

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*

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



Univerzitetni program Gradbeništvo,
Hidrotehniška smer

Kandidat:

Marjan Zorko

**Dvodimenzijski račun poplavnih valov na
območju predvidenih akumulacij HE Brežice in
HE Mokrice**

Diplomska naloga št.: 2976

Mentor:
prof. dr. Matjaž Četina

Somentor:
asist. dr. Mario Krzyk

Ljubljana, 27. 9. 2007

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisani **MARJAN ZORKO** izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom:

**»DVIDIMENZIJSKI RAČUN POPLAVNIH VALOV NA OBMOČJU
PREDVIDENIH AKUMULACIJ HE BREŽICE IN HE MOKRICE «.**

Izjavljam, da prenašam vse materialne avtorske pravice v zvezi z diplomsko nalogo na UL,
Fakulteto za gradbeništvo in geodezijo.

Krško, 21. 5. 2007

IZJAVA O PREGLEDU NALOGE

Nalogo so si ogledali učitelji hidrotehnične smeri:

BIBLIOGRAFSKO - DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

- UDK:** 519.61/.64:556.166:627.132(043.2)
- Avtor:** Marjan Zorko
- Mentor:** izr. prof. dr. Matjaž Četina
- Somentor:** asist. dr. Mario Krzyk
- Naslov:** Dvodimenzijski račun poplavnih valov na območju predvidenih akumulacij HE Brežice in HE Mokrice
- Obseg in oprema:** 66 str., 17 pregl., 32 sl., 6 en.
- Ključne besede:** tok s prosto gladino, translatorsni valovi, poplava, varnostni ukrep, alternativni ukrepi, 2D matematični model, PCFLOW2D, hidrogram, konsumpcijska krivulja, Manningov koeficient

Izvleček:

Diplomsko delo obravnava dvodimenzijski matematični model za račun poplavnih valov na območju predvidenih akumulacij HE Brežice in HE Mokrice. V uvodnem delu diplomske naloge je najprej opisana splošna klasifikacija poplavnih valov in njihova kombinacija razdelitev. V nadaljevanju je opisan pojav poplav, podane so njihove lastnosti in navedeni možni ukrepi zaščite pred njimi. Ukrepe za zaščito pred poplavami ločimo na vodogradbene in alternativne ukrepe. Prvi pomenijo graditev objektov, s katerimi izboljšamo razmere v reki, z drugimi pa poskušamo čim bolj omiliti škodo in zmanjšati posledice pojava. Nato je opisano, kako poteka račun poplavnih valov s programom PCFLOW2D, ki je bil razvit na katedri za mehaniko tekočin UL FGG. Opisane so teoretične osnove modela z enačbami in kratkim povzetkom numerične metode reševanja. V nadaljevanju so na kratko povzete značilnosti programa PCFLOW2D vključno z načinom priprave podatkov in prikazom rezultatov s pomočjo grafičnega paketa AutoCAD. V okviru diplomske naloge so bile izračunane gladine in hitrostna polja za osem različnih pretokov za primer stalnega toka in tudi dva primera za nestalni tok. Računi za obstoječe stanje nasipov so pokazali, da bo potrebno obstoječe nasipe mestoma nadvišati ter ponekod dodati nove in tako zagotoviti večjo poplavno varnost prebivalstva. Ko bo znano dokončno projektirano stanje novih nasipov in akumulacij za HE Brežice in HE Mokrice, ki jih načrtuje podjetje IBE d.d., bo potrebno izračune izvršiti še za končno stanje in preveriti ustreznost višine nasipov zaradi predvidenega dviga gladine vode.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC: 519.61/.64:556.166:627.132(043.2)
Author: Marjan Zorko
Supervisor: Assoc. Prof. dr. Matjaž Četina
Co – Supervisor: Assist. dr. Mario Krzyk
Title: Two-dimensional computation of flood waves in the area of planned reservoirs of Brežice and Mokrice hydro power plants
Notes: 66 p., 17 tab., 32 fig., 6 eq.
Key words: free surface flow, step waves, flood, safety measures, alternative measures, two - dimensional mathematical model, PCWLOW2D, hydrogram, consumption curve, Manning´ s coefficient

Abstract:

This graduation thesis treats two-dimensional mathematical flow model for computation of flood waves in the area of foreseen reservoirs HPP Brežice and HPP Mokrice. General description and classification of flood waves are described in initial part of the work. Then the phenomenon of floods, their characteristics and flood protection measures are described.

Measures for flood protection can be divided into river training activities and alteranive measures. First mean construction of buildings to improve conditions of river flow and with other we try to mitigate damage and to reduce consequences of the pfenomenon.

Further on, the computation of flood waves with the programme PCFLOW2D, that was developed at the Chair of fluid mechanics with a laboratory is described. Some theoretical features of the model including basic equations and numerical solution method are given. Main characteristics of the PCFLOW2D computer code are also presented devoting special attention to data preparation and presentation of the results with the use of AutoCAD graphies package.

On the lower Sava River steady flow at eight different discharges and two cases of unsteady flow were computed. Computations for the present state of embankments showed, the need of their reconstruction at some places to increase the flood safety of population. For the designed conditions with two reservoirs of HPP Brežice and HPP Mokrice new calculations will have to be made to check the height of existent and new embankments because of possible rise of water level.

ZAHVALA

Za vložen trud in pomoč pri nastajanju diplomske naloge se iskreno zahvaljujem mentorju izr. prof. dr. Matjažu Četini in somentorju asist. dr. Mariu Krzyku.

Zahvalil bi se tudi svojim staršema, ki sta mi vsa leta omogočala pogoje za študij in mi tako pomagala narediti lepši jutri.

KAZALO VSEBINE

1 UVOD	1
1.1 Opis problema	1
1.2 Nekatere fizično geografske značilnosti Save	2
1.3 Cilj diplomske naloge	4
2 SPLOŠNO O POPLAVNIH VALOVIH	5
2.1 Napotki za račun poplavnih valov	6
3 SPLOŠNO O POPLAVAH	8
3.1 Značilnosti poplav	8
3.1.1 Opis pojava	8
3.1.2 Lastnosti poplav v Sloveniji	9
3.2 Ukrepi za varstvo pred poplavami	10
3.2.1 Vodogradbeni ukrepi	10
3.2.2 Alternativni ukrepi	14
3.2.3 Ocenjevanje projektov	15
4 POPLAVE LETA 1990	17
4.1 Razpored padavin in njihov vpliv na poplave 1990	17
4.1.1 Vremenske razmere	17
4.2 Razpored padavin	17
4.3 Poplave leta 1990 ob Savi med Zidanim mostom in Bregano	18
5 RAČUN POPLAVNIH VALOV S PROGAMOM PCFLOW2D	23
5.1 Podatki	24
5.1.1 Geometrijski podatki	24
5.1.2 Hidrološki podatki	32
5.1.3 Hidravlični podatki	33
5.2 2D matematični model PCFLOW2D	37
5.2.1 Osnovne enačbe	37
5.2.2 Metoda reševanja in računalniški program	39
5.2.3 Začetni in robni pogoji	40
5.3 Umerjanje matematičnega modela	41
5.3.1 Postopek umerjanja	41

5.3.2 Točnost rezultatov	43
5.4 Rezultati izračunov	44
5.4.1 Pregled izvršenih izračunov in rezultati za prvo obravnavano območje predvidene akumulacije HE Brežice	44
5.4.2 Pregled izvršenih izračunov in rezultati za drugo obravnavano območje predvidene akumulacije HE Mokrice.....	50
5.4.3 Analiza nestalnega toka	55
6 PROJEKTIRANO STANJE NASIPOV PO IZGRADNJI AKUMULACIJ HE	60
BREŽICE IN HE MOKRICE	60
7 ZAKLJUČKI	63
VIRI	65

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Švicarska priporočila za nadvišanja brežin in premostitev na raznih vrstah vodotokov (po Vischerju in Huberju, 1993).....	12
Preglednica 2: Faze projekta.....	16
Preglednica 3: Pretoki, ki so bili uporabljeni za izračune hidrodinamičnega stanja na območju predvidenih akumulacij HE Brežice in HE Mokrice.....	33
Preglednica 4: Konsumpcijska krivulja na dolvodnem robu 2D matematičnega modela prvega obravnavanega območja na območju predvidene akumulacije HE Brežice.....	34
Preglednica 5: Konsumpcijska krivulja na dolvodnem robu 2D matematičnega modela drugega obravnavanega območja predvidene akumulacije HE Mokrice.	35
Preglednica 6: Maksimalne kote gladin vode v prečnih profilih na območju predvidene akumulacije HE Brežice pri različnih pretokih za obstoječe stanje nasipov.	45
Preglednica 7: Razdelilnik pretoka Save na odseku Krško – Brežice za sedanje stanje terena (primer BRE35, $Q_{um} = 3650 \text{ m}^3/\text{s}$ (Sava) + $204 \text{ m}^3/\text{s}$ (Krka)).....	47
Preglednica 8: Razdelilnik pretoka Save na odseku Krško – Brežice za sedanje stanje terena (primer BRE36, $Q_{100} = 3290 \text{ m}^3/\text{s}$ (Sava) + $310 \text{ m}^3/\text{s}$ (Krka)).....	48
Preglednica 9: Razdelilnik pretoka Save na odseku Krško – Brežice za sedanje stanje terena (primer BRE37, $Q_{1000} = 4040 \text{ m}^3/\text{s}$ (Sava) + $310 \text{ m}^3/\text{s}$ (Krka)).....	48
Preglednica 10: Razdelilnik volumna Save na odseku Krško – Brežice za sedanje stanje terena pri različnih pretokih.	49
Preglednica 11: Maksimalne kote gladin vode v prečnih profilih na območju predvidene akumulacije HE Mokrice pri različnih pretokih za obstoječe stanje nasipov.....	50
Preglednica 12: Razdelilnik pretoka Save na odseku Brežice - Mokrice za sedanje stanje terena (primer MOK13, $Q_{um1} = 3854 \text{ m}^3/\text{s}$).	52
Preglednica 13: Razdelilnik pretoka Save na odseku Brežice - Mokrice za sedanje stanje terena (primer MOK14, $Q_{um2} = 3267 \text{ m}^3/\text{s}$).	53
Preglednica 14: Razdelilnik pretoka Save na odseku Brežice - Mokrice za sedanje stanje terena (primer MOK17, $Q_{um2} = 3267 \text{ m}^3/\text{s}$, povečani koeficienti hrapavosti).	53
Preglednica 15: Razdelilnik pretoka Save na odseku Brežice - Mokrice za sedanje stanje terena (primer MOK16, $Q_{100} = 3393 \text{ m}^3/\text{s}$).	54

Preglednica 16: Razdelilnik pretoka Save na odseku Brežice - Mokrice za sedanje stanje terena (primer MOK15, $Q_{1000} = 4100 \text{ m}^3/\text{s}$).....	54
Preglednica 17: Razdelilnik volumna Save na odseku Brežice - Mokrice za sedanje stanje terena pri različnih pretokih.....	55

KAZALO SLIK

Slika 1: Porečje reke Save (Bricelj, 1991).....	3
Slika 2: Izvir Save Dolinke v Zelencih (Bricelj, 1991).....	4
Slika 3: Pozitivni sotočni, negativni protitočni, pozitivni protitočni in negativni sotočni val (Rajar, 1980).....	5
Slika 4: Navpično čelo, strmo čelo in val brez strmega čela (Rajar, 1980).	6
Slika 5: Nasip za varstvo pred poplavami (Brilly in sod., 1999).....	11
Slika 6: Visok nasip za novo cesto skozi Krško je preprečeval, da bi voda iz Dalmatinove ulice, kjer je zalila številne zgradbe, hitreje odtekla (UJMA, 1991).....	19
Slika 7: Poplave med Zidanim mostom in Bregano (UJMA, 1991).	20
Slika 8: Pogled po poplavni ravnici proti Savi na sredini slike. Novo nasut prod in pesek zavira odtok vode s poplavnega sveta (UJMA, 1991).....	21
Slika 9: Prvo z modelom PCFLOW2D obravnavano območje predvidene akumulacije HE Brežice.....	23
Slika 10: Drugo z modelom PCFLOW2D obravnavano območje predvidene akumulacije HE Mokrice.....	24
Slika 11: Začetek prvega obravnavanega območja dolvodno od mostu čez reko Savo v Krškem.	26
Slika 12: Konec prvega obravnavanega območja malo pred mostom, ki povezuje kraja Brežice in Čatež ob Savi.....	27
Slika 13: Sotočje reke Krke in Save.	28
Slika 14: Pogled na desni zavoj reke Save pri Čateških Toplicah.....	29
Slika 15: Zgrajeni nasip na levi strani reke Save za protipoplavno zaščito kraja Mostec.....	29
Slika 16: Zgrajeni nasip na levi strani reke Save za protipoplavno zaščito kraja Brežice.	30
Slika 17: Začetek obstoječega zidu na desni strani reke Save za protipoplavno zaščito kraja Čatež ob Savi.....	30
Slika 18: Konec obstoječega zidu na desni strani reke Save za protipoplavno zaščito kraja Čatež ob Savi, ki nato preide v nasip.	31
Slika 19: Obstoječi nasip na desni strani reke Save za protipoplavno zaščito Čateških Toplic.	31

Slika 20: Uporabljena konsumpcijska krivulja na dolvodnem robu 2D matematičnega modela prvega obravnavanega območja predvidene akumulacije HE Brežice.	35
Slika 21: Uporabljena konsumpcijska krivulja na dolvodnem robu 2D matematičnega modela drugega obravnavanega območja predvidene akumulacije HE Mokrice.	36
Slika 22: Fotografija poplavljenega področja v okolici Spodnjega Starega Gradu (5. 11. 1998).	41
Slika 23: Pogled na NEK in jez na reki Savi.	56
Slika 24: Lokacija vodomerne postaje Čatež.	57
Slika 25: Hidrološka postaja Čatež - Sava.	57
Slika 26: Vhodni in izhodni hidrogram poplavnega vala za drugo obravnavano območje predvidene akumulacije HE Mokrice.	58
Slika 27: Vhodni in izhodni hidrogram poplavnega vala za prvo obravnavano območje predvidene akumulacije HE Brežice.	58
Slika 28: Osi nasipov za območje HE Brežice.	60
Slika 29: Prikaz lokacije levega preliva na poplavno področje.	61
Slika 30: Prikaz lokacije desnega preliva na poplavno področje.	61
Slika 31: Možne osi nasipov za območje HE Mokrice.	62
Slika 32: Povečana lokacija preliva na levi strani za območje HE Mokrice.	62

PRILOGE

- Priloga A1: Pregledna situacija obravnavanega območja predvidene akumulacije HE Brežice s prikazom računskih točk ter položajem prečnih in podolžnega profila.
- Priloga A2: Pregledna situacija obravnavanega območja predvidene akumulacije HE Mokrice s prikazom računskih točk ter položajem prečnih in podolžnega profila.
- Priloga B1: Aksonometrična slika sedanjega stanja terena za območje predvidene akumulacije HE Brežice.
- Priloga B2: Aksonometrična slika sedanjega stanja terena za območje predvidene akumulacije HE Mokrice.
- Priloga B3: Umerjanje matematičnega modela. Podolžni profil gladine vode v osi reke Save za območje predvidene akumulacije HE Brežice.
- Priloga B4: Umerjanje matematičnega modela. Podolžni profil gladine vode v osi reke Save za območje predvidene akumulacije HE Mokrice.
- Priloga C1: Hitrostno polje in plastnice globin vode pri pretoku reke Save $Q = 3290 \text{ m}^3/\text{s}$ in Krke $Q = 310 \text{ m}^3/\text{s}$ na območju predvidene akumulacije HE Brežice.
- Priloga C2: Hitrostno polje in plastnice globin vode pri pretoku reke Save $Q = 3650 \text{ m}^3/\text{s}$ in Krke $Q = 204 \text{ m}^3/\text{s}$ na območju predvidene akumulacije HE Brežice.
- Priloga C3: Hitrostno polje in plastnice globin vode pri pretoku reke Save $Q = 4040 \text{ m}^3/\text{s}$ in Krke $Q = 310 \text{ m}^3/\text{s}$ na območju predvidene akumulacije HE Brežice.
- Priloga C4: Prečni profili dna in gladine pri pretoku reke Save $Q = 3290 \text{ m}^3/\text{s}$ in Krke $Q = 310 \text{ m}^3/\text{s}$ na območju predvidene akumulacije HE Brežice.
- Priloga C5: Prečni profili dna in gladine pri pretoku reke Save $Q = 3650 \text{ m}^3/\text{s}$ in Krke $Q = 204 \text{ m}^3/\text{s}$ na območju predvidene akumulacije HE Brežice.
- Priloga C6: Prečni profili dna in gladine pri pretoku reke Save $Q = 4040 \text{ m}^3/\text{s}$ in Krke $Q = 310 \text{ m}^3/\text{s}$ na območju predvidene akumulacije HE Brežice.
- Priloga C7: Povečani prečni profili pri pretokih Save od $Q = 3290 \text{ m}^3/\text{s}$ do $Q = 4040 \text{ m}^3/\text{s}$ za območje predvidene akumulacije HE Brežice.
- Priloga C8: Podolžni profili dna in gladine pri pretoku reke Save $Q = 3290 \text{ m}^3/\text{s}$ in Krke $Q = 310 \text{ m}^3/\text{s}$ na območju predvidene akumulacije HE Brežice.
- Priloga C9: Podolžni profili dna in gladine pri pretoku reke Save $Q = 3650 \text{ m}^3/\text{s}$ in Krke $Q = 204 \text{ m}^3/\text{s}$ na območju predvidene akumulacije HE Brežice.

- Priloga C10: Podolžni profili dna in gladine pri pretoku reke Save $Q = 4040 \text{ m}^3/\text{s}$ in Krke $Q = 310 \text{ m}^3/\text{s}$ na območju predvidene akumulacije HE Brežice.
- Priloga C11: Povečani podolžni profili pri pretokih Save od $Q = 3290 \text{ m}^3/\text{s}$ do $Q = 4040 \text{ m}^3/\text{s}$ za območje predvidene akumulacije HE Brežice.
- Priloga C12: Aksonometrična slika gladine in sedanjega stanja terena, na območju predvidene akumulacije HE Brežice pri pretoku Save $Q = 3290 \text{ m}^3/\text{s}$ in Krke $Q = 310 \text{ m}^3/\text{s}$.
- Priloga C13: Aksonometrična slika gladine in sedanjega stanja terena, na območju predvidene akumulacije HE Brežice pri pretoku Save $Q = 3650 \text{ m}^3/\text{s}$ in Krke $Q = 204 \text{ m}^3/\text{s}$.
- Priloga C14: Aksonometrična slika gladine in sedanjega stanja terena, na območju predvidene akumulacije HE Brežice pri pretoku Save $Q = 4040 \text{ m}^3/\text{s}$ in Krke $Q = 310 \text{ m}^3/\text{s}$.
- Priloga D1: Hitrostno polje in plastnice globin vode pri pretoku reke Save $Q = 3393 \text{ m}^3/\text{s}$ na območju predvidene akumulacije HE Mokrice.
- Priloga D2: Hitrostno polje in plastnice globin vode pri pretoku reke Save $Q = 3854 \text{ m}^3/\text{s}$ na območju predvidene akumulacije HE Mokrice.
- Priloga D3: Hitrostno polje in plastnice globin vode pri pretoku reke Save $Q = 4100 \text{ m}^3/\text{s}$ na območju predvidene akumulacije HE Mokrice.
- Priloga D4: Prečni profili dna in gladine pri pretoku reke Save $Q = 3393 \text{ m}^3/\text{s}$ na območju predvidene akumulacije HE Mokrice.
- Priloga D5: Prečni profili dna in gladine pri pretoku reke Save $Q = 3854 \text{ m}^3/\text{s}$ na območju predvidene akumulacije HE Mokrice.
- Priloga D6: Prečni profili dna in gladine pri pretoku reke Save $Q = 4100 \text{ m}^3/\text{s}$ na območju predvidene akumulacije HE Mokrice.
- Priloga D7: Povečani prečni profili pri pretokih Save od $Q = 3393 \text{ m}^3/\text{s}$ do $Q = 4100 \text{ m}^3/\text{s}$ za območje predvidene akumulacije HE Mokrice.
- Priloga D8: Podolžni profili dna in gladine pri pretoku reke Save $Q = 3393 \text{ m}^3/\text{s}$ na območju predvidene akumulacije HE Mokrice.
- Priloga D9: Podolžni profili dna in gladine pri pretoku reke Save $Q = 3854 \text{ m}^3/\text{s}$ na območju predvidene akumulacije HE Mokrice.
- Priloga D10: Podolžni profili dna in gladine pri pretoku reke Save $Q = 4100 \text{ m}^3/\text{s}$ na območju predvidene akumulacije HE Mokrice.
- Priloga D11: Povečani podolžni profili pri pretokih Save od $Q = 3393 \text{ m}^3/\text{s}$ do $Q = 4100 \text{ m}^3/\text{s}$ za območje predvidene akumulacije HE Mokrice.

Priloga D12: Aksonometrična slika gladine in sedanjega stanja terena, na območju predvidene akumulacije HE Mokrice pri pretoku Save $Q = 3393 \text{ m}^3/\text{s}$.

Priloga D13: Aksonometrična slika gladine in sedanjega stanja terena, na območju predvidene akumulacije HE Mokrice pri pretoku Save $Q = 3854 \text{ m}^3/\text{s}$.

Priloga D14: Aksonometrična slika gladine in sedanjega stanja terena, na območju predvidene akumulacije HE Mokrice pri pretoku Save $Q = 4100 \text{ m}^3/\text{s}$.

OKRAJŠAVE IN SIMBOLI

FGG	Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo
KMTe	Katedra za mehaniko tekočin z laboratorijem
UL	Univerza v Ljubljani
SIMPLE	Iterativni postopek popravkov globin
HE	Hidroelektrarna

1 UVOD

Živimo v času, v katerem je vse več izrednih naravnih pojavov, število teh pa se iz leta v leto povečuje zaradi globalnih podnebnih sprememb. Ob pojavu ekstremnih dogodkov se zgodi, da lahko v zelo kratkem času pade velika količina padavin. Delež teh padavin se infiltrira v zemljinu, odvisno od predhodne namočenosti tal, ostala voda pa se z vodozbirnega območja vodotoka zbira in odteka po strugi navzdol. Zato je potrebno zagotoviti čim večjo poplavno varnost prebivalstva v okolici vodotokov.

Z izgradnjo hidroelektrarn (HE) na spodnji Savi se bo povečala izkoriščenost vodnega potenciala, ki je na razpolago na reki Savi in hkrati se bo urejala struga reke Save, da bo zagotovljena večja pretočnost ob pojavu visokih voda. Na spodnji Savi so zgrajene že HE Vrhovo in HE Boštanj, v postopku gradnje pa je HE Blanca. V začetni fazi pa je tudi že postopek izgradnje HE Krško, kjer že potekajo pripravljalna dela za izgradnjo mostu čez reko Savo tik dolvodno od lokacije HE Krško. HE Brežice in HE Mokrice, ki sta zadnji dve hidroelektrarni v spodnji verigi in imata funkcijo izravnalnih bazenov, sta še v postopku projektiranja in priprave dokumentacije.

V diplomski nalogi sem obravnaval poplavno varnost območja zadnjih dveh hidroelektrarn na spodnji Savi za obstoječe stanje nasipov. Zaradi narave toka je bilo potrebno uporabiti dvodimenzijski (2D) matematični model. Računi so potekali z dvodimenzijskim programom PCFLOW2D, ki je bil razvit na Katedri za mehaniko tekočin UL FGG (Četina, 1988).

1.1 Opis problema

Danes je v javnosti veliko govora o podnebnih spremembah in njihovih vplivih na naravne pojave, kot so poplave. Trenutno poteka več raziskav globalnega pomena za ugotavljanje različnih vplivov industrializacije na globalne podnebne razmere. Spremembe so očitne v sestavi atmosfere, kjer se količina ogljikovega dioksida nenehno večja in s tem povečuje izolacijsko vlogo atmosfere. Posledice tega so zvišanje povprečnih temperatur na zemeljski obli, tajanje ledenikov, zvišanje morske gladine, intenziviranje termodinamičnih procesov v

atmosferi in podnebne spremembe. Pričakujemo lahko različne možne spremembe, od katerih bi bilo najmanj ugodno zmanjšanje povprečnih količin padavin in povečanje števila ujm.

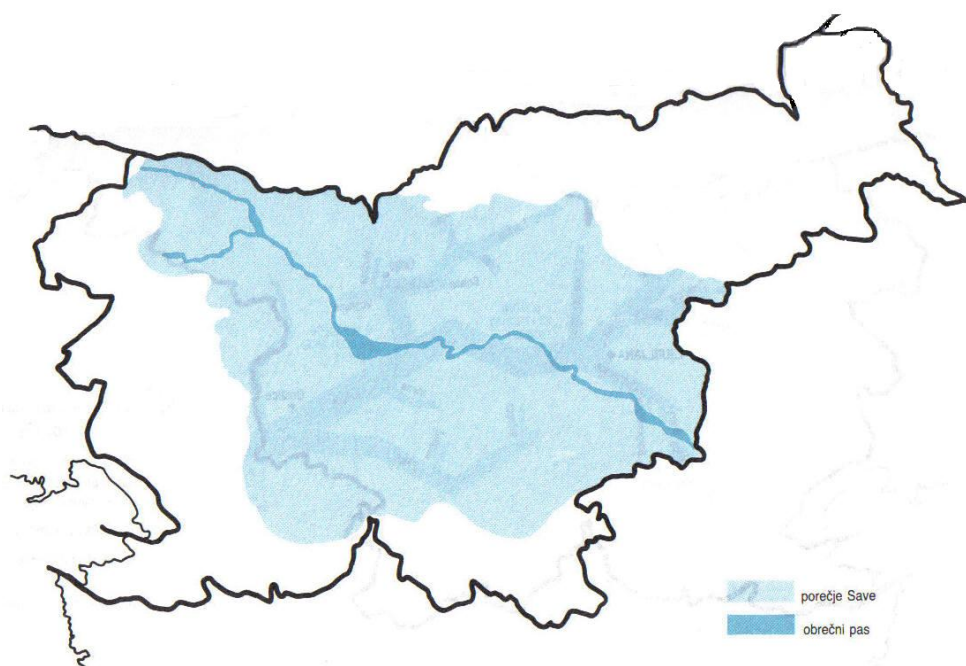
Pri naravnih katastrofah, ki so praviloma redek pojav, se danes pogosto postavlja vprašanje, v kolikšni meri je za to odgovoren človek s svojim tehnološkim razvojem. S tehničnimi ukrepi kot so regulacije vodotokov ter graditev akumulacij in drenažnih sistemov, je človek vplival pozitivno in negativno na odtočne razmere. Na sam pojav pa ni in ne more bistveno vplivati. Poplave so sestavni del naravnega režima voda, škoda, ki jo pri tem povzročajo, pa je posledica naše dejavnosti.

1.2 Nekatere fizično geografske značilnosti Save

Porečje Save v Sloveniji meri 10.871,5 km² (Kovačič, 1983) oz. obsega 53,6 % površja Slovenije (slika 1). V funkcijskem, hidrotehničnem pogledu je ta pokrajina medzrnski vodonosnik v naplavini in izdaten vir kakovostne pitne vode, z njo se oskrbuje veliko število prebivalcev.

Sava je osrednja in najdaljša slovenska reka. Od izvira Dolinke v Zelencih na 833 m (slika 2) do meje s Hrvaško meri 219 km, povprečni strmec je 3,1 ‰. Njen drugi povirni krak je Sava Bohinjka, ki izteka iz Bohinjskega jezera na 526 m in se izliva v Dolinko pri Radovljici na 411 m. V svojem toku skozi Slovenijo ima zaradi različnega podnebja in reliefa mešan rečni režim. Sava Dolinka ima prehodni snežni režim z mediteranskim poudarkom, Bohinjka in Sava pod Radovljico pa snežno-dežni režim. Oba imata primarni minimum v februarju, sekundarnega pa v avgustu.

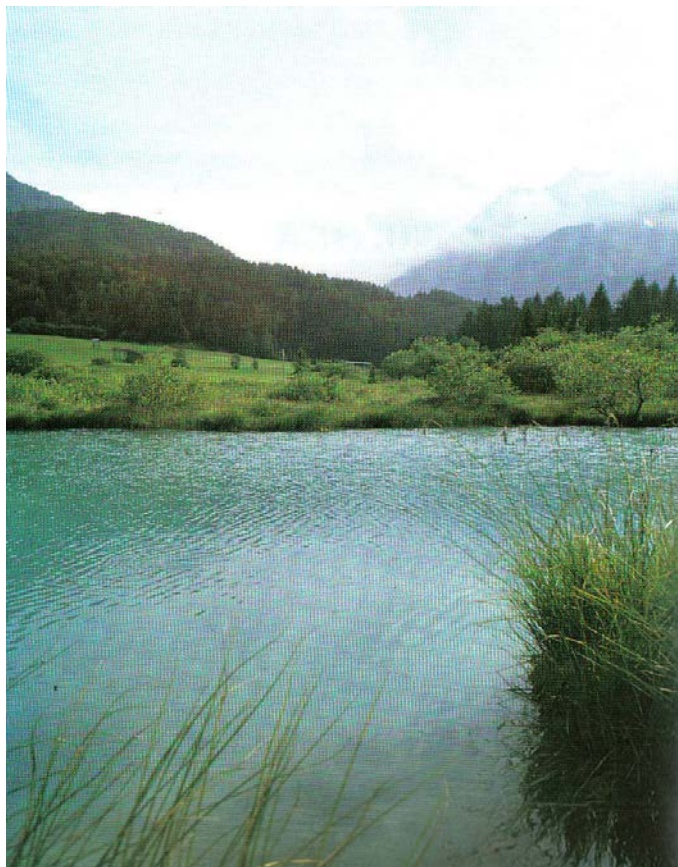
Snežno-dežni režim Save spremeni pod Ljubljano predvsem pritok kraške Ljubljanice in uveljavi se dežno-snežni režim z zmernim mediteranskim poudarkom. Primarni minimum se pojavlja v avgustu, sekundarni pa v zimskih mesecih. Ekstremne pretočne vrednosti se gibljejo v razmerju 1:100, največje zabeležene na Bohinjki pa presegajo vrednosti 1:250.



Slika 1: Porečje reke Save (Bricelj, 1991).

Struga Save je vrezana v litološko nehomogeno podlago. Profil reke sestavljajo štiri petrografski tipi (Ilešič, 1953):

1. Sava, vrezana pretežno v triadne apnence in dolomite (tok od izvira do Most, med vasjo Sava in Radečami ter med ustjem Mirne in Krškim).
2. Dolina v karbonskih skrilavcih in peščencih (med ustjem Ljubljanice in vasjo Sava ter med Radečami in Sevnico).
3. Dolina, vrezana v konglomerat ali starejši prod, ponekod tudi v morene, pod vsem tem pa je blizu živoskalna podlaga (Sava nad Mostami in ustjem Radovne, od radovljiškega sotočja do ustja Sore, na bohinjski Savi pa od jezera do Lepenc in od Bohinjske Bele do sotočja).
4. Področja sipkega proda (med ustjem Radovne in savskim sotočjem, Ljubljansko polje od ustja Sore do ustja Ljubljanice ter od Krškega do republiške meje).



Slika 2: Izvir Save Dolinke v Zelencih (Bricelj, 1991).

1.3 Cilj diplomske naloge

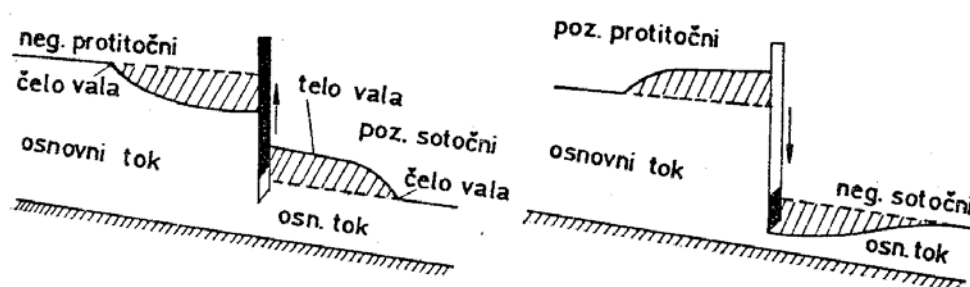
S pomočjo dvodimenzijskega (2D) matematičnega modela PCFLOW2D bo narejena simulacija širjenja poplavnih valov na območju Krško-brežiškega polja. Dvodimenzijski matematični model je uporabljen zaradi kompleksne geometrije terena Krškega polja s prečnimi nakloni terena na poplavnih ravninah. Po umeritvi modela bodo izvršeni računi poplavne varnosti za obstoječe stanje terena in stopnjo zgrajenosti varovalnih visokovodnih nasipov. Hkrati to predstavlja tudi referenčno stanje pri načrtovanju akumulacij za bodoči HE Brežice in HE Mokrice.

2 SPLOŠNO O POPLAVNIH VALOVIH

Rajar (1980) deli valove po raznih kriterijih, saj jih je mnogo vrst in nastajajo vsepovsod okrog nas. Najpogostejši so težnostni valovi v vodi in zgoščinski valovi v zraku. Težnostne je lažje opazovati, zgoščinskih pa navadno ne vidimo, ampak jih lahko slišimo. Obema vrstama valov pa je skupna lastnost, da nastanejo zaradi sile pritiska, ki se pojavi zaradi lokalne akumulacije tekočine. Ta je v primeru težnostnih valov odvisna od globine, v primeru zgoščinskih valov pa od spremembe gostote.

Težnostne valove delimo na oscilatorne in translatorne. Pri translatornih valovih se delci tekočine gibljejo, imamo torej pretok tekočine. Razlikujemo pozitivne, negativne, sotočne in protitočne valove.

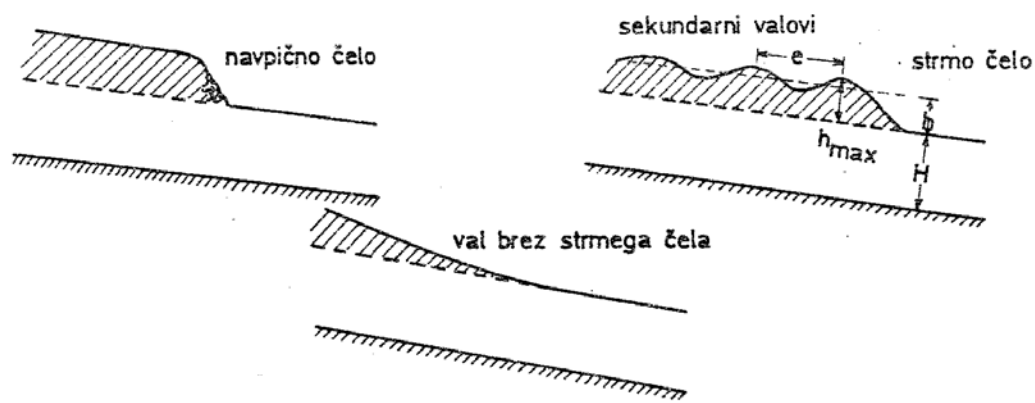
Pozitivni valovi so valovi, pri katerih se s prihodom vala v določen profil struge gladine zviša. Negativni valovi so valovi, ki s svojim prihodom v določen profil povzročijo znižanje gladine. Sotočni valovi so tisti, ki potujejo v isto smer kot osnovni tok, protitočni valovi pa potujejo v obratni smeri kot osnovni tok. Valovi so lahko pozitivni sotočni, pozitivni protitočni ter negativni sotočni in negativni protitočni (slika 3).



Slika 3: Pozitivni sotočni, negativni protitočni, pozitivni protitočni in negativni sotočni val
(Rajar, 1980)

Telo vala imenujemo ves val, razen sprednjega dela, ki ga imenujemo čelo vala. Čelo vala imenujemo sprednji del vala, ki povzroči spremembo gladine v profilu. Pri pozitivnem valu so

oblike čela vala tri: navpično čelo, strmo čelo in brez strmega čela (slika 4). Navpično čelo vala ima skoraj vertikalno vodno steno v obliki potujočega vodnega skoka, v katerem pride do velike disipacije energije. Za strmo čelo velja, da je naklon za čelom še vedno velik, tok pa je hitro spremenljiv, oblike potujočega vodnega skoka pa to čelo nima več. Pri valu brez strmega čela se v profilu pozna njegov prihod s počasnim in zveznim spreminjanjem globine. Tak val nima končne višine, čelo vala pa imenujemo tisto točko, kjer se najprej začne spreminjati globina.



Slika 4: Navpično čelo, strmo čelo in val brez strmega čela (Rajar, 1980).

Med translatorne valove po nastanku sodijo tudi poplavni (visokovodni) valovi. Tako imenujemo valove, ki nastanejo v rekah zaradi hidroloških razmer, zaradi velikih deževij ali topljenja snega ali ledu v povodju reke. Za te valove je značilno, da so zelo položni, brez strmega čela in da lahko trajajo več dni.

Pogosto je potrebno izračunati spreminjanje gladine v odvisnosti od časa v nekem dolvodnem profilu, če je znano spreminjanje pretoka v nekem gorvodnem profilu. Z namenom zmanjšanja obsega poplav se gradijo akumulacije, ki zadržijo del volumna poplavnega vala. Zato je potrebno preračunati propagacije poplavnih valov.

2.1 Napotki za račun poplavnih valov

V praksi se najpogosteje računa poplavne valove na rekah, torej v neprizmatičnih strugah, ki so včasih nepravilne oblike in imajo še velika poplavna področja. Taki valovi nimajo strmega

čela, ampak imajo zelo počasne spremembe pretoka in gladin. Račun poplavnih valov je v primeru obsežnih poplavnih področjih potrebno opraviti v dveh dimenzijah.

Za računanje je potrebno podati začetni in robne pogoje. Začetni pogoj pri računih je gladina nekega stalnega toka v strugi. Za zgornji robni pogoj uporabimo hidrogram $Q(t)$, to je podatek o spreminjanju pretoka za nek poplavni val. Pred nadaljevanjem izračunov pa je potrebno še umeriti matematični model. To je postopek, pri katerem spreminjamo predvsem vrednost koeficienta hrapavosti na posameznih odsekih, da dobimo čim manjše odstopanje od rezultatov računa z rezultati meritev. Ko je matematični model umerjen, lahko z njim simuliramo potek gladin in hitrosti za različne primere stalnih pretokov in propagacijo poplavnih valov, ki v naravi še niso nastopali.

3 SPLOŠNO O POPLAVAH

3.1 Značilnosti poplav

Poplave so naravni pojav, ki so z drugimi geološkimi procesi oblikovale in še danes preoblikujejo zemeljsko površje. Poplavna območja so sestavni del vodotokov, ki predstavljajo pomemben vodni ekosistem in pomembno vplivajo na vodni režim, predvsem pri zmanjševanju konic poplavnih valov in pri bogatenju podtalnice. Poplavne površine imajo pomembno naravno dediščino, saj imajo bogat ekosistem. Veliko vode in naplavin, ki vsebujejo veliko hranljivih snovi, so dobra podlaga za razvoj življenja.

3.1.1 Opis pojava

(Brilly in sod., 1999) opisuje poplavo kot izredno dinamični naravni pojav, ki z zbiranjem in odtokom povečanih količin padavin povzroča intenzivne procese erozije v strugi vodotoka. Zaradi intenzivnega povečanja premeščanja lebdečih snovi se zelo poveča kalnost vodotoka. Poleg rinjenih plavin, ki se premeščajo po strugi, voda nosi različne snovi in predmete, ki jih imenujemo plavje. Ko se pretok zmanjšuje, se voda umika nazaj v strugo, na poplavljenih površinah pa pušča drobnozrnate naplavine in razne druge materiale.

Poplave pri nas delimo na:

- hudourniške
- rečne nižinske
- kraške
- poplave morja

Za sam pojav poplav je poleg intenzivnih padavin zelo pomembna predhodna količina vlage v zemljini. Čim večja je predhodna vlažnost zemljine, tem večja količina padle vode lahko površinsko odteče. Verjetnost pojava poplav je določena s soodvisnostjo med pretokom vode in povratno dobo oziroma verjetnostjo. Če je verjetnost dogodka $P(x) = 0,99$, to pomeni, da je povratna doba tega dogodka enaka:

$$T(x) = \frac{1}{1 - P(x)} = \frac{1}{1 - 0,99} = \frac{1}{0,01} = 100 \text{ let} \quad (1)$$

Tako govorimo o dogodku s stoletno povratno dobo. Povratna doba pa ne pomeni, da bo do dogodka s stoletno povratno dobo prišlo vsakih sto let, temveč to pomeni, da bo v povprečju v tisoč letih prišlo do desetih takih dogodkov. Teoretično si lahko večje poplave sledijo v kratkem obdobju, potem pa se dlje časa ne pojavijo več.

3.1.2 Lastnosti poplav v Sloveniji

V naših krajih poplave največkrat nastopijo zaradi intenzivnih padavin. Odtok vode, ki se zbira v vodotokih, je zelo odvisen od vlažnosti zemljišča. Ker se večinoma nahajamo v povirju vodotokov, se največkrat zgodi, da nastopijo večurne hudourniške poplave, izjemi sta le reki Drava in Mura, kjer je trajanje poplav lahko tudi več dni. Celoten pojav zbiranja in odtekanja voda spremljajo erozijski pojavi. V povirnih delih pride do površinskega spiranja zemljin, v strugah hudournikov in potokov pa prihaja do globinske in bočne erozije, to je spiranja in odnašanja zemeljskega ter naplavinskega materiala z dna in brežin struge vodotoka. Material, ki se erodira, voda nosi s seboj kot plavine in jih ob zmanjšanih porivnih silah odlaga, s tem pa se zaplavlja dno struge in se dviguje gladina vode. Ta pojav je naraven v hidrološkem ciklusu in se vedno ponavlja v odvisnosti od vremenskih razmer. Pri normalnih vremenskih razmerah so ti pojavi manj intenzivni. Včasih pa pride do izrednih razmer in sicer zaradi:

- izredno velikih in dolgotrajnih padavin;
- velike predhodne vlažnosti tal;
- padavin, ki povzročijo tajanje snežne odeje in s tem velik površinski odtok.

Poplave v Sloveniji so povezane z močnimi padavinami, ki jih nad naše kraje prinašajo vlažne frontalne zračne gmote. Cikloni potujejo iz Biskajskega zaliva po Padski nižini proti našim krajem. Do obilnih padavin pride, ko se tople in vlažne zračne mase začenjajo vzpenjati ob pobočju Dinarsko-Alpskega gorovja.

3.2 Ukrepi za varstvo pred poplavami

Brilly in sod. (1999) pravi, da vedno bolj intenzivna izraba pokrajine zahteva učinkovito varstvo pred poplavami, z drugimi besedami rečeno urejen vodotok. Cilj obrambe pred poplavami je v bistvu gospodarjenje s škodo, ki jo lahko povzročijo poplave. Obramba pred vodno ujmo zahteva specifičen pristop in ukrepe, ki jih glede na način delovanja delimo na aktivne (sprememba režima voda) in pasivne (brez spremembe režima voda). V obrambi pred poplavami pa se uveljavlja tudi delitev ukrepov glede na vrsto posegov, na vodogradbene in na negradbene (alternativne) ukrepe.

3.2.1 Vodogradbeni ukrepi

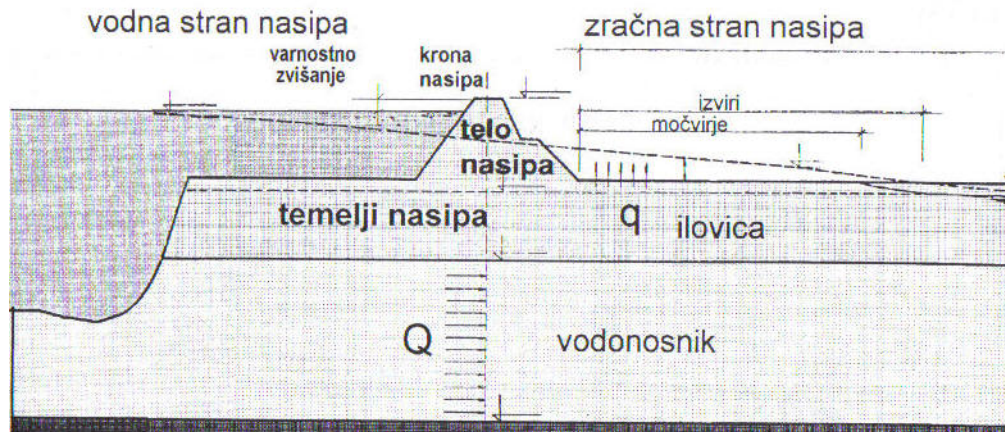
Vodogradbeni ukrepi pomenijo graditev objektov, s katerimi vplivamo na razmere v vodotoku (graditev hidrotehničnih objektov, regulacijski posegi). Ti ukrepi so eni najstarejših za varstvo pred poplavami in dolga stoletja celo edini. Z vodogradbenimi ukrepi posegamo v vodni režim in zaradi nepoznavanja zakonitosti sprožamo ali spreminjamo procese z nezaželenimi procesi. Brilly in sod. (1999) opozarja, da so poplave naravni pojav, ki se lahko delno spremenijo in katerih posledice lahko blažimo, ne moremo pa jih nikoli popolnoma preprečiti. Velja še opozoriti na nevarnost porušitve objekta, kajti poplavni val, ki nastane v tem primeru, odplavlja vse pred seboj in ljudje nimajo dosti časa za umik. To velja predvsem za objekte kateri so namenjeni varovanju pred poplavami, saj jih glede na naravo pojava ne moremo preizkusiti.

Poznamo več vrst vodogradbenih ukrepov:

- nasipi
- reguliranje struge vodotoka
- zadrževalniki
- oddušni kanali

Nasipi kot ukrep varstva pred poplavami so najstarejši objekti za zaščito pred poplavami in temeljni objekt pasivnega načina varstva, s katerimi odstranimo nevarnosti na območju. Z

nasipi preprečujemo razlitje vode po poplavnih območjih. Nasipi so v večini primerov grajeni iz zemlje (slika 5), sestavljeni so iz krone, telesa nasipa, ki ima zračno in vodno stran ter podlage nasipa, kjer temelji.



Slika 5: Nasip za varstvo pred poplavami (Brilly in sod., 1999).

Kot objekt je zelo podoben zemeljski pregradi. Ker je vodna stran le malo časa pod vodo (samo v primeru poplav), so nasipi zaradi manjših stroškov zgrajeni iz materiala, ki se nahaja v bližnji okolici in je lahko bolj prepusten ali slabše kakovosti kot na pregradi. Če bi nasipe gradili tako kot pregrade, bi bili predragi. Posledično pa je varnost nasipov glede na pregrade manjša.

Vrhnji del nasipa (krona nasipa) mora biti za določeno varnostno višino nad projektno gladino poplavne vode, za katero se dimenzionira nasip. Varnostno zvišanje mora biti dovolj veliko, da ob poplavi voda ne prelije nasipa in ga z erozijo ne uniči. Mikoš (2000) navaja osnovni pristop k določanju kriterijev za varnostno nadvišanje nasipov v nekaj točkah:

- varnostno nadvišanje temelji na izračunanih gladinah in je odvisno od točnosti izračunov, narave pojava in lastnosti konstrukcije
- z uporabo različnih postopkov pri hidravličnih izračunih (npr. upoštevanje uporov obrežne vegetacije), lahko dobimo razlike, ki so večje od pol metra
- stoječi valovi, ki spremljajo visoke vode, lahko presežejo tudi pol metra, premeščajo pa se tudi plavine, ki na eni strani poglobljajo strugo, na drugi strani pa pride do odlaganja plavin, posledica odlaganja pa je lokalno dvigovanje dna

- posledice nezadostnega dimenzioniranja objektov so različne, lahko pride do prelivanja nasipov, posledice so ogrožanje življenj ali poškodbe ceste.

Določanje ustreznih varnostnih višin je povezano z varnostjo objektov in njihove okolice ter bi jih morali izbirati glede na pomen objekta (preglednica 1).

Preglednica 1: Švicarska priporočila za nadvišanja brežin in premostitev na raznih vrstah vodotokov (po Vischerju in Huberju, 1993).

VRSTA VODOTOKA	NADVIŠANJE (m)	
	brežine	pod premostitvami
manjši vodotoki	0.5 – 0.8	0.7 – 1.0
reke	0.8 – 1.3	1.0 – 1.5
hudourniki	2.5	-

Švicarske izkušnje zahtevajo relativno velika zvišanja, kar ob upoštevanju hudourniškega značaja njihovih vodotokov ni presenetljivo. Pri nas bi se morali v gorskem in hribovitem svetu približati tem vrednostim.

Širina krone nasipa je odvisna od pomembnosti nasipa in potreb službe za varstvo pred poplavami. Biti mora dovolj široka, da omogoči prevoz in vzdrževanje telesa nasipa. Na nasip deluje hidrostatični pritisk z vodne strani, vzgonski tlak v temeljih nasipa in vpliv filtracije, ki povzroča različne oblike notranje ter zunanje erozije zaradi valovanja vode. Najnevarnejša je filtracija, ki lahko povzroči izpiranje materiala in s tem posedanje nasipa. Graditev nasipov v Sloveniji ni tako zahtevna, ker poplave ne trajajo dolgo. Čas poplav je kratek, tako da voda ne prevlaži nasipov, izjemi sta le reki Drava in Mura, kjer poplave lahko trajajo več dni. Za gradnjo lahko uporabimo tudi prepustnejše materiale, vendar je potrebno zadostno varnostno nadvišanje in skrbno vzdrževanje, ker je ob pojavu poplave premalo časa za kakršno koli ukrepanje.

Reguliranje struge vodotoka obsega vrsto ukrepov, s katerimi zmanjšujemo erozijo in povečujemo pretočno prevodnost struge. Odvajanje visokih voda brez posledic je glavni cilj

vsake ureditve vodotoka. Če razpoložljiva hidravlična prepustnost obstoječe struge vodotoka ni zadostna, Mikoš (2000) predlaga naslednje ureditveno regulacijske ukrepe:

- povečanje površine prečnega prereza z izkopi ali z gradnjo visokovodnih nasipov
- sprememba hrapavosti površin (npr. obrežni zidovi iz betona)
- sprememba hidravličnega radija (hidravlično ugodnejši prerez)
- povečanje padca dna struge vodotoka

Pretok v strugi povečamo s čiščenjem in z rednim vzdrževanjem struge. Večje vplive pa lahko dosežemo z razširitvijo struge in z oblaganjem brežin z gladkimi betonskimi oblogami. Ta ukrep lahko vodi tudi v krajinsko in estetsko težko sprejemljive rešitve. Pri oblikovanju pretočnega prereza je treba poiskati rešitev med hidravličnimi zahtevami in pogoji varstva narave. V kanaliziranem delu se struga pogloblja zaradi povečane hitrosti vode, dolvodno pa se struga zaplavlja.

Varnostna višina na brežini vodotoka predstavlja rezervo za primere pojavov stoječih valov, udarca valov, obilnega plavja na vodni površini. Mikoš (2000) predlaga minimalno varnostno višino na brežinah vodotokov vsaj 0,5 m, pri večjih padcih struge vodotoka (hudournik) in še posebno pod mostovi pa je potrebno varnostno višino povečati na 1,0 m do 1,5 m.

Zadrževalniki vode so objekti, s katerimi lahko ob poplavi zadržimo večje količine vode in tako zmanjšamo pretok v strugi. Delovanje takšnega ukrepa je podobno preusmerjanju visokih voda v posebej za te namene zgrajen zadrževalnik visokih voda, ki ni nujno zgrajen na vodotoku samem (npr. zadrževalnik na Drtjščici, kamor so preusmerjene visoke vode Radomlje). Zadrževalniki so lahko suhi ali mokri. Suhi se napolnijo samo ob pojavu poplav, mokri pa služijo kot večnamenske akumulacije, v katerih je del prostornine namenjen zadrževanju visokih voda ob poplavi. V Sloveniji zelo velikih zadrževalnih prostorov ni na voljo, saj jih je v ravninskem svetu težko izvesti, v hribovskem svetu pa prevladujejo ozke doline, kjer je težko s še sprejemljivo pregradno višino doseči večje zadrževalne prostore.

Mikoš (2000) opozarja, da dimenzioniranje zadrževalnikov visokih voda zahteva poznavanje celotnega hidrograma visokovodnega odtoka in ne samo največjega pretoka. Če zadrževalnik

opremimo z regulacijskimi organi (razna hidromehanska oprema, npr. zapornice), lahko tak regulacijski prelivni organ izboljša delovanje zadrževalnika. Hkrati pa s seboj prinaša nevarnost nepravilnega in nepravočasnega delovanja. Če slabo ocenimo potek visokovodnega vala, lahko z nepravilnim ravnanjem na prelivnih organih celo skokovito povečamo pretok pod njim. Pri načrtovanju zadrževalnikov pa je treba upoštevati še zaplavljanje zadrževalnega prostora. Pri umiku visokih voda lahko v posameznih primerih računamo na samočistilni efekt (spiranje) zadrževalnega prostora.

Oddušni kanali odvajajo vodo po suhi ali mokri strugi mimo ogroženega območja in zmanjšujejo nevarnost pred poplavami. Lokalno preusmerjanje visokih voda je alternativa reguliranju strug vodotokov za potrebe varstva pred poplavnimi vodami, če reguliranje zahteva njegovo masivno obzidavo ter obenem obstajajo potrebni pogoji za lokalno preusmerjanje visokih voda. Obstaja nevarnost, da s slabo rešitvijo na enem odseku vodotoka, prenesemo problem varstva pred poplavami dolvodno, kjer se lahko pojavi še v težje rešljivi obliki. Načelo rešitve preusmerjanja visokih voda je v tem, da se z razbremenilno strugo (kanali) odvede določeno količino vode. Tako se lahko ureditev prvotne struge za potrebe varstva pred visokimi vodami zmanjša ali pa celo ni potrebna.

Takšno preusmerjanje visokih voda je rešitev pred poglobljanjem nekega odseka z izrazito ožino, kjer del pretoka pred ožino odvezamo in ga vrnemo v prvotno strugo pod ožino. Razbremenitev visokih voda lahko izvedemo tudi na način, da lokalno odvedene visoke vode preusmerimo v jezero ali večji vodotok.

3.2.2 Alternativni ukrepi

Alternativni ukrepi so ukrepi, ki ne zahtevajo graditve hidrotehničnih objektov. Ukrepi morajo biti usmerjeni v zmanjšanje potencialne škode ob poplavah. V območjih, ki jih ogrožajo poplave, naj ne bo posebno občutljivih objektov. Naj bodo zelene površine oziroma take dejavnosti, ki jim poplave ne morejo škodovati.

Negradbeni ukrepi zajemajo več različnih ukrepov za varovanje pred poplavami. Brilly in sod. (1999) navajajo naslednje ukrepe:

- upravno-administrativni predpisi, s katerimi poskušamo doseči urejanje območja, na katerem bo škoda pri poplavih minimalna
- zavarovanje objektov pri zavarovalnicah
- ekonomska solidarna podpora širše družbene skupnosti
- preseljevanje ali sprememba namembnosti ogroženih območij
- zaščitni ukrepi pri projektiranju novih in rekonstrukciji starih objektov
- obveščanje ogroženih prebivalcev in izgradnja opozorilnih sistemov
- delovanje organizirane službe za redno in izredno zaščito pred poplavami, ukrepi, s katerimi poskušamo pri poplavih čim bolj omiliti škodo in zmanjšati posledice pojava.

Omenjeni ukrepi in njihovo delovanje so odvisni predvsem od družbe, saj se ukrepi načrtujejo in izvajajo s pomočjo administrativnega, pravnega, ekonomskega in političnega sistema družbe. V pripravo in izvajanje ukrepov morajo biti vključeni vsi deli družbe na vseh ravneh in ne samo vodarstvo in civilna zaščita. Glede na naše razmere je predvsem pomembno vključevanje občin in prebivalcev na ogroženih območjih.

Alternativni ukrepi zahtevajo majhna denarna vlaganja in visoko organiziranost družbe, kot je delovanje zavarovalne politike, davčne politike in civilne zaščite. Ukrepi temeljijo na analizi ogroženosti in na celovitem urejanju vodnega režima. Z njimi vplivamo na razvoj dejavnosti in obnašanje ljudi na ogroženih in na vplivnih območjih.

3.2.3 Ocenjevanje projektov

Cilj postopka je iskanje optimalnih rešitev oziroma oblikovanje najboljših rešitev na podlagi izdelane ustrezne dokumentacije in vključevanja prizadetih v proces. Celoten postopek mora biti zakonsko urejen, tako da sta vloga in odgovornost posameznih subjektov dovolj jasni in določeni. Postopki pri izvajanju hidrotehničnih projektov so dobro znani. V zadnjem času pa je poudarek predvsem na začetnih fazah projekta. Pri tem ločimo več faz (preglednica 2, Gardiner, 1990).

Prva faza je najbolj zahtevna in pomembna, saj imajo napačne odločitve pri temeljnih usmeritvah na začetku projekta lahko izredno velike negativne posledice. Ta faza zahteva vsaj 30 odstotkov časa in prav toliko sredstev glede na izvedbo celotnega projekta. Potrebno je izdelati več tehnično in družbeno sprejemljivih rešitev in določiti njihove pozitivne in negativne posledice ter vplive na podlagi strokovnega mnenja svetovalcev.

Proces odločanja se organizira in vodi kot poseben projekt z lastnim programom in dokumentacijo. Izbrana različica mora biti tehnično izvedljiva, sprejemljiva za okolje in ekonomsko upravičena.

Preglednica 2: Faze projekta.

Stopnja	Procesi	Dokumentacija
Predprojektna dejavnost	<ul style="list-style-type: none">• ugotavljanje potreb• določanje zahtev• opredelitev ciljev• izbira tehnično sprejemljivih različic• priprava dokumentacije za vključevanje ostalih dejavnikov, vključujoč javno mnenje• izbira različic• zagotavljanje finančnih virov	<ul style="list-style-type: none">• predlogi in zahteve prizadetih• raziskave, meritve in opazovanja• sklepi upravnih služb• določanje meril• odločitve pristojnih organov, organizacij
Graditev projekta	<ul style="list-style-type: none">• izdelava izvedbenih načrtov• graditev objekta• izdelava projekta izvedenih del	<ul style="list-style-type: none">• projektna dokumentacija• poročila o izvedbi posameznih faz
Poprojektna dejavnost	<ul style="list-style-type: none">• spremljanje vpliva objekta• ocenjevanje učinkovitosti• vzdrževanje• predlog za rekonstrukcijo	<ul style="list-style-type: none">• raziskave, meritve in opazovanja• poročila inšpekcijskih služb

4 POPLAVE LETA 1990

4.1 Razpored padavin in njihov vpliv na poplave 1990

V Sloveniji lahko povzročijo poplave različno močne padavine, odvisno od tega, kakšne so odtočne razmere, na katerem delu vodotoka se poplave pojavijo in od trajanja intenzivnih padavin. V neurju leta 1990 je bilo največ škode v zgornjem toku rek, kjer so vodotoki še hudourniškega značaja. V tem primeru niso toliko pomembne dnevne količine padavin kot intenzivne padavine v krajših časovnih obdobjih. Analize razmer, opravljene na Hidrometeorološkem zavodu Republike Slovenije v Ljubljani pokažejo, da so bile na območjih, kjer je nastal visokovodni val, zelo intenzivne padavine v manj kot 10-urnem časovnem obdobju.

4.1.1 Vremenske razmere

V zadnjem tednu oktobra se je nad Veliko Britanijo in vzhodnim Atlantikom zadrževalo zelo obsežno območje nizkega zračnega pritiska. Njegovo vzhodno obrobje in s tem tudi Slovenijo so večkrat prešle oslABLJENE hladne fronte, za njimi pa je ponovno dotekal toplejši in vlažen zrak. Močne padavine so bile v tem obdobju zabeležene v severozahodnih krajih, zmerne padavine pa po ostalih krajih po Sloveniji.

Vremenska situacija se je spremenila ob koncu meseca, ko so je območje nizkega zračnega pritiska začelo pomikati prek Severnega morja proti Skandinaviji in je zato že 1. novembra 1990 začel nad naše kraje dotekati hladnejši zrak. Ob prehodu te hladne fronte pa je padavine dobila celotna Slovenija.

4.2 Razpored padavin

Padavine, ki so se pojavile v Sloveniji 31. oktobra in 1. novembra, so bile na nekaterih območjih zelo intenzivne, še posebno tam, kjer se je dviganju zraka v ciklonalnem območju in prehodom hladne fronte pridružilo tudi dviganje zraka zaradi vpliva gorskih ovir.

Dnevne in tudi dvodnevne padavine niso bile tako intenzivne, da bi v normalnih razmerah ob enakomerni časovni porazdelitvi povzročile poplave. Že pred začetkom teh dvodnevnih padavin je bilo večdnevno padavinsko obdobje, zato so bila tla zelo namočena in tudi vodostaji na rekah so bili razmeroma visoki. Poplave so torej povzročile zelo intenzivne padavine, ki so padle v manj kot desetih urah.

4.3 Poplave leta 1990 ob Savi med Zidanim mostom in Bregano

Šifrer (1990) pravi, da je Sava močno narasla že v Ljubljanski kotlini, še močneje pa od Zidanega mosta navzdol, kjer so jo dosegle silovito narasle vode Savinje z območja največjih nalivov v Savinjski dolini. Zato je prišlo do posebno obsežnih poplav ob Savi navzdol proti Sevnici in Krškem in še posebno na Krško-brežiškem polju, kjer so se poplavne vode razlile več kilometrov na široko in drle proti Dobovi in Bregani ter še dalje proti Zagrebu. Ob tem je zanimiva ugotovitev, da pritoki Save med Zidanim mostom in Bregano zaradi skromnih padavin na njihovih porečjih skoraj niso poplavljali.

Zanimivo je tudi dejstvo, da Sava na vsej poti med Zidanim mostom in Boštanjem pri Sevnici skoraj ni prestopila bregov, čeprav se njena dolina med Radečami in vasjo Kompolje močno razširi. Obsežnejše so bile poplave med Sevnico in Dolnjim Leskovcem pri Brestanici, kjer je Sava poplavela okrog 200 - 250 m široko dolinsko dno, voda pa je zalila tudi spodnje dele dolin savskih pritokov, predvsem reke Mirne.

Do ponovne zožitve poplavnega sveta je prišlo v dolini Save med Brestanico in Krškim, kjer se je zaradi zelo tesne doline in na široko ob strugi zasajenih topolov, ki so zavirali hiter odtok vode, gladina močno dvignila. Narasla Sava je prestopila bregove in poplavela skozi Krško, po desni strani speljano novo cesto z Valvazorjevim nabrežjem in hišami v Dalmatinovi ulico (slika 6).



Slika 6: Visok nasip za novo cesto skozi Krško je preprečeval, da bi voda iz Dalmatinove ulice, kjer je zalila številne zgradbe, hitreje odtekla (UJMA, 1991)

Na ravnem Krško-brežiškem polju so se poplavne savske vode razlile čez 3 km na široko, predvsem na desni strani, kjer se je voda razlila do vasi Mrtvice, Vihre, Skopice in Krške vasi. Med Brežicami in Bregano je bil kljub narasli Savi obseg poplav manjši. K temu so pripomogli obsežni nasipi za zaščito Čateža ter Čateških toplic. Precej manj učinkoviti so bili nasipi na levi strani Save, ki so bili ob izlivu Gabrnice prekinjeni. Tako je narasla Sava zalila vas Trnje in ves obsežni poplavni svet ob spodnjem toku Gabrnice ter velik del Mosteca. Bolj na široko je Sava poplavljala še jugovzhodneje odtod, kjer je na desni strani segla do naselij Ribnica, Jesenice, Obrežje in Bregana (slika 7).

Sava se je na široko razlivala po poplavnih ravninah, ki so bile zaradi tega izpostavljene preoblikovanju. Zaradi velikih količin proda in peska, ki ga je prinašala s seboj, je prišlo tudi na ravninah do močnejšega nasipavanja. K temu je prav veliko prispeval značaj akumulacije. Reka Sava je veliko proda in peska odložila že takoj nad koritom, kjer je drevje in grmovje ter drugo rastje zavrlo njen tok in s tem tudi njegovo transportno moč. Kot posledica nasipavanja so takoj za koritom, nastale nizke pregrade, za katerimi se je še dolgo po povodnji zadrževala voda (slika 8). V tako nastalih plitvih bazenih se je že ob poplavi odložilo veliko peska, ob kasnejšem zastajanju vode v njih pa tudi drobnejšega ilovnatega in glinenega plavja. Do tovrstnega nasipavanja ni prišlo samo ob Savi med Zidanim mostom in Krškim. V večjem obsegu se je to zgodilo na poplavnem svetu na Krško-brežiškem polju ter ob Savi navzdol proti Dobovi in Bregani.



Slika 8: Pogled po poplavni ravnici proti Savi na sredini slike. Novo nasut prod in pesek zavira odtok vode s poplavnega sveta (UJMA, 1991)

Ob tej poplavi se je pokazalo, kako lahko rastje ščiti tla pred erozijo. Izdatnost erozije je bila ob moči in hitrosti vodnih tokov močno odvisna od značaja tal in celo od kmetijskih kultur na njih. Tam, kjer so rasle različne krmne in druge rastline, je bila erozija veliko manj učinkovita kot tam, kjer so pridelke že pospravili. Močno oviro je eroziji pomenilo nekaj centimetrov

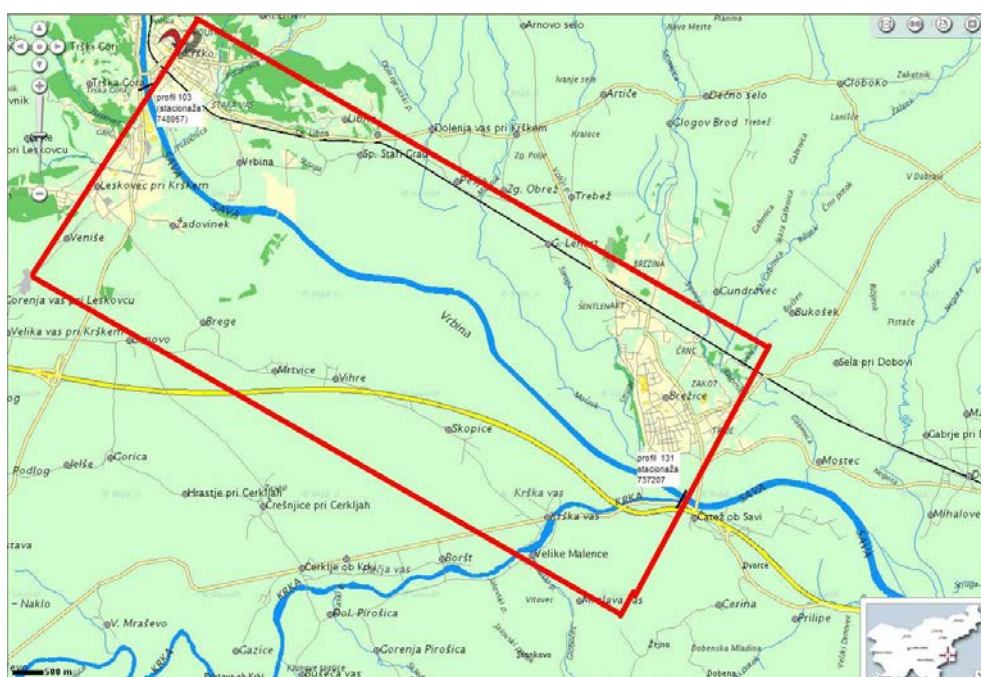
visoko ozimno žito. Na tistih mestih, kjer je eroziji uspelo odstraniti žito pa je potem lahko hitreje napredovala.

Naselja na severozahodnem in osrednjem delu Krško-brežiškega polja, nekako do Skopic in Gornjega Lenarta, so prestala to ujmo precej bolje kot tista jugovzhodno odtod proti Brežicam, Dobovi in Bregani. Pri tem je prav gotovo pomembno dejstvo, da se višinska razlika med ledenodobno teraso in najnižjim dolinskim dnom ob Savi od Krškega navzdol proti Brežicam in Dobovi hitro manjša, k temu pa so pomembno prispevala tudi najmlajša nasipanja, povezana s prenosom proda in peska po Savi navzdol.

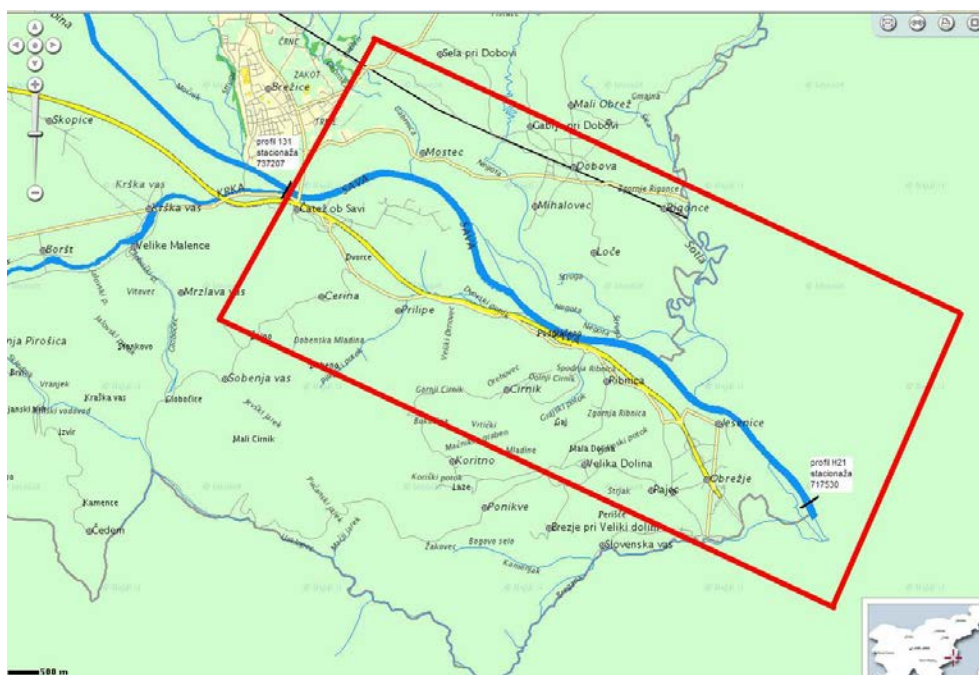
5 RAČUN POPLAVNIH VALOV S PROGAMOM PCFLOW2D

Problematika poplavne varnosti področja okrog NEK (Nuklearna elektrarna Krško) in objektov NEK je bila do sedaj že večkrat obravnavana. V diplomski nalogi pa sta vključno s tem področjem obravnavani še dolvodni območji predvidenih akumulacij HE Brežice in HE Mokrice.

Ker je teren zelo razgiban, s številnimi podolgovatimi vdolbinami, ki bi usmerjale tok v primeru poplavljenega Krško-brežiškega polja, uporaba običajnega enodimenzijskega (1D) matematičnega modela za ugotavljanje hidravličnih razmer ne zadostuje. Za oceno poplavne varnosti dejanskega stanja zgrajenih nasipov in analize načina prehoda visokovodnih valov preko obravnavanega območja je v diplomski nalogi uporabljen dvodimenzijski (2D) matematični model PCFLOW2D. Obravnavani območji 2D matematičnega modela sta prikazani na slikah 9 in 10.



Slika 9: Prvo z modelom PCFLOW2D obravnavano območje predvidene akumulacije HE Brežice.



Slika 10: Drugo z modelom PCFLOW2D obravnavano območje predvidene akumulacije HE Mokrice.

5.1 Podatki

5.1.1 Geometrijski podatki

V okviru študije z naslovom "Ocena stopnje varnosti NE Krško pred poplavami" (Četina in Krzyk, 2005) je bil v skladu s projektno nalogo obravnavan samo odsek med profilom 103 (stacionaža 748957) in profilom 120 (stacionaža 741842). Novo obravnavano območje predvidene akumulacije HE Brežice pa bo potekalo med profilom 103 (stacionaža 748957) in profilom 131 (stacionaža 737207). Območje predvidene akumulacije HE Mokrice pa bo potekalo med profilom 131 (stacionaža 737207) in profilom H21 (stacionaža 726600).

Za potrebe diplomske naloge nam je naročnik projektne naloge posredoval naslednje geodetske podatke:

- rastrska topografska karta 1:5000 širšega dela terena obravnavanega območja HE Brežice in HE Mokrice v digitalni obliki;

- geodetski tridimenzijski posnetek terena na gorvodnem področju od NEK, skupaj s platojem nuklearke in okoliškim terenom, posnetim v letu 2003 (merilo 1:1000);
- računske prečne profile struge reke Save, ki so bili pripravljene za enodimenzijske izračune matematičnega modela HEC-RAS;
- izvedene trase in geometrijske značilnosti zaščitnih nasipov ob levem in desnem bregu reke Save

Za potrebe 2D matematičnega modela je bilo potrebno pripraviti digitalni model terena (DTM) obravnavanih področij. V ta namen se je opravila digitalizacija rastrskih geodetskih kart področja, za katerega ni bilo podatkov v tridimenzijski obliki. Digitalizirale so se na kartah vrisane plastnice in geodetske točke, ki so imele definirane kote. V študiji o poplavni varnosti NEK (Četina in Krzyk, 2005) je navedeno, da so se na stičišču med digitaliziranimi kartami in novim posnetkom (3D) ponekod pojavila precejšnja višinska odstopanja (do 2.5 m). Na teh lokacijah se je potek plastnic obeh modelov prilagodil in se jih je med seboj smiselno povezalo.

Da bi se izboljšala natančnost digitalnega modela terena, so se geodetske točke med seboj povezale s tridimenzijskimi poligonskimi črtami za vsak tip objekta kot so varovalni zidovi in nasipi posebej. Tako pripravljene podatke se vnese v grafični paket QuickSurf, s pomočjo katerega je bila narejena interpolacija na osnovi trikotnih elementov in formiran DTM. DTM se potem uporabil pri avtomatski generaciji višinskih kot terena za razmeroma gosto enakomerno numerično mrežo ($\Delta x = \Delta y = 20$ m), uporabljeno v modelu PCFLOW2D, ki je imela 535 točk v podolžni y smeri in 249 točk v prečni x smeri za prvo obravnavano območje predvidene akumulacije HE Brežice. Tudi za drugo obravnavano območje predvidene akumulacije HE Mokrice je bila uporabljena enako gosta numerična mreža ($\Delta x = \Delta y = 20$ m), ki je imela 484 točk v podolžni y smeri in 322 točk v prečni x smeri.

Ker gostota numerične mreže presega širino krone nasipa, se zgodi, da se pri računalniškem prikazu terena pojavlja navidezno žagasta oblika posameznih objektov (npr. nasipov). Za pravilno ponazoritev funkcije nasipa je bilo dovolj določiti višinski podatek računskim točkam pravokotnih celic tako, da se med seboj navezujejo vsaj na stičnih vogalih, ni pa nujno

vzdolž skupnih stranic. Situaciji prvega in drugega območja sta skupaj z uporabljenimi numerično mrežo računskih točk, prečnimi profili in položajem podolžnih profilov podani na prilogah A1 in A2.

Prvo obravnavano območje je dolgo 10660 m in široko 4940 m. Simulirane so bile tokovne razmere pri različnih hidroloških razmerah. Umerjanje je bilo opravljeno za pretok $Q_{um} = 3650 \text{ m}^3/\text{s} + 204 \text{ m}^3/\text{s}$ reka Krka, hidrodinamične razmere pa nato izračune za naslednje pretoke določene povratne dobe: $Q_{100} = 3290 \text{ m}^3/\text{s} + 310 \text{ m}^3/\text{s}$ reka Krka in $Q_{1000} = 4040 \text{ m}^3/\text{s} + 310 \text{ m}^3/\text{s}$ reka Krka. Prvo obravnavano območje se začne dolvodno od mostu čez reko Savo v Krškem pri tovarni papirja Vipap Videm Krško (slika 11) in se konča malo pred mostom, ki povezuje kraja Brežice in Čatež ob Savi (slika 12).



Slika 11: Začetek prvega obravnavanega območja dolvodno od mostu čez reko Savo v Krškem.



Slika 12: Konec prvega obravnavanega območja malo pred mostom, ki povezuje kraja Brežice in Čatež ob Savi.

Drugo obravnavano območje je dolgo 9640 m in široko 6400 m. Tako kot za prvo so bile tudi za drugo simulirane tokovne razmere pri različnih hidroloških razmerah: umeritvena pretoka sta bila $Q_{um1} = 3854 \text{ m}^3/\text{s}$ in $Q_{um2} = 3267 \text{ m}^3/\text{s}$, hidrodinamični izračuni pa nato izvršeni še za pretoka: $Q_{100} = 3393 \text{ m}^3/\text{s}$ in $Q_{1000} = 4100 \text{ m}^3/\text{s}$. Drugo obravnavano območje se začne med sotočjem reke Krke in Save (slika13) ter mostom, ki povezuje kraja Brežice in Čatež ob Savi in se konča na območju republike Hrvaške.



Slika 13: Sotočje reke Krke in Save.

Pomembnejša regulacijska dela (Mikoš, 2000), opravljena v spodnjem toku reke Save za zaščito pred poplavljanjem, so: do leta 1981 je bil za zaščito jedrske elektrarne Krško na levem bregu zgrajen 2,8 km dolg zaščitni nasip, povezan s 780 m dolgim levobrežnim nasipom ob Starovaškem potoku. Od Krškega navzdol sta v dolžini 22 km oba bregova utrjena. V letih 1960 do 1967 je bil od Brežic navzdol zgrajen 3,8 km dolg desnobrežni in v letih 1981 do 1982 4,4 km dolg levoobrežni nasip za zaščito ravnine pri Termah Čatež in toplic (slike 14, 15, 16, 17, 18 in 19).



Slika 14: Pogled na desni zavoje reke Save pri Čateških Toplicah.



Slika 15: Zgrajeni nasip na levi strani reke Save za protipoplavno zaščito kraja Mostec.



Slika 16: Zgrajeni nasip na levi strani reke Save za protipoplavno zaščito kraja Brežice.



Slika 17: Začetek obstoječega zidu na desni strani reke Save za protipoplavno zaščito kraja Čatež ob Savi.



Slika 18: Konec obstoječega zidu na desni strani reke Save za protipoplavno zaščito kraja Čatež ob Savi, ki nato preide v nasip.



Slika 19: Obstoječi nasip na desni strani reke Save za protipoplavno zaščito Čateških Toplic.

5.1.2 Hidrološki podatki

Hidrološki podatki za Savo na obravnavanem odseku so razmeroma nezanesljivi, prav tako so se uradne vrednosti značilnih pretokov v zadnjem času spremenile. O veljavnosti teh pretokov obstajajo v strokovnih krogih različna mnenja, razlog za to so nezanesljivi podatki o zabeleženih visokih pretokih z vodomernih postaj pripadajočega vodozbirnega območja.

Za umerjanje 2D matematičnega modela ožjega področja okrog jezua NEK v študiji stopnje poplavne varnosti NE Krško (Četina in Krzyk, 2005) sta bila uporabljena pretoka, ki sta bila zabeležena ob poplavah 2. 11. 1990 in 5. 11. 1998. Za visoko vodo iz leta 1990 je bilo po poplavi ocenjeno, da je bil pretok zelo blizu vrednosti pretoka stoletne povratne dobe. Ta je po takratnih hidroloških študijah v profilu NEK znašal $3210 \text{ m}^3/\text{s}$. Na osnovi podatkov z vodomernih postaj Sava - Hrastnik, Mirna - Jelovec, Sevnična - Orešje in Savinja - Veliko Širje je ocenjeno, da sta pretoka v času poplav znašala $Q = 3240 \text{ m}^3/\text{s}$ leta 1990 in $Q = 3200 \text{ m}^3/\text{s}$ leta 1998. Ker sta vrednosti pretokov skoraj enaki, se je pri umerjanju v obeh letih upošteval kot merodajni pretok $Q = 3240 \text{ m}^3/\text{s}$. Po uradni hidrološki študiji (IZV, 2002) je bil pretok visoke vode leta 1990 v profilu NEK $3050 \text{ m}^3/\text{s}$, leta 1998 pa $3001 \text{ m}^3/\text{s}$. Zaradi majhne razlike med pretokoma se je pri umerjanju po tej uradni študiji upoštevalo samo vrednost $3050 \text{ m}^3/\text{s}$.

Na osnovi novejših ocen je bil ob poplavi 1990 pretok v profilu jezua NEK skupaj z desnim poplavnim področjem ca. $3650 \text{ m}^3/\text{s}$ (Ciuha, 2006; Steinman in sod., 2007). Zato smo v okviru te diplomske naloge za umerjanje na območju akumulacije HE Brežice upoštevali pretok Save $3650 \text{ m}^3/\text{s}$ in pripadajoči pretok Krke $204 \text{ m}^3/\text{s}$. Zabeležena konica vala Krke v Podbočju leta 1990 je bila sicer višja, vendar je treba upoštevati ca. 8 ur zamika zaradi potovanja vala do sotočja s Savo. Dolvodno na območju HE Mokrice pa smo pri umerjanju upoštevali skupni pretok Save $Q = 3854 \text{ m}^3/\text{s}$ brez dodatnega pritoka Sotle, ki se Savi priključi dolvodno od predvidene pregrade HE Mokrice. Kot drugi umeritveni pretok pa smo upoštevali $Q = 3267 \text{ m}^3/\text{s}$, kar je konica uradno zabeleženega vala leta 1990 na VP Čatež.

Za nadaljnje izračune hidrodinamičnega stanja na območju predvidenih akumulacij HE Brežice in HE Mokrice so bili uporabljeni podatki, ki so podani v preglednici 3. Pretoki

določenih povratnih dob za območje akumulacije HE Brežice so bili povzeti iz študije IZV (2002), za območje HE Mokrice pa zaradi primerljivosti rezultatov iz nekoliko starejše študije Zakrajšek in Krzyk (1997).

Preglednica 3: Pretoki, ki so bili uporabljeni za izračune hidrodinamičnega stanja na območju predvidenih akumulacij HE Brežice in HE Mokrice.

Računi na območju predvidene akumulacije HE Brežice				Računi na območju predvidene akumulacije HE Mokrice			
Št. računa	Pretok [m ³ /s]	Manningov Koeficient n _g		Št. računa	Pretok [m ³ /s]	Manningov koeficient n _g	
		struga	pop.področje			struga	pop.področje
BRE35	Q _{um} =3650+204 Krka	0,030	0,044	MOK13	Q _{um1} =3854	0,028	0,040
BRE36	Q ₁₀₀ =3290+310 Krka	0,030	0,044	MOK14	Q _{um2} =3267	0,028	0,040
BRE37	Q ₁₀₀₀ =4040+310Krka	0,030	0,044	MOK17	Q _{um2} =3267	0,030	0,044
				MOK16	Q ₁₀₀ =3393	0,028	0,040
				MOK15	Q ₁₀₀₀ =4100	0,028	0,040

V nalogi so simulirane tokovne razmere pri dejanskih nestalnih razmerah ob prehodu poplavnega vala. Hidrograma poplavnih valov, uporabljena za zgornji robni pogoj prvega obravnavanega območja predvidene akumulacije HE Brežice, sta bila dobljena s pomočjo nove konsumpcijske krivulje profila NEK (Steinman in sod., 2007) in nad jezom zabeleženega poteka gladin pri valovih novembra 1990 in 1998. Val za leto 1990 (slika 25) ima konico 3683 m³/s, ki je nastopila 19 ur po začetku naraščanja pretoka, za dotok Krke je bila upoštevana vrednost Q = 193 m³/s. Val iz leta 1998 (slika 26) pa ima konico 3284 m³/s, ki se pojavi 14 ur po začetku naraščanja pretoka, za dotok Krke je bila upoštevana vrednost Q = 157 m³/s.

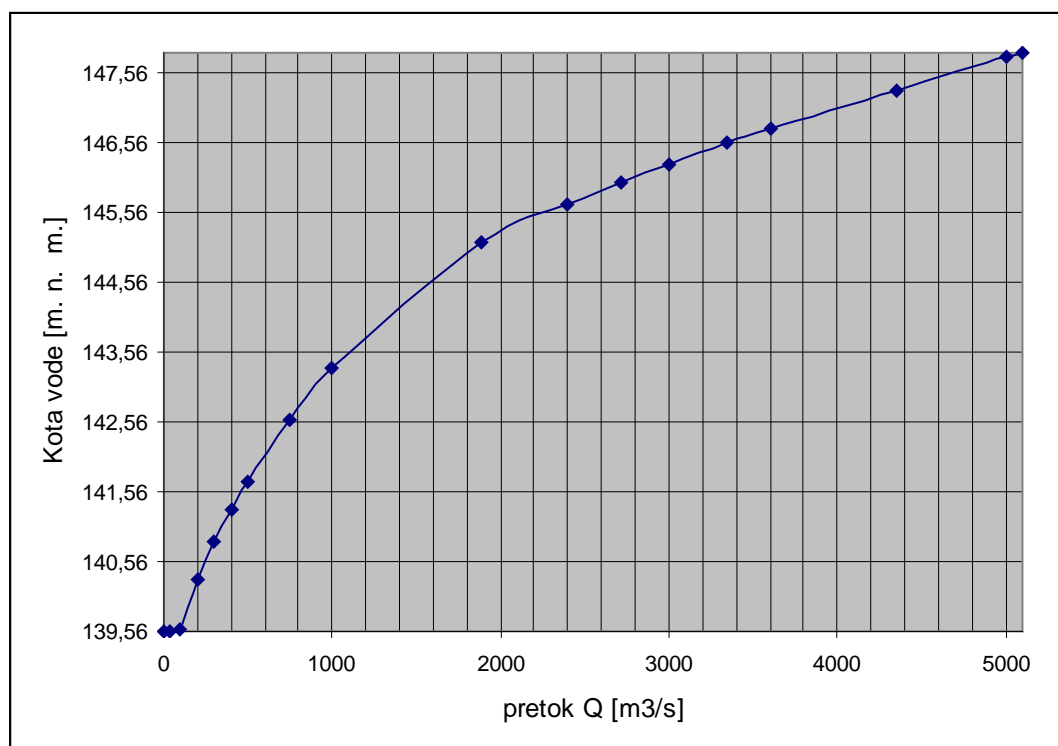
5.1.3 Hidravlični podatki

Na spodnjem robu 2D matematičnega modela prvega obravnavanega območja, v profilu 131, je upoštevana konsumpcijska krivulja, ki je rezultat enodimenzijskih izračunov s pomočjo matematičnega modela HEC-RAS, ki ga je pripravil IBE. 1D računi so bili opravljeni do vrednosti pretoka 5100 m³/s. Vse upoštrevane vrednosti pretokov in kote gladine vode na

spodnjem robu 2D matematičnega modela prvega obravnavanega območja so številčno prikazane v preglednici 4, grafično pa na sliki 20.

Preglednica 4: Konsumpcijska krivulja na dolvodnem robu 2D matematičnega modela prvega obravnavanega območja na območju predvidene akumulacije HE Brežice.

Pretok Q [m ³ /s]	Kota vode [m n. m.]
0	139,56
40	139,57
100	139,59
200	140,30
300	140,84
400	141,30
500	141,71
750	142,59
1000	143,33
1890	145,13
2400	145,69
2720	145,99
3000	146,24
3350	146,55
3600	146,75
4350	147,32
5000	147,78
5100	147,85



Slika 20: Uporabljen konsumpcijska krivulja na dolvodnem robu 2D matematičnega modela prvega obravnavanega območja predvidene akumulacije HE Brežice.

Na spodnjem robu 2D matematičnega modela drugega obravnavanega območja, v profilu H21, je upoštevana konsumpcijska krivulja, ki je številčno prikazana v preglednici 5, grafično pa na sliki 21.

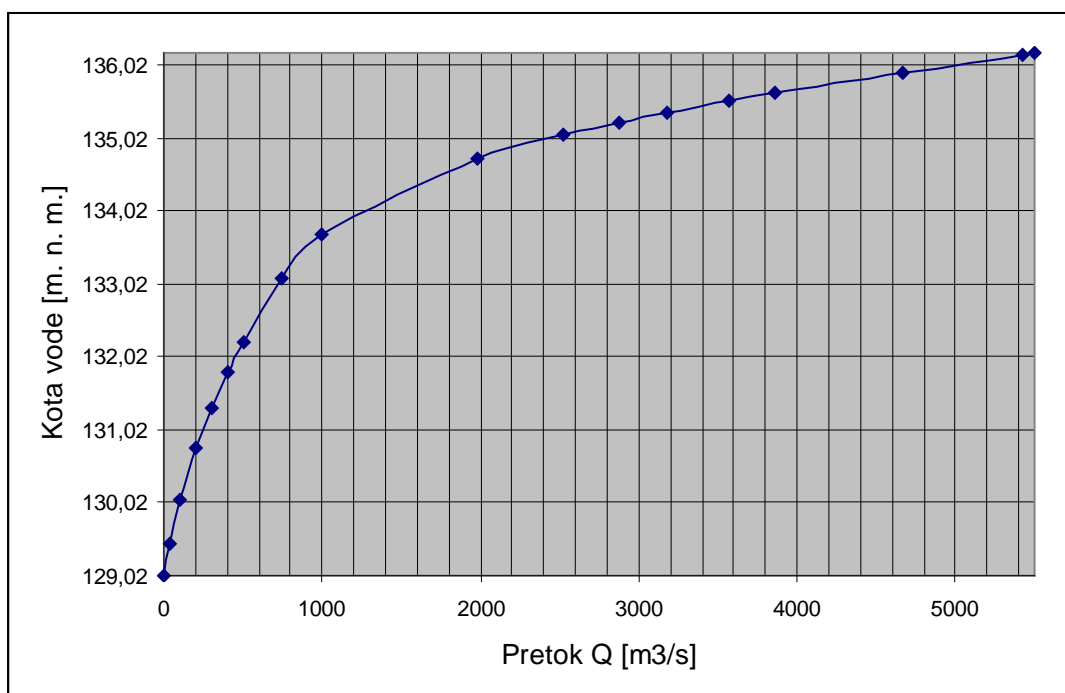
Preglednica 5: Konsumpcijska krivulja na dolvodnem robu 2D matematičnega modela drugega obravnavanega območja predvidene akumulacije HE Mokrice.

Pretok Q [m³/s]	Kota vode [m n. m.]
0	129,02
40	129,46
100	130,06
200	130,77
300	131,32
400	131,80
500	132,23
750	133,10

se nadaljuje

nadaljevanje

1000	133,71
1980	134,74
2525	135,06
2873	135,23
3182	135,37
3570	135,52
3854	135,63
4668	135,92
5420	136,16
5500	136,19



Slika 21: Uporabljena konsumpcijska krivulja na dolvodnem robu 2D matematičnega modela drugega obravnavanega območja predvidene akumulacije HE Mokrice.

Uporabljeni dvodimenzijski matematični model dopušča možnost podajanja različnih vrednosti koeficienta hrapavosti po posameznih podpodročjih oz. celo v vsaki posamezni celici. Za določanje teh vrednosti bi potrebovali terenske meritve hitrosti in gladin pri visokih vodah, ki bi bile bolj natančne in bolj zanesljive od razpoložljivih.

S postopkom umerjanja so bili določeni naslednji koeficienti hrapavosti, ki so navedeni tudi v preglednici 3:

- za prvo obravnavano območje predvidene akumulacije HE Brežice za strugo reke Save $n = 0,030 \text{ sm}^{-1/3}$, za poplavna področja pa $n = 0,044 \text{ sm}^{-1/3}$
- za drugo obravnavano območje predvidene akumulacije HE Mokrice za strugo reke Save $n = 0,028 \text{ sm}^{-1/3}$, za poplavna področja pa $n = 0,040 \text{ sm}^{-1/3}$

5.2 2D matematični model PCFLOW2D

5.2.1 Osnovne enačbe

V modelu PCFLOW2D je uporabljen Kartezični koordinatni sistem. Kontinuiteta je opisana z enačbo (2), dinamični enačbi (3) in (4), ki opisujeta dvodimenzionalni nestalni globinsko povprečni tok, pa sta podani v konservativni obliki. Zadnja dva člena na desnih straneh enačb izražata vpliv turbulentne viskoznosti, ki jo lahko določimo s pomočjo znanega $k - \varepsilon$ modela turbulence. Zato sta potrebni dve dodatni transportni enačbi za turbulentno kinetično energijo na enoto mase k ter stopnjo njene disipacije ε (enačbi 5 in 6).

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2)}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = -gh \frac{\partial h}{\partial x} - gh \frac{\partial z_b}{\partial x} - ghn^2 \frac{u\sqrt{u^2+v^2}}{h^{4/3}} + \frac{\partial}{\partial x} (h\nu_{ef} \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (h\nu_{ef} \frac{\partial u}{\partial y}) \quad (3)$$

$$\frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial(hv^2)}{\partial y} = -gh \frac{\partial h}{\partial y} - gh \frac{\partial z_b}{\partial y} - ghn^2 \frac{v\sqrt{u^2+v^2}}{h^{4/3}} + \frac{\partial}{\partial x} (h\nu_{ef} \frac{\partial v}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (h\nu_{ef} \frac{\partial v}{\partial y}) \quad (4)$$

$$\frac{\partial(hk)}{\partial t} + \frac{\partial(huk)}{\partial x} + \frac{\partial(hvk)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} (h \frac{\nu_{ef}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (h \frac{\nu_{ef}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial y}) + hG - c_D h\varepsilon + hP_{kv} \quad (5)$$

$$\frac{\partial(hu\varepsilon)}{\partial x} + \frac{\partial(hv\varepsilon)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} (h \frac{\nu_{ef}}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (h \frac{\nu_{ef}}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial y}) + c_1 \frac{\varepsilon}{k} hG - c_2 \frac{\varepsilon^2}{k} h + hP_{\varepsilon v} \quad (6)$$

kjer je:

- t čas
- h globina vode
- u in v ...komponenti hitrosti v x in y smeri
- z_b kota dna
- n koeficient hrapavosti po Manningu
- g gravitacijski pospešek
- ν_{ef} efektivni koeficient viskoznosti
- k turbulentna kinetična energija na enoto mase
- ε stopnja njene disipacije

Izrazi za G (produkcija k zaradi horizontalnih gradientov hitrosti), P_{kv} in P_{zv} (izvorna člena zaradi trenja ob dno) kakor tudi vrednosti standardnih turbulentnih konstant (c_D , c_μ , C_1 , C_2 , σ_k in σ_ε) so podani v literaturi (Četina, 1998).

V primeru računov toka na obravnavanem območju predvidene akumulacije HE Brežice in območju predvidene akumulacije HE Mokrice na reki Savi je bilo potrebno izvesti veliko število računov. Ti so bili zelo dolgotrajni, saj je bilo razmerje med realnim časom poteka vala in porabljenim računskim časom za vsak posamezen primer 1:5. Tako je bilo zaradi numerične zahtevnosti, potrebne goste računske mreže in kratkega časovnega koraka za simulacijo prehoda celotnega vala preko območja potrebnih celo več dni za vsak obravnavani primer.

Zaradi prihranka časa za določitev koeficienta efektivne viskoznosti ν_{ef} niso uporabljene dodatne enačbe 5 in 6, temveč je upoštevana konstantna vrednost ν_{ef} preko celotnega obravnavanega območja. Pri tej predpostavki velja, glede na raziskave in izkušnje, da pri toku s prosto gladino v razmerah nestalnega toka z razmeroma naglimi spremembami pretokov in gladin ν_{ef} ne vpliva bistveno na rezultate. Poleg tega je ugotovljeno, da se dobi pri toku v rekah brez izrazitih recirkulacijskih področij, kakršno je tudi obravnavano območje reke Save, razmeroma dobre rezultate tudi z uporabo konstantne vrednosti efektivne viskoznosti, če je leta realno ocenjena (Četina, 1988).

Pri računih toka Save je v vseh primerih uporabljena vrednost $\nu_{ef} = 0,1 \text{ m}^2/\text{s}$, ki je določena kot povprečna vrednost rezultatov stalnega toka s $k - \varepsilon$ modelom pri toku Savinje v Laškem (Četina in Krzyk, 2002) in toka Soče v območju HE Plave (Četina in Krzyk, 2001). Izbrana vrednost konstantne vrednosti koeficienta efektivne viskoznosti $\nu_{ef} = 0,01 \text{ m}^2/\text{s}$ se je izkazala za ustrezno tudi pri obravnavi podobnega hidrodinamičnega problema toka Malega Grabna v Ljubljani (Četina in Krzyk, 2004).

5.2.2 Metoda reševanja in računalniški program

Povezan sistem parcialnih diferencialnih enačb (2) - (4) se rešuje s pomočjo Patankar-Spaldingove metode končnih volumnov, ki je skupaj z uporabljenim računalniškim programom PCFLOW2D, razvitim na Katedri za mehaniko tekočin UL FGG, opisana v literaturi (Četina, 1988). Osnovne značilnosti metode so premaknjena numerična mreža, hibridna shema (kombinacija centralnodiferenčne in sheme gorvodnih razlik) ter iterativni postopek popravkov globin, znan kot SIMPLE. Za integracijo po času je uporabljena polno implicitna shema, ki je stabilna in dovolj točna tudi pri daljših časovnih korakih in relativno visokih Courantovih številih.

Pri vseh izračunih z modelom PCFLOW2D smo privzeli časovni korak $\Delta t = 10 \text{ s}$. Kot kriterij konvergence smo najprej privzeli, da mora biti v vsakem časovnem koraku vsota napak v vseh točkah računske mreže manjša od 1 % trenutnega vtoka v področje. Pri tem se je pokazalo, da bi bilo zaradi zelo drobne računske mreže s 133215 točkami za prvo obravnavano območje in 155848 točkami za drugo obravnavano območje v vsakem časovnem koraku potrebnih več kot 180 iteracij, kar bi nerazumno podaljšalo računske čase. Zato smo število iteracij omejili na največ 60 na časovni korak in z analizo občutljivosti modela ugotovili, da napaka pri računu volumnov večinoma ni preseгла 2 %. Računi so bili še vseeno zelo dolgotrajni, saj je en hidrodinamični izračun na razmeroma hitrem PC računalniku s procesorjem INTEL CORE 2 DUO E6600, upošteva potreben čas do vzpostavitve stalnega toka, trajal 100 ur za izračune pretokov za prvo obravnavano območje predvidene akumulacije HE Brežice in 50 ur za drugo obravnavano območje predvidene akumulacije HE

Mokrice. Račun za nestalni tok pa je trajal še nekoliko dlje. Za vsako obravnavano območje posebej je račun potekal 150 ur, kar pomeni več kot 6 dni računskega časa za posamezen račun.

5.2.3 Začetni in robni pogoji

Pri nestalnem toku je kot začetni pogoj pred prihodom vala upoštevano suho dno, kar se zaradi lažjega načina računa ponazori z majhno globino 0,01 m. Račun je nato ves čas potekal po vseh celicah računskega področja in če po desetih iteracijah znotraj časovnega koraka globina ni presegla 0,02 m, je program celico smatral za neaktivno in umetno postavil vrednosti hitrosti na 0 in globino na 0,01m. Na ta način je bil zagotovljen mehanizem širjenja vala po približno suhem dnu.

Kot robni pogoj ob bregovih obravnavanega območja je upoštevano, da so hitrosti v prečni smeri na tok enake 0. Za vzdolžne hitrosti pa je uporabljen preprost pogoj "drsnih vrednosti", torej da je gradient vzdolžnih hitrosti v prečni smeri enak 0. Z neupoštevanjem običajnega logaritemskega stenskega zakona (kot je uporabljen npr. pri $k - \epsilon$ modelu) ne naredimo večje napake, saj ima pri obravnavanem pojavu v robnih celicah prevladujoč vpliv trenje ob dno.

Na iztoku iz obeh obravnavanih območij sta na dolvodnem robu upoštevani konsumpcijski krivulji $z = z(Q)$, dobljeni na osnovi enodimenzijskih računov s programom HEC-RAS. Pri tem je kota gladine z v vsakem računskem koraku predpisana samo v eni celici na spodnjem robu, približno v osi struge. Gladine v ostalih točkah na robu izračuna program sam. Na odprtih stranskih robovih računskega področja pa je upoštevano, da so gradienti h , u in v pravokotno na rob enaki 0.

Na vtoku v vsako obravnavano območje pa je podan hidrogram ustreznih poplavnih valov. Vsi računski primeri za stalni tok so obravnavani kot nestalni tok, kjer se obravnavani pretok doseže v 15 minutah in se tekom računa obdrži njegova konstantna vrednost, dokler se razmere ne ustalijo (približno se to zgodi na območju akumulacije Brežice zgodi po 10 urah, na območju akumulacije Mokrice pa po 20 urah. V vtočnem profilu je upoštevana

enakomerna porazdelitev hitrosti po prerezu, potek gladin v prečni smeri pa izračuna program sam.

5.3 Umerjanje matematičnega modela

5.3.1 Postopek umerjanja

V obravnavani nalogi pomeni umerjanje matematičnega modela predvsem postopek, pri katerem določimo porazdelitev koeficientov hrapavosti v strugi in na poplavnih področjih. Vrednost koeficienta hrapavosti za obravnavano območje smo določili z upoštevanjem naslednjih faktorjev:

- ocene koeficienta hrapavosti na osnovi detajlnejšega terenskega ogleda, dosedanjih izkušenj Katedre za mehaniko tekočin z laboratorijem (KMTe) Fakultete za gradbeništvo in geodezijo (FGG) in vrednosti, ki se priporočajo v literaturi,
- primerjave rezultatov dvodimenzijskega izračuna z enodimenzijskimi izračunanimi kotami in
- primerjave izračunanih kot gladine vode z merjenimi vrednostmi in fotografsko zabeleženim stanjem dosega poplav na dan poplave leta 1998 (slika 22) in leta 1990.



Slika 22: Fotografija poplavljenega področja v okolici Spodnjega Starega Gradu (5. 11. 1998).

2D model je bil umerjen predvsem na osnovi primerjave rezultatov z merjenimi kotami sledov gladine pri visokih vodah 2. 11. 1990 ter 5. 11. 1998 in ocenjenih pretokov v reki Savi na področju NEK. Ocena vrednosti pretokov, pri katerih so bile zabeležene sledi na terenu pa je nekoliko negotova, zato smo, kakor sem omenil že v poglavju 5.1.2, pri umerjanju upoštevali več pretokov. Na ta način se poskuša zajeti možna odstopanja od resničnega pretoka in upoštevati vse ocenjene in določene vrednosti pretokov, da bi se čimbolj izognili možnim napakam pri določanju koeficienta hrapavosti.

Primerjava rezultatov umeritvenih izračunov nam lahko nakaže tudi vpliv vrednosti pretoka na potek gladine vzdolž obravnavanega odseka. Poleg tega je potrebno upoštevati, da izmerjene vrednosti predstavljajo posnetek sledov visoke vode na terenu ali objektih, ki so bile določene naknadno po poplavi. Neposredno med samo poplavo pa gladine vode niso bile merjene, zaradi česar so možna določena odstopanja od dejanskega stanja na terenu. Pri tem smo za leto 1990 razpolagali z veliko večjim številom izmerjenih sledov.

V fazi umerjanja smo upoštevali sedanje podatke o terenu. Aksonometrična slika terena prvega obravnavanega območja predvidene akumulacije HE Brežice, formirana s pomočjo digitalnega modela terena, je prikazana na prilogi B1, aksonometrična slika terena drugega območja predvidene akumulacije HE Mokrice pa je prikazan na prilogi B2. Zaradi že omenjenih težav pri določanju dejanskega pretoka pri poplavah leta 1990 in 1998 sta bila v študiji poplavne varnosti NEK (Četina in Krzyk, 2005) upoštevani uradno vrednost pretoka v profilu NEK ($Q = 3050 \text{ m}^3/\text{s}$) in popravljena ocena FGG z vrednostjo $Q = 3240 \text{ m}^3/\text{s}$ (poglavje 5.1.2). V okviru te diplomske naloge pa smo pri umerjanju za leto 1990, za katerega razpolagamo z največ merjenimi točkami, upoštevali najnovejšo oceno za pretok na območju akumulacije HE Brežice $Q = 3650 \text{ m}^3/\text{s}$, dotok Krke $204 \text{ m}^3/\text{s}$ in pretok na dolvodnem območju predvidene akumulacije HE Mokrice $Q = 3854 \text{ m}^3/\text{s}$ (poglavje 5.1.2).

Z umerjanjem smo določili, da dosežemo najboljše ujemanje izračunanih gladin in izmerjenih vrednosti s koeficientoma hrapavosti $n = 0,030 \text{ sm}^{-1/3}$ za strugo reke Save ter $n = 0,044 \text{ sm}^{-1/3}$ za poplavna področja za prvo obravnavano območje predvidene akumulacije HE Brežice ter $n = 0,028 \text{ sm}^{-1/3}$ za strugo reke Save ter $n = 0,040 \text{ sm}^{-1/3}$ za poplavna področja za drugo obravnavano območje predvidene akumulacije HE Mokrice. Rezultati izračunov končnega

umerjanja so skupaj z vrisanimi meritvami iz leta 1990 prikazani na podolžnem profilu na prilogi B3 za območje predvidene akumulacije HE Brežice in na prilogi B4 za območje predvidene akumulacije HE Mokrice. Za primerjavo in verifikacijo rezultatov umerjanja je priložena fotografija poplavljenega terena, ki je bila posneta ob poplavi leta 1998, v bližini Spodnjega starega gradu (Slika 22). Na tem detajlu, kjer bi se sicer zaradi terena z blagimi nakloni lahko hitro ugotovila morebitna nenatančnost matematičnega modela, je razvidno zelo dobro ujemanje med dejanskim in izračunanim poplavljenim območjem.

Iz podolžnega profila za območje akumulacije HE Brežice lahko ugotovimo, da je model dobro umerjen, kajti odstopanja od gladin umeritvenih pretokov in izmerjenih vrednosti so dokaj majhna. Odstopanja znašajo približno 30 cm pod in nad meritvijo, nekje pa tudi do 50 cm. Zelo dobro pa je tudi ujemanje izmerjenih vrednosti iz leta 1990 z enodimenzijskimi izračuni pri pretoku $Q = 3210 \text{ m}^3/\text{s}$, povzetimi iz Zakrajšek in Krzyk (1997).

Iz podolžnega profila za območje akumulacije HE Mokrice pa lahko ugotovimo, da je odstopanje od gladin enodimenzijskih izračunov za pretok $Q = 3393 \text{ m}^3/\text{s}$ (Zakrajšek in Krzyk, 1997) in izmerjenih vrednosti iz leta 1990 zelo majhno. Največje odstopanje znaša približno 30 cm, večina vrednosti odstopanj pa znaša le 10 do 20 cm. Če pa primerjamo vrednosti gladin med enodimenzijskimi izračuni in dvodimenzijskimi izračuni za pretok $Q = 3393 \text{ m}^3/\text{s}$ pa ugotovimo, da so razlike dokaj majhne in sicer znašajo približno 25 do 30 cm, ponekod pa tudi manj, samo 10 do 15 cm. Iz tega lahko sklepamo, da je ujemanje z računi in dejanskimi izmerjenimi točkami dovolj dobro. Pri pretoku $Q = 3854 \text{ m}^3/\text{s}$ pa so z 2D modelom izračunane kote nekoliko previsoke, kar kaže na to, da je bil pretok na tem odseku do vtoka Sotle nekoliko višji, kar so potrdili tudi kasnejši računi nestalnega toka (poglavje 5.4.3).

5.3.2 Točnost rezultatov

Točnost uporabljenega modela je glede na to, da lahko zajamemo tok v dveh dimenzijah, razmeroma dobra. Pri točnih vhodnih hidroloških (različne ocene poplavnih umeritvenih pretokov), hidravličnih in geometrijskih podatkih se ocenjuje, da bi bila točnost modela na obravnavanem odseku toka reke Save pri stoletnem pretoku Q_{100} v mejah $\pm 10 \text{ cm}$. To je

hkrati tudi natančnost, s katero se lahko ugotavlja vplive relativnih sprememb gladine v strugi Save in na poplavnem področju zaradi različnih ukrepov na varovalnih objektih (nasipi, zidovi) glede na obstoječe referenčno stanje.

Ker je uporabljen dvodimenzijski matematični model, bi za vrednosti izmerjenih sledov visoke vode, poleg s stacionažo definiranega položaja, potrebovali še situativno definiran položaj. Na ta način bi lažje ločili vpliv energijske višine pri meritvah v strugi ali na poplavnem področju. Poleg tega čas meritev položaja sledov na objektih ni znan, kar vključuje možno napako pri dejanskem določanju kote gladine v primerjavi s sledmi, ki se na zidanih objektih s časom spreminjajo.

5.4 Rezultati izračunov

Za izračune smo obravnavali različne pretoke od $Q_{100} = 3290 \text{ m}^3/\text{s}$ do $Q_{1000} = 4040 \text{ m}^3/\text{s}$ na območju predvidene akumulacije HE Brežice ter od $Q_{um2} = 3267 \text{ m}^3/\text{s}$ do $Q_{1000} = 4100 \text{ m}^3/\text{s}$ na območju predvidene akumulacije HE Mokrice. Vmesne vrednosti pretokov pa so prikazane v preglednici 3. Vsi izvršeni računi so bili narejeni za sedanje stanje terena in obstoječe stanje stopnje izgradnje nasipov.

5.4.1 Pregled izvršenih izračunov in rezultati za prvo obravnavano območje predvidene akumulacije HE Brežice

Pri hidrodinamičnih izračunih za sedanje stanje terena so upoštevane kote dna struge reke Save in terena, ki so prikazane na aksonometrični sliki terena v prilogi B1. Ko so bili izračuni izvršeni, je bilo potrebno rezultate izrisati s pomočjo vmesnih programov. S temi programi se dobi grafične prikaze rezultatov in sicer hitrostna polja, izolinije gladin, prečne in podolžne profile ter aksonometrične slike terena in gladine vode.

Za primere pretokov $Q_{100} = 3290 \text{ m}^3/\text{s}$ do $Q = 3650 \text{ m}^3/\text{s}$ bi znašale hitrosti vode v strugi 3 - 4 m/s, na poplavnem območju pa hitrosti ne bi presegle vrednosti 1 m/s. Pri pretoku $Q_{1000} = 4040 \text{ m}^3/\text{s}$ pa bi se hitrost vode po strugi Save povečala na 4 – 5 m/s, hitrost na poplavnem

območju pa tudi ne bi preseгла vrednosti 1 m/s, razen na kratkem odseku na začetku območja okoli izliva Potočnice v Savo in pred jezom NE Krško, kjer bi bila hitrost približno 1,5 m/s. Hitrostna polja za posamezne računske primere so prikazana na prilogah od C1 do C3. Skupaj s hitrostmi vode so na teh prilogah grafično prikazane še plastnice globin vode s korakom 1 m. V preglednici 6 pa so prikazani še rezultati maksimalnih gladin kot vode v nekaterih izbranih prečnih profilih.

Pozicije in stacionaže profilov P103 do P130 na območju predvidene akumulacije HE Brežice se lahko najbolje vidijo na prilogi A1.

Preglednica 6: Maksimalne kote gladin vode v prečnih profilih na območju predvidene akumulacije HE Brežice pri različnih pretokih za obstoječe stanje nasipov.

Pretok [m ³ /s] Profil	Stacionaža prečnih profilov	4040 (Sava) +310 (Krka) [m n.m.]	3650 (Sava) +204 (Krka) [m n.m.]	3290 (Sava) +310 (Krka) [m n.m.]
P103	748957	158,96	158,65	158,39
P104	748442	158,41	158,15	157,92
P105	748062	157,86	157,63	157,39
P106	747647	157,50	157,30	157,06
P107	747182	156,33	156,21	156,07
P108	746797	155,87	155,78	155,67
P109	746512	155,80	155,70	155,58
P110	746202	155,64	155,54	155,41
P111	745732	154,52	154,40	154,28
P112	745302	153,88	153,76	153,64
P113	744852	152,87	152,77	152,67
P114	744452	152,49	152,39	152,30
P115	744127	152,11	152,02	151,95
P116	743732	151,68	151,60	151,53
P117	743257	151,14	151,06	150,99
P118	742837	150,59	150,53	150,47
P119	742367	150,28	150,21	150,16
P120	741842	149,98	149,90	149,83
P121	741272	149,49	149,25	149,09
P122	740842	149,35	149,07	148,89
P123	740387	149,17	148,83	148,63
P124	739987	149,06	148,69	148,47
P125	739547	148,97	148,58	148,36

se nadaljuje

nadaljevanje

P126	739102	148,86	148,45	148,23
P127	738752	148,77	148,35	148,12
P127a	738442	148,63	148,19	147,96
P128	738222	148,37	147,91	147,69
P128a	737992	148,17	147,72	147,50
P129	737802	147,86	147,42	147,21
P130	737477	147,49	147,09	146,90

Iz priloge C1 je razvidno, da bi se voda pri pretoku $Q_{100} = 3290 \text{ m}^3/\text{s}$ razlila na levi breg dolvodno od konca nasipa za zaščito Nuklearne elektrarne Krško (NEK). Na desni breg, ki je nižji in deluje kot preliv pa se poplavna voda razlije precej na široko in tako ostaja NEK varna pred visokimi vodami Save. Na levem bregu priteče v Savo Potočnica, ki jo Sava pri obravnavanem pretoku zajezi, tako da, poplavi manjši del ozemlja do globine 2 m. Obstoječi nasipi za zaščito NEK niso nikjer preplavljeni.

Voda, ki se razlije na levi breg, seže v bližino železniške proge Ljubljana – Zagreb, v manjšem obsegu je poplavljen vasi Vrbinja do globine 1 m, v bližini Save pa seže voda na majhnem delu tudi do višine 3 m. Poplavljen območja so v glavnem kmetijske površine, kot so njive, travniki in pašniki. Razlita voda na levo stran doseže še majhen del vasi Gornji Lenart pri Brežicah in doseže rob Šentlenarta. Vsi objekti ostanejo na suhem, ker se voda do globine 2 m razlije po travnikih. Pri kraju Brežice je globina poplavne vode tudi do 4 m, vendar mesto ni ogroženo, ker je teren naravno višji in tako ostajajo objekti varni pred poplavami. V nadaljevanju pa prelivanja na levo stran ni več, ker so že zgrajeni protipoplavni nasipi.

Poplavna voda, ki prelije desni breg, seže v povprečju približno 2000 m na široko in priteče do naselja Žadovinek, v bližino vasi Brege in Mrtvic, v nadaljevanju pa se območje poplavne vode zoži in gre okoli vasi Vihre. Nato pa ostane voda v bližini avtocestnega nasipa novo zgrajene avtoceste do Obrežja. Avtocesta ostane nepoplavljen. Na tem območju med strugo reke Save in avtocesto se giblje globina vode med 1 m do 3 m.

Proti koncu matematičnega modela prvega območja se v reko Savo pri kraju Čatež izlije reka Krka. Reka Krka prav tako poplavi in sicer je poplavljen naselje Krška vas. Globina vode je

na večjem območju 1 m, ponekod tudi do 2 m, ozko območje ob Krki pa je preplavljeno do višine 4 m. Poplavna voda sega do avtoceste, vendar je ne poplavi. Površine, prelite z vodo so v glavnem kmetijska zemljišča, razen v naselju Krška vas, kjer so zaliti z vodo tudi objekti. Globina vode v strugi reke Save in reke Krke znaša približno 8 m.

Na prilogah od C4 do C6 je za različne pretoke prikazana izračunana gladina v izbranih prečnih profilih, katerih tlorsni položaj je označen s številko 2D računskega profila vzdolž y osi. Na prilogah od C8 do C10 je prikazana izračunana gladina v izbranih podolžnih profilih, označenih s številko 2D računskega profila vzdolž x osi. Povečan prikaz posameznega izbranega prečnega ter podolžnega profila z vrisanimi gladinami pa je prikazan na prilogah C7 in C11.

Aksonometrične slike poplavljenega območja za vsak računski primer posebej pa so prikazane na prilogah od C12 do C14. Razdelitev pretoka po strugi ter levem in desnem poplavnem območju v nekaterih najznačilnejših profilih je za posamezne računske primere prikazana v preglednicah 7, 8 in 9.

Preglednica 7: Razdelilnik pretoka Save na odseku Krško – Brežice za sedanje stanje terena (primer BRE35, $Q_{um} = 3650 \text{ m}^3/\text{s}$ (Sava) + $204 \text{ m}^3/\text{s}$ (Krka)).

Profil	Skupni pretok [m^3/s]	Levi breg [m^3/s]	Struga [m^3/s]	Desni breg [m^3/s]
J = 534	3854	687	3167	0
J = 450	3854	1810	1063	981
J = 400	3650	1972	1014	664
J = 350	3650	1603	1213	834
J = 300	3650	669	1931	1050
J = 250	3650	461	2240	949
J = 200	3650	184	2560	906
J = 100	3650	0	3361	289
J = 50	3650	0	3584	66
J = 2	3650	0	3650	0

Preglednica 8: Razdelilnik pretoka Save na odseku Krško – Brežice za sedanje stanje terena (primer BRE36, $Q_{100} = 3290 \text{ m}^3/\text{s}$ (Sava) + $310 \text{ m}^3/\text{s}$ (Krka)).

Profil	Skupni pretok [m^3/s]	Levi breg [m^3/s]	Struga [m^3/s]	Desni breg [m^3/s]
J = 534	3600	605	2995	0
J = 450	3600	1603	1021	976
J = 400	3290	1719	998	573
J = 350	3290	1393	1202	695
J = 300	3290	572	1881	837
J = 250	3290	382	2180	728
J = 200	3290	149	2471	670
J = 100	3290	0	3154	136
J = 50	3290	0	3272	18
J = 2	3290	0	3290	0

Preglednica 9: Razdelilnik pretoka Save na odseku Krško – Brežice za sedanje stanje terena (primer BRE37, $Q_{1000} = 4040 \text{ m}^3/\text{s}$ (Sava) + $310 \text{ m}^3/\text{s}$ (Krka)).

Profil	Skupni pretok [m^3/s]	Levi breg [m^3/s]	Struga [m^3/s]	Desni breg [m^3/s]
J = 534	4350	848	3502	0
J = 450	4350	2053	1068	1228
J = 400	4040	2269	994	777
J = 350	4040	1852	1196	992
J = 300	4040	792	1981	1267
J = 250	4040	563	2304	1173
J = 200	4040	245	2641	1154
J = 100	4040	21	3548	471
J = 50	4040	21	3883	136
J = 2	4040	0	4040	0

V preglednici 10 pa so podani volumni na območju struge ter levega in desnega poplavnega območja za vse računске primere.

Preglednica 10: Razdelilnik volumna Save na odseku Krško – Brežice za sedanje stanje terena pri različnih pretokih.

Račun	Skupni volumen [m ³]	Levo poplavno območje [m ³]	Struga [m ³]	Desno poplavno območje [m ³]
BRE 35, Q = 3650 + 204 m ³ /s	40.486.957,796	15.403.504,166	8.702.489,544	16.380.964,087
BRE36, Q ₁₀₀ = 3290 + 310 m ³ /s	36.708.443,375	13.999.579,952	8.530.762,717	14.178.100,706
BRE37, Q ₁₀₀₀ = 4040 + 310 m ³ /s	46.620.986,985	17.869.013,783	8.934.175,390	19.817.797,812

Pri pretokih reke Save $Q = 3650 \text{ m}^3/\text{s}$ (priloga C2) in $Q_{1000} = 4040 \text{ m}^3/\text{s}$ (priloga C3) je obseg poplavnega področja na levem in desnem bregu podoben tistemu pri pretoku $Q_{100} = 3290 \text{ m}^3/\text{s}$. Do razlik pride pri gladini reke Save, ki je seveda za oba primera višja kot pri pretoku Save $Q_{100} = 3290 \text{ m}^3/\text{s}$: pri pretoku $Q = 3650 \text{ m}^3/\text{s}$ se gladina vode poveča za približno 25 cm, v srednjem delu pa je povišanje nekoliko manjše in znaša 5 do 15 cm ter pri pretoku $Q_{1000} = 4040 \text{ m}^3/\text{s}$ se gladina vode poveča približno 50 do 70 cm, v srednjem delu pa je povišanje nekoliko manjše in znaša 10 do 20 cm.

Čeprav je iz priloge C3 razvidno, da je pri pretoku reke Save $Q_{1000} = 4040 \text{ m}^3/\text{s}$ obseg poplav podoben kot pri ostalih dveh pretokih, obstaja tudi manjša razlika pri naselju Mrtvice, kjer je obseg poplav nekoliko večji. Na levem bregu, kjer priteče v Savo Potočnica, se pojavi še nekoliko večja zajezev kot v primeru pretoka $Q_{100} = 3290 \text{ m}^3/\text{s}$, to pa pomeni, da se nekaj vode pretaka v ozkem pasu po nižjem delu terena proti poplavni vodi, ki poplavi levi breg, kjer se konča nasip za zaščito NEK.

5.4.2 Pregled izvršenih izračunov in rezultati za drugo obravnavano območje predvidene akumulacije HE Mokrice

Pri hidrodinamičnih izračunih za sedanje stanje terena so upoštevane kote dna struge reke Save in terena, ki so prikazane na aksonometrični sliki terena v prilogi B2. Ko so bili izračuni izvršeni, je bilo potrebno rezultate izrisati s pomočjo vmesnih programov. S temi programi se dobi grafične prikaze rezultatov in sicer hitrostna polja, izolinijske gladine, prečne in podolžne profile ter aksonometrične slike terena in gladine vode.

Za primere pretokov $Q = 3267 \text{ m}^3/\text{s}$ do $Q = 3854 \text{ m}^3/\text{s}$ bi znašale hitrosti vode v strugi 3 - 4 m/s, na poplavnem območju pa hitrosti ne bi presegle vrednosti 1 m/s. Pri pretoku $Q_{1000} = 4100 \text{ m}^3/\text{s}$ bi bile hitrosti vode po strugi Save tudi 3 – 4 m/s, večje hitrosti bi se dosegle le na začetku območja, kjer so nasipi in s tem zmanjšana možnost razlivanja vode. Te hitrosti bi znašale 5 – 7 m/s. Hitrosti na poplavnem območju pa tudi ne bi presegle vrednosti 1 m/s. Hitrostna polja za posamezne računske primere so prikazana na prilogah od D1 do D3. Skupaj s hitrostmi vode so na teh prilogah prikazane še plastnice globin vode s korakom 1 m. V preglednici 11 pa so prikazani še rezultati maksimalnih gladin kot vode v nekaterih izbranih prečnih profilih.

Pozicije in stacionaže profilov P131 do H22 na območju predvidene akumulacije HE Mokrice se lahko najbolje vidijo na prilogi A2.

Preglednica 11: Maksimalne kote gladin vode v prečnih profilih na območju predvidene akumulacije HE Mokrice pri različnih pretokih za obstoječe stanje nasipov.

Profil \ Pretok [m ³ /s]	Stacionaža prečnih profilov	3854 (MOK13) [m n.m.]	3267 (MOK14) [m n.m.]	3267 _{pov,ng} (MOK17) [m n.m.]	3393 (MOK16) [m n.m.]	4100 (MOK15) [m n.m.]
P131	737207	146,44	146,02	146,21	146,11	146,57
P132	736999	146,73	146,25	146,42	146,36	146,93
P133	736562	146,22	145,73	145,91	145,84	146,40
P134	736162	145,83	145,35	145,52	145,46	146,02

se nadaljuje

nadaljevanje

P135	735842	145,59	145,11	145,27	145,22	145,78
P136	735522	145,22	144,76	144,91	144,86	145,41
P137	735157	144,95	144,51	144,65	144,60	145,13
P138	734757	144,26	143,84	143,99	143,93	144,43
P139	734389	143,75	143,35	143,50	143,44	143,91
P140	733952	143,18	142,83	142,96	142,30	143,32
P141	733452	142,55	142,22	142,36	142,30	142,68
P142	733127	142,22	141,92	142,03	141,99	142,34
P143	732702	141,94	141,67	141,76	141,73	142,04
P144	732267	141,34	141,11	141,20	141,16	141,43
P145	731752	140,95	140,73	140,81	140,78	141,04
P146	731437	140,79	140,56	140,64	140,62	140,87
P147	731075	140,53	140,31	140,38	140,36	140,61
P148	730782	140,07	139,87	139,94	139,92	140,15
P149	730530	139,80	139,60	139,68	139,64	139,88
P150	730237	139,69	139,50	139,56	139,54	139,76
P151	729847	139,10	138,88	138,97	138,93	139,19
P152	729622	138,96	138,73	138,81	138,78	139,05
H32	729380	138,70	138,42	138,52	138,48	138,80
P154	729209	138,58	138,29	138,39	138,36	138,70
H31	729098	138,48	138,17	138,28	138,24	138,60
P155	728957	138,45	138,14	138,24	138,21	138,57
H30	728872	138,37	138,07	138,17	138,14	138,50
P155a	728802	138,28	137,97	138,08	138,04	138,40
H29	728695	138,18	137,88	137,98	137,94	138,30
H28	728542	138,01	137,72	137,83	137,78	138,12
P157	728477	137,94	137,66	137,76	137,72	138,05
H27	728285	137,71	137,44	137,55	137,50	137,81
H26	728065	137,47	137,24	137,33	137,29	137,57
H25	727790	137,18	136,95	137,03	137,00	137,26
H24	727491	136,83	136,61	136,68	136,66	136,91
H23	727161	136,43	136,22	136,28	136,27	136,52
H22	726865	136,03	135,81	135,84	135,86	136,11

Iz priloge D1 je razvidno, da bi se voda pri pretoku $Q_{100} = 3393 \text{ m}^3/\text{s}$ razlila na levo stran struge, vendar voda ne ogroža prebivalcev in stanovanjskih objektov, ker so na levem bregu že zgrajeni protipoplavni nasipi do naselja Mihalovec. Globina vode bi narasla od 1 m do 3 m. V območju nasipov so z vodo prelit le travniki, kar ne predstavlja velike škode. Ko pa se nasip konča, se poplavna voda razlije daleč po ravnini vse do meje s Hrvaško in naprej.

Poplavljen območja so v glavnem kmetijske površine, kot so njive, travniki in pašniki. Razlita voda na levo stran ne doseže naselja Mihalovec, poplavi pa del vasi Loče, kjer je pod vodo tudi nekaj objektov in to do globine 1 m. Nato se voda širi naprej po kmetijskih površinah in se približa naselju Ključ, ki ostane nepoplavljen. Globina na celotnem levem poplavnem območju doseže globino od 1 m do 2 m, izjema so le nekatere kotanje, kjer voda doseže globino tudi 3 m ali celo 4 m.

Protipoplavni nasipi so zgrajeni tudi na desni strani struge in tako tudi tukaj ostane reka Sava znotraj meja nasipov. Globina vode, ki jo doseže, znaša do 3 m. Ko pa se nasipi končajo, se voda po nižjem terenu razlije nazaj proti Čateškemu polju. Na tem območju se voda razliva med avtocesto, ki je ne poplavi in strugo Save, globine pa dosežejo od 1 m do 2 m. Nadaljnje izlivanje Save prepreči naravno visok teren vse do kraja Jesenice, kjer se pa še nekaj malega vode razlije po tamkajšnjih travnikih z globino od 1 m do 2 m. Globina vode v strugi reke Save znaša približno 8 m.

Na prilogah od D4 do D6 je za različne pretoke prikazana gladina v izbranih prečnih profilih, katerih tlorisni položaj je označen s številko 2D računskega profila vzdolž y osi. Na prilogah od D8 do D10 je prikazana izračunana gladina še v izbranih podolžnih profilih, označenih s številko 2D računskega profila vzdolž x osi. Povečan prikaz posameznega izbranega prečnega ter podolžnega profila z vrisanimi gladinami pa je prikazan na prilogah D7 in D11.

Aksonometrične slike poplavljenega območja za vsak računski primer posebej pa so prikazane na prilogah od D12 do D14. Razdelitev pretoka po strugi ter levem in desnem poplavnem območju v nekaterih najznačilnejših računskih profilih je za posamezne računske primere prikazana v preglednicah 12, 13, 14, 15 in 16.

Preglednica 12: Razdelilnik pretoka Save na odseku Brežice - Mokrice za sedanje stanje terena (primer MOK13, $Q_{um1} = 3854 \text{ m}^3/\text{s}$).

Profil	Skupni pretok [m^3/s]	Levi breg [m^3/s]	Struga [m^3/s]	Desni breg [m^3/s]
J = 483	3854	1404	2180	270

se nadaljuje

nadaljevanje

J = 450	3854	1473	1846	536
J = 400	3854	1699	2155	0
J = 350	3854	1911	1943	0
J = 300	3854	1310	2343	201
J = 250	3854	1729	2125	0
J = 207	3854	1103	2239	512
J = 150	3854	514	2958	382
J = 78	3854	139	2836	879
J = 2	3854	0	3854	0

Preglednica 13: Razdelilnik pretoka Save na odseku Brežice - Mokrice za sedanje stanje terena (primer MOK14, $Q_{um2} = 3267 \text{ m}^3/\text{s}$).

Profil	Skupni pretok [m^3/s]	Levi breg [m^3/s]	Struga [m^3/s]	Desni breg [m^3/s]
J = 483	3267	1044	2165	159
J = 450	3267	1144	1741	381
J = 400	3267	1245	2022	0
J = 350	3267	1416	1851	0
J = 300	3267	917	2202	148
J = 250	3267	1305	1962	0
J = 207	3267	840	2031	397
J = 150	3267	381	2631	255
J = 78	3267	99	2515	653
J = 2	3267	0	3267	0

Preglednica 14: Razdelilnik pretoka Save na odseku Brežice - Mokrice za sedanje stanje terena (primer MOK17, $Q_{um2} = 3267 \text{ m}^3/\text{s}$, povečani koeficienti hrapavosti).

Profil	Skupni pretok [m^3/s]	Levi breg [m^3/s]	Struga [m^3/s]	Desni breg [m^3/s]
J = 483	3267	1038	2057	172
J = 450	3267	1157	1716	395
J = 400	3267	1282	1985	0
J = 350	3267	1467	1800	0
J = 300	3267	956	2156	155
J = 250	3267	1346	1921	0
J = 207	3267	863	2004	399
J = 150	3267	390	2596	280
J = 78	3267	105	2498	664
J = 2	3267	0	3267	0

Preglednica 15: Razdelilnik pretoka Save na odseku Brežice - Mokrice za sedanje stanje terena (primer MOK16, $Q_{100} = 3393 \text{ m}^3/\text{s}$).

Profil	Skupni pretok [m^3/s]	Levi breg [m^3/s]	Struga [m^3/s]	Desni breg [m^3/s]
J = 483	3393	1121	2091	181
J = 450	3393	1215	1764	414
J = 400	3393	1340	2053	0
J = 350	3393	1522	1871	0
J = 300	3393	998	2235	160
J = 250	3393	1395	1998	0
J = 207	3393	896	2075	421
J = 150	3393	409	2702	282
J = 78	3393	108	2585	700
J = 2	3393	0	3393	0

Preglednica 16: Razdelilnik pretoka Save na odseku Brežice - Mokrice za sedanje stanje terena (primer MOK15, $Q_{1000} = 4100 \text{ m}^3/\text{s}$).

Profil	Skupni pretok [m^3/s]	Levi breg [m^3/s]	Struga [m^3/s]	Desni breg [m^3/s]
J = 483	4100	1553	2224	323
J = 450	4100	1612	1885	603
J = 400	4100	1896	2204	0
J = 350	4100	2125	1975	0
J = 300	4100	1485	2393	222
J = 250	4100	1911	2189	0
J = 207	4100	1214	2325	561
J = 150	4100	572	3092	437
J = 78	4100	156	2967	977
J = 2	4100	0	4100	0

V preglednici 17 pa so podani volumni na območju struge ter levega in desnega poplavnega območja za vse računske primere.

Preglednica 17: Razdelilnik volumna Save na odseku Brežice - Mokrice za sedanje stanje terena pri različnih pretokih.

Račun	Skupni volumen [m ³]	Levo poplavno območje [m ³]	Struga [m ³]	Desno poplavno območje [m ³]
MOK13, Q _{um1} = 3854 m ³ /s	27.224.550,648	12.847.010,326	8.032.776,846	6.344.763,475
MOK14 Q _{um2} = 3267 m ³ /s	23.596.591,551	10.671.322,010	7.655.216,255	5.270.053,286
MOK17 Q _{um2} =3267 m ³ /s, povečan n _g	24.844.227,392	11.454.225,027	7.791.061,949	5.598.940,416
MOK16 Q ₁₀₀ =3393 m ³ /s	24.381.500,288	11.136.485,027	7.740.133,696	5.504.881,565
MOK15 Q ₁₀₀₀ =4100 m ³ /s	28.713.950,136	13.744.086,028	8.182.324,430	6.787.539,678

Pri ostalih pretokih reke Save $Q = 3267 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q = 3854 \text{ m}^3/\text{s}$ (priloga D2) in $Q_{1000} = 4100 \text{ m}^3/\text{s}$ (priloga D3) je obseg poplavnega področja na levem in desnem bregu podoben tistemu pri pretoku $Q_{100} = 3393 \text{ m}^3/\text{s}$. Do razlik pa pride pri gladini reke Save: v primerjavi z gladinami Save pri $Q_{100} = 3393 \text{ m}^3/\text{s}$ so gladine vode za pretok $Q = 3267 \text{ m}^3/\text{s}$ nižje za 5 do 10 cm, pri pretoku $Q = 3854 \text{ m}^3/\text{s}$ višje od 30 do 35 cm in pri pretoku $Q_{1000} = 4100 \text{ m}^3/\text{s}$ višje od 50 do 55 cm.

5.4.3 Analiza nestalnega toka

Za sedanje stanje terena smo za območji predvidenih akumulacij HE Brežice in HE Mokrice izračunali tokovne razmere tudi pri prehodu celotnega poplavnega vala. Kot je bilo omenjeno že pri hidroloških podatkih (podpoglavje 5.1.2), smo kot vhodna hidrograma na gorvodnem robu (profil P103 v km 748.957) obravnavanega področja 2D matematičnega modela

predvidene akumulacije HE Brežice upoštevali na jezu NEK (slika 23) zabeležene valove iz novembra 1990 (slika 25) in iz novembra 1998 (slika 26).

Pri valu iz leta 1990 se maksimalni pretok $Q = 3683 \text{ m}^3/\text{s}$ pojavi 19 ur po začetku obravnave dogodka, pri valu iz leta 1998 pa se maksimalni pretok $Q = 3284 \text{ m}^3/\text{s}$ pojavi v času 14 ur po začetku obravnave dogodka.



Slika 23: Pogled na NEK in jez na reki Savi.

Za val iz leta 1990 smo preračunali transformacijo na celotnem področju predvidenih akumulacij HE Brežice in HE Mokrice vse do zadnjega dolvodnega profila H21 pri vasi Šikara, transformacijo vala iz leta 1998 pa zaradi dolgotrajnosti računov samo na območju predvidene akumulacije Brežice do dolvodnega profila V.P. Čatež.

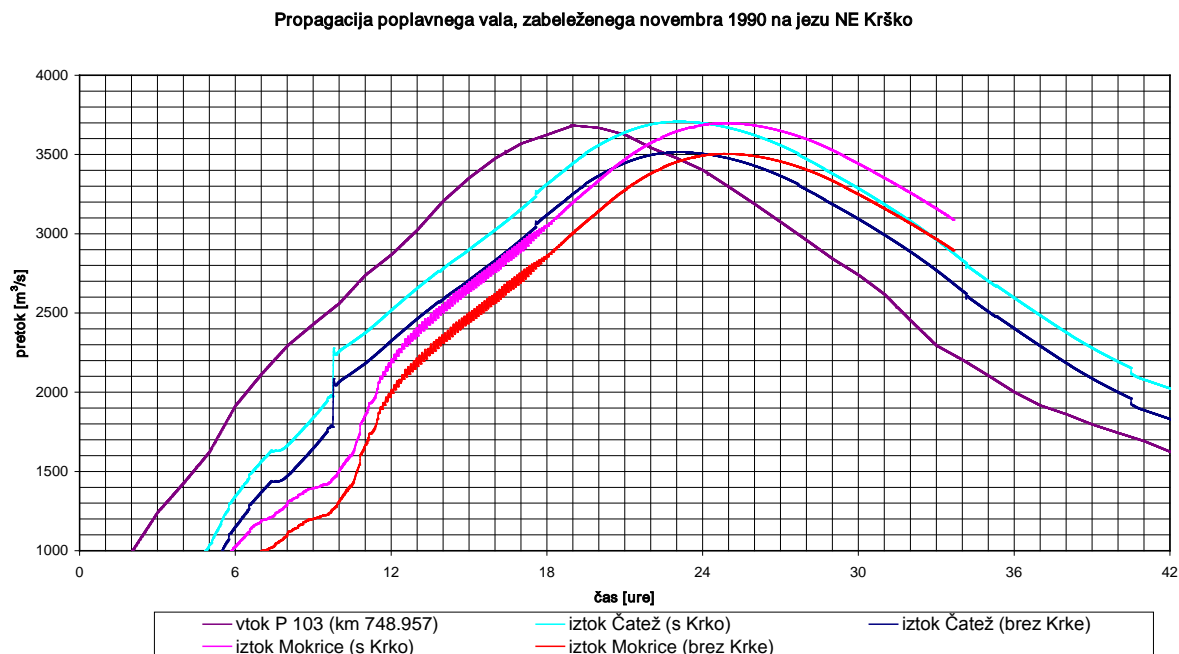
Vhodni in izračunani izhodni hidrogrami so za val leta 1990 prikazani na sliki 27, za val leta 1998 pa na sliki 26. Če primerjamo tokovne razmere poplavnega vala za stanje nestalnega toka pri določenem pretoku in hitrostno polje za stanje stalnega toka pri istem pretoku, lahko ugotovimo, da sta obseg poplavljenega terena in hitrostni polji za oba primera skoraj enaki. To potrjuje upravičenost uporabljenega pristopa, pri katerem smo zaradi počasnih sprememb pretoka pri visokovodnih valovih tudi nestalne pojave lahko dovolj dobro obravnavali kot stalni tok.



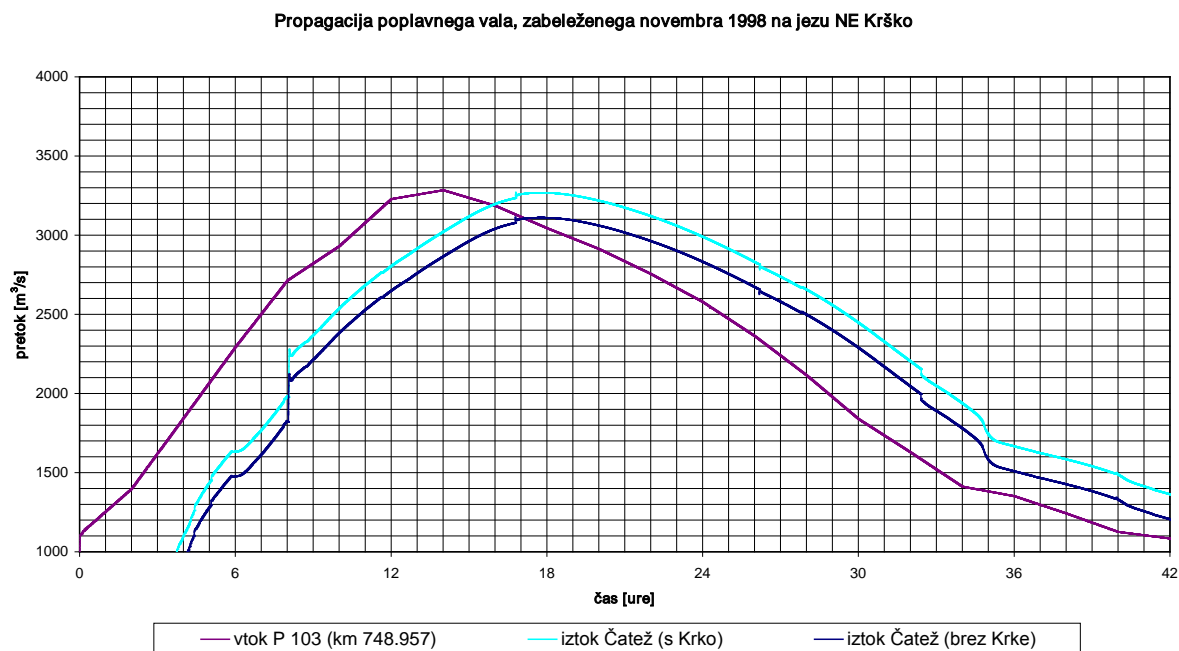
Slika 24: Lokacija vodomerne postaje Čatež.



Slika 25: Hidrološka postaja Čatež - Sava.



Slika 26: Vhodni in izhodni hidrogram poplavnega vala za drugo obravnavano območje predvidene akumulacije HE Mokrice.



Slika 27: Vhodni in izhodni hidrogram poplavnega vala za prvo obravnavano območje predvidene akumulacije HE Brežice.

Rezultati kažejo, da bi se v obstoječih razmerah konica vala iz leta 1990, ki je nad jezom NEK znašala $3683 \text{ m}^3/\text{s}$, do VP Čatež brez upoštevanja dotoka Krke znižala na $3515 \text{ m}^3/\text{s}$, v profilu na meji s Hrvaško pa (brez upoštevanja Krke in Sotle!) na $3505 \text{ m}^3/\text{s}$.

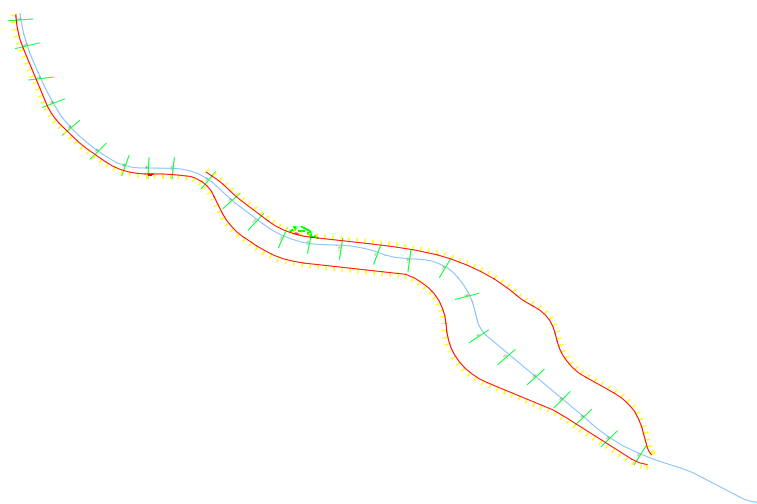
Iz tega je možno oceniti retenzijski učinek Krško – Brežiškega in Čateškega polja. Večjega znižanja maksimalnih pretokov ne dobimo zato, ker je volumen vode na poplavnih področjih za val iz leta 1990 še vedno le ca. 10 % volumna samega vala. Če pa upoštevamo še dotok Krke, do znižanja konice praktično ne pride. Za val iz leta 1998 pa slika 27 kaže, da bi se konica vala s $Q = 3284 \text{ m}^3/\text{s}$ v profilu VP Čatež znižala na $Q = 3111 \text{ m}^3/\text{s}$. Z upoštevanjem dotoka Krke pa je znižanje minimalno ($Q = 3268 \text{ m}^3/\text{s}$).

6 PROJEKTIRANO STANJE NASIPOV PO IZGRADNJI AKUMULACIJ HE BREŽICE IN HE MOKRICE

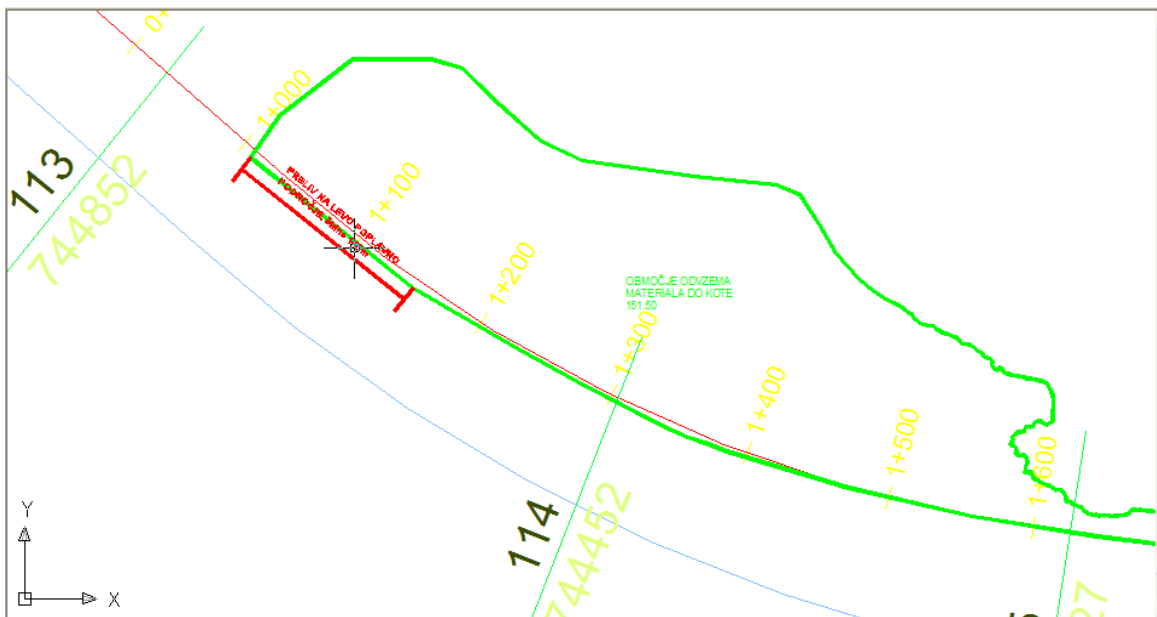
Na podlagi najnovejših podatkov o topografiji terena, posnetega z LIDAR tehnologijo, se hkrati s predvidenima akumulacijama načrtujejo tudi protipoplavne ureditve krajev ob reki Savi. Eden od zaščitnih ukrepov, ki bo uporabljen, bodo zgrajeni protipoplavni nasipi s prelivni. To pomeni, da se bo 10 in 20 letna voda zadržala v akumulacijskem bazenu, če pa se bodo pojavile vode z več kot 20 letno povratno dobo, bo s pomočjo hidromehanske opreme omogočeno prelivanje vode čez preliv. Voda se bo iz akumulacije prelivala na nenaseljena kmetijska zemljišča in sicer na obe poplavni področji levo in desno od načrtovanih nasipov.

Na spodnji sliki 28 so vidne osi nasipov za prvo obravnavano območje HE Brežice. Na sliki 29 in 30 pa je vidna lokacija levega in desnega preliva na poplavno območje. Treba pa je povedati, da to še ni dokončno izbrana varianta lokacije prelivov, pride lahko še do kakšnih sprememb tako pri lokaciji in širini preliva kot tudi koti prelivnega robu, kar bodo pokazali še nadaljnji izračuni.

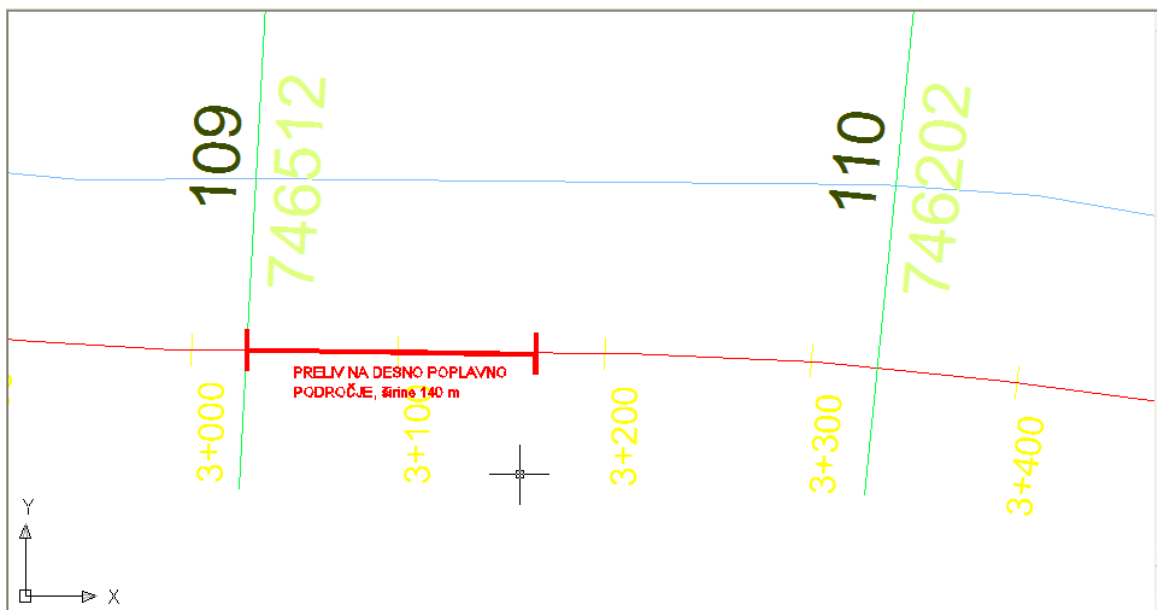
OSI NASIPOV:



Slika 28: Osi nasipov za območje HE Brežice.



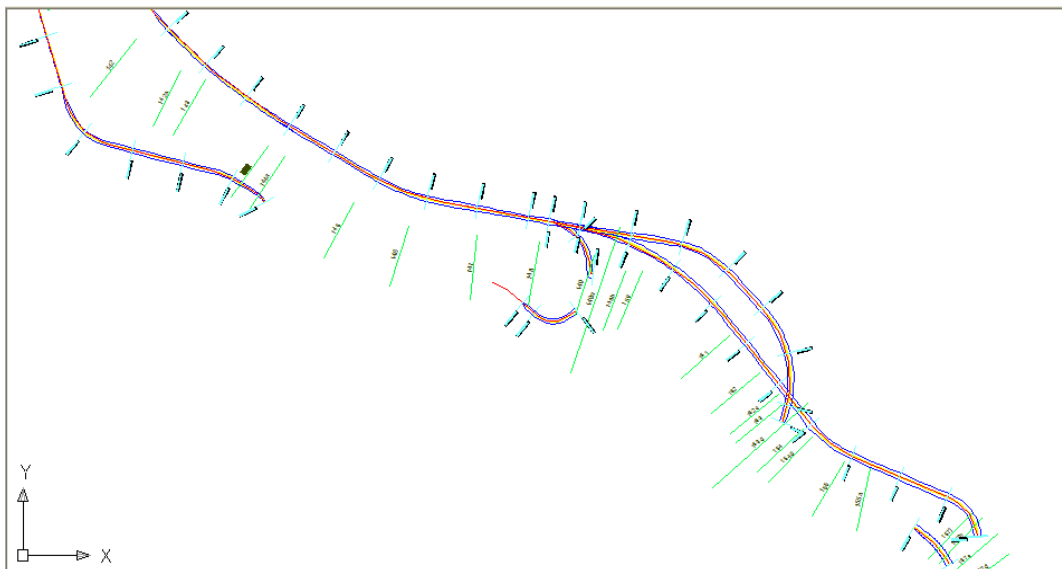
Slika 29: Prikaz lokacije levega preliva na poplavno področje.



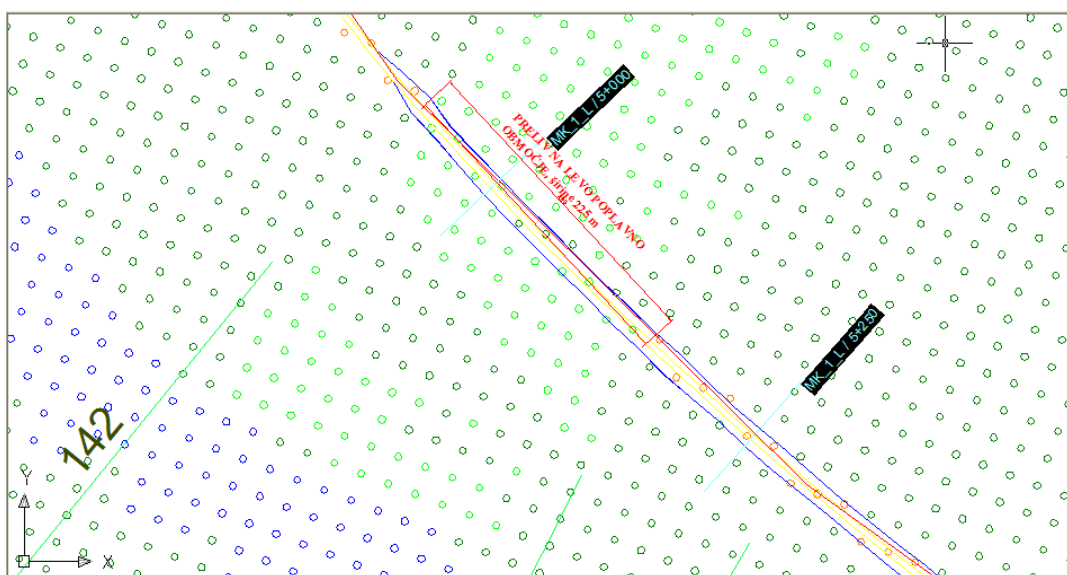
Slika 30: Prikaz lokacije desnega preliva na poplavno področje.

Na sliki 31 so prikazane tri različne možnosti poteka nasipov za drugo obravnavano območje HE Mokrice. Kot je vidno na sliki, je predvideno, da bo nasip na levi strani prekinjen. Na tem delu nasip ne bo zgrajen, teren bo samo zravnano na koto 140 m n.m. in bo ostal čim bolj

naraven. Ta prekinjen del nasipa bo imel funkcijo preliva visokih voda. Širina tega naravnega preliva bo predvidoma 225 m. Od poteka nasipov je odvisna velikost akumulacijskega bazena, trenutno so predlagane tri različne variante. Katera pa bo izbrana za najbolj primerno, bodo pokazali šele nadaljnji izračuni in usklajevanja. Na sliki 32 pa je prikazana povečana lokacija preliva skupaj z računskimi točkami, uporabljenimi pri izračunu obstoječega stanja.



Slika 31: Možne osi nasipov za območje HE Mokrice.



Slika 32: Povečana lokacija preliva na levi strani za območje HE Mokrice.

7 ZAKLJUČKI

Načrtovanje in izgradnja hidroelektrarn na spodnji Savi je zelo kompleksno delo, ker je potrebno poleg energetskih ureditev zagotoviti tudi izboljšanje poplavne varnosti. Glede na dogovore z lokalnimi skupnostmi, kjer bodo hidroelektrarne locirane, je potrebno poiskati rešitve, ki so povezane z izboljšanjem infrastrukture na ožjem in tudi širšem območju načrtovanih posegov.

Cilj diplomske naloge je bil s pomočjo dvodimenzijskega (2D) matematičnega modela PCFLOW2D narediti simulacijo širjenja poplavnih valov na območju Krško-brežiškega in Čateškega polja za obstoječe stanje terena in stopnjo zgrajenosti varovalnih visokovodnih nasipov. Umerjanje 2D modela na osnovi primerjave z zabeleženim obsegom poplav v novembru 1990, izmerjenimi gladinami ter razpoložljivimi 1D računi je dalo dobre rezultate. Hkrati ima 2D model pri simulaciji tokov po geometrijsko kompleksnih poplavnih področjih bistvene prednosti v primerjavi s preprostejšimi 1D modeli. Zato lahko rezultati opravljenih izračunov predstavljajo referenčno stanje pri načrtovanju bodočih akumulacij HE Brežice in HE Mokrice.

Analiza rezultatov za obe območji predvidenih akumulacij HE Brežice in HE Mokrice je dala naslednje ugotovitve:

- za boljšo poplavno varnost bo potrebno podaljšati obstoječe nasipe od NEK naprej, sama lokacija nasipov še ni znana, ker je dokumentacija za hidroelektrarno Brežice še v izdelavi in so lokacije nasipov še v fazi projektiranja;
- velik problem je naselje Krška vas, kjer bo potrebno zagotoviti večjo poplavno varnost prebivalcev. Na tem območju naselje Krška vas ne poplavijo vode narasle Save, ampak poplave povzroča narasla reka Krka, ki ob vsakih malo večjih vodah že prestopi bregove in tako poplavi tudi nekaj objektov, ki se nahajajo v bližini;
- za boljšo poplavno varnost bo potrebno nadaljevati z izgradnjo nasipov, ki so zgrajeni za zaščito Čateža ob Savi. Točne lokacije nasipov še niso znane, ker

so v fazi projektiranja, prav tako se še ne ve, kje bo točna lokacija hidroelektrarne Mokrice. Ko bodo stvari dokončno znane bo potrebno urediti poplavno varnost okoliških krajev;

- v računskem modelu reka Sotla ni bila upoštevana, njen prispevek vode reki Savi je precej majhen v primerjavi s pretoki Save. Po besedah domačina pa je reka Sotla že nekajkrat toliko narasla, da je poplavela bližnje travnike in njive ter se približala tudi hišam na tem območju, zato jo bo v nadaljnjih računih potrebno upoštevati;

Ko bodo dokončno znane vse lokacije načrtovanih pregrad energetskih in protipoplavnih nasipov ob spodnji Savi, bo v okviru nadaljnjega dela potrebno ponovno preveriti poplavno varnost za to območje. Hkrati bo potrebno preveriti točne višine obstoječih nasipov in ugotoviti, če te zadoščajo ali bi jih bilo potrebno nadvišati.

Rezultati, dobljeni v okviru te diplomske naloge bodo služili kot referenčno obstoječe stanje in predvsem za primerjavo z izračuni, ki bodo narejeni z najnovejšimi podatki geometrije terena, pridobljenimi s pomočjo LIDAR tehnologije.

VIRI

Bricelj, M. 1991. Reka in človek – Sava. Ljubljana, Državna založba Slovenije d.d., str. 7-9, 70.

Brilly, M., Mikoš, M., Šraj, M. 1999. Vodne ujme. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 186 str.

Ciuha, D. 2006. Pretočnost Save pri visokih vodah v odseku HE Krško – Opredelitev projektiranih hidravličnih osnov za HE Krško, IBE, Ljubljana.

Četina, M. 1988. Matematično modeliranje dvodimenzionalnih turbulentnih tokov, magistrsko delo, FAGG, Ljubljana.

Četina, M., Krzyk, M. 2001. Dvodimenzionalni matematični model toka Soče v območju iztoka HE Plave II, Ljubljana, UL FGG, Katedra za mehaniko tekočin z laboratorijem, naročnik Soške elektrarne Nova Gorica.

Četina, M., Krzyk, M. 2002. Dvodimenzionalni matematični model toka Savinje v Laškem, Ljubljana, UL FGG, Katedra za mehaniko tekočin z laboratorijem, naročnik Pivovarna Laško.

Četina, M., Krzyk, M. 2004. Hidravlična študija, 2D hidravlični model območja Malega Grabna od Dolgega mostu do križanja z Južno obvoznico vključno z razbremenjevanjem visokih vod proti Ljubljanskemu barju.

Četina, M. 1998. Dvodimenzijski program PCFLOW2D za račun toka s prosto gladino. Študijsko gradivo, inženirsko modeliranje naravnih procesov, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Podiplomski študij, Hidrotehnična smer: 67 str.

Četina, M., Krzyk, M. 2005. Ocena stopnje varnosti NE Krško pred poplavami, Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za mehaniko tekočin z laboratorijem, naročnik IBE d.d. Ljubljana.

IZV (2002). Hidrološka študija Save na odseku HE Boštanj, HE Blanca, HE Krško, HE Brežice in HE Mokrice, naročnik IBE, d.d., št. 50/BA -02.

Mikoš, M. 2000. Urejanje vodotokov. Skripta, verzija 01.2000. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za splošno hidrotehniko: 182 str.

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

Steinman, F., Rajar, R., Četina, M., Rah, G., Krzyk, M., Zakrajšek, M., Gosar, L., Prešeren, T. 2007. Recenzija elaboratov o pretočnosti pri visokih vodah Save v povezavi s HE Krško, FGG, Ljubljana.

UJMA: Revija za vprašanja varstva pred naravnimi in drugimi nesrečami 1991, 5. Uredniški svet: prof. dr. Ivan Gams (predsednik) in sodelavci: str. 80-88.

Zakrajšek, M., Krzyk, M. 1997. Preračun posledic morebitne porušitve jezovne zgradbe HE Vrhovo in račun visokovodnih valov, FGG, Ljubljana.

Internetni viri:

Agencija za Okolje Republike Slovenije, www.kremen.arso.gov.si/NVatlas/ewmap.asp/
(26.6.2007)

www.zemljevid.najdi.si/ (16.5.2007)

PRILOGE