

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 Vodarstvo in
komunalno inženirstvo

Kandidat:

Miha Lenič

Hidravlično modeliranje toka Save v Krškem v območju izgradnje športnega centra

Diplomska naloga št.: 129

Mentor:

prof. dr. Matjaž Četina

Somentor:

asist. dr. Mario Krzyk , dr. Andrej Širca

Ljubljana, 30. 11. 2009

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisani **MIHA LENIČ** izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom:
**»HIDRAVLIČNO MODELIRANJE TOKA SAVE V KRŠKEM V OBMOČJU
IZGRADNJE ŠPORTNEGA CENTRA«.**

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

Ljubljana, 19.11.2009

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

- UDK:** 519.61/64:556.166:627.13:(282.243.743)(043.2)
- Avtor:** Miha Lenič
- Mentor:** prof. dr. Matjaž Četina
- Somentorja:** dr. Andrej Širca, zn. sod.
asist. dr. Mario Krzyk
- Naslov:** Hidravlično modeliranje toka Save v Krškem v območju izgradnje športnega centra
- Obseg in oprema:** 60 str., 14 pregl., 27 sl., 10 en.
- Ključne besede:** stalni tok, nestalni tok, poplave, poplavna področja, matematično modeliranje toka, enodimenzionalni tok, dvodimenzionalni tok, poplavna varnost, reka Sava, športni center Krško

Izvleček

Voda je kot del našega življenja tudi v sodobni družbi ključen element našega preživetja. Človek jo v svojo korist izkorišča od nekdaj. Oblikuje ji strugo, da hitreje odvede poplave; zajezi, da lahko zgradi hidroelektrarne ipd. Zato se v hidravliki uporablja kompleksne matematične modele, ki temeljijo na zakonih fizike in nekaterih predpostavkah. Danes se za pomembne študije in projekte pretežno uporabljajo 2D in 3D matematični modeli, ki bolje zajemajo gibanje vode od 1D modelov, danes namenjenih predvsem le za podporo in grobe ocene hidravličnih razmer.

V diplomski nalogi so podani rezultati simulacij matematičnega modeliranja toka Save v Krškem na območju bodočega športnega centra, za kar sta pomembna tako 1D kot 2D model. Za grobe ocene poplavne varnosti je na daljšem odseku uporabljen 1D model HEC-RAS. Rezultat 1D modela je krivulja $Z(Q)$, ki je tudi vhodni podatek na spodnjem robu 2D modela. Pri vseh simulacijah je bil upoštevan stalni tok, ki v naravi seveda ne obstaja, je pa dovolj natančna aproksimacija za račun gladin po poplavnih valovih. Dvodimenzijski izračuni so bili izvedeni s programskim orodjem PCFLOW2D, razvitim na Katedri za mehaniko tekočin Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani.

Tako kot druge reke po Sloveniji je tudi Sava v 20. in 21. stoletju doživela mnogo sprememb, ki so dodobra spremenile njen naravni režim. Danes se gradi hidroelektrarna nad mestom Krško. V diplomski nalogi je bil zato zadan cilj oceniti poplavno varnost bodočega projekta mesta Krško, in sicer športno rekreacijskega centra na desnem bregu Save. Ta bo vključeval športni kompleks z olimpijskim bazenom, zunanji bazen, odprto drsališče/in-line hokej, travnato igrišče za mali nogomet, igrišča za odbojko na mivki itd. Zaradi neposredne nevarnosti visokih vod reke Save je pomembno, da se objekti zavarujejo pred poplavami daljših povratnih dob, predvsem 100 letnimi vodami. V ta namen so bili oblikovani scenariji z različnimi stopnjami poplavne varnosti.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC: 519.61/64:556.166:627.13:(282.243.743)(043.2)
Author: Miha Lenič
Supervisor: prof. Matjaž Četina, Ph.D.
Co-supervisors: Andrej Širca, Ph.D.
Mario Krzyk, Ph.D.
Title: Hydraulic modelling of Sava river flow in the area of the future
Krško sports center
Notes: 60 p., 14 tab., 27 fig., 10 eq.
Key words: steady flow, unsteady flow, mathematical modelling, floods, flood
plains, one dimensional flow, two dimensional flow, flood
protection, the Sava river, Krško sports center

Abstract

In the present thesis, simulation results of a mathematical modelling of the river Sava in Krško are presented, which we got on the basis of 1D and 2D model. For a rough estimates of flood safety 1D model HEC-RAS was used. On the basis of 1D simulations steady water flow was predicted, which in nature doesn't exist but is sufficiently accurate for the calculations performed in this thesis. 2D calculations were simulated with software tool PCFLOW2D. The models theoretical background, the required input data and the mathematical principles are described.

Just like other rivers in Slovenia the river Sava has also experienced many changes in the 20th and 21st century, which caused changes in its natural regime. Today a hydroelectric plant Krško is under construction. The goal of this thesis was therefore to assess flood safety for one of the future projects in Krško: the recreational sports centre on the right bank of the river Sava, which will include a sports complex with swimming pool, outdoor pool, in-line hockey, golf course, soccer, beach volleyball, etc. Given the imminent threat of high water flow of the river Sava, it is important to protect buildings against floods with long return periods, such as 100 years. For this purpose different scenarios were formed to assess levels of flood safety.

ZAHVALA

Za pomoč pri nastajanju diplomske naloge se iskreno zahvaljujem mentorju prof. dr. Matjažu Četini in somentorjema dr. Andreju Širci ter dr. Mariu Krzyku.

Najlepša hvala mama in oče, ker sta mi omogočila študij ter me vsa leta tudi drugače podpirala.

KAZALO VSEBINE

1	UVOD.....	1
2	OBSTOJEČE IN PREDLAGANO BODOČE STANJE STRUGE IN ZAŠČITE PRED POPLAVAMI NA OBMOČJU MESTA KRŠKO.....	3
2.1	Osnovne lastnosti prostora na lokaciji mesta Krško	3
2.1.1	Geografija prostora	3
2.1.2	Meteorologija prostora.....	3
2.1.3	Hidrologija prostora.....	4
2.2	Stanje struge in njena geometrija	5
2.3	Predlagano bodoče stanje struge po izgradnji športno rekreacijskega centra - ŠRC	9
2.4	Poplave.....	14
2.4.1	Poplave leta 1990.....	16
2.4.2	Poplave 1998.....	19
3	IZRAČUNI Z 1D MATEMATIČNIM MODELOM HEC-RAS.....	21
3.1	Splošno o programu HEC-RAS.....	22
3.2	Obstoječe stanje lokacije ŠRC	23
3.2.1	Splošno	23
3.2.2	Podatki	24
3.2.3	Rezultati.....	25
3.3	Predlagano bodoče stanje lokacije ŠRC	32
3.3.1	Splošno	32
3.3.2	Podatki	33
3.3.3	Rezultati.....	34
3.4	Zaključki na podlagi 1D izračunov	37
4	IZRAČUNI Z 2D MATEMATIČNIM MODELOM PCFLOW2D	39
4.1	Opis 2D matematičnega modela PCFLOW2D.....	39
4.1.1	Osnovne enačbe.....	39
4.1.2	Metoda reševanja.....	41
4.1.3	Priprava podatkov ter začetni in robni pogoji.....	42
4.2	Obstoječe stanje terena z geometrijo 2005 – Sc1*	47

4.3	Predlagano bodoče stanje brez HE Brežice – Sc2*	50
4.4	Predlagano bodoče stanje terena s HE Brežice z gladino na koti 153.00 in obratovalnim pretokom 500 m³/s – Sc3*	51
4.5	Predlagano bodoče stanje terena s HE Brežice z gladino na koti 153.00 in pretoki 45 m³/s in 100 m³/s – Sc4*	52
4.6	Predlagano bodoče stanje terena s HE Brežice z denivelirano koto zajezitve -1.1 m – Sc5*	53
4.7	Predlagano bodoče stanje terena s HE Brežice in pretoki Q₀₅, Q₂₀, Q₁₀₀ – Sc6* ..	53
4.8	Primerjava scenarijev Sc1 in Sc1* z dosedaj izvedenimi 2D študijami širšega območja spodnje Save	55
5	UGOTOVITVE IN ZAKLJUČKI	57
5.1	Ocena vpliva predlagane bodoče ureditve	57
5.2	Vpliv oblike rečne marine na smer in hitrosti toka v njej	59
5.3	Usmeritve za nadaljnje delo	60

VIRI

PRILOGE

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Pretoki, uporabljeni v simulacijah.....	21
Preglednica 2: Scenariji simulirani z 1D matematičnim modelom HEC-RAS.....	21
Preglednica 3: Primerjava gladin vode in hitrosti v strugi med Sc1 in Sc2 od profila P102 do P110 pri pretoku $Q_{obr} = 500 \text{ m}^3/\text{s}$	26
Preglednica 4: Primerjava gladin vode in hitrosti v strugi med Sc1 in Sc2 od profila P102 do P110 pri pretoku $Q_{100} = 3290 \text{ m}^3/\text{s}$	28
Preglednica 5: Pretočna krivulja obstoječega stanja v stacionaži 747497 iz 1D modela za spodnji robni pogoj numerične mreže 2D matematičnega modela	31
Preglednica 6: Primerjava gladin vode in hitrosti v strugi od profila P102 do P110	38
Preglednica 7: Pretoki, uporabljeni v simulacijah.....	45
Preglednica 8: Maksimalne kote gladin vode v prečnih profilih na območju bodočega ŠRC pri različnih pretokih za obstoječe stanje terena	48
Preglednica 9: Maksimalne kote gladin vode v prečnih profilih pri pretoku $Q_{100} = 3290 \text{ m}^3/\text{s}$ za obstoječe stanje terena	49
Preglednica 10: Maksimalne kote gladin vode v prečnih profilih na obravnavanem odseku pri obratovalnem pretoku ($Q_{obr} = 500 \text{ m}^3/\text{s}$) za bodoče stanje terena	51
Preglednica 11: Maksimalne kote gladin vode v prečnih profilih na obravnavanem odseku pri pretokih $45 \text{ m}^3/\text{s}$ in $100 \text{ m}^3/\text{s}$ za bodoče stanje terena	52
Preglednica 12: Primerjava maksimalnih kot gladin vode v prečnih profilih na obravnavanem odseku pri pretoku $3290 \text{ m}^3/\text{s}$	54
Preglednica 13: Primerjava maksimalnih kot gladin vode v prečnih profilih na obravnavanem odseku pri pretoku $3290 \text{ m}^3/\text{s}$ med Sc6* in študijo "HE Brežice, Idejne rešitve" (HSE d.o.o., 2007).....	54
Preglednica 14: Primerjava gladin vode pri obstoječem stanju terena in pretoku $Q_{100} = 3290 \text{ m}^3/\text{s}$ med profili P103 in P110 med Sc1 in 2D študijama	56

KAZALO SLIK

Slika 1: Geometrija Save od HE Blanca do začetka akumulacijskega bazena HE Brežice HE Brežice	7
Slika 2: Karakteristični prečni profili na obravnavanem rečnem odseku 1D modela (HE Blanca, zgornji cestni most v Krškem, profil P2 – športno rekreacijski center	8
Slika 3: Športno rekreacijski center (Vir: Savaprojekt, 2009).....	11
Slika 4: Severni del (levo) in južni del ŠRC (desno).....	12
Slika 5: "Vojaški most" (levo) in Leskovški potok (desno).....	12
Slika 6: Rečna marina poleg ŠRC (Vir: Savaprojekt, 2009).....	14
Slika 7: Jez pri NEK med poplavami leta 1990 (Vir: Arhiv NEK)	15
Slika 8: Staro Krško na desnem bregu Save med poplavami leta 1990 (Vir: Arhiv NEK).....	16
Slika 9: Jez pri NEK med poplavami leta 1990 (Vir: Arhiv NEK)	16
Slika 10: Visoke vode leta 1998 pri NEK (Vir: Arhiv NEK).....	20
Slika 11: Jez pri NEK leta 1998 (Vir: Arhiv NEK).....	20
Slika 12: Situacija obravnavanega področja od profila P110 do P102.....	23
Slika 13: Sc1 - Detalj obstoječega stanja področja bodočega ŠRC, pri 100 letni visoki vodi.	25
Slika 14: Scenarij Sc1 - podolžni profil gladine Save od P102 (stacionaža 749334) do prečnega profila P110 (stacionaža 746202) z obratovalnim pretokom HE Brežice 500 m ³ /s	27
Slika 15: Scenarij Sc2 - podolžni profil gladine Save od P102 (stacionaža 749334) do prečnega profila P110 (stacionaža 746202) z obratovalnim pretokom HE Brežice 500 m ³ /s	27
Slika 16: Scenarij Sc1 - pretok $Q_{100} = 3290 \text{ m}^3/\text{s}$ v profilu P105 (stacionaža 748062).....	29
Slika 17: Scenarij Sc1 - podolžni profil gladine Save od P102 (stacionaža 749334) do prečnega profila P110 (stacionaža 746202) pri 100 letni visoki vodi.....	29
Slika 18: Scenarij Sc2 - podolžni podolžni profil gladine Save od P102 (stacionaža 749334) do prečnega profila P110 (stacionaža 746202) pri 100 letni visoki vodi.....	30
Slika 19: Pretočna krivulja obstoječega stanja v stacionaži 747497 iz 1D matematičnega modela za spodnji robni pogoj numerične mreže 2D matematičnega modela	31
Slika 20: Topografski aerofoto posnetek območja bodočega ŠRC (Vir: ARSO, 2009).....	33

Slika 21: Scenarij Sc3 - detalj bodočega področja ŠRC pri 100 letni visoki vodi	35
Slika 22: Scenarij Sc4 - detalj bodočega področja ŠRC pri 100 letni visoki vodi	35
Slika 23: Scenarij Sc3 - podolžni podolžni profil gladine Save od P102 (stacionaža 749334) do prečnega profila P110 (stacionaža 746202) pri 100 letni visoki vodi	36
Slika 24: Sc4 - podolžni podolžni podolžni profil gladine Save od P102 (stacionaža 749334) do prečnega profila P110 (stacionaža 746202) pri 100 letni visoki vodi	36
Slika 25: Delovanje sistema LIDAR in njegove komponente.....	43
Slika 26: Pregledna situacija s prikazom z modelom PCFLOW2D obravnavanega območja.	44
Slika 27: Računska mreža 4 x 4 m postavljena na podlogo s plastnicami	44

KAZALO PRILOG

Priloga A	Pregledna situacija obravnavanega območja s prikazom točk
Priloge B	Sedanje stanje geometrije terena (2005)
B1	Hitrostno polje in plastnice globin pri pretoku Save $Q = 45 \text{ m}^3/\text{s}$
B2	Hitrostno polje in plastnice globin pri pretoku Save $Q = 100 \text{ m}^3/\text{s}$
B3	Hitrostno polje in plastnice globin pri pretoku Save $Q = 500 \text{ m}^3/\text{s}$
B4	Hitrostno polje in plastnice globin pri pretoku Save $Q = 2160 \text{ m}^3/\text{s}$
B5	Hitrostno polje in plastnice globin pri pretoku Save $Q = 2730 \text{ m}^3/\text{s}$
B6	Hitrostno polje in plastnice globin pri pretoku Save $Q = 3290 \text{ m}^3/\text{s}$
B7	Podolžni profili gladine vode v osi reke Save
B8	Prečni profili gladine vode
Priloge C	Bodoče stanje geometrije terena brez HE Brežice
C1	Hitrostno polje in plastnice globin pri pretoku Save $Q = 500 \text{ m}^3/\text{s}$
C2	Hitrostno polje in plastnice globin pri pretoku Save $Q = 3290 \text{ m}^3/\text{s}$
C3	Podolžni profili gladine vode v osi reke Save
C4	Prečni profili gladine vode
Priloge D	Bodoče stanje geometrije terena s HE Brežice (153,0 m n.v.)
D1	Hitrostno polje in plastnice globin pri pretoku Save $Q = 45 \text{ m}^3/\text{s}$
D2	Hitrostno polje in plastnice globin pri pretoku Save $Q = 100 \text{ m}^3/\text{s}$
D3	Hitrostno polje in plastnice globin pri pretoku Save $Q = 500 \text{ m}^3/\text{s}$
D4	Hitrostno polje in plastnice globin pri pretoku Save $Q = 500 \text{ m}^3/\text{s}$ (detajl rečne marine)
D5	Hitrostno polje in plastnice globin pri pretoku Save $Q = 2160 \text{ m}^3/\text{s}$
D6	Hitrostno polje in plastnice globin pri pretoku Save $Q = 2730 \text{ m}^3/\text{s}$

- D7 Hitrostno polje in plastnice globin pri pretoku Save $Q = 3290 \text{ m}^3/\text{s}$
- D8 Podolžni profili gladine vode v osi reke Save
- D9 Prečni profili gladine vode
-
- Priloge E Bodoče stanje geometrije terena s HE Brežice (151,9 m n.v.)
-
- E1 Hitrostno polje in plastnice globin pri pretoku Save $Q = 45 \text{ m}^3/\text{s}$
- E2 Hitrostno polje in plastnice globin pri pretoku Save $Q = 100 \text{ m}^3/\text{s}$
- E3 Hitrostno polje in plastnice globin pri pretoku Save $Q = 250 \text{ m}^3/\text{s}$
- E4 Hitrostno polje in plastnice globin pri pretoku Save $Q = 500 \text{ m}^3/\text{s}$
- E5 Hitrostno polje in plastnice globin pri pretoku Save $Q = 500 \text{ m}^3/\text{s}$
(detajl rečne marine)
- E6 Podolžni profili gladine vode v osi reke Save
- E7 Prečni profili gladine vode

OKRAJŠAVE IN SIMBOLI

Okrajšave

ARSO	Agencija Republike Slovenije za okolje
DMT	digitalni model terena
DPN	državni prostorskih načrt
FGG	Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo
GPS	Global Positioning System
HE	hidroelektrarna
HEC-RAS	Hydrologic Engineering Center - River Analysis System
IC	industrijska cona
IMU	inertial measurement unit
IZV	Inštitut za vode
KMTe	Katedra za mehaniko tekočin
LIDAR	Light Detection and Ranging
NEK	Nuklearna elektrarna Krško
ŠRC	športno rekreacijski center
TIN	triangulacijska mreža
UL	Univerza v Ljubljani
VP	vodomerna postaja
1D	enodimenzijski
2D	dvodimenzijski
3D	tridimenzijski
n. v.	nadmorska višina

Simboli

Simbol	Opis	Enota
b	širina krone nasipa	m
B	širina struge	m
c_f	Chezyjev koeficient trenja	$m^{1/2}/s$
$c_D, c, c_1, c_2,$ $\sigma_k, \sigma_\epsilon, c_\mu$	empirične konstante v modelu turbulence	
C	Courantovo število	
g	zemeljski pospešek	m/s^2
G	produkcija turbulentne kinetične energije k na enoto mase	m^2/s^2
h	globina	m
ha	hektar	10000 m^2
I	naklon energijske črte	
I_0	naklon dna struge	
k	turbulentna kinetična energija na enoto mase	
K_k	prevodnost posameznega odseka	
K_1, K_2, K_3	konvekcijski členi v diskretizirani kontinuitetni enačbi	
m	naklon brežine	
M	korekcijski faktor gibalne količine	
n_G	koeficient hrapavosti po Manningu	$sm^{-1/3}$
$P_{kv}, P_{\epsilon v}$	produkcija turbulentne kinetične energije zaradi trenja ob rečno dno	
R	hidravlični radij	m
S	površina prečnega preseka struge	m^2
t, Δt	čas, časovni korak	s
u, v	komponente hitrosti v x in y smeri	m/s
u^*	trenjska hitrost	m/s
q	vertikalni dotok v posamezno celico na enoto površine	m/s
Q	pretok	m^3/s
v_z	vertikalna komponenta hitrosti	m/s
V	volumen	m^3

z	kota gladine	m
z_b	kota dna	m
β	Funkcija trenjskega tipa in oblike prečnega prereza	
ε	stopnja disipacije turbulentne kinetične energije na enoto mase	m^2/s^3
μ_z	koeficient neprizmatičnosti	
$\nu_{\text{ef}}, \nu, \nu_t$	kinematični koeficienti efektivne, molekularne in turbulentne viskoznosti	m^2/s
ρ	gostota vode	kg/m^3

SLOVAR MANJ ZNANIH BESED IN TUJK

disipacija	stanje razpršenosti
diskretizacija	točkovni približek zvezne funkcije
hibriden	sestavljen iz več stvari
impliciten	oblika, zapis funkcije, v katerem odvisna spremenljivka ni sama na eni strani enačbe
inundacija	povodenj, poplava poplavnih področij
interpolacija	ocena vrednosti funkcije, na podlagi točk okoli nje
iteracija	ponovitev procesa
konvergenca	zmanjševanje razlik, ki delijo kaj enotnega
parcialno	delno
propagacija	širitev, razširjanje
recirkulacija	ponavljajoče gibanje v krogu
triangulacija	način določanje razdalj in smeri na podlagi točno znanega izhodišča
viskoznost	lastnost tekočine, da se upira strigu ob prisotnosti gradienta hitrosti, navadno izražena kot količnik

1 UVOD

Voda kot del našega življenja je tudi v sodobni družbi ključen element preživetja. Služi kot tekočina, brez katere naše telo ni zmožno delovati, življenjski prostor iz katerega pridobivamo hrano, prostor za rekreacijsko, raziskovalno, sproščujoče okolje in nenazadnje obnovljivi vir energije. Vsa živa bitja so odvisna od vode posredno ali neposredno. Torej je voda v raznih oblikah nujna za naš obstoj.

Po drugi strani lahko voda povzroča tudi poplave, zato je potrebno posege v vodotok skrbno načrtovati. Gibanje vode, ki se prilagodi površini in terenu, je matematično težko opisati. Zato se v hidravliki uporablja kompleksne matematične modele, ki temeljijo na zakonih fizike in nekaterih predpostavkah. V splošnem so lahko enodimenzijski (1D), dvodimenzijski (2D) in tridimenzijski (3D) modeli. Danes se za pomembne študije in projekte vse bolj uporabljajo 2D in 3D matematični modeli, ki lahko bolje zajemajo gibanje vode od 1D modelov, namenjenih predvsem za podporo kompleksnejšim modelom, določitvi robnih pogojev in hitrim približnim ocenam različnih variant in grobe ocene. Še posebej so se 2D modeli izkazali za natančnejše v primeru toka po ravninskem terenu s kompleksno geometrijo.

Za diplomsko nalogo, kjer smo se ukvarjali z matematičnim modeliranjem toka Save v Krškem, sta pomembna tako enodimenzijski kot dvodimenzijski model. Za približne ocene poplavne varnosti na daljšem odseku in določitev robnih pogojev je uporabljen enodimenzijski model HEC-RAS, ki smo ga opisali v poglavju 3. Rezultat 1D modela je krivulja $Z(Q)$, ki je bila nato upoštevana kot vhodni podatek na spodnjem robu 2D modela. Pri vseh simulacijah je bil upoštevan stalni tok, ki v naravi seveda ne obstaja, je pa dovolj natančna aproksimacija za obravnavane poplavne valove, ki so položni in dolgi. Dvodimenzijski izračuni so simulirani s programskim orodjem PCFLOW2D, razvitim na Katedri za mehaniko tekočin Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani. 2D matematični model uporablja osnovno kontinuitetno in dinamični enačbi za nestalni tok, Patankar-Spaldingovo numerično metodo končnih volumnov za njihovo reševanje in preko vmesnih programov omogoča tudi grafični izris rezultatov.

Tako kot druge reke po Sloveniji je tudi Sava v 20. in 21. stoletju doživela mnogo sprememb, ki so dodobra spremenile njen naravni režim. Že konec 19. stoletja so po Krškem polju meandrirajočo Savo umestili v raven kanal, da so bila naselja ob njej varna, hkrati pa so pridobili tudi potrebne poljedeljske površine. Delo človeške roke, ki jo je spremenilo, s tem ni bilo končano, ampak se še danes nadaljuje z izgradnjo verige hidroelektrarn na spodnji Savi, ki zagotavljajo čist in obnovljiv vir energije. Tako se danes gradi hidroelektrarna nad mestom Krško. Sledila ji bo hidroelektrarna Brežice, ki je trenutno še zmeraj v postopku umeščanja v prostor in kasneje še hidroelektrarna Mokrice. Zato je prostor okoli mesta Krško zanimiv s hidravličnega in hidrološkega vidika, saj ima gladina Save ključno vlogo za oceno poplavne varnosti obstoječih in načrtovanja novih objektov v Krškem.

V diplomski nalogi smo si zadali cilj oceniti poplavno varnost enega izmed bodočih projektov mesta Krško in sicer športno rekreacijskega centra na desnem bregu Save, ki je načrtovan na območju med Tenis klubom Krško in mestnim pokopališčem. Center bo vključeval športni kompleks z olimpijskim bazenom, zunanji bazen, odprto drsališče/in-line hokej, travnato igrišče za mali nogomet, igrišča za odbojko na mivki, mini golf, kegljišče ter kolesarske in sprehajalne poti. Zaradi varovanja bodoče infrastrukture in objektov je predvidena njihova zaščita pred visokimi vodami Save. Za urbanizirana območja je običajni nivo zaščite Q_{100} , ki se aplicira tudi na vzporedno tekočem projektu izgradnje HE na spodnji Savi. Idejne zasnove projekta predvidevajo protiplavne nasipe in dvig terena nad kote gladin omenjenih poplav. V ta namen smo oblikovali scenarije, jih simulirali, primerjali in na koncu podali ugotovitve in zaključke o poplavni varnosti športnega centra.

2 OBSTOJEČE IN PREDLAGANO BODOČE STANJE STRUGE IN ZAŠČITE PRED POPLAVAMI NA OBMOČJU MESTA KRŠKO

2.1 Osnovne lastnosti prostora na lokaciji mesta Krško

2.1.1 Geografija prostora

Krško leži na robu Krške ravnine, ki je najbolj južna pokrajina slovenskega panonskega sveta. Mesto je locirano na obeh bregovih reke Save, na začetku aluvialne doline reke Save. Na severu ga obdajata Bizeljsko in Krško gričevje s panonskim značajem. Na zahodu meji na dinarsko Novomeško pokrajino, na jugu pa na dinarske Gorjance. Vzhod Krške ravnine se razteza vse do meje s Hrvaško, ki jo predstavlja reka Sotla. Povprečni naklon Krške ravnine je 1,6°.

Krško leži v spodnje savski regiji Slovenije. Regija obsega občine Brežice, Kostanjevica ob Krki, Krško, Sevnica, Radeče in Bistrica ob Sotli. Število prebivalcev v regiji je bilo leta 2005 meseca decembra 69.899. Krško šteje 6994 prebivalcev (Popis, 2002).

2.1.2 Meteorologija prostora

Krška ravan ima zmerno celinsko podnebje. Količina padavin se zmanjšuje od zahoda proti vzhodu. Šentjernejsko polje, Zakrakovje in Krakovski gozd dobijo letno od 1100 do 1200 mm padavin, Krško polje okrog 1100 mm, Brežiško polje pa od 1000 mm ob Sotli do 1100 mm ob Savi. Prvi padavinski višek je junija in drugi novembra, prvi nižek januarja in drugi oktobra.

Povprečna letna temperatura je med 9 in 10 °C, julijska okrog 20 °C in januarska med -1 in -2 °C. Celotna regija je zaščitena pred zahodnimi vetrovi z Alpami in Dinaridi. Ekstremni vremenski pojavi so redni, vendar je njihova intenziteta dokaj nizka, čeprav ta trend v zadnjih letih narašča.

2.1.3 Hidrologija prostora

Pogrezanje večjega dela Krške ravnine je pritegnilo vodne tokove s širšega zaledja. Glavne reke so Sava, Krka in Sotla. Sava in Sotla naj bi pred tem tekli severno od tod proti vzhodu, Krka pa zahodno od tod proti Beli krajini. Rečna mreža v kotlini je še mlada, na kar kaže tudi njena precejšnja nesimetričnost. Krka se po izlivu Radulje umakne proti Gorjancem, kamor jo je s svojim prodom porinila Sava. Podobno se je proti gričevju pri Mariji Gorici na hrvaški strani umaknila Sotla.

Krka ima dežno-snežni režim. Višek vode je aprila in drugi novembra, prvi nižek avgusta in drugi januarja. Tako kot Krka ima Sava dežno-snežni režim s prvim viškom aprila in drugim novembra ter prvim nižkom avgusta in drugim januarja. Srednji letni vodomerni pretok pri vodomerni postaji Čatež je 288,8 m³/s.

Tretjina Krške ravnine so poplavna območja. Poplavlajo vse tri največje reke, prav tako pa tudi večina njihovih pritokov, predvsem tistih s Krških in Bizeljskih goric.

Reka Sava ima hudourniški značaj. Na slovenskem ozemlju v dolžino meri okoli 200 km. Njeno celotno porečje od izvira pa do profila jezusa Nuklearne elektrarne Krško (NEK) meri 7764 km² in ima gorato-hriboviti značaj. Velikost povodja do hrvaške meje je približno 10837 km². Sava ima relativno bogato zgodovino opazovanja vodostaja in pretoka. S pomočjo limnografov obstajajo meritve za obdobje od 75 do 100 let. S tem je omogočeno tudi natančno spremljanje oblike vodnega vala. Postaje, ki beležijo te podatke, si sledijo: Radovljica, Prebačevo, Sveti Jakob, Litija, Radeče in Čatež. Novejše postaje s krajšimi nizi podatkov so še Hrastnik, Jesenice na Dolenjskem in merska mesta na pregradah HE na spodnji Savi, ki zaenkrat še niso umerjena. Merilne postaje pa so tudi na pritokih: Sora-Suha, Ljubljaničica-Moste ter Savinja Laško in (novejša) Veliko Širje. Pomemben pritok Save je Savinja, ki se izliva v Savo pri Zidanem Mostu. Njena prispevna površina je okoli 1848 km². Ima prav tako izrazit hudourniški značaj, saj padavinska voda odteče izjemno hitro.

2.2 Stanje struge in njena geometrija

Kot je bilo že omenjeno je Sava hudourniška reka in tipična alpska prodonosna reka, ki svojo strugo vrezuje v svoje naplavine. Te mestoma tvorijo obsežne naplavinske ravnice z značilnimi rečnimi terasami kot so npr. Sorško polje, Ljubljansko polje in Krško-Brežiško polje. Omenjena polja so pomembni vodonosniki za lokalno pitno vodo, ki se napajajo s savsko vodo.

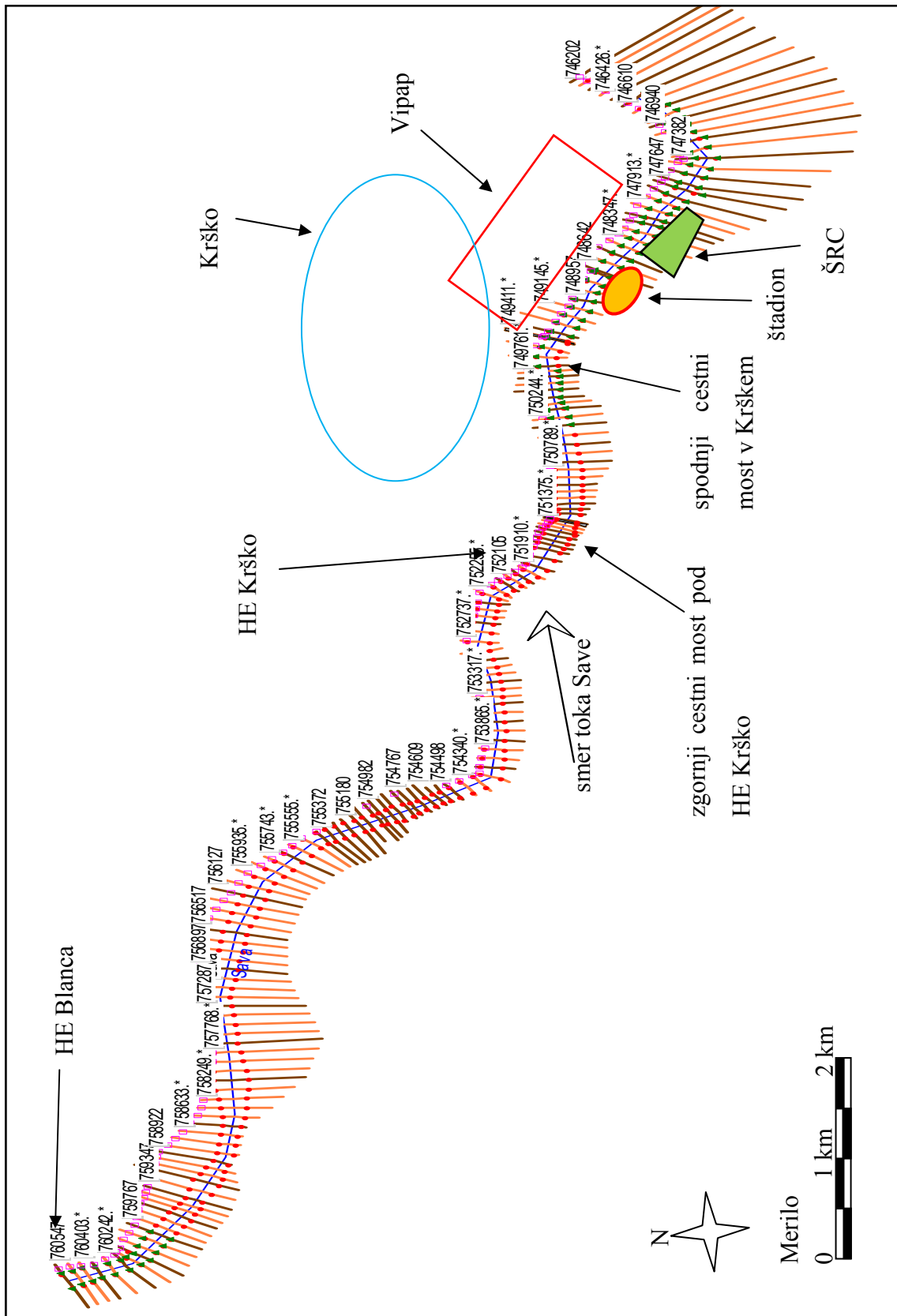
Zaledje Save sprošča letno okoli 2,8 milijona m³ hribinskega materiala. Vendar pa odplavljanje ne dosega 50 %, kar pomeni, da je dotok rinjenih in lebdečih plavin v povodju Save okoli 1 milijon m³. Od tega se slabih 700.000 m³ plavin premešča naprej po reki Savi skozi mejni prerez na Hrvaško, dobrih 300.000 m³ pa se jih letno odlaga že v Sloveniji. Dno Save je bilo v preteklosti verjetno večinoma prodnato in s tem podvrženo stalnemu procesu transporta proda. Zaradi izgradnje raznih zadrževalnikov rinjenih plavin in zagrajevanja hudournikov tako na Savi kot njenih pritokih je bilo že konec sedemdesetih let ugotovljeno, da je naravni pretok proda na Savi že zelo moten in da prodonosnosti sploh ne bo več mogoče meriti.

Zaradi izkoriščanja hidroenergetskega potenciala in namena varovanja ljudi in infrastrukture pred poplavami se danes na spodnji Savi gradi veriga hidroelektrarn. Trenutno je v gradnji HE Krško, ki ji bosta predvidoma sledila še HE Brežice in HE Mokrice. V energetske politiki Slovenije je pa načrtovano tudi izkoriščanje Save v njenem srednjem delu. Izgradnja HE ter nasipi ob bregovih Save spreminjajo odtočni režim reke in ustavljajo transport rinjenih plavin. Prva pregrada na celotni Savi je HE Moste, ki popolnoma prekinja pretok rinjenih plavin dolvodno od HE. Tako Sava Dolinka do sotočja s Savo Bohinjko premešča v glavnem plavine, ki jih pridobi s poglobljanjem dna in bočnim erodiranjem brežin. Poglobljanje dna pa je izrazito vsaj do sotočja s Tržiško Bistrico. Naslednja pregrada je HE Mavčice, ki popolnoma prekinja pretok rinjenih plavin do HE Medvode. Tako prihaja do dolvodne erozije pod HE Medvode in poglobljanja struge pod Tacnom. Pomemben dotok proda Savi prispeva Savinja, vendar le do prodnih jam pred HE Vrhovo, ki preprečujejo zaprojevanje akumulacijskega bazena. Pod HE Vrhovo se je takoj po njeni izgradnji pričela dolvodna

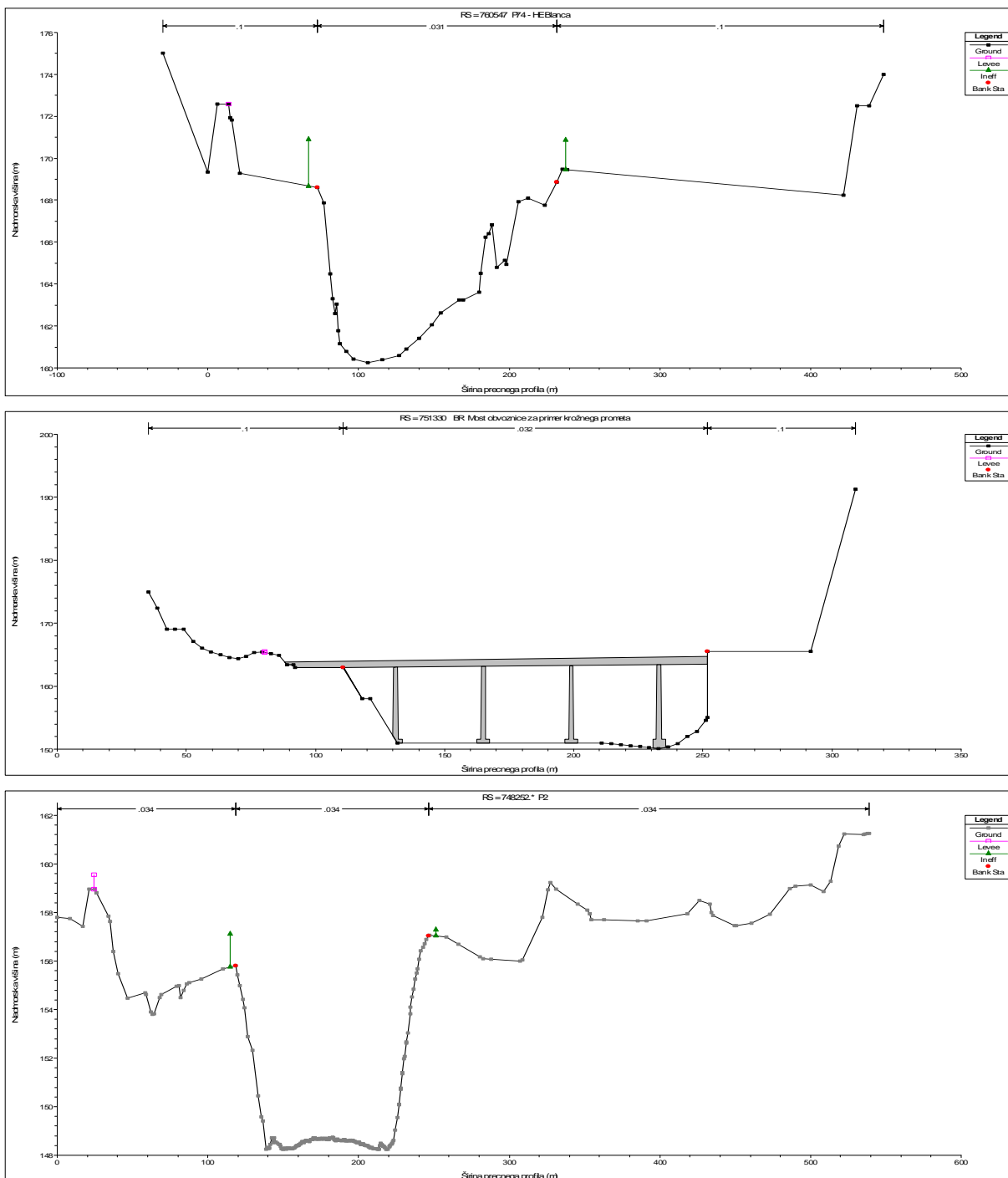
erozija, ki je ob neutrjenem podslapju in neizgrajeni naslednji stopnji privedla do lokalnega erozijskega tolmana globine tudi do 6 m. Z izgradnjo HE Boštanj in HE Blanca se je pojav umiril. V akumulacijskih bazenih HE in prodnih zadrževalnikih se letno zadržuje okoli 74.000 m³ rinjenih plavin, od tega okoli 20.000 m³ v prodnem zadrževalniku Hrušica na Savi Dolinki, okoli 28.000 m³ rinjenih plavin v akumulacijskem bazenu HE Mavčiče in okoli 26.000 m³ rinjenih plavin v akumulacijskem bazenu HE Vrhovo. Podatkov o količini zadrževanih plavin v bazenih HE Boštanj in Blanca ni bilo možno pridobiti. Vendar lahko na podlagi strokovnega članka "Prodna bilanca reke Save od Jesenic do Mokric" (Mikoš, 2000), kjer avtor navaja, da rečne pregrade HE praktično popolnoma prekinejo pretok rinjenih plavin sklepamo, da se bo transport rinjenih plavin popolnoma prekinil, ko bo zgrajena celotna veriga HE. Pred izgradnjo HE Boštanj in Vrhovo se je skozi mejni hidrološki profil Save na Hrvaško premeščalo okoli 60.000 m³ rinjenih plavin letno. Danes so verjetno te številke mnogo manjše. Prihaja verjetno tudi do lokalnega poglobljanja struge Save dolvodno od HE Blanca, kot se je to dogajalo takoj po izgradnji HE Vrhovo, ker HE Blanca še ni bila zgrajena (Mikoš, 2000). Vendar se bo erozija struge Save pod HE Blanca kmalu ustavila zaradi izgradnje HE Krško. V zgoraj omenjenih podatkih ni upoštevano izkoriščanje rinjenih plavin na pritokih reke Save.

Pri oblikovanju dna akumulacijskih bazenov HE pa sodelujejo tudi lebdeče plavine, ki povzročajo nabiranje mulja. Vendar pa je slednje mogoče v omejenem obsegu izpirati v času visokovodnih konic, ki zmanjšajo vpliv visokih koncentracij kalnosti na floro in favno reke. Letna kalnost se na Savi zmanjšuje z izgradnjo verige HE (Mikoš, 2000), hkrati pa tudi s pospešeno izgradnjo komunalnih in industrijskih čistilnih naprav.

Na spodnji sliki 1 je prikazan v 1D modelu uporabljen rečni odsek reke Save od HE Blanca (stacionaža 760547) do profila P110 (stacionaža 746202), ki je gorvodno od jezua NEK. V 1D modelu smo uporabili 179 prečnih profilov, ki vključujejo profile izmerjene v naravi in tiste, ki so interpolirani med njimi. Posebnosti tega rečnega odseka so del verige HE na spodnji Savi, ki je v gradnji, ozka rečna dolina, industrijski obrat Vipap, levobrežni protipoplavni nasipi, ki ščitijo NEK in mesto Krško, potok Potočnica (levi pritok Save pri Vipapu) ter dva cestna mostova. Na desnem bregu je tudi štadion v Krškem ter predvideni športno rekreacijski center, katerega poplavno varnost smo ocenjevali.



Slika 1: Geometrija Save od HE Blanca do začetka akumulacijskega bazena HE Brežice



Slika 2: Karakteristični prečni profili na obravnavanem rečnem odseku 1D modela (zgoraj: HE Blanca, v sredini: zgornji cestni most v Krškem, spodaj: profil P2 – športno rekreacijski center

2.3 Predlagano bodoče stanje struge po izgradnji športno rekreacijskega centra - ŠRC

Mesto Krško ima namen na desnem bregu Save zgraditi športno rekreacijski center (v nadaljevanju ŠRC)¹, ki bo umeščen med Savo na vzhodu in pokopališčem na zahodu ter s tenis igrišči Teniškega kluba Krško na severu. ŠRC bo vključeval športni kompleks z olimpijskim bazenom, zunanji bazen, odprto drsališče/in-line hokej, travnato igrišče za mali nogomet, igrišča za odbojko na mivki, mini golf, kegljišče ter kolesarske in sprehajalne poti.

Predvidena lokacija ŠRC z okolico se nahaja na območju znotraj mesta Krško, na stavbnih zemljiščih, ki so po namenski rabi namenjene za šport in rekreacijo. Del zemljišč je opredeljen kot mestno zelenje (ozek rob ob reki Savi, ob potoku ter cesti). Obstoječi planski akt opredeljuje območje južno od Leskovškega potoka trenutno kot kmetijske površine.

Območje strokovnih podlag zajema dve območji ob izlivnem delu Leskovškega potoka v reko Savo:

- Večji, severni del območja športno- rekreacijskega centra v velikosti približno 3,6 ha se nahaja med desnim bregom reke Save, cesto ob obstoječem pokopališču Krško in Leskovškim potokom. Severno od lokacije je urejen teniški kompleks s šestimi zunanjimi tenis igrišči, ter dvignjenim platojem za zaprta tenis igrišča. V območju ŠRC se nahaja večja makadamska površina, občasno namenjena za parkirišče oz. postavitev zabaviščnega parka. Prav tako se v območju nahajajo manjši skladiščni objekti. V večini pa so površine do Leskovškega potoka nepozidane.

Groba ocena izračuna nasipov severnega dela (bazenski kompleks in športni park):

Bazenski kompleks:

- velikost 18.980 m²,
- grobo ocenjena obstoječa povprečna kota terena = 157,40 m n.v.
- minimalna ureditvena kota = 157,60 (0,5 m nad sedaj znano poplavno koto)
- povprečna minimalna višina nasipa = 0,20 m

¹ V diplomski nalogi smo poimenovali športni center s kratico ŠRC, ker ime oz. naziv centra še ni znan.

- ocenjena količina materiala za nasip = 3.800 m³

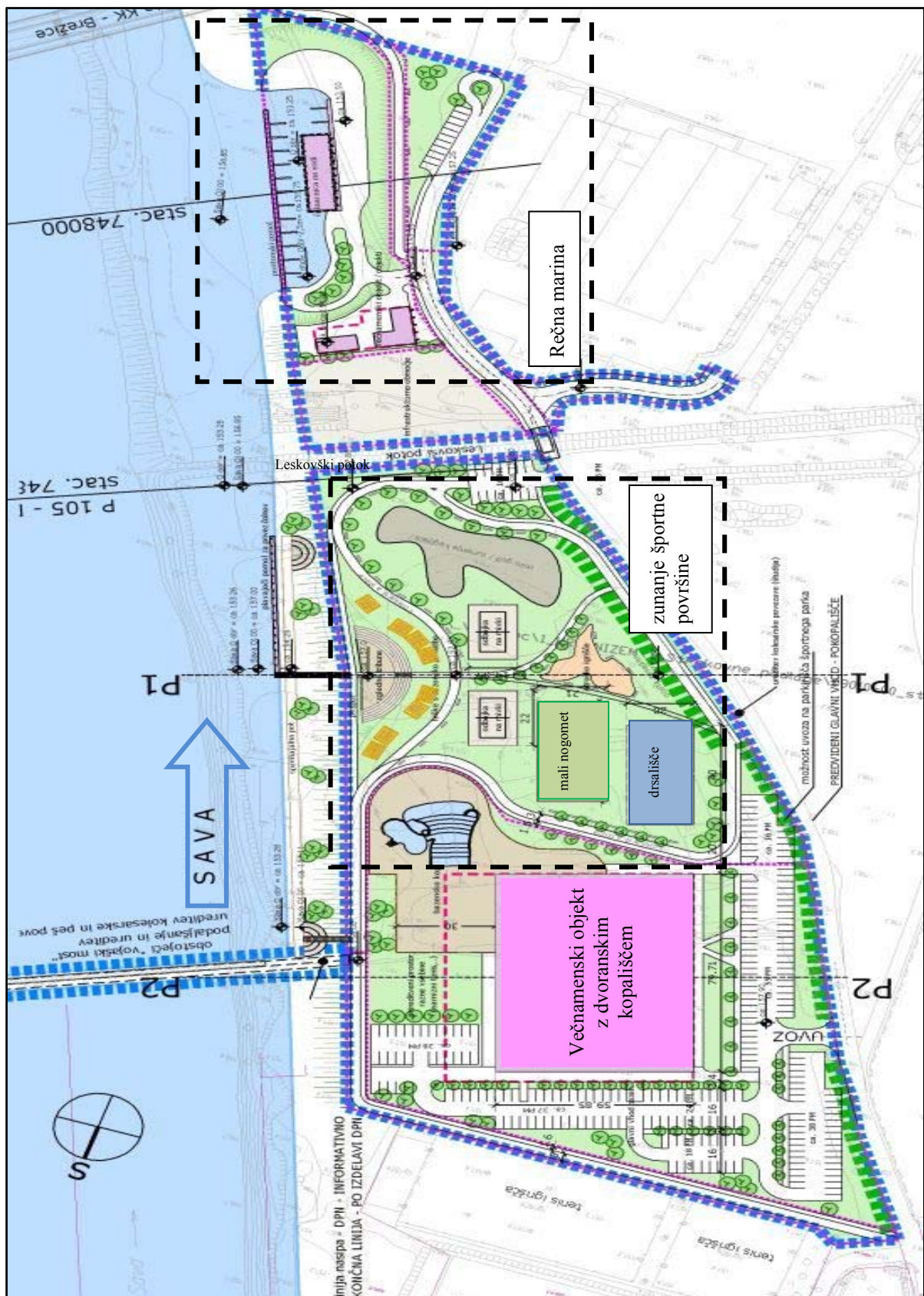
oziroma:

- s strokovnimi podlagami predlagana ureditvena kota = 157,80 (ocenjena oz. predlagana)
- povprečna minimalna višina nasipa = 0,40 m
- ocenjena količina materiala za nasipe = 7.600 m³

Športni park:

- velikost območja je 15.615 m²,
 - grobo ocenjena obstoječa povprečna kota terena = 156,80 m n.v.
 - minimalna ureditvena kota = 157,50 do 157,80
 - povprečna minimalna višina nasipa = 0,50 m
 - ocenjena količina materiala za nasipe = 7.800 m³
- Manjše območje v velikosti 1,07 ha se nahaja južno od Leskovškega potoka in zajema površine med reko Savo, industrijsko cono IC Žadovinek in bodočo traso povezovalne ceste Krško – Brežice, oziroma njenim prečkanjem reke Save. Ob izlivnem delu potoka na južni strani je površina namenjena komunalnim ureditvam (obstoječi zadrževalni bazen visokih voda, v izgradnji pa je črpališče za potrebe kanalizacije).

Na območju ŠRC (slika 3) v profilu P2 (stacionaža 748252) je čez reko Savo postavljen tudi most ("Vojaški most"), ki služi kot premostitveni objekt za infrastrukturne vode (srednje napetostni elektrovod, vodovod, ...). Most ni namenjen nobeni obliki prometa, niti peš prometu. V okviru strokovnih podlag za umestitev ŠRC in mostu v državnem prostorskem načrtu (DPN) HE Brežice se predvideva tudi rekonstrukcija in podaljšanje obstoječega mostu za namen izvedbe kolesarske in peš povezave med predvidenim športnim centrom in predvideno obvoznico Krško ob levem bregu Save. Kot je razvidno iz slike 3 se bo struga razširila v desno brežino za približno 15 m. Uredila se bo obvodna peš pot, brežine zatravile in zasadile posamezne drevesne skupine.



Slika 3: Športno rekreacijski center (Vir: Savaprojekt, 2009)

Obstoječe kote terena severno od Leskovškega potoka se gibljejo od okrog 157,3 m n.v. na severu, v osrednjem delu so povprečno višje (od 157,2 m n.v., večinoma okrog 157,50 m n.v. in do 159,50 m n.v. na vzhodnem delu), proti jugu se teren spusti na povprečno 156,50 m n.v., na manjšem delu ob javni cesti pa doseže najnižjo točko 156,40 m n.v.. Obstoječa lokalna cesta in javna pot, ki potekata zahodno ob ureditvenem območju in na kateri se območje (območje severno od Leskovškega potoka) prometno navezuje, sta na kotah (od severa) od 158,10 m n.v. do 158,70, obstoječi mostiček čez Leskovški potok (vozišče) pa je na koti ca. 158,7 - 158,90 m n.v..



Slika 4: Severni del (levo) in južni del ŠRC (desno)

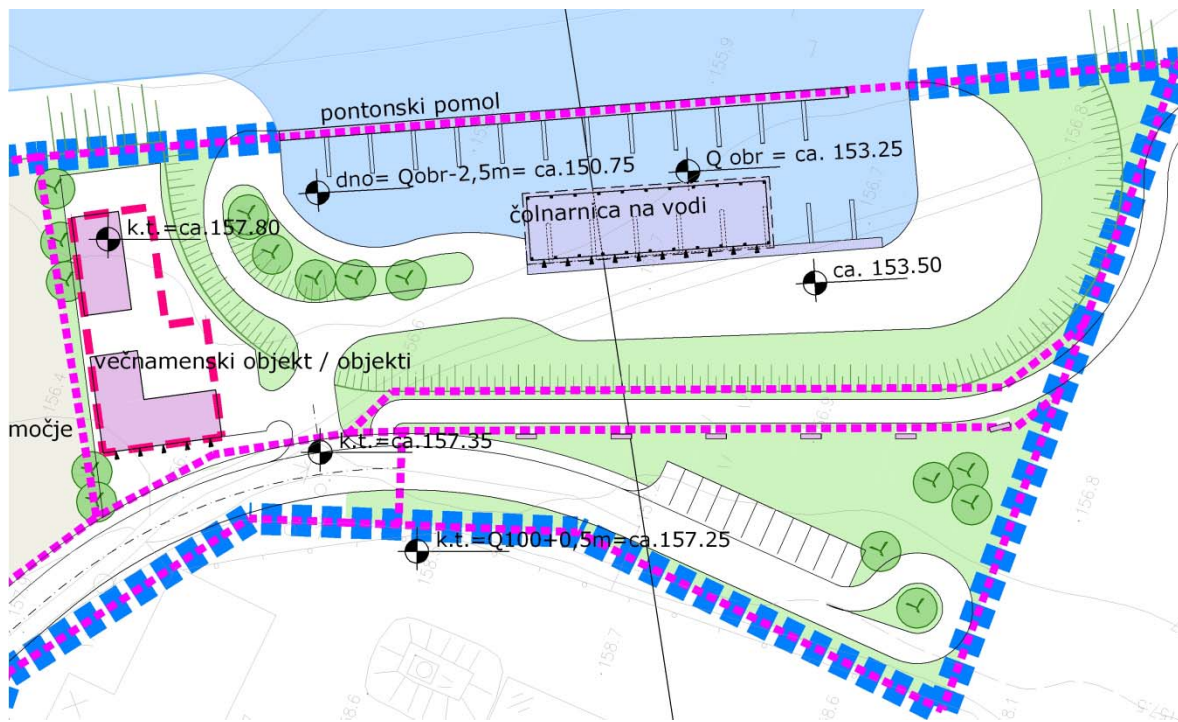


Slika 5: "Vojaški most" (levo) in Leskovški potok (desno)

Po projektu umestitve območja v DPN HE Brežice znaša predvidena koto gladine Q_{100} reke Save po izgradnji HE Brežice med profiloma P105 in P 104 ca. 157,10 m n.v. Zato svetujejo, da bi teren na severni strani ureditvenega območja moral biti dvignjen minimalno na koto predvidene $Q_{100} + 0.5$ m; ca. 157,60 m n.v. Glede na podatke projekta "Ureditve Leskovškega potoka" (Inštitut za vode RS, 2009) je treba ureditve dolvodno od mostička Leskovškega potoka varovati pred visokimi vodami oz. koto 157,30 m n.v. Pri ureditvi platoja ob Leskovškem potoku (severno in južno ureditveno območje) dolvodno strokovne podlage upoštevajo minimalno koto ureditve 157,80 m n.v.. Pri ureditvah gorvodno od mostička Leskovškega potoka pa morajo biti ureditve za 50 cm dvignjene nad koto 158,50, kar pomeni minimalno koto 159,00 (s strokovnimi podlagami predlagana minimalna ureditvena kota na območju Športnega parka je tako 157,50 do 157,90 m n.v.) Ureditvene kote so informativno povzete iz projekta "Strokovne podlage za umestitev območja športnega centra in mostu v DPN HE Brežice" (Sava Projekt, 2009) in so tudi okvirno potrjene s strani projektanta IBE d.o.o. kot kote na "varni strani".

Po projektu "Državni prostorski načrt za hidroelektrarno Brežice" (Savaprojekt in ACER, 2008) je za normalni profil desnega nasipa predlagan profil s krono širine $b = 4,0$ m in naklonom brežine $m = 2$ na vodni strani. Na zračni strani je naklon brežine nasipa $m = 2$ ali blažji (npr. do $m = 10$). Predvideva se tudi tesnitev nasipa, saj se bo verjetno uporabljal material iz savske sipine. Načeloma se bo uporabljalo glineno jedro. V kolikor slednje ne bo mogoče, bo potrebna vgradnja tesnilne folije (npr. bentonitne).

V južnem delu ŠRC se predvideva rečna marina s plavajočim pomolom. Globina marine bo 2,5 m oziroma obratovalni pretok $Q_{obr} - 2,5$ m. Pri tem se predvideva, da bo kota pri pretoku $Q_{obr} (500 \text{ m}^3)$ na 153,25 m n.v.



Slika 6: Rečna marina poleg ŠRC (Vir: Savaprojekt, 2009)

Izvedba terena v depresiji za visokovodnim nasipom ali zidom s prostorskega oziroma krajinskega vidika ni ustrezna. Območje je glede na zasnovo, namen in lokacijo smiselno povezati z reko Savo oziroma akumulacijskim bazenom HE Brežice, s čimer se poveča odprtost območja, možnost razvoja dodatnih obvodnih dejavnosti in s tem povečanje pestrosti lokacije. Območje bazena mora gravitirati v nasprotno stran od pokopališča, torej proti reki Savi.

2.4 Poplave

Mesto Krško je zaradi svoje lege ob spodnjem toku Save močno na udaru ob visokih vodah Save. Izjemno veliko porečje obsega tudi porečja Sore, Kamniške Bistrice in Savinje, zato lahko Sava pri Krškem dosega ekstremno visoke vode. Zaradi svojega značaja pa tudi poplavlja zelo hitro.



Slika 7: Jez pri NEK med poplavami leta 1990 (Vir: Arhiv NEK)

Pretok in gladine Save se opazujejo od leta 1926 dalje. Največje visoke vode Save, ki jih pomnijo današnje generacije so bile v letih 1933, 1990 in 1998. Poplave iz leta 2007 v Krškem niso imele takšnega obsega, kot zgoraj omenjene. Sledeči podatki (Vir: ARSO, Arhivski hidrološki podatki) veljajo za:

- Vodomerno postajo (VP) Radeče:

- Leto 1933: 2809 m³/s
- Leto 1990: 2991 m³/s
- Leto 1998: 2940 m³/s

- VP Čatež:

- Leto 1933: ni podatka
- Leto 1990: 3267 m³/s
- Leto 1998: 3266 m³/s

Danes so v teku hidravlične raziskave (hibridni hidravlični modeli za spodnje vode HE Krško, HE Brežice, HE Mokrice), ki bodo določile bolj natančne pretoke iz let 1990 in 1998, kot pa so sedaj veljavni. Raziskovanje poteka na fizičnih hidravličnih modelih, na podlagi katerih se bodo kasneje umerili matematični hidravlični modeli. Slednji omogočajo simuliranje različnih poplav, upoštevanje sprememb na terenu (novi objekti, izgradnja nasipov...).

2.4.1 Poplave leta 1990

Najhujše zabeležene poplave v Krškem so bile leta 1990. Večji del starega jedra Krškega na desnem bregu je bil poplavljen. Gladina vode je bila 2,5 m pod cestnim mostom v Krškem. Na območju NEK se je Sava, zaradi 1 m nižjega desnega bregu, prelivala na desne inundacije.



Slika 8: Staro Krško na desnem bregu Save med poplavami leta 1990 (Vir: Arhiv NEK)



Slika 9: Pogled proti reaktorski zgradbi NEK med poplavami leta 1990 (Vir: Arhiv NEK)

Leta 1990 je visokovodni val Savinje prispel v Radeče kar dobrih deset ur pred visokovodnim valom Save. Sočasnost obeh konic poplavnih valov bi lahko povzročila še bistveno večji obseg poplav, ki do sedaj še niso bile zabeležene. Na katastrofalno visoko vodo Save leta 1990 od Litije navzdol sta poleg Savinje najbolj vplivala njena pritoka Sora in Kamniška Bistrica. Pri obeh je visoka voda 1.11.1990 dosegla pojav stoletne visoke vode. Ekstremni pretoki Sore in Kamniške Bistrice so ob že nekoliko višji vodi Save v zgornjem toku vplivali na nastop katastrofalno visoke vode v njenem srednjem in spodnjem toku. Sava je v Litiji in Radečah tako narasla, da je dosegla stoletno povratno dobo, do sedaj največja voda v Radečah iz leta 1933 (2809 m³/s) je bila presežena, medtem ko je bila od Krškega navzdol nekoliko nižja kot leta 1933.

Obilne padavine in visoke vode površinskih voda so povzročile tudi močan dvig gladine podtalnice v nekaterih ravninskih vodonosnikih Slovenije, posebno še v Ljubljanski kotlini, Savinjski dolini in na Krško-Brežiškem polju. Pri omenjenih vodonosnikih ima infiltracija v prodnato-peščenih naplavinah iz površinskih voda poleg stalnih "prehranjevalcev" prevladujoč vpliv na dvig podtalnice. K močnejšemu dvigu gladine je pripomogla tudi visoka namočenost tal med površino in podtalnico. Na področjih formiranja visokovodnega vala so padle zelo intenzivne padavine v manj kot 10-urnem časovnem obdobju.

Od 26. do 30. oktobra so bile zelo intenzivne padavine predvsem ob hribovitih območjih Tolminskega in Trnovskega gozda. Znatno manj padavin je bilo na območju Snežnika in Savinjskih Alp, še manj pa na območju Karavank. Nad Slovenijo so prevladovali zahodni zračni tokovi in intenzivne padavine so nastale predvsem zaradi dviganja vlažnega in toplega zraka ob gorskih ovirah.

Večina padavin je padla v noči med 31. oktobrom in 1. novembrom ter 1. novembra čez dan. Najmočnejše padavine so padale manj kot 24 ur, vendar so razdeljene na 2 merska dneva. Pas najmočnejših padavin je potekal od Kanina prek Komne in Vogla do Vojskega in od tam dalje prek Blegoša, Brnika, Kamniške Bistrice in Luč do Topolšice. V preteklosti so bile v Sloveniji izmerjene že znatno močnejše padavine (ko je v 24 urah padla enaka količina padavin kot 1. in 2. novembra skupaj, torej v 48 urah), ki pa niso povzročile tako velike škode. Iz tega so izvedli sklep, da 48- ali 24-urne padavine za poplavo niso toliko pomembne

kot močne padavine v krajših časovnih intervalih. V študiji so ugotovili, da so škodo povzročile predvsem padavine, ki so padle v kratkem časovnem obdobju, medtem ko tiste porazdeljene enakomerno preko obeh dni niso povzročile večje škode. Dnevne in tudi dvodnevne padavine niso bile tako intenzivne, da bi v normalnih razmerah ob enakomerni časovni porazdelitvi povzročile poplave. Že pred začetkom teh dvodnevni 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.

Sava je močno narasla že v Ljubljanski kotlini, še močneje pa od Zidanega Mosta navzdol, kjer so jo dosegle visoke vode Savinje. 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 po zožitvi pri Brežicah naprej proti Dobovi in Bregani ter še dalje proti Zagrebu. Zanimivo je, da pritoki Save med Zidanim Mostom in Bregano zaradi skromnih padavin na območju njihovih porečij skoraj niso poplavljali. Značilna je tudi časovna razlika med glavnimi nalivi v severozahodni Sloveniji ter porastom vode v Savi od Zidanega Mosta navzdol.

Na območju Posavskega hribovja vse do Radeč, skozi katerega teče Sava po apnenčasti soteski, je bil obseg poplav razmeroma majhen (z izjemo Litijske kotline), saj je dolina globoko vrezana in ima zmožnost visokih pretokov. Sava tudi v močneje razširjenih delih doline pod Radečami, zaradi znatne poglobljenosti svojega rečnega korita (5 - 6 m) marsikje ni poplavljala. Videti je, kot da je tu obseg poplavnega sveta bolj kot od širine doline odvisen od različne poglobljenosti rečnega korita, ki je posledica diferenciranega premikanja tektonskih struktur ter ustrezno različno intenzivne globinske erozije. Tako Sava med Zidanim Mostom in Boštanjem pri Sevnici skoraj ni prestopila svojega 5 - 6 m globoko zajedenega korita, čeprav se njena dolina na tem območju, predvsem 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. Na ravnem Krško-brežiškem polju so se poplave savske vode razlile še čez

3 km na široko in predvsem na desni strani Save močno presegle obseg poplav iz let 1933 in 1964. Na levem bregu Save med Vidmom in Brežicami je bil obseg poplavljenega sveta v primerjavi z letoma 1933 in 1964 celo nekoliko manjši, kar je posledica na novo zgrajenih nasipov in dejstva, da tukajšnji pritoki niso poplavljali (deloma zaradi regulacije). Med Brežicami in Bregano je bil kljub silovito narasli Savi obseg zadnjih poplav precej manjši kot v letih 1933 in 1964. K temu so poleg obrežnih nasipov za zaščito Čateža ter toplic, pa tudi naselij in njivskih površin na levi strani Save med Brežicami in Sotlo pod Ločami, ugodno vplivale tudi regulacije potokov (Grabrnice in Sotle). Poplave so bile tudi na z nasipi zaščitenem prostoru, vendar je bil njihov obseg razmeroma majhen, saj se je omejil samo na njivske površine ter toplice vzhodno od Čateža.

2.4.2 Poplave 1998

Leta 1998 je bilo največ poplav jeseni (oktober, november), njihov obseg in škoda pa sta bili večji od vsakoletnih pojavov. Poplave meseca novembra so bile po obsegu podobne katastrofalnim poplavam iz leta 1990. Od januarja do julija pa vodostaji rek niso presegli vrednosti, pri katerih se prične izredno spremljanje in obveščanje.

Visoke vode in poplave med 4. in 6. novembrom

V noči iz 4. na 5. november so se zaradi spremembe vremenskega položaja okrepile padavine v osrednji in vzhodni Sloveniji. Močne padavine z nevihtami so povzročile zvišanje gladin rek s povirij Kamniških Alp, Uršlje gore in Pohorja. Savinja, obogatena z naraslimi vodami pritokov, je prestopila bregove (Celje, Laško), njen pretok pa je presegel 50-letno povratno dobo in se tako izenačil s pretokom iz leta 1990.

V jutranjih urah in podnevi 5. novembra je poplavljala Sava v srednjem in spodnjem toku. Visokovodni val Save je poplavljal tudi med Ljubljano in Litijo. V spodnjem toku je obogatena z naraslo Savinjo, Mirno in Sevnico pri Čatežu dosegla pretok z 20-letno povratno dobo. Sava je podnevi in zvečer poplavlala v Zasavju, Sevnici in okolici, med Sevnico in Krškim in v starem delu Krškega. Popoldne in zvečer je poplavlala tudi v Brežicah in okolici. Zajezila je naraslo Krko, ki se je razlila v Krški vasi.



Slika 10: Visoke vode leta 1998 pri NEK (Vir: Arhiv NEK)



Slika 11: Jez pri NEK leta 1998 (Vir: Arhiv NEK)

3 IZRAČUNI Z 1D MATEMATIČNIM MODELOM HEC-RAS

Izračuni z 1D matematičnim modelom so primarno služili za grobo oceno poplavne varnosti lokacije ŠRC Krško ter pridobitev krivulje $Q(Z)$, ki je nato služila kot spodnji robni pogoj za bolj detajlni 2D matematični model, uporabljen na krajšem območju Save pri ŠRC Krško. V spodnji preglednici podajamo seznam pretokov ki smo jih uporabljali v simulacijah.

Preglednica 1: Pretoki, uporabljeni v simulacijah

Pretok Q [m^3/s]
$Q = 45$
$Q = 100$
$Q = 250$
$Q_{obr} = 500$
$Q = 1000$
$Q = 1500$
$Q_5 = 2160$
$Q_{20} = 2730$
$Q_{100} = 3290$
$Q = 4000$

Podajamo pa tudi preglednico, kjer so zbrane vse štiri simulacije s pripadajočimi vhodnimi parametri, ki smo jih izvedli s programskim orodjem HEC-RAS.

Preglednica 2: Scenariji simulirani z 1D matematičnim modelom HEC-RAS

Scenarij	Stanje lokacije ŠRC	HE Brežice [kota zaježitve 153,00 m n.v. $Q_{obr} = 500 m^3/s$]	Protipoplavni nasipi	Simulirani pretoki
Sc1	obstoječe	NE	levi breg	vsi pretoki iz Preglednice 1
Sc2	obstoječe	DA	levi breg in desni breg	
Sc3	bodoče (širitev struge + dvig terena)	DA	levi in desni breg od P102 do P109	
Sc4	bodoče (širitev struge + dvig terena)	DA	levi in desni breg po projektu DPN HE Brežice	

3.1 Splošno o programu HEC-RAS

Program je bil razvit s strani US Department of Defense, Army Corps of Engineers (<http://www.hec.usace.army.mil>), za namene upravljanja rek, luk, in drugih javnih gradenj v okviru pristojnosti US Department of Defense. HEC-RAS je računalniški program, ki modelira hidravliko vodnega pretoka v naravnih rekah in drugih kanalih. Program je enodimenzionalen, kar pomeni, da ni neposrednega modeliranja hidravličnih količin v prečni smeri na tok.

Hidrology Engineering Center (HEC) iz Davisa, Kalifornija, je razvil River Analysis System (RAS) v pomoč hidravličnim inženirjem za modeliranje tokav rečnih strugah, toka po poplavnih površinah itd. Vključuje širok spekter možnih vhodnih podatkov, komponente za hidravlične analize, shranjevanje podatkov, izrisovanje grafov in izpise podatkov.

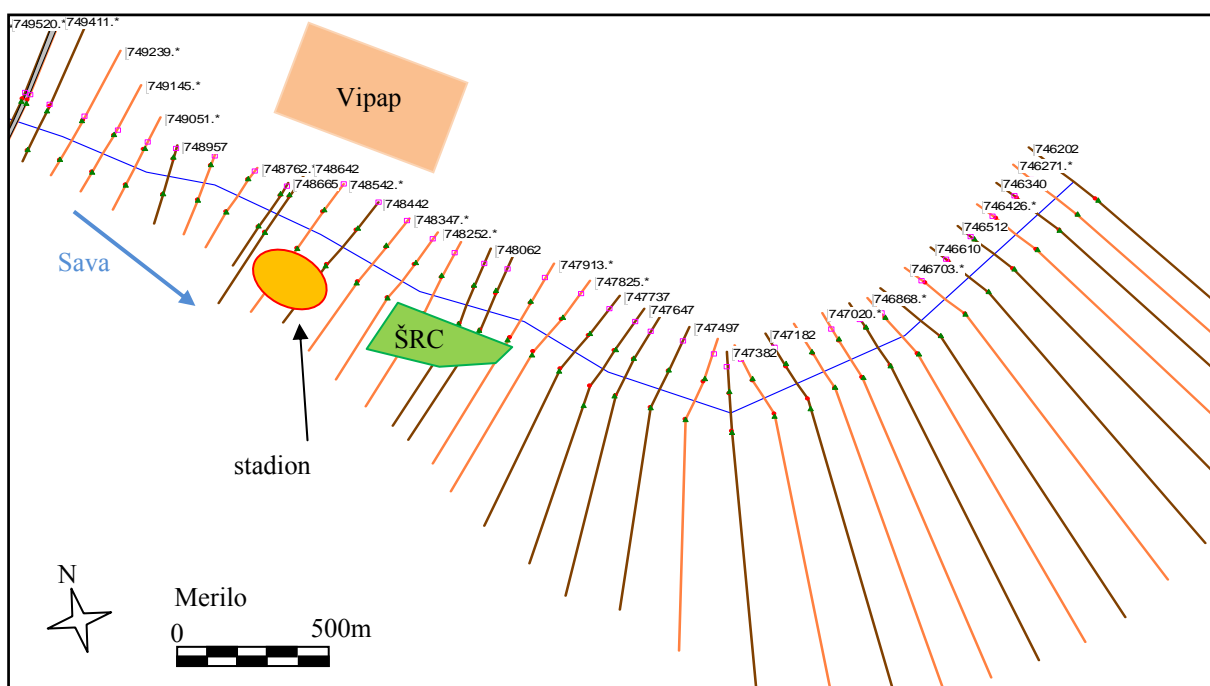
Osnovni računski postopek v HEC-RAS-u za stalni pretok temelji na rešitvi enodimenzionalne energijske enačbe. Izgube energije so ocenjene s trenjem in ožanjem/širjenjem struge. Dinamična enačba se lahko uporabi v razmerah, ko se vodna gladina profila hitro spreminja. Te razmere vključujejo hidravlični skok, hidravliko mostov in ocenjevanje profilov na rečnih sotočjih. Za nestalni tok HEC-RAS v celoti rešuje dinamično Saint-Venantovo enačbo z uporabo implicitne metode končnih razlik.

HEC-RAS je opremljen za modeliranje mreže kanalov, razvejan sistem ali za en sam rečni odsek. Pri bolj kompleksnih pojavih moramo izvesti nekatere poenostavitve, da lahko uporabimo HEC-RAS-ov enodimenzionalni pristop. Program je sposoben modeliranja mirnega, deročega in mešanega režima toka skupaj z vplivi mostov, prepustov, jezov in drugih objektov.

3.2 Obstoječe stanje lokacije ŠRC

3.2.1 Splošno

V tem poglavju bomo z 1D modelom, pridobljenim od IBE iz projekta "HE Krško – Idejni projekt", preverili, kakšno je obstoječe stanje gladine na lokaciji ŠRC in njegovi okolici ter kakšno bi bilo stanje, če bi že obratovala HE Brežice. Ta objekt bo namreč vnesel spremembe v gladinsko in hitrostno stanje Save, kar je treba upoštevati pri načrtovanju objektov v obvodnem prostoru. Za naše potrebe smo 1D model od IBE malo spremenili. Vstavili smo spodnji cestni most v Krškem, upoštevali neefektivna področja toka ter skrajšali računski odsek dolvodno samo do profila P110 (stacionaža 746202). Že v poglavju 2.3 smo predstavili bodoče stanje na sami lokaciji ŠRC, zato tega tukaj nismo vključili. Situacija obravnavanega področja od profila P110 (stacionaža 746202) do P102 (stacionaža 749334) je prikazana na sliki 12.



Slika 12: Situacija obravnavanega področja od profila P110 do P102

Izvedli smo simulacije z dvema scenarijema:

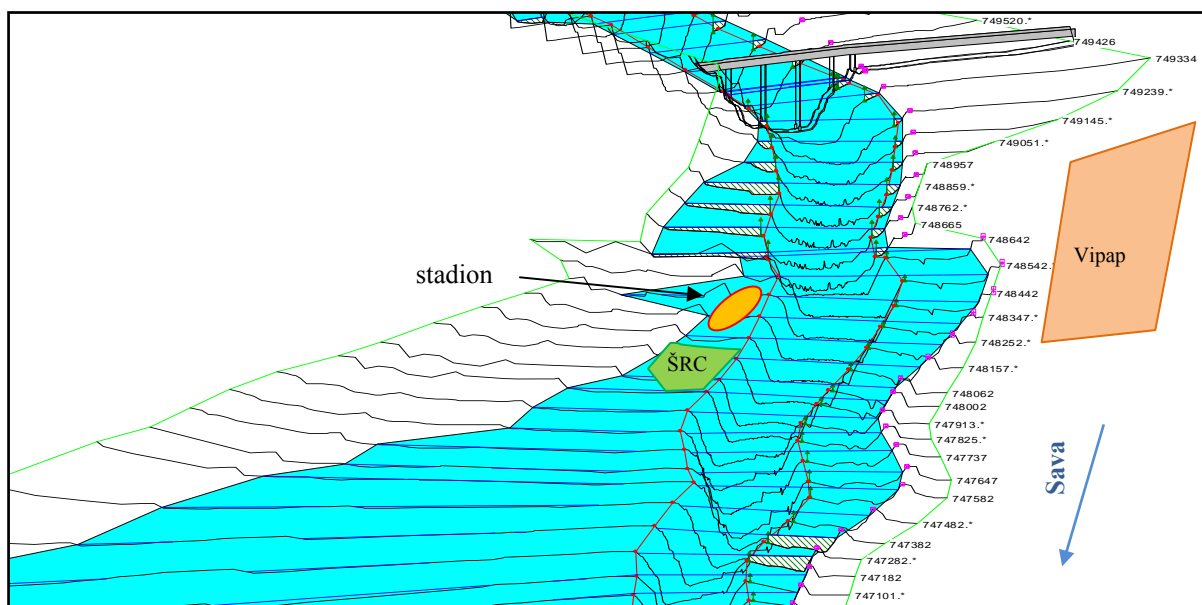
- Scenarij 1 (Sc1):
 - Obstoječe stanje struge in terena
 - HE Brežice še ni zgrajena
- Scenarij 2 (Sc2):
 - Obstoječe stanje struge in terena
 - HE Brežice je zgrajena, kota zajezitve na 153 m n.v., $Q_{obr} = 500 \text{ m}^3/\text{s}$

Omenjena scenarija ne vključujeta bodočih kot terena, na katerih temeljijo vsi objekti ŠRC, ampak zajemata današnje kote terena na lokaciji ŠRC. Izračuni nam bodo podali približno oceno varnosti lokacije, kateri bomo nato lahko dodali še varnostno nadvišanje terena (odločili smo se za 80 cm varnostnega nadvišanja). Predpostavljamo, da bo gladina pri Q_{obr} v Sc2 višja za okoli 20 cm kot v Sc1. Predpostavka temelji na izsledkih študije "Strokovne podlage za umestitev območja športnega centra in mostu v DPN HE Brežice" (Sava Projekt, 2009), ki je bila izvedena za obravnavano območje.

3.2.2 Podatki

Hidravlični model obsega rečni odsek od HE Blanca do začetka akumulacijskega bazena HE Brežice. Konkretno od profila P74 (stacionaža 760547), ki je HE Blanca, do profila P110 (stacionaža 746202). Zaradi boljše preglednosti rezultatov bomo v nadaljevanju predstavljali samo odsek od P110 (stacionaža 746202) do P102 (stacionaža 749334).

V obeh scenarijih (Sc1 in Sc2) smo kot robni pogoj v zadnjem dolvodnem profilu P110 določili stalni tok na osnovi izbranega padca dna ($I_0 = 0,001$). Tako padec dna kot vrednosti n_G smo povzeli po 1D modelu IBE (HE Krško – Idejni projekt). Na obravnavanem rečnem odseku smo za hrapavost struge uporabili koeficiente hrapavosti v razponu od $n_G = 0,030 \text{ sm}^{-1/3}$ do $0,085 \text{ sm}^{-1/3}$. Zgornja vrednost n_G je bila uporabljena na kratkem odseku, kjer je objekt HE Krško. Tako je bil zajet vpliv HE, ker nismo upoštevali natančne geometrije jezua HE Krško. Za hrapavost na poplavnih področjih pa koeficiente od $n_G = 0,030 \text{ sm}^{-1/3}$ do $n_G = 0,100 \text{ sm}^{-1/3}$.



Slika 13: Scenarij Sc1 - detalj obstoječega stanja področja bodočega ŠRC, pri 100 letni visoki vodi

Pri simulacijah smo se osredotočili na dva pretoka, in sicer obratovalni Q_{obr} ($500 \text{ m}^3/\text{s}$) in Q_{100} ($3290 \text{ m}^3/\text{s}$). Za oba pretoka smo namreč pridobili predvidene približne kote gladin za prečne profile na območju športnega centra po izgradnji HE Brežice in razširitve struge na odseku ŠRC iz "Strokovne podlage za umestitev območja športnega centra in mostu v DPN HE Brežice" (Sava Projekt, 2009). Poleg omenjenih pretokov smo izvedli simulacije tudi s pretoki $45 \text{ m}^3/\text{s}$, $100 \text{ m}^3/\text{s}$, $250 \text{ m}^3/\text{s}$, Q_{05} in Q_{20} . Tukaj je potrebno poudariti, da so hidrološki podatki in s tem statistično izvrednoteni pretoki za Savo na obravnavanem odseku še vedno predmet raziskav. Zato uporabljeni pretoki niso zadnji uradno potrjeni. Rezultate za primerjavo med Sc1 in Sc2 podajamo samo za pretok Q_{obr} . Računi za pretok Q_{100} so potrdili predvidevanja projektnih osnov HE Brežice, ki prevzemajo, da bodo obsegi največjih poplav (Q_{50} , Q_{100}) in s tem gladine približno enake tako pri obstoječem kot bodočem stanju. Gladine pri pretoku Q_{100} so se izkazale v obeh scenarijih Sc1 in Sc2 enako visoke.

3.2.3 Rezultati

Izračuni in primerjava med Sc1 in Sc2 za pretok $Q_{obr} = 500 \text{ m}^3/\text{s}$ je potrdila domnevo, da se bodo gladine v Sc2 dvignile za ca. 20 cm, glede na koto zaježitve na sami jezovni zgradbi HE

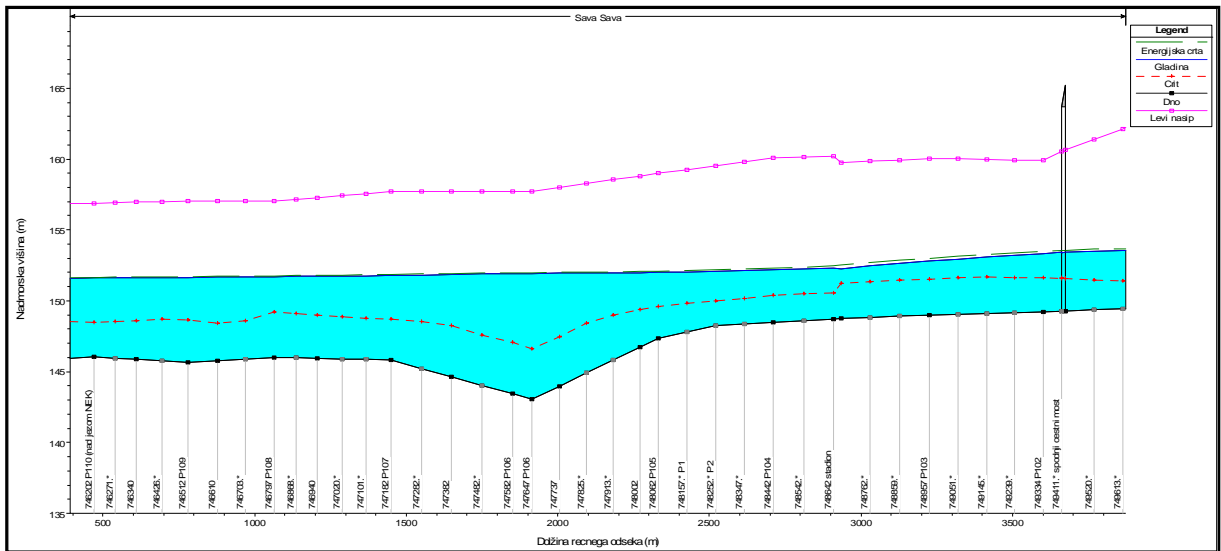
Brežice. V spodnji preglednici 3 podajamo gladine in hitrosti v strugi Save za rečni odsek od mostu Krško do jezua NEK.

Preglednica 3: Primerjava gladin vode in hitrosti v strugi med Sc1 in Sc2 od profila P102 do P110 pri pretoku $Q_{obr} = 500 \text{ m}^3/\text{s}$

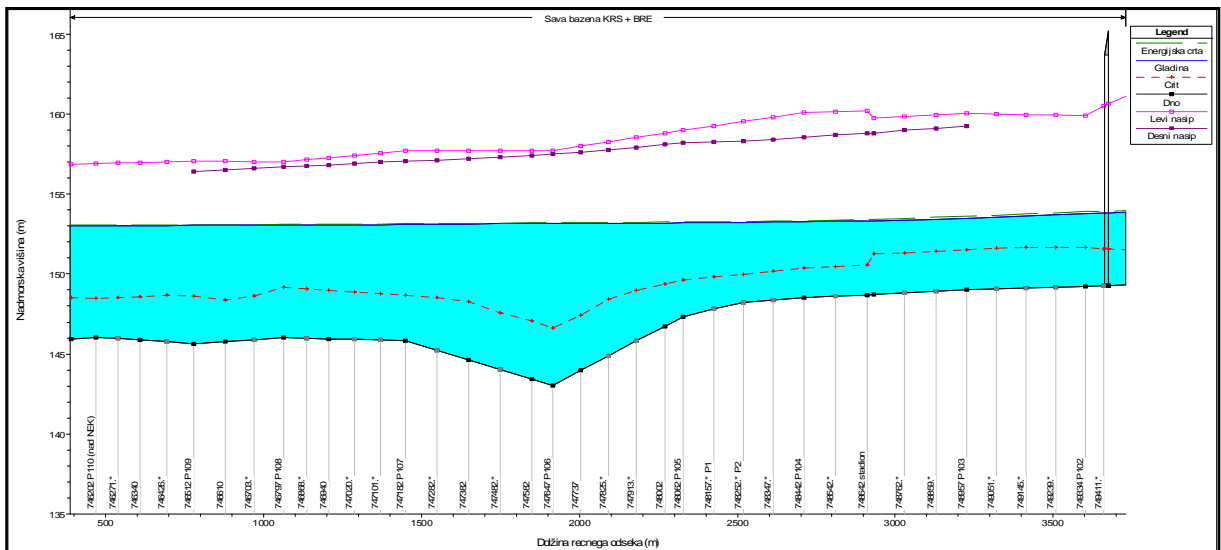
$Q_{obr} = 500 \text{ m}^3/\text{s}$			Sc1	Sc2		Sc1	Sc2	
Opis lokacije	prečni profil	stacionaža	kota gladine vode	kota gladine vode	razlika gladine	hitrosti v strugi	hitrosti v strugi	razlika hitrosti
			(m)	(m)	(m)	(m/s)	(m/s)	(m/s)
	P102	749334	153.33	153.76	0.43	1.83	1.59	-0.24
	P103	748957	152.81	153.49	0.68	2.00	1.56	-0.44
		748665	152.26	153.30	1.04	2.24	1.52	-0.72
stadion		748642	152.32	153.32	1.00	1.61	1.20	-0.41
stadion	P104	748442	152.19	153.27	1.08	1.58	1.16	-0.42
"Vojaški most"	P2	748252	152.08	153.23	1.15	1.50	1.10	-0.40
ŠRC	P1	748157	152.04	153.21	1.17	1.45	1.08	-0.37
Leskovški potok	P105	748062	152.00	153.19	1.19	1.41	1.05	-0.36
rečna marina		748002	151.98	153.19	1.21	1.34	1.01	-0.33
		747737	151.94	153.17	1.23	1.05	0.84	-0.21
	P106	747647	151.94	153.17	1.23	0.96	0.78	-0.18
		747582	151.92	153.16	1.24	1.02	0.82	-0.20
		747382	151.86	153.13	1.27	1.21	0.94	-0.27
	P107	747182	151.79	153.09	1.30	1.35	1.03	-0.32
		746940	151.73	153.07	1.34	1.16	0.85	-0.31
	P108	746797	151.70	153.06	1.36	1.10	0.79	-0.31
		746610	151.68	153.05	1.37	0.93	0.70	-0.23
	P109	746512	151.65	153.04	1.39	1.00	0.73	-0.27
		746340	151.62	153.03	1.41	0.95	0.69	-0.26
	P110	746202	151.60	153.00	1.40	0.91	0.62	-0.29

Če podrobneje pregledamo kote gladin v profilih P2 in P1, lahko razberemo, da se je gladina pri scenariju Sc2 v primerjavi s scenarijem Sc1 dvignila za približno 1,15 m. Rezultati so zelo blizu kotam gladin iz "Strokovne podlage za umestitev območja športnega centra in mostu v DPN HE Brežice" (Savaprojekt, 2009). Naše izračunane gladine so v obeh profilih P2 in P1 nižje za 5 cm. Podolžna profila gladin za oba scenarija sta podana na slikah 16 – 17. Za oba scenarija so bili narejeni tudi izračuni pri pretoku $Q_{100} = 3290 \text{ m}^3/\text{s}$. Ker so gladine pri obeh

scenarijih Sc1 in Sc2 enake, smo podali rezultate gladin za Sc2 kar v preglednici 4 in na slikah 16 (prečni profil P105) ter 17 – 18 (podolžna profila gladin).



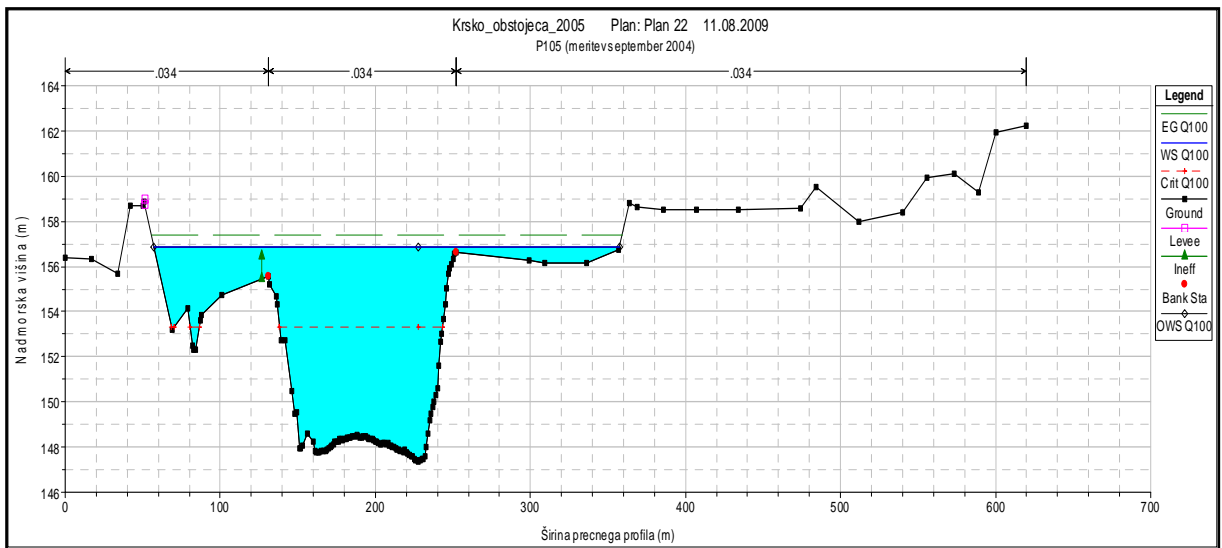
Slika 14: Scenarij Sc1 - podolžni profil gladine Save od P102 (stacionaža 749334) do prečnega profila P110 (stacionaža 746202) z obratovalnim pretokom HE Brežice 500 m³/s



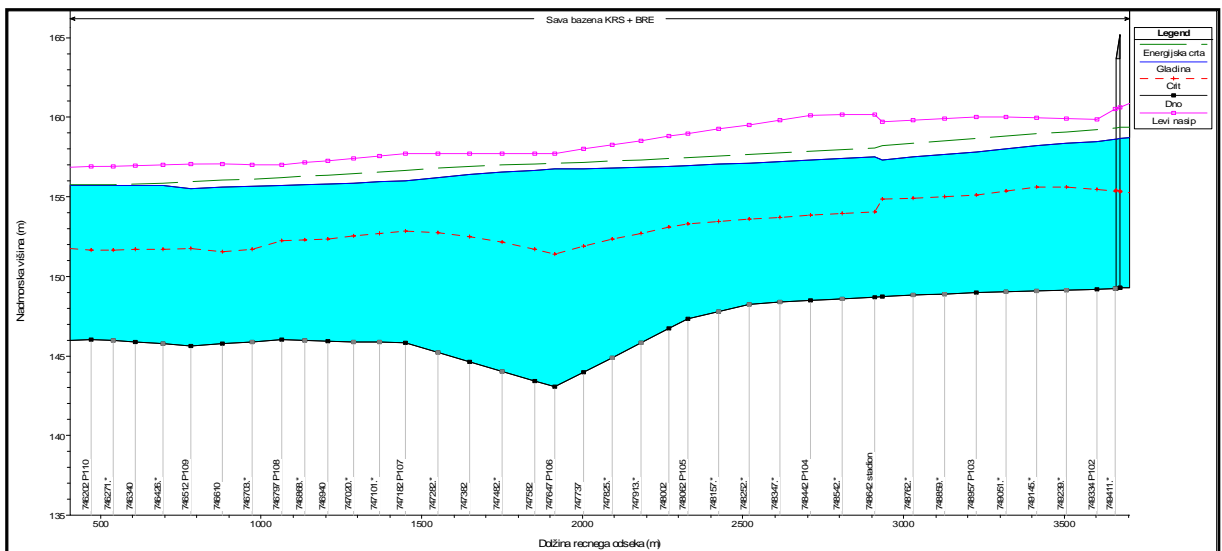
Slika 15: Scenarij Sc2 - podolžni profil gladine Save od P102 (stacionaža 749334) do prečnega profila P110 (stacionaža 746202) z obratovalnim pretokom HE Brežice 500 m³/s

Preglednica 4: Primerjava gladin vode in hitrosti v strugi med Sc1 in Sc2 od profila P102 do P110 pri pretoku $Q_{100} = 3290 \text{ m}^3/\text{s}$

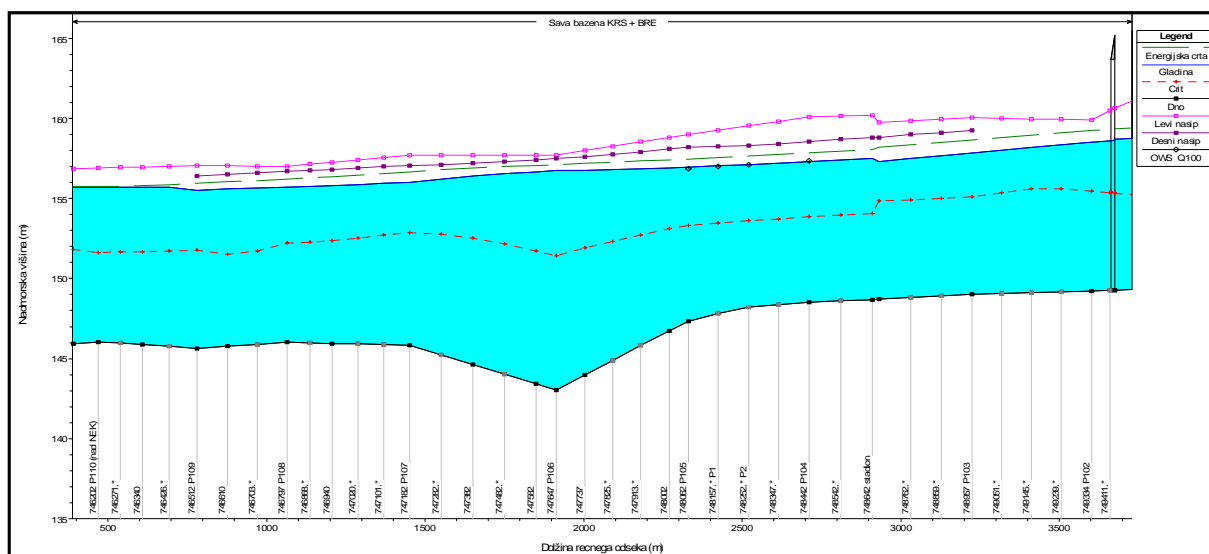
$Q_{100} = 3290 \text{ m}^3/\text{s}$		Sc1	Sc2	
prečni profil	stacionaža	kota gladine vode	kota gladine vode	razlika gladine
		(m)	(m)	(m)
P102	749334	158.48	158.48	0
P103	748957	157.84	157.84	0
	748665	157.32	157.32	0
	748642	157.53	157.53	0
P104	748442	157.31	157.31	0
P2	748252.*	157.13	157.13	0
P1	748157.*	157.04	157.04	0
P105	748062	156.95	156.95	0
	748002	156.91	156.91	0
	747737	156.77	156.77	0
P106	747647	156.74	156.74	0
	747582	156.67	156.67	0
	747382	156.4	156.4	0
P107	747182	156.03	156.03	0
	746940	155.79	155.79	0
P108	746797	155.71	155.71	0
	746610	155.62	155.62	0
P109	746512	155.53	155.53	0
	746340	155.71	155.71	0
P110	746202	155.72	155.72	0



Slika 16: Scenarij Sc1 - pretok $Q_{100} = 3290 \text{ m}^3/\text{s}$ v profilu P105 (stacionaža 748062)



Slika 17: Scenarij Sc1 - podolžni profil gladine Save od P102 (stacionaža 749334) do prečnega profila P110 (stacionaža 746202) pri 100 letni visoki vodi



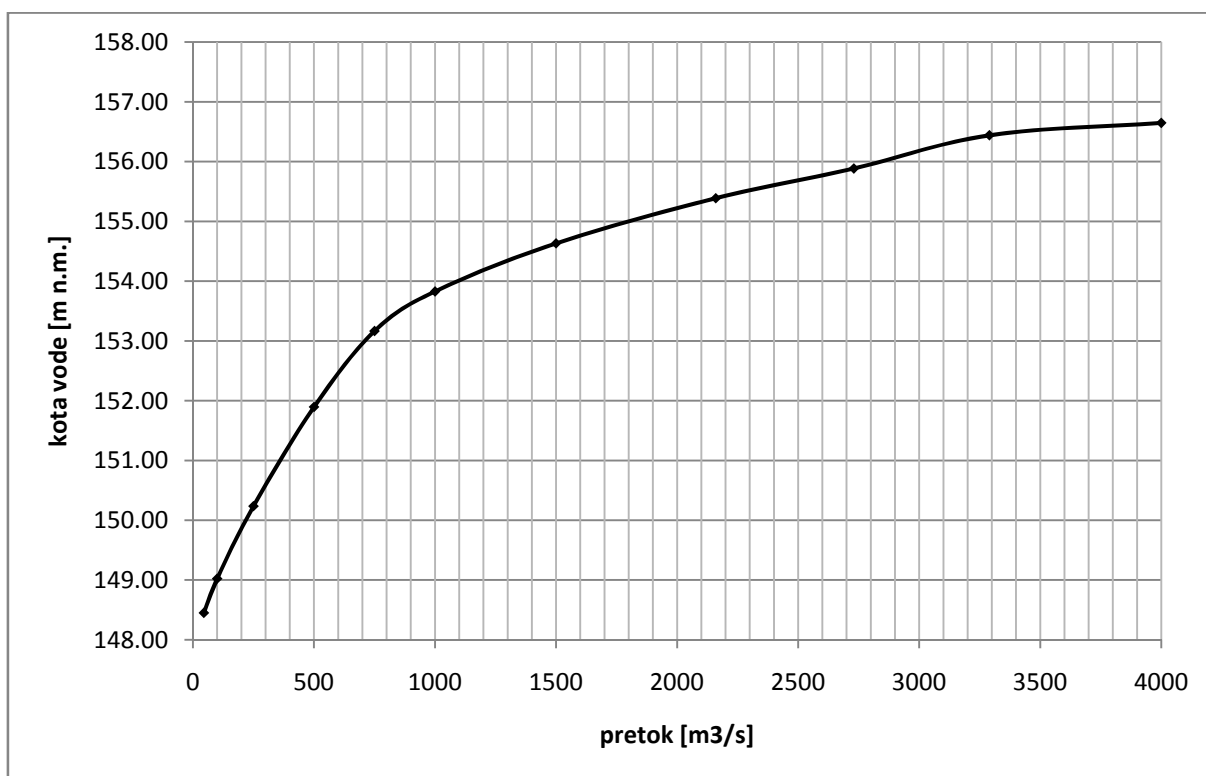
Slika 18: Scenarij Sc2 - podolžni profil gladine Save od P102 (stacionaža 749334) do prečnega profila P110 (stacionaža 746202) pri 100 letni visoki vodi

Visoke vode s 100 letno povratno dobo poplavlajo sedanje stanje lokacije ŠRC. Naši izračuni se tudi tukaj dobro ujemajo s tistimi iz "Strokovne podlage za umestitev območja športnega centra in mostu v DPN HE Brežice" (Savaprojekt, 2009). Naša gladina je za 4 cm višja.

Pomemben rezultat, ki smo ga pridobili iz 1D računov je tudi konsumpcijska krivulja $Q(Z)$ za obstoječe stanje, ki je eden izmed potrebnih vhodnih podatkov za 2D račune. Za potrebe 2D matematičnega modela smo sestavili numerično mrežo, ki vsebuje lastnosti terena (koordinate x , y , z , koeficiente hrapavosti...). Spodnji robni pogoj na mreži (natančneje v osi vodotoka) je krivulja $Q(Z)$, ki smo jo izvedli iz 1D računov. Glede na koordinate spodnjega robu numerične mreže 2D modela smo določili ustrezen prečni profil (stacionaža 747497) v 1D modelu. Na podlagi izbranih pretokov in pripadajočih gladin v tem prečnem profilu podajamo pretoke in kote gladin številčno v preglednici 5, grafično pa na sliki 19 graf $Q(Z)$.

Preglednica 5: Pretočna krivulja obstoječega stanja v stacionaži 747497 iz 1D modela za spodnji robni pogoj numerične mreže 2D matematičnega modela

Pretok Q [m ³ /s]	Kota vode [m n.v.]
45	148.45
100	149.02
250	150.24
500	151.90
750	153.17
1000	153.83
1500	154.63
2160	155.39
2730	155.88
3290	156.44
4000	156.65



Slika 19: Pretočna krivulja obstoječega stanja v stacionaži 747497 iz 1D matematičnega modela za spodnji robni pogoj numerične mreže 2D matematičnega modela

3.3 Predlagano bodoče stanje lokacije ŠRC

3.3.1 Splošno

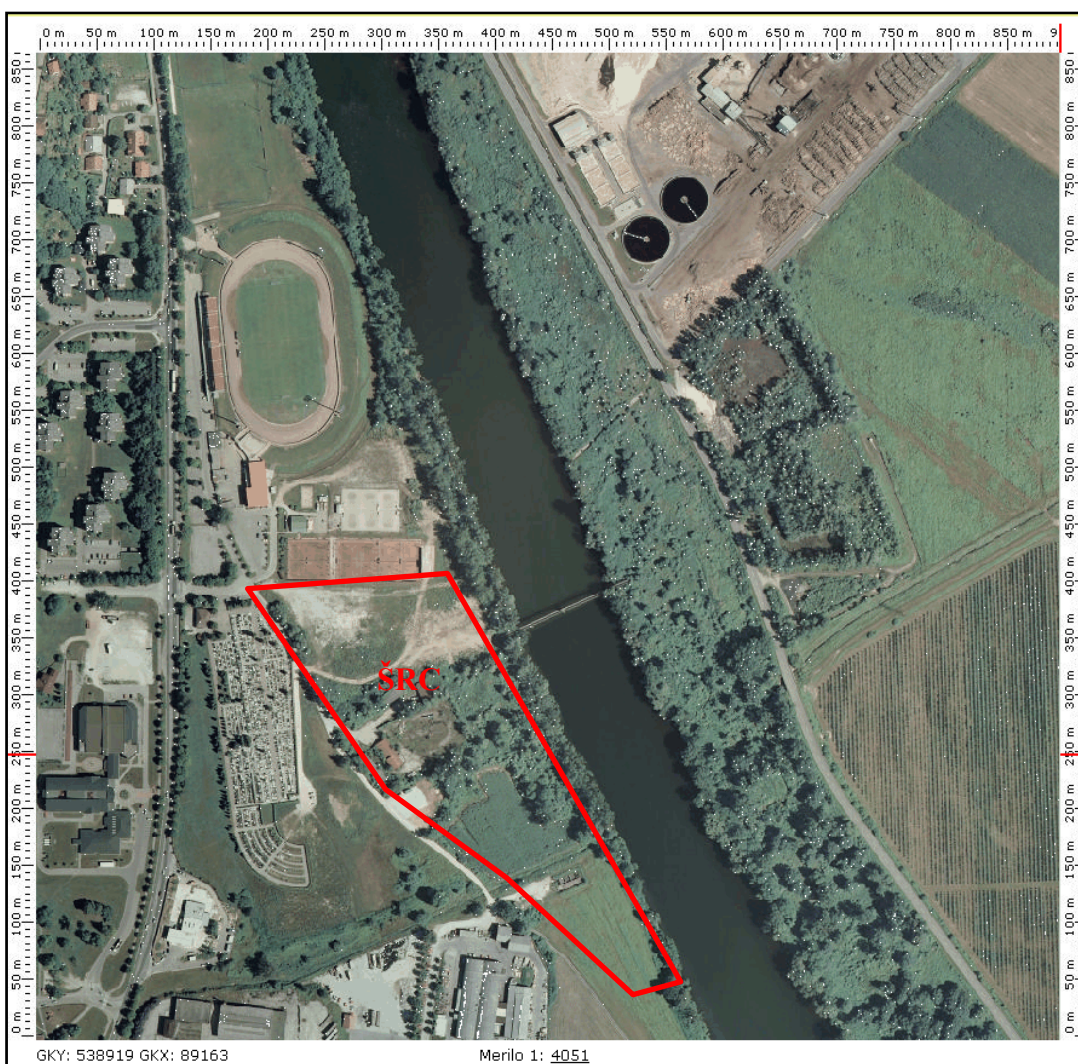
Kot smo že omenili, se bo na območju južno od stadiona in tenis igrišč v Krškem zgradil ŠRC, ki je prikazan na sliki 3. Že v poglavju 2.3 smo predstavili dejansko sedanje stanje terena na mestu same lokacije. Za preverbo gladin vode za predlagano bodoče stanje na lokaciji ŠRC smo najprej izvedli izračune z 1D modelom. Za čimbolj natančen izračun gladin smo obravnavali veliko daljši rečni odsek kot je območje ŠRC, saj so 1D računi v HEC-RAS časovno zelo kratki. Izvedli smo simulacije z dvema scenarijema:

- Scenarij 3 (Sc3):
 - Bodoče stanje struge in terena (na desnem bregu Save smo predvideli zvezen nasip s konstantnim padcem v dolžini 2915 m in sicer od spodnjega cestnega mostu v Krškem do profila P109; struga je razširjena za okoli 15 m v desno brežino na odseku ŠRC)
 - HE Brežice je zgrajena, kota zajezitve na 153 m n.v., $Q_{obr} = 500 \text{ m}^3/\text{s}$
- Scenarij 4 (Sc4):
 - Bodoče stanje struge in terena (predvideli smo nasipe, kot so določeni v "Strokovne podlage za umestitev območja športnega centra in mostu v DPN HE Brežice" (Sava Projekt, 2009), struga je razširjena za okoli 15 m v desno brežino na odseku ŠRC)
 - HE Brežice je zgrajena, kota zajezitve na 153 m n.v., $Q_{obr} = 500 \text{ m}^3/\text{s}$

Scenarij Sc3 vključuje lokacijo ŠRC in zajema predvidene kote terena na lokaciji ŠRC po projektu "Strokovne podlage za umestitev območja športnega centra in mostu v DPN HE Brežice" (Sava Projekt, 2009). Protipoplavne nasipe z varnostnim nadvišanjem 80 cm nad Q_{100} smo v tem scenariju določili sami. Gre za varnejšo, hkrati pa tudi dražjo varianto v primerjavi z Sc4, kjer je varnostno nadvišanje 50 cm nad Q_{100} . Izračuni nam bodo podali oceno varnosti lokacije in smo jih kasneje uporabili za primerjavo z 2D matematičnim modelom. Tukaj smo se osredotočili torej predvsem na 100 letne visoke vode, pred katerimi moramo varovati ŠRC, tako da rezultatov za Q_{obr} ne podajamo.

3.3.2 Podatki

Hidravlični model obsega rečni odsek od HE Blanca (profil P74 s stacionažo 760547, do začetka akumulacijskega bazena HE Brežice v profilu P110 (stacionaža 746202), ki je prvi profil gorvodno od jezua NEK. Topografski aerofoto posnetek območja ŠRC je podan na sliki 22, tlorsni položaj profilov računskega odseka pa na sliki 1 in sliki 14.



Slika 20: Topografski aerofoto posnetek območja bodočega ŠRC (Vir: ARSO, 2009)

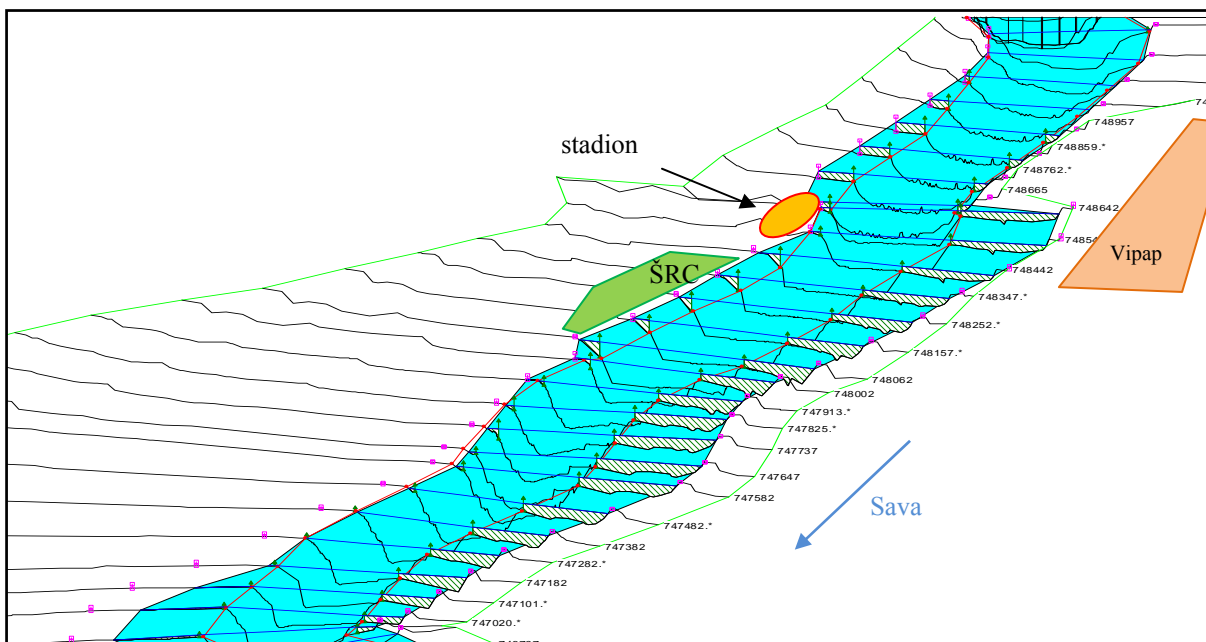
Projekt opcijsko predvideva tudi širitev struge Save v desno brežino. V naši simulaciji smo upoštevali širitev struge za približno 15 m. Tako ostane med krono nasipa in predvideno gladino Save pri $Q_{obr} = 500 \text{ m}^3/\text{s}$ blizu 15 m. Profil nasipa je širine $b = 4,0 \text{ m}$ v kroni in

naklonom brežine $m = 2$ na vodni strani. Na zračni strani je naklon brežine nasipa $m = 2$ ali blažji (npr. do $m = 10$). Za scenarij Sc4 se na odseku od južnega dela stadiona do Leskovškega potoka ne predvideva izgradnja nasipa, saj je teren višji od Q_{100} . Gorvodno od tega odseka do cestnega mostu bo visokovodni zid. Naslednji nasip se bo začel na točki 150 m gorvodno po Leskovškem potoku od njegovega izliva v Savo, v dolžini 250 m proti jugu. Nato je teren dovolj visok v dolžini okoli 100 m, sledi ponovno nasip v dolžini 500 m.

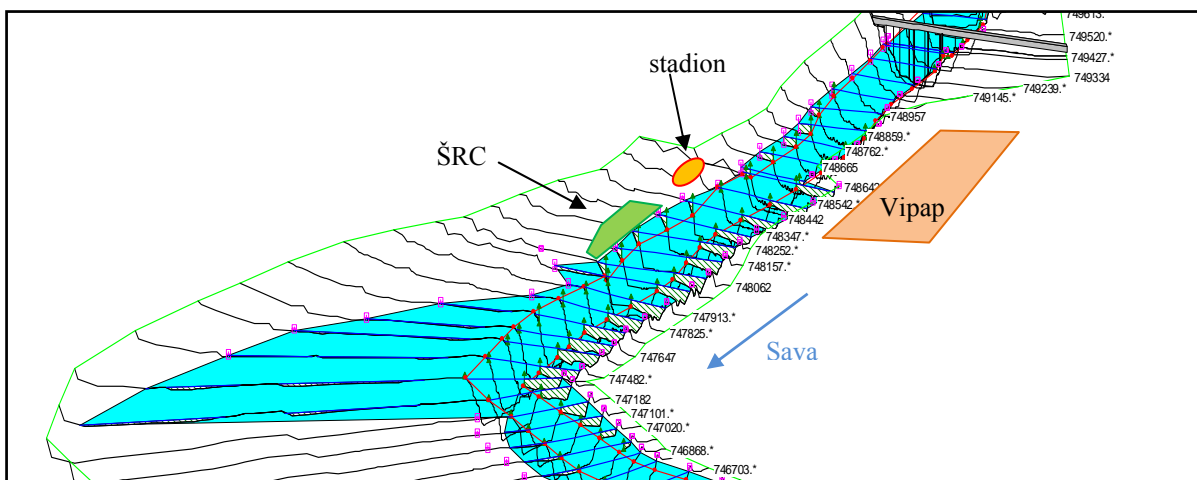
3.3.3 Rezultati

Z enodimenzijskim modelom HEC-RAS smo izvedli račune za predlagano bodoče stanje obravnavanega področja in varnostnimi nasipi. V modelu zaradi njene kompleksne geometrije nismo zajeli rečne marine na skrajnem južnem delu ŠRC. Rečno marino pa smo nato zajeli z detalnejšim 2D modelom. V obravnavani 1D simulaciji smo razširili rečno strugo, zgradili nasipe po scenarijih Sc3 in SC4 ter izvedli izravnavo terena za bodoče objekte ŠRC. Z namenom dobiti bolj natančne rezultate smo poizkusili na rečnem odseku območja ŠRC interpolirati večje število prečnih profilov, da bi natančneje zajeli geometrijo struge in terena ob njej. Vendar se interpolacija ni izkazala za učinkovito, zato smo simulacije izvajali z enakim številom prečnih profilov kot za obstoječe stanje pri scenarijih Sc1 in Sc2. Da bi dobili primerljive gladine s tistimi iz "Strokovne podlage za umestitev območja športnega centra in mostu v DPN HE Brežice" (Sava Projekt, 2009) smo naš model umerili s pomočjo neefektivnih območij, ki močno vplivajo na kote gladine vode v sami strugi. Glavna neefektivna območja so ravno v profilu športnega parka na nasprotnem levem bregu Save. Na sliki 21 so vidna neefektivna območja toka, ki smo jih ustvarili zaradi nižjega in gosteje obraščenega terena.

Na podlagi 1D izračunov smo predvideli izgradnjo nasipov s takšno višino, da je območje ŠRC varno pred 100 letno visoko vodo. Tudi pri simulaciji po scenariju Sc3 s $Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$ so bili nasipi glede na izračunane gladine dovolj visoki, vendar brez ustrezne varnostne višine.



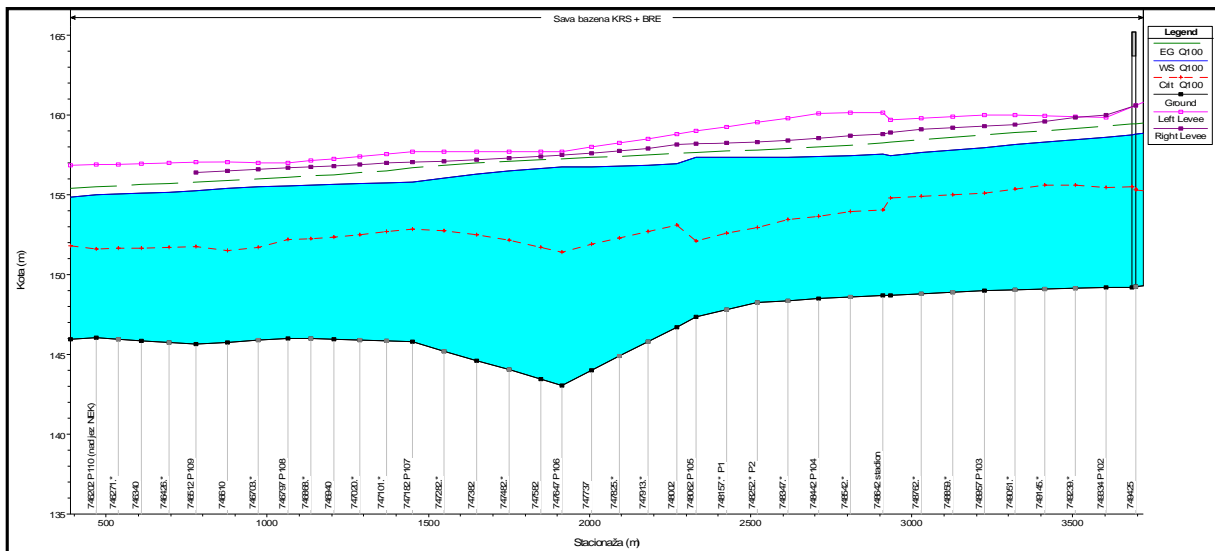
Slika 21: Scenarij Sc3 - detalj bodočega področja ŠRC pri 100 letni visoki vodi



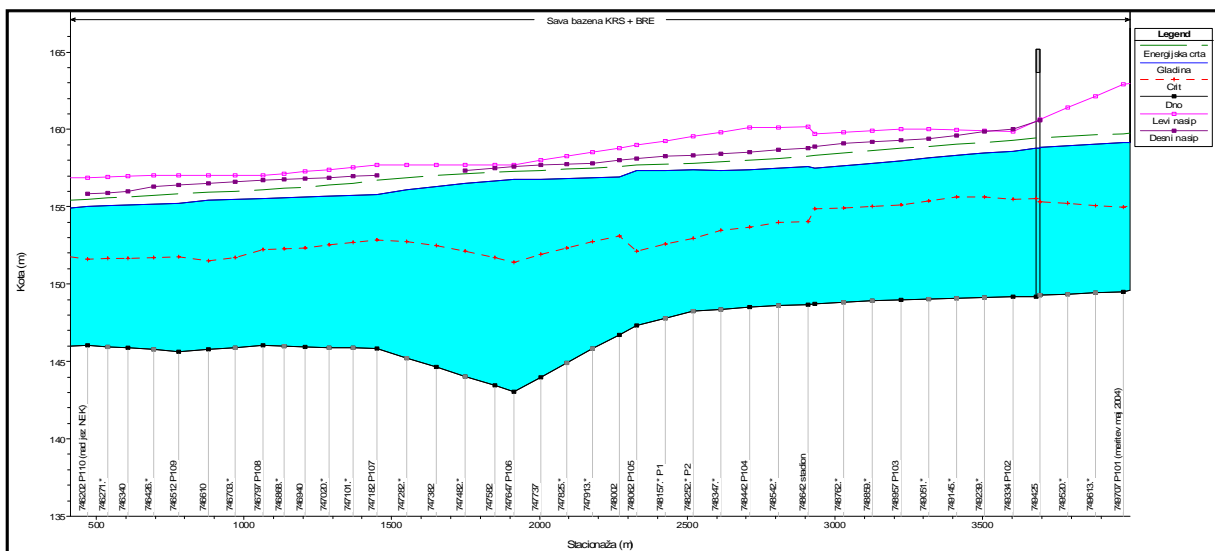
Slika 22: Scenarij Sc4 - detalj bodočega področja ŠRC pri 100 letni visoki vodi

Tako kot smo primerjali scenarija Sc1 in Sc2 za obstoječe stanje smo tukaj primerjali scenarija Sc3 in Sc4 za predvideno bodoče stanje. Medsebojna analiza rezultatov je pokazala, da so kote gladin pri Q_{obr} in Q_{100} na obravnavanem rečnem odseku za scenarija Sc3 in Sc4 enake. Lokacija ter objekti ŠRC so varni pred 100 letno visoko vodo. Pri grafični analizi pa se izkaže, da Sava v primeru Sc4 poplavi okoli 100 m struge Leskovškega potoka in se malo nižje razlije tudi na širše območje Žadovinka. To je ugodno, saj so tam naravne retenzijske površine, ki delno razbremenijo tok v strugi. Z 1D modelom ni mogoče prikazati natančnega

obsega poplav ter verjetno malo nižjih gladin kot v primeru Sc3, kjer smo predvideli visokovodne nasipe od cestnega mostu v Krškem do jezua NEK. Slednje bomo ugotavljali pri 2D simulacijah.



Slika 23: Scenarij Sc3 - podolžni podolžni profil gladine Save od P102 (stacionaža 749334) do prečnega profila P110 (stacionaža 746202) pri 100 letni visoki vodi



Slika 24: Sc4 - podolžni podolžni podolžni profil gladine Save od P102 (stacionaža 749334) do prečnega profila P110 (stacionaža 746202) pri 100 letni visoki vodi

3.4 Zaključki na podlagi 1D izračunov

Končna primerjava rezultatov scenarijev Sc2 in Sc3/Sc4 pokaže, da so razlike v kotah gladin na rečnem odseku lokacije ŠRC med obstoječim in predvidenim bodočim stanjem pri obratovalnem pretoku $500 \text{ m}^3/\text{s}$ zelo majhne. V scenariju Sc3 se pri obratovalnem pretoku $500 \text{ m}^3/\text{s}$ gladina vode v profilih P2 (stacionaža 748252) in P1 (stacionaža 748157) dvigne do 2 cm v primerjavi s scenarijem Sc2. Tako majhna razlika je pričakovana, saj je Sava še vedno v strugi.

Drugačna situacija je pri $Q_{100} = 3290 \text{ m}^3/\text{s}$, kjer so razlike v gladinah med scenariji Sc2 in Sc3/Sc4 večje. V profilih P2 (stacionaža 748252) in P1 (stacionaža 748157) so gladine pri scenariju Sc3/Sc4 višje za okoli 25 – 30 cm kot pri scenariju Sc2. Razlika je verjetno posledica razširitve struge in večjih neefektivnih poplavnih področij na odseku ŠRC ter ponovne zožitve struge dolvodno od profilov ŠRC, katerih vpliv se pri stalnem toku širi gorvodno. Dolvodno od ŠRC so gladine v scenariju Sc3/Sc4 nižje kot v scenariju Sc2, vendar se tudi na tem odseku predvidevajo novi protipoplavni nasipi. V scenariju Sc4 je desni breg tudi delno odprt (v dolžini 155 m) v nasipu med profiloma P105 (stacionaža 748062) in P106 (stacionaža 747647), kar omogoča odtok vode na desna poplavna področja ter s tem nižjo gladino v strugi. Zgornje zaključke smo podali na podlagi spodnje preglednice 6.

Preglednica 6: Primerjava gladin vode v strugi med Sc2 in Sc3/Sc4 od profila P102 do P110

		$Q_{obr} = 500 \text{ m}^3/\text{s}$			$Q_{100} = 3290 \text{ m}^3/\text{s}$		
		Sc2	Sc3/ Sc4		Sc2	Sc3/ Sc4	
prečni profil	stacionaža	kota gladine vode	kota gladine vode	razlika gladine	kota gladine vode	kota gladine vode	razlika gladine
		(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
P102	749334	153.76	153.75	-0.01	158.48	158.6	0.12
P103	748957	153.49	153.47	-0.02	157.84	157.97	0.13
	748665	153.3	153.28	-0.02	157.32	157.49	0.17
	748642	153.32	153.3	-0.02	157.53	157.58	0.05
P104	748442	153.27	153.26	-0.01	157.31	157.41	0.1
P2	748252.*	153.23	153.24	0.01	157.13	157.38	0.25
P1	748157.*	153.21	153.23	0.02	157.04	157.35	0.31
P105	748062	153.19	153.23	0.04	156.95	157.34	0.39
	748002	153.19	153.19	0	156.91	156.95	0.04
	747737	153.17	153.17	0	156.77	156.78	0.01
P106	747647	153.17	153.17	0	156.74	156.75	0.01
	747582	153.16	153.16	0	156.67	156.65	-0.02
	747382	153.13	153.13	0	156.4	156.31	-0.09
P107	747182	153.09	153.1	0.01	156.03	155.79	-0.24
	746940	153.07	153.08	0.01	155.79	155.66	-0.13
P108	746797	153.06	153.07	0.01	155.71	155.56	-0.15
	746610	153.05	153.06	0.01	155.62	155.42	-0.2
P109	746512	153.04	153.05	0.01	155.53	155.25	-0.28
	746340	153.03	153.04	0.01	155.71	155.12	-0.59
P110	746202	153.03	153.03	0	155.72	155.03	-0.69

4 IZRAČUNI Z 2D MATEMATIČNIM MODELOM PCFLOW2D

4.1 Opis 2D matematičnega modela PCFLOW2D

Matematični model je bil razvit na Katedri za mehaniko tekočin (KMTe) Fakultete za gradbeništvo in geodezijo (FGG) Univerze v Ljubljani (UL) (Četina, 1988; Četina, 1998). Model temelji na uporabi kartezičevega koordinatnega sistema. Upoštevana je kontinuitetna enačba (1) in dinamični enačbi v konzervativni obliki (2) in (3), ki določajo dvodimenzionalni nestalni globinsko povprečni tok.

4.1.1 Osnovne enačbe

Kontinuitetna enačba:
$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

Dinamični enačbi:

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

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

Zadnja dva člena na desnih straneh dinamične enačbe izražata vpliv turbulentne viskoznosti, ki jo lahko določimo s k-ε modelom turbulence. Zato potrebujemo še dve transportni enačbi za turbulento kinetično energijo na enoto mase k ter stopnjo njene disipacije ε (enačbi 5 in 6). Turbulentna kinetična energija k in stopnja njene disipacije ε sta povezana s koeficientom efektivne viskoznosti preko relacije:

$$v_{ef} = v + c_{\mu} \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4)$$

Transportni enačbi za k in ε :

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

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

kjer je

$$G = v_{ef} \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right\} \quad (7)$$

produkcija turbulente kinetične energije zaradi horizontalnih gradientov hitrosti osnovnega toka.

Člena P_{kv} in $P_{\varepsilon v}$ predstavljata posledico produkcije turbulence zaradi trenja ob rečno dno.

$$P_{kv} = c_k \frac{u_*^3}{h}, \quad P_{\varepsilon v} = c_{\varepsilon} \frac{u_*^4}{h^2} \quad (8)$$

Določena sta preko tako imenovane trenjske hitrosti u_* .

$$u_* = \sqrt{c_f (u^2 + v^2)}, \quad c_k = \frac{1}{\sqrt{c_f}}, \quad c_{\varepsilon} = c_{\varepsilon f} c_2 \sqrt{c_{\mu}} \frac{1}{c_f^{3/4}}, \quad c_f = \frac{n_G^2 g}{h^{1/3}} \quad (9)$$

$c_{\varepsilon f}$ ima vrednost 3,6 za laboratorijske kanale in 2,0 za naravne rečne struge. Spodnja tabela vsebuje empirične konstante, ki so uporabljene v modelu turbulence. Te konstante so univerzalne za različne vrste turbulentnih tokov (Četina, 1998).

Preglednica: Empirične konstante v modelu turbulence (Vir: Dvodimenzijski program PCFLOW2D. Četina, 1998, stran 5)

c_D	c	c_1	c_2	σ_k	σ_ϵ
1,0	0,09	1,44	1,92	1,00	1,21

V modelu PCFLOW2D se v primeru nestalnega toka izračuni z uporabo dodatnih enačb (4) in (5) ne izvajajo, ker to preveč podaljša čas računanja. Zadovoljivo točnost dobimo s konstantno vrednostjo koeficienta efektivne viskoznosti v_{ef} . Na podlagi izkušenj je bilo namreč ugotovljeno, da v_{ef} pri toku s prosto gladino v razmerah nestalnega toka z naglimi spremembami pretokov in gladin ne vpliva bistveno na rezultate (Rajar in ostali, 1986). Prav tako velja, da so dobljeni rezultati dobri z uporabo realno ocenjene konstantne vrednosti efektivne viskoznosti, če je odsek brez izrazitih recirkulacijskih področij (Četina, 1988). Za odsek spodnje Save se uporablja vrednost $v_{ef} = 0,01 \text{ m}^2/\text{s}$ (študija: "Ocena stopnje varnosti NEK pred poplavami", FGG in IBE 2005).

4.1.2 Metoda reševanja

Enačbe (1, 2, 3, 5, 6) so povezane v sistem parcialnih diferencialnih enačb. Rešujejo se s pomočjo Patankar-Spalding-ove metode končnih volumnov. Metoda ima naslednje značilnosti:

- premaknjena numerična mreža
- hibridna shema (kombinacija centralno diferenčne in sheme gorvodnih razlik), ter
- iterativni postopek popravkov gladin, poznan kot SIMPLE.

Polna implicitna shema, ki je stabilna in dovolj točna tudi pri daljših časovnih korakih in relativno visokih Courantovih številih, se uporablja za integracijo po času. Courantovo število je razmerje med fizično propagacijo hitrosti vala βV in hitrostjo $\Delta x/\Delta t$ (<http://ponce.sdsu.edu>, 2009). β je funkcija hrapavosti ostenja in oblike prečnega prereza in je brezdimenzijska vrednost, pridobljena z raziskavami na večjem številu vodotokov. Ima različne vrednosti, ki

so odvisne od vrste toka (turbulenten, laminaren in mešani). Pri turbulentnih tokovih je β od 1 do $5/3$, pri laminarnem toku 3 in pri mešanem od $5/3$ do 3.

$$C = \beta V \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (10)$$

V program je potrebno vstaviti časovni korak, v katerem se bo izvedlo določeno število iteracij. Na podlagi izkušenj se izbere dovolj majhen časovni korak, da dosežemo zadostno natančnost in da izračuni niso predolgi. Posledica predolгих časovnih korakov je lahko prevelika napaka v volumnih oz. je znotraj časovnega koraka potrebnih preveč iteracij. V naših izračunih smo privzeli časovni korak $\Delta t = 2$ s. Kot kriterij konvergence smo najprej privzeli, da mora biti vsota napak v vseh točkah numerične mreže v vsakem časovnem koraku manjša od 1 % trenutnega vtoka v področje. Ker pa bi bilo zaradi drobne numerične mreže s 95200 točkami v vsakem časovnem koraku potrebnih več kot 180 iteracij, bi to preveč podaljšalo potrebne računske čase. Zato smo število iteracij omejili na največ 60 znotraj časovnega koraka in z analizo občutljivosti modela ugotovili, da napaka pri računu volumnov ni presegla 2 %, kar je za praktične račune dovolj natančno.

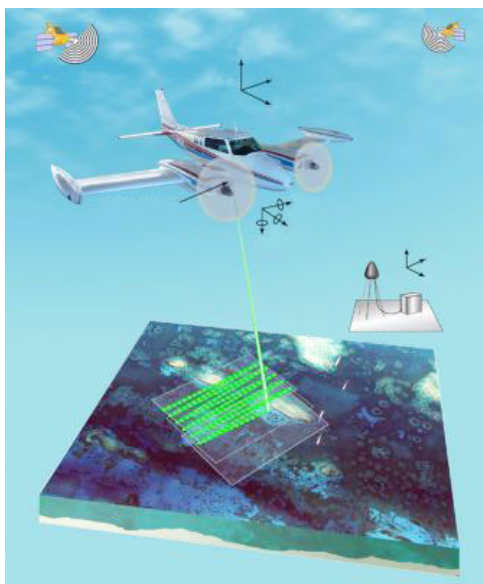
4.1.3 Priprava podatkov ter začetni in robni pogoji

Za 2D program smo morali pripraviti geometrijske, hidrološke in hidravlične podatke.

Geometrijski podatki

PCFLOW2D računa širjenje vode tudi po poplavnih ravninah. Za izvajanje računov na takšnih območjih je potrebno poznati geometrijske podatke področja oziroma razpolagati z digitalnim modelom terena (DMT). DMT smo pripravili iz podatkov o topografiji terena. Te podatke smo pridobili iz meritev s tehnologijo daljinskega zaznavanja LIDAR. V diplomski nalogi smo uporabili podatke, deloma izmerjene terestrično (iz leta 2005) in deloma s tehnologijo LIDAR (iz leta 2007).

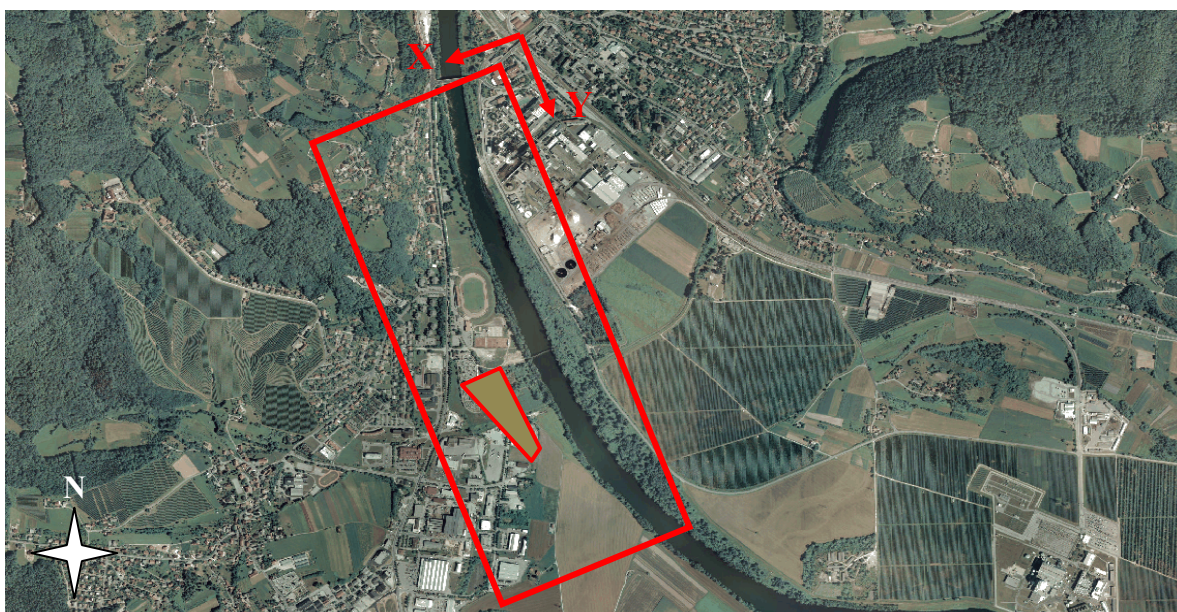
Kratek opis tehnologije LIDAR podajamo kot povzetek iz literature (Sound Waves, 2008). Tehnologija LIDAR zajema točke terena zemeljskega površja s pomočjo laserskega tipala. Tipalo je pritrjeno na zračna plovila, kot so letala, helikopterji. Na drugi strani pa optični sistemi daljinskega zaznavanja potrebujejo zunanji vir energije. Sistem LIDAR je sestavljen iz komponent na plovilu in komponent za obdelavo podatkov. Lasersko tipalo je sestavljeno iz laserja, oddajnika, sprejemnika, detektorja signala, ojačevalca in ostalih elektronskih komponent. Pomembni so tudi radarska antena, GPS (Global Positioning System), IMU (inertial measurement unit) ter video kamera ali fotografski aparat za dokumentacijo območja meritve.



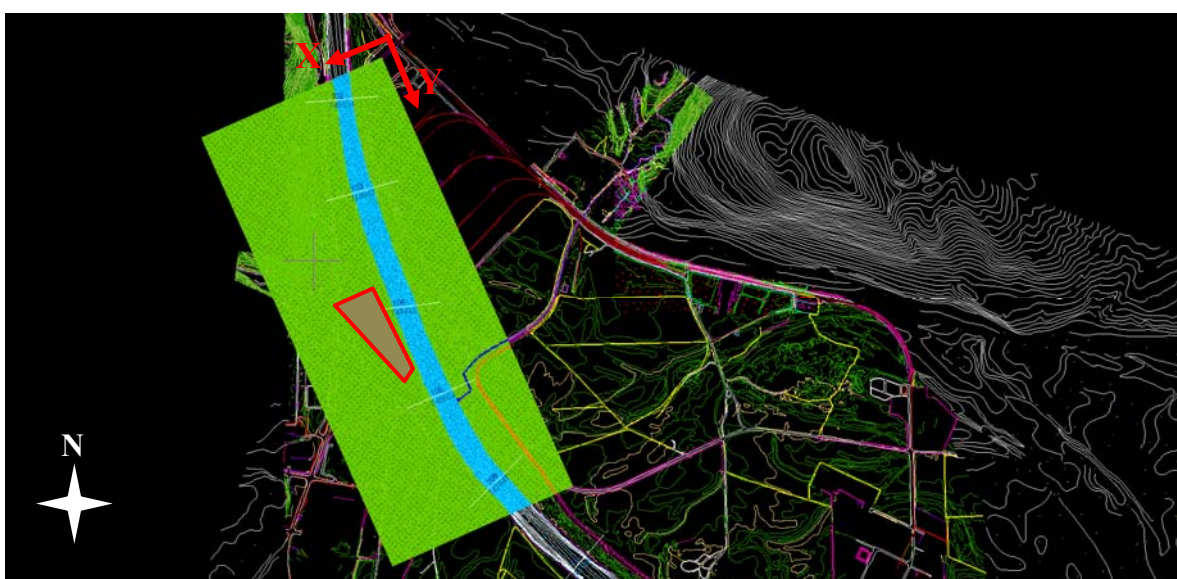
Slika 25: Delovanje sistema LIDAR in njegove komponente (Vir: <http://soundwaves.usgs.gov>, 2008)

Praviloma potrebujemo za delo vnaprej zvezno potekajoč teren, brez ekstremnih, v naravi neobstoječih točk. Potrebna je nadaljnja obdelava pridobljenih meritev. V pomoč so nam lahko istočasno posneti ortofoto posnetki. Izdela se lahko tudi DMT v obliki triangulacijske mreže (TIN), kjer se zaradi velike natančnosti podatkov točk terena vidijo tudi manjši detajli terena, kot so depresije na terenu, možne poti odtekanja vode ipd. DMT smo nato pretvorili v gosto enakomerno numerično mrežo $\Delta x = \Delta y = 4$ m s pomočjo avtomatske generacije višinskih kot terena. Čeprav se največkrat uporabi enakomerno mrežo, je le-ta lahko tudi neenakomerna. Mrežo smo pripravili s programskim dodatkom QuickSurf, ki je integriran v

AutoCAD. Naša mreža, ki vsebuje 95200 točk, ima celice velikosti $\Delta x = \Delta y = 4$ m in ima 476 točk v podolžni smeri y in 200 točk v prečni smeri x. Postavitev mreže v prostoru je prikazana na prilogi A in slikah 26 - 27. Gostoto računske mreže smo določili na podlagi potrebne natančnosti zajema objektov ŠRC. Z mrežo 4 x 4 metre smo tako zajeli tudi najmanjše objekte ŠRC. Mreža je dolga 1900 m in široka 796 m. Ko smo imeli mrežo pripravljeno, smo pripravili tekstovno obliko, ki jo PCFLOW2D lahko prepozna.



Slika 26: Pregledna situacija s prikazom z modelom PCFLOW2D obravnavanega območja



Slika 27: Računska mreža 4 x 4 m, postavljena na podlogo s plastnicami

Hidrološki podatki

Podatki o pretokih, ki so bili upoštevani v računih, so podani v preglednici 7. Karakteristični pretoki določene povratne dobe za Q_5 , Q_{20} in Q_{100} so bili prevzeti po študiji Inštituta za vode (IZVRS, 2002).

Preglednica 7: Uporabljeni pretoki v simulacijah

Pretok Q [m^3/s]
$Q = 45$
$Q = 100$
$Q = 250$
$Q_{obr} = 500$
$Q = 1000$
$Q = 1500$
$Q_5 = 2160$
$Q_{20} = 2730$
$Q_{100} = 3290$
$Q = 4000$

Hidravlični podatki

V naravnih vodotokih in ob njih se pojavlja vegetacija in drugi manjši objekti, ki povzročajo spremembe v tokovni sliki. Zato pride do pojava pretočne redukcije in s tem prerazporeditve vlečnih sil po omočenem obodu. Zato je pomemben hidravlični podatek pravilen oziroma realno ocenjen koeficient hrapavosti, znan tudi kot Manning-ov koeficient. Za naravne vodotoke je značilna velika hrapavost in velika Reynolds-ova števila. Posledično ima Manning-ova enačba konstantno vrednost n_G . Zato je za primerno oceno n_G potrebno kvalitativno poznavanje faktorjev, od katerih je n_G odvisen. Na vrednost n_G vpliva hrapavost ostenja, vegetacija, spreminjanje prečnih presekov vodotoka, oblika in spreminjanje omočenega oboda vzdolž trase vodotoka, prepreke, ovire, trasa vodotoka, transport plavin in izpodjedanje, vodostaj in pretok. Podrobnejši način določanja koeficienta hrapavosti je podan v literaturi (Steinman, 1999).

Ko na osnovi zgornjih kriterijev določimo okvirne vrednosti n_G , izvedemo simulacije s programom PCFLOW2D. Model nato s pomočjo v naravi izmerjenih gladin umerimo, tako da

spreminjamo n_G toliko časa, da dobimo zadovoljivo ujemanje izračunanih in izmerjenih gladin. Ponavadi se izvede tudi analiza občutljivosti za različne vrednosti koeficienta hrapavosti, ki nam pove, ali ima n_G velik vpliv na rezultate. Za potrebe naše naloge so zadoščali koeficienti hrapavosti n_G za strugo ($0,030 \text{ sm}^{-1/3}$) in poplavna področja ($0,044 \text{ sm}^{-1/3}$), ki smo jih privzeli iz literature 13 (IBE d.d. in FGG, 2005) in so bili dobljeni s predhodnim umerjanjem. Vsako dodatno umerjanje bi bilo tudi časovno preveč zamudno.

Začetni in robni pogoji

Čeprav smo računali gladine pri določenem stalnem pretoku, smo račune izvedli kot nestalni tok, ki se po določenem času ustali pri željnem pretoku. Kot začetni pogoj pri nestalnem toku se pred prihodom vala upošteva suho dno na poplavnih področjih ter v strugi. Da je račun lažji, se suho dno ponazori z majhno globino, npr. 0,01 m. Program nato ves čas računa hitrost in globine po vseh celicah računskega področja in če po desetih iteracijah znotraj časovnega koraka globina ne preseže 0,02 m, program celico smatra za neaktivno in umetno postavi vrednosti hitrosti na 0 in globino na 0,01 m. Tako je zagotovljen mehanizem širjenja vala po približno suhem dnu. V našem primeru, ko smo računali s stalnim tokom, smo upoštevali, da se po 1,5 ure tok ustali in postane stalen za obravnavani pretok.

Ob bregovih področja smo kot robni pogoj upoštevali, da so hitrosti v prečni smeri na tok enake 0. Za vzdolžne hitrosti pa smo uporabili pogoj »drsnih vrednosti«. Pogoj pomeni, da je gradient hitrosti v prečni smeri enak 0. V robnih celicah ima prevladujoč vpliv trenje ob dno, zato neupoštevanje logaritemskega stenskega zakona ne povzroči večje napake.

Na iztoku iz področja (stacionaža 747497) smo upoštevali konsumpcijsko krivuljo $Q = Q(Z)$, ki je bila dobljena na podlagi 1D računov. Kota gladine Z se v vsakem računskem koraku predpiše samo v eni celici na robu, približno v osi struge. Gladine v ostalih točkah na robu izračuna sam program. Gradienti h , u in v so na robu računskega področja enaki 0.

Za vtok v področje smo uporabili željen pretok, ki se ustali v podanem času (1,5 ure v našem primeru). Po prerezu vtočnega profila se upošteva enakomerna porazdelitev hitrosti. Potek gladin v prečni smeri izračuna program sam.

4.2 Obstoječe stanje terena z geometrijo 2005 – Sc1*

Opomba: Zvezdica poleg kratic Sc označuje scenarije v 2D modelu, medtem ko kratice Sc brez zvezdice označujejo scenarije v 1D modelu.

Uporabili smo pretoke iz preglednice 7. Izračuni so pokazali, da so pri Q_{obr} hitrosti vode v strugi do 1,8 m/s (profil P1). Pri tem pretoku je Sava še zmeraj v strugi. Pri Q_5 začne poplavlјati tako na desnem kot levem bregu. Hitrosti v strugi so okoli 3,7 m/s, na poplavnih področjih pa hitrosti ne presežejo 0,55 m/s. Pri Q_{100} se hitrosti v strugi povečajo že na 4,5 do 5 m/s, na poplavnih področjih pa narastejo do 1,5 m/s. Hitrostna polja teh simulacij so prikazana na prilogah B. Skupaj s hitrostmi vode so na teh prilogah grafično prikazane še plastnice globin vode z intervalom 1 m.

Območje bodočega ŠRC je pri pretoku Q_{100} in obstoječem stanju terena delno poplavlјeno. Voda poplavlјa gorvodno po strugi Leskovškega potoka in se razliva čez njegovo levo in desno brežino. Poplavlјen bi bil celoten južni del in južna polovica severnega dela ŠRC. Pri tem pretoku je Sava razlita na levem in desnem bregu obravnavanega območja. Na desnem bregu je stadion v Krškem obdan z vodo s severne in vzhodne strani. Tenis igrišča, ki so severno od načrtovanega ŠRC, so pri tem pretoku tudi na suhem. Le južno od ŠRC Sava ne prestopa desnega brega. Na levem bregu sega voda do protipoplavnega nasipa, ki je varovalni nasip NEK. Na izlivu Potočnice v Savo slednja zajezi Potočnico gorvodno, tako da se voda na razdalji 150 m od cestnega prepusta tudi razliva čez desni breg Potočnice.

Pri pretoku $Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$ je samo še majhen del severnega dela območja ŠRC suh. Tudi vsa tenis igrišča, razen platoja za zimsko pokrita igrišča, so poplavlјena. Voda se razliva na desna poplavna področja proti vasi Žadovinek.

V nadaljevanju prilagamo še rezultate maksimalnih gladin vode v pomembnejših prečnih profilih računske mreže, ki so zbrani na prilogi B8. Prikazane pa so tudi na podolžnem profilu osi reke Save, podanem na prilogi B7. Kote gladin vode v spodnji preglednici so podane za os struge Save.

Preglednica 8: Maksimalne kote gladin vode v prečnih profilih na območju bodočega ŠRC pri različnih pretokih za obstoječe stanje terena

obstoječe stanje		Q = 45 m ³ /s	Q = 100 m ³ /s	Q _{obr} = 500 m ³ /s	Q ₁₀₀ = 3290 m ³ /s
prečni profil	stacionaža	kote gladin	kote gladin	kote gladin	kote gladin
		(m)	(m)	(m)	(m)
P102	749334	151.42	151.89	153.46	158.42
P103	748957	150.60	150.90	152.58	157.83
P104	748442	149.69	150.03	152.23	157.36
P2	748252.*	149.18	149.67	152.16	157.31
P1	748157.*	149.06	149.55	152.11	157.22
P105	748062	149.01	149.50	152.07	157.15
marina	748000	148.94	149.41	152.03	157.09
P106	747647	148.33	149.01	151.97	157.03

Naše rezultate smo primerjali še z rezultati študij "Možne rešitve za izboljšavo zaščite NEK pred poplavami (IBE d.d. in FGG, 2005) in "HE Brežice, Idejne rešitve" (HSE d.o.o., 2007). Opozoriti je potrebno, da je študija 2007 upoštevala poleg pretoka Save tudi pretok reke Krke (Q = 310 m³/s), ki pa na odseku ŠRC nima več vpliva. Obe študiji sta računali z mnogo večjo računsko mrežo velikosti $\Delta x = \Delta y = 20$ m, ki je prekrivala območje od sotočja Save s Krko do stadiona v Krškem. Primerjava je podana tabelarično v preglednici 9. Gladine se razlikujejo od 0,04 m do 0,69 cm. Večje razlike v gorvodnih profilih P104 (748442) in P103 (748957) so mogoče posledica bolj grobe mreže modelov iz let 2005 in 2007, kjer je bila struga zajeta samo s 4 – 5 celicami, pri našem 2D modelu iz leta 2009 pa s 16 – 20 celicami, kar omogoča točnejše račune. Pri 1D računih tudi nismo upoštevali jezua NEK. Zato je bila verjetno konsumpcijska krivulja za 2D model, pridobljena iz 1D računov, premalo natančna, čeprav jez NEK na gladine pri ŠRC ne vpliva več. Primerjava naše konsumpcijske krivulje (gladina pri pretoku Q₁₀₀ = 3290 m³/s) in izmerjenih gladin poplav leta 1990 (stoletne vode) v stacionaži 747497 (spodnji rob našega 2D modela) je pokazala, da je bila naša gladina (156,44 m n.v.) iz 1D modela za 6 cm nižja od meritve na terenu (156,50 m n.v.). 2D model študije 2007 pa je bil umerjen pri pretoku Q₁₀₀ = 3290 m³/s na gladino 156,68 m. Torej 24 cm višjo gladino od tiste v našem sedanjem 2D modelu. Zaključimo lahko, da so naši rezultati uporabni, vendar pa zagotavljajo nekoliko manjšo varnost kot rezultati študij iz let 2005 in 2007.

Preglednica 9: Maksimalne kote gladin vode v prečnih profilih pri pretoku $Q_{100} = 3290 \text{ m}^3/\text{s}$ za obstoječe stanje terena

obstoječe stanje		študija 2005		študija 2007		razlika kot gladin	
prečni profil	stacionaža	kote gladin	kote gladin	razlika kot gladin	kote gladin	kote gladin	razlika kot gladin
		(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
P103	748957	157.83	158.45	-0.62	157.83	158.42	-0.59
P104	748442	157.36	157.98	-0.62	157.36	157.93	-0.57
P105	748062	157.15	157.53	-0.38	157.15	157.40	-0.25
P106	747647	157.03	157.34	0.69	157.03	156.99	0.04
	747497	156.44	156.80	0.36	156.44	156.68	0.24

4.3 Predlagano bodoče stanje brez HE Brežice – Sc2*

V tej simulaciji smo razširili strugo Save za približno 15 m v desno brežino, hkrati pa dvignili teren na lokaciji ŠRC od 0,20 m do 0,50 m. Teren okoli bazenskega kompleksa smo dvignili na koto 157,9 m n.v. Okoli zunanjih športnih igrišč pa teren pada v smeri zahod-vzhod od kote 157,5 m n.v. do kote 157,0 m n.v., kjer so razgledne tribune. Prevezli smo jih z nekaj lastnimi popravki po projektu "Strokovne podlage za umestitev območja športnega centra in mostu v DPN HE Brežice" (Sava Projekt, 2009). Po strokovnih podlagah se ne predvidevajo nasipi od južnega dela stadiona do Leskovškega potoka, ker je teren višji od Q_{100} . V naši geometriji smo upoštevali zvezno padajoč nasip z začetno koto 160,0 m n.v. pri cestnem mostu, ter končno koto 158,5 m n.v. pri severnem delu ŠRC. Začetno koto 160,0 m n.v. smo privzeli od 1D računov, kjer smo imeli 0,8 m varnostnega nadvišanja nad Q_{100} . Izkazalo se je, da je bilo nadvišanje dobro ocenjeno in zagotavlja dovolj visoko varnost. Na odseku, kjer bo ŠRC in nismo predvideli nasipov, je varnostnega nadvišanja okoli 0,6 m, kar je dovolj. V tem scenariju HE Brežice še ni zgrajena. V rečni marini smo privzeli kote dna po prej omenjenem projektu in sicer 150,75 m n.v.

Izračuni so pri pretoku $500 \text{ m}^3/\text{s}$ pokazali hitrosti v strugi okoli 1,7 m/s. V rečni marini se na južnem delu ŠRC pojavljajo recirkulacijska področja toka. Hitrosti v marini ne presegajo 0,4 m/s. Globina vode se giblje med enim in dvema metroma. Pri stoletnih vodah ($3290 \text{ m}^3/\text{s}$) je plato ŠRC varen pred poplavami. V rečni marini voda naraste za nekaj metrov in dosega globine od 6 do 7 metrov. Hitrosti v marini se zmanjšajo v primerjavi s pretokom $500 \text{ m}^3/\text{s}$ na le okoli 0,3 m/s, kakor tudi na zunanji strani pontonskega pomola. Drugače je seveda v strugi, kjer so hitrosti okoli 3,5 m/s. Levi breg je pri omenjenem pretoku poplavljen vse do levobrežnega nasipa. Pri pretoku $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ je desni breg od mostu do ŠRC marine popolnoma varen pred poplavami. Pri rečni marini pa se začne voda razlivati desno, tudi za nasipom proti naselju Žadovinek. Odsek, kjer ni nasipa, služi za razbremenjevanje pri takšnih pretokih in smo ga načrtovali po strokovnih podlagah. Hitrosti v strugi dosega okoli 4 m/s. V prilogah C prikazujemo pregledne situacije, podolžne in prečne profile za tri pretoke.

4.4 Predlagano bodoče stanje terena s HE Brežice z gladino na koti 153.00 in obratovalnim pretokom 500 m³/s – Sc3*

HE Brežice ima po načrtu zajezi koto na 153,0 m n.v. in HE naj bi obratovala s pretokom 500 m³/s. Z zgrajeno HE Brežice bo rečni odsek od HE Krško dolvodno postal akumulacijsko jezero. S tem se bodo hitrosti v strugi zmanjšale. Izračuni so pokazali na hitrosti okoli 1,2 m/s (profil P1), kar pomeni, da bodo manjše za 0,6 m/s glede na nezajezeno stanje. Rezultati so grafično prikazani na prilogah D3 (pregledna situacija), D4 (detajl rečne marine), D8 (podolžni profil) in D9 (prečni profili). Maksimalne kote gladin v prečnih profilih pa podajamo tudi tabelarično v preglednici 10. Pri obratovalnem pretoku ($Q_{obr} = 500 \text{ m}^3/\text{s}$) bo povprečna gladina v rečni marini okoli 2,5 m. Voda bo tekla v rečno marino s hitrostmi od 0,2 do 0,35 m/s. V marini se pojavlja cirkulacija vode v smeri urinega kazalca. Zaradi večjega vtoka vode v južni del marine iz struge se ustvari tok proti severnemu delu marine.

Preglednica 10: Maksimalne kote gladin vode v prečnih profilih na obravnavanem odseku pri obratovalnem pretoku ($Q_{obr} = 500 \text{ m}^3/\text{s}$) za bodoče stanje terena

bodoče stanje (HE 153,0 m n.v.)		$Q_{obr} = 500 \text{ m}^3/\text{s}$
prečni profil	stacionaža	kote gladin
		(m)
P102	749334	153.85
P103	748957	153.53
P104	748442	153.35
P2	748252.*	153.31
P1	748157.*	153.28
P105	748062	153.27
marina	748000	153.25
P106	747647	153.21

4.5 Predlagano bodoče stanje terena s HE Brežice z gladino na koti 153.00 in pretoki 45 m³/s in 100 m³/s – Sc4*

Pri pretoku 45 m³/s bo globina v rečni marini približno 2 m, pri 100 m³/s pa okoli 2,25 m (priloga D9). Hitrosti pri pretoku 45 m³/s so v strugi okoli 0,15 m/s (profil P1), v rečni marini pa so celo višje, okoli 0,2 m/s. Pri pretoku 100 m³/s se hitrosti v marini povečajo na 0,4 m/s, medtem ko so v strugi (profil P1) 0,3 m/s. Rezultate izračunov z obravnavanima pretokoma prikazujemo na prilogah D1, D2, D8 in D9 ter tabelarično v spodnji preglednici.

Preglednica 11: Maksimalne kote gladin vode v prečnih profilih na obravnavanem odseku pri pretokih 45 m³/s in 100 m³/s za bodoče stanje terena

bodoče stanje (HE 153,0 m n.v.)		Q = 45 m ³ /s	Q = 100 m ³ /s
prečni profil	stacionaža	kote gladin (m)	kote gladin (m)
P102	749334	152.91	153.07
P103	748957	152.89	153.03
P104	748442	152.85	153.03
P2	748252.*	152.84	153.03
P1	748157.*	152.84	153.03
P105	748062	152.83	153.03
marina	748000	152.83	153.02
P106	747647	152.81	153.01

4.6 Predlagano bodoče stanje terena s HE Brežice z denivelirano koto zajezitve -1.1 m – Sc5*

Eden izmed scenarijev je predvideval za 1,1 m nižjo koto zajezitve od tiste pri normalnem obratovanju HE Brežice (153,0 m n.v.). Pri vseh pretokih so gladine nižje za okoli 1 m od tistih pri koti zajezitve 153,0 m n.v. Pri pretoku $Q_{obr} = 500 \text{ m}^3/\text{s}$ je globina v rečni marini 1,55 m. Pri pretoku $100 \text{ m}^3/\text{s}$ je globina že samo 1,15 m, medtem ko je pri pretoku $45 \text{ m}^3/\text{s}$ le še 0,95 m. Omenjen scenarij prikazujemo le za pretoke do $500 \text{ m}^3/\text{s}$, saj so verjetno razlike v gladinah pri visokih vodah zelo majhne. Grafični izris rezultatov podajamo v prilogah od E1 do E7.

4.7 Predlagano bodoče stanje terena s HE Brežice in pretoki Q_{05} , Q_{20} , Q_{100} – Sc6*

Zaradi ekstremnih razsežnosti visokih vod daljših povratnih dob (100 let) se gladine v vodotoku dvignejo na takšno višino, da se vzpostavi naravni rečni režim, k čemur pripomorejo jezovi, ki odprejo svoja prelivna polja. To pomeni, da bi morale biti gladine med naravnim stanjem vodotoka in zgrajenimi stopnjami HE pri takšnih pretokih skoraj enake. Spodnja preglednica podaja razliko med obstoječim in bodočim stanjem pri 100 letnih visokih vodah. Razlike med gladinama so dokaj majhne. Izstopa le profil P103 (stacionaža 748957). Vzrok je verjetno v desnem visokovodnem nasipu, saj zaradi zožitve pride do večjih hitrosti in s tem nižjih gladin. Grafični izris rezultatov za pretok Q_{100} je na prilogi D7.

Akumulacija HE Brežice uspešno zajema tudi visoke vode s pretoki Q_5 in Q_{20} . Visoke vode s temi pretoki ne prestopajo bregov. Izjema je le rečna marina na južnem delu ŠRC, kjer zaradi nižjega terena voda sega do ceste pokopališče-Žadovinek. Objekti, ki so na južnem zemljišču ŠRC, so na suhem. Za omenjena pretoka prikazujemo hitrostna polja in plastnice globin na prilogah D5 in D6. Maksimalne gladine v prečnih profilih so na prilogi D9.

Preglednica 12: Primerjava maksimalnih kot gladin vode v prečnih profilih na obravnavanem odseku pri pretoku 3290 m³/s

Q ₁₀₀ = 3290 m ³ /s		obstoječe stanje	bodoče stanje (HE 153,0 m n.v.)	
prečni profil	stacionaža	kote gladin	kote gladin	razlika gladin
		(m)	(m)	(m)
P102	749334	158.42	158.50	0.08
P103	748957	157.83	157.60	-0.23
P104	748442	157.36	157.27	-0.09
P2	748252.*	157.31	157.27	-0.04
P1	748157.*	157.22	157.22	0.00
P105	748062	157.15	157.22	0.06
marina	748000	157.09	157.15	0.06
P106	747647	157.03	157.04	0.01

Preglednica 13: Primerjava maksimalnih kot gladin vode v prečnih profilih na obravnavanem odseku pri pretoku 3290 m³/s med Sc6* in študijo "HE Brežice, Idejne rešitve" (HSE d.o.o., 2007)

bodoče stanje (HE 153,0 m n.v.)				
Q _{obr} = 500 m ³ /s		Sc6*	študija 2007	
prečni profil	stacionaža	kote gladin	kote gladin	razlike kot gladin
		(m)	(m)	(m)
P103	748957	157.60	158.82	1.22
P104	748442	157.27	158.01	0.74
P105	748062	157.22	157.63	0.41
P106	747647	157.04	157.21	0.17

Za konec smo primerjali naše rezultate s tistimi, ki so bili narejeni kot idejne rešitve za HE Brežice (preglednica 13). Ker se mreži obeh nalog ne prekrivata v celoti, lahko podamo primerjavo samo za štiri prečne profile (P103-P106). Potrebno je opozoriti, da je študija 2007 poleg pretoka Save upoštevala še pretok reke Krke ($Q = 310 \text{ m}^3/\text{s}$), kar pa kot smo že omenili nima vpliva na odsek ŠRC. Razlike med gladinami so od 0,2 m do 1,2 m. Mogoče gre vzrok pripisati dejstvu, da naš model nismo umerjali na znane gladine iz let 1990 in 1998. Del k

razliki so prispevale tudi konsumpcijske krivulje iz 1D modela, ki so imele nekoliko nižje gladine kot tiste iz študij 2005 in 2007. Nenazadnje je tudi velikost naših računskih celic manjša, vendar so pri tem računi bolj natančni.

4.8 Primerjava scenarijev Sc1 in Sc1* z dosedaj izvedenimi 2D študijami širšega območja spodnje Save

Za grobo oceno natančnosti smo naše rezultate 1D in 2D računov za obstoječe stanje primerjali tudi s študijami, ki so že bile narejene na odseku spodnje Save z 2D modeli. Za najbolj referenčno velja študija "HE Brežice, Idejne rešitve" (HSE d.o.o., 2007), kjer je bila uporabljena geometrija narejena na podlagi zadnjih podatkov o topografiji terena, posnetega z LIDAR tehnologijo leta 2007. Druga študija s katero smo izvedli primerjavo je bila "Možne rešitve za izboljšavo zaščite NEK pred poplavami (IBE d.d. in FGG, 2005), ki uporablja geometrijo dobljeno iz podatkov, ki so bili na voljo leta 2005. Razlika med obema geometrijama se pokaže okoli jezua NEK in okolice stadiona v Krškem. Pri našem 2D modelu smo sicer uporabljali geometrijo iz podatkov leta 2005, vendar večjih sprememb struge in okoliškega terena ni bilo.

Zgoraj omenjeni študiji sta obravnavali samo visoke vode z dolgimi povratnimi dobami (100, 1000 in 10000 let). Tako smo si za primerljiv pretok izbrali $Q_{100} = 3290 \text{ m}^3/\text{s}$ pri obstoječem stanju. Tukaj je potrebno opozoriti, da je študija iz leta 2007 poleg pretoka Save upoštevala še pretok reke Krke ($310 \text{ m}^3/\text{s}$), vendar to ni relevantno za lokacijo ŠRC, saj nima nobenega vpliva. V spodnji preglednici podajamo številčno primerjavo rezultatov, v nadaljevanju pa tudi komentarje in ugotovitve.

Preglednica 14: Primerjava gladin vode pri obstoječem stanju terena in pretoku $Q_{100} = 3290$ m^3/s med profili P103 in P110 med scenarijem Sc1 in 2D študijama

$Q_{100} = 3290 m^3/s$		Sc1 1D račun	Sc1* 2D račun	študija 2005 2D račun	študija 2007 2D račun
prečni profil	stacionaža	kota gladine vode	kota gladine vode	kota gladine vode	kota gladine vode
		(m)	(m)	(m)	(m)
P103	748957	157.84	157.83	158.45	158.42
P104	748442	157.31	157.36	157.98	157.93
P105	748062	156.95	157.15	157.53	157.40
P106	747647	156.74	157.03	157.34	156.99
P107	747182	156.03	/	156.19	156.04
P108	746797	155.71	/	155.84	155.49
P109	746512	155.53	/	155.62	155.34
P110	746202	155.72	/	155.61	155.06

Primerjava gladin pokaže, da so med 1D modelom Sc1 in 2D modeli študij iz let 2005 in 2007 kar velike razlike. Gladine pri našem 1D modelu so za okoli 0,6 m nižje od tistih, dobljenih z 2D modeli. Med študijama 2005 in 2007 so razlike manjše. Naš 1D model ni zajel tako širokega območja poplavnih področij dolvodno od profila P105 kot ga je 2D model. Tudi geometrija terena je pri 1D modelu manj natančna. 1D model obravnava tok samo v smeri vodotoka, zato je natančnost poplavljanja inundacij zelo zmanjšana. Upoštevali smo neefektivna področja toka, kar pa ni pomembneje vplivalo na rezultate. Enako je bilo tudi pri primerjavi našega 2D modela s scenarijem Sc2* z 2D modeli preteklih študij. Gladine so opazno nižje. Kot smo že omenili je vzrok v nižjih gladinah delno spodnji robni pogoj. Potrebno bi bilo natančnejše umerjanje 1D modela, ki bi nato zagotovili konsumpcijske krivulje boljše kvalitete. Ugotavljamo pa dobro ujemanje gladin med našima 1D in 2D modeloma. Gladine so pri 2D modelu nekoliko višje.

5 UGOTOVITVE IN ZAKLJUČKI

Geometrija terena Krškega polja je zaradi prečnih naklonov terena zelo kompleksna. Posledično potrebuje tudi natančnejše obravnavanje razlivanja vode po poplavnih površinah v obeh smereh horizontalne ravnine. Zato se danes uporabljajo napredni dvodimenzijski modeli, ki smo ga aplicirali tudi na obravnavano območje, kjer naj bi se zgradil ŠRC. V nadaljevanju podajamo ugotovitve, ki se nanašajo na poplavno varnost predvidenega ŠRC in morebitne spremembe, ki bi jih povzročila izgradnja tega kompleksa.

5.1 Ocena vpliva predlagane bodoče ureditve

Splošna ugotovitev, ki jo lahko podamo na podlagi 1D in 2D izračunov je, da predvidena ureditev odseka reke Save in izgradnja športno rekreativnega centra v Krškem nimata večjega vpliva na bližnjo okolico. Izračuni so pokazali, da se pri visokih vodah daljših povratnih dob (5, 20, 100 let) in upoštevanju izgradnje nove stopnje HE Brežice, rečni režim reke Save bistveno ne spremeni. Pri omenjenih visokih vodah se namreč vzpostavi naravno stanje, kot da omenjenih ureditev ne bi bilo.

Nova ureditev sicer prinese nekaj manjših sprememb. Desno poplavno področje od cestnega mostu v Krškem do stadiona se pri izgradnji protipoplavnih nasipov izloči iz retenzijskih površin za pretoke do $Q_{100} = 3290 \text{ m}^3/\text{s}$. Simulacije so pokazale, da Sava ponovno poplavlja te površine nad $Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$. Zaradi dviga terena na zemljišču predvidenega ŠRC se tudi tam delček poplavnih površin zmanjša. Dolvodno od ŠRC pa nasipi omogočajo razlivanje nad pretokom Q_{100} na naravne retenzijske površine. 2D model za scenarij Sc2* je pokazal, da so na odseku, ki ga je pokrila računska mreže, odstopanja gladin od tistih pri obstoječem stanju (Sc1*) le največ 3 cm, kar je zanemarljivo malo. Zaključimo lahko, da sama širitev struge na desnem bregu in rečna marina nimata vpliva na okolico tako gorvodno kot dolvodno.

Na obravnavanem področju se spremembe predvidevajo samo na desnem bregu. Tako smo predvidevali, da le-te ne bodo imele večjega vpliva na levo poplavno področje, kar se je z

izračuni tudi potrdilo. Še posebej pri pretoku Q_{100} so globine na levih poplavnih področjih enake, kar se lepo razbere iz prilog B6 in D7.

Cilj te diplomske naloge je bil s pomočjo dvodimenzijskega matematičnega modela PCFLOW2D podati oceno poplavne varnosti za objekte predvidenega športno rekreativnega centra v Krškem. Izvedli smo simulacije za različne pretoke za obstoječe stanje in bodoče stanje po izgradnji HE Brežice. Geometrijski podatki so bili pripravljene na osnovi izmer terena iz leta 2005. 2D model nismo dodatno umerjali, ker bi bilo to preveč časovno zamudno in bi presegalo okvirje te naloge. Cilj naloge je bil dosežen in lahko ugotovimo, da so načrtovani objekti ŠRC Krško s predvidenimi ukrepi varni pred visokimi vodami s 100 letno povratno dobo ($Q_{100} = 3290 \text{ m}^3/\text{s}$). Varni so tudi pred pretoki $Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$.

5.2 Vpliv oblike rečne marine na smer in hitrosti toka v njej

Ena izmed nalog diplomske naloge je bila ugotoviti hitrosti toka in njegovo smer v rečni marini, ki se nahaja na južnem delu ŠRC. Za ta namen smo oblikovali tri scenarije (Sc3*, Sc4* in Sc*5). Opozoriti je potrebno, da se marina v računski mreži zaradi velikosti celic 4 x 4 m ne prekriva popolno z marino, ki je projektirana v strokovnih podlagah. Pretoki, pri katerih nas je zanimalo stanje globine in hitrosti v marini, so bili 45 m³/s, 100 m³/s in 500 m³/s.

Pri gladini zaježitve 153,00 m n.v. na HE Brežice in pretoku 45 m³/s je globina vode v marini 2 m. Tok v sami marini dosega hitrosti do 0,2 m/s. Slika tokovnic se pri tem pretoku temeljito spremeni. Voda teče v marino že v severnem delu, vendar z majhnimi hitrostmi. V severozahodnem delu marine se ustvari manjša cirkulacija vode, ki pa ima zelo majhne hitrosti. Glavni tok v marino pa prihaja gorvodno po strugi in zavija v južni del marine. Pri pretoku 100 m³/s je podobna situacija smeri toka kot pri pretoku 45 m³/s, le globine in hitrosti so malo večje.

Pri gladini zaježitve 153,00 m .n.v. na HE Brežice teče voda pri pretoku $Q_{obr} = 500$ m³/s v marino s hitrostjo okoli 0,3 m/s. Glavni tok vode v marino se pojavi na južnem delu marine in se zaradi oblike delno tudi obrne nazaj proti severu. Ustvari se cirkulacija v smeri urinega kazalca, ki ima hitrosti v sami marini okoli 0,15 m/s. Globina vode v marini se giblje okoli 2,5 m. Pontonski most, ki se razteza vzdolž celotne marine, bi bilo treba nujno sidrati v južnem delu marine.

Pri gladini zaježitve 151,90 m n.v. na HE Brežice in pretoku 45 m³/s je globina vode v marini le še slab meter. Hitrosti so nizke (0,1 do 0,2 m/s). Tok pa prihaja iz dolvodne smeri, vstopa v južni del marine in z malo večjimi hitrostmi izstopa iz severnega dela marine v strugo. Enaka situacija je pri pretoku 100 m³/s.

Pri gladini zaježitve 151,90 m n.v. na HE Brežice in pretoku 500 m³/s sta hitrostna slika in smer toka podobna kot pri enakemu pretoku pri koti zaježitve 153,00 m n.v. na HE Brežice.

Večji del toka vstopa v marino v južnem delu in se pod čolnarno obrne proti severnemu delu marine.

Glede na sliko tokovnic bi lahko obliko marine optimizirali, da gre glavna toka z visokimi hitrostmi mimo same marine. Tako bi zagotovili počasnejši tok pod pontonskim mostom in čolnarno. Z bolj odprtim preходом marine nazaj v rečno strugo in manjšim polotokom na severnem delu marine, katerega vrh bi segal bolj proti strugi, bi mogoče dosegli, da bi tok s hitrostmi 0,3 m/s šel mimo marine. V tej smeri bi bilo seveda smiselno postaviti še gostejšo računsko mrežo ($\Delta x = \Delta y = 1$ m) za samo rečno marino in preverjati hitrosti, smer toka in globine mnogo bolj natančno. Z različnimi oblikami marine bi določili optimalno za različne pretoke.

5.3 Usmeritve za nadaljnje delo

Pomembna stvar pri vseh prihodnjih hidravličnih analizah na obravnavanem območju je uporaba pravih hidroloških parametrov in hidravličnih rezultatov, ki bodo pridobljeni iz naslova hibridnih hidravličnih modelov, katere trenutno izvaja Inštitut za hidravlične raziskave v Ljubljani. Na podlagi natančnih analiz bodo določeni bolj verjetni pretoki za visoke vode s 100, 1000 in 10000 letnimi povratnimi dobami, kot so trenutno veljavni. Z njimi bi lahko naš 2D matematični model tudi zelo natančno umerili in dobili še bolj kakovostne rezultate.

Glede na že uporabljeno razmeroma gosto numerično mrežo še gostejša mreža ne bi bistveno pripomogla k še večji natančnosti rezultatov. Študije, ki so obravnavale odsek spodnje Save od mesta Krško do HE Brežice, so uporabljale redkejšo numerično mrežo (20 x 20 m), da so lahko pokrile mnogo večjo površino in so bili časi računanja še sprejemljivi. Tako bi lahko bil eden izmed ciljev nadaljnjih raziskav na omenjenem območju uporaba gostejše računske mreže (npr. vsaj 10 x 10 m), ki bi pokrila rečni odsek Save od HE Krško do HE Brežice. Zaradi podaljšanih časov računanja pa bi potrebovali tudi hitrejše računalnike, saj so naši izračuni na procesorju Intel Pentium M s frekvenco 2,13 GHz trajali okoli 27 ur.

Dobljeni rezultati za obstoječe stanje terena lahko služijo kot referenčno stanje, rezultati pri končnem stanju terena z načrtovano bodočo akumulacijo HE Brežice pa za oceno vpliva predvidenih ukrepov na gladine preko obravnavanega odseka. Oboje bo možno upoštevati pri dokončnem detajlnem načrtovanju objektov bodočega ŠRC.

VIRI

Agencija Republike Slovenije za okolje, 2009. Arhivski hidrološki podatki.

<http://www.arso.gov.si/> (1.7.2009)

Agencija Republike Slovenije za okolje, 2009. Atlas okolja.

<http://www.arso.gov.si/> (5.7.2009)

Centralni register prebivalcev, 31.12.2007. Statistični urad Republike Slovenije.

<http://www.stat.si/> (11.2.2009)

Četina, M. 1998. Dvodimenzijski program PCFLOW2D. Študijsko gradivo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Hidrotehnična smer: 67 str.

Četina, M. 1988. Matematično modeliranje dvodimenzionalnih turbulentnih tokov.

Magistrsko delo. Ljubljana, Univerza Edvarda Kardelja v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo: 105 str. in priloge.

Ponce, V. M., 2009. Engineering Hydrology, Principles and Practices.

<http://ponce.sdsu.edu> (25.9.2009)

Holding Slovenske elektrarne d.o.o., 2007. HE Brežice, Idejne rešitve. Ljubljana, IBE d.d. in FGG

IBE d.d., 2002. Hidrološka študija Save na odseku HE Boštanj, HE Blanca, HE Krško, HE Brežice in HE Mokrice. Ljubljana, IZVRS

Iskalnik Google, 2009.

<http://www.google.com> (13.2.2009)

Hidroelektrarne na spodnji Savi d.o.o., 2009. HE Brežice, Idejna zasnova. Ljubljana, IBE d.d. in Inženiring za vode d.o.o.

Lenič, M. 2009. Modeliranje toka v vodotokih s poplavnimi področji. Seminarska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Vodarstvo in komunalno inženirstvo: 65 str.

Mikoš, M. 2000. Prodna bilanca reke Save od Jesenic do Mokric. Strokovni članek. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za splošno hidrotehniko: Gradbeni vestnik, Ljubljana 49, str: 208 – 219.

Nuklearna elektrarna Krško, 2005. Možne rešitve za izboljšavo zaščite NEK pred poplavami. IBE d.d. in FGG, Ljubljana: 143 f

Nuklearna elektrarna Krško, 2009. Arhiv Nuklearna elektrarna Krško, Krško.

Nuklearna elektrarna Krško, 2009. Updated Safety Analysis Report Rvesion 14. Arhiv Nuklearna elektrarna Krško, Krško.

Občina Krško, 2009. Strokovne podlage za umestitev območja športnega centra in mostu v DPN HE Brežice. Savaprojekt d.d., Krško: 25 f

Perko, D., Adamič, M.O. 1999. Slovenija – pokrajine in ljudje. Ljubljana, Mladinska knjiga: 735 str.

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

Republika Slovenija, Ministrstvo za okolje in prostor 2007. Recenzija elaboratov o pretočnosti pri visokih vodah Save v povezavi s HE Krško. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za mehaniko tekočin z laboratorijem: 46 str.

Sound Waves, 2008.

<http://soundwaves.usgs.gov> (10.8.2008)

Steinman, F. 1999. Hidravlika. Učbenik. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za mehaniko tekočin z laboratorijem: 295 str.

US Army Corps of Engineers, 2009.

<http://www.hec.usace.army.mil> (20.7.2009)

Wikipedia, 2009.

<http://en.wikipedia.org> (11.2.2009)