Krško. Zato smo si za obe obdobji zrisali podolžne profile gladin v različnih časih. Za fazo odpiranja pretokov so časi prikaza gladin podani v preglednici 2, podolžni profili gladin pa na prilogi D, za fazo zapiranja pretokov pa v preglednici 3 in prilogi E.

Preglednica 2: Časovna preglednica odpiranja pretoka

t [h]	HE Krško, HE Brežice, HE Mokrice
0:00	začetek odpiranja turbinskega pretoka
1:00	odpiranje turbinskega pretoka 1 uro
1:30	odpiranje turbinskega pretoka 1 uro in 30 min
2:00	konec odpiranja turbinskega pretoka, 500 m^3/s
2:30	maksimalni turbinski pretok 30 min

Ugotovili smo, da se nad obema HE ustvarijo negativni protitočni valovi, pod obema HE pa pozitivni sotočni valovi. Hitrost dviga oziroma upada gladine zaradi valovanja pri odpiranju pretoka skozi turbine je razvidna iz preglednice 4.

Preglednica 3: Časovna preglednica zapiranja pretoka

t [h]	HE Krško	HE Brežice	HE Mokrice
3:25	začetek zapiranja turbinskega pretoka	maksimalni turbinski pretok 1 uro in 25 min	maksimalni turbinski pretok 1 uro in 25 min
3:40	zapiranje turbinskega pretoka 15 min	maksimalni turbinski pretok 1 uro in 40 min, začetek upadanja gladine	maksimalni turbinski pretok 1 uro 40 min
5:25	konec zapiranja turbinskega pretoka, 100 m^3/s	maksimalni turbinski pretok 3 ure in 25 min	maksimalni turbinski pretok 3 ure in 25 min
6:47	naravni dotok, 100 m^3/s	začetek zapiranja turbinskega pretoka	maksimalni turbinski pretok 4 ure in 47 min
8:47	naravni dotok, 100 m^3/s	konec zapiranja turbinskega pretoka	zapiranje turbinskega pretoka 23 min
10:24	naravni dotok, 100 m^3/s	naravni dotok, 100 m^3/s	konec zapiranja turbinskega pretoka

Ugotovili smo, da se nad obema HE ustvarijo pozitivni protitočni valovi, pod obema HE pa negativni sotočni valovi. Hitrost dviga oziroma upada gladine zaradi valovanja je razvidna iz preglednice 5.

Preverili smo hitrost spremembe gladine v akumulacijskem bazenu HE Brežice in v akumulacijskem bazenu HE Mokrice na petih lokacijah v bazenu: tik pod gorvodno HE, na ¼ bazena, na ½ bazena, na ¾ bazena in nad obravnavano HE. Pod HE Mokrice v naravni strugi

do vodomerne postaje Jesenice na Dolenjskem smo preverili hitrost spremembe gladine na treh lokacijah: pod HE Mokrice, na ½ naravne struge in v profilu vodomerne postaje.

Največja hitrost spreminjanja nivoja gladine na posameznih lokacijah za obe fazi intenzivnejšega spreminjanja nivoja je podana v preglednicah 4 in 5.

Preglednica 4: Maksimalna hitrost spreminjanja gladine pri odpiranju pretoka skozi turbine (vzporedno obratovanje)

		dZ/dt [m/h]
HE BREŽICE	pod HE Krško (KK)	**0,716**
	na 1/4 bazena BR	**0,505**
	na 1/2 bazena BR	**0,214**
	na 3/4 bazena BR	**-0,060**
	nad HE BR	**-0,056**
HE MOKRICE	pod HE Brežice (BR)	**0,360**
	na 1/4 bazena MOK	**0,064**
	na 1/2 bazena MOK	**-0,060**
	na 3/4 bazena MOK	**-0,071**
	nad HE MOK	**-0,073**
pod HE MOKRICE	pod HE Mokrice (MOK)	**0,993**
	na 1/2 naravne struge pod HE MOK	**0,795**
	na V.P. Jesenice	**0,792**

V preglednici 4 je razvidna hitrost naraščanja in upadanja gladine v akumulacijskem bazenu HE Brežice, akumulacijskem bazenu HE Mokrice in v naravni strugi pod HE Mokrice do vodomerne postaje Jesenice na Dolenjskem.

Dopustna hitrost spremembe gladine v akumulacijskem bazenu je 1 m/h in v naravni strugi 0,5 m/h.

Iz rezultatov je razvidno, da HE Brežice in HE Mokrice začeta takoj porabljati koristni volumen, kar je razvidno iz upada gladine preden val iz gorvodnih HE doseže profil obravnavane HE.

V akumulacijskih bazenih je hitrost spremembe gladine v dopustnih mejah, pod HE Mokrice v naravni strugi pa preseže dopustno hitrost. Zato bi bilo potrebno bodisi znižati hitrost spreminjanja pretoka na HE Mokrice, bodisi ustrezno utrditi brežine struge pod HE Brežice vse do vodomerne postaje.

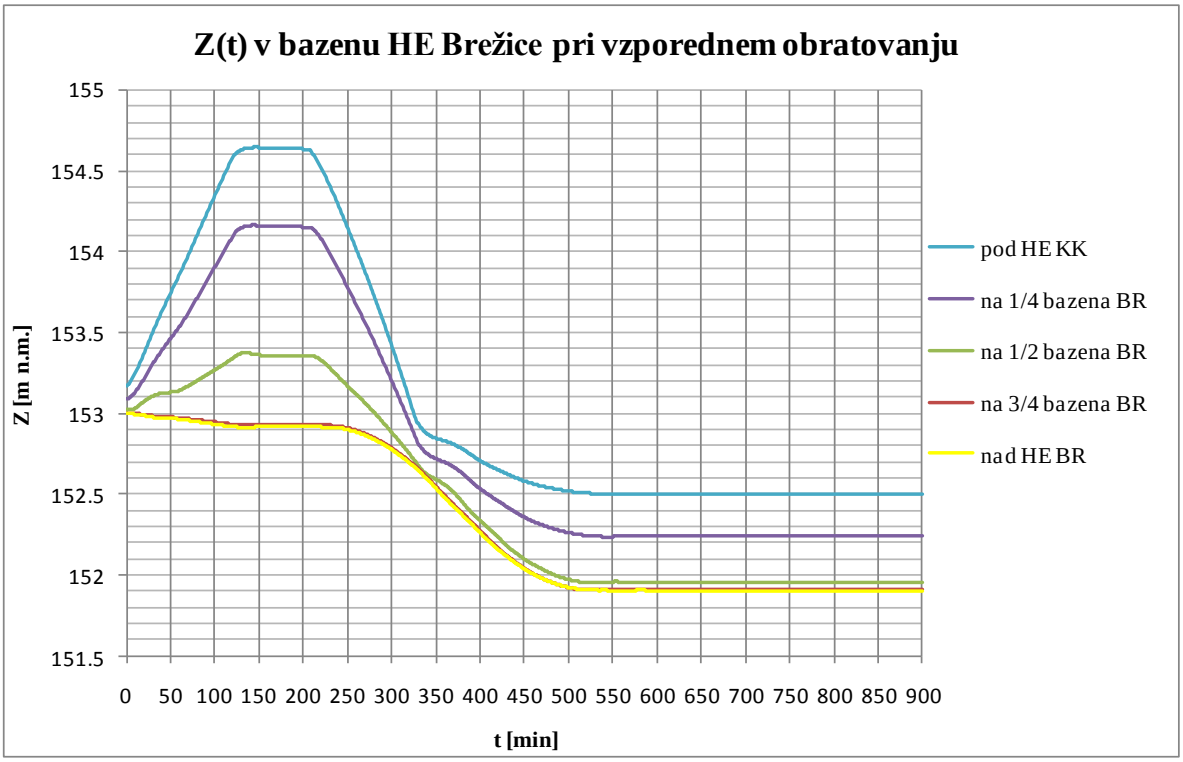
Preglednica 5: Maksimalna hitrost spreminjanja gladine po začetku zapiranju pretoka na HE Krško (vzporedno obratovanje)

		dZ/dt [m/h]
HE BREŽICE	pod HE Krško (KK)	**-0,851**
	na 1/4 bazena BR	**-0,698**
	na 1/2 bazena BR	**-0,328**
	na 3/4 bazena BR	**-0,321**
	nad HE BR	**-0,310**
HE MOKRICE	pod HE Brežice (BR)	**-0,788**
	na 1/4 bazena MOK	**-0,647**
	na 1/2 bazena MOK	**-0,611**
	na 3/4 bazena MOK	**-0,600**
	nad HE MOK	**-0,618**
pod HE MOKRICE	pod HE Mokrice (MOK)	**-0,878**
	na 1/2 naravne struge pod HE MOK	**-0,807**
	na V.P. Jesenice	**-0,741**

Pri zapiranju pretoka na gorvodni HE začne gladina upadati. V akumulacijskih bazenih je ta vrednost v dopustnih mejah, pod HE Mokrice v naravni strugi pa to mejo preseže. Torej bi bili potrebni enaki ukrepi kot so navedeni za primer odpiranja pretoka.

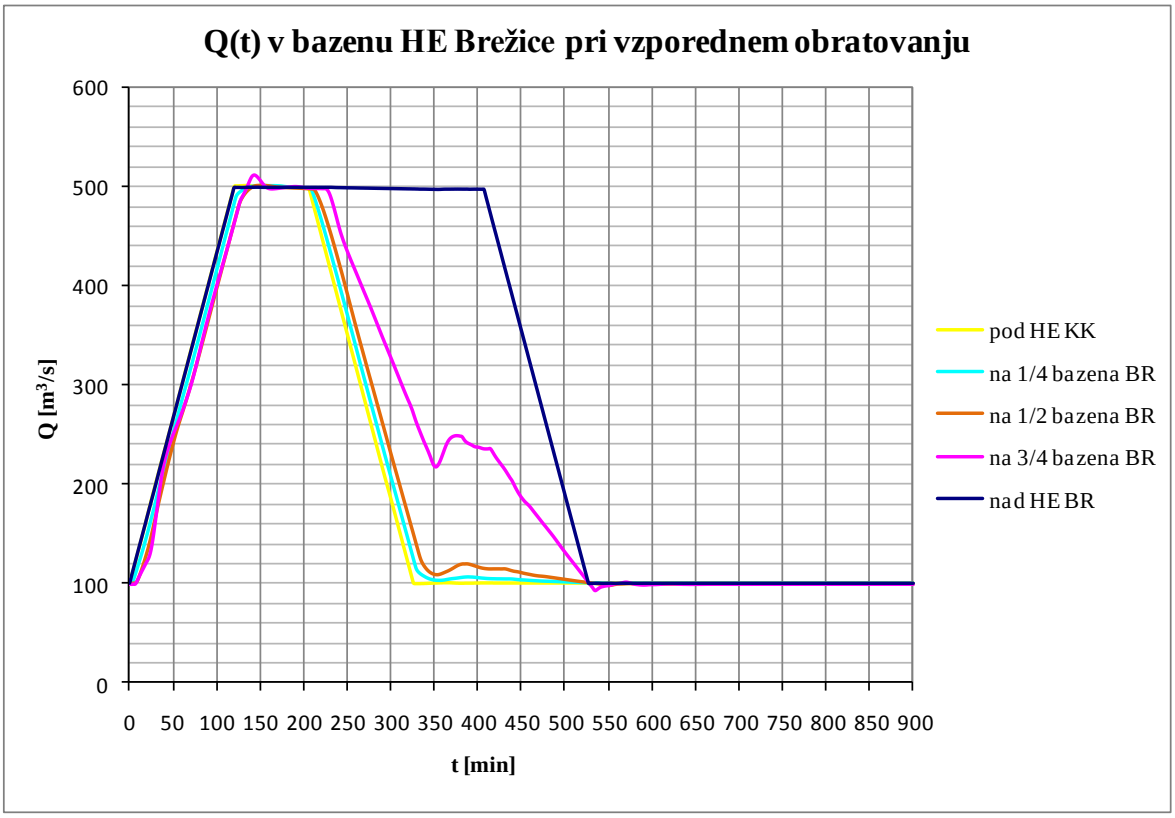
Preverili smo potek gladine in pretoka s časom v akumulacijskem bazenu HE Brežice in HE Mokrice na petih lokacijah v bazenu: tik pod gorvodno HE, na ¼ bazena, na ½ bazena, na ¾ bazena in nad obravnavano HE. Pod HE Mokrice v naravni strugi do vodomerne postaje Jesenice na Dolenjskem smo preverili gladino na treh lokacijah: pod HE Mokrice, na ½ naravne struge in v profilu vodomerne postaje. Zrisali smo nivograme in hidrograme.

1. Akumulacijski bazen HE Brežice



Slika 16: Nivogrami v bazenu HE Brežice pri vzporednem obratovanju

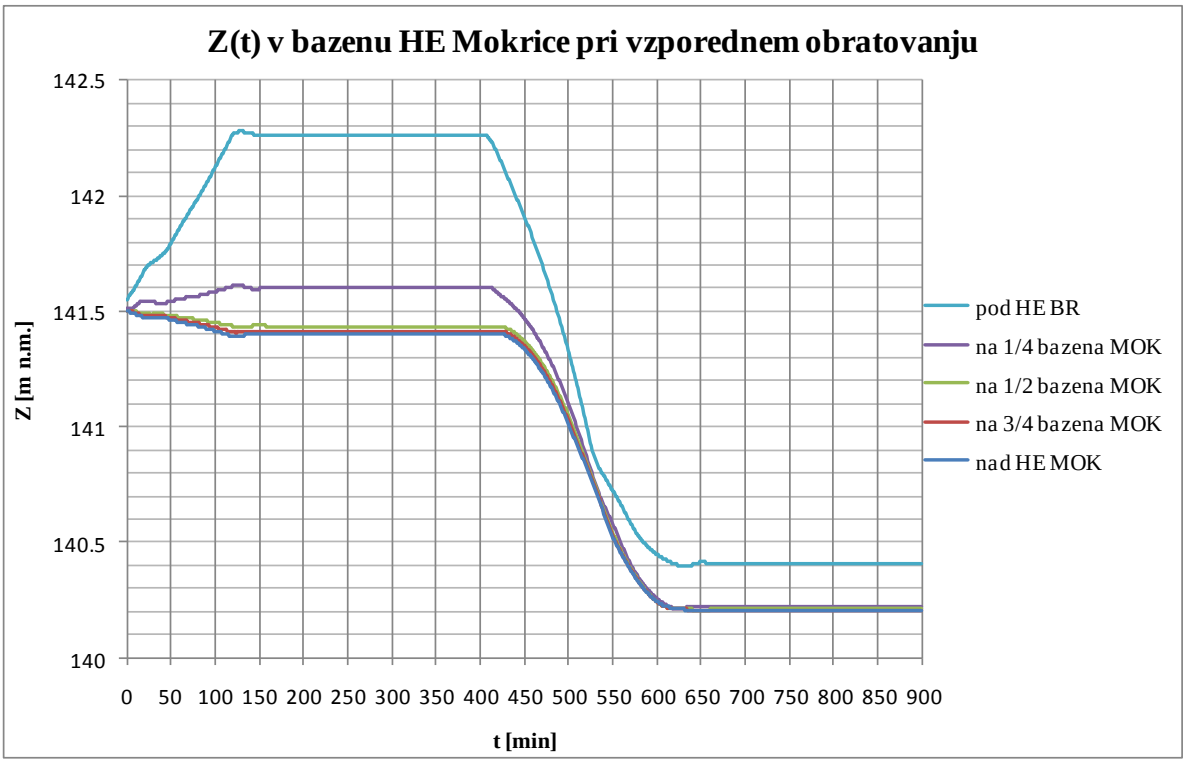
Ker smo začeli odpirati pretok istočasno z gorvodnimi HE, smo začeli takoj porabljati lastni koristni volumen, kar je razvidno tudi iz nivograma na sliki 16. Ko val iz HE Krško doseže HE Brežice, gladina nad HE Brežice preneha upadati in drži nivo. Ko se volumen obratovalnega vala iz gorvodnih HE porabi, se spet začne porabljati koristni volumen in gladina upade do minimalne obratovalne gladine. Pri HE Brežice je minimalna obratovalna gladina Z_{nom} – 1,1 m (151,90 m).



Slika 17: Hidrogrami v bazenu HE Brežice pri vzporednem obratovanju

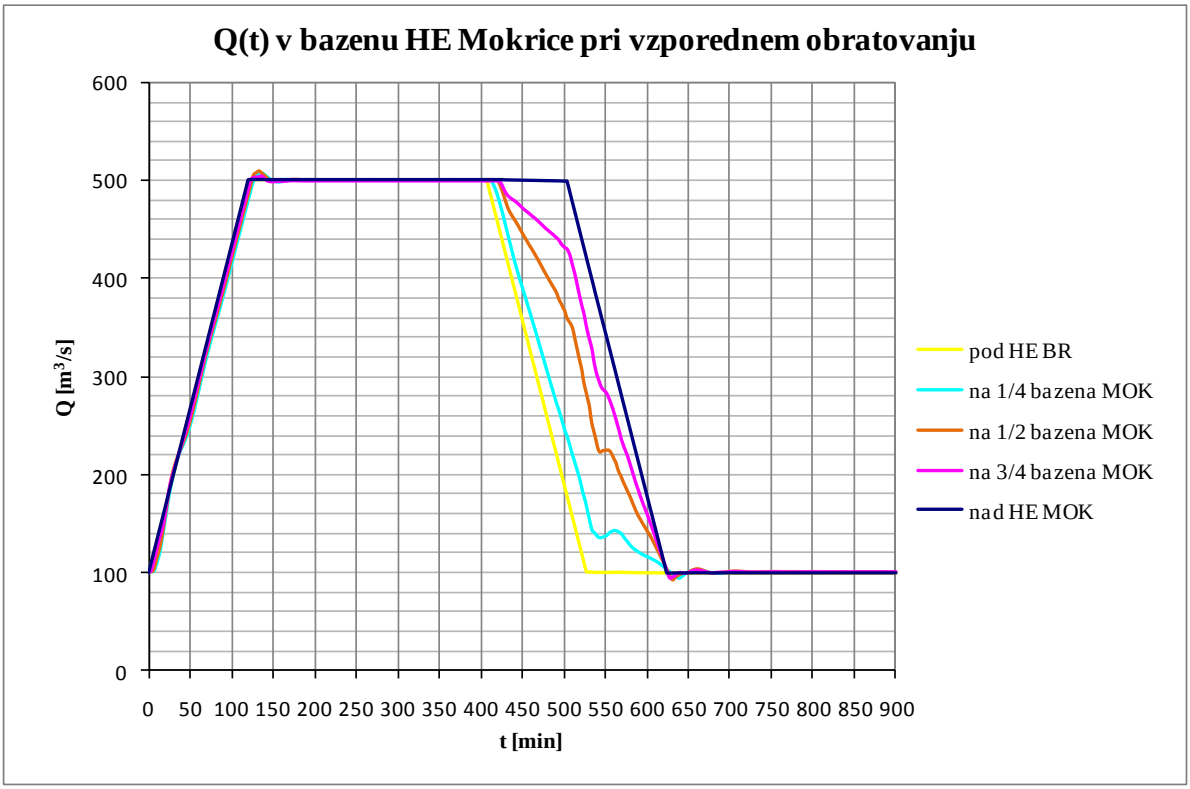
Trajanje maksimalnega turbinskega pretoka na HE Brežice je daljše kot na gorvodnih HE, saj HE Brežice porablja ves koristni volumen gorvodnih HE in lastni koristni volumen.

2. Akumulacijski bazen HE Mokrice



Slika 18: Nivogrami v bazenu HE Mokrice pri vzporednem obratovanju

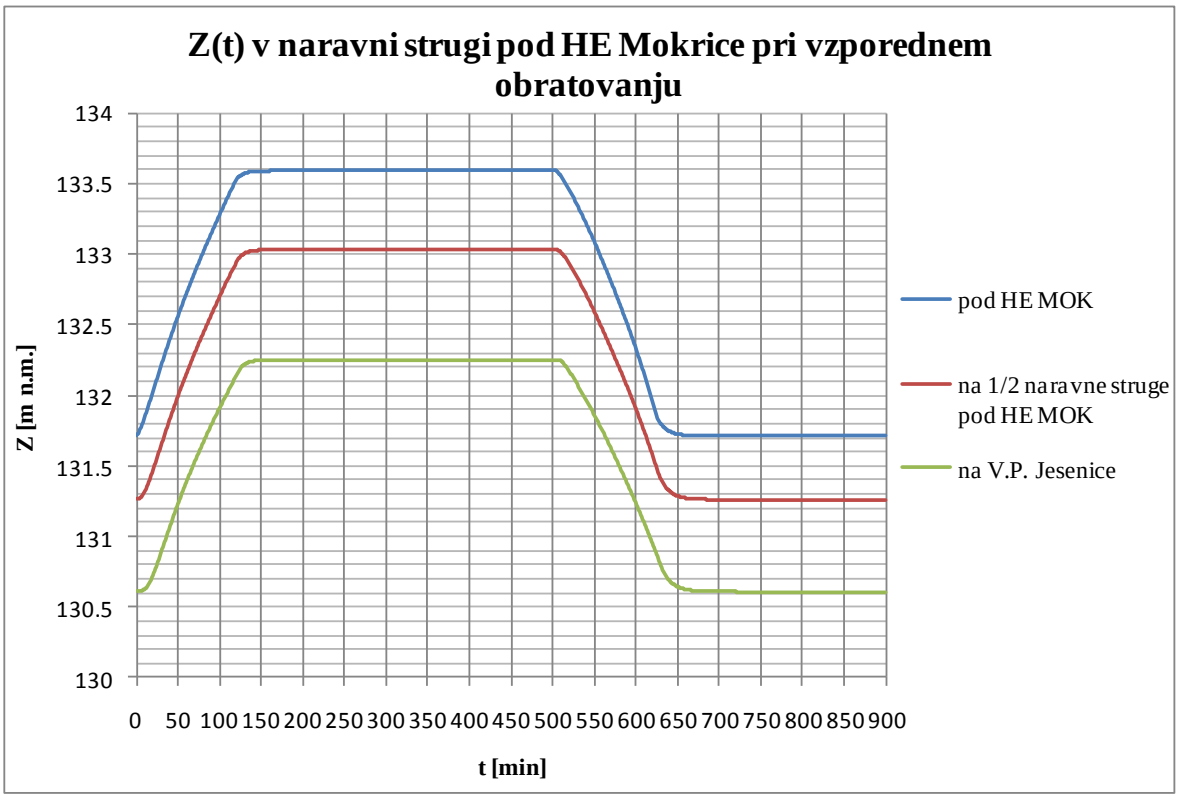
Ker HE Mokrice odpre pretok istočasno kot HE Brežice in ostale gorvodne HE, začne takoj porabljati lastni koristni volumen, kar je razvidno iz nivograma na sliki 18. Šele ko jo doseže val iz HE Brežice, se nivo vode ustali vse dokler obratovalni val z gorvodnih HE polni bazen, nato se spusti do minimalne obratovalne gladine. Pri HE Mokrice je to Z_{nom} – 1,3 m (140,20 m).



Slika 19: Hidrogrami v bazenu HE Mokrice pri vzporednem obratovanju

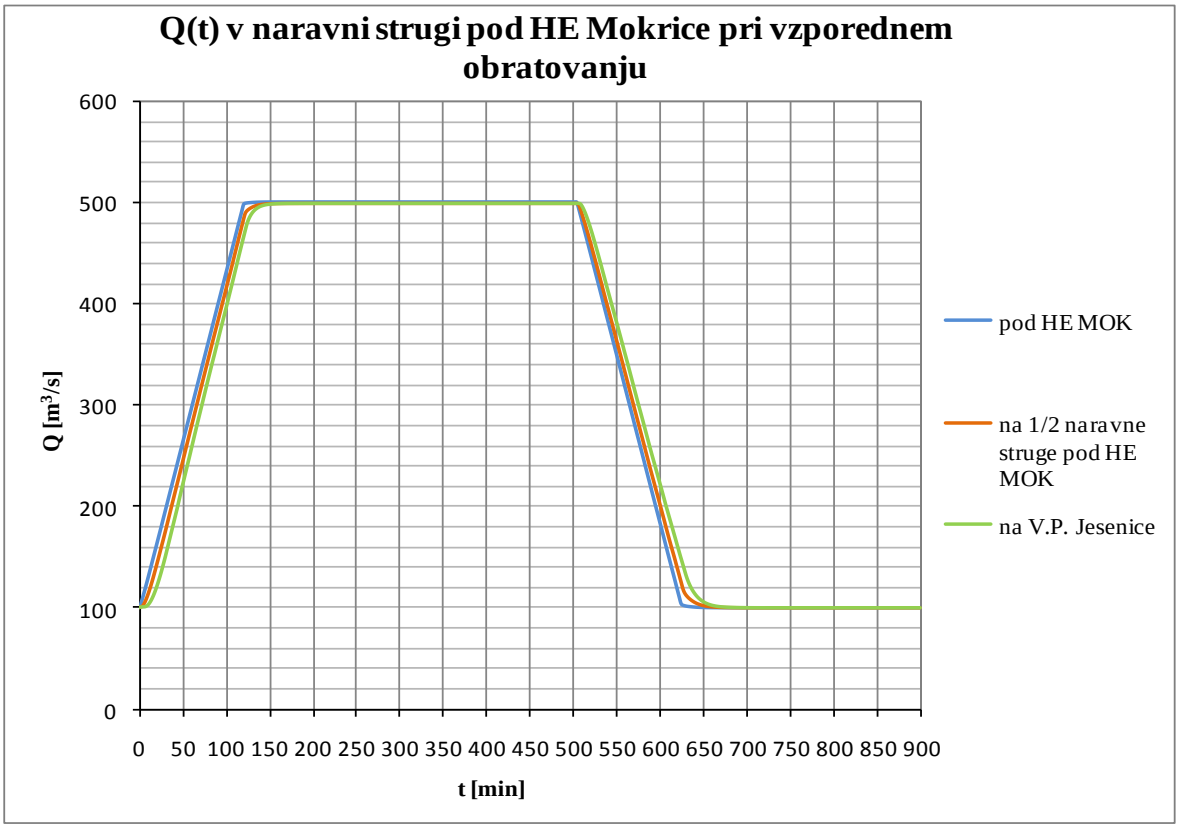
Ker HE Mokrice izrablja ves koristni volumen iz vseh gorvodnih HE in lastni koristni volumen, je trajanje maksimalnega turbinskega pretoka toliko daljše.

3. Naravna struga pod HE Mokrice



Slika 20: Nivogrami v naravni strugi pod HE Mokrice pri vzporednem obratovanju

Gladina pod HE Mokrice začne takoj naraščati zaradi odpiranja turbinskega pretoka na HE Mokrice. Gladina se ustali, ko turbinski pretok doseže maksimalno vrednost 500 m^3/s, nato pa z začetkom zapiranja pretoka skozi turbine gladina začne upadati.



Slika 21: Hidrogrami v naravni strugi pod HE Mokrice pri vzporednem obratovanju

Sprememba pretoka v naravni strugi je enaka hidrogramu iztoka iz HE Mokrice.

5.2 Zaporedno obratovanje

Pri zaporednem obratovanju odpremo turbinski pretok s hitrostjo 200 $m^3/s/h$ v trenutku, ko obravnavano HE doseže val iz gorvodnih HE.

Preglednica 6: Čas, ko posamezna HE odpre in zapre pretok skozi turbine po začetku obratovanja HE Vrhovo

	Odpiranje pretoka [h]	Zapiranje pretoka [h]
HE Krško	0:18 - 2:18	3:44 - 5:44
HE Brežice	0:55 - 2:55	7:15 - 9:15
HE Mokrice	1:17 - 3:17	8:58 - 10:58

Iz preglednice 6 je razviden dopustni čas obratovanja, ki smo ga določiti za HE Brežice in Mokrice:

- HE Brežice
  Dopustni čas obratovanja je 8 ur in 20 min.
  Turbinski pretok odpremo 55 min kasneje kot HE Vrhovo in 37 min kasneje kot HE Krško.
    - Dopustni čas obratovanja z maksimalnim turbinskim pretokom je 4 ure in 20 min.
- HE Mokrice
  Dopustni čas obratovanja je 9 ur in 41 min.
  Turbinski pretok odpremo 1 uro in 17 kasneje kot HE Vrhovo in 22 min kasneje kot HE Brežice.
    - Dopustni čas obratovanja z maksimalnim turbinskim pretokom je 5 ur in 41 min.

Ker začnemo z odpiranjem turbinskega pretoka šele, ko val že doseže HE, bi se gladina v bazenu začasno dvignila nad Z_{nom}, ker pretok nad obravnavano HE narašča hitreje kot smemo odpirati turbinski pretok na obravnavani HE. To pa na spodnjesavski verigi ni dovoljeno. Zato, da nivo gladine držimo na dovoljeni vrednosti, je potrebno višek vode spustiti skozi prelivna polja in s tem izgubimo del koristnega volumna.

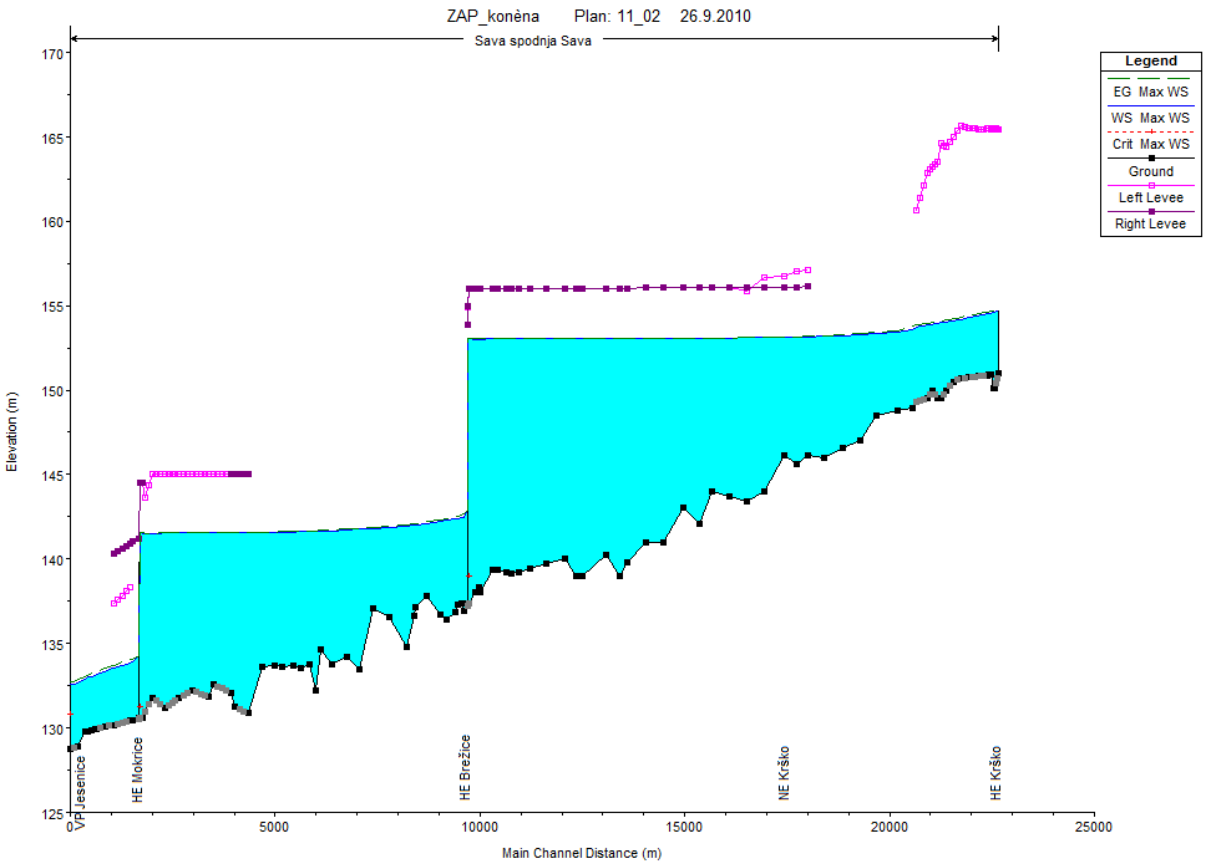
Ker HEC-RAS zapornice odpira s stalno hitrostjo ves čas, ko je gladina vsaj minimalno čez zgornjo predpisano mejo, naraste pretok preko zapornic zelo hitro in prav tako hitro upade pri zapiranju. Zaradi precej grobe simulacije odpiranja verjetno pri računski simulaciji izgubimo (prelijemo) nekaj več vode, kot bi jo dejansko. Vendar pa to nima bistvenega vpliva na kvantitativno ovrednotenje zaporednega obratovanja.

Privzeta hitrost odpiranja zapornic je 0,4 m/min.

Zaradi pretoka skozi zapornice izgubimo velik del koristnega volumna obeh akumulacijskih bazenov.

1. HE Brežice: izgubimo 662.128,2 m^3 koristnega volumna.
2. HE Mokrice: izgubimo 1.119.646,8 m^3 koristnega volumna.

Na sliki 22 je prikazan potek maksimalne gladine vode in linija krone nasipov ob NE Krško, HE Brežice in HE Mokrice.



Slika 22: Podolžni profil z maksimalno gladino pri zaporednem obratovanju in vrisanimi nasipi

Opazovali smo nivo gladine v bazenih HE Brežice, HE Mokrice in v naravni strugi pod HE Mokrice do vodomerne postaje Jesenice na Dolenjskem v različnih časih po začetku obratovanja HE Krško.

Nivo gladine se najprej intenzivno spreminja v fazi odpiranja pretoka na vseh HE, nato pa spet v času po začetku zapiranja pretoka na HE Krško. Zato smo si za obe obdobji zrisali podolžne profile gladin v različnih časih. Za fazo odpiranja pretokov so časi prikaza gladin

podani v preglednici 7, podolžni profili gladin pa na prilogi F, za fazo zapiranja pretokov pa v preglednici 8 in prilogi G.

Preglednica 7: Časovna preglednica odpiranja pretoka

t [h]	HE Krško	HE Brežice	HE Mokrice
0:18	začetek odpiranja turbinskega pretoka	naravni dotok, 100 m^3/s	naravni dotok, 100 m^3/s
0:55	odpiranje turbinskega pretoka 37 min	začetek odpiranja turbinskega pretoka	naravni dotok, 100 m^3/s
1:17	odpiranje turbinskega pretoka 59 min	odpiranje turbinskega pretoka 22 min	začetek odpiranja turbinskega pretoka
2:18	konec odpiranja turbinskega pretoka, 500 m^3/s	odpiranje turbinskega pretoka 1 uro in 22 min	odpiranje turbinskega pretoka 1 uro in 1 min
2:55	maksimalni turbinski pretok 37 min	konec odpiranja turbinskega pretoka, 500 m^3/s	odpiranje turbinskega pretoka 1 uro in 38 min
3:17	maksimalni turbinski pretok 59 min	maksimalni turbinski pretok 22 min	konec odpiranja turbinskega pretoka, 500 m^3/s

Ugotovili smo, da se nad obema HE ustvarijo negativni protitočni valovi, pod obema HE pa pozitivni sotočni valovi. Hitrost dviga oziroma upada gladine zaradi valovanja je razvidna v preglednici 9.

Preglednica 8: Časovna preglednica zapiranja pretoka

t [h]	HE Krško	HE Brežice	HE Mokrice
3:44	začetek zapiranja turbinskega pretoka	maksimalni turbinski pretok 49 min	maksimalni turbinski pretok 27 min
4:17	zapiranje turbinskega pretoka 33 min	maksimalni turbinski pretok 1 uro in 22 min, začetek upadanja gladine	maksimalni turbinski pretok 1 uro
5:44	konec zapiranja turbinskega pretoka, 100 m^3/s	maksimalni turbinski pretok 2 uri in 49 min	maksimalni turbinski pretok 2 uri in 27 min
7:15	naravni dotok, 100 m^3/s	začetek zapiranja turbinskega pretoka	maksimalni turbinski pretok 3 ure in 58 min
8:58	naravni dotok, 100 m^3/s	zapiranje turbinskega pretoka 1 uro in 43 min	začetek zapiranja turbinskega pretoka
9:15	naravni dotok, 100 m^3/s	konec zapiranja turbinskega pretoka, 100 m^3/s	zapiranje turbinskega pretoka 17 min
10:58	naravni dotok, 100 m^3/s	naravni dotok, 100 m^3/s	konec zapiranja turbinskega pretoka, 100 m^3/s

Ugotovili smo, da se nad obema HE ustvarijo pozitivni protitočni valovi, pod obema HE pa negativni sotočni valovi. Hitrost dviga oziroma upada gladine zaradi valovanja je razvidna v preglednici 10.

Preverili smo hitrost spremembe gladine v akumulacijskem bazenu HE Brežice in v akumulacijskem bazenu HE Mokrice na petih lokacijah v bazenu: tik pod gorvodno HE, na ¼ bazena, na ½ bazena, na ¾ bazena in nad obravnavano HE. Pod HE Mokrice v naravni strugi do vodomerne postaje Jesenice na Dolenjskem smo preverili hitrost spremembe gladine na treh lokacijah: pod HE Mokrice, na ½ naravne struge in v profilu vodomerne postaje.

Največja hitrost spreminjanja nivoja gladine na posameznih lokacijah za obe fazi intenzivnejšega spreminjanja nivoja je podana v preglednici 9 in 10.

Preglednica 9: Maksimalna hitrost spreminjanja gladine pri odpiranju pretoka skozi turbine (zaporedno obratovanje)

		dZ/dt [m/h]
HE BREŽICE	pod HE Krško (KK)	**0,724**
	na 1/4 bazena BR	**0,505**
	na 1/2 bazena BR	**0,210**
	na 3/4 bazena BR	**0,082**
	nad HE BR	**0,063**
HE MOKRICE	pod HE Brežice (BR)	**0,529**
	na 1/4 bazena MOK	**0,508**
	na 1/2 bazena MOK	**0,300**
	na 3/4 bazena MOK	**0,273**
	nad HE MOK	**0,300**
pod HE MOKRICE	pod HE Mokrice (MOK)	**2,167**
	na 1/2 naravne struge pod HE MOK	**2,194**
	na V.P. Jesenice	**2,164**

Pri odpiranju pretoka skozi turbine gladina nad HE Brežice in HE Mokrice naraste, saj nam val iz gorvodnih hidroelektrarn povzroči dvig gladine zaradi prelivanja skozi zapornice. Pod HE Krško in HE Brežice pa je ta sprememba veliko hitrejša, vendar je še vedno v mejah dopustnega, to je pod 1 m/h.

Pod HE Mokrice je hitrost naraščanja gladine presežena po celem odseku in je kar precej večja kot je dopustna. Po celem odseku naravne struge do vodomerne postaje znaša hitrost naraščanja gladine več kot 2 m/h. Zato bi bilo potrebno bodisi zmanjšati hitrost spreminjanja pretoka na HE Mokrice ali pa utrditi brežine po celotnem odseku med HE Mokrice in vodomerno postajo.

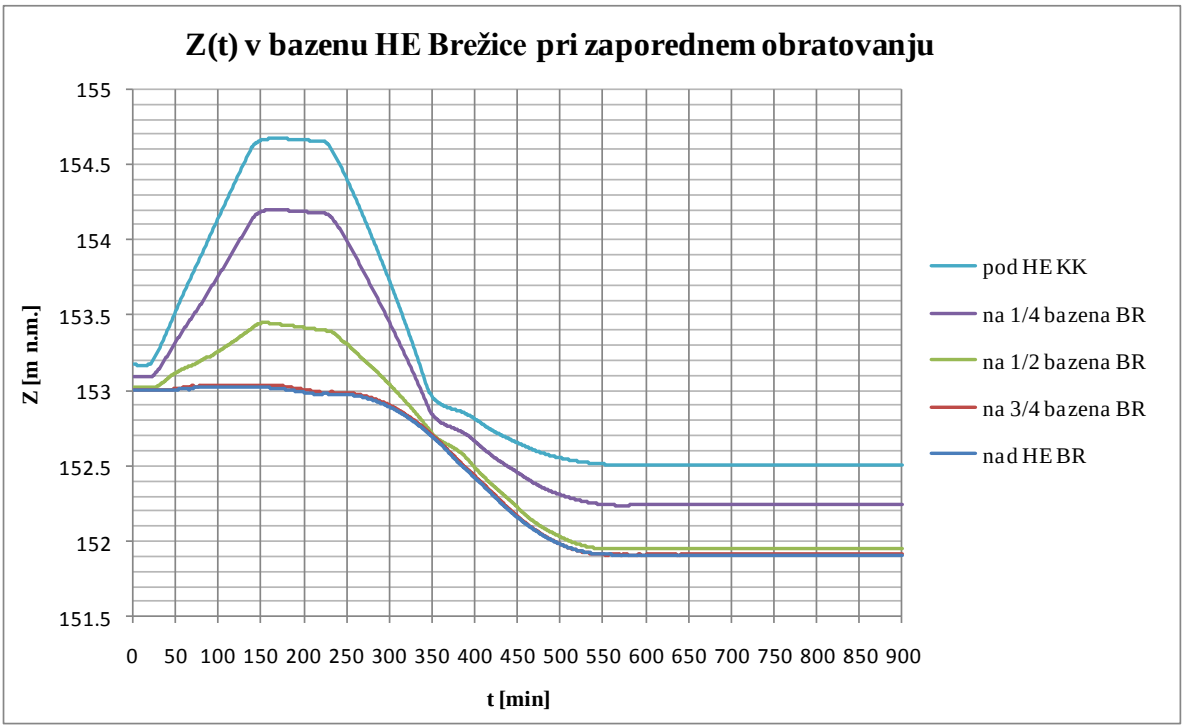
Preglednica 10: Maksimalna hitrost spreminjanja gladine po začetku zapiranja pretoka na HE Krško (zaporedno obratovanje)

		dZ/dt [m/h]
HE BREŽICE	pod HE Krško (KK)	**-0,839**
	na 1/4 bazena BR	**-0,689**
	na 1/2 bazena BR	**-0,349**
	na 3/4 bazena BR	**-0,288**
	nad HE BR	**-0,266**
HE MOKRICE	pod HE Brežice (BR)	**-0,722**
	na 1/4 bazena MOK	**-0,684**
	na 1/2 bazena MOK	**-0,631**
	na 3/4 bazena MOK	**-0,620**
	nad HE MOK	**-0,629**
pod HE MOKRICE	pod HE Mokrice (MOK)	**-0,880**
	na 1/2 naravne struge pod HE MOK	**-0,807**
	na V.P. Jesenice	**-0,755**

Pri zapiranju pretoka je hitrost spremembe gladine v bazenih HE Brežice in HE Mokrice še vedno pod dopustno. Pod HE Mokrice pa je hitrost upadanja gladine nad dopustno, vendar je hitrost manjša kot pri odpiranju pretoka. Kljub temu pa velja enak komentar o potrebnih ukrepih.

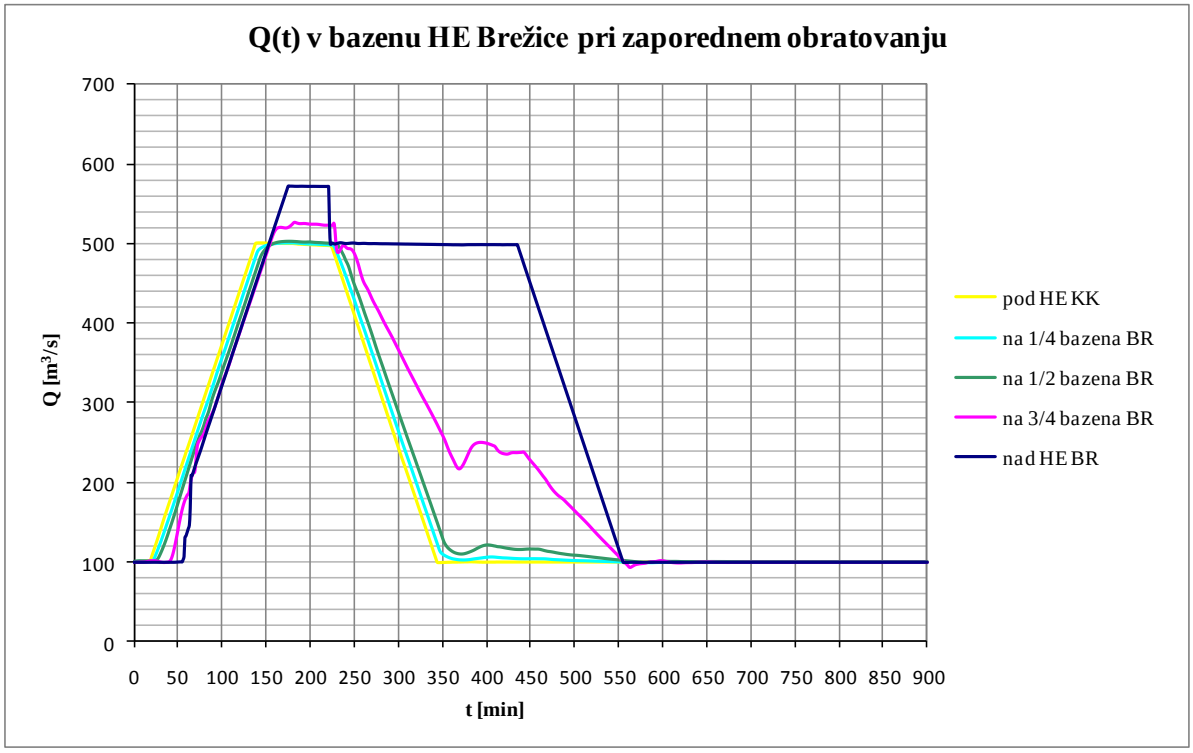
Preverili smo potek gladine in pretoka s časom v akumulacijskem bazenu HE Brežice in HE Mokrice na petih lokacijah v bazenu: tik pod gorvodno HE, na ¼ bazena, na ½ bazena, na ¾ bazena in nad obravnavano HE. Pod HE Mokrice v naravni strugi do vodomerne postaje Jesenice na Dolenjskem smo preverili gladino na treh lokacijah: pod HE Mokrice, na ½ naravne struge in v profilu vodomerne postaje. Zrisali smo nivograme in hidrograme.

1. Akumulacijski bazen HE Brežice



Slika 23: Nivogrami v bazenu HE Brežice pri zaporednem obratovanju

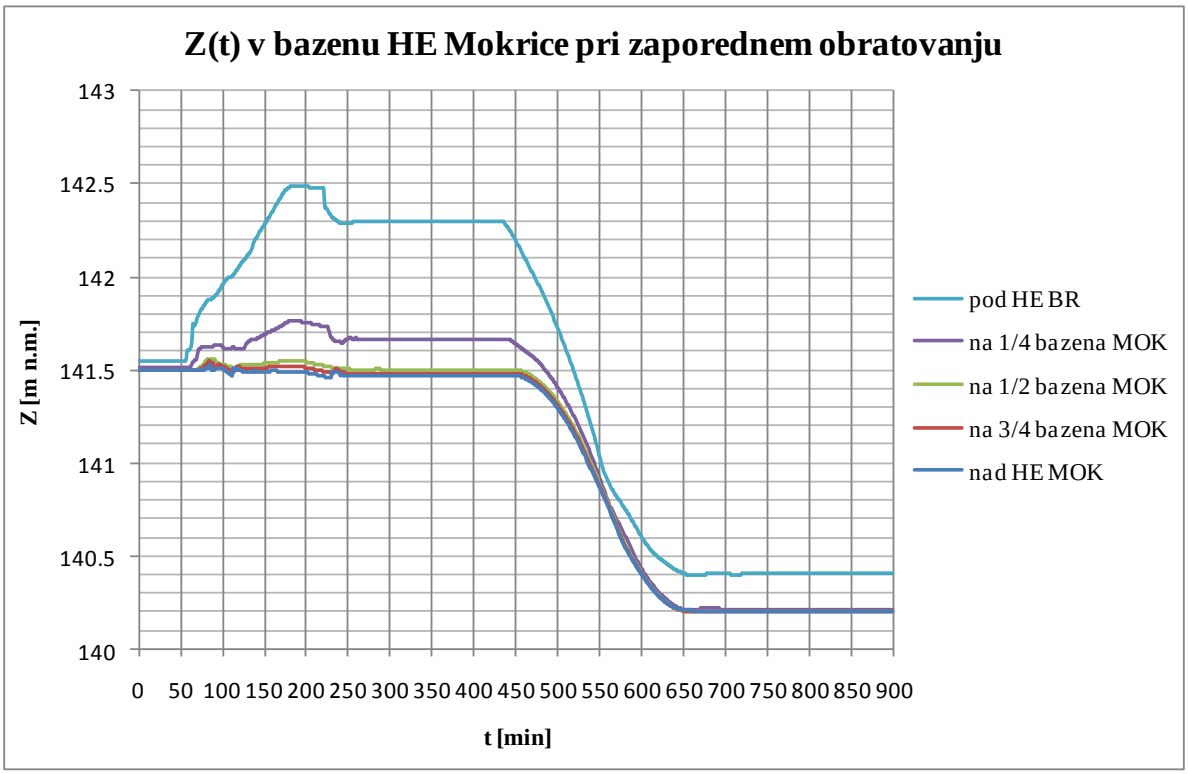
Ker začnemo obratovati v času, ko val iz HE Krško doseže HE Brežice, nam del vala odteče skozi zapornice. Ko turbinsko obratovanje izkoristi preostali koristni volumen gorvodnih HE, začnemo prazniti koristni volumen HE Brežice. Turbinski pretok začnemo zapirati tako zgodaj, da ob zmanjšanju turbinskega pretoka na naravni dotok ravno dosežemo minimalno obratovalno gladino, to je Z_{nom} – 1,1 m nad HE Brežice (151,90 m).



Slika 24: Hidrogrami v bazenu HE Brežice pri zaporednem obratovanju

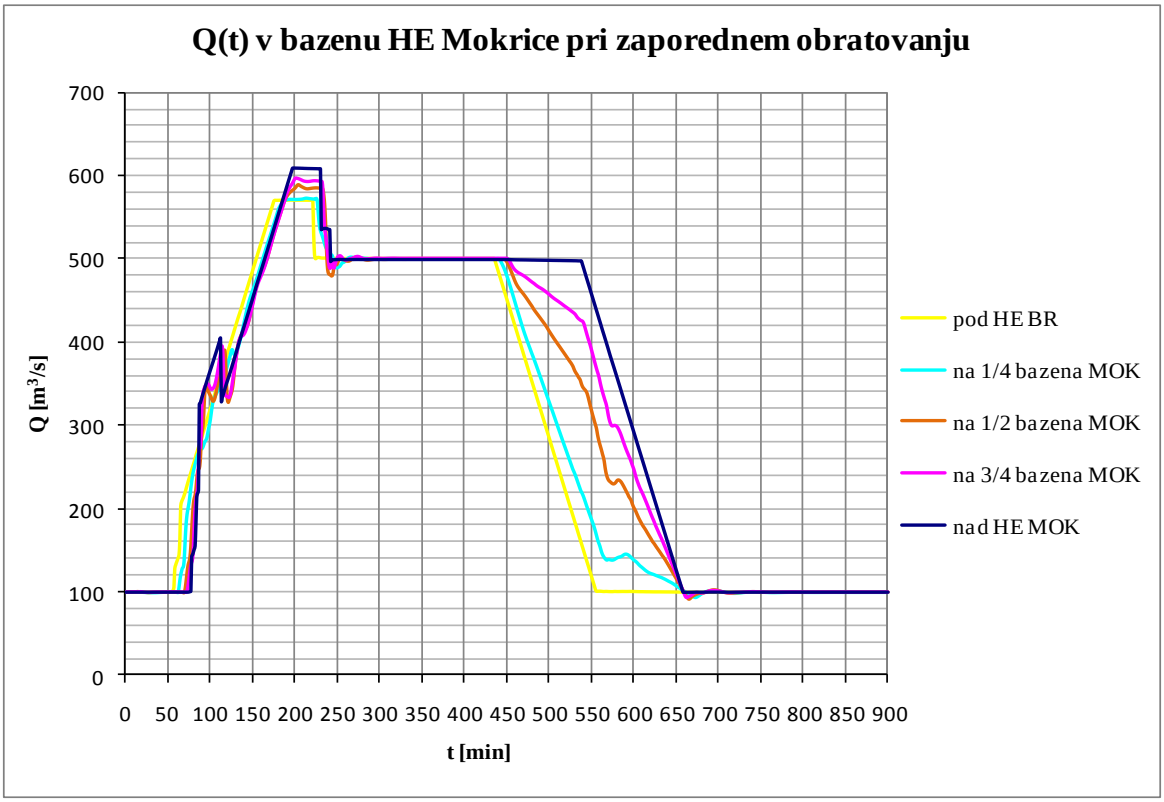
Oblika hidrogramov kaže prelivanje v začetnem delu obratovanja. Ko se višek vode prelije, hidrogram kaže spet samo turbinski pretok.

2. Akumulacijski bazen HE Mokrice



Slika 25: Nivogrami v bazenu HE Mokrice pri zaporednem obratovanju

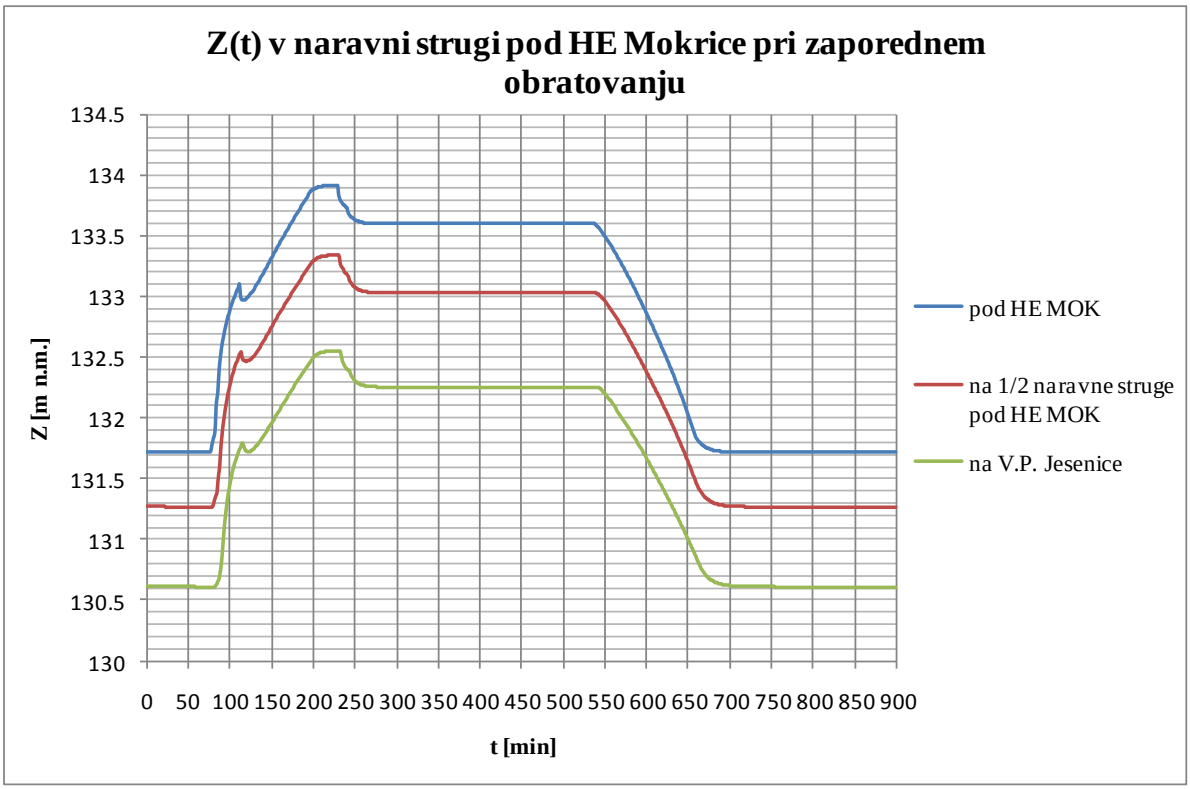
Gladina vode nad HE Mokrice se v začetku ne spreminja, ker vzdržujemo gladino vode na Z_{nom} s prelivanjem, pod HE Brežice pa narašča, saj voda izteka hkrati skozi zapornice in skozi turbine. Nato se ustali, ko neha prelivati. Ko za obratovanje porabimo ves preostali koristni volumen zgornjih HE, začnemo porabljati lastni volumen HE Mokrice, zaradi česar prične gladina upadati, in zapremo ravno pravi čas, da gladina ne upade pod minimalno obratovalno gladino, to je Z_{nom} – 1,3 m (140,2 m).



Slika 26: Hidrogrami v bazenu HE Mokrice pri zaporednem obratovanju

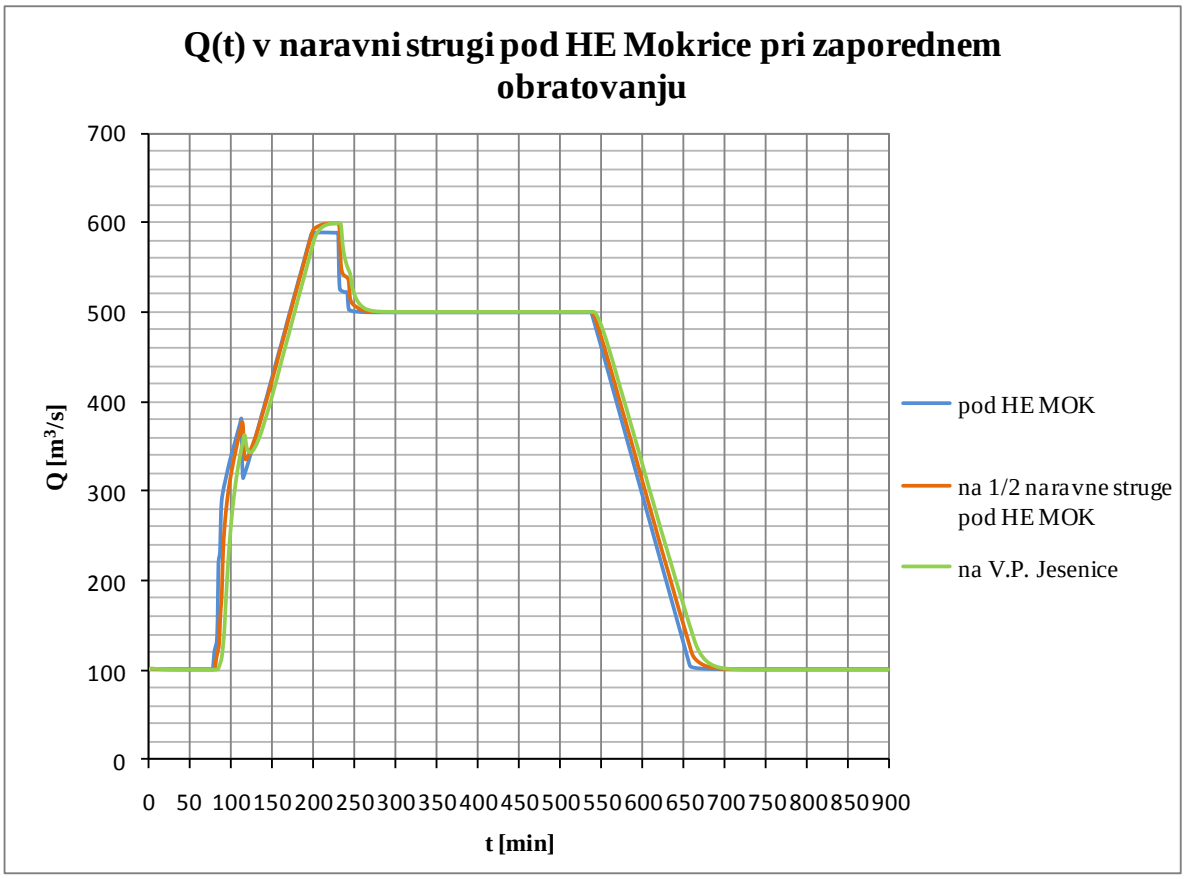
Zaradi prelivanja skozi zapornice in odpiranja turbinskega pretoka na HE Brežice se poveča pretok v bazenu HE Mokrice, ko začne prelivati preko zapornic HE Mokrice, pa ta še bolj naraste. Ko se prelivanje konča, se pretok ustali na maksimalnem turbinskem pretoku 500 m^3/s do časa, ko je potrebno začeti z zapiranjem turbinskega pretoka na vrednost naravnega dotoka.

3. Naravna struga pod HE Mokrice



Slika 27: Nivogrami v naravni strugi pod HE Mokrice pri zaporednem obratovanju

Gladina začne naraščati, ko HE Mokrice začne z obratovanjem. Ker začne prelivati skozi zapornice hkrati z naraščanjem turbinskega pretoka, gladina strmo naraste in se ustali, ko se prelivanje konča. Z začetkom zapiranja turbinskega pretoka s 500 m^3/s na 100 m^3/s gladina začne upadati in se nato spet ustali na vrednosti za osnovni pretok.



Slika 28: Hidrogrami v naravni strugi pod HE Mokrice pri zaporednem obratovanju

Pretok naraste zaradi prelivanja preko zapornic in odpiranja turbinskega pretoka na HE Mokrice in se ustali na 500 m^3/s, ko se prelivanje konča in teče le turbinski pretok do časa, ko je potrebno začeti z zapiranjem turbinskega pretoka na vrednost naravnega dotoka.

Iz rezultatov je razvidno, da ta način obratovanja ni smiselno iz dveh razlogov:

1. zaradi prelivanja vode z namenom vzdrževanja Z_{nom}, ki je izgubljena z vidika proizvodnje električne energije,
2. zaradi prehitrega naraščanja pretoka (prelivanje + turbinski pretok), kar povzroči prehitro spreminjanje gladine na določenih odsekih in to še bistveno bolj kot pri drugih načinih obratovanja.

Zaporedno obratovanje bi bilo smiselno v primeru, da bi se gladina pri obratovanju lahko dvignila nad Z_{nom}, kar pa pri spodnjesavskih HE ni dovoljeno.

5.3 Optimirano zaporedno obratovanje

Pri optimiranem zaporednem obratovanju odpiramo pretok skozi turbine ravno pravi trenutek, da ni potrebno prelivanje vode skozi zapornice in hkrati čim dlje držimo koto gladine na Z_{nom}.

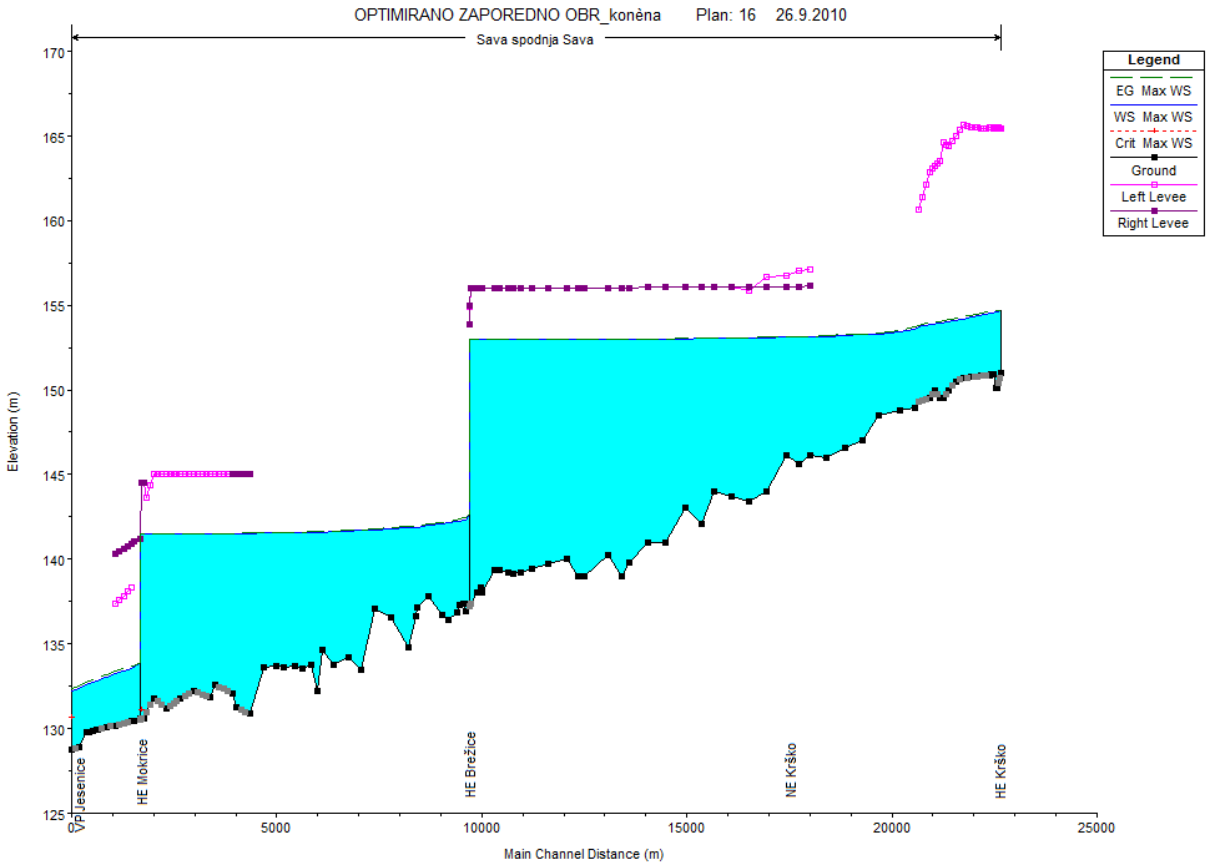
Preglednica 11: Čas, ko posamezna HE odpre in zapre pretok skozi turbine po začetku obratovanja HE Vrhovo

	Odpiranje pretoka [h]	Zapiranje pretoka [h]
HE Krško	0:18 - 2:18	3:44 - 5:44
HE Brežice	0:32 - 2:32	7:19 - 9:19
HE Mokrice	0:39 - 2:39	9:03 - 11:03

Določili smo tak čas začetka obratovanja HE Brežice in Mokrice, da prelivanje ni potrebno, gladina pa ostane čim bližje Z_{nom} in dopusten (največji možen) čas obratovanja z maksimalnim turbinskim pretokom, da gladina vode upade ravno do minimalne obratovalne gladine.

- HE Brežice
  Dopustni čas obratovanja je 8 ur in 47 min.
  Pretok skozi turbine odpremo 32 min kasneje kot HE Vrhovo in 14 min kasneje kot HE Krško.
  - Dopustni čas obratovanja z maksimalnim turbinskim pretokom je 4 ure in 47 min.
- HE Mokrice
  Dopustni čas obratovanja je 10 ur in 24 min.
  Pretok skozi turbine odpremo 39 min kasneje kot HE Vrhovo in 7 min kasneje kot HE Brežice.
  - Dopustni čas obratovanja z maksimalnim turbinskim pretokom je 6 ur in 24 min.

Na sliki 29 je prikazan potek maksimalne gladine vode in linija krone nasipov ob NE Krško, HE Brežice in HE Mokrice.



Slika 29: Podolžni profil z maksimalno gladino pri optimiranem zaporednem obratovanju in vrisanimi nasipi

Opazovali smo spreminjanje nivoja gladine v bazenih HE Brežice, HE Mokrice in v naravni strugi pod HE Mokrice do vodomerne postaje Jesenice na Dolenjskem v različnih časih po začetku obratovanja HE Krško.

Nivo gladine se najprej intenzivno spreminja v fazi odpiranja pretoka na vseh HE, nato pa spet v času po začetku zapiranja pretoka na HE Krško. Zato smo si za obe obdobji zrisali podolžne profile gladin v različnih časih. Za fazo odpiranja pretokov so časi prikaza gladin podani v preglednici 12, podolžni profili gladin pa na prilogi H, za fazo zapiranja pretokov pa v preglednici 13 in prilogi I.

Preglednica 12: Časovna preglednica odpiranja pretoka

t [h]	HE Krško	HE Brežice	HE Mokrice
0:18	začetek odpiranja turbinskega pretoka	naravni dotok, 100 m^3/s	naravni dotok, 100 m^3/s
0:32	odpiranje turbinskega pretoka 14 min	začetek odpiranja turbinskega pretoka	naravni dotok, 100 m^3/s
0:39	odpiranje turbinskega pretoka 21 min	odpiranje turbinskega pretoka 7 min	začetek odpiranja turbinskega pretoka
2:18	konec odpiranja turbinskega pretoka, 500 m^3/s	odpiranje turbinskega pretoka 1 uro in 46 min	odpiranje turbinskega pretoka 1 uro in 39 min
2:32	maksimalni turbinski pretok 14 min	konec odpiranja turbinskega pretoka, 500 m^3/s	odpiranje turbinskega pretoka 1 uro in 53
2:39	maksimalni turbinski pretok 21 min	maksimalni turbinski pretok 7 min	konec odpiranja turbinskega pretoka, 500 m^3/s

Ugotovili smo, da se nad obema HE ustvarijo negativni protitočni valovi, pod obema HE pa pozitivni sotočni valovi. Hitrost dviga oziroma spusta gladine zaradi valovanja je razvidna v preglednici 14.

Preglednica 13: Časovna preglednica zapiranja pretoka

t [h]	HE Krško	HE Brežice	HE Mokrice
3:44	začetek zapiranja turbinskega pretoka	maksimalni turbinski pretok 1 uro in 12 min	maksimalni turbinski pretok 1 uro in 5 min
4:20	zapiranje turbinskega pretoka 36 min	maksimalni turbinski pretok 1 uro in 48 min, začetek upadanja gladine	maksimalni turbinski pretok 1 uro in 41 min
5:44	konec zapiranja turbinskega pretoka, 100 m^3/s	maksimalni turbinski pretok 3 ure in 12 min	maksimalni turbinski pretok 3 ure in 5 min
7:19	naravni dotok, 100 m^3/s	začetek zapiranja turbinskega pretoka	maksimalni turbinski pretok 4 ure in 40 min
9:03	naravni dotok, 100 m^3/s	zapiranje turbinskega pretoka 1 uro in 44 min	začetek zapiranja turbinskega pretoka
9:19	naravni dotok, 100 m^3/s	konec zapiranja turbinskega pretoka, 100 m^3/s	zapiranje turbinskega pretoka 16 min
11:03	naravni dotok, 100 m^3/s	naravni dotok, 100 m^3/s	konec zapiranja turbinskega pretoka, 100 m^3/s

Ugotovili smo, da se nad obema HE ustvarijo pozitivni protitočni valovi, pod obema HE pa negativni sotočni valovi. Hitrost dviga oziroma spusta gladine zaradi valovanja je razvidna v preglednici 15.

Preverili smo hitrost spremembe gladine v akumulacijskem bazenu HE Brežice in v akumulacijskem bazenu HE Mokrice na petih lokacijah v bazenu: tik pod gorvodno HE, na ¼ bazena, na ½ bazena, na ¾ bazena in nad obravnavano HE. Pod HE Mokrice v naravni strugi do vodomerne postaje Jesenice na Dolenjskem smo preverili hitrost spremembe gladine na treh lokacijah: pod HE Mokrice, na ½ naravne struge in v profilu vodomerne postaje.

Največja hitrost spreminjanja nivoja gladine na posameznih lokacijah za obe fazi intenzivnejšega spreminjanja nivoja je podana v preglednici 14 in 15.

Preglednica 14: Maksimalna hitrost spreminjanja gladine pri odpiranju pretoka skozi turbine (optimirano zaporedno obratovanje)

		dZ/dt [m/h]
HE BREŽICE	pod HE Krško (KK)	**0,726**
	na 1/4 bazena BR	**0,500**
	na 1/2 bazena BR	**0,248**
	na 3/4 bazena BR	**0,000**
	nad HE BR	**0,000**
HE MOKRICE	pod HE Brežice (BR)	**0,380**
	na 1/4 bazena MOK	**0,071**
	na 1/2 bazena MOK	**0,032**
	na 3/4 bazena MOK	**0,000**
	nad HE MOK	**0,000**
pod HE MOKRICE	pod HE Mokrice (MOK)	**0,907**
	na 1/2 naravne struge pod HE MOK	**0,864**
	na V.P. Jesenice	**0,822**

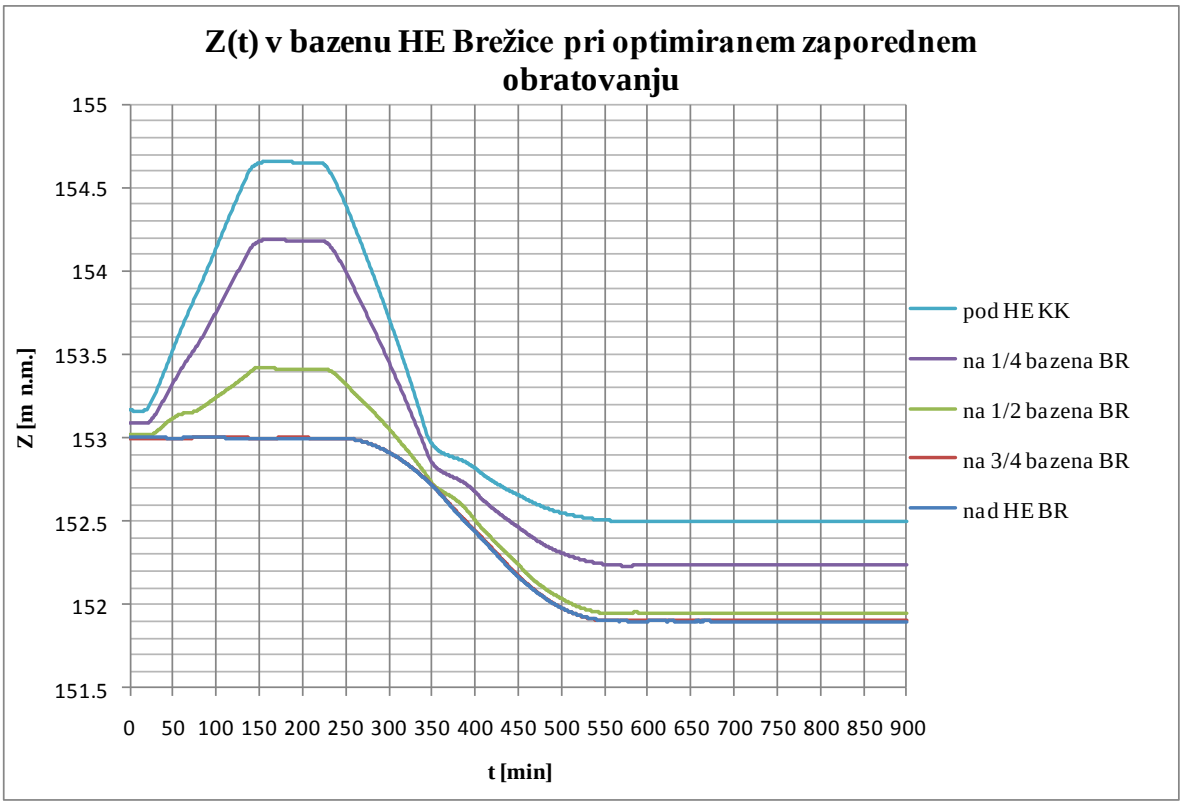
Preglednica 15: Hitrost spreminjanja gladine po začetku zapiranja pretoka na HE Krško (optimirano zaporedno obratovanje)

		dZ/dt [m/h]
HE BREŽICE	pod HE Krško (KK)	**-0,838**
	na 1/4 bazena BR	**-0,685**
	na 1/2 bazena BR	**-0,323**
	na 3/4 bazena BR	**-0,318**
	nad HE BR	**-0,308**
HE MOKRICE	pod HE Brežice (BR)	**-0,742**
	na 1/4 bazena MOK	**-0,684**
	na 1/2 bazena MOK	**-0,618**
	na 3/4 bazena MOK	**-0,620**
	nad HE MOK	**-0,622**
pod HE MOKRICE	pod HE Mokrice (MOK)	**-0,878**
	na 1/2 naravne struge pod HE MOK	**-0,807**
	na V.P. Jesenice	**-0,732**

Pri odpiranju in zapiranju pretoka skozi turbine je hitrost spremembe gladine v bazenih HE Brežice in HE Mokrice v dopustnih mejah. Pod HE Mokrice pa preseže dopustno vrednost, kar pomeni, da bi morali izvesti določene ukrepe za zavarovanje dolvodne struge, ki smo jih predlagali tudi pri prejšnjih primerih.

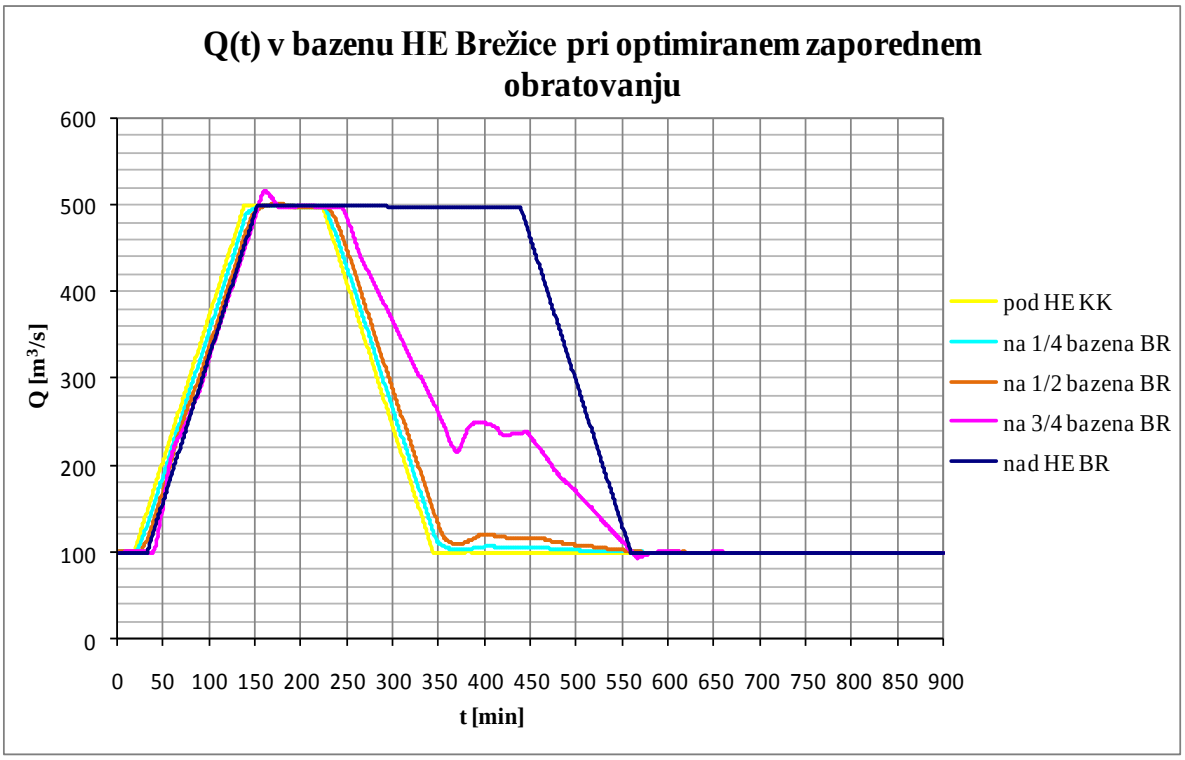
Preverili smo potek gladine in pretoka s časom v bazenu HE Brežice in v bazenu HE Mokrice na petih lokacijah v bazenu: tik pod gorvodno HE, na ¼ bazena, na ½ bazena, na ¾ bazena in nad obravnavano HE. Pod HE Mokrice smo preverili gladino do vodomerne postaje Jesenice na Dolenjskem na treh lokacijah: pod HE Mokrice, na ½ naravne struge in v profilu vodomerne postaje. Zrisali smo nivograme in hidrograme.

1. Akumulacijski bazen HE Brežice



Slika 30: Nivogrami v bazenu HE Brežice pri optimiranem zaporednem obratovanju

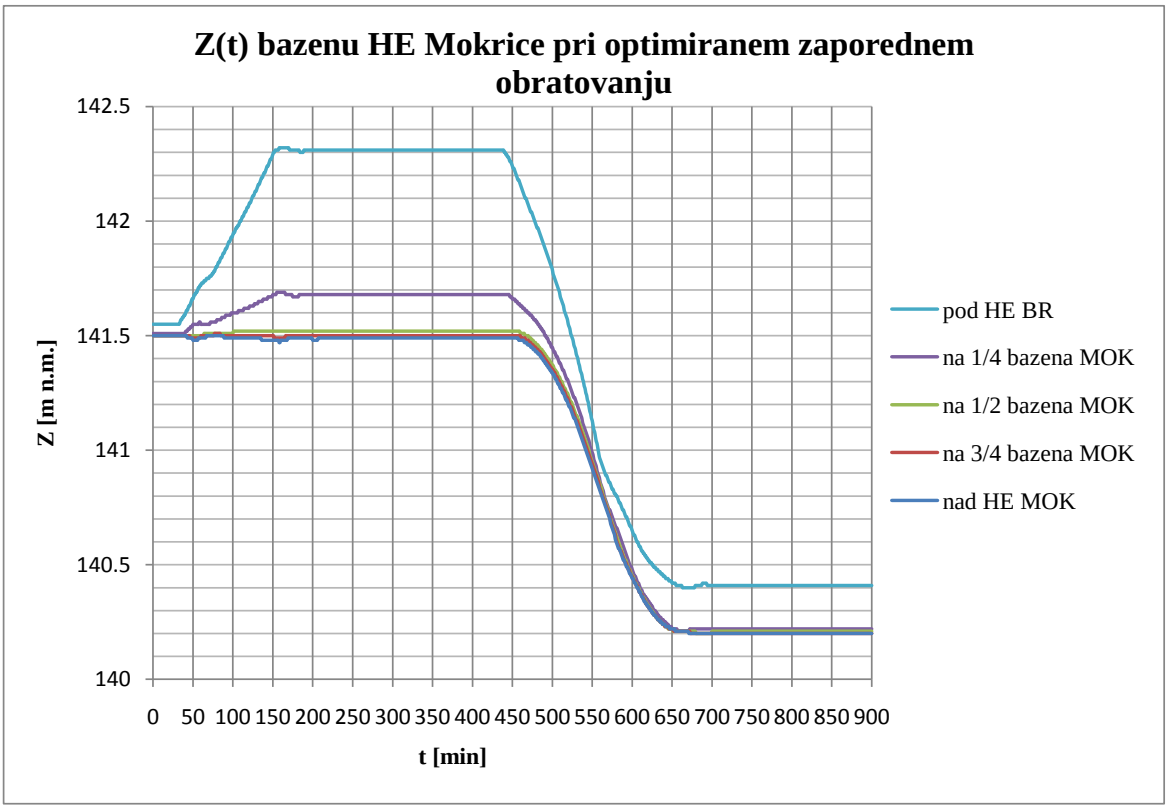
Pod HE Krško začne gladina naraščati, nad HE Brežice pa ostaja gladina blizu nominalne gladine 153 m n.m ves čas dotoka obratovalnega vala z gorvodnih HE. Ko izrabimo celoten koristni volumen tega obratovalnega vala, začnemo koristiti lastni koristni volumen akumulacije. Pretok skozi turbine začnemo zapirati pravočasno, da nam gladina ne upade pod minimalno obratovalno gladino, to je Z_{nom} – 1,1 m (150,9 m).



Slika 31: Hidrogrami v bazenu HE Brežice pri optimiranem zaporednem obratovanju

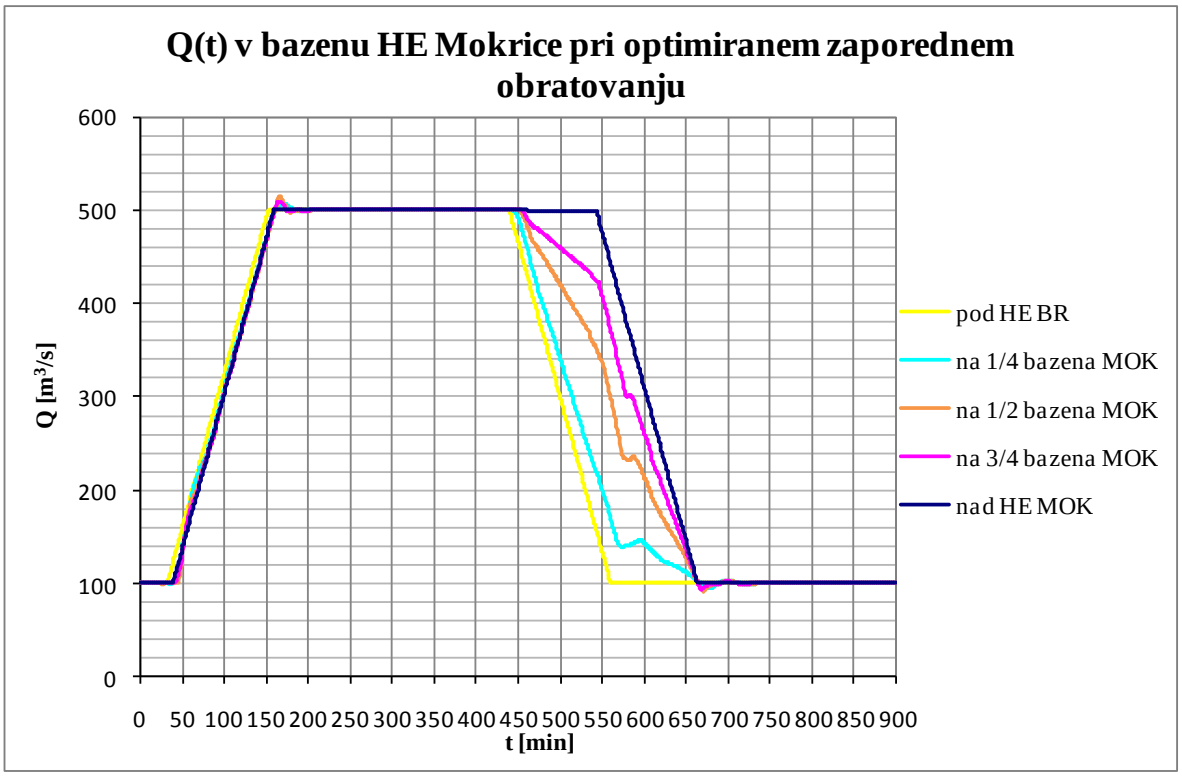
HE Brežice koristi pri obratovanju koristni volumen gorvodnih HE in lastni koristni volumen, zato je trajanje maksimalnega turbinskega pretoka toliko daljše.

2. Akumulacijski bazen HE Mokrice



Slika 32: Nivogrami v bazenu HE Mokrice pri optimiranem zaporednem obratovanju

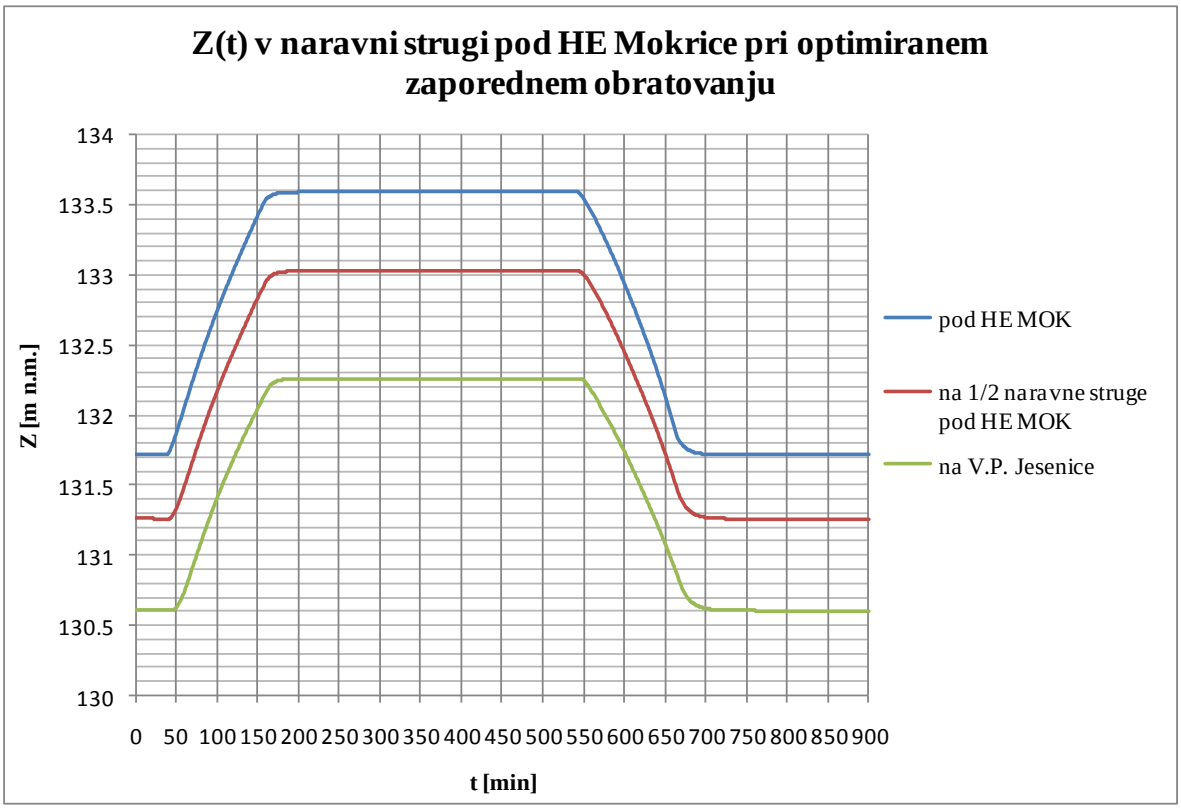
Gladina pod HE Brežice začne naraščati, ko HE Brežice začne z obratovanjem. Nad HE Mokrice gladina ostaja približno na nominalni koti (141,5 m n.m.), dokler ni porabljen volumen vala iz gorvodnih HE, ko pa začnemo koristiti lastni koristni volumen, začne gladina v akumulaciji upadati. Pretok skozi turbine začnemo zapirati ravno v pravem času, da gladina nad HE ne upade pod Z_{nom} – 1,3 m (140,2 m), izkoristimo pa celotni koristni volumen.



Slika 33: Hidrogrami v bazenu HE Mokrice pri optimiranem zaporednem obratovanju

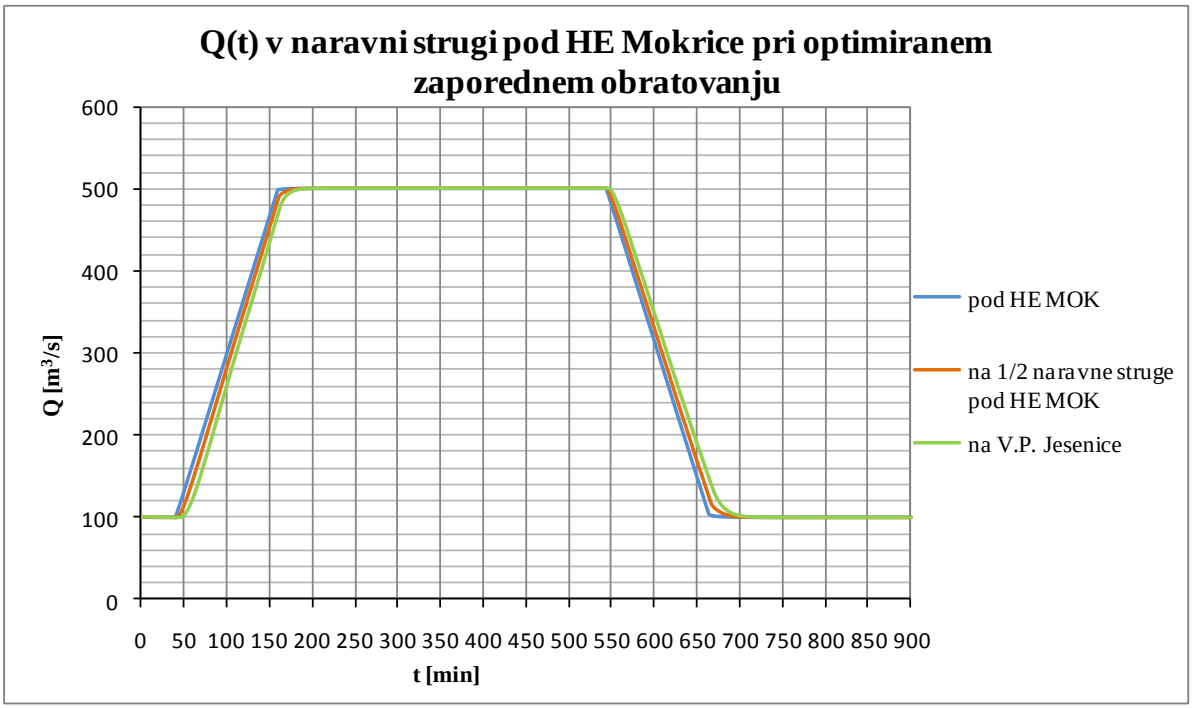
Obratovanje HE Mokrice z maksimalnim turbinskim pretokom je daljše kot na HE Brežice, saj porablja ves koristni volumen gorvodnih HE in lastni koristni volumen.

3. Naravna struga pod HE Mokrice



Slika 34: Nivogrami v naravni strugi pod HE Mokrice pri optimiranem zaporednem obratovanju

Ko HE Mokrice prične z obratovanjem, začne gladina pod HE Mokrice naraščati, v času maksimalnega turbinskega pretoka drži konstantno maksimalno gladino, nato pa z zapiranjem pretoka spet upade na gladino pri privzetem naravnem dotoku.



Slika 35: Hidrogrami v naravni strugi pod HE Mokrice pri optimiranem zaporednem obratovanju

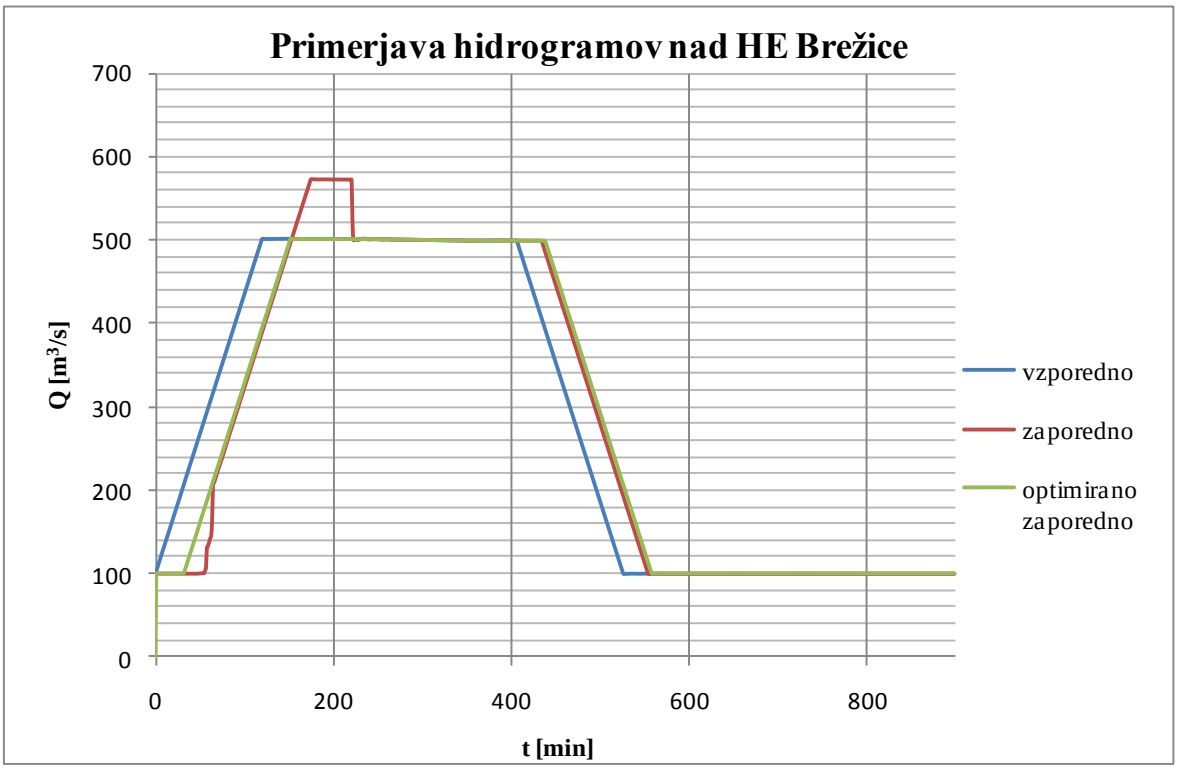
Sprememba pretoka v naravni strugi je enaka hidrogramu iztoka iz HE Mokrice.

6 PRIMERJAVA MED OBRATOVANJI

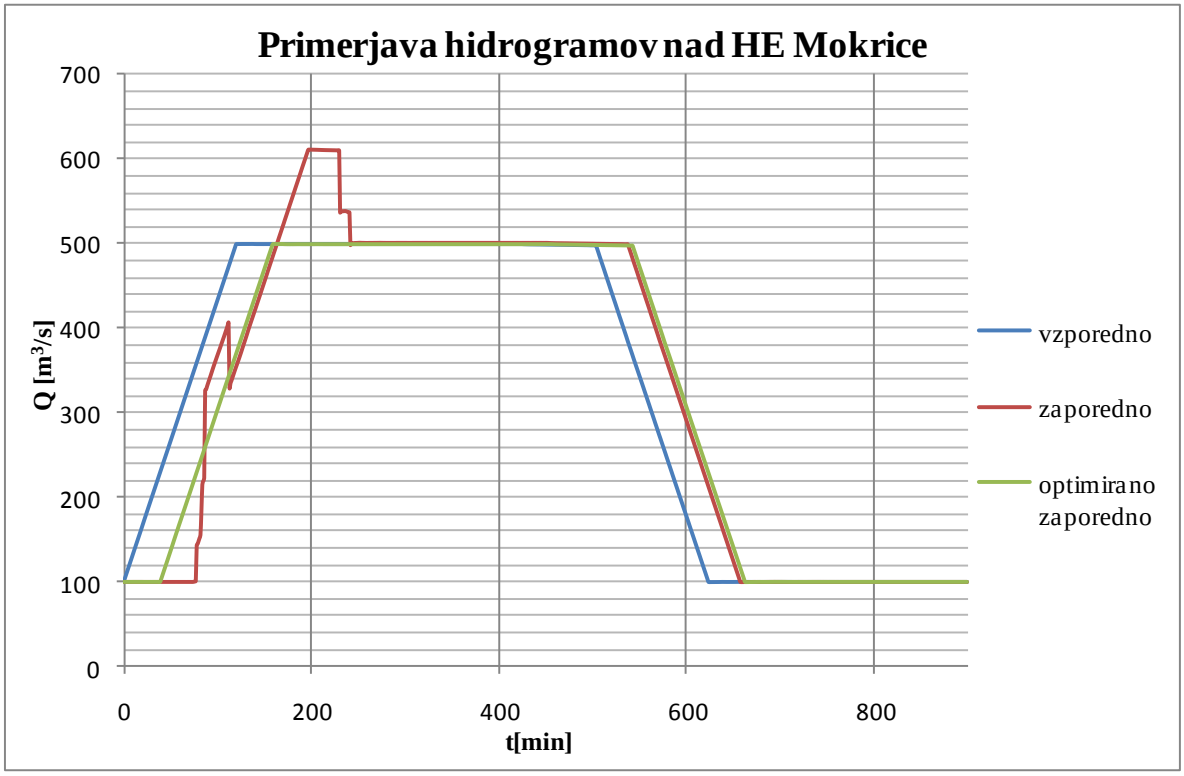
Če primerjamo najvažnejši parameter s stališča proizvodnje energije, to je največji možni čas obratovanja pri maksimalnem turbinskem pretoku na posamezni HE, imamo pri različnih načinih obratovanja naslednje vrednosti:

- VZPOREDNO OBRATOVANJE
  - HE Brežice: 4 ure 47 min
  - HE Mokrice: 6 ur 24 min
- ZAPOREDNO OBRATOVANJE
  - HE Brežice: 4 ure 20 min
  - HE Mokrice: 5 ur 41 min
- OPTIMIRANO ZAPOREDNO OBRATOVANJE
  - HE Brežice: 4 ure 47 min
  - HE Mokrice: 6 ur 24 min

Primerjamo hidrograme nad posamezno HE pri različnih načinih obratovanja (sliki 36 in 37):



Slika 36: Primerjava hidrogramov nad HE Brežice pri vzporednem, zaporednem in optimiranem zaporednem načinu obratovanja



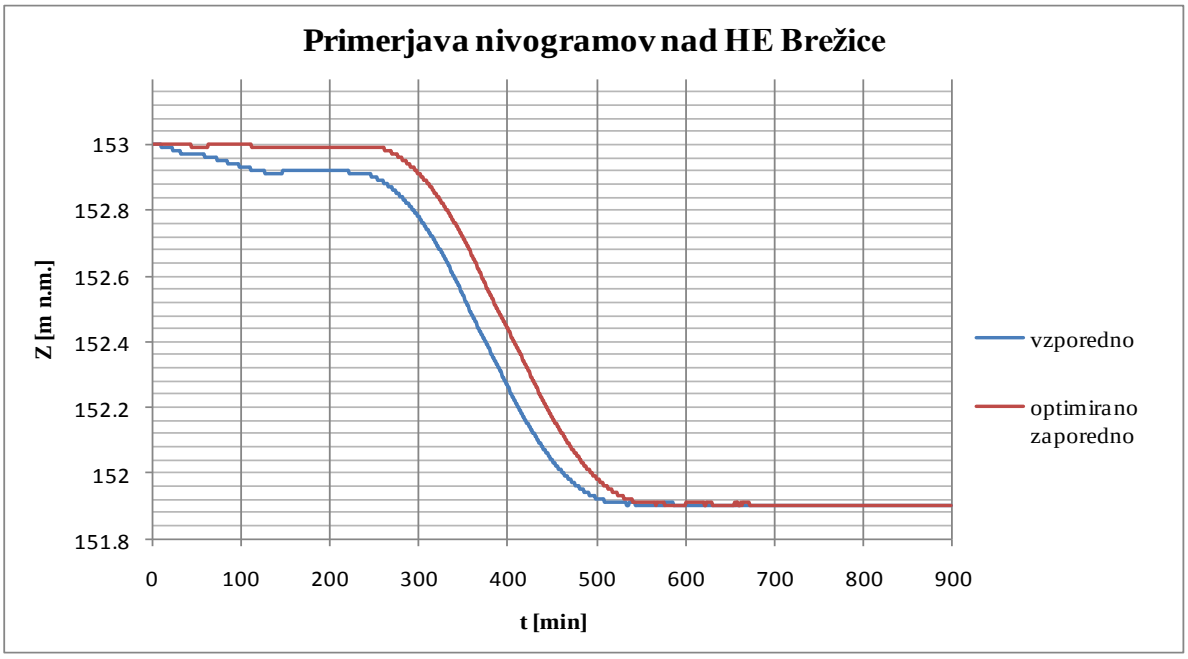
Slika 37: Primerjava hidrogramov nad HE Mokrice pri vzporednem, zaporednem in optimiranem zaporednem načinu obratovanja

Vidimo, da lahko pri vzporednem obratovanju in optimiranem zaporednem obratovanju obratujemo z maksimalnim pretokom (500 m^3/s skozi turbine) enako dolgo.

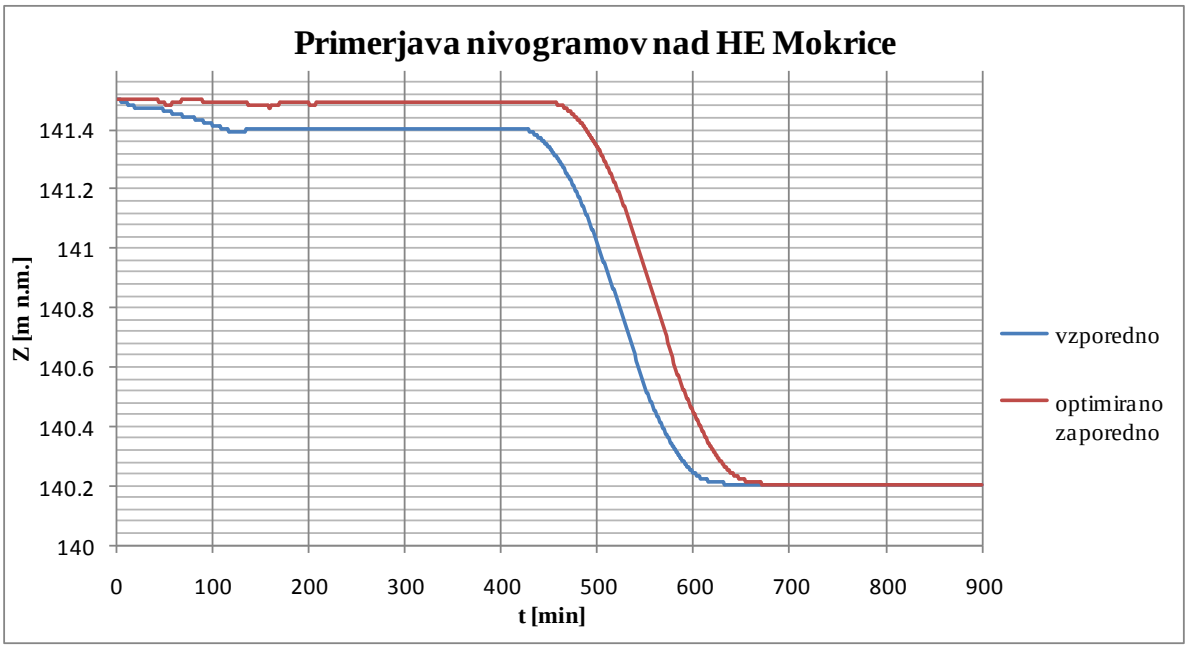
Čas maksimalnega obratovanja je pri zaporednem načinu obratovanja krajši kot pri ostalih dveh, saj del koristnega volumna izgubimo skozi zapornice in s tem zmanjšamo proizvodnjo električne energije. Iz oblike hidrograma pri zaporednem obratovanju je v delu, kjer skupni pretok narašča hitreje kot turbinski pretok in je tudi večji od njega, razvidno prelivanje skozi zapornice zaradi vzdrževanja gladine na Z_{nom}.

Vendar gornja trditev ne pomeni, da pri vzporednem in optimiranem zaporednem obratovanju proizvedemo tudi enako količino energije. Le ta je odvisna tudi od nivoja vode v akumulaciji oz. od višinske razlike zgornje in spodnje vode na HE.

Ker je spodnja voda pri istih pretokih enaka, je razlika pri obeh primerih samo še v nivoju zgornje vode. Le to uspemo dlje časa vzdrževati na višjih kotah pri optimiranem zaporednem obratovanju, kar je razvidno iz primerjave nivogramov nad posamezno HE pri obeh načinih obratovanja (sliki 38 in 39).



Slika 38: Primerjava nivogramov nad HE Brežice pri vzporednem in optimiranem zaporednem načinu obratovanja



Slika 39: Primerjava nivogramov nad HE Mokrice pri vzporednem in optimiranem zaporednem načinu obratovanja

7 ZAKLJUČKI

- Čeprav HEC-RAS ni prirejen za račun obratovalnih valov hidroelektrarn (nima opcije za upoštevanje spremenljivega turbinskega pretoka), smo kljub temu na poseben način uredili turbinski pretok (kot stranski odtok tik nad HE in stranski dotok tik pod HE) in podali takšne interne in robne pogoje, da smo uspešno izračunali obratovanje delne verige spodnjesavskih hidroelektrarn.

- S primerjavo med različnimi načini obratovanja smo ugotovili, da je najprimernejši način optimirano zaporedno obratovanje, saj s tem načinom izkoristimo ves koristni volumen in imamo gladino na nominalni koti dalj časa in s tem proizvedemo večjo količino energije. Pri vzporednem načinu tudi izkoristimo ves koristni volumen, malo pa izgubimo pri proizvodnji energije zaradi takojšnje porabe dela lastnega koristnega volumna v času, preden obratovalni val iz gorvodnih HE doseže obravnavano HE in zato obratujemo pri nekoliko nižjih nivojih gladine zgornje vode. Zaporedni način obratovanja je najmanj primeren, saj s prelivanjem zaradi vzdrževanja gladine na Z_{nom} izgubimo velik del koristnega volumna.

- Hitrost spremembe gladine je v akumulacijskih bazenih HE Brežice in HE Mokrice v dopustnih mejah, manjša od 1 m/h, pri vseh načinih obratovanja. Pod HE Mokrice v naravni strugi pa ta preseže dopustno mejo pri vseh načinih obratovanja, saj je večja od 0,5 m/h, ki je dopustna za naravno strugo. Preseganje je največje pri zaporednem načinu obratovanja.

- Na podlagi rezultatov hitrosti spremembe gladine ugotovimo, da je hitrost odpiranja in zapiranja pretoka skozi turbine v primeru HE Mokrice še vedno prevelika, še posebej v primeru prelivanja skozi zapornice. Hitrost spremembe pretoka bi torej morala biti manjša ali pa bi morali utrditi brežine struge dolvodno od HE Mokrice.

- Konični način obratovanja HE Mokrice bi bil mogoč le v primeru, če bi bila zgrajena HE Podsused na Hrvaškem. HE Mokrice je sicer namenjena izravnavi na naravni pretok v mejnem profilu.

- Pri dejanskem obratovanju morajo HE pri vstopnem naravnem pretoku 100 m^3/s obratovati po tem pretoku brez praznjenja bazenov, saj ko enkrat znižajo gladino na minimalno obratovalno gladino, jih ne morejo več napolniti. Edini razlog praznjenja bazenov bi bilo zagotavljanje vode za NEK. Kljub temu smo v nalogi računali z obratovanjem na račun praznjenja koristnih volumnov že pri 100 m^3/s, saj smo želeli preveriti hitrost spreminjanja gladine pri največji možni spremembi turbinskega pretoka. Sicer pa bi bil tak način obratovanja smiseln le, če bi v kratkem času pričakovali porast pretoka zaradi večjih padavin.

- V nalogi proizvodnja energije ni izračunana. Za določanje najprimernejšega načina obratovanja smo povzeli kot najpomembnejši faktor pri proizvodnji energije največji možni čas obratovanja pri maksimalnem pretoku in čim daljšem vzdrževanju gladine blizu Z_{nom}. Ker pa ima pri načinu obratovanja veliko vlogo trg električne energije, bi morali za realnejšo sliko upoštevati tudi ceno električne energije. Pri določanju stopnje obratovanja je najvažnejši parameter največji prihodek od prodaje električne energije. Vendar to ni bila več vsebina te diplomske naloge.

LITERATURA

Brunner, G. W. 2010. HEC – RAS River Analysis System, User's Manual, version 4.1. CA, Davis, US Army, Corps of Engineers, 790 str.

Brunner, G. W. 2010. HEC – RAS River Analysis System, Reference Manual, version 4.1. CA, Davis, US Army, Corps of Engineers, 417 str.

Četina, M., Zakrajšek, M. 2006. Določitev ukrepov ob prehodu poplavnih valov, račun obratovalnih valov in opredelitev načina obratovanja v verigi – HE Krško.. Študija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Laboratorij za mehaniko tekočin: 32 str.

Četina, M., Rajar, R., Širca, A., Zakrajšek, M. 2001 Optimizacija obratovanja HE na Savi – I. faza. Študija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Laboratorij za mehaniko tekočin: 29 str.

Četina, M., Zakrajšek, M., Žagar, D., Brecelj, M., Širca, A. 2001. Optimizacija obratovnaja na Savi – II. faza. Študija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Laboratorij za mehaniko tekočin: 35 str.

Holding Slovenske elektrarne d.o.o. 2007. HE BREŽICE, Idejne rešitve. Ljubljana, IBE d.d. in FGG: 41 str.

Hydrologic Engineering Center River Analysis System (HEC-RAS) web site: http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras (10. 10. 2010)

Lukavečki, B. 2010. Analiza reke Save s programom HEC-RAS na odseku od HE Vrhovo do Sevnice. Diplomsko delo. Maribor, Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo: 65 str.

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

Rajar, R., Verbovšek, V. 1974. Izvještaj o računu valova u kompenzacionom bazenu HE Buk Bijela. Študija. Ljubljana, Vodogradbeni laboratorij: 13 str.

Rajar, R., Zakrajšek, M., Četina, M. 1984. Matematični model mejne in notranje Mure – končno (odseka A in B: od Spielfelda do Murskega Središča). Študija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Laboratorij za mehaniko tekočin: 34 str.

Rajar, R., Četina, M., Zakrajšek, M. 1985. Matematični model Save, odsek D – končno stanje. Študija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo Laboratorij za mehaniko tekočin: 39 str.

Šetina, B., Ciuha, D. 1983. Povratni val SD – 2. Kratek izvleček iz poročil zvezkov 2 do **7** (vse o povratnem valu). Ljubljana, Vodogradbeni laboratorij: 23 str.

Taškov, C. 2001. Primerjava programov za račun obratovalnih valov v prizmatičnih trapeznih kanalih. Diplomsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 41 str.

Verbovšek, V. 1975. Analiza nestacionarnog tečenja u kanalu 'Lusnić – Plovuća'. Študija. Ljubljana, Vodogradbeni laboratorij: 25 str.

Verbovšek, V., Rajar, R. 1972. Application of the pressure relief valve, of the type Zlatoličje, in the hydroelectric plant Ohau. Študija. Ljubljana, Vodogradbeni laboratorij: 8 str.

Warner, J. C., Brunner, G. W., Wolfe, B. C., Piper, S. S. 2010. HEC – RAS River Analysis System, Applications Guide, version 4.1. CA, Davis, US Army, Corps of Engineers, 351 str.

PRILOGE

Priloga A: Pretočna krivulja na V.P. Jesenice na Dolenjskem

Priloga B: Merjeni prečni profili v akumulacijskem bazenu HE Brežice

Priloga C: Merjeni prečni profili v akumulacijskem bazenu HE Mokrice

Priloga D: Podolžni profili gladin pri vzporednem odpiranju pretoka skozi turbine v različnih časih po začetku obratovanja HE Krško

Priloga E: Podolžni profili gladin pri zaporednem odpiranju pretoka skozi turbine v različnih časih po začetku obratovanja HE Krško

Priloga F: Podolžni profili gladin pri optimiranem zaporednem odpiranju pretoka skozi turbine v različnih časih po začetku obratovanja HE Krško

Priloga G: Podolžni profili gladin pri vzporednem zapiranju pretoka skozi turbine v različnih časih po začetku obratovanja HE Krško

Priloga H: Podolžni profili gladin pri zaporednem zapiranju pretoka skozi turbine v različnih časih po začetku obratovanja HE Krško

Priloga I: Podolžni profili gladin pri optimiranem zaporednem zapiranju pretoka skozi turbine v različnih časih po začetku obratovanja HE Krško

Priloga A: Pretočna krivulja na V.P. Jesenice na Dolenjskem

MOP ARSO 11-APR-08 *program PK*

P R E T O Č N A K R I V U L J A
H (cm) / Q (m3/s)

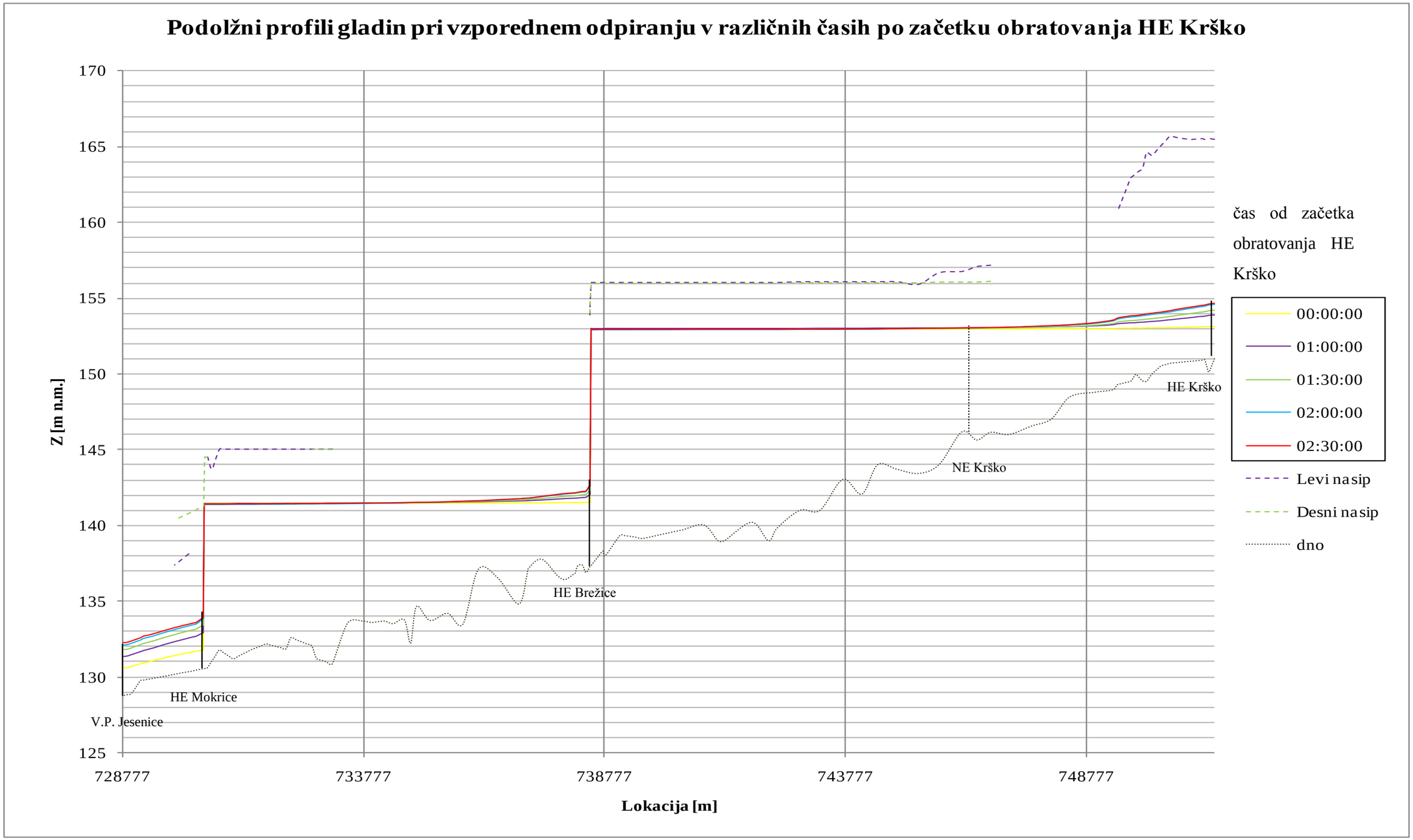
Vodotok : SAVA
Postaja : JESENICE NA DOLENJSKEM
Šifra : 3900
Številka kr. : 5

Veljavnost od	Veljavnost do
4.01.2006	30.05.2006
1.09.2006	31.12.2007

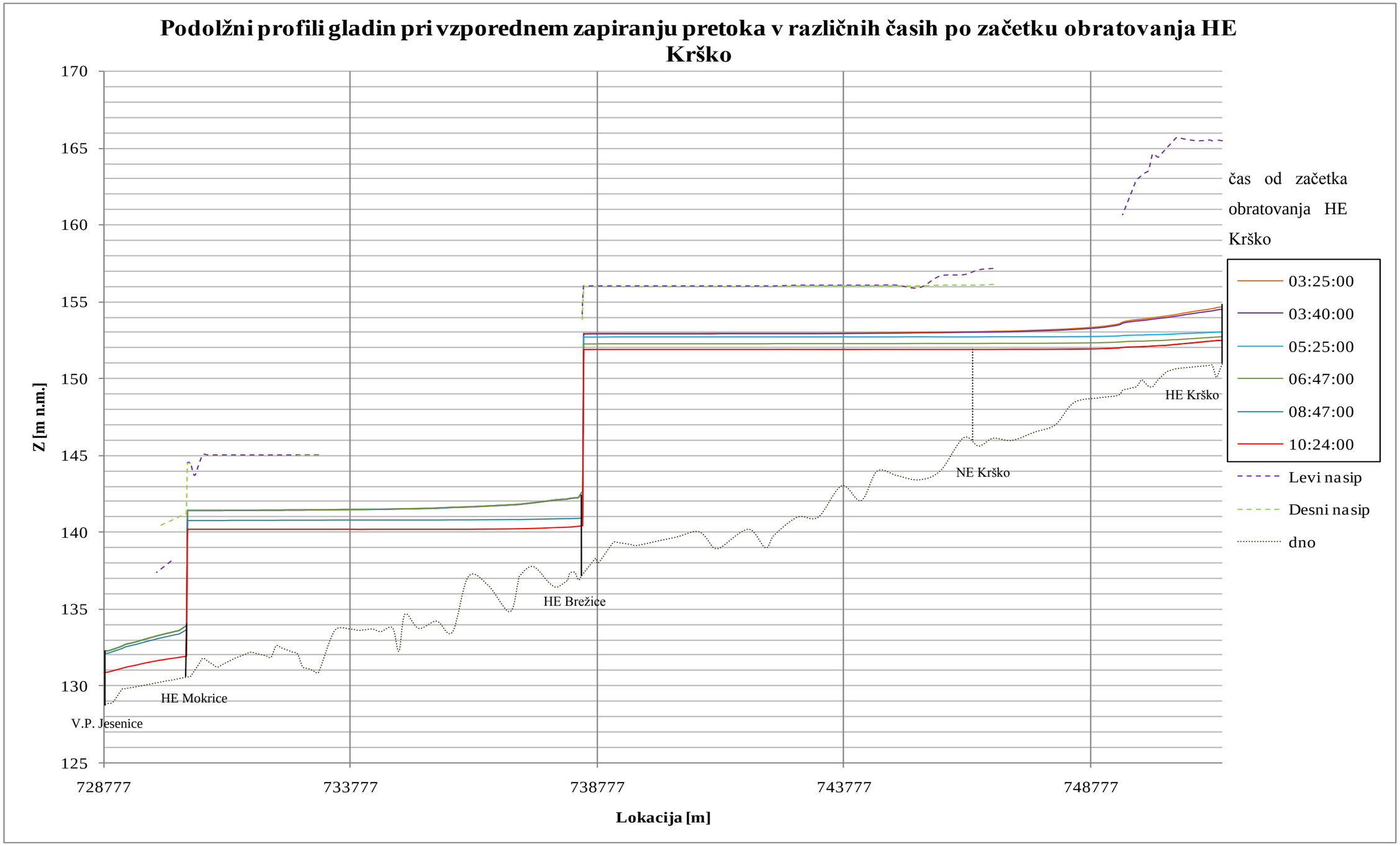
H	+000	+001	+002	+003	+004	+005	+006	+007	+008	+009
70	45.9	46.7	47.5	48.3	49.2	50.0	50.9	51.7	52.6	53.6
80	54.5	55.4	56.4	57.3	58.3	59.3	60.3	61.3	62.4	63.4
90	64.5	65.6	66.7	67.8	69.0	70.1	71.3	72.4	73.6	74.9
100	76.1	77.3	78.6	79.9	81.2	82.5	83.8	85.1	86.5	87.9
110	89.3	90.7	92.1	93.5	95.0	96.5	98.0	99.5	101	103
120	104	106	107	109	111	112	114	116	117	119
130	121	122	124	126	128	130	131	133	135	137
140	139	141	143	145	147	149	151	153	155	157
150	159	161	163	165	167	169	171	173	175	177
160	179	181	183	185	187	190	192	194	196	198
170	200	202	205	207	209	211	213	216	218	220
180	222	225	227	229	232	234	236	239	241	243
190	246	248	250	253	255	257	260	262	265	267
200	269	272	274	277	279	282	284	287	289	292
210	294	297	299	302	304	307	310	312	315	317
220	320	323	325	328	331	333	336	339	341	344
230	347	349	352	355	358	360	363	366	369	371
240	374	377	380	383	385	388	391	394	397	400
250	403	405	408	411	414	417	420	423	426	429
260	432	435	438	441	444	447	450	453	456	459
270	462	465	468	471	474	478	481	484	487	490
280	493	496	500	503	506	509	512	516	519	522
290	525	529	532	535	538	542	545	548	552	555
300	558	562	565	568	572	575	579	582	585	589
310	592	596	599	603	606	609	613	616	620	623
320	627	631	634	638	641	645	648	652	656	659
330	663	666	670	674	677	681	685	688	692	696
340	699	703	707	711	714	718	722	726	729	733
350	737	741	745	748	752	756	760	764	768	772
360	775	779	783	787	791	795	799	803	807	811
370	815	819	823	827	831	835	839	843	847	851
380	855	859	864	868	872	876	880	884	888	892
390	897	901	905	909	913	918	922	926	930	935
400	939	943	947	952	956	960	965	969	973	978
410	982	986	991	995	1000	1004	1008	1013	1017	1022
420	1026	1031	1035	1040	1044	1049	1053	1058	1062	1067
430	1071	1076	1081	1085	1090	1094	1099	1104	1108	1113
440	1117	1122	1127	1131	1136	1141	1146	1150	1155	1160
450	1164	1169	1174	1179	1184	1188	1193	1198	1203	1208
460	1212	1217	1222	1227	1232	1237	1242	1247	1252	1256
470	1261	1266	1271	1276	1281	1286	1291	1296	1301	1306
480	1311	1316	1321	1326	1332	1337	1342	1347	1352	1357
490	1362	1367	1372	1378	1383	1388	1393	1398	1404	1409
500	1414	1419	1424	1430	1435	1440	1446	1451	1456	1461
510	1465	1471	1476	1481	1486	1491	1496	1502	1507	1512
520	1517	1522	1528	1533	1538	1543	1548	1554	1559	1564

530	1569	1575	1580	1585	1591	1596	1601	1607	1612	1617
540	1623	1628	1633	1639	1644	1650	1655	1660	1666	1671
550	1677	1682	1688	1693	1699	1704	1710	1715	1721	1726
560	1732	1737	1743	1748	1754	1760	1765	1771	1776	1782
570	1788	1793	1799	1805	1810	1816	1822	1828	1833	1839
580	1845	1851	1856	1862	1868	1874	1880	1886	1891	1897
590	1903	1909	1915	1921	1927	1933	1939	1945	1951	1957
600	1963	1969	1975	1981	1987	1993	1999	2005	2012	2018
610	2024	2030	2036	2043	2049	2055	2061	2067	2074	2080
620	2086	2093	2099	2105	2112	2118	2125	2131	2137	2144
630	2150	2157	2163	2170	2176	2183	2190	2196	2203	2209
640	2216	2223	2229	2236	2243	2249	2256	2263	2270	2277
650	2283	2290	2297	2304	2311	2318	2325	2332	2338	2345
660	2352	2359	2366	2374	2381	2388	2395	2402	2409	2416
670	2423	2431	2438	2445	2452	2460	2467	2474	2482	2489
680	2496	2504	2511	2519	2526	2533	2541	2549	2556	2564
690	2571	2579	2586	2594	2602	2609	2617	2625	2633	2640
700	2648	2656	2664	2672	2680	2688	2696	2703	2711	2719
710	2727	2736	2744	2752	2760	2768	2776	2784	2793	2801
720	2809	2817	2826	2834	2842	2851	2859	2867	2876	2884
730	2893	2901	2910	2919	2927	2936	2944	2953	2962	2970
740	2979	2988	2997	3006	3014	3023	3032	3041	3050	3059
750	3068	3077	3086	3095	3104	3113	3123	3132	3141	3150
760	3159	3169	3178	3187	3197	3206	3216	3225	3235	3244
770	3254	3263	3273	3282	3292	3302	3311	3321	3331	3341
780	3350	3360	3370	3380	3390	3400	3410	3420	3430	3440
790	3450	3460	3471	3481	3491	3501	3511	3522	3532	3542
800	3553	3563	3574	3584	3595	3605	3616	3627	3637	3648
810	3659	3669	3680	3691	3702	3713	3723	3734	3745	3756
820	3767	3778	3790	3801	3812	3823	3834	3845	3857	3868
830	3879	3891	3902	3914	3925	3937	3948	3960	3971	3983

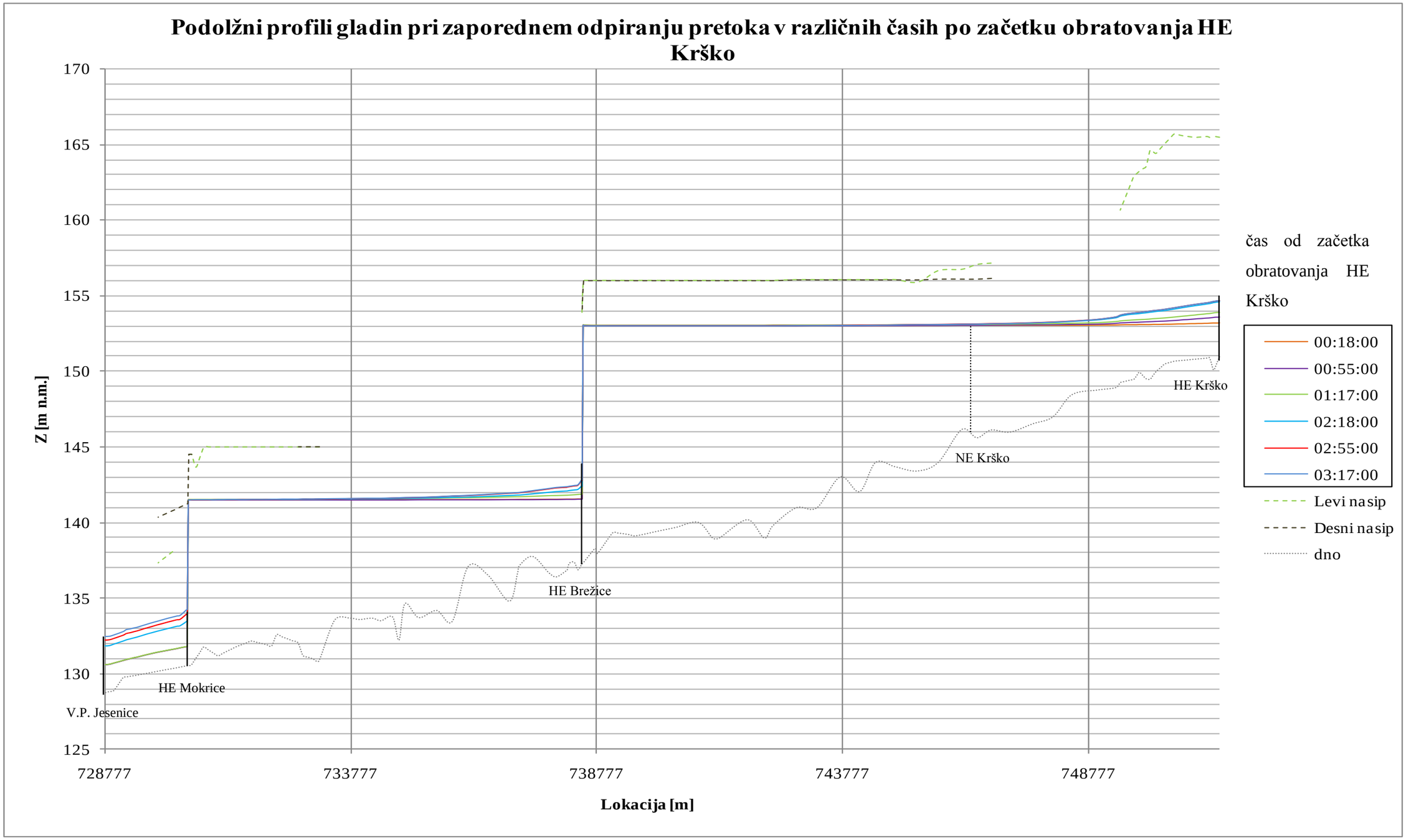
Priloga D: Podolžni profil gladin pri vzporednem odpiranju pretoka skozi turbine v različnih časih po začetku obratovanja HE Krško



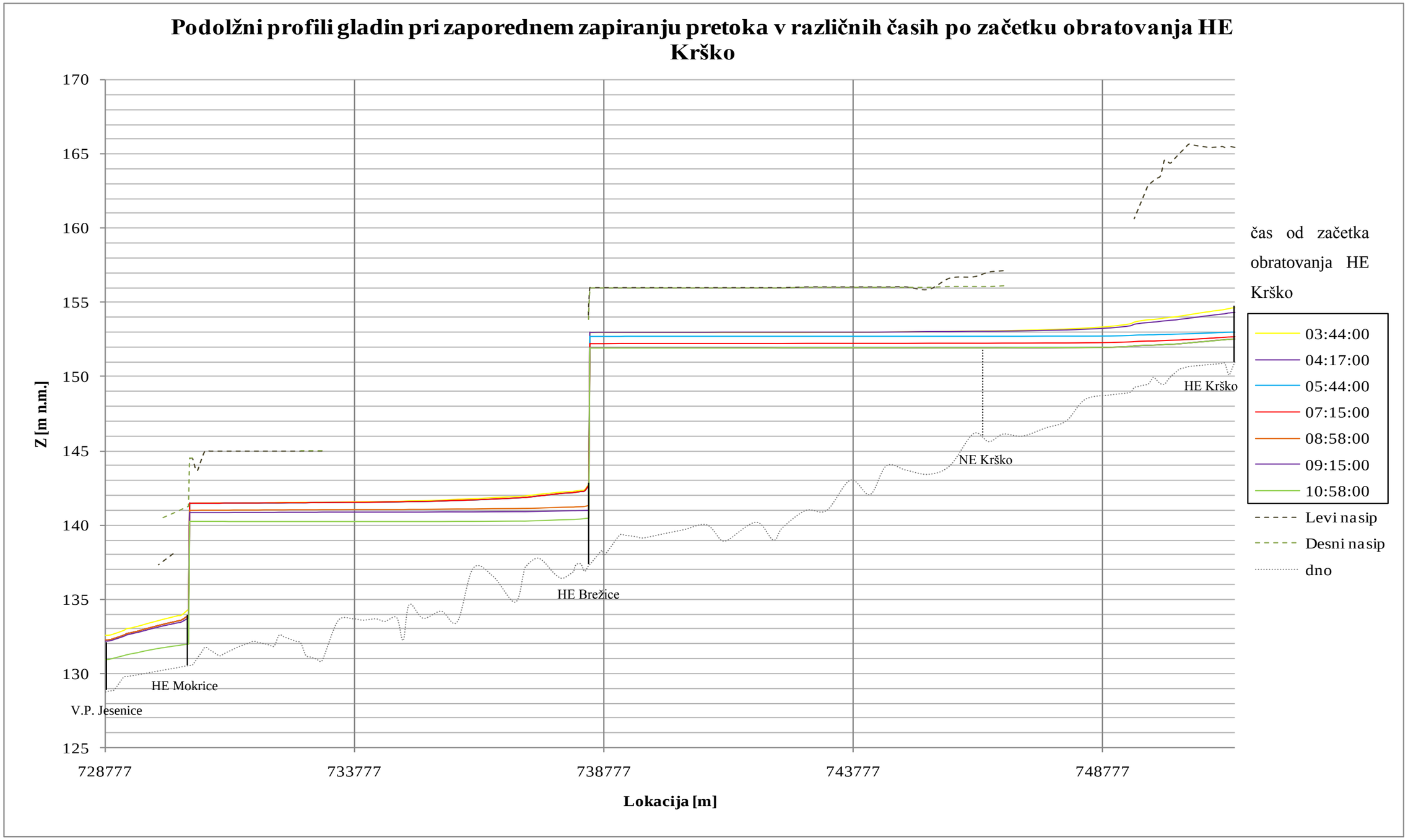
Priloga E: Podolžni profil gladin pri vzporednem zapiranju pretoka skozi turbine v različnih časih po začetku obratovanja HE Krško



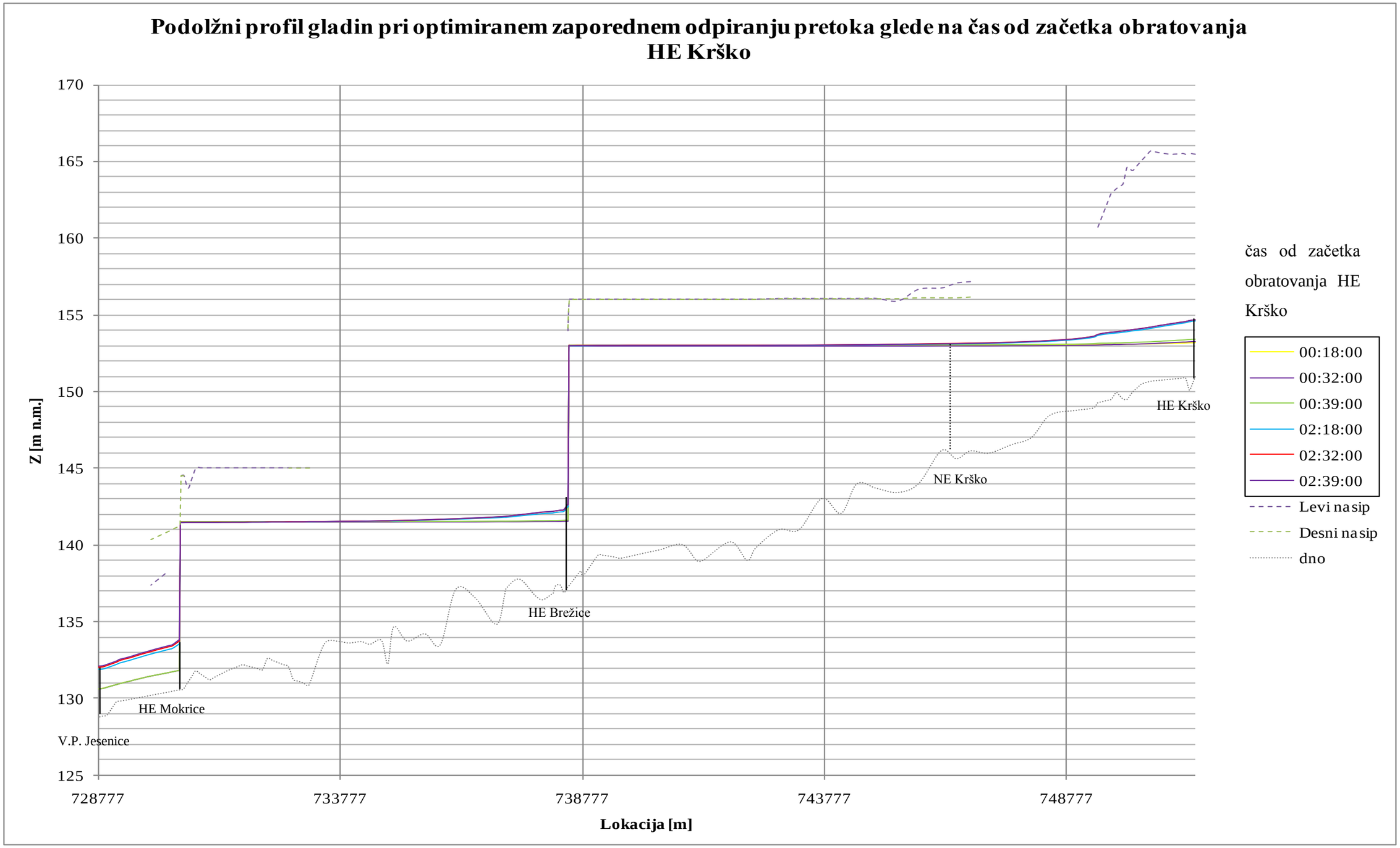
Priloga F: Podolžni profil gladin pri zaporednem odpiranju pretoka skozi turbine v različnih časih po začetku obratovanja HE Krško



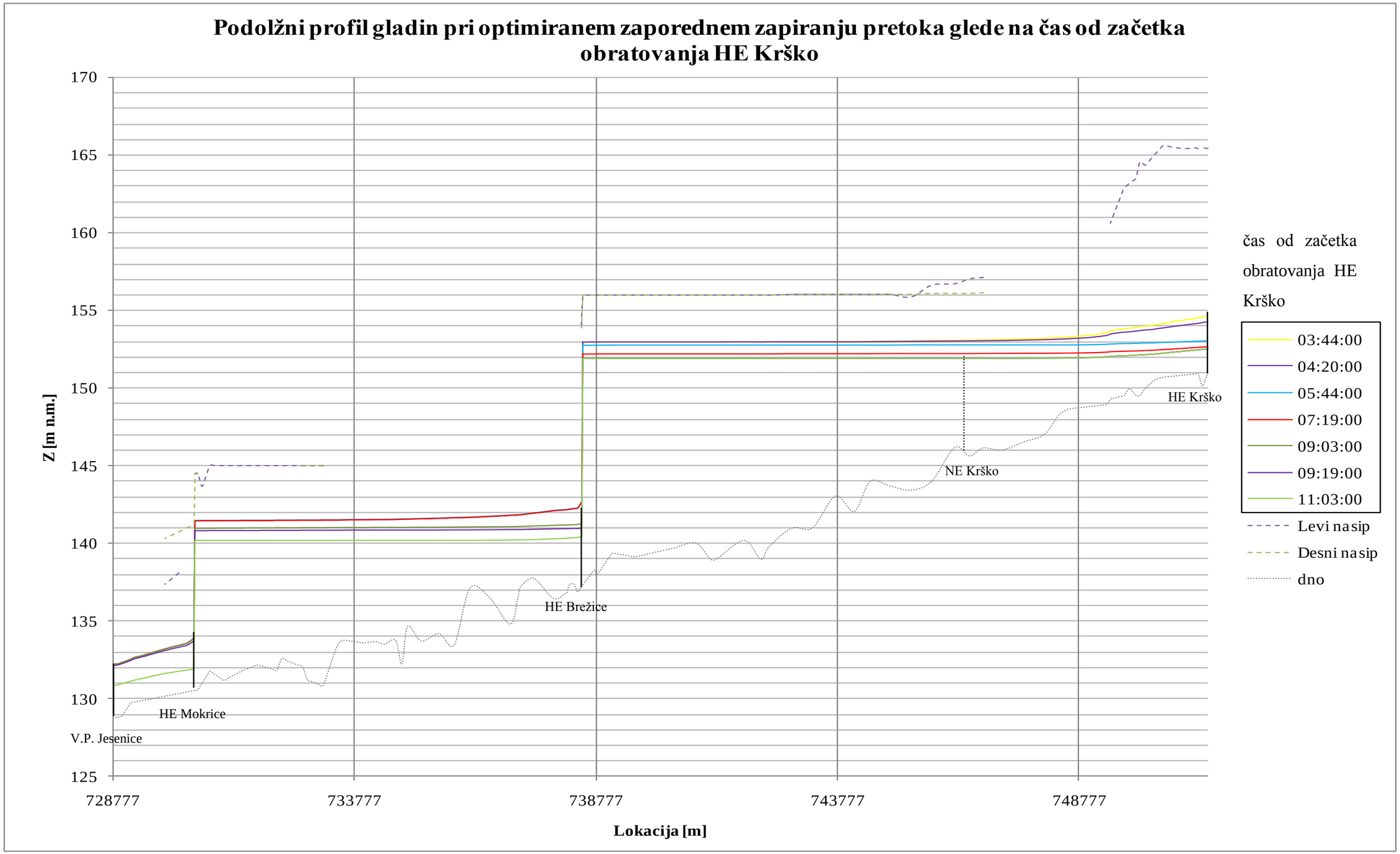
Priloga G: Podolžni profil gladin pri zaporednem zapiranju pretoka skozi turbine v različnih časih po začetku obratovanja HE Krško



Priloga H: Podolžni profil gladin pri optimiranem zaporednem odpiranju pretoka skozi turbine v različnih časih po začetku obratovanja HE Krško



Priloga I: Podolžni profil gladin pri optimiranem zaporednem zapiranju pretoka skozi turbine v različnih časih po začetku obratovanja HE Krško



LAZE
DOBRAVA
GMAJNA
Gabernica
Stara Gabernica
Cundrovec
TREBEŽE
BUKOŠEK
Gasilski dom
Črnc
Sromelca
Vrtnarija
Sela
Pri Dobovi
Bučlah
206
219
217z
217c
216
220
221
222
223
224
207
364
230s
R 5270/b
R OP686
R 5271
R 5271a
R 5271b

Gornji Lenart
Glinokop
Brezina
AGRARIA
OPEKARNA
Ljubljana-Zagreb
AGRARIA
GG Brežice
DINOS
SLOVIN
SLOVIN
AGROSERVIS
Šentlenart
Sv. Lenart
Petarkovič
STRUGA
ROLOPLAST
PREVOZ
TURBUS
Stadion
BREŽICE
AGROTEHNIKA
Sv. Rok
Trg Dr. h Ribarja
Gimnazija
Bolnišnica
Zdr. dom
Zakot
Č r n c
V R B I N A
MOČVIRJE
Cesta Braov
Millavcev
Kaulova ul.
Cerneičeva c.
Pleteršnikova cesta
Židarske poti
Cesta Dolenjska
IMV
B. Č.
Gas dom
Tf
211
212
212a
213
214
215
197
203
204
205
206
251
362
8030
338

DRAGE
MLAKE
PODVORNICA
SELIŠĆA
PANOVJE
ŠIKARA
SAVA
DRAŠKOVICA
DUGI LAKTI
BREGANIŠĆE
POTOK BREGANA
PRUDIĆAK
LAZE
STARA VUKOVA VRBINA
MATOŠČINE
MUHIĆE U MUHIĆAMA
Bregana
PESKI
MALEŠĆICE
MURVICE
LAZNICE
A1 Ljubljana - Zagreb
BRESTINA
MUHIĆE
CVITOVKE
Potok Podvršćak
BREG
SUPLATA
BLATNICE
POTOK PODVRŠĆAK
PODGORICE
GMAJNICA
BREGI
Klokočevac
KUTIĆI
KIPIŠĆE
PUSTAČE
ZAVRTNICE
PESAK
ZAMLAĆE
PAŠENCI
POTOK BISTRAC
OSIŠĆE
BALAGOVO
RASTINA
KRČI
NJIVE
GMAJNA
Bobovica
PRESIKA
Lug
Bistrac
CIGLENJAK
PAPRTIŠĆE
POTOK BISTRAC
Mjd,z

Ključ
TRAVNIK
SITIHE
HARMICARKA
LOBARDE
CIGLENKA
Ljubljana - Zagreb
RUNJAVA
KOMARNIK
UGRAJI
STRIČANOVO
GORJAČNICA
KANAL GORJAK
GMAJNA
Drenje
MRTVICA
DROBNOLIS
PRIŠNICA
JARAK
SUTLA
TOPLENIŠKA BARA
JURMANOVA BARA
JAGEDINA
STARO KORITO SUTLE
KUT
KRČNA BARA
PEŠIVIČA
PANOVJE
BOROVINA
ŠIRINA
Jesenice
SAVA
VRBINA
RUPE
PRIČRIKV
MLAKE
Šlj
Sk.
PS
R
T1
303
T4
T3
T5
△ 356

ZATON
VRBINA
BIVNICE
PEČAKOVKE
KUTI
JARKI
KELNERCE
GORIČKE
Ključ
RUNJAVA
FUŽINE
LAZAC
PERIKA
LUSKA
KOSTANJEVICA
GMAJNA
VRBINA
TREBEŽ
LAZAC
KOSTANJEVICA
BARA
STRUGA
FRENKOVA
VRBINA
SUTLA
VRBINA
Ribnica
SAVA
PODERENK
KINEL
JAUŠINA
SUTLA
JAGEDINA
RIBNICA
PERIC
JURJI DVORI
NA ŠPICI
BAJSI
JALIŠEVKE
PEŠČENJAKI
FORHEK
OPČINA
BAŠIČE
JARKI
DOLINSKI POTOK
POTOČJE
Jesenice
MOKRIŠKA
LES
JZ. RIBNIK
Moknice
HRIP
KRČI
SJEČE
NEDELJCI
MARGETIĆ
AGRARNA

VRBINA
COL
Ljubljana - Zagreb
C1-1
SAVA
GMAJNA
DROBNO LESJE
Podgračeno
VRTAČA
ČIČEV GRAD
ORFHOVEC
Zofič
Galič
RIGLOVO REBRO
DRNOVEC
Kušma
Resnjak
Sv. Križ
POD KRIŽEM
REBER
NOVA GORA
DOVCI
GAJ
MLADINE
Mala dolina
Vel. dolina
Koritno

KLESTA
V. Obrež
PODBRĐE
PODVRTE
PODLOŠCE
SPODNE LOKVE
ŠIGA
ŠTRLENKE
LOKE
GAJ
Vukovo Selo
GRBE
OTOK
SIOCE
PRUDI
Dobova
PODCESTE
VUGRENJE
SUTLA
ORAŠJE
GRŠNICE
PODGUMALE
PODSUKNICE
Harmica
PUDULE
PODLUČA
VEZNICE
PREČNICE
REGRARNA
PODVOBNICE
Rigonce
TUPUŠCE
DUGE
ČRNINE
KRČINA
PREDHIŠNICE
DEOCI
CELINKE
ŠIROKE
TRANKI
ŽAGA
ČETRNJE
GREŠINSKO
KUT
Loče
PRÚDNICE
GMAJNA
ŠIROKE
VRTA
ZATON
PEČAKOVKE
GEREVIĆEVI
KUTI

SELA pri Dobovi

PISTAČE

MALI OBREŽ

GABRJE pri Dobovi

DOBOVA

POLJE

MIHALOVAC

LOČE

SAVA

Negod

Zakot
Elektro Krško
Trnje
AGRARIA
SLATNE
VRBINA
GMAJNA
TREBLJENJE
ČRNILA
ČRETA
GABRNICA
Sela pri Dobovi
Ljubljana-Zagreb
Rekatina
NAKLA
Mostec
Sv. Fabijan
LEDINIŠČE
SAVA
ČATEŠKO POLJE
Spodnji Čatež
Zdravilišče Čateške Toplice
AGRARIA
Čatež ob Savi
Gornji Čatež
Stare Toplice
FAJFARJEV BREG
DOLJNJA VRBINA
BUKOVJE
Dvorce
PURGARICA
Gorenja vas
Cerma
GMAJNA
Bačanovec

BREŽICE
Zakot
Gimnazija
O. šola
bratov Ribar
Lenčičeva cesta
Levstikova ul.
Tomšičeva ul.
Kržičnikova ul.
Šola
Ulica stare pravde
Cesta prvih borcev
Ulica 1. maja
Askerčeva
Razlagova
Tratnikova ulica
SLOVENIJALES
Grad
Dom JNA
Dobovška cesta
Prešernova cesta
Usnjarska
Gelmarska pot
Vinapol
JUTRANJKA
MALO POLJE
Trnje
SAVA
STRUGA
MOČNIK
VRBINA
ZASAVJE
NA TRAVNIKIH
TERINJA
KARLOVEC
KRKA
Kopališče
Gost. Grič
Čateški grič
MOTEL
Šv. Jurij
Šola
Čatež ob Savi
ZADNJE NJIVE
TREBEŽ
Gornji Čatež
MLADINCE
TREBLJE
Velike Malence
GRADIŠČE
ZA GAJEM
JURKOV LAZ
SOVINJEK
MLADINE
Šentviška gora
Šv. Vid
Košavč
GORENJE STRAŽE
PUŠČAK
LAČEN BREG
Kozolc
HUDO
Mrzlava vas
Stubel
OŠREDEK
STRAŽE

Gornji Lenart
Ljubljana-Zagreb
OSREDKI
VRBINA
SAVA
MOČNIK
VTOKE
MAROF
JEVŠČINA
DRAGE
DOLGE ZDELAPTE

VRBINA
SAVA
KRČI
SOBOJAČE
JARKI
GMAJNICE
NA TRAVNIKU
DOLGE NJIVE
VRTI
ŠIROKO
Vihre
Gasilni dom
BREG
PRI CERKVI
POLANCI
SREDJE
VTOKE
DRAGE
C III-8021
Ljubljana – Zagreb CI-1

PARADIŽ
DOLNJI ŽABJEK
REMEN
Vodna črpalka
SAVIŠČE
MALA VRBINA
ŽABJEK
SIČJAKI
VRTI
SRKOVŠČE
Brege
MLAKE
LASTINA
BOROVNA
JABŠČE
TOPOLI
Drnovo
Mrtvice
ČREŠJE
VELIKE NJIVE
C III-8021
Ljubljana-Zagreb CI-1

Venišče
GORENJI TALI
PODGORA
ZA ULICAMI
POD BREGOM
BOROVINA
V ZAJČKAH
GRABNIK
Gorenja vas
pri Leskovcu
NA GRABNIKU
UŽANKA
DRAGA
PIRČEV BREG
NA BLOKIH
PRI VELIKI CESTI
DOLGE NJIVE
PIONIR-Novo mesto
IGM SAVA-Krško
VRH ZELNIKOV
RESOLE
KAMNICA
ZELNIKI
CIII-8020
Z GLAVNICE
OVNIK
Drnovo
PODORNICE
VRTCE
VELIKE NJIVE
PRI GRAMOZNICI
Kovačič
B.č.
PRI PRIKLJUČKU
Ljubljana-Zagreb
C I-1
LAPTE
CIII-8025
VELIKE NJIVE
VELIKE NJIVE

RAJCKOVO
ČELA
Arnovo selo
MERZLAKI
PERSINA
Dolenja vas
pri Krškem
Spodnja Pohanca
Trebež
DOLGE NJIVE
ZALOKE
V TRAVNIKIH
Pesje
Zgornji Obrež
PRODI
Gornji Lenart
MOČNIK
Pšeničnik
Zagreb

MIČLAGE
ČRNA MLAKA
OKLJUK
Dolenjevaški potok
Sečnik
Stardgaški potok
Ljubljana - Zagreb
Dolenja vas
pri Krškem
Stari grad
pri Vidmu
MAROF
HROŠOVEC
Gas. dom
DELČKI
Žel. postaja
305
V TRAVNIKIH
HIDROMONTAŽA
VRBINA
POD KRČEM
NUKLEARNA ELEKTRARNA

SGP PIONIR
RESA
RIBNIK RESA
Drnik
Potoče
Jagodič
KREMENSKE NJIVE
Kremen
Hrvat
Glas
Potočnica
LABOD
Šola
O. šola J. Dalmatin
DES
Hotel Sremič
PAPIRKONF
PTT
Ž. P.
124
124c
VIDEM
IMPERIAL
STARA VAS
TOVARNA CELULOZE IN PAPIRJA DJURO SALAJ
KRŠKO
Planinc
Libna
Sv. Marjeta
Lov. koča
Prsolja
Hrašovec
Ljubljana - Zagreb
AGROKOMBINAT Krško (hladilnica)
Spodnja Libna
355c
355
Vrbina
STARA VRBINA
Pašnik (Velarček)
SPLOŠNO MIZARSTVO
SAVA
STAROVAŠKA GMAJNA
VRBINA
POD KRČEM
NUKLEARNA ELEKTRARNA Krško
CESARSKA VRBINA
G R B E
R E M E N
Žadovinek
AGROKOMBINAT KRŠKO

Osredek
pri Trški Gori
Osredek
Piro
NOVA GORA
Sv. Jožef
Zabkar
Kamnik
Trška Gora
Sv. Rozalija
Zdr. dom
Primavc
SAVA
KRŠKO
Zorinc
Lavrinšek
TRŠLJAVEC
NARPELJ
Puntar
AGROKOMBINAT
Krško
LOKE
Grad
Tumska
graščina
ŽLAPOVEC
Resnik
FLORJANOVO
MLADINE
Stadion
Matije
Gubca
Loke
Pod lipo
T r n o v e c
AGROKOMBINAT
Krško
GRIČ
KRŠKO
TOPOLINA
PAŠNIK
VRHI
TRANSPORT
SGP Krško
IGM
SAVA
Sv. Marija
Pašnik (Vejanšek)
O. šola
Milke Kerin
PTT
Leskovec
pri Krškem
Č R N I L E
KOVINARSKA
TRPEČE
Sv. Ana
Gas. dom
NA GMAJNI
SOP
HREPETULE
PETROVCE
D o b r a v a
Tičarjev breg

Graben
BREŠTANICA
Anže
Anže
ŠKRIL
HRUŠOVJE
Zgornji Sremič
MOČLJE
MRZLA DOLINA
PEČICE
Grmada
754
Sremič
Slom
RUPA
DEVCI
Ponikva
PADEŽ
SELA
STUPANCA
Babna dolina
Stupanca
1,419,0
Bučerca
Koritno
Spodnji Sremič
LOKA
Komarič
Planinc
Pleteški
GORNJA RESA
LORATNA
Kolar
Sv. Primož
117
GAJ
Drnik
ZAHOVEC
TOPOLAJŠCA
Kremen
Zahoč
Sremiška cesta
POLJŠČICA
KRŠKO
V BREGU

Rajhenburški grad
Brestanica
Kantalon
Sv. Mohor
KUMERNICA
Gric
Spodnje Gunte
SUHADOL
KRIŽANCA
Zgornji Sremič
MOCLJE
Pieterski hrib
LAZE
Vrh
Gradišče
PRELOGE
Gunte
Gornje Gunte
Gunski graben
Sotelsko
DOLINCA
SAVA
Sremič
ZEMLJAK
BORŠT
Stolek
DELE
KOTE
GRAHOVŠ
IMPERIAL
Cesta
MLAČNICA
BRIŠNICE
JAGICA
RAVNE
MALA REBER
DOLINCE
VELIKA REBER
Ljubljana-Zagreb
Drgača
STRMOLINA
Šolski center
KRŠKO
Konjski rt
Čretež pri Krškem
PREŠNICA
Prška gora
Gasl. dom
Lov. dom
SLOVENIJA AVTO
Žlapovec

Gorenje Skopice
DOLENJA OGRAJA
SOSESKO
SAVA
POD OGRAJO
KONOPLJIŠČE
RAVNE
ŠIROKO
Dolenje Skopice
ČUPKE
DUGAČI
PESEK
DOVGILE
STARE CELINE
PODREDINE
LANIŠČE
VELIKE LOPATE
CELINE
CESTICE
PODENIŠČE
NA DVORU
SUHO POLJE
NOVE CELINE
Krška vas
NA DRAGAH
PEČNIKI
NA ZGONAH
OGLINKI
STAZE
PODGOMILA
Boršt
NA BREŽICAH
KRKA
LOŠCE
Velike Malence
KOZELC
NA DOBRAVI
TREBEŽI
C III-8014
C III-8017
C III-8021