

Univerza  
v Ljubljani  
Fakulteta  
*za gradbeništvo  
in geodezijo*

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



Univerzitetni program Gradbeništvo,  
Hidrotehniška smer

Kandidat:

**Tomaž Balut**

# **DVODIMENZIJSKO MODELIRANJE EKSTREMNIH POPLAV SAVE V OBMOČJU NE KRŠKO**

**Diplomska naloga št.: 3165**

**Mentor:**  
prof. dr. Matjaž Četina

**Somentor:**  
asist. dr. Mario Krzyk, dr. Andrej Širca

Ljubljana, 27. 5. 2011

## **POPRAVKI**

**Stran z napako**

**Vrstica z napako**

Namesto

**Naj bo**

## IZJAVA O AVTORSTVU

Skladno s 27. členom Pravilnika o diplomskem delu UL Fakultete za gradbeništvo in geodezijo,

Podpisani **TOMAŽ BALUT** izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom:

**»DVODIMENZIJSKO MODELIRANJE EKSTREMNIH POPLAV SAVE V OBMOČJU NE KRŠKO«**

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

Noben del tega zaključnega dela ni bil uporabljen za pridobitev strokovnega naziva ali druge strokovne kvalifikacije na tej ali na drugi univerzi ali izobraževalni inštituciji.

Ljubljana, 15.april 2011

.....

(podpis kandidata)

## **ZAHVALA**

*Rad bi se zahvalil mentorju prof. dr. Matjažu Četini in somentorjema dr. Mariu Krzyku ter dr. Andreju Širci za strokovno vodstvo in za vse nasvete pri izdelavi diplomskega dela. Zahvalil pa bi se tudi svoji družini, ki mi je omogočila študij ter mi stala ob strani v tem času.*

## **BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK**

**UDK:** 532.5:627.51(043.2)

**Avtor:** Tomaž Balut

**Mentor:** prof. dr. Matjaž Četina

**Somentorja:** dr. Mario Krzyk, dr. Andrej Širca

**Naslov:** Dvodimenzijsko modeliranje ekstremnih poplav Save v območju NE Krško

**Obseg in oprema:** 63 str., 15 pregl., 26 sl., 5 en., 18 pril.

**Ključne besede:** varovanje pred poplavami, 2D matematično modeliranje poplavnih valov, nasipi, reka Sava, NE Krško, pretočna krivulja

### **Izveček:**

V diplomski nalogi je obravnavana poplavna varnost širšega področja NE Krško. Obravnavano je bilo sedanje stanje terena ter predvidene ureditve. Hidravlični izračun je potekal z dvodimenzionalnim matematičnim modelom, razvitim na Katedri za mehaniko tekočin UL FGG. V uvodnem delu so opisane osnovne značilnosti obravnavanega območja. Navedene so topografske značilnosti ter hidrološki pogoji na povodju. V nadaljevanju je predstavljen matematični model ter potek računa z računalniškim programom PCFLOW2D. Opisane so teoretične osnove modela z enačbami in povzetkom numerične metode reševanja. Na koncu so predstavljeni rezultati izvedenih izračunov, ki so pokazali, da obstoječe stanje visokovodnih zaščit za primer pojava maksimalno verjetnega pretoka ne zadošča. Glede na rezultate izračunov so bile nato podane smernice za načrtovanje bodočih protipoplavnih zaščit na tem območju.

**BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION****UDC:** 532.5:627.51(043.2)**Author:** Tomaž Balut**Supervisor:** Prof. Ph. D. Matjaž Četina**Co-supervisors:** Ph. D. Mario Krzyk, Ph. D. Andrej Širca**Title:** Two-dimensional modelling of extreme floods of the Sava River in the area of NPP Krško**Notes:** 63 p., 15 tab., 26 fig., 5 eq., 18 ann.**Key words:** flood protection, 2D mathematical modelling of flood waves, levees, the Sava River, NPP Krško, consumption curve**Abstract:**

The graduation thesis deals with flood protection in the area of NPP Krško. It treats the current state of the terrain and foreseen conditions. Hydraulic calculations were carried out with two-dimensional mathematical model developed at the Chair of fluid mechanics. General description and main characteristics of the area are described in the beginning. Also basic topographical and hydrological conditions of the river basin are listed in initial part. Further on, the mathematical model and the computations with the programme PCFLOW2D are described. Some theoretical basis, including basic equations and numerical solution method are also presented. Results of the computations are presented in the end. Analysis for the present state showed, that flood protections measures for probably maximum flood are not appropriate. Finally, the design of future flood protection measures in this area is proposed considering all the analyses performed.

**KAZALO VSEBINE**

<b>1</b>	<b>UVOD .....</b>	<b>1</b>
	1.1 Splošno .....	1
	1.2 Značilnosti obravnavanega območja .....	2
	1.3 Namen diplomske naloge .....	4
<b>2</b>	<b>POPLAVNO VAROVANJE ŠIRŠEGA OBMOČJA NEK.....</b>	<b>5</b>
	2.1 Lastnosti poplav na spodnji Savi .....	6
	2.1.1 Odtočni pogoji na porečju .....	6
	2.1.2 Visoke vode na krško-brežiškem polju .....	8
	2.2 Obstoječe stanje objektov .....	10
	2.2.1 Pregrada in plato NE Krško.....	10
	2.2.2 Levoobrežni visokovodni nasipi.....	11
	2.2.3 Desni breg .....	12
	2.3 Ukrepi za izboljšanje poplavne varnosti.....	13
	2.3.1 Vodnogospodarski posegi .....	14
	2.3.2 Negradbeni ukrepi .....	15
	2.4 Načrtovane ureditve.....	16
	2.4.1 Izboljšave za različne nivoje varovanja .....	16
	2.4.2 Potek visokovodnih nasipov .....	17
<b>3</b>	<b>RAČUN VISOKIH VOD Z 2D MATEMATIČNIM MODELOM .....</b>	<b>19</b>
	3.1 Osnovni podatki .....	20
	3.1.1 Hidrološki podatki .....	20
	3.1.2 Geometrijski model območja .....	21
	3.1.3 Hidravlični podatki .....	23
	3.2 2D matematični model .....	26
	3.2.1 Osnovne enačbe izračuna .....	26

3.2.2	Postopek reševanja z računalniškim programom .....	28
3.2.3	Uporabljeni začetni in robni pogoji modela .....	29
3.3	Umerjanje računskega modela .....	30
3.3.1	Rezultati in njihova točnost.....	33
4	<b>REZULTATI HIDRAVLIČNIH IZRAČUNOV .....</b>	<b>34</b>
4.1	Pregled izvedenih izračunov.....	34
4.1.1	Rezultati za obstoječe stanje.....	35
4.1.2	Rezultati za bodoče ureditve .....	39
4.2	Primerjava variantnih rešitev .....	43
4.2.1	Poteki gladin v strugi Save .....	44
4.2.2	Obseg poplave in poplavne linije .....	45
4.3	Primerjava poplave leta 2010 z rezultati matematičnega modela .....	46
4.3.1	Hidrološki podatki o visokih vodah.....	47
4.3.2	Poplavljeno območje na obravnavanem odseku .....	48
5	<b>NAČRTOVANE VISOKOVODNE ZAŠČITE OBMOČJA.....</b>	<b>51</b>
5.1	Varovanje ožjega območja NE Krško .....	51
5.1.1	Plato nuklearne elektrarne.....	51
5.1.2	Zaščite na desnem bregu .....	52
5.2	Varovanje širšega področja.....	52
5.2.1	Navezava na akumulacijski bazen HE Brežice .....	54
5.3	Sestava predvidenih nasipov .....	56
5.3.1	Karakteristični prerez nasipa .....	56
5.4	Predlagane izboljšave.....	59
5.4.1	Določitev poteka novih nasipov.....	59
6	<b>ZAKLJUČEK .....</b>	<b>60</b>
	<b>VIRI .....</b>	<b>62</b>
	<b>PRILOGE</b>	



**KAZALO SLIK**

Slika 1: Zračni posnetek obravnavanega območja - označena je lokacija NE Krško .....	3
Slika 2: Lokacija NE Krško in načrtovanega odlagališča jedrskih odpadkov.....	4
Slika 3: Karta poplavne ogroženosti Slovenije.....	7
Slika 4: Sava proti hrvaški meji ob visokih vodah leta 2010 .....	8
Slika 5: Pogled gorvodno na poplavljenno področje Krške vasi.....	9
Slika 6: Pogled na pregrado in plato NEK na levem bregu Save .....	11
Slika 7: Vodno gospodarske ureditve na HE Blanca.....	13
Slika 8: Prikaz obravnavanih različic visokovodnih nasipov .....	17
Slika 9: Obseg 2D matematičnega modela na obravnavanem območju .....	19
Slika 10: Začetek obravnavanega odseka v Krškem .....	22
Slika 11: Pretočna krivulja v profilu P120, uporabljena za dolvodni robni pogoj .....	24
Slika 12: Poplavljenno območje v okolici Starega Gradu novembra leta 1998 .....	31
Slika 13: Gladine v profilu P120, dobljene v predhodnih študijah za to območje .....	32
Slika 14: Pretočna krivulja v profilu P110 za sedanje stanje teren .....	44
Slika 15: Poplave septembra 2010 na območju začetka 2D modela v mestu Krško.....	46
Slika 16: Hidrogram visokovodnega vala na pragu jezua NE Krško septembra 2010 .....	47
Slika 17: Zračni posnetek poplavljenega območja na obravnavanem odseku .....	48
Slika 18: Območje NE Krško ob poplavih leta 2010.....	49
Slika 19: Pogled gorvodno na poplavljenno sotočje reke Save in Krke.....	50
Slika 20: Pretočna krivulja v profilu P110 za varianto C .....	52
Slika 21: Pretočna krivulja v profilu P105 za varianto C .....	53
Slika 22: Pretočna krivulja v profilu P113 za varianto C .....	54
Slika 23: Prikaz idejne zasnove ureditev za HE Brežice.....	55

Slika 24: Karakteristični prečni profil nadvišanja visokovodnega nasipa.....	56
Slika 25: Polje potencialov pod netesnjem visokovodnim nasipom .....	57
Slika 26: Polje potencialov pod tesnjem visokovodnim nasipom .....	58

**KAZALO PREGLEDNIC**

Preglednica 1: Razmerje med največjimi in najmanjšimi pretoki na reki Savi.....	6
Preglednica 2: Varnostno nadvišanje brežin .....	14
Preglednica 3: Vpliv različnih robnih pogojev na gladino Save v profilu P120 .....	24
Preglednica 4: Kote gladin v profilu P120, dobljene z 1D hidravličnim modelom .....	25
Preglednica 5: Umerjene vrednosti Manning-ovega koeficienta hrapavosti.....	31
Preglednica 6: Izvedeni izračuni z 2D matematičnim modelom.....	35
Preglednica 7: Kote gladin Save za pretok $Q_{100}$ in $Q_{PMF}$ , izračunane z 1D modelom.....	36
Preglednica 8: Kote gladin, dobljene z 2D modelom za sedanje stanje terena .....	37
Preglednica 9: Razdelilnik pretoka na obravnavanem odseku za sedanje stanje terena .....	38
Preglednica 10: Gladine, dobljene z 2D modelom za novo stanje pri pretoku $Q=3290 \text{ m}^3/\text{s}$ ..	40
Preglednica 11: Gladine, dobljene z 2D modelom za novo stanje pri pretoku $Q=7081 \text{ m}^3/\text{s}$ ..	41
Preglednica 12: Razdelilnik pretoka za novo stanje - varianta A.....	42
Preglednica 13: Razdelilnik pretoka za novo stanje - varianta B .....	42
Preglednica 14: Razdelilnik pretoka za novo stanje - varianta C .....	43
Preglednica 15: Teoretično največji pretok skozi visokovodni nasip ob Savi .....	58

## OKRAJŠAVE IN SIMBOLI

UL	Univerza v Ljubljani
FGG	Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo
NEK	Nuklearna elektrarna Krško
HESS	Hidroelektrarne na spodnji Savi
KMTe	Katedra za mehaniko tekočin
PMF	Probably maximum flood (maksimalno verjetna poplava)
HE	Hidroelektrarna
NSRAO	Nizko in srednje radioaktivni odpadki

# 1 UVOD

## 1.1 Splošno

Varovanje življenjskega okolja človeka pred ekstremnimi naravnimi pojavi je prisotno skozi celotno zgodovino razvoja civilizacije. Med omenjene dogodke spada tudi pojavljanje izredno visokih voda, ki jih rečne struge običajno ne zmorejo odvesti in se posledično razlijejo na poplavne površine v okolici. S tem lahko povzročajo tudi škodljivo delovanje na človekove dobrine in njegov življenjski prostor. V današnjih časih celostno upravljanje z vodami dobiva še posebno pomembno vlogo, saj se je uporaba vode razširila na številna področja človekovega delovanja in kot taka voda predstavlja nezamenljivo dobrino, ki jo je potrebno varovati ter ohraniti čimbolj nedotaknjeno za prihodnje generacije.

Zaradi vse večje poseljenosti območij, ki jih voda pri pojavu obilnih padavin preplavi, ter uporabe vode v različne gospodarske namene, postaja varovanje širšega obrečnega prostora in infrastrukturnih objektov pred škodljivim delovanjem voda čedalje bolj zahtevno. Zato je smiselno vse bodoče ureditve načrtovati kot večnamenske objekte ter njihovo rabo prilagoditi glede na okoljske zahteve in lokalno problematiko.

Eden takšnih večnamenskih projektov je tudi ureditev reke Save na odseku med njenim levim pritokom Savinjo in državno mejo z republiko Hrvaško. Načrtovane ureditve obsegajo izgradnjo verige šestih hidroelektrarn, izboljšanje poplavne varnosti obrečnega prostora, ohranjanje nivoja podtalne vode pod obsežnimi kmetijskimi površinami, ureditev nadomestnih habitatov in mokrišč ter izgradnjo infrastrukturnih objektov kot so mostovi, ceste, čistilne naprave, kanalizacijska omrežja, namakalna omrežja in podobni objekti.

Ker so v zadnjem času ekstremni vremenski dogodki vse pogostejši, so tudi visoke vode ter z njimi povezane poplave vse pogostejše velik problem za lokalno prebivalstvo in infrastrukturo. Vendar je sam pojav visokih voda sestavni del vodnega režima, tako da človek s svojim delovanjem nanj ne more pomembno vplivati, lahko se le ustrezno prilagodi in zavaruje obstoječe objekte pred škodljivim delovanjem visokih voda. Načini varovanja posameznih lokacij so lahko različni, poleg uporabe vodnogospodarskih ukrepov je predvidena tudi uporaba negradbenih ukrepov, ki so usmerjeni predvsem v zmanjševanje obsega škode ob pojavu poplav ter v ustrezno umeščanje novih objektov v prostor.

Načrtovanje in izgradnja verige hidroelektrarn na spodnji Savi tako zahteva natančno preučitev obstoječih razmer ter upoštevanje vseh vplivov novo zgrajenih objektov na lokalni prostor. Na ta način je potrebno zagotoviti tudi ustrezno visokovodno zaščito širšega območja obstoječe nuklearne elektrarne Krško (NEK) in pripadajočih objektov. Ker se lokacija NEK nahaja neposredno ob akumulacijskem jezeru načrtovane hidroelektrarne Brežice, je potrebno bodoče vodnogospodarske ureditve na tem območju načrtovati skladno s potekom ureditev, ki se navezujejo na izgradnjo omenjene hidroelektrarne.

Skupaj z izbrano stopnjo poplavne varnosti širšega območja NEK ter potekom predevidenih ureditev za HE Brežice, podanih s strani projektanta le-te, je v tej diplomi obravnavana poplavna varnost širšega območja obstoječe nuklearne elektrarne Krško in pripadajočih objektov za primer pojava ekstremnih poplav.

## **1.2        Značilnosti obravnavanega območja**

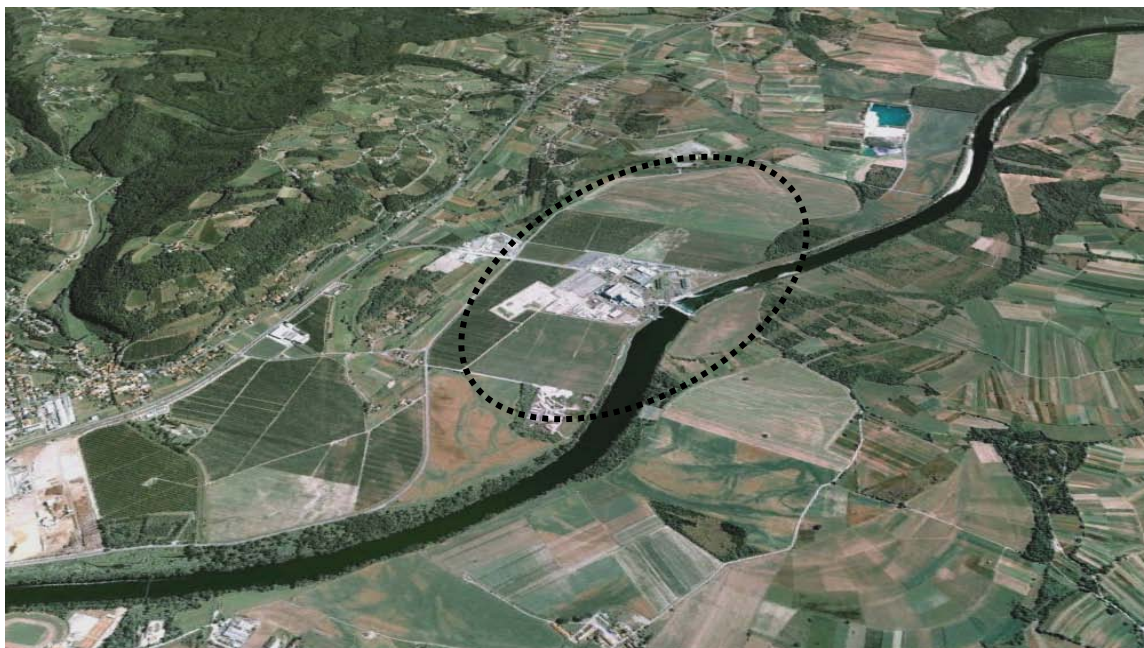
Odsek spodnje Save, na katerem poteka projekt izgradnje verige hidroelektrarn, trenutno predstavlja najobsežnejši in najzahtevnejši infrastrukturni projekt, ki poteka v Sloveniji. Po dokončanju ureditev in vseh načrtovanih objektov bo na tem območju poleg gospodarskih pridobitev zagotovljena tudi večja poplavna varnost celotnega območja, predvsem urbaniziranih površin, ki so vedno bolj pogosto podvržena delovanju visokih vod. Ker se na omenjenem območju nahaja tudi NE Krško, so zahteve po poplavni varnosti še strožje ter varovanje pred stoletnimi visokimi vodami ne zadošča, temveč je potrebno zagotoviti ustrezno varnost objektov pri mnogo večjih pretokih reke Save.

V načrtovani verigi šestih HE na spodnji Savi so do sedaj zgrajene ter v polnem obratovanju tri elektrarne, in sicer HE Vrhovo, HE Boštanj in HE Blanca, HE Krško kot četrta elektrarna v verigi je v gradnji, zadnji dve, HE Brežice in HE Mokrice, katerih akumulacijska jezera imata funkcijo izravnalnih bazenov pa sta v fazi načrtovanja.

Na verigi do HE Krško je bila najpomembnejša okoljska problematika ohranjanje kmetijskih površin v primeru trajnega dviga gladin reke Save, ohranjanje ribje populacije in njene migracije ter ohranitev obstoječe obrečne krajine. Dolvodno od HE Krško so pomembna

vprišanja vezana na premeščanje plavin, vplive akumulacijskih bazenov na podtalnico, zelo zahtevno pa je tudi reševanje prevajanja poplavnih valov in s tem povezane varnosti NE Krško (Hudoklin, 2005).

Vpliv bodoče akumulacije HE Brežice sega vse do jezua NE Krško, tako da spodnja voda na jezua določa maksimalno koto predvidene zaježitve tudi nad NEK. Energetski nasipi hkrati predstavljajo tudi visokovodne zaščitne območja. Ker je potrebno ohraniti aktivno vlogo poplavnih površin v zaledju, je predvidena ureditev preлива na levem bregu Save ter prosto prelivanje visokih vod čez desni breg v območju NEK. S tem se tudi ohranja poplavna varnost na platoju NEK, saj se vode prej razlijejo na obsežna polja na nasprotni strani, kot pa preplavijo elektrarno.



*Slika 1: Zračni posnetek obravnavanega območja - označena je lokacija NE Krško  
(<http://www.google.com/> 15.11.2010)*

V izogib poslabšanju obstoječih hidravličnih pogojev toka dolvodno od predvidene akumulacije mora biti zagotovljen odtok visokih voda ob pojavu izrednih hidroloških razmer v dosedanjih vrednostih. Tako bo z ureditvijo prelivov ter prostim prelivanjem poplavnih valov čez nasipe retenzijski učinek obstoječih poplavnih območij ohranjen, maksimalne vrednosti pretokov dolvodno od HE Brežice pa bodo ostale na zdajšni ravni.

### 1.3 Namen diplomske naloge

V okviru diplomske naloge je potrebno preučiti obstoječe stanje visokovodnih nasipov na obravnavanem odseku Save v okolici NEK ter podati smernice in izhodišča za nadaljnje načrtovanje visokovodnih zaščit tako obstoječih kakor tudi novozgrajenih objektov na tem območju. Ker je neposredno poleg nuklearne elektrarne Krško predvidena tudi izgradnja trajnega odlagališča radioaktivnih odpadkov, je potrebno podati ustrezne kote visokih voda tudi na tem področju.

S pomočjo dvodimenzijskega (2D) matematičnega modela območja in privzetih vrednosti visokovodnih pretokov je bilo obravnavano obstoječe stanje terena ter tri možne bodoče ureditve visokovodnih zaščit širšega območja NEK. Obravnavani so poteki visokovodnih nasipov, ki so bili predlagani s strani projektanta HE Brežice, ki se nahaja dolvodno od bodočega odlagališča radioaktivnih odpadkov in s svojim akumulacijskim jezerom sega vse do obravnavanega odseka na območju nuklearne elektrarne. Na podlagi izvedenih izračunov in dobljenih rezultatov za primere pojava stoletne visoke vode in verjetno maksimalnega pretoka na tem območju so bile predlagane možne izboljšave obstoječih nasipov ter določena izhodišča za ureditev novih protipoplavnih zaščit okoliških površin in objektov.



*Slika 2: Lokacija NE Krško in načrtovanega odlagališča jedrskih odpadkov  
(<http://www.arao.si/> 15.1.2011 )*



## 2 POPLAVNO VAROVANJE ŠIRŠEGA OBMOČJA NEK

Območje NE Krško leži neposredno ob obstoječih poplavnih površinah, zato je določitev ustreznega poteka visokovodnih nasipov tesno povezana z zagotavljanjem zadostne zadrževalne sposobnosti področja tudi v bodoče. Vsi posegi v prostor spreminjajo razmere za zadrževanje voda na nekem območju in kot taki vplivajo na vodno bilanco ter na elemente hidrološkega kroga.

Na povečanje konic odtokov in pospeševanje odtoka vplivajo predvsem povečevanje nepropustnih površin zaradi različnih vzrokov (urbanizacija, gradnja cest in parkirišč), drugačne rabe tal (pridelava monokultur, sečnja gozdov) in izločevanje obstoječih naravnih retenzij (posegi v obvodni svet, prekomerna zaščita zemljišč pred visokimi vodami, ureditve za hidroelektrarne, ipd.). To pomeni, da lahko zadrževanje voda v najširšem obsegu dosežemo z različnimi ukrepi. Potrebno je zadrževanje odtoka že na kraju nastanka, preoblikovanje krivulj odtoka vzdolž vodotokov, obravnavanje vplivov akumulacij oziroma zadrževalnikov ter omogočanje intenzivnega ponikovanja (Steinman in Mikoš, 1993).

Akumulacije in jezera imajo velik vpliv na oblikovanje odtoka voda, saj zadržijo del odtekle vode in s tem povečujejo poplavno varnost, omogočajo bolj uravnotežen odtok ter večajo najmanjše pretoke. Omenjeno vlogo bo imel tudi akumulacijski bazen HE Brežice, ki je načrtovan dolvodno od nuklearne elektrarne. S svojim obsegom bo posegel tudi na obstoječe poplavne površine, zato moramo zagotoviti nadomestne izravnalne ukrepe, da zmanjšamo negativne posledice kot so uničenje obstoječega naravnega habitata, sprememba temperaturnega režima vode, transporta sedimentov, drugačne porazdelitve pretokov in podobno. Načrtovane ureditve morajo tako zagotoviti večjo poplavno varnost, a hkrati tudi omogočiti dovolj prostora za učinkovito zadrževanje obstoječih količin vode.

V okviru izgradnje bodočega akumulacijskega jezera je predvideno poplavno varovanje območja NEK z visokovodnimi nasipi ter bočnimi prelivami. Potek obstoječih visokovodnih nasipov predstavlja izhodiščno točko za načrtovanje novih ureditev, zato je bilo najprej potrebno obravnavati obstoječe stanje pri izbranih visokih vodah. Načrtovane ureditve pa so obsegale različne stopnje varovanja obstoječih objektov kakor tudi predvidene lokacije odlagališča radioaktivnih odpadkov v neposredni bližini nuklearne elektrarne.

## 2.1 Lastnosti poplav na spodnji Savi

Porečje Save predstavlja skupaj s svojim 10 872 km<sup>2</sup> velikim vodozbirnim območjem kar 53.6% celotne površine Slovenije. Vendar je kljub svoji pomembnosti ena najmanj izkoriščenih od večjih rek. Njeno povodje sestavljajo trije odseki: zgornja Sava, srednja Sava in spodnja Sava. Na obravnavanem odseku spodnje Save trenutno potekajo obsežne ureditve, tako da bo območje, kjer Sava najpogosteje poplavlja, v prihodnje precej bolj varno pred visokimi vodami kot je danes.

### 2.1.1 Odtočni pogoji na porečju

Reka Sava dobiva večino vode s področja Alp, zato ima v svojem toku skozi Slovenijo snežno-dežni režim. Ker je v zgornjem in srednjem toku z izjemo ljubljanske kotline povodje precej hribovito, pomeni prehod na ravnico krško-brežiškega polja možnost za nastanek obsežnih poplavnih površin, kjer se voda lahko zadrži več dni. Podobne odtočne pogoje bo potrebno zagotoviti tudi v prihodnje, saj se razmere dolvodno zaradi hitrejšega odtoka ne smejo poslabšati.

Za učinkovito gospodarjenje z vodami je potrebno poznavanje minimalnih in maksimalnih odtokov s porečja, saj so ti pogoji z vidika varstva pred vodami in druge rabe vodnih količin merodajni. Glede na razmerje med največjimi in najmanjšimi pretoki ima reka Sava hudourniški značaj (Steinman in Banovec, 2004).

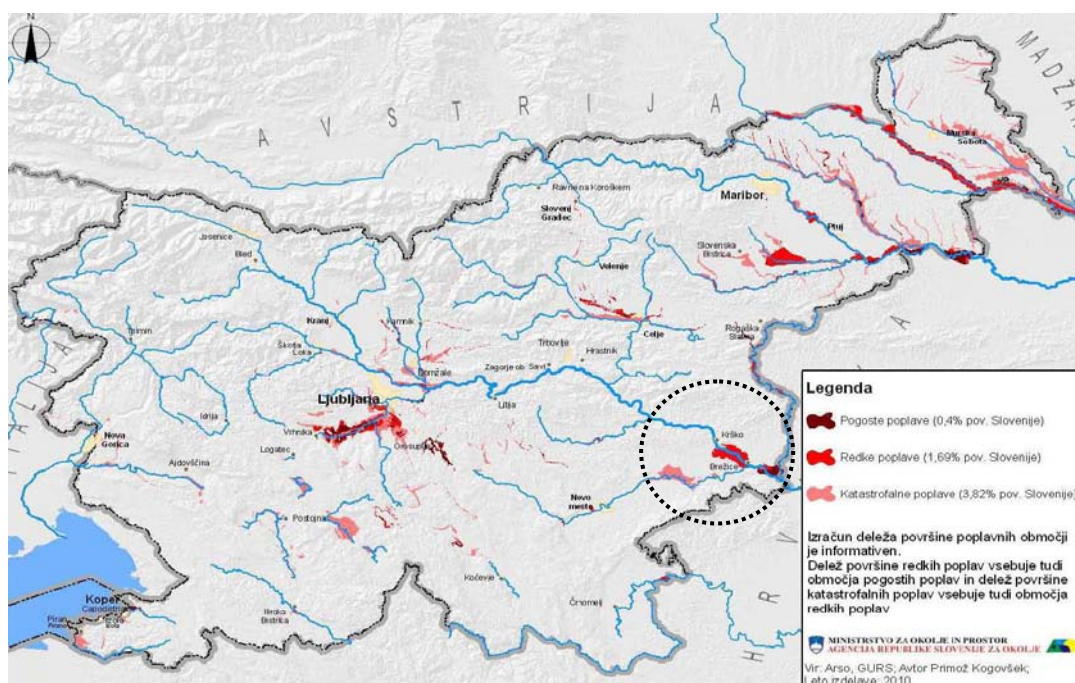
*Preglednica 1: Razmerje med največjimi in najmanjšimi pretoki na reki Savi (Steinman in Banovec, 2004)*

Vodotok	vQv(k)	nQn(k)	Razmerje
SAVA	3650 m <sup>3</sup> /s	46,3 m <sup>3</sup> /s	79:1

Odsek spodnje Save je še posebej podvržen hudourniškem površinskemu odtoku. K temu precej prispeva njen levi pritok Savinja, ki ima poleg hudourniškega značaja tudi zelo veliko

vodnatost preko celega leta. Ker se nahajamo v povirnih delih vodotokov, večinoma nastopajo večerne hudourniške poplave, ki so posledica zelo intenzivnih padavin.

Od sotočja s Savinjo in do četrte HE v verigi (Krško) poteka struga Save v dokaj ozkem dolinskem profilu, nato pa se od mesta Krško naprej dolina razširi, tako da je do meje z republiko Hrvaško območje precej ravninsko in posledično vzdolžni padec nekoliko manjši. Na odseku, kjer so hidroelektrarne že zgrajene, se je poplavna varnost že zagotovila, na območju krško-brežiškega polja pa se vode razlijejo izven struge tako na obsežne poplavne ravnice kakor tudi na poseljena področja.



Slika 3: Karta poplavne ogroženosti Slovenije  
(<http://www.arso.gov.si/> 9.1.2011)

Na karti poplavne ogroženosti Slovenije (slika 3) je razvidno, da spada obravnavano področje na odseku spodnje Save med ene izmen najbolj izpostavljenih pri nas. Še posebno je ogroženo območje na sotočju Save in njenega desnega pritoka Krke med mestom Brežice in Krško vasjo. Z izgradnjo zadnjih dveh stopenj HE v spodnje savski verigi bodo odtočni pogoji na tem območju precej spremenjeni. S povečanim zadrževanjem vode znotraj energetskih in visokovodnih nasipov se bo zmanjšal obseg poplavnih površin in posledično se bodo

spremenili obstoječi hidravlični pogoji na porečju. Da ne bi prišlo do poslabšanja odtočnih pogojev dolvodno od načrtovanih ureditev, moramo ohraniti vrednosti odtočnih količin največjih visokovodnih valov na enaki ravni kot so obstoječe. Načrtovane ureditve bodo ohranile obstoječe zadrževalne lastnosti območja v enakih mejah, le da bo večji del volumna regulirano odtekal na predvidena retenzijska področja v okolici oziroma se bo zadržal v akumulacijskih jezerih predvidenih hidroelektrarn. Z zadrževanjem vode v bazenih se bo povečala tudi količina vode, ki bo na voljo za druge rabe, s sistemom drenažnih kanalov pa se bo uravnavala gladina podtalnice v zelednem področju.

### 2.1.2 Visoke vode na krško-brežiškem polju

Širše območje NE Krško je poleg energetike pomembno tudi zaradi odlagališča NSRAO, saj je predvideno kot mesto za postavitev trajnega odlagališča radioaktivnih odpadkov. Načrtovati je potrebno izgradnjo odlagališča na nasipu, ki bo ščitil pomembne objekte pred največjimi visokimi vodami, ki se na tem področju lahko pojavijo. Tako bomo v času obratovanja poplavni vodi preprečili vstop v varovane objekte in s tem omilili posledice poplav.



*Slika 4: Sava proti hrvaški meji ob visokih vodah leta 2010  
(<http://www.arso.gov.si/> 13.1.2011)*

Lokacija NEK in bodočega odlagališča radioaktivnih odpadkov se nahaja približno 7,5km gorvodno od sotočja reke Krke in reke Save, lokacija načrtovane HE Brežice pa precej bližje, in sicer 1,2km nad sotočjem. Na levem bregu sotočja se nahaja mesto Brežice, ki je varovano pred poplavami z obstoječimi nasipi. V bodoče bo levi breg med NE Krško in Brežicami varovan z energetskimi in visokovodnimi nasipi, območje na desnem bregu pa je gorvodno od NEK prevedeno za prosto prelivanje poplavnih valov na okoliške kmetijske površine.

Tudi ob zadnjih poplavah se je pokazalo, da je sotočje problematično, saj Sava ob visokih pretokih zajezi Krko in s tem povzroči velike težave gorvodno na reki Krki, predvsem na širšem območju Krške vasi, kjer voda zalije veliko število stanovanjskih objektov. V ta namen bo potrebno z novimi ureditvami doseči manjši vpliv Save na Krko in omogočiti lažje odtekanje Krke dolvodno, saj se v nasprotnem dviguje gladina gorvodno na reki Krki.



*Slika 5: Pogled gorvodno na poplavljeno področje Krške vasi  
(Hidroelektrarne na spodnji Savi, 2011)*

Področje NEK in predvidene lokacije odlagališča je na nekoliko višjem terenu od okoliškega, zato je obstoječe stanje precej varnejše pred poplavami kot območja dolvodno, vendar bo potrebno v prihodnje zagotoviti ustrezno varnost tudi za večje vrednosti visokih voda.

## **2.2 Obstoječe stanje objektov**

Zahtevano je bilo, da se pred visokimi vodami Save in pritoka Potočnice zaščiti širše področje nuklearne elektrarne, ki ga na severni strani omejuje železniška proga Ljubljana – Zagreb, na zahodnem delu regulirana struga levega savskega pritoka Potočnice, na jugozahodnem ter na južnem robu pa struga Save.

Na podlagi opisa izvedenih del po projektih za NEK ter geodetskih posnetkov in ostalih podlog, ki jih je posredoval projektant hidroelektrarn, je bilo ugotovljeno obstoječe stanje visokovodnih zaščit ob reki Savi. V osnovni rešitvi za zaščito objektov NEK pred visokimi vodami je bilo celotno območje nasuto do kote 155,20 m.n.v., kar je zagotavljalo varnost pred 100-letno vodo z varnostnim nadvišanjem 0,6 m. Zaradi kasneje ugotovljenih višjih gladin visokih voda in ostrejših pogojev, ki predvidevajo varnostno nadvišanje 1,2 m, se je pokazalo, da je kota platoja prenizka in da ga je treba dodatno zaščititi z nasipi. Tako se je pred visokimi vodami reke Save in levega pritoka Potočnice zaščitilo širše področje. Ob nastopu 1000-letne vode v Savi je bilo privzeto, da bo hkrati nastopila v Potočnici 100-letna voda. Kota nasipa ob Potočnici je 1.2m nad gladino Potočnice ob 1000-letni savski vodi oziroma 0,6 m nad gladino 100-letne vode Potočnice v zgornjem nezajezenem delu.

Območje odlagališča NSRAO se nahaja na rečni terasi reke Save. Na jugo zahodnem delu je območje oddaljeno približno 500m od levega brega, ki ga sestavljajo prodi in peski ter rečne terase, katere pa na večjih delih pokrivajo plavine in sedimenti visokih voda. Gorvodno od konca obstoječega nasipa (500 metrov) je breg reke Save urejen in pokrit z skalometno oblogo. Približno 300 metrov južno od območja odlagališča se nahaja gramoznica, ki bo ohranila svojo zadrževalno vlogo.

### **2.2.1 Pregrada in plato NE Krško**

Področje platoja NEK je zaščiteno pred ekstremnimi poplavami z obrežnim zidom s krono na koti 157.10 m.n.v. Dolvodno od platoja se zid nadaljuje v visokovodni nasip in spremlja savsko strugo do profila, kjer se gladina 1000-letne vode spusti do kote 154,00 m.n.v. Nasip ima zahtevano varnostno nadvišanje 1,2 m.



*Slika 6: Pogled na pregrado in plato NEK na levem bregu Save  
(<http://www.nek.si/> 24.1.2011)*

Na območju platoja NEK poteka trasa nasipov v neposredni bližini zavarovanih brežin reke Save in se priključi na krilne in obrežne zidove ob jezovni zgradbi ter črpališčih hladilne vode. Na tem odseku je brežina zavarovana deloma z betonsko oblogo (od jezua do iztoka hladilne vode), deloma pa s skalometom (dolvodno od iztoka hladilne vode ter gorvodno od črpališča nujne vode). Na ta način je na tem odseku zagotovljena stabilnost naravnih brežin in visokovodnega nasipa.

### **2.2.2 Levoobrežni visokovodni nasipi**

Nasipi so zgrajeni iz prodnega materiala. Širina krone nasipa je 4 m, kar omogoča dostop za potrebe vzdrževanja. Nagib brežin je 1:2, brežine nasipa so humusirane in zatravljene. Na suhi strani nasipa je drenažna nožica iz drobljenca, ki preprečuje pojav erozije v peti nasipa.

Dolvodno od platoja NEK poteka trasa nasipa na tolikšni oddaljenosti od savskega brega, da ostaja med dolvodno nožico nasipa in teoretičnim savskim bregom najmanj 10 m ravnega terena. To je potrebno zaradi možnosti dostopa v primeru, da se pojavijo večji erozivni efekti,

ki lahko ogrozijo stabilnost nasipa. Dolvodni nasip se prične na koti 156,50 in teče enakomerno v naklonu do zaključne točke na koti 155,20 m.n.v.

Na podlagi prejete dokumentacije (IBE, 2005) so ugotovljene sledeče kote levega brega Save:

- Krona nasipa ob Potočnici na izlivu 158,09
- Cesta na izlivu Potočnice (kota ceste na mostu) 159,00
- Začetek visokovodnega nasipa 157,60
- Lokacija NEK (ob bregu) 157,10
- Plato NEK 155,50
- Konec nasipa (1km dolvodno od jezu) 155,20

Gorvodno od platoja NEK poteka trasa nasipa enako kot dolvodno od platoja na minimalni oddaljenosti 10 m od teoretičnega brega Save. V oddaljenosti približno 1,4 km od platoja NEK se visokovodni nasip priključi na cestno telo. Cesta je od tu naprej na višini minimalno 1,2 m nad nivojem 1000-letne visoke vode. Cestno telo predstavlja hkrati tudi zaščitni visokovodni nasip, ki poteka vse do mostu čez Savo v Krškem.

### 2.2.3 Desni breg

Zaradi ščitenja elektrarne ni protipoplavnih nasipov na nasprotnem, desnem bregu Save. S tem je omogočeno, da se Sava razlije na tamkajšnja polja in zato ne naraste čez nasipe na levi strani ter poplavi elektrarne. Desni breg Save gorvodno od NE Krško bo v skladu z zahtevami tudi po izgradnji HE Brežice ostal 1 m nižji od levega brega, kar bo zagotavljalo večjo varnost levega brega. Na območju dolvodno od mostu v Krškem je obstoječi teren na koti 156,50 m.n.v. višji od gladine stoletne vode, zato bodo potrebna le lokalna nadvišanja terena za zaščito mesta Krško. Dolvodno od jezu poteka desni breg ravno tako 1 m nižje od krone levega nasipa, vendar bo v bodoče ta odsek že zgornji dela bazena Brežice, tako da bo od jezu naprej po desnem bregu potekal visokovodno-energetski nasip do hidroelektrarne. Na gorvodnem območju bo potekal visokovodni nasip dolžine 750 m in krono na koti 155,50 m.n.v.



### 2.3 Ukrepi za izboljšanje poplavne varnosti

Ukrepe, ki jih izvajamo za zaščito pred škodljivim delovanjem visokih voda, v osnovi delimo na tiste, s katerimi aktivno vplivamo na naravo pojava, ter na pasivne, s katerimi se samo ščitimo, ne spreminjamo pa samega pojava. Glede na način izvajanja ukrepov, poznamo vodnogospodarske ukrepe ter alternativne ukrepe brez gradnje novih objektov. Vse ureditve je potrebno obravnavati celovito ter preveriti skupni vpliv in posledice načrtovanih ureditev. Predvideti moramo tudi izravnalne ukrepe in nadomestne ureditve na okoliških površinah.

Zaradi lege NE Krško v zgornjem območju akumulacijskega bazena Brežice, kjer bodo vplivi pregrade bodoče hidroelektrarne ob visokih vodah zanemarljivi, bo poplavna varnost ostala nespremenjena. Pri načrtovanju bazena se posebno pozornost posveča ukrepom za prevajanje visokovodnega vala (bočni prelivni, zaščite brežin), ki ne smejo poslabšati poplavnih razmer tako na območju NE Krško, kot na poplavnem področju izven nasipov. Posegi na nekaterih naravovarstveno pomembnih površinah zahtevajo izvedbo obsežnih nadomestnih habitatov, mokrišč, vodnih površin in gozdov (Širca in sod., 2010).



*Slika 7: Vodno gospodarske ureditve na HE Blanca  
(<http://www.he-ss.si/> 13.2.2011)*

### 2.3.1 Vodnogospodarski posegi

Pri tovrstnih ukrepih je potrebno s pomočjo gradbenih ukrepov zagotoviti neškodljivo odvajanje izbranega visokovodnega pretoka, ki ga mora nato urejena struga prevajati brez škode za okoliška zemljišča. Če obstoječa hidravlična prevodnost struge ni zadostna, Mikoš (2007) navaja naslednje ureditvene in regulacijske ukrepe:

- Povečanje površine prečnega prereza z izkopi ali visokovodnimi nasipi
- Sprememba hidravličnega radija (hidravlično ugodnejši prerez)
- Sprememba hrapavosti brežin
- Povečanje vzdolžnega padca struge
- Gradnja zadrževalnikov visokih voda
- Lokalne preusmeritve visokih voda

Za načrtovanje posegov je potrebno natančno poznavanje hidroloških podatkov in hidravličnih razmer na povodju, saj v nasprotnem prihaja do neustreznega dimenzioniranja objektov. Pomembno je zagotoviti tudi varnostno nadvišanje brežin za primere obilnega plavja, pojava stoječih valov ali premeščanja plavin. Določitev ustrezne varnostne višine je odvisna od pomembnosti objekta in zahtevane stopnje varnosti na območju (Mikoš, 2007). V spodnji preglednici so podane nekatere priporočene vrednosti za nadvišanje brežin:

*Preglednica 2: Varnostno nadvišanje brežin  
(Mikoš, 2007)*

Vodotok	Varnostno nadvišanje (m)	
	brežine	premostitve
<b>Manjši vodotoki</b>	0,50	1,00
<b>reke</b>	0,50 – 1,00	1,00 – 1,50
<b>hudourniki</b>	1,50 – 2,00	-

### 2.3.2 Negradbeni ukrepi

V to področje spadajo ukrepi, ki ne zahtevajo gradnje hidrotehničnih objektov, temveč morajo biti usmerjeni k zmanjševanju potencialne škode ob pojavu visokih voda. Alternativni ukrepi zajemajo več vidikov zavarovanja pred poplavami. Brilly in sod. (1999) predlagajo naslednje dejavnosti in zaščitne ukrepe:

- Zakonski predpisi in upravni postopki, s katerimi poskušamo doseči urejanje poplavnih območij na način, da bo škoda minimalna
- Zavarovanje objektov pri zavarovalnicah
- Zaščitni ukrepi pri načrtovanju novih in rekonstrukciji starih ureditev
- Delovanje organiziranih služb za zaščito pred poplavami
- Spremembe namembnosti ali preseljevanje z ogroženih območij
- Vzpostavitev opozorilnega sistema in obveščanje prebivalstva
- Analiziranje ogroženosti posameznih lokacij

Mikoš in Steinman (1993) ugotavljata, da se pri nas za prerazporejanje voda še vedno največkrat gradi zadrževalnike in akumulacije, manjka pa sistematično ukrepanje za zagotavljanje razpršene retenzije, ki vpliva na hidrološki krog. Možne spremembe elementov hidrološkega sistema lahko dosežemo s povečanjem infiltracije padavin in časa zadrževanja vode v tleh, povečanjem zelenih površin v naseljih, upočasnitvijo površinskega odtoka ipd. Problematika slednjih ukrepov se nanaša predvsem na kvaliteto ponikajoče vode, vzdrževanje ureditev za razpršeno retenzijo, težavnost kontrole učinka ter razmerje med stroški in koristmi takih manjših in številnih ureditev, ki na prvi pogled ne kažejo koristnih učinkov.

## 2.4 Načrtovane ureditve

Zaradi dodatnih zahtev po zaščiti območja ter kasnejše izgradnje hidroelektrarne, se je določilo več različic poteka visokovodnih nasipov, ob hkratnem upoštevanju nadvišanja obstoječih nasipov in nadvišanja platoja NE Krško do ustrezne kote z upoštevanjem varnostnega nadvišanja, ki znaša 1,2 m. HE Brežice je objekt, ki bo z ustvarjeno zaježitvijo na predvideni koti 153,00 vplival na visokovodne razmere v širšem območju platoja .

Za poplavno varnost NE Krško bosta po izgradnji HE Brežice pomembni vprašanji poteka gladinskih krivulj ob visokih vodah ter pojava porušitvenih valov gorvodnih stopenj v primeru polnega bazena HE Brežice. Problem porušitvenih valov bistveno presega okvir te naloge in v tem delu ni zajet. Zaradi utemeljenih zahtev po povečani varnosti NEK je potrebno povečanje varnosti prehodnega dela levoobrežnega energetskega nasipa ter zalednega področja na višje pretoke reke Save.

### 2.4.1 Izboljšave za različne nivoje varovanja

Nuklearna elektrarna Krško je zaščiten pred poplavami z nasipi na levem bregu Save. Ti so projektirani tako, da tudi pri pretokih okoli 6500 m<sup>3</sup>/s (<http://www.ujv.gov.si/> 22.11.2010) ne bi prišlo do prelivanja in posledično poplavljanja elektrarne. Verjetno maksimalen pretok (PMF) naj bi bil teoretično največji možen pretok v primeru skrajno negativnega spleta okoliščin na povodju.

Brilly (2010) ugotavlja, da bi zaradi okoljskih sprememb ter novejših študij največji pretok lahko bil še večji, kot so to ocenjevali pri projektiranju objekta. Zato je potrebno nasipe povišati glede na nove hidrološke in hidravlične pogoje vzdolž obravnavanega odseka oziroma zgraditi nove, kjer je to potrebno. V tej nalogi je obravnavana zaščita območja pred stoletnimi vodami in verjetno maksimalnim pretokom, ki je določen za to področje.

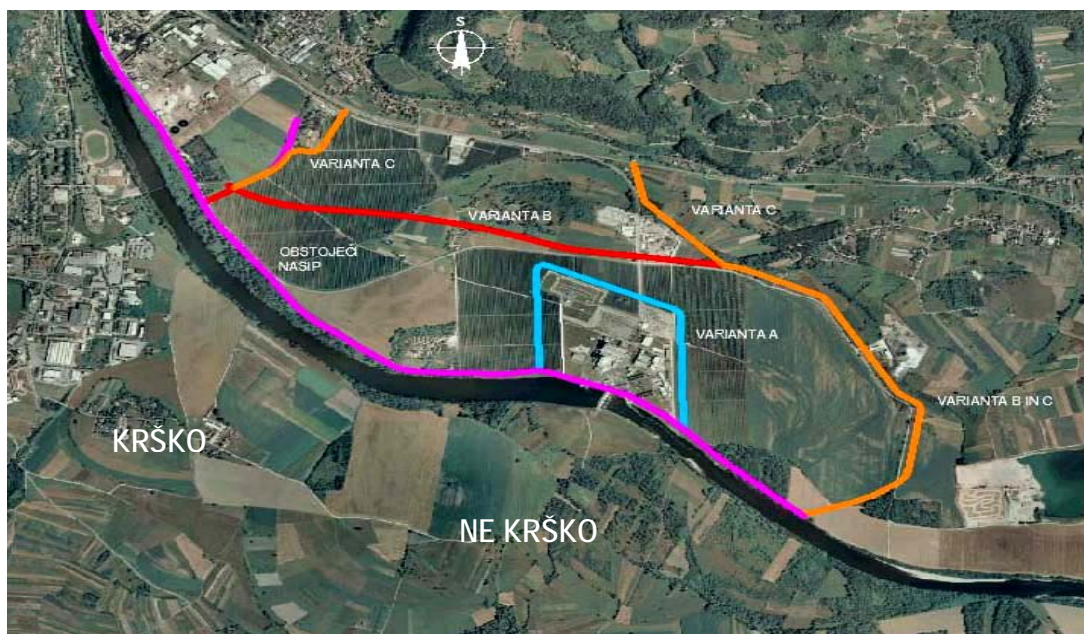
Tako je bilo za omenjene pretoke obravnavano sedanje stanje terena ter trije možni poteki bodočih visokovodnih nasipov. Ker je zahtevana varnost območja zelo visoka, je potrebno z novimi ureditvami zagotoviti, da območje platoja in zaledja NEK na levem bregu ne bo

preplavljeno ob pojavu verjetno maksimalnega pretoka, ki je bistveno večji od stoletne vode, ki običajno predstavlja merodajno vrednost za načrtovanje visokovodnih zaščit.

#### 2.4.2 Potek visokovodnih nasipov

V nalogi so bili predvideni trije možni poteki novih nasipov. Trasa A predvideva samo zaščito ožjega območja NE Krško, trasa B vključuje tudi zaščito širšega območja gorvodno in dolvodno od platoja nuklearne elektrarne, medtem ko varianta C izključuje celotno zaledno področje med levim bregom Save, pritokom Potočnico ter železniško progo Ljubljana-Zagreb. Potek desnoobrežnih visokovodnih nasipov ter energetskih nasipov akumulacijskega bazena HE Brežice v tej nalogi ni bil zajet, ker je bila le-ta osredotočena na določitev potrebnih zaščit za varovanje nuklearne elektrarne pred verjetno maksimalnim pretokom in preverbo obstoječega stanja pri tako visokih vodah.

Obravnavana levoobrežna zavarovanja omogočajo navezavo na ostale ureditve nove hidrelektarne v vseh treh primerih. Obstoječi levoobrežni visokovodni nasip je bil na dolvodnem koncu podaljšan do obravnavanih variant B in C v dolžini približno 500 m. Upoštevan je bil tudi obstoječi visokovodni nasip na levem bregu savskega pritoka Potočnice, ki se v profilu Save P105 v rečnem km 748.094 priključi na levoobrežni savski nasip.



Slika 8: Prikaz obravnavanih različic visokovodnih nasipov  
(avtor dipl. dela, 2011)

Različica nasipa A se začne 95 m gorvodno od platoja NE Krško v profilu P110 v km 746.202, nato poteka proti severu v dolžini 745 m, kjer se obrne proti jugozahodu in v tej smeri poteka ob območju nuklearne elektrarne v dolžini 619 m. Na obstoječi levoobrežni nasip ob Savi se ponovno priključi 80.0m dolvodno od platoja, v rečnem km 745.586. Skupna dolžina nasipa je 1854 m, površina območja znotraj nasipa pa znaša 0.34 km<sup>2</sup>.

Začetek trase nasipa B je ob obstoječem levoobrežnem nasipu na Potočnici. Nasip se 240 m gorvodno od sotočja Potočnice in Save obrne proti zahodu ter se v tej smeri nadaljuje približno 2.5 km, kjer se spet obrne proti strugi Save. Poteka ob obstoječi dovozni cesti do stare gramoznice. Zaključi se na levem bregu Save, 1 km dolvodno od praga NEK, v profilu P113 v rečnem km 744.852. Do tu je bil tudi podaljšan obstoječi levoobrežni savski nasip. Dolžina nasipa B je 4243 m, od tega predstavlja obstoječi nasip ob Potočnici 147 m. Področje znotraj nasipov je velikosti 2.25 km<sup>2</sup> in protipolavno štiti tudi lokacijo bodočega odlagališča NSRAO zahodno od območja NE Krško. Na gorvodni strani je pred poplavami zaščiteno področje med Potočnico in platojem nuklearne elektrarne veliko 0.87 km<sup>2</sup>.

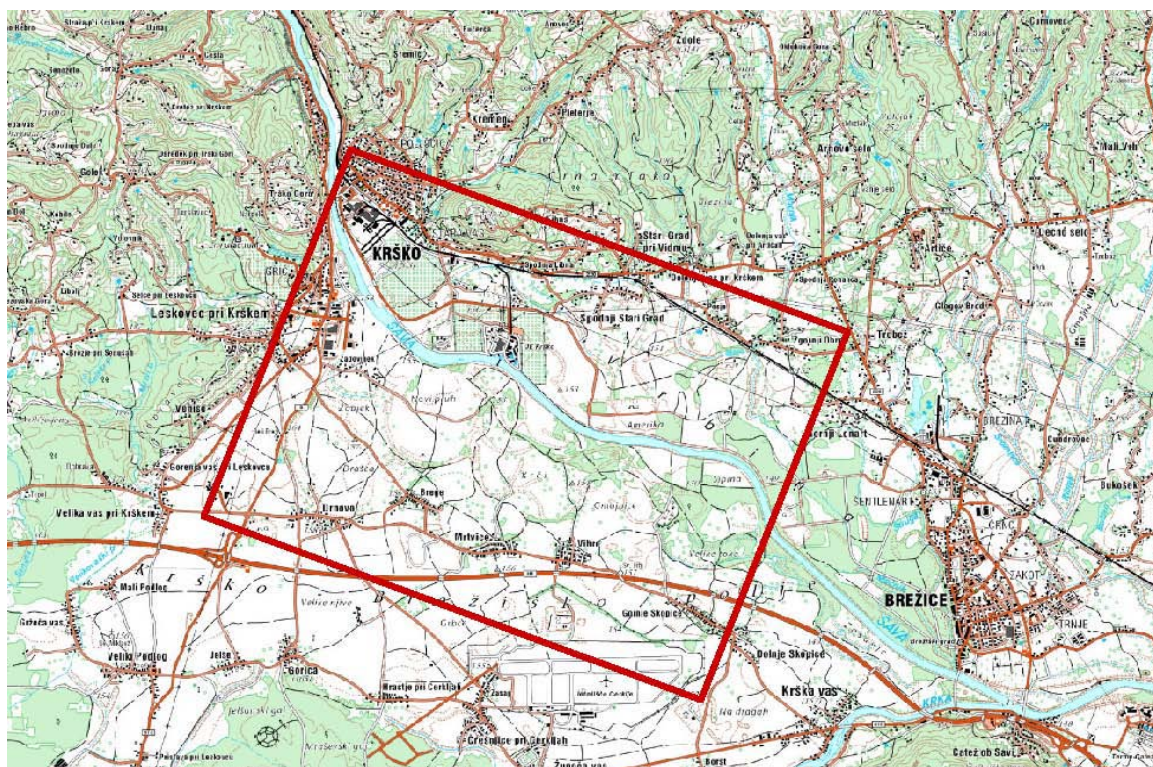
Varianta C predstavlja izključitev celotnega levega brega med Potočnico, železniško progo ter strugo Save od sotočja s Potočnico do profila P113 v km 744.852. Ta različica je sestavljena iz dveh ločenih nasipov. Gorvodni nasip poteka ob levem bregu Potočnice do železniške proge v dolžini 817 m, na dolvodni strani NEK pa poteka trasa kot pri varianti B, nato pa se nasip obrne severno proti železniški progi, medtem ko trasa B poteka proti vzhodu do Potočnice. Dolvodni nasip variante C je dolžine 2717 m in se priključi na levoobrežni savski nasip v profilu P113. Velikost zalednega področja, ki je varovano s to različico nasipa znaša 3.01 km<sup>2</sup>, skupna dolžina obeh nasipov pa 3534 m. Najdaljši potek nasipa je tako pri različici B, največje področje pa je protipoplavno zaščiteno pri trasi C.

Levoobrežni energetski nasip HE Brežice bo dolvodno navezan na obstoječi visokovodni nasip. Za energetski nasip je stopnja poplavne varnosti zelo velika, ker so v času visokih voda vse zapornice na jezcu odprte in je gladinska krivulja zelo podobna današnji naravni - zaradi praga, ki ga ustvarja jezu, je gladina nekoliko dvignjena le v spodnjem delu bazena. V tej nalogi niso bile upoštevane nove ureditve na desnem bregu, saj je bila naloga osredotočena na varovanje levega brega. Desnoobrežni energetski nasip bo potekal do predvidenega preliva na desnem bregu Save v km 746.512, ki bo odvajal visoke vode na poplavna področja v okolici.

### 3 RAČUN VISOKIH VOD Z 2D MATEMATIČNIM MODELOM

Na obravnavanem področju je teren zelo raznolik, s številnimi poplavnimi ravnici in različnimi prečnimi nakloni na poplavnih področjih. Zaradi narave toka po tako zapleteni geometriji terena je potrebno za račune uporabiti dvodimenzijski matematični model, saj za ugotavljanje hidravličnih razmer na zapletenem terenu ter načina prehoda visokovodnih valov preko obravnavanega območja enodimenzijski model ne zadostuje.

V ta namen je bil uporabljen dvodimenzijski (2D) računalniški program PCFLOW2D, ki je bil razvit na Katedri za mehaniko tekočin Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani. S pomočjo rezultatov matematičnega modela je bila ocenjena poplavna ogroženost objektov za sedanje stanje terena ter podane smernice za načrtovanje novih ureditev za zaščito širšega področja NE Krško. Na spodnji sliki sta prikazana obseg ter lega 2D matematičnega modela, ki je bil uporabljen za obravnavano območje.



Slika 9: Obseg 2D matematičnega modela na obravnavanem območju (avtor dipl. dela, 2011)

### 3.1 Osnovni podatki

Za postavitev matematičnega računskega modela je bilo potrebno pridobiti podatke o topografiji terena in geometriji objektov, potekih načrtovanih nasipov, vrednostih karakterističnih pretokov za obravnavane nivoje varovanja ter o preteklih hidroloških in hidravličnih študijah na tem območju. Nekatere podatke je posredoval projektant HE Brežice, nekateri pa so bili že uporabljeni v preteklih študijah, ki so bile narejene s pomočjo programa PCFLOW2D na Katedri za mehaniko tekočin.

#### 3.1.1 Hidrološki podatki

Hidrološki podatki za povodje Save na tem odseku so dokaj nezanesljivi. Zaradi določenih nejasnosti, ki so še predmet razprave v strokovnih krogih, se uradne vrednosti značilnih pretokov še vedno spreminjajo. Razlog so pomanjkljivi podatki o visokovodnih pretokih na vodomernih postajah v obravnavanem vodozbirnem področju.

Vrednosti pretokov določenih povratnih dob, ki so bile uporabljene v modelu so bile privzete iz uradne hidrološke študije za to območje (»Hidrološka študija Save na odseku HE Boštanj, HE Blanca, HE Krško, HE Brežice in HE Mokrice«, IZV, 2002). Vrednost maksimalno verjetnega pretoka v obravnavanem profilu pa je bila povzeta iz študije »Preparation of new revision of PMF study and conceptual design package for flood protection of NPP Krško«, izdelane leta 2010 na Katedri za splošno hidrotehniko Fakultete za gradbeništvo Univerze v Ljubljani. Za preverbo varnosti nuklearne elektrarne in uporabo pri načrtovanju visokovodnih nasipov se je tako za obravnavani prerez uporabilo sledeče vrednosti maksimalnih pretokov:

- za pretok s povratno dobo 100 let:  $Q_{100} = 3290 \text{ m}^3/\text{s}$
- maksimalno verjetni pretok (PMF) za Savo:  $Q_{\text{PMF}} = 7081 \text{ m}^3/\text{s}$

Za umerjanje 2D matematičnega modela območja sta bila uporabljena pretoka, ki sta bila zabeležena ob poplavah leta 1990 in 1998. Po poplavah je bilo ocenjeno, da sta pretoka v času poplav znašala  $Q = 3240 \text{ m}^3/\text{s}$  leta 1990 ter  $Q = 3200 \text{ m}^3/\text{s}$  leta 1998. Vrednosti pretokov sta zelo podobni, zato se je pri umerjanju upošteval kot merodajni pretok  $Q = 3240 \text{ m}^3/\text{s}$ .



Po uradni hidrološki študiji (IZV, 2002) je bil pretok visoke vode leta 1990 v profilu NEK 3050 m<sup>3</sup>/s, leta 1998 pa 3001 m<sup>3</sup>/s. Zaradi majhne razlike med vrednostmi pretokov, se je pri umerjanju po tej uradni študiji upoštevalo samo vrednost 3050 m<sup>3</sup>/s (Četina in Krzyk, 2005). Najnovejša določitev pretoka je bila izvedena s pomočjo fizičnega modela. Tako je bila za leto 1990 določena vrednost pretoka 4000 m<sup>3</sup>/s (Hidroinštitut, 2008). Zaradi časovnega zamika z diplomsko nalogo, v delu ni upoštevana za umerjanje, čeprav se uporablja kot uradna vrednost za dimenzioniranje objektov HE Brežice.

### 3.1.2 Geometrijski model območja

Za postavitev dvodimenzionalnega matematičnega modela obravnavanega območja so bili uporabljeni geodetski podatki, ki jih je posredoval projektant bodočih ureditev ter podatki privzeti iz starejših študij. Potrebno je bilo pripraviti digitalni model terena območja, ki je podloga za matematični model. Uporabljeni so bili naslednji geodetski podatki:

- obstoječi in obravnavani visokovodni nasipi ter njihove geometrijske značilnosti
- načrtovane ureditve akumulacijskega bazena HE Brežice
- ortofoto posnetek obravnavanega območja
- geodetski posnetek širšega dela terena obravnavanega območja akumulacije HE Brežice v digitalni obliki, pridobljen s pomočjo tehnike LIDAR z gostoto 1 x 1 m, 2 x 2 m, 5 x 5 m in 10 x 10 m
- vektorski prikaz situacije obravnavanega območja HE Brežice (merilo 1:1000)
- rastrska topografska karta 1:5000 širšega dela terena obravnavanega območja akumulacije HE Brežice v digitalni obliki
- geodetski tridimenzionalni posnetek terena na levem bregu reke Save gorvodnega območja od NEK (merilo 1:1000)
- računski prečni profili struge reke Save, ki so bili pripravljene za enodimenzijske izračune matematičnega modela HEC-RAS za obravnavano območje

Glede na privzeto gostoto numerične mreže dvodimenzionalnega matematičnega modela z velikostjo računskih celic 20 x 20 m je uporabljena gostota 5 x 5 m, posneta s pomočjo tehnike LIDAR, dovolj natančna. Na območjih, kjer je bilo potrebno zagotoviti večjo natančnost geodetskega posnetka, kot so visokovodni in cestni nasipi, protipoplavni zaščitni zidovi in podobno, so bili potrebni podatki o kotah terena privzeti iz posnetkov večje gostote.



*Slika 10: Začetek obravnavanega odseka v Krškem  
(Četina in Krzyk, 2005)*

S pomočjo programske opreme QuickSurf in pripravljenih geodetskih podlag, je bila narejena interpolacija točk na osnovi trikotnih elementov in s tem postavljen digitalni model terena, ki je bil nato uporabljen pri avtomatskem generiranju višinskih kot terena za razmeroma gosto enakomerno numerično mrežo ( $\Delta x = \Delta y = 20,0$  m). Numerična mreža je imela 323 točk v podolžni smeri y in 249 točk v prečni smeri x.

Na osnovi podatkov o položaju in koti preliva jezusa NE Krško, je bila določena ustrezna kota točk numerične mreže, ki sovpadajo z jezom ter dodatno preverjene in korigirane točke, ki predstavljajo strugo Potočnice ter visokovodne nasipe. To je potrebno narediti zaradi premajhne gostote numerične mreže, ki presega širino jezusa (7,0 m), širino struge Potočnice (4,0 m) ter krone nasipov (4,0 m).

Zaradi navedenih lastnosti bi z avtomatičnim določanjem višine točk numerične mreže dobili neustrezne geometrijske podatke za hidrodinamični matematični model. Omenjeno nesovpadanje med dejanskimi dimenzijami objektov in velikostjo računskih celic se pri računalniškem prikazu terena ponekod pojavlja kot navidezno žagasta oblika posameznih objektov (npr. nasipov). Za pravilno ponazoritev funkcije nasipa je dovolj določiti višinski podatek računskim točkam pravokotnih celic tako, da se med seboj navezujejeo vsaj na stičnih vogalih, ni pa nujno vzdolž skupnih stranic (Četina in Krzyk, 2005).

Matematični model obravnavanega območja je tako dolg 6440 m in širok 4960 m. Začetek modela je 280 m dolvodno od mostu čez Savo v Krškem, v savskem profilu P103, konec pa 4070 m dolvodno od jezua NEK, v profilu P120 v rečnem km 741.842. Model obsega področje v velikosti 31,94 km<sup>2</sup>. Vse variante nasipov so bile dvignjene do take kote, da je bilo onemogočeno prelivanje le-teh za pretok  $Q_{PMF}$ . Na ta način so bile določene kote, ki so potrebne, da ne pride do prelivanja nasipov. Pregledna situacija območja in uporabljena numerična mreža 2D matematičnega modela z orientacijami osi  $x$  in  $y$ , ter lega prečnih profilov struge Save na obravnavanem odseku je prikazana v prilogi A1.

### 3.1.3 Hidravlični podatki

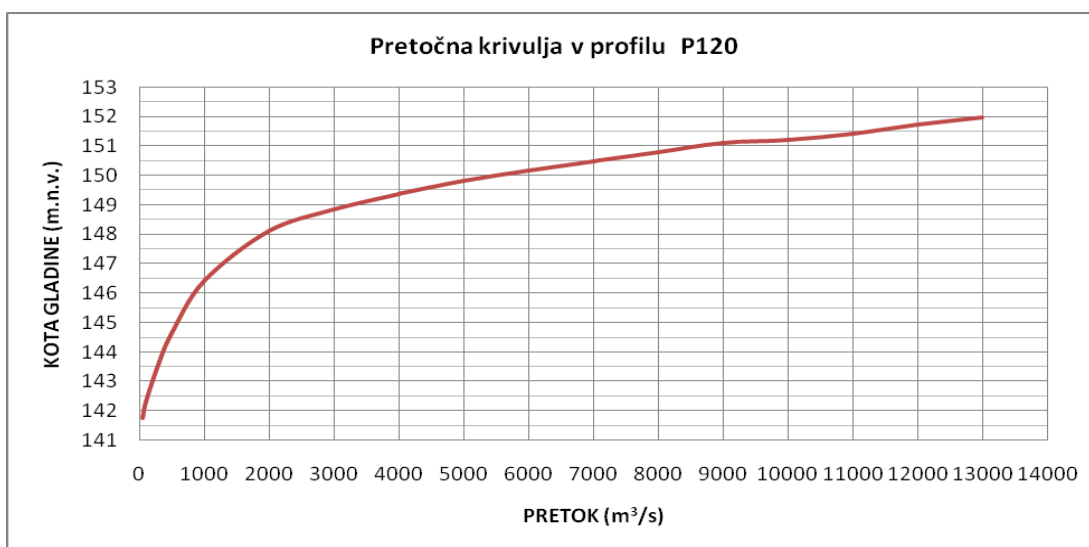
Rezultati hidravličnega izračuna z enodimezionalnim modelom so služili kot pomoč pri 2D modeliranju odseka Save. Pretočna krivulja na spodnjem robu matematičnega modela v profilu P120, dobljena z 1D izračunom, je bila uporabljena kot dolvodni robni pogoji v 2D modelu. Enodimenzijski hidravlični izračun je potekal s programom HEC-RAS, uporabljen je bil geometrijski model področja, ki ga je pripravil projektant novih ureditev. Nekateri hidravlični podatki so bili privzeti iz obstoječe študije o poplavni varnosti NEK (Četina in Krzyk, 2005). Enodimenzijski model zajema odsek med profiloma P102 in P127i, ki se nahaja 1,2 km gorvodno od sotočja Save in Krke. Računan je bil stalni tok s prosto gladino v mirnem režimu, pri čemer se je za dolvodni robni pogoj upošteval povprečni padec dna struge reke Save na tem odseku, ki znaša 0.1%. Izračuni so bili opravljeni za vrednosti pretokov od 50 m<sup>3</sup>/s do 13000 m<sup>3</sup>/s. S spreminjanjem kot gladin kot dolvodnega robnega pogoja v profilu P127i, se je ugotavljalo še vpliv dolvodnega robnega pogoja na gladine Save v profilu P120.

Kot je razvidno iz preglednice 3, vpliv pri pretoku reke Save  $7000 \text{ m}^3/\text{s}$ , kmalu precej izvedeni, zato je bilo upravičeno skrajšati 2D model samo do profila P120.

*Preglednica 3: Vpliv različnih robnih pogojev na gladino Save v profilu P120 (avtor dipl. dela, 2010)*

<b>Robni pogoj gladina v profilu P127i</b>	<b>gladina (<math>Q = 7000 \text{ m}^3/\text{s}</math>) v profilu P120</b>
<b>148,00</b>	150,45
<b>148,50</b>	150,47
<b>149,00</b>	150,56
<b>149,50</b>	150,69
<b>150,00</b>	150,87

Tako je bila določena pretočna krivulja v profilu P120 za sedanje stanje terena, z upoštevanjem normalnega toka pri padcu dna struge  $I = 0.001$  na dolvodnem robu. Pretočna krivulja, dobljena z 1D hidravličnim modelom, ki je bila uporabljena v profilu P120 kot dolvodni robni pogoj v 2D matematičnem modelu, je prikazana na sliki 11:



*Slika 11: Pretočna krivulja v profilu P120, uporabljena za dolvodni robni pogoj (avtor dipl. dela, 2010)*

V spodnji preglednici 4 so kot rezultat 1D modeliranja vodnega toka s prosto gladino s programom HEC-RAS še v številčni obloki prikazane dobljene kote gladin v profilu P120.

*Preglednica 4: Kote gladin v profilu P120, dobljene z 1D hidravličnim modelom (avtor dipl. dela, 2010)*

<b>Pretok (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Kota gladine (m.n.v.)</b>
<b>50</b>	141,74
<b>100</b>	142,31
<b>300</b>	143,68
<b>500</b>	144,63
<b>1000</b>	146,41
<b>2000</b>	148,10
<b>3000</b>	148,84
<b>4000</b>	149,37
<b>4040</b>	149,39
<b>5000</b>	149,82
<b>6000</b>	150,16
<b>7000</b>	150,48
<b>7081</b>	150,51
<b>8000</b>	150,79
<b>9000</b>	151,11
<b>10000</b>	151,19
<b>11000</b>	151,42
<b>12000</b>	151,73
<b>13000</b>	151,98

### 3.2 2D matematični model

Tok vode s prosto gladino se največkrat rešuje ali z matematičnimi ali s fizičnimi modeli. V zadnjem času se pojavljajo tudi tako imenovani hibridni modeli, ki združujejo fizični in matematični model skupaj, saj je prednost fizičnih modelov v tem, da je z njimi možno obravnavati trodimenzionalne tokove z vsemi detajli vsled kompleksnih geometrijskih lastnosti robov. Ker pa narava toka dostikrat dopušča določene poenostavitve (obravnavanje toka samo v eni ali dveh dimenzijah), je možno tok vode v takšnih primerih enostavneje modelirati z matematično obravnavo, saj so matematični modeli bistveno cenejši od fizičnih.

Večina tokov v rekah ali jezerih je turbulentnih, zato je njihovo poznavanje osnova za učinkovito projektiranje hidrotehničnih objektov. Uporaba dvodimezionalnega matematičnega modela toka vode s prosto gladino z uporabo verzije  $k$ - $\varepsilon$  modela turbulence je bil v našem primeru nujen, saj 1D hidravlični model zaradi zapletene geometrije terena na obravnavanem območju ne bi zadostoval. V rekah prihaja zaradi trenja ob dno tudi do intenzivnega mešanja vode v navpični smeri, zato je bil uporabljen globinsko povprečni model toka.

#### 3.2.1 Osnovne enačbe izračuna

V matematičnem modelu PCFLOW2D je uporabljen kartezični koordinatni sistem. Kontinuiteta je opisana z enačbo (1), dinamični enačbi (2) in (3), ki opisujeta dvodimenzionalni nestalni globinsko povprečni tok, pa sta podani v konservativni obliki. Zadnja dva člena na desnih straneh enačb izražata vpliv turbulentne viskoznosti, ki jo lahko določimo s pomočjo znanega  $k$  -  $\varepsilon$  modela turbulence. Zato sta potrebni dve dodatni transportni enačbi (enačbi 4 in 5) za turbulentno kinetično energijo na enoto mase  $k$  ter stopnjo njene disipacije  $\varepsilon$  (Četina, 1988):

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

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

$$\frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{(huv)}{\partial x} + \frac{\partial(hv^2)}{\partial y} = -gh \frac{\partial h}{\partial y} - gh \frac{\partial z_b}{\partial y} - ghn^2 \frac{v\sqrt{u^2+v^2}}{h^{7/3}} + \frac{\partial}{\partial x} (h v_{ef} \frac{\partial v}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (h v_{ef} \frac{\partial v}{\partial y}) \quad (3)$$

$$\frac{\partial(hk)}{\partial t} + \frac{(huk)}{\partial x} + \frac{\partial(hvk)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} (h \frac{v_{ef}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (h \frac{v_{ef}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial y}) + hG - c_D h \varepsilon + hP_{kv} \quad (4)$$

$$\frac{(hu\varepsilon)}{\partial x} + \frac{\partial(hv\varepsilon)}{\partial y} + \frac{\partial(h\varepsilon)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (h \frac{v_{ef}}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (h \frac{v_{ef}}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial y}) + c_1 \frac{\varepsilon}{k} hG - c_2 \frac{\varepsilon^2}{k} h + hP_{\varepsilon v} \quad (5)$$

kjer je:

- $t$  .....čas
- $h$  ..... globina vode
- $u$  in  $v$  ...komponenti hitrosti v  $x$  in  $y$  smeri
- $Z_b$  .....kota dna
- $n$  .....koeficient hrapavosti po Manningu
- $g$  .....gravitacijski pospešek
- $v_{ef}$  .....efektivni koeficient viskoznosti
- $k$  .....turbulentna kinetična energija na enoto mase
- $\varepsilon$  .....stopnja disipacije turbulentne kinetične energije na enoto mase

Izrazi za  $G$  (produkcija  $k$  zaradi horizontalnih gradientov hitrosti),  $P_{kv}$  in  $P_{\varepsilon v}$  (izvorna člena zaradi trenja ob dno) kakor tudi vrednosti standardnih turbulentnih konstant ( $c_D$ ,  $c_\mu$ ,  $G_1$ ,  $G_2$ ,  $\sigma_k$  in  $\sigma_\varepsilon$ ) so podani v literaturi (Četina, 1988).

V primeru preračunov toka na območju NE Krško, je bilo potrebno izvesti veliko izračunov. Le-ti so zelo dolgotrajni, saj je razmerje med realnim časom poteka visokovodnega vala ter potrebnim računskim časom za posamezen primer 1:5. Zaradi numerične zahtevnosti, goste računske mreže ter kratkega časovnega koraka, je bilo za simulacijo prehoda celotnega vala preko odseka potrebnih več dni računalniškega časa za posamezen obravnavani primer.

Zaradi prihranka časa za določitev koeficienta efektivne viskoznosti  $\nu_{ef}$  niso uporabljene dodatne enačbe (4) in (5), ampak je upoštevana konstantna vrednost  $\nu_{ef}$  preko celotnega obravnavanega področja. Pri tej predpostavki velja, glede na raziskave in izkušnje, da pri toku s prosto gladino v razmerah nestalnega toka z razmeroma naglimi spremembami pretokov in gladin  $\nu_{ef}$  ne vpliva pomembno na rezultate. Poleg tega je ugotovljeno, da so rezultati pri toku v rekah brez izrazitih recirkulacijskih področij, kakršno je tudi obravnavano območje reke Save, razmeroma dobri tudi z uporabo konstantne vrednosti efektivne viskoznosti, če je le-ta realno ocenjena (Četina, 1988).

Pri preračunih toka Save je v vseh primerih uporabljena vrednost  $\nu_{ef} = 0,01 \text{ m}^2/\text{s}$ , ki je določena kot povprečna vrednost rezultatov stalnega toka s  $k - \varepsilon$  modelom pri toku Savinje v Laškem (Četina in Krzyk, 2002) in toka Soče v območju HE Plave (Četina in Krzyk, 2001). Izbrana konstantna vrednost koeficienta efektivne viskoznosti  $\nu_{ef} = 0,01 \text{ m}^2/\text{s}$  se je izkazala za ustrezno tudi pri obravnavi podobnega hidrodinamičnega problema toka Malega Grabna v Ljubljani (Četina in Krzyk, 2004) in pri že izvršenih računih toka Save v območju jezua NE Krško za oceno njene poplavne varnosti (Četina in Krzyk, 2005).

### 3.2.2 Postopek reševanja z računalniškim programom

Povezan sistem parcialnih diferencialnih enačb (1) - (3) se rešuje s pomočjo Patankar-Spaldingove metode končnih volumnov, ki je skupaj z uporabljenim računalniškim programom PCFLOW2D, razvitim na Katedri za mehaniko tekočin UL FGG, opisana v literaturi (Četina, 1988). Osnovne značilnosti metode so premaknjena numerična mreža, hibridna shema (kombinacija centralnodiferenčne in sheme gorvodnih razlik) ter iterativni postopek popravkov globin, znan kot SIMPLE. Za integracijo po času je uporabljena polna



implicitna shema, ki je stabilna in dovolj točna tudi pri daljših časovnih korakih in relativno visokih Courantovih številih.

Pri vseh izračunih z modelom PCFLOW2D je bil privzet časovni korak  $\Delta t = 10$  s. Kot kriterij konvergence je bilo najprej privzeto, da mora biti v vsakem časovnem koraku vsota napak v vseh točkah računske mreže manjša od 1 % trenutnega vtoka v področje. Pri tem se je pokazalo, da bi bilo zaradi zelo goste računske mreže z 80427 točkami v vsakem časovnem koraku potrebnih veliko število iteracij, kar bi nerazumno podaljšalo računske čase. Zato je bilo število iteracij omejeno na največ 60 na časovni korak ter z analizo občutljivosti modela ugotovljeno, da napaka pri računu volumnov večinoma ni presegla 2 %. Računi so bili še vedno dolgotrajni, saj je en hidrodinamični izračun na razmeroma hitrem PC računalniku, upošteva potreben čas 20 ur do popolne vzpostavitve stalnega toka, trajal več dni.

### 3.2.3 Uporabljeni začetni in robni pogoji modela

Kot robni pogoj ob bregovih obravnavanega območja je upoštevano, da so hitrosti v prečni smeri na tok enake 0. Za vzdolžne hitrosti pa je uporabljen preprost pogoj "drsnih vrednosti", torej da je gradient vzdolžnih hitrosti v prečni smeri enak 0. Z neupoštevanjem običajnega logaritmskega stenskega zakona (kot je uporabljen npr. pri  $k - \epsilon$  modelu) ne naredimo večje napake, saj ima pri obravnavanem pojavu v robnih celicah prevladujoč vpliv trenje ob dno (Četina in Krzyk, 2005).

Na dolvodnem robu matematičnega modela je bila upoštevana pretočna krivulja  $z = z(Q)$ , dobljena na osnovi enodimenzijskih izračunov s programom HEC-RAS. Pri tem je kota gladine  $z$  v vsakem računskem koraku določena samo v eni celici na spodnjem robu, približno v osi struge. Kote gladine v ostalih točkah na robu modela izračuna program sam. Na odprtih stranskih robovih računskega področja pa je upoštevano, da so gradienti  $h$ ,  $u$  in  $v$  pravokotno na rob enaki 0.

Na vtoku v model pa je podan hidrogram ustreznih visokovodnih valov. Vsi računski primeri za stalni tok so obravnavani kot nestalni tok, kjer se računski pretok doseže v 15 minutah in se tekom računa obdrži njegova konstantna vrednost, dokler se razmere ne ustalijo (na območju

akumulacije Brežice se to zgodi po že omenjenih približno 20 urah). V vtočnem profilu je upoštevana enakomerna porazdelitev hitrosti po prerezu, potek gladin v prečni smeri pa izračuna program sam.

### 3.3 Umerjanje računskega modela

Umerjanje matematičnega modela je potekalo v smislu določanja ustreznih vrednosti Manning-ovega koeficienta hrapavosti za strugo Save ter za poplavna področja. 2D model je bil umerjen predvsem na osnovi primerjave rezultatov z merjenimi kotami sledov gladine pri visokih vodah novembra 1990 in novembra 1998 ter ocenjenih pretokov reke Save na področju NE Krško. Ocena vrednosti pretokov visokih voda, pri katerih so bile zabeležene sledi na terenu pa je nekoliko negotova, zato je bilo pri umerjanju upoštevanih več vrednosti pretokov. Na ta način se poskuša zajeti možna odstopanja od resničnega pretoka in upoštevati vse ocenjene in določene vrednosti pretokov, da bi se čimbolj izognili možnim napakam pri določanju koeficienta hrapavosti.

Za umerjanje 2D matematičnega modela območja sta bila uporabljena pretoka, ki sta bila zabeležena ob poplavah leta 1990 in 1998. Tako sta se pri umerjanju kot merodajna upoštevala pretoka  $Q = 3050 \text{ m}^3/\text{s}$  ter  $Q = 3240 \text{ m}^3/\text{s}$ . Privzete vrednosti so bile natančneje opisane v poglavju o hidroloških podatkih. Koeficient hrapavosti za obravnavano območje je bil izbran z upoštevanjem naslednjih dejavnikov (Četina in Krzyk, 2005):

- ocene koeficienta hrapavosti na osnovi detajlnejšega terenskega ogleda, dosedanjih izkušenj Katedre za mehaniko tekočin z laboratorijem (KMTe) Fakultete za gradbeništvo in geodezijo ter vrednosti, ki so priporočene v literaturi
- primerjave rezultatov dvodimenzijskih izračunov z izračunanimi kotami enodimenzijskih modelov (kote gladin v profilu P120 so prikazane na sliki 11)
- primerjave izračunanih kot gladine vode z merjenimi vrednostmi in fotografsko zabeleženim stanjem obsega poplav na dan poplave leta 1998 (slika 12) in 1990



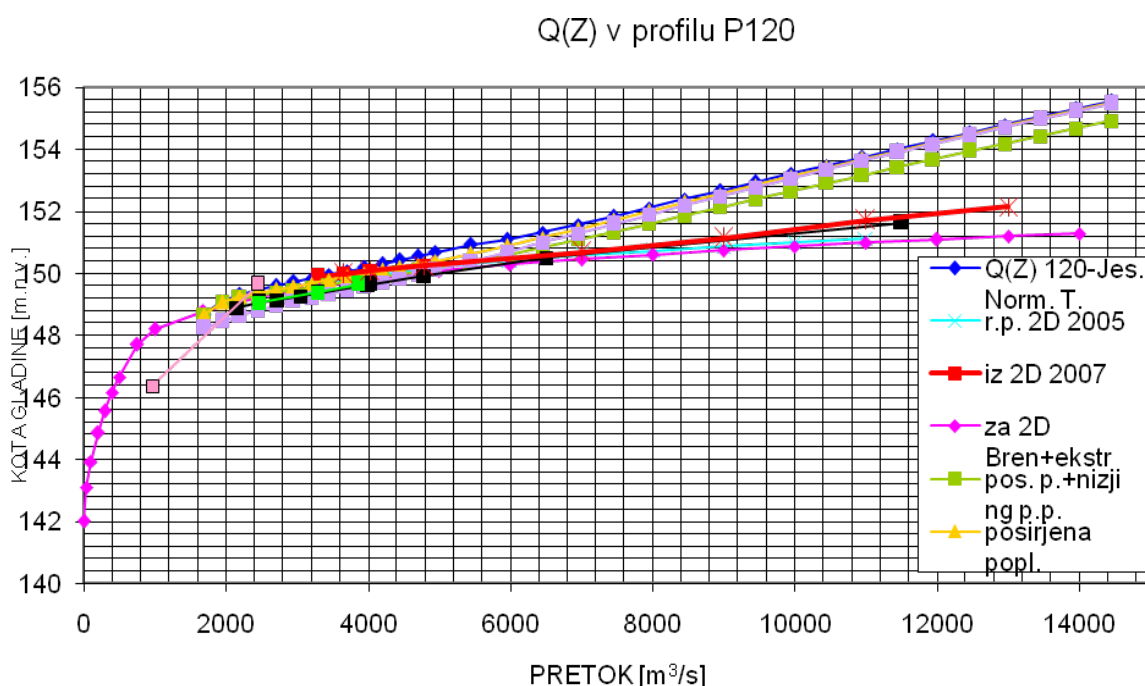
Slika 12: Poplavljenno območje v okolici Starega Gradu novembra leta 1998  
(Četina in Krzyk, 2005)

Z umerjanjem modela so bili za obravnavano območje NEK izbrani koeficienti hrapavosti, ki so navedeni tudi v spodnji preglednici. Za strugo Save je bil določen  $n = 0,030 \text{ sm}^{-1/3}$  ter za poplavna področja  $n = 0,044 \text{ sm}^{-1/3}$ . S temi koeficienti hrapavosti je bilo doseženo najboljše ujemanje med izračunanimi in izmerjenimi vrednostmi gladin na obravnavanem odseku.

Preglednica 5: Umerjene vrednosti Manning-ovega koeficienta hrapavosti  
(Četina in Krzyk, 2005)

Pretok [m <sup>3</sup> /s]	Manningov koeficient	
	hrapavosti $n$	
	struga	poplavno področje
<b>Q<sub>um</sub> = 3050</b>	0,030	0,044
<b>Q<sub>um</sub> = 3240</b>	0,030	0,044
<b>Q<sub>100</sub> = 3290</b>	0,030	0,044
<b>Q<sub>PMF</sub> = 7081</b>	0,030	0,044

Umerjeni koeficienti hrapavosti, uporabljeni v 2D modelu, so nekoliko manjši od tistih, ki so bili uporabljeni v izračunih z 1D hidravličnim modelom s programom HEC-RAS. V tem modelu so bile uporabljene vrednosti od  $n = 0,032 \text{ sm}^{-1/3}$  do  $n = 0,035 \text{ sm}^{-1/3}$  za strugo ter  $n = 0,080 \text{ sm}^{-1/3}$  do  $n = 0,100 \text{ sm}^{-1/3}$  za poplavna področja. Ker so v 2D modelu podani natančni geometrijski podatki na poplavnih področjih, je razlika skladna s predvidevanji in dosedanjimi izkušnjami, saj so mnoge ovire na poplavnih področjih v 1D modelu zajete z višjim koeficientom hrapavosti, v 2D modelu pa z dejansko podano geometrijo.



Slika 13: Gladine v profilu P120, dobljene v predhodnih študijah za to območje (KMTe, 2010)

Tekom umerjanja modela je bilo upoštevano sedanje stanje terena. Aksonometrična slika terena obravnavanega območja, narejena s pomočjo digitalnega modela terena, je prikazana v prilogi A2. Zaradi že omenjenih težav pri določanju dejanskega pretoka pri poplavah leta 1990 in 1998 sta bili v študiji poplavne varnosti NEK (Četina in Krzyk, 2005) upoštevani uradni vrednosti pretoka v profilu NE Krško ( $Q = 3050 \text{ m}^3/\text{s}$ ) ter popravljena vrednost FGG z vrednostjo  $Q = 3240 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Rezultati izračunov končnega umerjanja so skupaj z vrisanimi meritvami iz leta 1990 prikazani na vzdolžnem profilu v prilogi A5. Iz vzdolžnega profila obravnavanega odseka na območju NE Krško je razvidno, da je model zadovoljivo umerjen, saj so odstopanja med izračunanimi gladinami pri umeritvenih pretokih in izmerjenimi vrednostmi razmeroma majhna in odstopajo približno 0,3 m pod in nad meritvami, ponekod na dolvodnem odseku pa največ za 0,5 m.

Ker med strokovnjaki za ta dolvodni del še vedno ni povsem enotnega mnenja, kolikšen je bil leta 1990 dejanski pretok, so bili preverjeni še 1D izračuni za pretok  $Q = 3210 \text{ m}^3/\text{s}$ , ki je bil v študiji Zakrajšek in Krzyk (1997) glede na takratne podatke uporabljen kot umeritveni pretok, saj je ujemanje izmerjenih vrednosti leta 1990 z 1D izračuni precej dobro. Takrat dobljeni koeficienti hrapavosti so bili uporabljeni tudi kot osnova za umerjanje 2D modela v okviru te študije. Rezultatov najnovejših analiz s hibridnimi hidravličnimi modeli, zaradi delovnega značaja ter nezaključenosti v času izdelave diplomske naloge žal ni bilo mogoče upoštevati.

### **3.3.1 Rezultati in njihova točnost**

Natančnost rezultatov uporabljenega 2D matematičnega modela je glede na to, da je bil obravnavan tok v dveh dimenzijah, precej dobra. Pri razmeroma točnih vhodnih hidroloških, hidravličnih in geometrijskih podatkih je ocenjeno, da je natančnost uporabljenega modela na obravnavanem odseku toka reke Save pri stoletnem pretoku  $Q_{100}$  v mejah  $\pm 0,1$  m. To je tudi natančnost, s katero se lahko ugotavlja vplive relativnih sprememb gladine v strugi Save in na poplavnem področju zaradi različnih ukrepov na varovalnih objektih (nasipi, zidovi) glede na obstoječe začetno stanje (Četina in Krzyk, 2005).

Ker je bil za izračune uporabljen dvodimenzijski matematični model, bi za še natančnejše umerjanje, potrebovali za vrednosti izmerjenih sledov visoke vode poleg s stacionažo določenega položaja še situativno točno določen položaj. Tako bi lažje ločili vpliv energijske višine pri meritvah v strugi ali na poplavnem področju. Poleg tega čas meritev položaja sledov visoke vode na objektih ni poznan, kar vključuje možno napako pri dejanskem določanju kote gladine v primerjavi s sledmi, ki se na posameznih objektih s časom spreminjajo.

## 4 REZULTATI HIDRAVLIČNIH IZRAČUNOV

Izračuni z dvodimenzionalnim modelom so bili izvedeni za sedanje stanje terena ter za vse obravnavane različice varovanja območja NE Krško s protipoplavnimi nasipi pri vrednostih pretokov od 3050 m<sup>3</sup>/s do 13000 m<sup>3</sup>/s. Z 1D hidravličnim modelom je bilo obravnavano le sedanje stanje terena. V tej nalogi so zajeti rezultati izračuna za umeritveni pretok, stoletni pretok ter maksimalno verjetni pretok. Izračuni za ostale vrednosti pretokov so bili uporabljeni le za določitev pretočnih krivulj v posameznih prečnih profilih struge Save. Ker so bili z 2D modelom obravnavani le visokovodni pretoki, so bili pri določitvi pretočnih krivulj za manjše vrednosti pretokov privzeti rezultati izračunani z 1D modelom. Zaradi tega, so pretočne krivulje v območju od 2000 m<sup>3</sup>/s do 3000 m<sup>3</sup>/s nekoliko prelomljene. V razdelilniku pretoka je v območju struge zajeta osnovna struga, medtem ko je levoobrežno poplavno območje med visokovodnim nasipom in brežino zajeto v pretoku po levem bregu.

### 4.1 Pregled izvedenih izračunov

V nadaljevanju so predstavljeni rezultati izračunanih kot gladin ter porazdelitve pretokov med strugo in poplavnimi področji za obravnavane primere. Dobljena hitrostna polja, plastnice globin ter aksonometrične slike območja so predstavljeni v grafičnih prilogah. Grafični izris rezultatov je potekal s pomočjo vmesnih računalniških programov, ki izrišejo polja hitrosti, plastnice globin ter prečne profile. Vzdolžni profil po osi struge je bil izrisan s pomočjo programa AutoCad Civil 3D, v katerem se je iz podatkov o kotah gladin v točkah računske mreže formiral digitalni model terena ter nato po osi struge dobil vzdolžni potek gladin na računskem odseku.

Kote gladin v osi struge Save v obravnavanih prečnih profilih od P102 do P120 za sedanje stanje terena so prikazane za izračune z 1D modelom in 2D matematičnim modelom, izračuni za načrtovane nasipe pa so bili opravljeni samo z dvodimenzionalnim modelom. Izračunane kote gladin so bile nato uporabljene za oceno potrebne višine visokovodnih nasipov za varovanje območja pred  $Q_{PMF}$ . Predstavljeni rezultati se nanašajo samo na varovanje območja NE Krško pred visokimi vodami, saj novi prelivni in energetski nasipi bazena HE Brežice v tej

nalogi niso bili zajeti. Zato bi v nadaljnjih študijah morali preveriti tudi celotno projektirano stanje z vključitvijo vseh bodočih ureditev.

*Preglednica 6: Izvedeni izračuni z 2D matematičnim modelom (avtor dipl. dela, 2011)*

<b>Št. izračuna</b>	<b>Geometrija terena in nasipov</b>	<b>Pretok [m<sup>3</sup>/s]</b>
BRENEK 1	Sedanje stanje	3050
BRENEK 2	Sedanje stanje	3240
BRENEK 3	Sedanje stanje	3290
BRENEK 11	Sedanje stanje	7081
BRENEK 20	Varianta A	3290
BRENEK 28	Varianta A	7081
BRENEK 37	Varianta B	3290
BRENEK 45	Varianta B	7081
BRENEK 54	Varianta C	3290
BRENEK 62	Varianta C	7081

#### **4.1.1 Rezultati za obstoječe stanje**

Rezultati izvedenih izračunov za sedanje stanje so pokazali, da obstoječe ureditve ob Savi za stoletni pretok načeloma zadostujejo, edino v kritičnem profilu, približno 200 m pod izlivom Potočnice se visokovodni nasip s cesto spusti le 20 cm nad gladino Save. Na lokaciji platoja NEK je pri stoletnem pretoku gladina Save 0,35 m pod nivojem kote platoja, na katerem so postavljeni glavni objekti. Na izteku levoobrežnega nasipa je kota gladine pod koto, ki zagotavlja varnostno navidvišanje 1,2 m. Na prilogi B1 je razvidno, da bi se voda pri pretoku  $Q_{100} = 3290 \text{ m}^3/\text{s}$  razlila na levi breg dolvodno od konca nasipa za zaščito nuklearne elektrarne. Na desni breg, ki je nižji in omogoča prelivanje, pa se voda razlije 2 km široko in tako je NEK varovana pred poplavnimi vodami.

Izračuni gladin ter porazdelitve pretokov za sedanje stanje terena so za primere umeritvenih pretokov, stoletne vode in  $Q_{PMF}$  prikazani na preglednicah 7 – 9. Hitrostna polja, globine, prečni profili in vzdolžni poteki gladin za omenjene pretoke pa so prikazani v prilogah A3 – A5 in B1 – B5.

*Preglednica 7: Kote gladin Save za pretok  $Q_{100}$  in  $Q_{PMF}$ , izračunane z 1D modelom (avtor dipl. dela, 2010)*

<b>Profil</b>	<b>Stacionaža</b>	<b><math>Q=3290m^3/s</math></b>	<b><math>Q=7081m^3/s</math></b>
<b>P103</b>	748957	157,77	159,91
<b>P104</b>	748442	157,31	159,29
<b>P105</b>	748062	156,88	158,23
<b>P106</b>	747647	156,52	158,45
<b>P107</b>	747182	155,32	157,07
<b>P108</b>	746797	155,50	157,46
<b>P109</b>	746512	155,01	156,60
<b>P110</b>	746202	155,06	156,69
<b>P111</b>	745732	153,62	155,99
<b>P112</b>	745302	153,03	155,43
<b>P113</b>	744852	152,31	154,00
<b>P114</b>	744452	151,83	153,38
<b>P115</b>	744127	151,05	152,71
<b>P116</b>	743732	151,45	152,70
<b>P117</b>	743257	151,03	152,36
<b>P118</b>	742837	150,14	151,45
<b>P119</b>	742367	149,47	150,82
<b>P120</b>	741842	149,01	150,51

V profilu platoja NEK je tako gladina pri stoletnem pretoku na koti 155,06, kar je približno 45 cm pod koto platoja in 2 m pod koto obrežnega zidu. Tako levoobrežni obstoječi nasipi za zaščito NEK niso nikjer preplavljeni. Na dolvodnem koncu obstoječega nasipa znaša za  $Q_{100}$



kota gladine 153,09, tako da je doseženo varnostno nadvišanje 2,1 m. Na začetku nasipa ob izlivu Potočnice doseže gladina koto 157,40, tako da se zelo približa koti vozišča na visokovodnem nasipu. S tem praktično ni upoštevanega nobenega varnostnega nadvišanja, saj je cestišče samo 20 cm nad gladino. V tem profilu priteče v Savo še Potočnica, ki jo Sava pri obravnavanem pretoku zajezi in s tem poplavi manjši del območja na desnem bregu Potočnice do globine 2,0 m. Voda se pri  $Q_{100}$  razlije do prepusta Potočnice pod železniško progo.

*Preglednica 8: Kote gladin, dobljene z 2D modelom za sedanje stanje terena (avtor dipl. dela, 2011)*

<b>Profil</b>	<b>Stacionaža</b>	<b><math>Q=3050m^3/s</math></b>	<b><math>Q=3240m^3/s</math></b>	<b><math>Q=3290m^3/s</math></b>	<b><math>Q=7081m^3/s</math></b>
<b>P103</b>	748957	158,23	158,39	158,44	160,35
<b>P104</b>	748442	157,73	157,88	157,93	159,95
<b>P105</b>	748062	157,22	157,36	157,40	159,27
<b>P106</b>	747647	156,82	156,94	156,97	158,60
<b>P107</b>	747182	155,96	156,02	156,05	157,31
<b>P108</b>	746797	155,34	155,44	155,46	156,38
<b>P109</b>	746512	155,20	155,31	155,33	156,30
<b>P110</b>	746202	154,94	155,04	155,06	156,10
<b>P111</b>	745732	154,11	154,18	154,20	155,13
<b>P112</b>	745302	153,53	153,58	153,59	154,53
<b>P113</b>	744852	153,01	153,07	153,09	153,87
<b>P114</b>	744452	152,15	152,19	152,20	153,13
<b>P115</b>	744127	151,93	151,97	151,98	152,71
<b>P116</b>	743732	151,43	151,49	151,50	152,20
<b>P117</b>	743257	150,77	150,80	150,80	151,54
<b>P118</b>	742837	150,55	150,58	150,59	151,19
<b>P119</b>	742367	150,09	150,13	150,14	150,86
<b>P120</b>	741842	148,87	148,96	148,99	150,51

Na desnem bregu se voda pri  $Q_{100}$  razlije 2 km na večinoma kmetijske površine. Poplavna voda sega vse do vasi Drnovo, Mrtvice in Vihre ter na ozkem območju do avtoceste Ljubljana – Zagreb vendar je ne poplavi. Globina vode na poplavnih področjih je med 1 in 3 m, hitrosti pa večinoma ne presežejo vrednosti 1 m/s. V strugi Save je gladina visoka do 10 m, hitrosti pa dosežejo vrednosti med 3 in 4 m/s. Kot je razvidno iz spodnje preglednice, teče na koncu matematičnega modela v profilu P119 pri stoletnem pretoku po desnem poplavnem področju  $831 \text{ m}^3/\text{s}$ , na levem poplavnem področju,  $351 \text{ m}^3/\text{s}$ , v strugi pa  $2108 \text{ m}^3/\text{s}$ .

*Preglednica 9: Razdelilnik pretoka na obravnavanem odseku za sedanje stanje terena (avtor dipl. dela, 2011)*

<b>Profil</b>	<b>Skupni pretok [m<sup>3</sup>/s]</b>	<b>Levi breg [m<sup>3</sup>/s]</b>	<b>Struga [m<sup>3</sup>/s]</b>	<b>Desni breg [m<sup>3</sup>/s]</b>
<b>P106</b>	3050	612	2395	43
<b>P111</b>	3050	364	2209	477
<b>P114</b>	3050	67	2488	495
<b>P119</b>	3050	305	2095	650
<b>P106</b>	3240	663	2518	59
<b>P111</b>	3240	376	2280	584
<b>P114</b>	3240	80	2567	593
<b>P119</b>	3240	342	2110	788
<b>P106</b>	3290	677	2547	66
<b>P111</b>	3290	378	2293	619
<b>P114</b>	3290	84	2578	628
<b>P119</b>	3290	351	2108	831
<b>P106</b>	7081	1584	4132	1365
<b>P111</b>	7081	511	2890	3680
<b>P114</b>	7081	478	3400	3203
<b>P119</b>	7081	1597	2530	2954

Na levo poplavno področje se voda razlije na koncu obstoječega visokovodnega nasipa in se razlije vse do železniške proge. Voda tudi tu poplavlja večinoma kmetijske površine. Gladine sežejo med 1 in 3 m visoko, hitrosti večinoma ne presežejo 1 m/s.

Rezultati za sedanje stanje terena pri pretoku  $Q_{PMF} = 7081 \text{ m}^3/\text{s}$  so pokazali, da obstoječe stanje visokovodnih nasipov ter objektov za tak pretok ne zadostuje. Gladina v osi struge Save na sotočju s Potočnico je povprečno 1,1 m nad koto nasipa Potočnice, v Cesta ob Savi je poplavljen v kritičnem profilu za 1 m. Na lokaciji platoja NE Krško je pri tem pretoku gladina Save 1,0 m pod nivojem levoobrežnega zidu, oziroma 60 cm nad nivojem terena za nasipom. Na izteku levoobrežnega nasipa je kota gladine v strugi približno 1,3 m pod koto nasipa. Do poplavljanja ravnice dolvodno od NEK za nasipom prihaja zaradi povratnega toka vode, ki doteka za nasip z dolvodne strani. Poplavljen je tudi zaledno področje med NEK in železniško progo. Gladine na tem območju so od 1 do 4 m nad terenom, hitrosti pa ne presežejo 1 m/s. V strugi hitrosti dosežejo od 4 do 5 m/s, gladina vode znaša do 12 m.

Na desnem poplavnem področju sega voda do 2,5 km daleč do vasi Drnovo, kjer voda poplavi tudi nekaj hiš. Poplave sežejo tudi do vasi Mrtvice ter Vihre, nato se nadaljujejo do avtoceste, ki jo voda v manjšem območju poplavi. Hitrosti večinoma ne presegajo vrednosti 1 m/s, le na manjšem območju na nasprotni strani NEK dosežejo do 1,5 m/s. Desno poplavno področje je poplavljen za 1 do 4 m. Iz porazdelitve pretoka na odseku se vidi, da na začetku teče na levem in desnem poplavnem področju približno enako velik pretok, nato pa se voda široko razlije na kmetijske površine na desnem področju, kjer nato teče toliko vode kot v strugi.

#### **4.1.2 Rezultati za bodoče ureditve**

V nadaljevanju so prikazani še rezultati za posamezne variante novih nasipov. Hitrostna polja, plastnice globin, prečni ter vzdolžni profili so prikazani v grafičnih prilogah C1 – C7, kote gladin ter razdelilnik pretoka za stoletni in maksimalno verjetni pretok so podani v spodnjih preglednicah 10 – 14. Kot je razvidno iz dobljenih podatkov, se rezultati za stoletni pretok ne razlikujejo bistveno od rezultatov matematičnega modela za sedanje stanje terena. Tudi rezultati za maksimalno verjetni pretok so za obravnavane trase pokazali, da v potekih gladin v osi struge ni pomembnih razlik, prav tako so dosežene hitrosti podobne za vse tri različice.

Za stoletni pretok so izračunane kote gladin na sotočju s Potočnico 157,40 m.n.v. za varianto A, ter 157,39 za varianti B in C. Hitrosti so med 3 in 4 m/s v strugi ter do 1 m/s na poplavnih področjih. Na levem poplavnem področju teče na gorvodnem odseku  $676 \text{ m}^3/\text{s}$ , na dolvodnem koncu v profilu P119 pa  $351 \text{ m}^3/\text{s}$ . V strugi je pretok na gorvodnem odseku  $2545 \text{ m}^3/\text{s}$ , v profilu P119 pa  $2111 \text{ m}^3/\text{s}$ . Iz tega je razvidno, da se pretoki na desnem poplavnem področju s tokom Save povečujejo od  $69 \text{ m}^3/\text{s}$  do  $828 \text{ m}^3/\text{s}$ .

*Preglednica 10: Gladine, dobljene z 2D modelom za novo stanje pri pretoku  $Q=3290 \text{ m}^3/\text{s}$  (avtor dipl. dela, 2011)*

<b>Profil</b>	<b>Stacionaža</b>	<b>Varianta A</b>	<b>Varianta B</b>	<b>Varianta C</b>
<b>P103</b>	748957	158,44	158,44	158,44
<b>P104</b>	748442	157,93	157,93	157,93
<b>P105</b>	748062	157,40	157,39	157,39
<b>P106</b>	747647	156,97	156,97	156,97
<b>P107</b>	747182	156,05	156,05	156,05
<b>P108</b>	746797	155,46	155,46	155,46
<b>P109</b>	746512	155,33	155,33	155,33
<b>P110</b>	746202	155,06	155,06	155,06
<b>P111</b>	745732	154,20	154,20	154,20
<b>P112</b>	745302	153,59	153,59	153,59
<b>P113</b>	744852	153,09	153,09	153,09
<b>P114</b>	744452	152,20	152,20	152,20
<b>P115</b>	744127	151,98	151,98	151,98
<b>P116</b>	743732	151,50	151,50	151,50
<b>P117</b>	743257	150,80	150,80	150,80
<b>P118</b>	742837	150,59	150,59	150,59
<b>P119</b>	742367	150,14	150,14	150,14
<b>P120</b>	741842	148,99	148,99	148,99

Za maksimalno verjetni pretok so izračunane kote gladin na sotočju s Potočnico 159,27 za varianti A in B, ter 159,28 m.n.v. za varianto C. Hitrosti so med 4 in 5 m/s v strugi ter do 1.5 m/s na poplavnih področjih. Na levem poplavnem področju teče na gorvodnem odseku 1584 m<sup>3</sup>/s, na dolvodnem koncu v profilu P119 pa 1597 m<sup>3</sup>/s. V strugi je pretok na gorvodnem odseku 4132 m<sup>3</sup>/s, v profilu P119 pa 2530 m<sup>3</sup>/s. Iz tega je razvidno, da se pretoki na levem poplavnem področju ne spremenijo bistveno, medtem ko se voda iz struge prelije na desno poplavno področje, kjer se pretoki povečajo od 1365 m<sup>3</sup>/s do 2954 m<sup>3</sup>/s.

*Preglednica 11: Gladine, dobljene z 2D modelom za novo stanje pri pretoku  $Q=7081 \text{ m}^3/\text{s}$  (avtor dipl. dela, 2011)*

<b>Profil</b>	<b>Stacionaža</b>	<b>Varianta A</b>	<b>Varianta B</b>	<b>Varianta C</b>
<b>P103</b>	748957	160,35	160,35	160,36
<b>P104</b>	748442	159,95	159,95	159,96
<b>P105</b>	748062	159,27	159,27	159,28
<b>P106</b>	747647	158,60	158,60	158,61
<b>P107</b>	747182	157,31	157,31	157,31
<b>P108</b>	746797	156,38	156,38	156,38
<b>P109</b>	746512	156,30	156,30	156,31
<b>P110</b>	746202	156,10	156,10	156,10
<b>P111</b>	745732	155,13	155,13	155,13
<b>P112</b>	745302	154,53	154,53	154,53
<b>P113</b>	744852	153,87	153,87	153,91
<b>P114</b>	744452	153,13	153,13	153,14
<b>P115</b>	744127	152,71	152,71	152,72
<b>P116</b>	743732	152,20	152,20	152,20
<b>P117</b>	743257	151,54	151,54	151,54
<b>P118</b>	742837	151,19	151,19	151,19
<b>P119</b>	742367	150,86	150,85	150,86
<b>P120</b>	741842	150,51	150,50	150,51

*Preglednica 12: Razdelilnik pretoka za novo stanje - varianta A  
(avtor dipl. dela, 2011)*

<b>Profil</b>	<b>Skupni pretok [m<sup>3</sup>/s]</b>	<b>Levi breg [m<sup>3</sup>/s]</b>	<b>Struga [m<sup>3</sup>/s]</b>	<b>Desni breg [m<sup>3</sup>/s]</b>
<b>P106</b>	3290	676	2545	69
<b>P111</b>	3290	378	2294	618
<b>P114</b>	3290	84	2580	626
<b>P119</b>	3290	351	2111	828
<b>P106</b>	7081	1584	4132	1365
<b>P111</b>	7081	511	2890	3680
<b>P114</b>	7081	477	3400	3204
<b>P119</b>	7081	1597	2530	2954

*Preglednica 13: Razdelilnik pretoka za novo stanje - varianta B  
(avtor dipl. dela, 2011)*

<b>Profil</b>	<b>Skupni pretok [m<sup>3</sup>/s]</b>	<b>Levi breg [m<sup>3</sup>/s]</b>	<b>Struga [m<sup>3</sup>/s]</b>	<b>Desni breg [m<sup>3</sup>/s]</b>
<b>P106</b>	3290	677	2547	66
<b>P111</b>	3290	378	2295	617
<b>P114</b>	3290	84	2580	626
<b>P119</b>	3290	351	2111	828
<b>P106</b>	7081	1548	1432	1365
<b>P111</b>	7081	504	2894	3683
<b>P114</b>	7081	456	3409	3216
<b>P119</b>	7081	1574	2539	2968

*Preglednica 14: Razdelilnik pretoka za novo stanje - varianta C  
(avtor dipl. dela, 2011)*

<b>Profil</b>	<b>Skupni pretok [m<sup>3</sup>/s]</b>	<b>Levi breg [m<sup>3</sup>/s]</b>	<b>Struga [m<sup>3</sup>/s]</b>	<b>Desni breg [m<sup>3</sup>/s]</b>
<b>P106</b>	3290	677	2547	66
<b>P111</b>	3290	378	2295	617
<b>P114</b>	3290	84	2580	626
<b>P119</b>	3290	351	2111	828
<b>P106</b>	7081	1586	4139	1374
<b>P111</b>	7081	488	2894	3699
<b>P114</b>	7081	444	3410	3227
<b>P119</b>	7081	1573	2537	2971

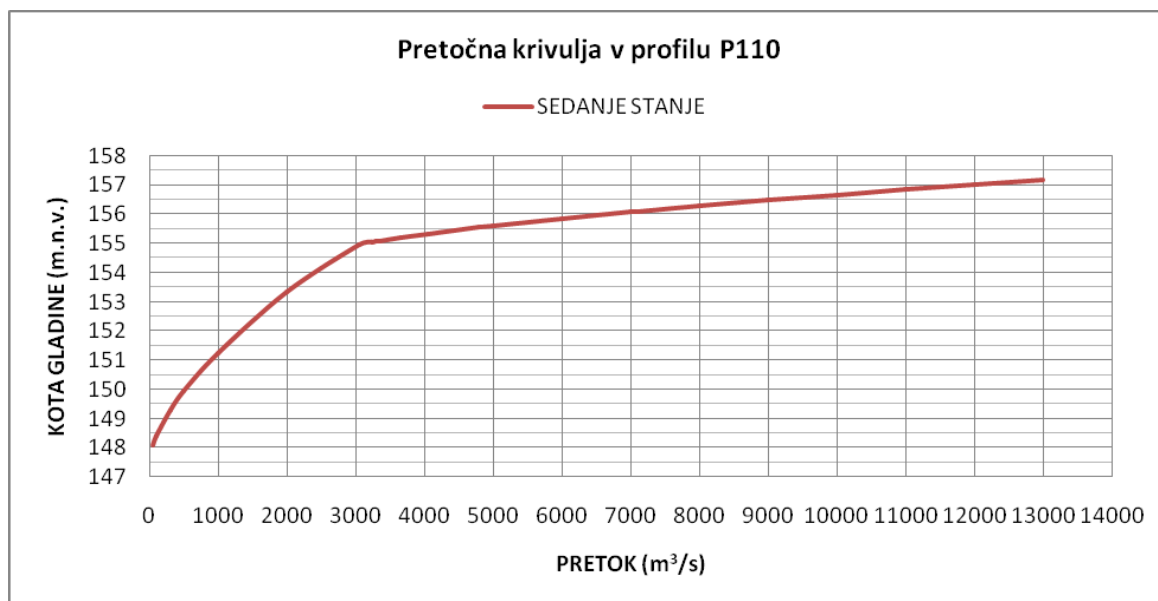
#### **4.2 Primerjava variantnih rešitev**

Primerjava rezultatov izračunov za obravnavane različice visokovodnih nasipov je pokazala, da velikih razlik za posamezne trase pri stoletnem pretoku ni, le pri varianti A seže na koncu obstoječega levoobrežnega nasip ozek pas poplave do južnega roba odlagališča jedrskih odpadkov. Vtekanja vode za nasipom Potočnice v zaledno področje ni v nobenem primeru.

Nekoliko večje razlike med posameznimi variantami se pojavijo pri maksimalno verjetnem pretoku, saj se obsegi poplave v zalednem področju NE Krško razlikujejo. Iz rezultatov za ta pretok je tudi razvidno, da je pri trasi nasipa C, ki izkjučuje celoten levi breg, kota železnice prenizko, tako da pride na tem delu do prelivanja v območje varovanja preko železnice. Zato bi morala biti kota železnice dvignjena na koto 160,00, če ne bi želeli, da se voda preliva v območje znotraj nasipov. Izračun je tudi pokazal, da je sedanja kota platoja NE Krško 50 cm pod gladino pri tem pretoku, medtem ko je levoobrežni zid z upoštevanjem varnostnega nadvišanja 1 m ustrezen, saj ne pride do prelivanja čez plato.

#### 4.2.1 Poteki gladin v strugi Save

Višine gladin v osi struge se med posameznimi različicami tras nasipov pri stoletnem pretoku razlikujejo le za 1 cm, pri maksimalno verjetnem pretoku pa za največ 4 cm. Tako je na spodnji sliki prikazana pretočna krivulja v profilu platoja NEK samo za sedanje stanje terena, saj pomembnih razlik med posameznimi variantami ni.



Slika 14: Pretočna krivulja v profilu P110 za sedanje stanje teren (avtor dipl. dela, 2011)

Za potrebe ocene višine visokovodnih nasipov z upoštevanjem varnostnega nadvišanja 1.2 m so bile ugotovljene naslednje kote: pri 100-letni vodi ( $Q_{100} = 3290 \text{ m}^3/\text{s}$ ) v profilu P105 (gorvodni začetek nasipa) bi morala biti kota nasipa na 158,60 m.n.v., kota za  $Q_{PMF} = 7081 \text{ m}^3/\text{s}$  pa bi morala znašati 160,50 m.n.v. V profilu P113, ki predstavlja dolvodni konec nasipa, pa znašajo potrebne kote 154,30 m.n.v. za 100-letno vodo in 155,10 m.n.v. za  $Q_{PMF}$ . V profilu P110, ki predstavlja profil platoja NEK, znašajo kote 156,30 m.n.v. za 100-letni pretok ter 157,30 m.n.v. za maksimalno verjetni pretok.



#### 4.2.2 Obseg poplave in poplavne linije

Kot je bilo predhodno omenjeno, se kote ter hitrosti v osi struge za različne trase nasipov razlikujejo le malo, tako da je razlika v obsegu poplavljenih področij najpomembnejša za izbiro najustreznejšega varovanja širšega območja NE Krško.

Na desnem bregu Save poplavno območje pri stoletnem pretoku zajema poplavno ravnico med Savo in Krko ter na južnem delu avtocesto Ljubljana - Zagreb. V gorvodnem delu sega poplavno področje ob Savi do naselij Drnovo, Brege, Mrtvice in Vihre. Na levem bregu Save je poplavna ravnica med železniško progo Ljubljana – Zagreb, cesto Krško – Vrbina ter na kmetijskih površinah v okolici gramoznice. Poplavna linija stoletnih voda sega na desnem bregu do avtoceste in ob njej do naselja Vihre. Tam se umakne pod naselje in tako poteka pod vasmi Brege in Žadovinek, kjer se obrne nazaj k Savi. Na levem bregu Save segajo stoletne vode zvezno skozi Vrbino do nasadov pri nuklearni elektrarni Krško ter v bližino železnice.

Poplavna linija za maksimalno verjetni pretok sega na desnem bregu v profilu P107 2,5 km široko do naselij Drnovo, Brege in Mrtvice. Nato do avtoceste in ob njej naprej do sotočja z reko Krko. Na levem bregu Save segajo poplavne vode zvezno skozi Vrbino do nasadov pri nuklearni elektrarni Krško ter v zalednem področju med NE Krško in železnico do Potočnice. Poplavljen so tudi kmetijske površine na desnem bregu Potočnice.

V primeru variante A sega poplava za maksimalno verjetni pretok na dolvodnem koncu obstoječega nasipa do platoja NEK, saj poplavna voda zateka na koncu nasipa nazaj proti nuklearni elektrarni vse do nasipa različice A. Globina vode na tem področju je od 1 m do 2 m. Poplava za ta primer sega tudi do zahodnega roba območja, kjer bo postavljeno odlagališče jedrskih odpadkov. Gladina je tu 1 m nad terenom.

Poplavljen območje v zaledju NEK je v primeru variante B nekoliko manjše, kot pri varianti A, saj voda, ki teče na gorvodnem koncu v zaledno področje za nasipom Potočnice, poplavi območje do nasipa ter nato teče med nasipom in železnico proti Vrbini, kjer poplavi tudi nekaj hiš. Poplavne vode na tem območju dosežejo globine od 1 m do 4 m. Na dolvodnem koncu voda, ki pri varianti A zateka za obstoječim nasipom, pri varianti B teče ob nasipu, kjer se nato za gramoznico obrne proti Gornjemu Lenartu. Pri varianti C je poplavljen območje podobno, le da voda v tem primeru na gorvodnem koncu zateka v zaledje čez železnico

### 4.3 Primerjava poplave leta 2010 z rezultati matematičnega modela

Ker je konec leta 2010 reka Sava na obravnavanem področju dosegla pretok z veliko povratno dobo in prestopila bregove, je bilo možno rezultate 2D matematičnega modela kvantitativno primerjati z dejanskim obsegom poplave. V ta namen so bili pridobljeni hidrološki podatki o visokih vodah za ta dogodek ter zračni posnetek poplav na obravnavanem odseku.

Velika količina padavin po celotnem območju Slovenije je v septembru povzročila poplavljanje predvsem v spodnjih tokovih rek. Poplavljali sta tudi Sava in Krka. Zaradi visokih in razburkanih voda ARSO ni mogel opraviti natančnih meritev pretokov reke Save v okolici NE Krško, znane pa so meritve višine vode in iz tega izračunan pretok reke Save na merilni postaji Jesenice na Dolenjskem. Ta naj bi bil ocenjen na  $3700 \text{ m}^3/\text{s}$ , višina vode pa naj bi bila 15 cm višja kot ob poplavi leta 1990. Sava v spodnjem toku je bila 19.9.2010 višja kot leta 1990, v Čatežu za 15 cm (zabeležba približno 50 m gorvodno od vodomerne letve). Najbolj ekstremni so bili ob tem pretoki Save v Hrastniku in Jesenicah na Dolenjskem, kjer sta bili visokovodni konici najvišji v celotnem obdobju opazovanj. (Agencija RS za okolje, 2011)



*Slika 15: Poplave septembra 2010 na območju začetka 2D modela v mestu Krško (Hidroelektrarne na spodnji Savi, 2011)*

### 4.3.1 Hidrološki podatki o visokih vodah

Ker dokončnih uradnih podatkov o vrednostih pretokov na tem območju še ni, je bil ocenjen primerjalni pretok izbran na podlagi pridobljenih podatkov tekom izdelave naloge. Podatki o pretokih so bili pridobljeni s strani nuklearne elektrarne Krško, upravljalca hidroelektrarn na spodnji Savi ter meritev s strani Katedre za splošno hidrotehniko FGG. Brilly (2011) ocenjuje, da je bil pretok reke Save na obravnavanem odseku okrog  $3000 \text{ m}^3/\text{s}$ . Pretoki na pregradi HE Blanca so ocenjeni nekoliko višje, na približno  $3300 \text{ m}^3/\text{s}$  (HESS, 2011) saj je maksimalno izmerjen pretok znašal  $2888 \text{ m}^3/\text{s}$ , nato pa zaradi popolnoma odprtih zapornic izgubijo možnost meritve. Narasla Sava je pri NE Krško dosegla pretok  $3111 \text{ m}^3/\text{s}$  ter gladino  $154,60 \text{ m.n.v.}$  (NEK, 2011). Največja vrednost pretoka je tako znašala  $3111 \text{ m}^3/\text{s}$ . Za primerjavo obsega poplave z 2D matematičnim modelom je bila nato izbrana vrednost  $3050 \text{ m}^3/\text{s}$ , ki je že bila uporabljena za umeritveni pretok. Z modelom izračunana kota gladine na jezui NEK znaša  $154,34 \text{ m.n.v.}$ , kar pomeni, da je ujemanje precej dobro. Na spodnji sliki je prikazan hidrogram na jezui NEK, ki je bil posredovan s strani nuklearne elektrarne.



Slika 16: Hidrogram visokovodnega vala na pragu jezui NE Krško septembra 2010 (NE Krško, 2011)

### 4.3.2 Poplavljeni območje na obravnavanem odseku

Za primerjavo obsega poplave med matematičnim modelom in poplavami septembra 2010 je bil pridobljen zračni posnetek poplavljenega območja na odseku med mestom Krško in sotočjem reke Save in Krke. Zračni posnetek je bil narejen z infra-rdečo kamero, tako da so na posnetku obarvana v modro področja, kjer je teren poplavljen ali polno zasičen z vodo. Zaradi navedenega je potrebno pri določevanju obsega poplavljenega področja nekoliko paziti, saj ni nujno, da so bila področja v modrem tudi dejansko preplavljena. Zato je potrebno rezultate interpretirati tudi s pomočjo podrobnejših fotografij.



*Slika 17: Zračni posnetek poplavljenega območja na obravnavanem odseku (Agencija RS za okolje, 2011)*

Tako so bile za primerjavo poplavljenega območja v okolici NEK uporabljene še fotografije na slikah 15 in 18. Potrebno se je tudi zavedati, da bi bilo za natančnejšo primerjavo potrebno pridobiti tudi podatke o globinah na poplavljenih področjih ter točnejše sledove o višini ter

obsegu poplave. Potrebno bi bilo tudi natančneje določiti ter uskladiti vrednost pretoka, ki je povzročil poplave. Zaradi tega je primerjava omogočala le določitev poplavljenih območij, ki se med seboj razlikujejo ali pa sovpadajo z rezultati matematičnega modela.

Na spodnji sliki je prikazana lokacija NE Krško, kjer se vidi, da je voda prestopila levi breg na koncu obstoječega nasipa, kjer se je razlila do Spodnjega Starega Gradu. Prikazana je tudi lokacija bodočega odlagališča jedrskih odpadkov, ki v tokratnih poplavah ni bila poplavljena.



*Slika 18: Območje NE Krško ob poplavah leta 2010  
(<http://www.arao.si>, 17.1.2011 )*

Na zračnem posnetku poplav je področje sicer obarvano modro, vendar območje ni bilo poplavljeno, tako da se na tem območju rezultati modela dobro ujemajo z dejanskim stanjem.

Na dolvodnem robu matematičnega modela v okolici Gornjega Lenarta je dejansko poplavljen področje na levem bregu manjše od izračunanega. Prav tako model na odseku med profili P118 in P119 na levem bregu kaže, da je območje poplavljen, vendar v resnici ni bilo poplavljen.



*Slika 19: Pogled gorvodno na poplavljeno sotočje reke Save in Krke (Hidroelektrarne na spodnji Savi, 2011)*

Na desnem poplavnem področju se na odseku od profila P104 do profila P108 rezultati ujemanjo dokaj natančno, južneje pa model kaže prevelik doseg poplave, saj je dejansko stanje poplavljeno približno 1,5 km izven struge, medtem ko model kaže poplavo do vasi Drnovo, ki je od Save oddaljena približno 2,5 km. Nekoliko večji obseg kaže model tudi v okolici vasi Mrtvice, saj sega poplava do severnega roba vasi, medtem ko je bil dejanski doseg približno 500 m manjši. V okolici vasi Vihre izračunan obseg poplave kaže boljše rezultate, saj je ujemanje z dejanskim stanjem precej dobro. Vzhodno od omenjene vasi se dejanska poplava razteza do avtoceste Ljubljana – Zagreb, kar sovпада tudi z rezultati matematičnega modela. Slabše ujemanje se pojavi na dolvodnem odseku med profili P118 in P119, saj model kaže poplavljeno območje tudi 1 km izven struge, medtem ko je iz posnetka razvidno, da je bilo območje poplavljeno približno 600 m izven struge.

Primerjava poplavljenih področij med matematičnim modelom in poplavo leta 2010 je pokazala, da matematični model za uporabljeni pretok  $Q = 3050 \text{ m}^3/\text{s}$  kaže nekoliko večji obseg poplavljenih območij od dejanskega predvsem na desnem poplavnem področju, medtem ko za poplavljenno področje v okolici platoja NEK ter za področje na levem bregu daje precej dobre rezultate, saj se kota v osi struge na jezcu NEK razlikuje le za 26 cm.

## 5 NAČRTOVANE VISOKOVODNE ZAŠČITE OBMOČJA

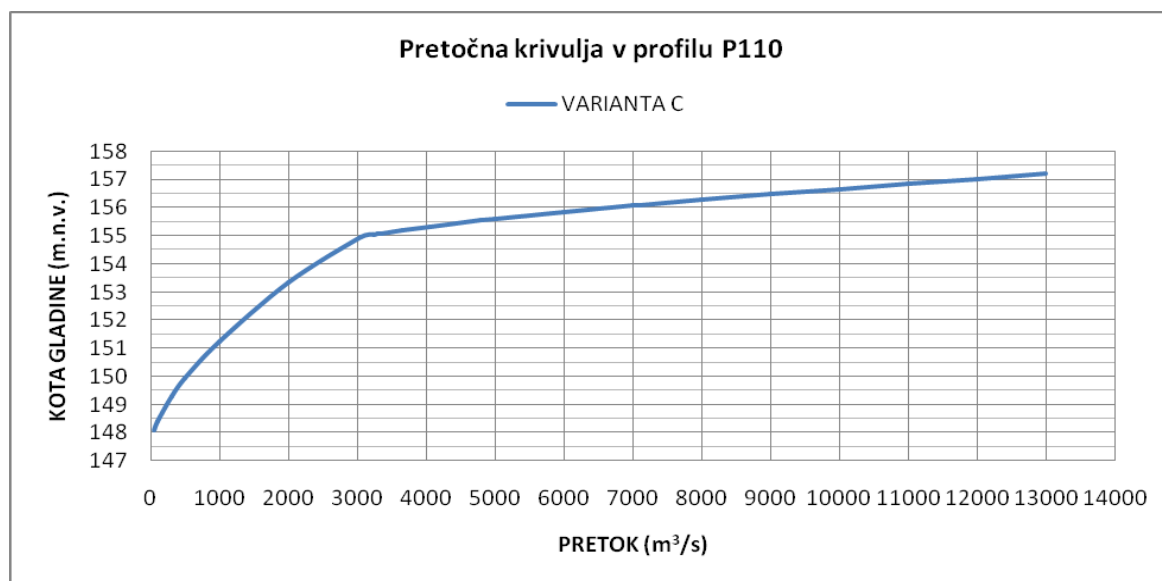
Na podlagi ugotovljenih razmer pripravljene variantne rešitve izboljšave poplavne varnosti NE Krško predvidevajo ukrepe, ki so opisani za obravnavane pretoke  $Q_{100}$  in  $Q_{PMF}$ . Večanje poplavne zaščite za omenjene pretoke je urejeno z varovanjem širšega območja NE Krško z nadvišanjem obstoječih visokovodnih nasipov ter ceste ob Savi in Potočnici. Zavarovanje tega območja za primer nivoja  $Q_{100}$  z višanjem nasipov na območju platoja NEK ni potrebna. Za varovanje območja pred maksimalno verjetnim pretokom pa bodo potrebne izboljšave obstoječe stanja, saj le-to ne zadostuje. V vseh primerih je v skladu z vodarsko prakso upoštevano dodatno varnostno nadvišanje nasipov 0,5 m ter v območju NEK 1,2 m.

### 5.1 Varovanje ožjega območja NE Krško

Obstoječe ureditve okrog ožjega platoja NEK ustrezajo tako za stoletni pretok kot za maksimalno verjetni pretok, saj gladine nikjer niso 1 m pod koto obrežnega zidu. V profilu platoja NEK je tako gladina pri stoletnem pretoku približno 45cm pod koto platoja in 2 m pod koto obrežnega zidu. Tako levoobrežni obstoječi nasipi za zaščito NEK niso nikjer preplavljeni. Zaradi zagotavljanja še višjega nivoja poplavne varnosti ožjega območja nuklearne elektrarne je smiselno povišanje obstoječih nasipov na koto 158,00 m.n.v., saj bi s tem dosegli večje varnostno nadvišanje.

#### 5.1.1 Plato nuklearne elektrarne

Za potrebe ocene višine visokovodnih nasipov z upoštevanjem varnostnega nadvišanja 1,2 m so bile ugotovljene naslednje kote: kota 100-letne vode ( $Q_{100} = 3290 \text{ m}^3/\text{s}$ ) v profilu P110, ki predstavlja profil platoja NEK znaša 155,06 m.n.v. Z upoštevanjem varnostnega nadvišanja je potrebna kota krone visokovodnega nasipa 156,30. Tako so obstoječe ureditve ustrezne. Pri pretoku  $Q_{PMF} = 7081 \text{ m}^3/\text{s}$  je kota gladine 156,10 m.n.v. Obstoječi levoobrežni zid je potrebno tako nadvišati za 0,2 m na koto 157,30 m.n.v. Na spodnji sliki je prikazana pretočna krivulja, ki je bila uporabljena za oceno višine visokovodnih nasipov v območju platoja NEK.



Slika 20: Pretočna krivulja v profilu P110 za varianto C (avtor dipl. dela, 2011)

### 5.1.2 Zaščite na desnem bregu

Zaradi zagotavljanja zaščite NEK bo teren na desnem bregu potekal 1 m pod koto levoobrežnega nasipa. Tako je predvidena kota terena 156,30 m.n.v. Do profila platoja NEK bo obstoječi teren nadvišan, dolvodno pa je predvidena navezava na energetske nasipe akumulacijskega bazena HE Brežice. Na desni breg, ki je nižji in deluje kot preliv, se tako poplavna voda razlije precej na široko in tako ostaja NEK varna pred visokimi vodami Save. S tem bo ohranjena tudi retenzijska vloga obširnih poplavnih področij na desnem bregu, saj se bodo poplavne vode z večjimi povratnimi dobami čez preliv prevajale na poplavne ravnice na desnem bregu.

### 5.2 Varovanje širšega področja

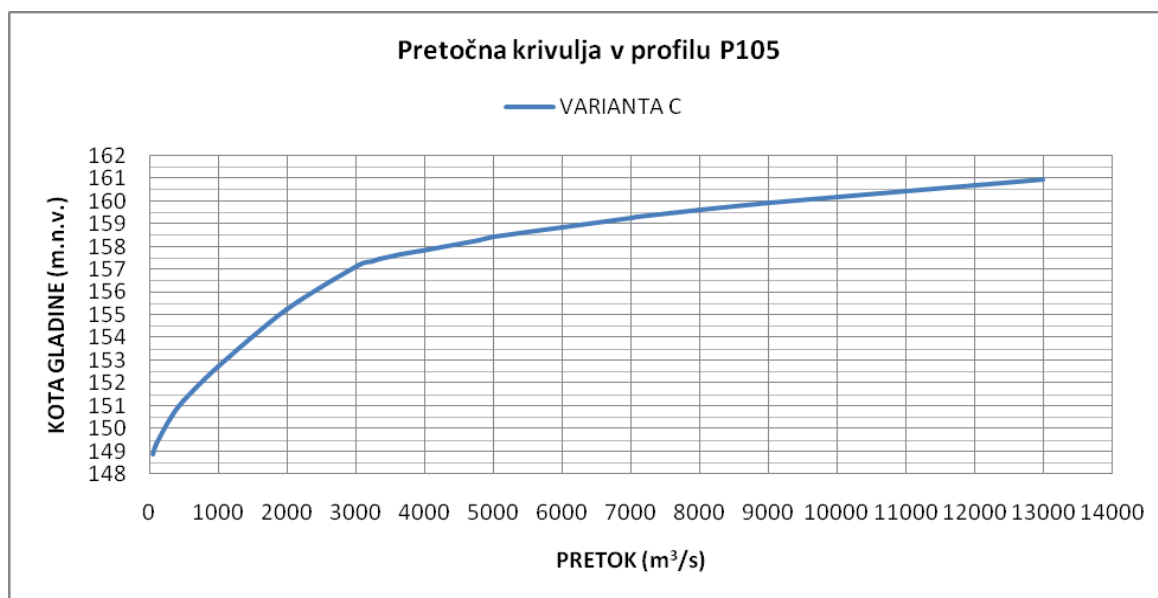
Za obravnavane nivoje varovanja je bil tudi preračunan vpliv predlaganih izvedb varovanja širšega območja NE Krško na gladino Save z zvišanjem visokovodnih nasipov ob Potočnici in Savi, in sicer za primer nadvišanja obstoječih nasipov, pa tudi za primer podaljšanja



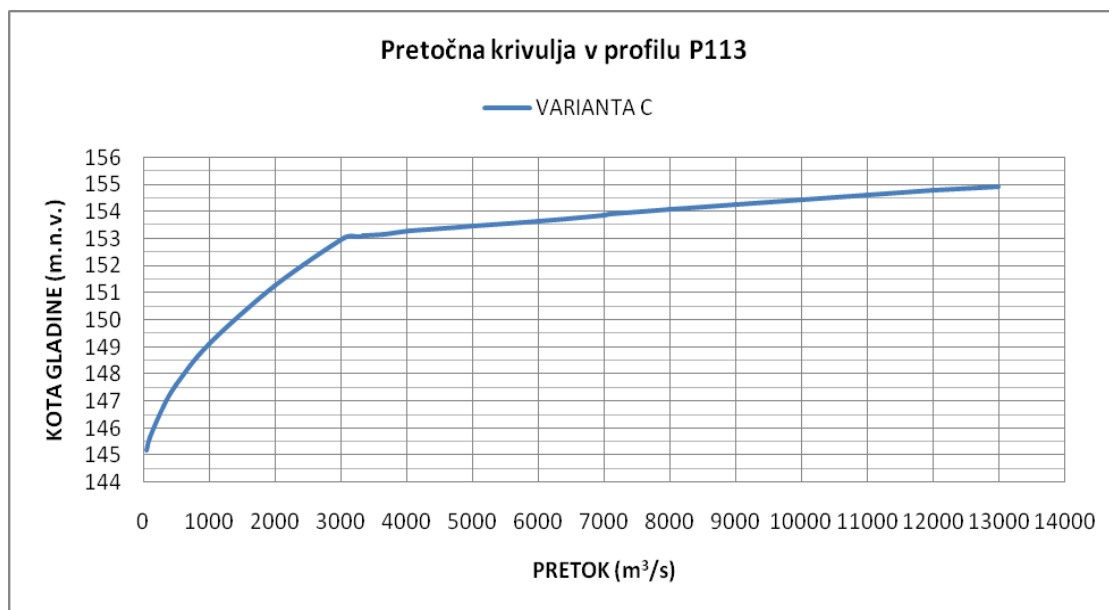
obstoječega levoobrežnega visokovodnega nasipa ob Potočnici do železniške proge ter izvedbe nasipa dolvodno za zaščito zaledja nuklearne elektrarne.

Za določitev potrebne kote višine visokovodnih nasipov na širšem območju NEK, je bilo upoštevano varnostno nadvišanje 1,2 m. Ugotovljene so bile naslednje kote krone nasipov: kota za 100-letne vode ( $Q_{100} = 3290 \text{ m}^3/\text{s}$ ) v profilu P105 (gorvodni začetek nasipa) se nahaja na 158,60 m.n.v., kota za  $Q_{PMF} = 7081 \text{ m}^3/\text{s}$  pa znaša 160,40 m.n.v. V profilu P113, ki predstavlja dolvodni konec nasipa, pa znašajo kote 154,30 m.n.v. za 100-letno vodo in 155,10 m.n.v. za  $Q_{PMF}$ . Na dolvodnem koncu je obstoječi nasip ustrezen za oba primera varovanja, saj je vrh na koti 155,20 m.n.v.

Pri trasi nasipa C, ki izkjučuje celoten levi breg, se je pokazalo, da je kota železnice prenizko, tako da je potrebno obstoječo železniško progo nadvišati. Tako je z upoštevanjem varnostnega nadvišanja 0,5 m potrebna kota železnice na koti 160,00 m.n.v., če ne bi želeli, da se voda preliva v območje znotraj nasipov. Na spodnjih slikah sta prikazani pretočni krivulji na začetku ter na koncu visokovodnih nasipov, ki sta bili uporabljeni za oceno potrebne višine nasipov v omenjenih profilih.



Slika 21: Pretočna krivulja v profilu P105 za varianto C (avtor dipl. dela, 2011)



Slika 22: Pretočna krivulja v profilu P113 za varianto C (avtor dipl. dela, 2011)

Konfiguracija terena na področju lokacije odlagališča NSRAO v Vrbini, ki je nekoliko dvignjena nad okoliškim terenom, je taka, da lokacija ob septembrskih poplavah leta 2010 ni bila poplavljena. Vendar pa bo potrebno odlagališče jedrskih odpadkov načrtovati na nasipu, ki bo ščitil pomembne objekte pred maksimalno možno poplavo, ki lahko na tem področju nastane. To pomeni, da bodo vhodi v objekte zgrajeni na nasipu, ki bo za nekaj metrov dvignjen nad obstoječo koto terena. Tako bo v času obratovanja možni poplavni vodi preprečen vstop v varovane objekte.

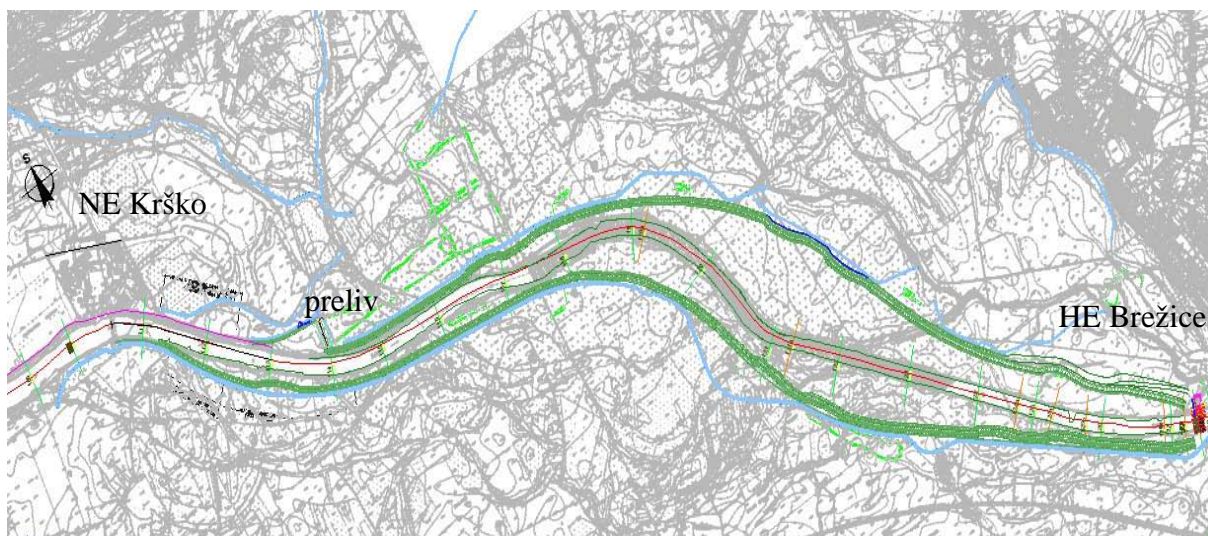
### 5.2.1 Navezava na akumulacijski bazen HE Brežice

Hkrati s predvideno akumulacijo HE Brežice se načrtujejo tudi protipoplavne ureditve krajev ob reki Savi. Eden od zaščitnih ukrepov, ki bo uporabljen, bodo zgrajeni protipoplavni nasipi s preliv. To pomeni, da se bo voda z 10 do 20-letno povratno dobo zadržala v akumulacijskem bazenu, če pa se bodo pojavile vode višjih povratnih dob, bo s pomočjo hidromehanske opreme omogočeno prelivanje vode čez levoobrežni preliv ter prosto

prelivanje čez desni breg. Voda se bo iz akumulacije prelivala na nenaseljena kmetijska zemljišča in sicer na obe poplavni področji levo ter desno od načrtovanih nasipov.

Dolvodno od konca obstoječega levoobrežnega nasipa je ob izvedbi HE Brežice predvidena navezava na novi preliv, ki bo reguliran s hidromehansko opremo. Preliv se dolvodno navezuje na bodoči energetski nasip, ki bo dimenzioniran na  $Q_{100}$ . Na desnem bregu je predvideno nadvišanje terena do pregrade NEK, ki omogoča prosto prelivanje. Nato se teren naveže na energetski nasip akumulacije. Dolvodno od jezua bo tako preprečeno prelivanje zaradi izgradnje energetskega nasipa.

Na spodnji sliki 23 je vidna lokacija levega preliva na poplavno področje, določena v okviru idejnih rešitev. Treba pa je povedati, da to še ni dokončno izbrana lokacije preliva, pride lahko še do kakšnih sprememb tako pri lokaciji in širini preliva kot tudi koti prelivnega robu, kar bodo pokazali nadaljnji detajlni izračuni v fazah načrtovanja.



Slika 23: Prikaz idejne zasnove ureditev za HE Brežice (IBE, 2011)

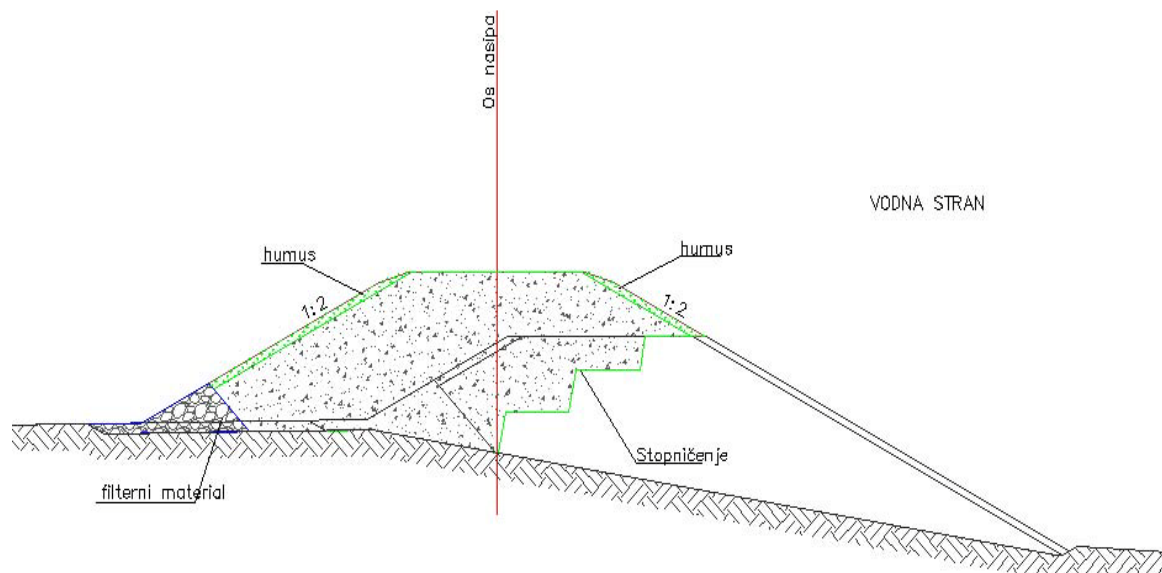
Visokovodno-energetski nasipi se bodo nato nadaljevali do mesta Brežice, kjer bo v rečnem km 738.492 locirana pregrada in strojnica HE Brežice. Na zaledni strani visokovodnih nasipov so vzporedno z njimi speljani drenažni kanali, ki uravnavajo nivo vode na poplavnih področjih.

### 5.3 Sestava predvidenih nasipov

Bodoči visokovodni nasipi ter nadvišanja obstoječih nasipov bodo izvedeni brez dodatne tesnitve v jedru, medtem ko bodo energetske nasipi tesnjeni z izvedbo injekcijske tesnilne zavesne. S tem bodo tudi preprečene izgube iz akumulacijskega bazena. Na podlagi več študij vpliva akumulacijskih bazenov na razmere v podtalnici je izražena zahteva po ločitvi bazenov od vodonosnikov. Takšne rešitve preprečujejo izgube iz bazenov, s sistemom drenažnih kanalov pa se obvladuje gladine podtalnice v zaledju ter v določenih razmerah tudi ščiti podtalnico pred onesnaženjem (Širca in sod., 2010).

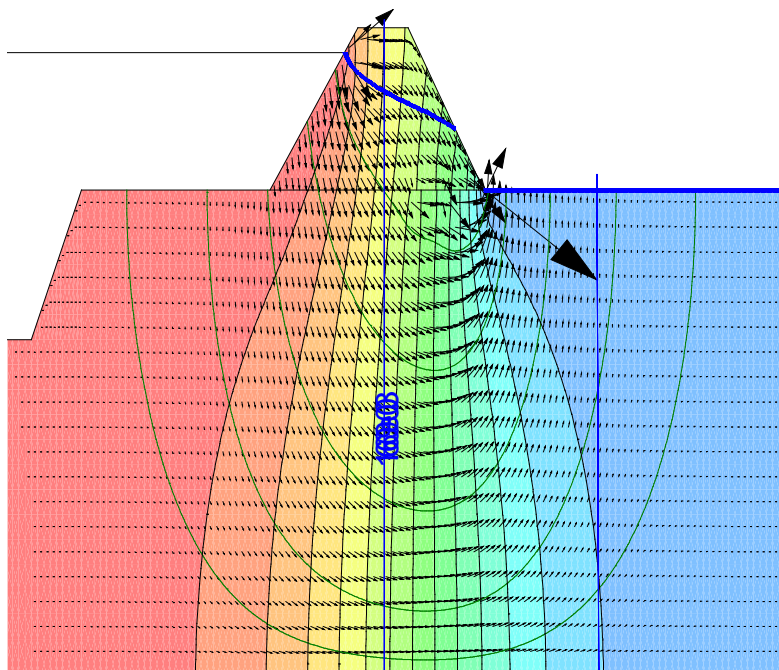
#### 5.3.1 Karakteristični prerez nasipa

Telo visokovodnega nasipa je zgrajeno iz aluvialno-deluvialnega prodnega materiala. Širina krone gotovega nasipa je 4m, kar zadošča, da lahko krona nasipa služi tudi kot dostop na zemljišče med nasipom in strugo Save ter za dovoz potrebnega materiala in mehanizacije za potrebe vzdrževalnih del na savskih brežinah. Na več mestih so dostopne poti s krone nasipa na teren ob strugi Save.



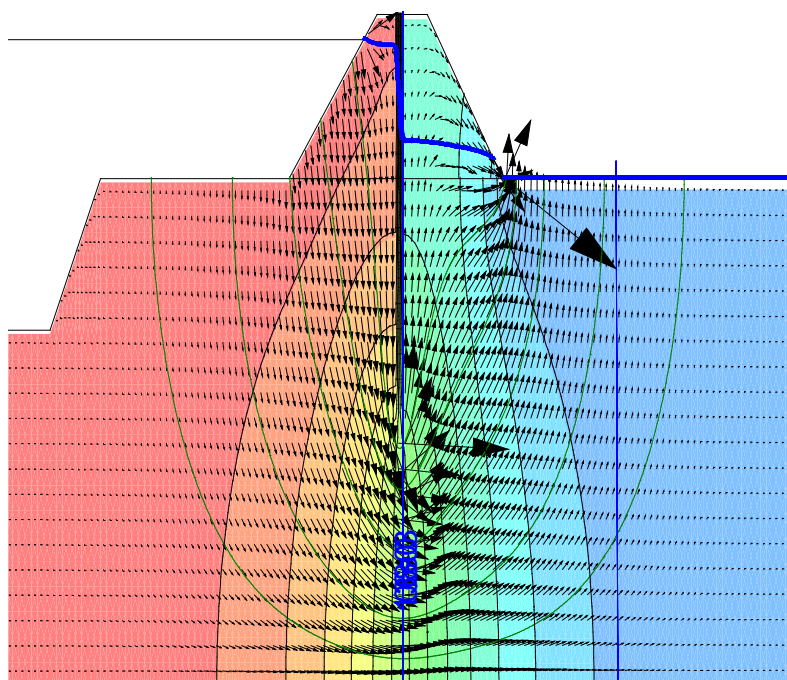
Slika 24: Karakteristični prečni profil nadvišanja visokovodnega nasipa (IBE, 2005)

Nagib obeh brežin nasipa je 1:2, brežine pa so humusirane in zatravljene. Na suhi strani nasipa je drenažna nožica iz okroglic ali lomljenca, ki zagotavlja, da se iz relativno prepustnega nasipa centralno ponikla voda kontrolirano izpušča skozi drenažni sloj brez nevarnosti pojava regresivne erozije v peti nasipa. Na tak način izvedeni nasipi (brez tesnitve) varujejo varovano območje pred zalitjem s poplavno vodo, ne rešujejo pa problema skozi telo nasipa pronikle vode pri dolgotrajnejših poplavah. V nadaljevanju so podane ocene pretokov skozi visokovodne nasipe ob Potočnici in Savi za primer netesnjenih visokovodnih nasipov in za primer izvedbe tesnilne zavese pod nasipi (IBE, 2005). Na spodnji sliki je prikazan potek strujanja vode skozi telo nasipa.



Slika 25: Polje potencialov pod netesnjem visokovodnim nasipom (IBE, 2005)

Vsi računi so bili izvedeni za stacionarno stanje, kar pomeni, da bi morala poplava trajati najprej 1 - 2 dneva, da bi se vzpostavilo stacionarno stanje strujanja, nato pa še vsaj 1 - 2 dneva, da bi skozi nasipe in zaščitne objekte preniknila večja količina vode. Dejansko je narava poplavnih valov kratkotrajna, časovnega merila dni. Zato je navedene vrednosti precejanja skozi objekte poplavne zaščite treba razumeti kot absolutno največje možne.



Slika 26: Polje potencialov pod tesnjnim visokovodnim nasipom (IBE, 2005)

Račun prepustnosti visokovodnega nasipa je bil izveden za pretok  $Q = 5000 \text{ m}^3/\text{s}$ . Za prepustni sloj debeline 10 m je bil predpostavljen koeficient prepustnosti  $k = 10^{-3} \text{ m/s}$ . Koeficient prepustnosti neprepustnega sloja je bil ocenjen na  $k = 10^{-7} \text{ m/s}$ . Izvedena sta bila dva računa. S prvim primerom je bila določena ocena pretoka skozi obstoječ nasip, koef. neprepustnosti je bil izbran  $k_n = 10^{-3} \text{ m/s}$ , s katerim je privzet precejšen faktor varnosti. Drugi primer predpostavlja nasip s tesnilno zaveso (slika 26) do globine 5 m. Koeficient prepustnosti zavesa je znašal  $k_{tz} = 10^{-7} \text{ m/s}$  (IBE, 2005). Rezultati računov so zbrani v spodnji preglednici. Prikazani so tudi skupni pretoki skozi visokovodni nasip in obrežno cesto.

Preglednica 15: Teoretično največji pretok skozi visokovodni nasip ob Savi (IBE, 2005)

Računski primer	Specif. pretok (l/s/m)	Skupni pretok (l/s)
netesnjen nasip	1,70	3400
tesnjen nasip	1,04	2080

## 5.4 Predlagane izboljšave

V nadaljnjih fazah načrtovanja bo potrebno po dokončni umestitvi vseh hidrotehničnih objektov v prostor ponovno preveriti varnost območja pred maksimalno poplavo. Ker so tokrat vzporedno z izračuni z 2D matematičnim modelom potekale tudi modelne raziskave na fizičnih in hibridnih modelih, so se nekatere variante varovanja tekom izdelave diplomske naloge nekoliko spremenile. Tako se je pokazalo, da dolvodni konec nasipa pri varianti C ni potreben, saj bo vodi onemogočeno vtekanje v zaledno področje na gorvodnem koncu čez železnico, na dolvodnem koncu pa bo prelivanje regulirano s prelivom. S tem bo zagotovljeno, da bo zaledno področje NE Krško varovano pred poplavnimi vodami.

Pokazalo se je tudi, da izboljšave obstoječega stanja za varovanje pred stoletno vodo niso potrebne, tako da bo potrebno zagotoviti večjo varnost samo za primer varovanja pred maksimalno verjetno poplavo. Bodoče ureditve bodo načrtovane tako, da bo pred poplavnimi vodami varen celotni levi breg med Potočnico in prelivom, lociranim v profilu P114.

### 5.4.1 Določitev poteka novih nasipov

Potek visokovodnih nasipov za varovanje NEK pred maksimalno verjetnim pretokom je bi določen na podlagi dobljenih izračunov ter rešitev predlaganih s strani projektanta. Tako je bila na koncu izbrana nekoliko drugačna varianta poteka nasipa, kot je bila pri različici C, saj dolvodni del nasipa pri tej različici ni potreben. V nasprotnem bi bilo potrebno zagotoviti zanesljivo evakuacijo zalednih voda z območja znotraj nasipov. Bilo bi potrebno izvesti še ustrezen drenažni sistem ter črpališče ustrezne zmogljivosti za odvajanje zalednih voda.

Tako so bile izbrane rešitve, ki zagotavljajo zadostno stopnjo varovanja ob minimalnih posegih na obstoječih objektih ter s čim manj novimi ureditvami. Obstoječi nasip ob Potočnici bo potrebno nadvišati do kote 160,50 v dolžini približno 350 m, ter ga podaljšati približno 500 m do železniške proge, katero je potrebno nadvišati do kote 160,00 m.n.v.

Obstoječi levoobrežni savski nasip bo potrebno nadvišati na koto 160.50 v gorvodnem profilu P105, ter z enakomernim vzdolžnim sklonom doseči koto 158.00 v profilu platoja NE Krško. Nato se nasip nadaljuje do kote 155,20 v profilu P113, kjer se priključi na levoobrežni preliv.

## 6 ZAKLJUČEK

Namen diplomske naloge je bil preučiti obstoječe stanje visokovodnih nasipov na obravnavanem odseku Save v okolici NEK ter podati smernice in izhodišča za nadaljne načrtovanje visokovodnih zaščit na tem območju.

Rezultati, dobljeni s pomočjo dvodimenzijskega matematičnega modela območja ter privzetih visokovodnih pretokov so pokazali na pomanjkljivosti obstoječih visokovodnih zaščit v širšem območju nuklearne elektrarne Krško pri pojavu ekstremnih poplav. Obstoječe stanje je za varovanje ožjega območja pred stoletnimi vodami še ustrezno, medtem ko so na širšem področju, predvsem v bližini nekaterih vasi, območja, ki jih bo potrebno zaščititi s protipoplavnimi nasipi tudi za omenjeni pretok. Če želimo za stoletno vodo doseči željeno varnostno nadvišanje nasipov, so potrebni le manjši posegi in lokalna nadvišanja obstoječih visokovodnih nasipov.

Na podlagi izvedenih izračunov in dobljenih rezultatov za primere pojava verjetno maksimalnega pretoka na tem območju pa se je pokazalo, da za tako visok nivo varovanja obstoječe stanje ne zadošča. Za zagotovitev zahtevane stopnje varovanja so potrebni večji posegi ter nadvišanja obstoječih in gradnja novih nasipov. Ker se bodoče ureditve visokovodnih nasipov v območju NEK načrtujejo hkrati z ureditvami hidroelektrarne Brežice, bo mogoče vse ureditve umestiti v prostor na najustreznejši način, tako z vidika poplavnega varovanja, kot z vidika ohranjanja aktivne retenzijske vloge obravnavanega območja.

Ker postaja varovanje širšega obrečnega prostora in infrastrukturnih objektov pred visokimi vodami vedno bolj zahtevno, bo potrebno vse bodoče ureditve načrtovati kot večnamenske objekte in njihovo rabo prilagoditi glede na lokalne potrebe. Na ta način je potrebno zagotoviti tudi ustrezno visokovodno zaščito širšega območja obstoječe nuklearne elektrarne Krško in pripadajočih objektov.

Glede na rezultate, se je potrdila potreba po preverbi obstoječega stanja kot tudi smiselnost izboljšav obstoječih nasipov. S tem so bila določena izhodišča za ureditev novih protipoplavnih zaščit okoliških površin in objektov. Rezultati za sedanje stanje lahko služijo kot referenčno stanje, rezultati pri končnem stanju z načrtovanimi ureditvami, pa za oceno vpliva načrtovanih ukrepov na gladine in obseg ekstremnih poplav na obravnavanem odseku.



V nadaljnjem poteku načrtovanja bo potrebno po dokončni umestitvi vseh hidrotehničnih objektov v prostor ponovno preučiti varnost območja pred maksimalno poplavo.

Ker so tokrat za obravnavani odsek vzporedno z izračuni z 2D matematičnim modelom potekale tudi modelne raziskave na fizičnih hidravličnih modelih, bi lahko rezultate iz te naloge uporabili kot pomoč za modeliranje v hibridnih modelih in za primerjavo s sorodnimi matematičnimi modeli. Za naslednje poplavne študije na tem odseku je potrebno zagotoviti tudi bolj kakovostne in novejšje visokovodne podatke za umeritev 2D in 1D modelov. Poplavni val Save iz septembra leta 2010 bi to vsekakor omogočal, vendar bi bilo potrebno pridobiti več natančnejših podatkov o pretoku in višinah gladin na poplavljenih področjih, kot je jih je bilo mogoče tekom izdelave te naloge. Z novimi podatki bi tako še bolje umerili matematični model območja ter optimizirali tehnične rešitve novih visokovodnih zaščit v zaledju.

## VIRI

### Uporabljeni viri:

Agencija RS za okolje. 2011. Hidrološko poročilo o povodnji v dneh od 17. do 21.septembra 2010. ([http://www.arso.gov.si/vode/poročila\\_in\\_publicacije/](http://www.arso.gov.si/vode/poročila_in_publicacije/) 21.2.2011 ).

Brilly, M. 2010. Preparation of new revision of PMF study and conceptual design package for flood protection of NPP Krško. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za splošno hidrotehniko: loč. pag.

Brilly, M., Mikoš M., Šraj, M. 1999. Varstvo pred poplavami, erozijo in plazovi. Vodne ujme VIII: 186.

Četina, M. 1988. Matematično modeliranje dvodimenzionalnih turbulentnih tokov. Magistrsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Hidrotehnična smer: loč. pag.

Četina, M., Krzyk, M. 2001. Dvodimenzionalni matematični model toka Soče v območju iztoka HE Plave II. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za mehaniko tekočin: loč. pag.

Četina, M., Krzyk, M. 2004. 2D hidravlični model območja Malega Grabna od Dolgega mostu do križanja z južno obvoznico vključno z razbremenjevanjem visokih vod proti Ljubljanskemu barju. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za mehaniko tekočin: loč.pag.

Četina, M., Krzyk, M. 2005. Ocena stopnje varnosti NE Krško pred poplavami. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za mehaniko tekočin: loč. pag.

Hidroinštitut. 2008. Izvedba hibridnih hidravličnih modelov za območje spodnje vode HE Krško, območje HE Brežice in območje HE Mokrice: 10 str.

Hudoklin, J. 2005. Prostorski in okoljski vidiki načrtovanja hidroelektrarn. Slovenski vodar 16: 7-9.

IBE. 2005. Možne rešitve za izboljšavo NEK pred poplavami: 32 str.

IZV. 2002. Hidrološka študija Save na odseku HE Boštanj, HE Blanca, HE Krško, HE Brežice in HE Mokrice: loč. pag.

Mikoš, M. 2007. Urejanje vodotokov. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za splošno hidrotehniko: 200 str.

Steinman, F., Banovec, P. 2004. Hidrotehniko: Vodne zgradbe 1. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za mehaniko tekočin: 101 str.

Steinman, F., Mikoš, M. 1993. Zadrževanje voda v Sloveniji. V: Mišičev vodarski dan 1993: zbornik referatov. Maribor, Vodno gospodarstvo Drava: str. 95 -99.

Širca, A., Josipovič, Z., Kvaternik, K., Močnik, I., Somrak, D. 2010. Večnamenski projekt hidroelektrarn na spodnji Savi. Gradbeni vestnik 59, 4: 74-81.

Zakrajšek, M., Krzyk, M. 1997. Preračun posledic morebitne porušitve jezovne zgradbe HE Vrhovo in račun visokovodnih valov. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za mehaniko tekočin: loč. pag.

### **Osebna komunikacija:**

Brilly, M. 2011. Vrednost pretoka na jezu NEK leta 2010. Osebna komunikacija.

Četina, M. 2010. Pretočna krivulja v profilu P120. Osebna komunikacija.

Požun, D. Hidroelektrarne na spodnji Savi. 2011. Vrednost pretoka in fotografije poplav na jezu HE Blanca in območju NEK septembra leta 2010. Osebna komunikacija.

Pribožič, M. NE Krško. 2011. Vrednost pretoka na jezu HE Blanca leta 2010. Osebna komunikacija.

Širca, A. IBE. 2011. Prikaz idejne zasnove HE Brežice. Osebna komunikacija.

Veršič, A. Agencija RS za okolje. 2011. Zračni posnetek poplave leta 2010. Osebna komunikacija.

## **PRILOGE**

Priloga A1: Pregledna situacija obravnavanega območja s prikazom računskih točk  
M 1:20000

Priloga A2: Aksonometrična slika območja za sedanje stanje terena  
M 1:20000

Priloga A3: Izolinije globin in hitrostno polje za sedanje stanje pri pretoku  $Q = 3050 \text{ m}^3/\text{s}$   
M 1:20000

Priloga A4: Izolinije globin in hitrostno polje za sedanje stanje pri pretoku  $Q = 3240 \text{ m}^3/\text{s}$   
M 1:20000

Priloga A5: Vzdolžni profil gladin v osi struge pri umerjanju matematičnega modela  
M 1:200/20000

### **Izračuni pri sedanjem stanju terena**

Priloga B1: Izolinije globin in hitrostno polje za sedanje stanje pri pretoku  $Q = 3290 \text{ m}^3/\text{s}$   
M 1:20000

Priloga B2: Prečni profili gladin za sedanje stanje pri pretoku  $Q = 3290 \text{ m}^3/\text{s}$   
M 1:20000

Priloga B3: Izolinije globin in hitrostno polje za sedanje stanje pri pretoku  $Q = 7081 \text{ m}^3/\text{s}$   
M 1:20000

Priloga B4: Prečni profili gladin za sedanje stanje pri pretoku  $Q = 7081 \text{ m}^3/\text{s}$   
M 1:20000

Priloga B5: Vzdolžni profil gladin v osi struge za sedanje stanje  
M 1:200/20000

Priloga B6: Primerjava obsega poplave leta 2010 z matematičnim modelom  
M 1:20000

### **Izračuni pri bodočem stanju terena**

Priloga C1: Izolinije globin in hitrostno polje za varianto A pri pretoku  $Q = 7081 \text{ m}^3/\text{s}$   
M 1:20000

Priloga C2: Prečni profili gladin za varianto A pri pretoku  $Q = 7081 \text{ m}^3/\text{s}$   
M 1:20000

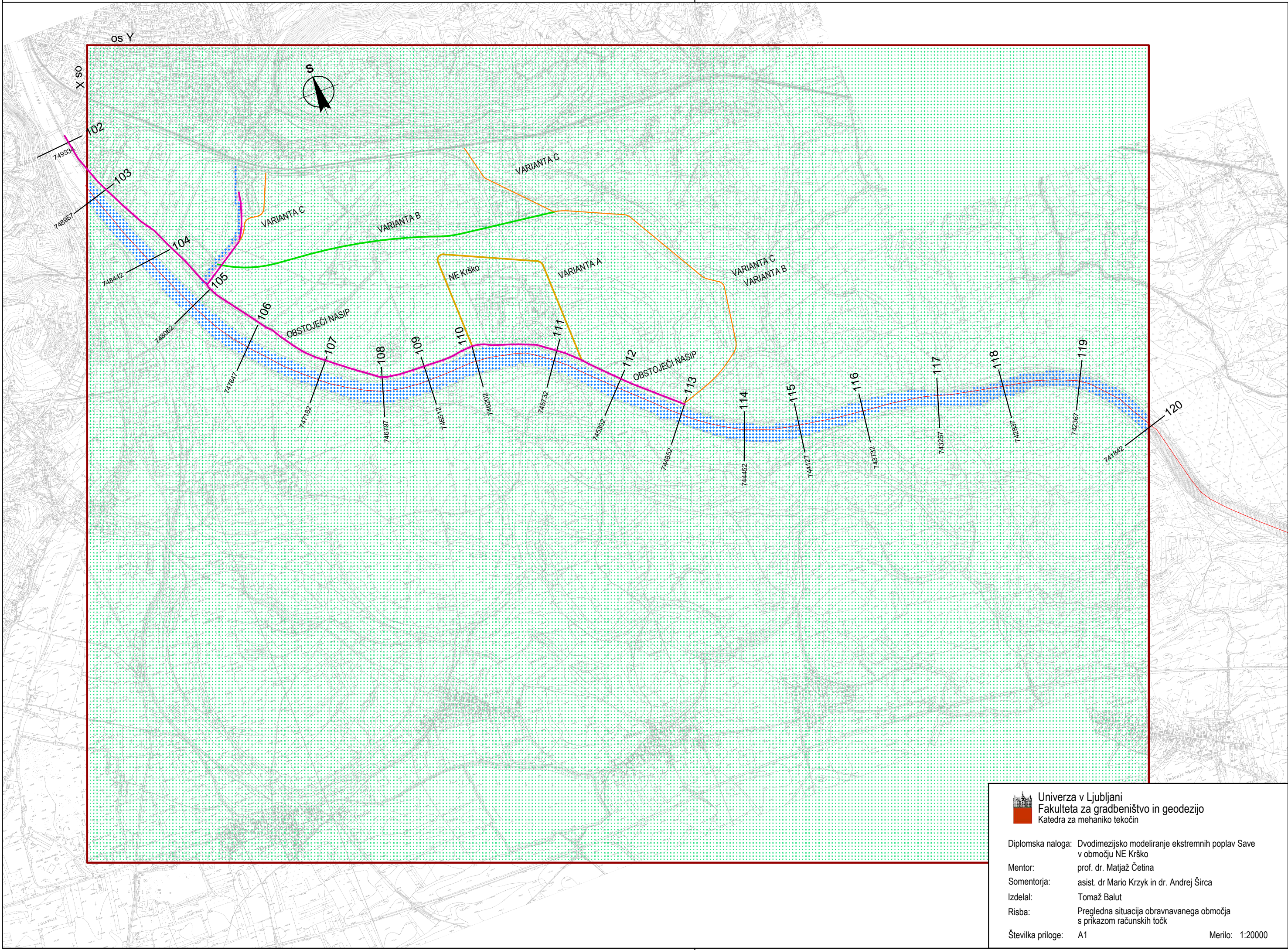
Priloga C3: Izolinije globin in hitrostno polje za varianto B pri pretoku  $Q = 7081 \text{ m}^3/\text{s}$   
M 1:20000

Priloga C4: Prečni profili gladin za varianto B pri pretoku  $Q = 7081 \text{ m}^3/\text{s}$   
M 1:20000

Priloga C5: Izolinije globin in hitrostno polje za varianto C pri pretoku  $Q = 7081 \text{ m}^3/\text{s}$   
M 1:20000

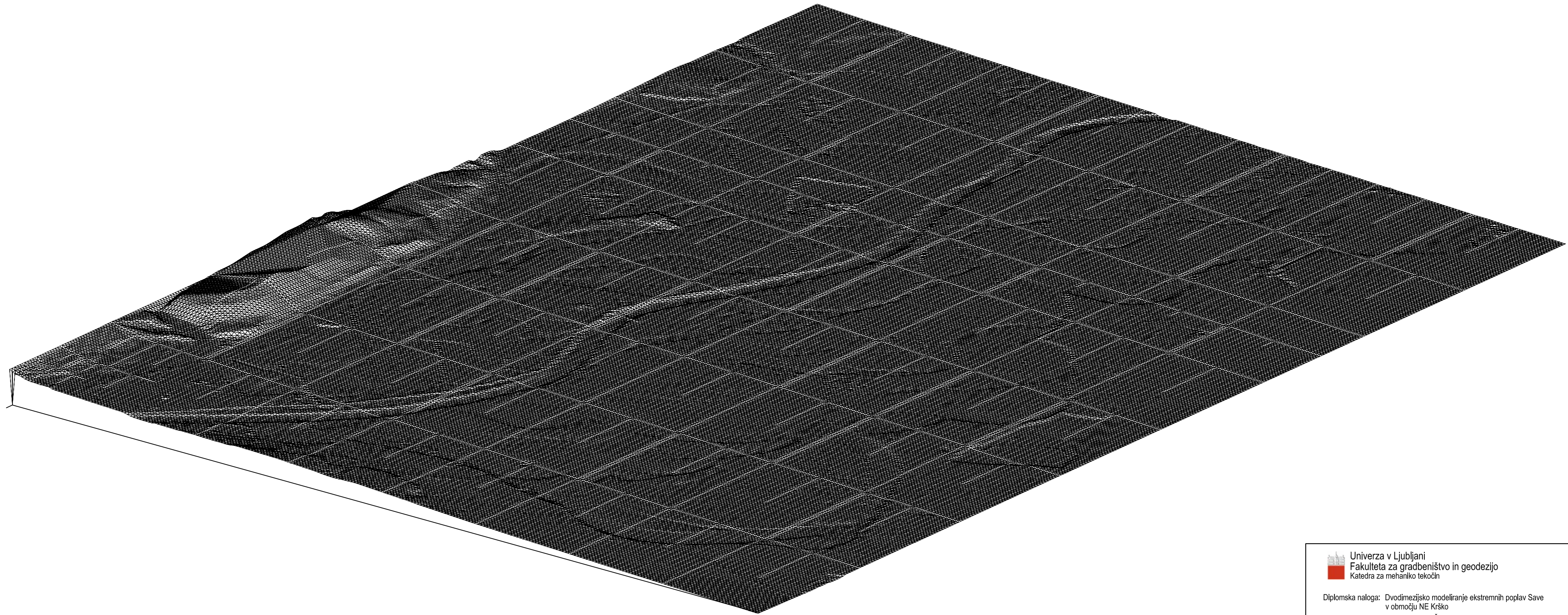
Priloga C6: Prečni profili za varianto C pri pretoku  $Q=7081\text{m}^3/\text{s}$   
M 1:20000

Priloga C7: Vzдолžni profil gladin v osi struge za bodoče stanje  
M 1:200/20000




**Univerza v Ljubljani**  
 Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo  
 Katedra za mehaniko tekočin

Diplomska naloga: Dvodimenzijsko modeliranje ekstremnih poplav Save v območju NE Krško  
 Mentor: prof. dr. Matjaž Četina  
 Somentorja: asist. dr. Mario Krzyk in dr. Andrej Širca  
 Izdelal: Tomaž Balut  
 Risba: Pregledna situacija obravnavanega območja s prikazom računskih točk  
 Številka priloge: A1 Merilo: 1:20000



Univerza v Ljubljani  
Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo  
Katedra za mehaniko tekočin

Diplomska naloga: Dvodimenzijsko modeliranje ekstremnih poplav Save  
v območju NE Krško

Mentor: prof. dr. Matjaž Četina

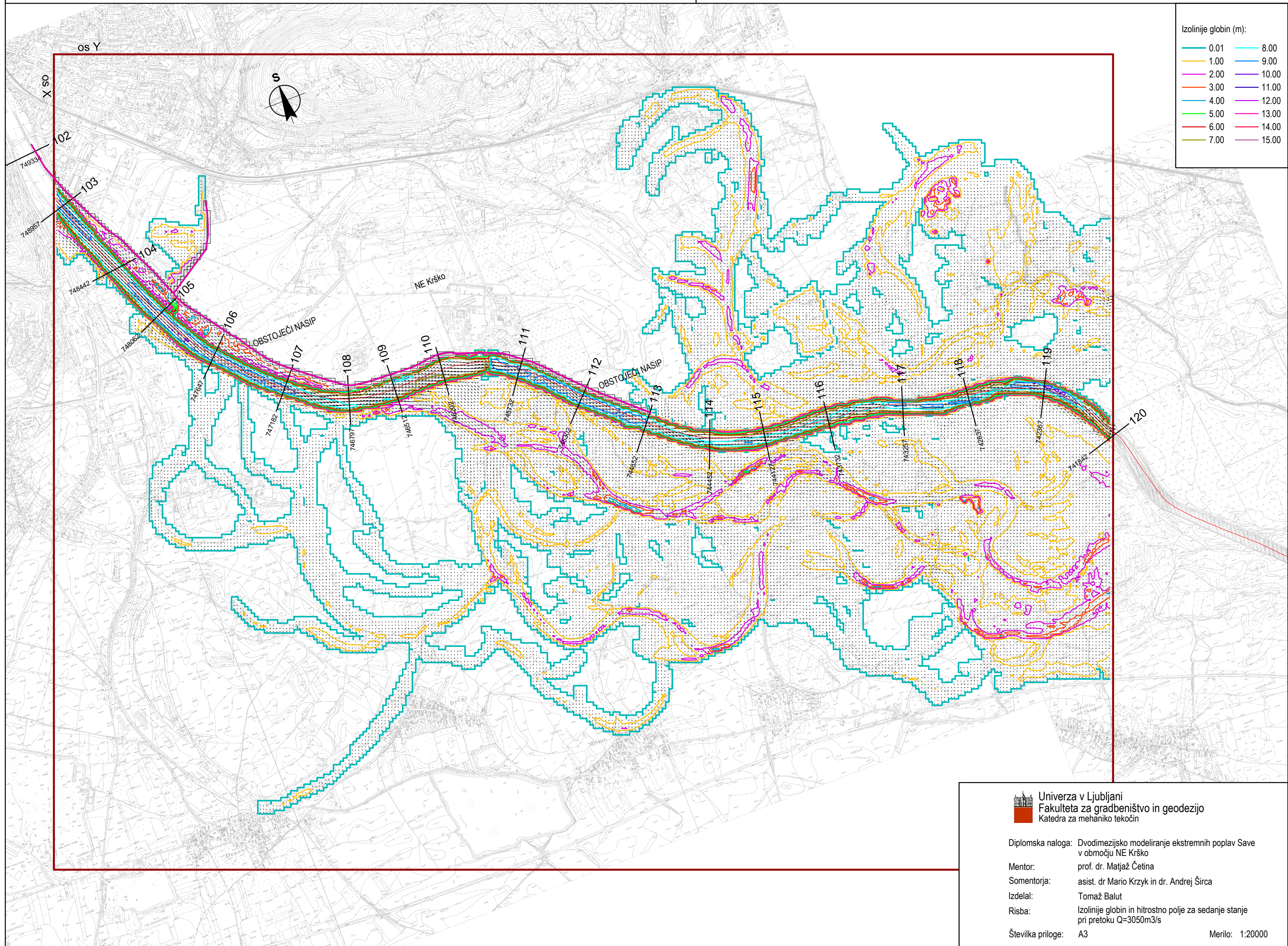
Somentorja: asist. dr. Marjo Krzyk in dr. Andrej Širca

Izdelal: Tomaž Balut

Risba: Aksonometrična slika obravnavanega območja  
za sedanje stanje terena

Številka priloge: A2

Merilo: 1:15000



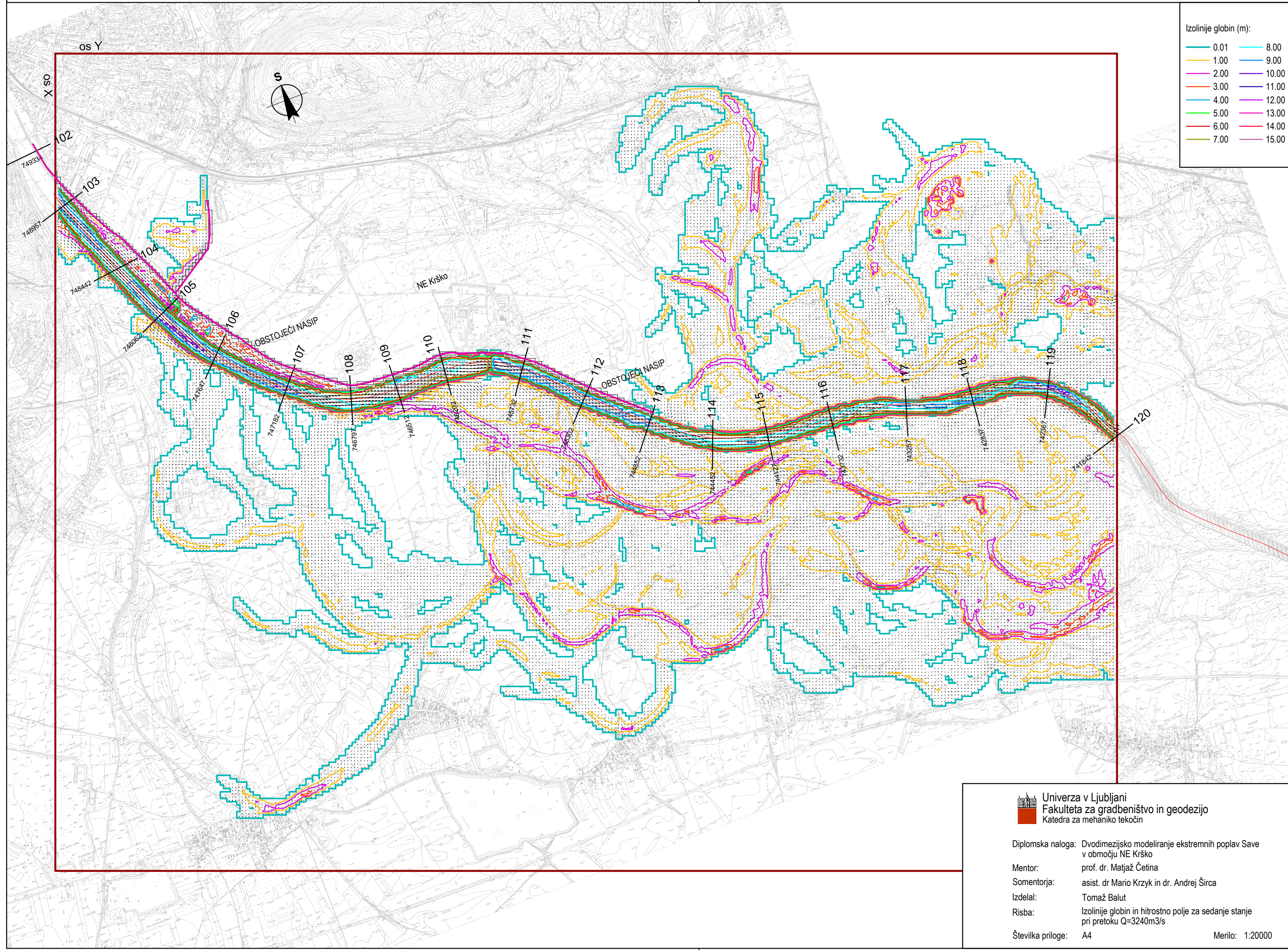
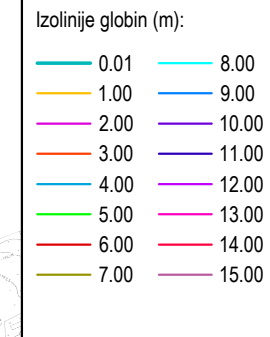
Izolinije globin (m):

0.01	8.00
1.00	9.00
2.00	10.00
3.00	11.00
4.00	12.00
5.00	13.00
6.00	14.00
7.00	15.00


**Univerza v Ljubljani**  
 Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo  
 Katedra za mehaniko tekočin

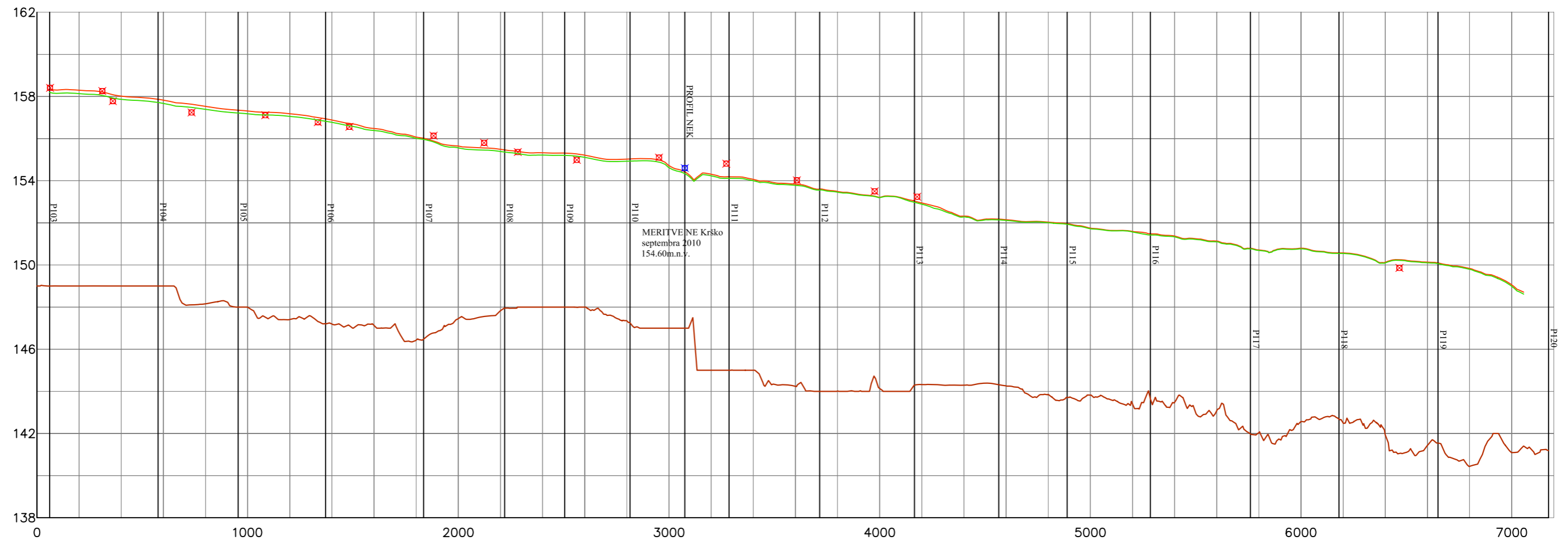
Diplomska naloga: Dvodimenzijsko modeliranje ekstremnih poplav Save v območju NE Krško  
 Mentor: prof. dr. Matjaž Četina  
 Somentorja: asist. dr. Mario Krzyk in dr. Andrej Širca  
 Izdelal: Tomaž Balut  
 Risba: Izolinije globin in hitrostno polje za sedanje stanje pri pretoku  $Q=3050\text{m}^3/\text{s}$   
 Številka priloge: A3 Merilo: 1:20000






**Univerza v Ljubljani**  
 Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo  
 Katedra za mehaniko tekočin

Diplomska naloga: Dvodimenzijsko modeliranje ekstremnih poplav Save v območju NE Krško  
 Mentor: prof. dr. Matjaž Četina  
 Somentorja: asist. dr. Mario Krzyk in dr. Andrej Širca  
 Izdelal: Tomaž Balut  
 Risba: Izolinije globin in hitrostno polje za sedanje stanje pri pretoku  $Q=3240\text{m}^3/\text{s}$   
 Številka priloge: A4 Merilo: 1:20000



ŠTEVILKA PROFILA	P103	P104	P105	P106	P107	P108	P109	P110	P111	P112	P113	P114	P115	P116	P117	P118	P119	P120
RELATIVNA STACIONAŽA (m)	60	575	955	1370	1835	2220	2505	2815	3285	3715	4165	4565	4890	5285	5760	6180	6650	7175
STACIONAŽA (m)	957	442	062	647	182	797	512	202	732	302	852	452	127	732	257	837	367	842
KILOMETRAŽA (km)	☒	748	☒	747	☒	746	☒	745	☒	744	☒	743	☒	742	☒	741	☒	740
KOTA DNA (m n.m.)	149.00	149.00	148.00	147.20	146.48	147.95	148.00	147.26	145.00	144.00	144.29	144.32	143.71	143.65	141.98	142.65	141.54	141.19
MERITVE I.1990	158.41	158.26 157.78	157.24	157.11	156.78	156.56	156.14	155.80	155.36	154.99	155.10	154.81	154.02	153.50	153.21	149.86		

## LEGENDA

- Dno
- ☒ Meritve leta 1990
- $Q = 3050 \text{ m}^3/\text{s}$
- $Q = 3240 \text{ m}^3/\text{s}$

Univerza v Ljubljani  
 Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo  
 Katedra za mehaniko tekočin

Diplomska naloga: Dvodimenzijsko modeliranje ekstremnih poplav Save v območju NE Krško

Mentor: prof. dr. Matjaž Četina

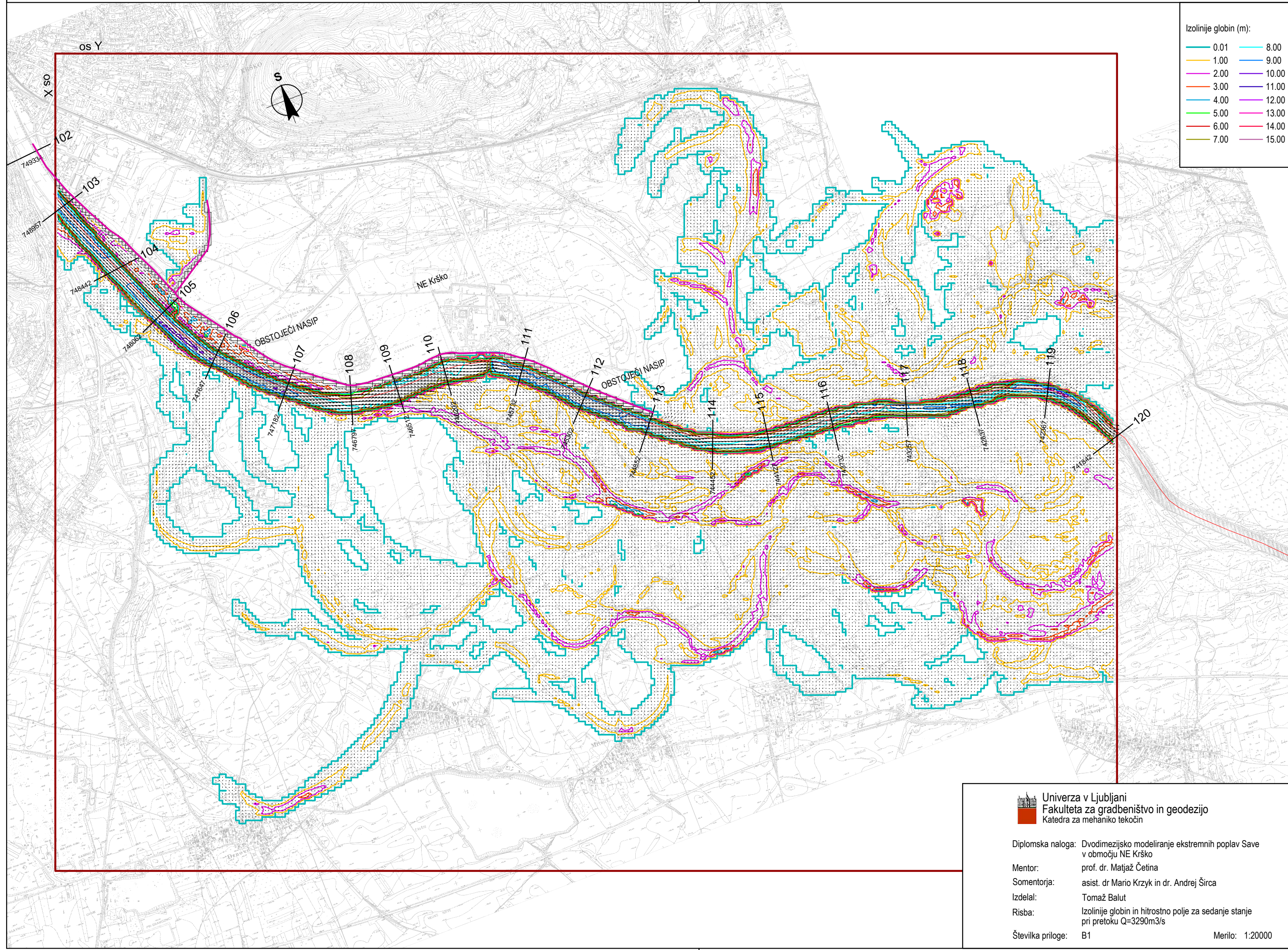
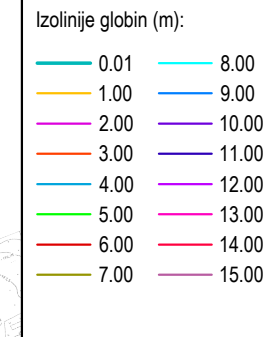
Somentorja: asist. dr. Mario Krzyk in dr. Andrej Širca

Izdelal: Tomaž Balut

Risba: Vzdolžni profil gladin v osi struge pri umerjanju matematičnega modela

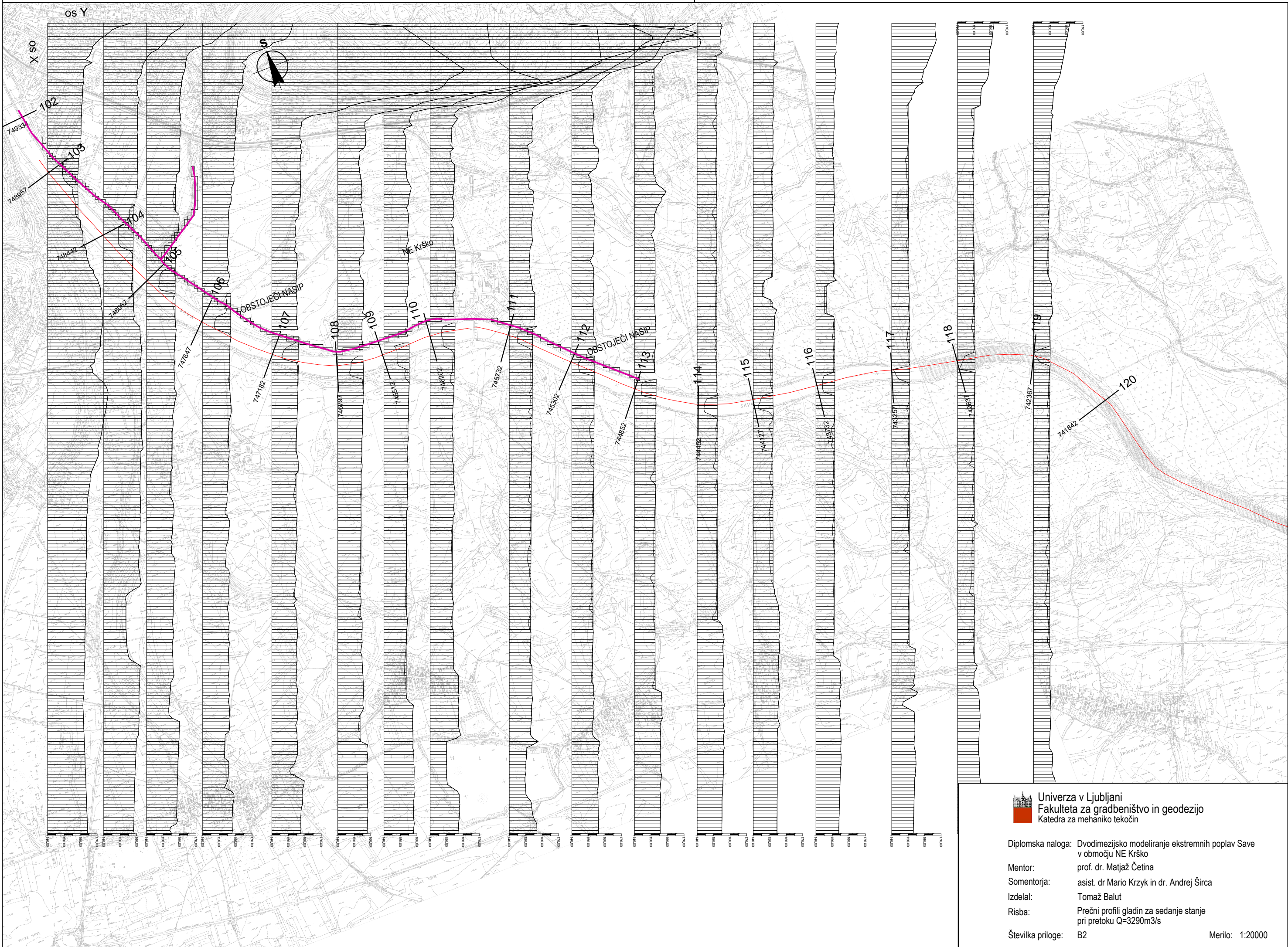
Številka priloge: A5

Merilo: 1:200/20000



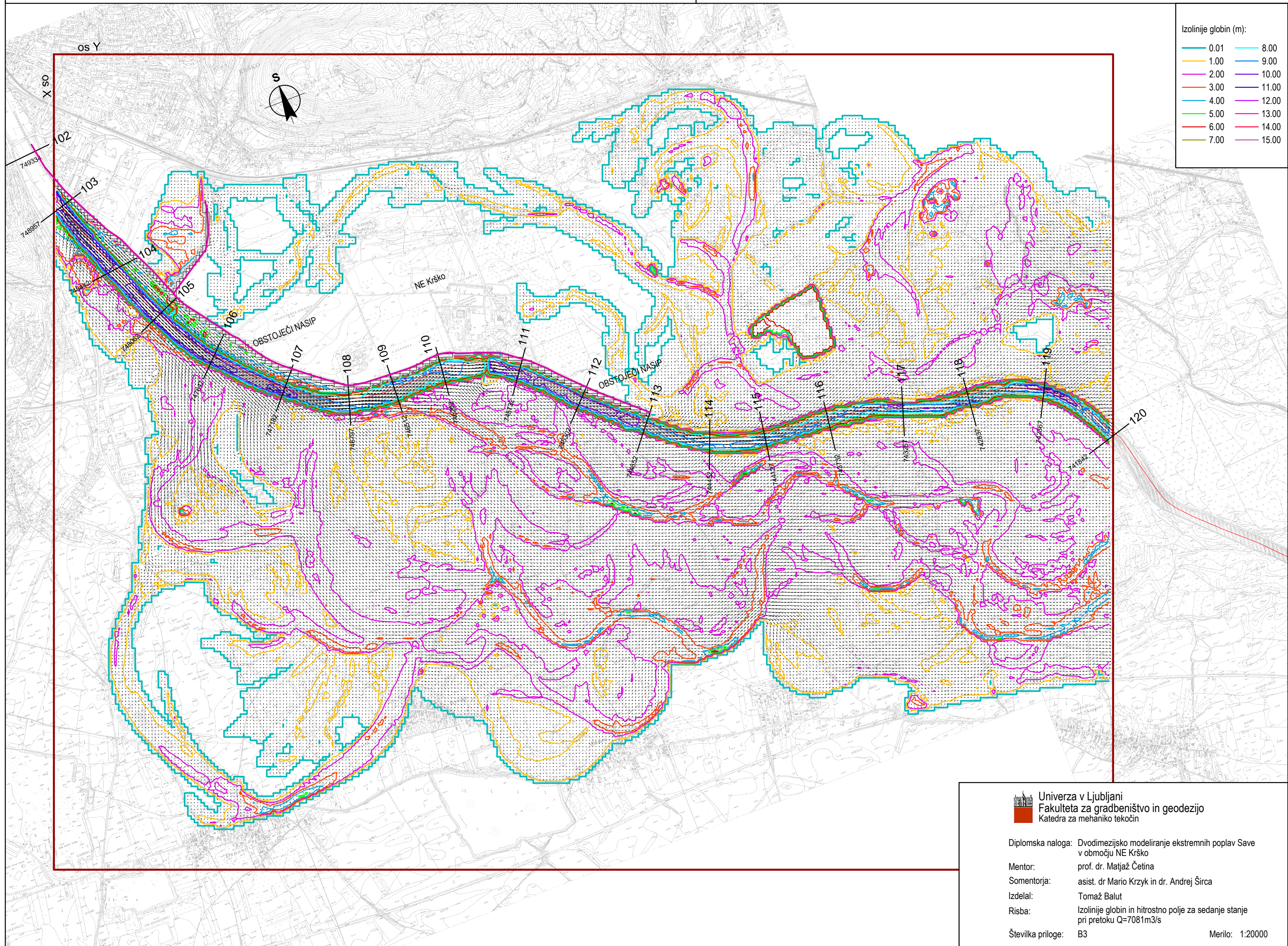

**Univerza v Ljubljani**  
 Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo  
 Katedra za mehaniko tekočin

Diplomska naloga: Dvodimenzijsko modeliranje ekstremnih poplav Save v območju NE Krško  
 Mentor: prof. dr. Matjaž Četina  
 Somentorja: asist. dr. Mario Krzyk in dr. Andrej Širca  
 Izdelal: Tomaž Balut  
 Risba: Izolinije globin in hitrostno polje za sedanje stanje pri pretoku  $Q=3290\text{m}^3/\text{s}$   
 Številka priloge: B1 Merilo: 1:20000




**Univerza v Ljubljani**  
**Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo**  
 Katedra za mehaniko tekočin

Diplomska naloga: Dvodimenzijsko modeliranje ekstremnih poplav Save v območju NE Krško  
 Mentor: prof. dr. Matjaž Četina  
 Somentorja: asist. dr. Mario Krzyk in dr. Andrej Širca  
 Izdelal: Tomaž Balut  
 Risba: Prečni profili gladin za sedanje stanje pri pretoku  $Q=3290\text{m}^3/\text{s}$   
 Številka priloge: B2 Merilo: 1:20000

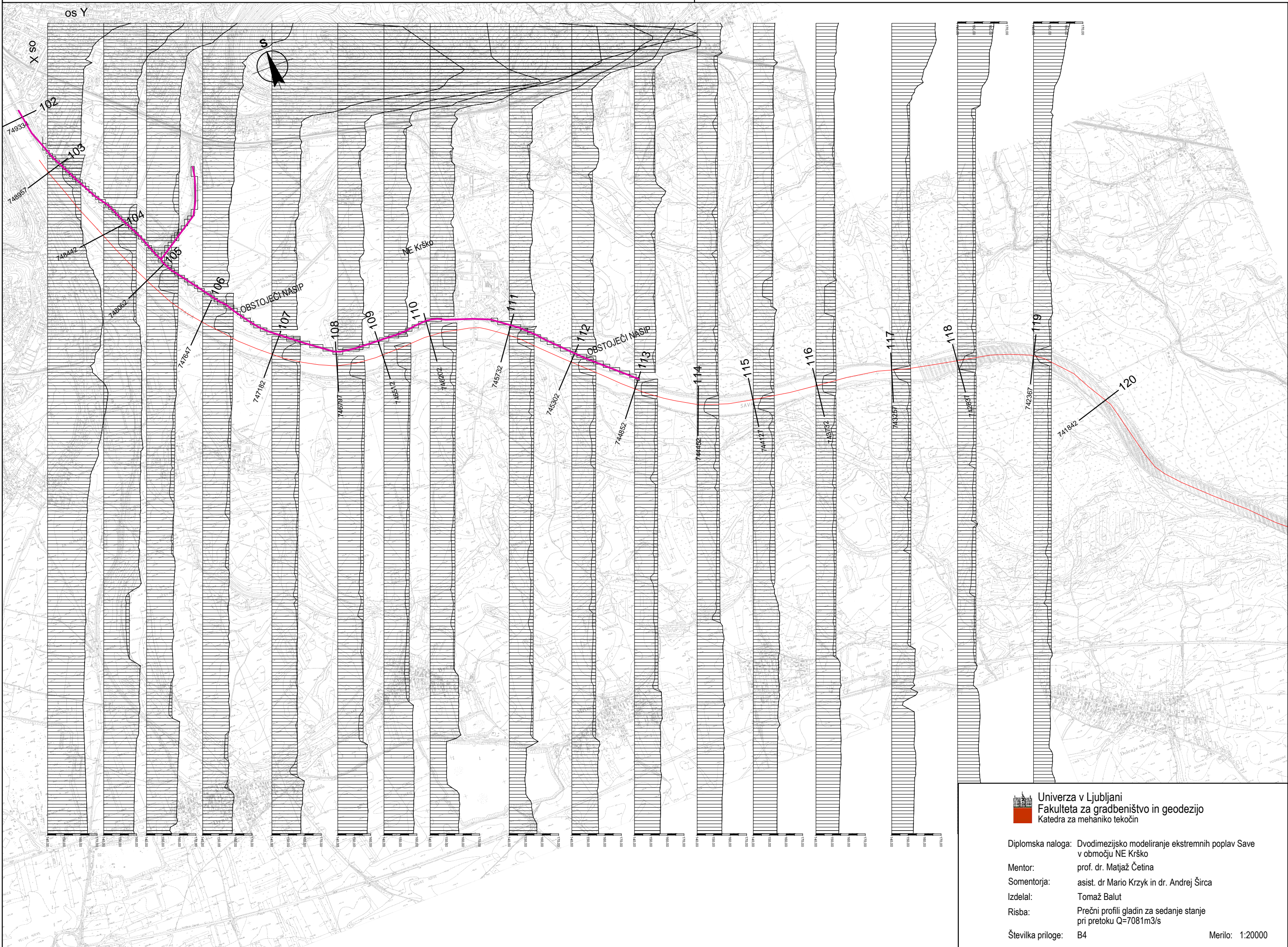


Izolinije globin (m):

0.01	8.00
1.00	9.00
2.00	10.00
3.00	11.00
4.00	12.00
5.00	13.00
6.00	14.00
7.00	15.00

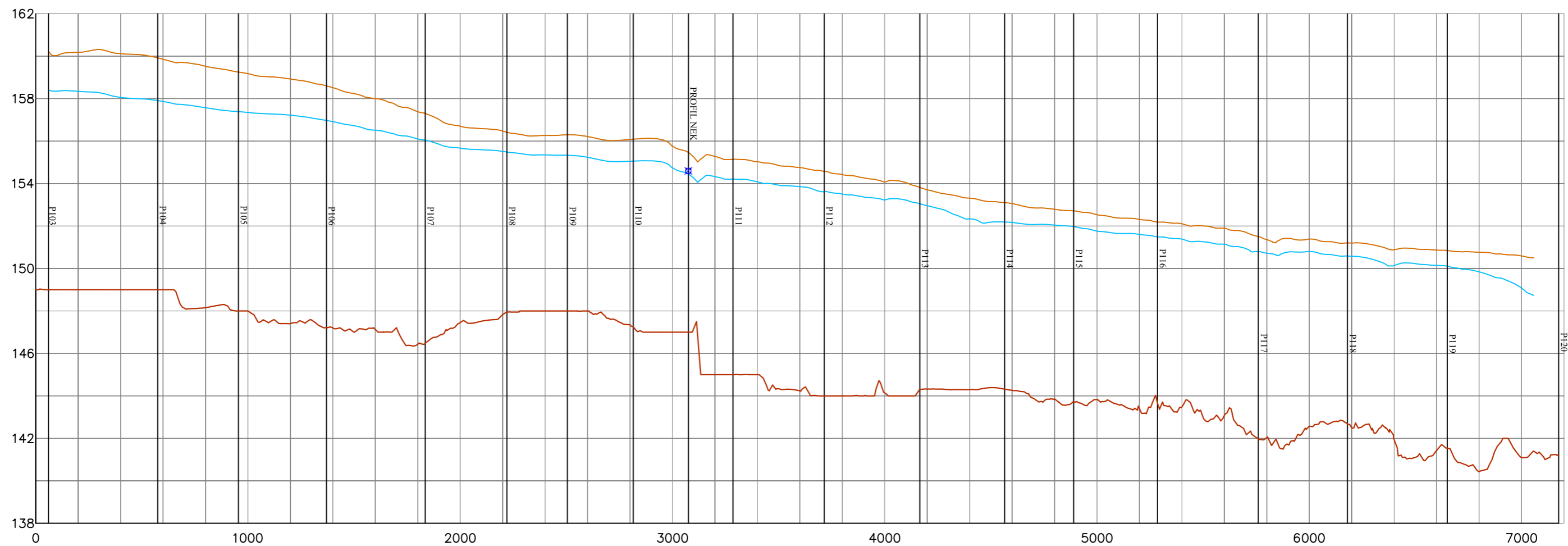

**Univerza v Ljubljani**  
**Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo**  
 Katedra za mehaniko tekočin

Diplomska naloga: Dvodimenzijsko modeliranje ekstremnih poplav Save v območju NE Krško  
 Mentor: prof. dr. Matjaž Četina  
 Somentorja: asist. dr. Mario Krzyk in dr. Andrej Širca  
 Izdelal: Tomaž Balut  
 Risba: Izolinije globin in hitrostno polje za sedanje stanje pri pretoku  $Q=7081\text{m}^3/\text{s}$   
 Številka priloge: B3 Merilo: 1:20000




**Univerza v Ljubljani**  
**Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo**  
 Katedra za mehaniko tekočin

Diplomska naloga: Dvodimenzijsko modeliranje ekstremnih poplav Save v območju NE Krško  
 Mentor: prof. dr. Matjaž Četina  
 Somentorja: asist. dr. Mario Krzyk in dr. Andrej Širca  
 Izdelal: Tomaž Balut  
 Risba: Prečni profili gladin za sedanje stanje pri pretoku  $Q=7081\text{m}^3/\text{s}$   
 Številka priloge: B4 Merilo: 1:20000



ŠTEVILKA PROFILA	P103	P104	P105	P106	P107	P108	P109	P110	P111	P112	P113	P114	P115	P116	P117	P118	P119	P120
RELATIVNA STACIONAŽA (m)	60	575	955	1370	1835	2220	2505	2815	3285	3715	4165	4565	4890	5285	5760	6180	6650	7175
STACIONAŽA (m)	957	442	062	647	182	797	512	202	732	302	852	452	127	732	257	837	367	842
KILOMETRAŽA (km)	⊗	748	⊗	747	⊗	746	⊗	745	⊗	744	⊗	743	⊗	742	⊗	741	⊗	740
KOTA DNA (m n.m.)	149.00	149.00	148.00	147.20	146.48	147.95	148.00	147.26	145.00	144.00	144.29	144.32	143.71	143.65	141.98	142.65	141.54	141.19
MERITVE l.1990	158.41	158.26 157.78	157.24	157.11	156.78 156.56	156.14	155.80	155.36	154.99	155.10	154.81	154.02	153.50	153.21	149.86	149.86	149.86	149.86

## LEGENDA

- Dno
- $Q_{100} = 3290 \text{ m}^3/\text{s}$
- $Q_{PMF} = 7081 \text{ m}^3/\text{s}$

Univerza v Ljubljani  
 Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo  
 Katedra za mehaniko tekočin

Diplomska naloga: Dvodimenzijsko modeliranje ekstremnih poplav Save v območju NE Krško

Mentor: prof. dr. Matjaž Četina

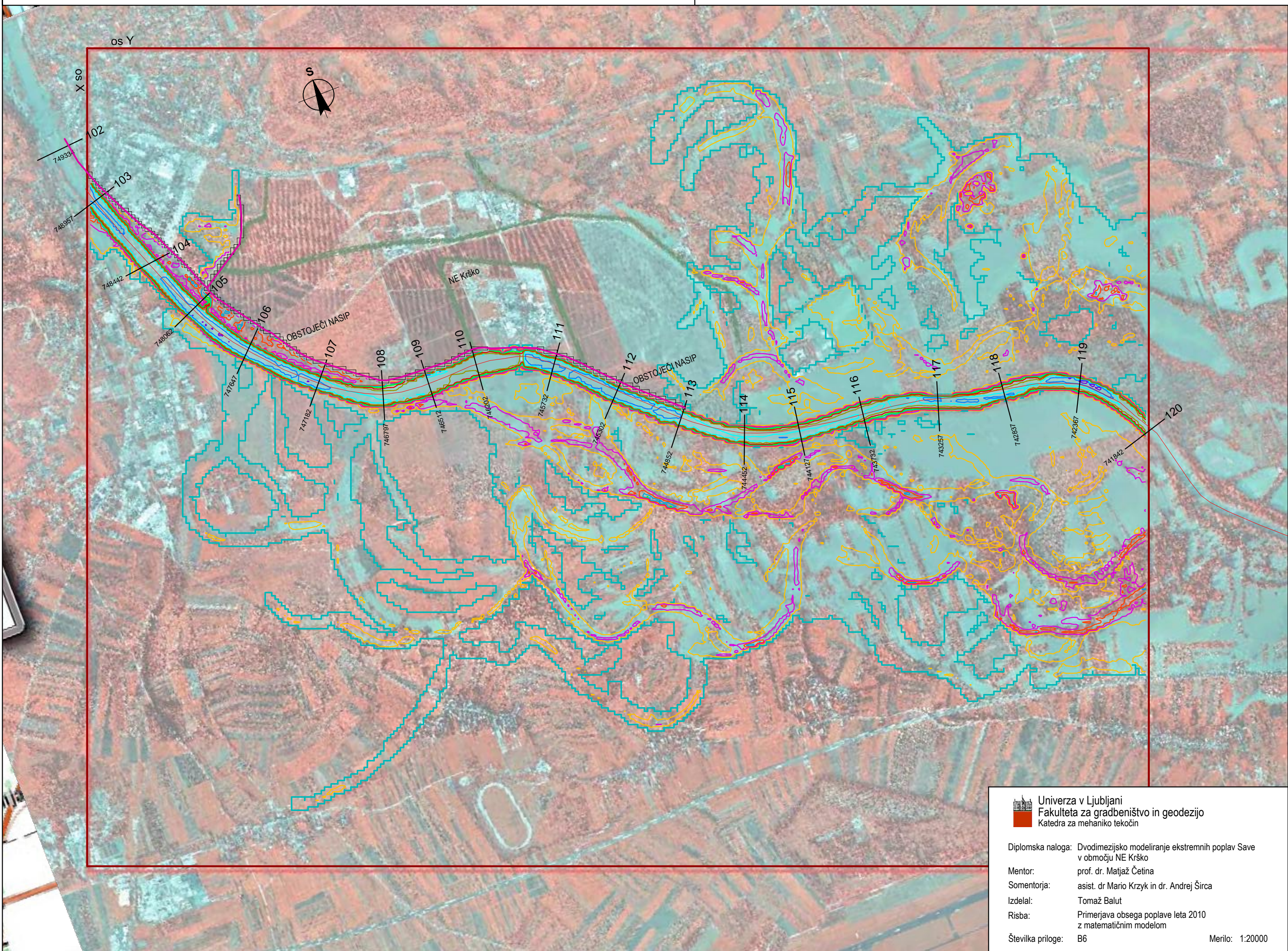
Somentorja: asist. dr. Mario Krzyk in dr. Andrej Širca

Izdelal: Tomaž Balut

Risba: Vzdolžni profil gladin v osi struge za sedanje stanje terena

Številka priloge: B5

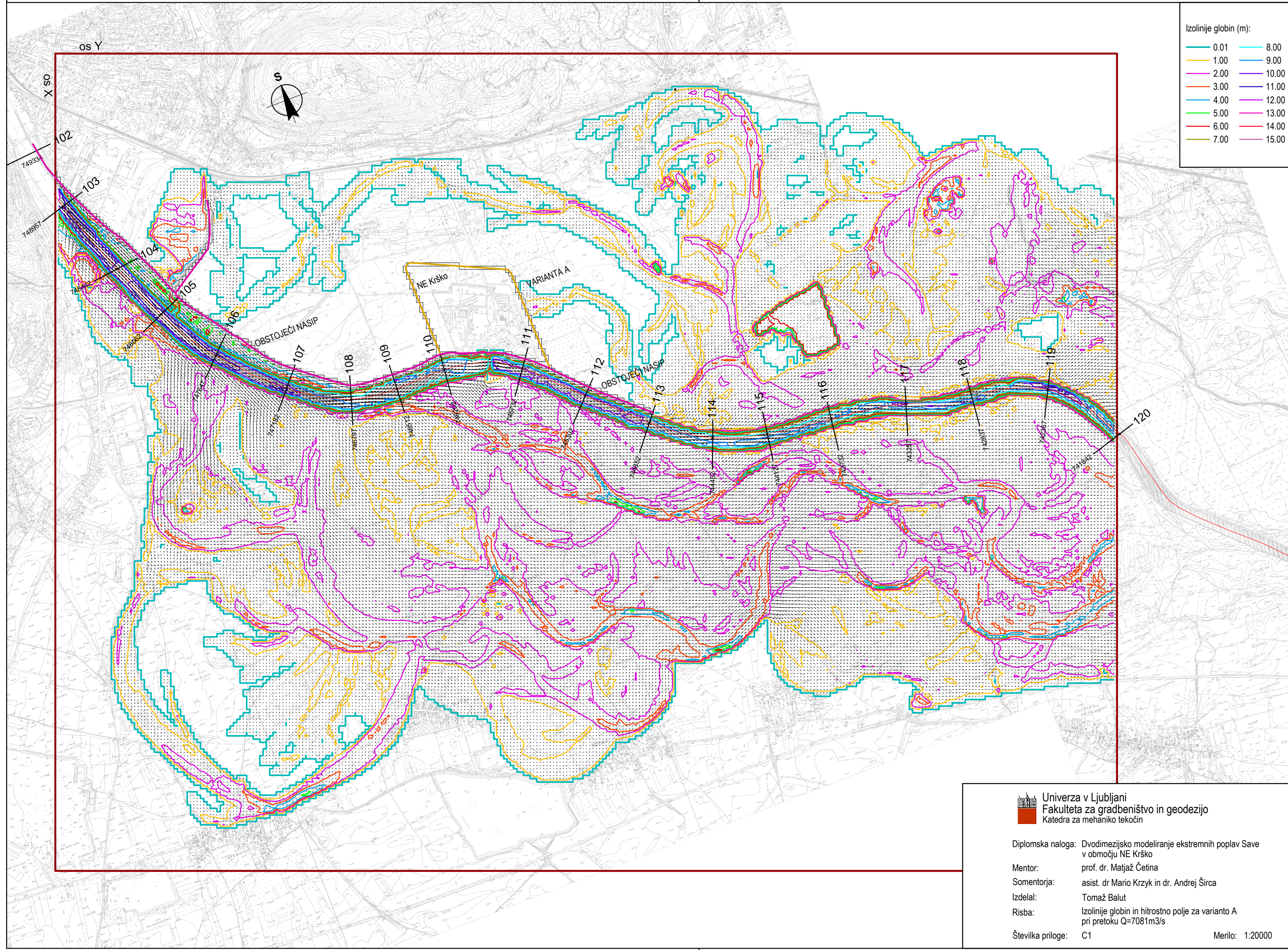
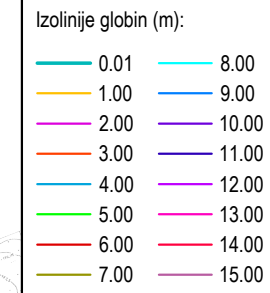
Merilo: 1:200/20000




**Univerza v Ljubljani**  
**Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo**  
 Katedra za mehaniko tekočin

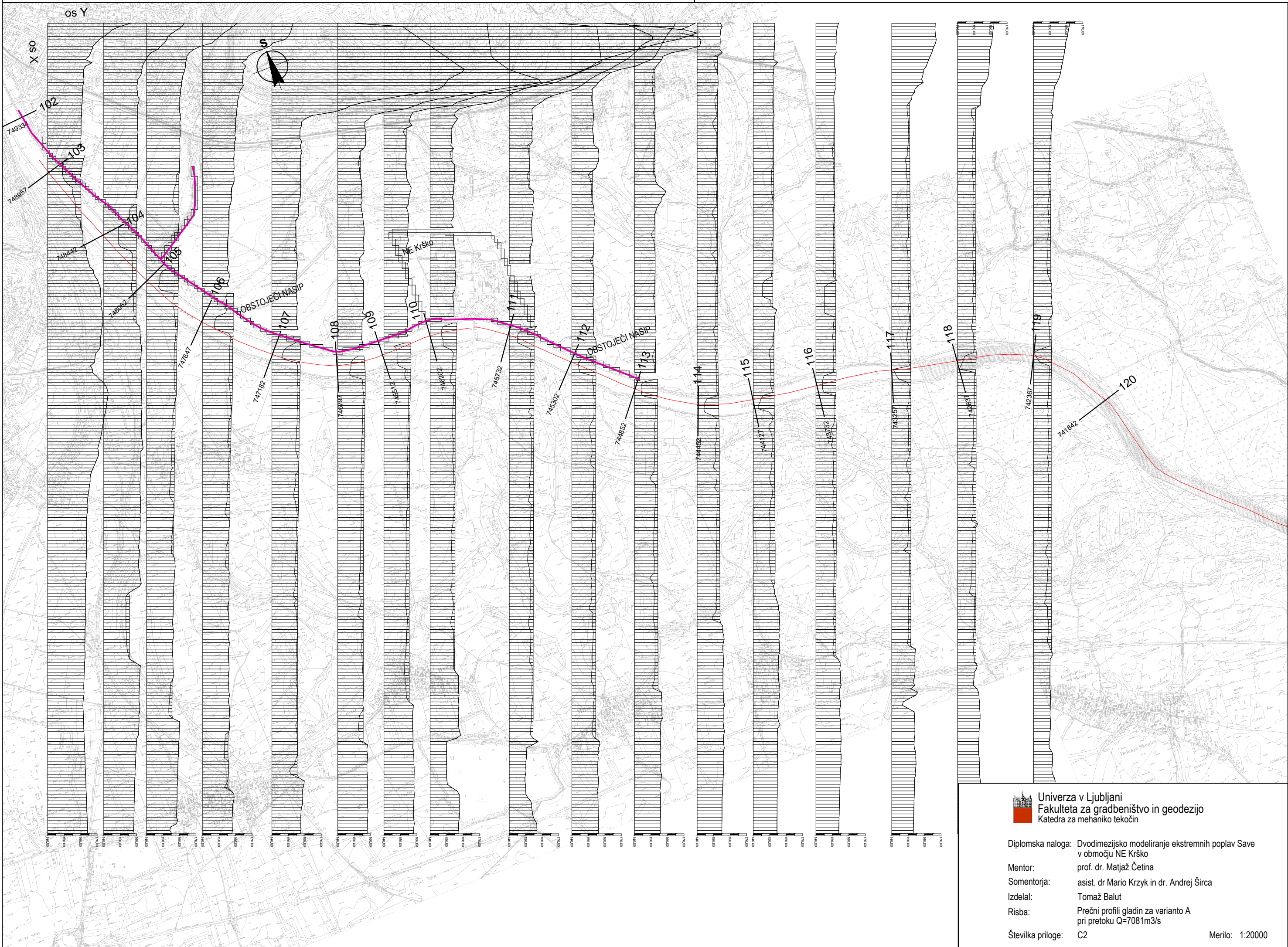
Diplomska naloga: Dvodimenzijsko modeliranje ekstremnih poplav Save v območju NE Krško  
 Mentor: prof. dr. Matjaž Četina  
 Somentorja: asist. dr. Mario Krzyk in dr. Andrej Širca  
 Izdelal: Tomaž Balut  
 Risba: Primerjava obsega poplave leta 2010 z matematičnim modelom  
 Številka priloge: B6 Merilo: 1:20000





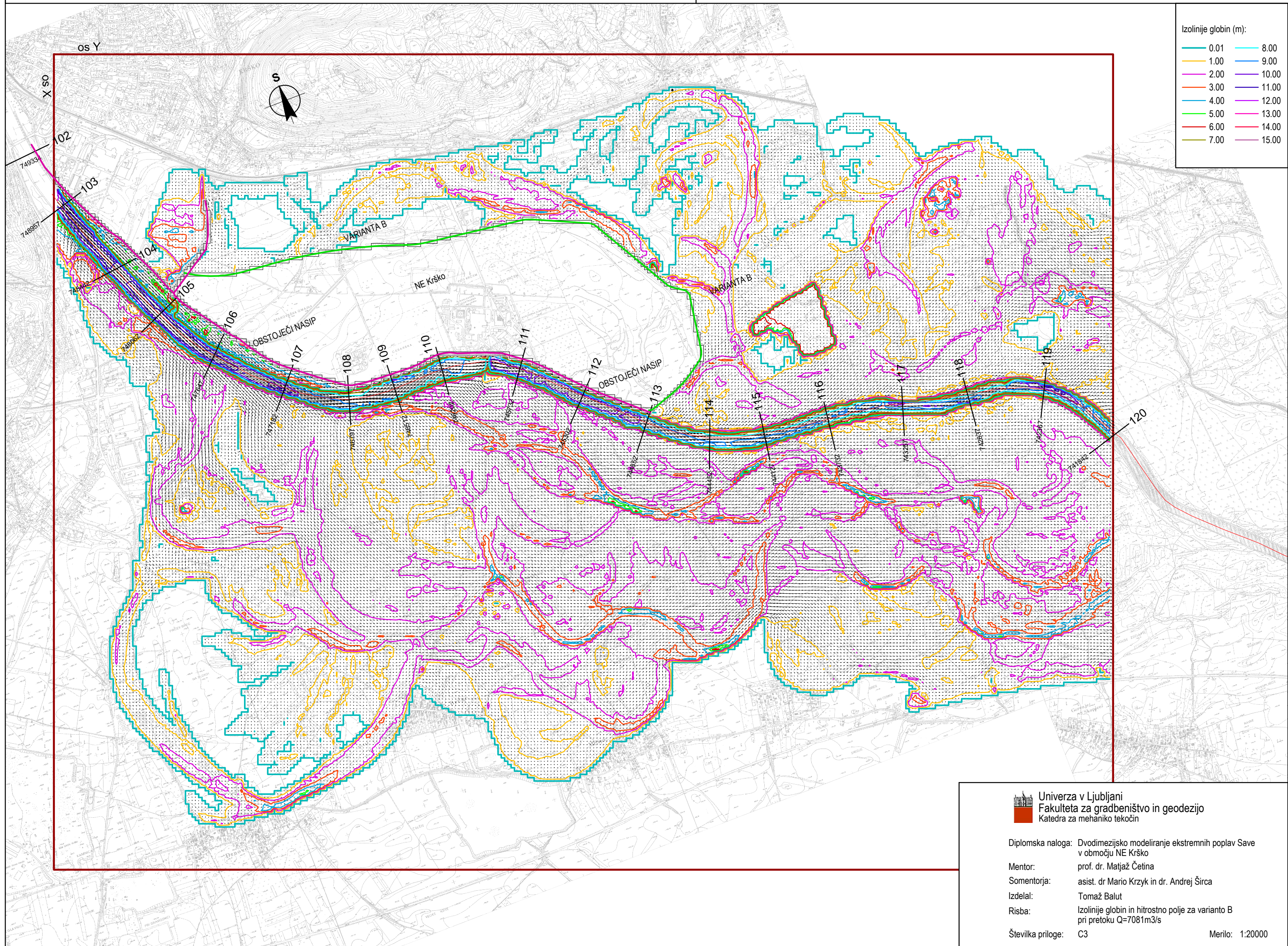

**Univerza v Ljubljani**  
 Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo  
 Katedra za mehaniko tekočin

Diplomska naloga: Dvodimenzijsko modeliranje ekstremnih poplav Save v območju NE Krško  
 Mentor: prof. dr. Matjaž Četina  
 Somentorja: asist. dr. Mario Krzyk in dr. Andrej Širca  
 Izdelal: Tomaž Balut  
 Risba: Izolinije globin in hitrostno polje za varianto A pri pretoku  $Q=7081\text{m}^3/\text{s}$   
 Številka priloge: C1 Merilo: 1:20000



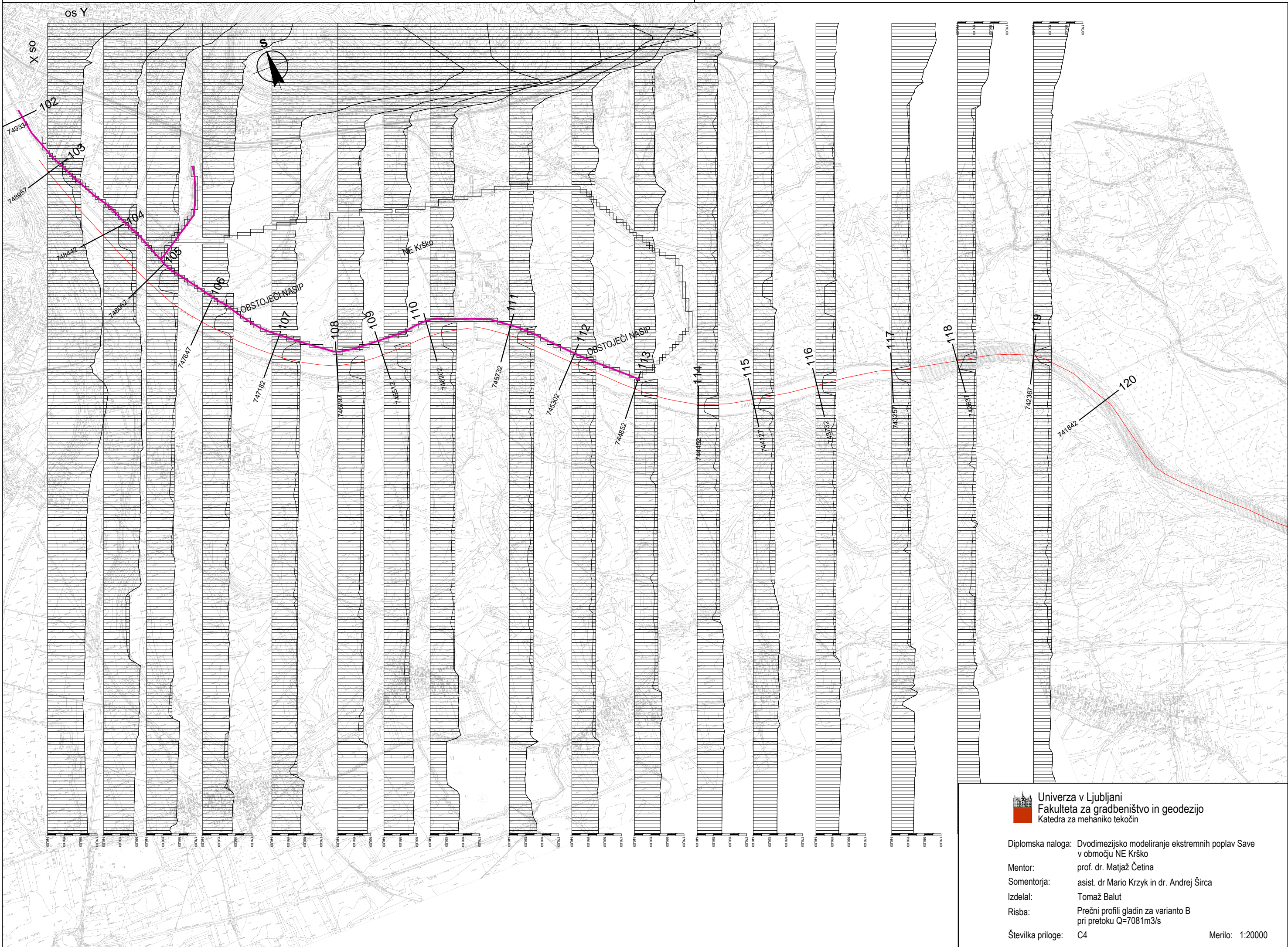

**Univerza v Ljubljani**  
**Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo**  
 Katedra za mehaniko tekočin

Diplomska naloga: Dvodimenzijsko modeliranje ekstremnih poplav Save v območju NE Krško  
 Mentor: prof. dr. Matjaž Četina  
 Somentorja: asist. dr. Mario Krzyk in dr. Andrej Širca  
 Izdelal: Tomaž Balut  
 Risba: Prečni profili gladin za varianto A pri pretoku  $Q=7081\text{m}^3/\text{s}$   
 Številka priloge: C2 Merilo: 1:20000



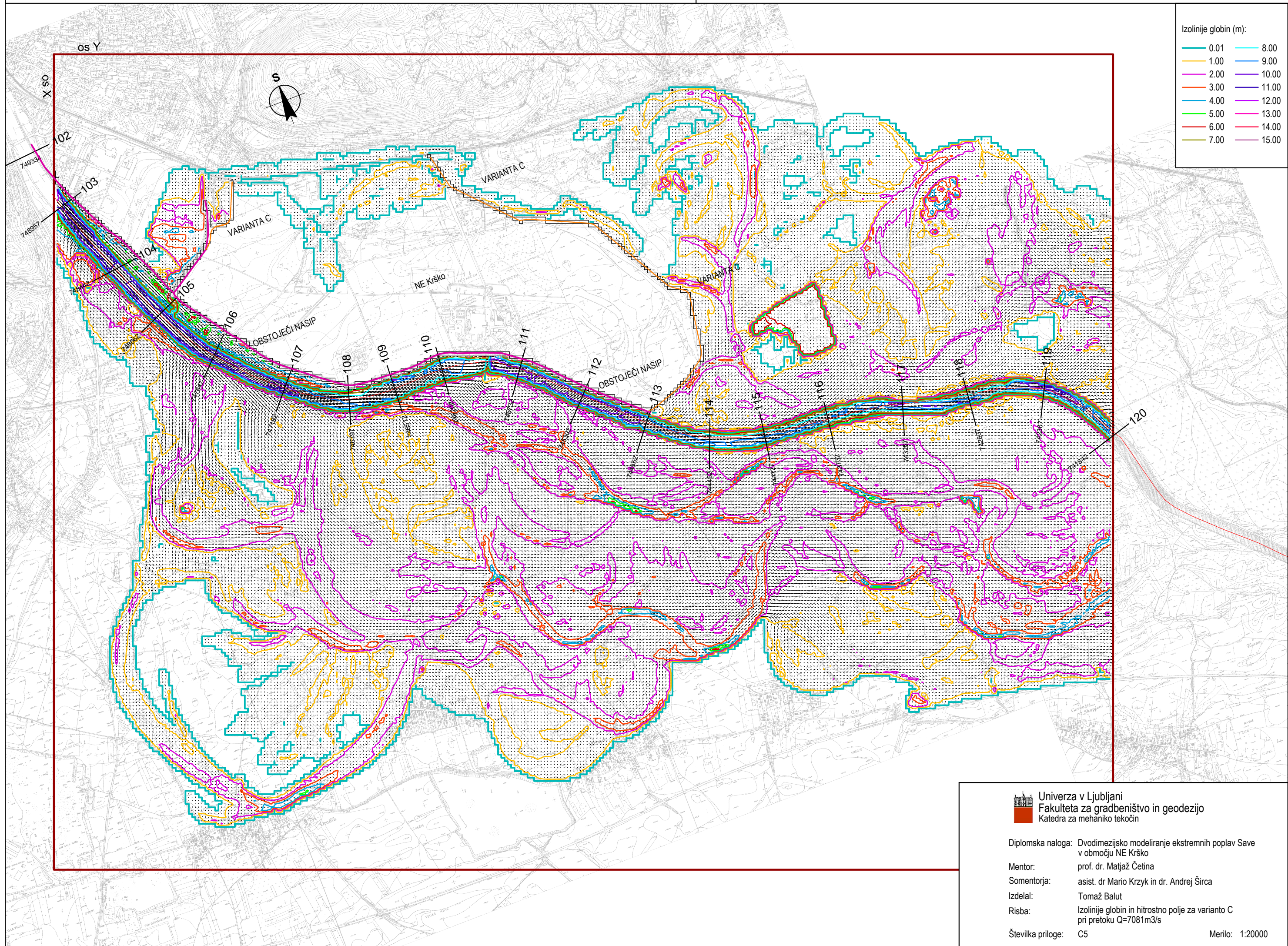

**Univerza v Ljubljani**  
**Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo**  
 Katedra za mehaniko tekočin

Diplomska naloga: Dvodimenzijsko modeliranje ekstremnih poplav Save v območju NE Krško  
 Mentor: prof. dr. Matjaž Četina  
 Somentorja: asist. dr. Mario Krzyk in dr. Andrej Širca  
 Izdelal: Tomaž Balut  
 Risba: Izolinije globin in hitrostno polje za varianto B pri pretoku  $Q=7081\text{m}^3/\text{s}$   
 Številka priloge: C3 Merilo: 1:20000





**Univerza v Ljubljani**  
**Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo**  
 Katedra za mehaniko tekočin

Diplomska naloga: Dvodimenzijsko modeliranje ekstremnih poplav Save v območju NE Krško  
 Mentor: prof. dr. Matjaž Četina  
 Somentorja: asist. dr. Mario Krzyk in dr. Andrej Širca  
 Izdelal: Tomaž Balut  
 Risba: Prečni profili gladin za varianto B pri pretoku  $Q=7081\text{m}^3/\text{s}$   
 Številka priloge: C4 Merilo: 1:20000

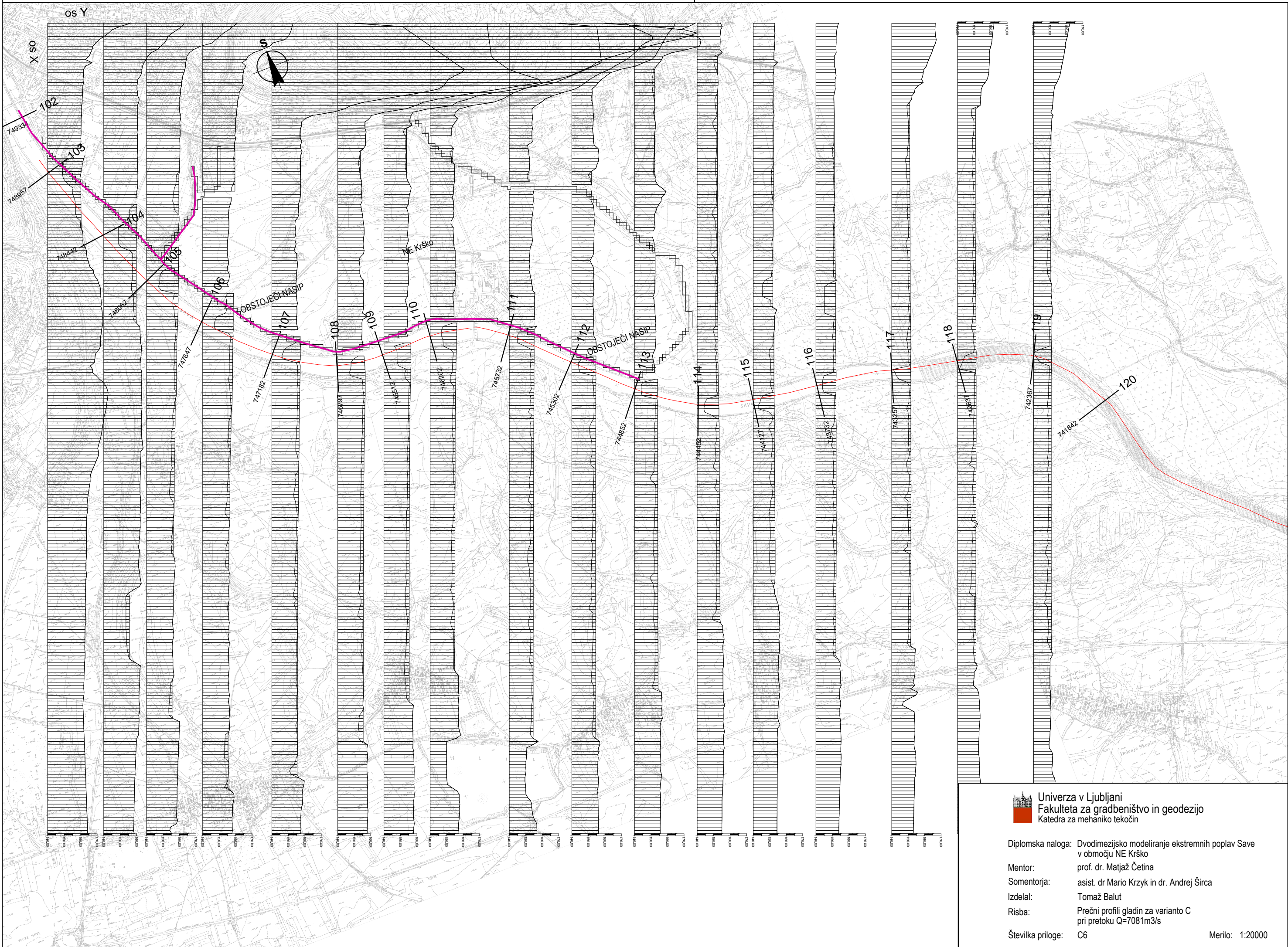


Izolije globin (m):

0.01	8.00
1.00	9.00
2.00	10.00
3.00	11.00
4.00	12.00
5.00	13.00
6.00	14.00
7.00	15.00

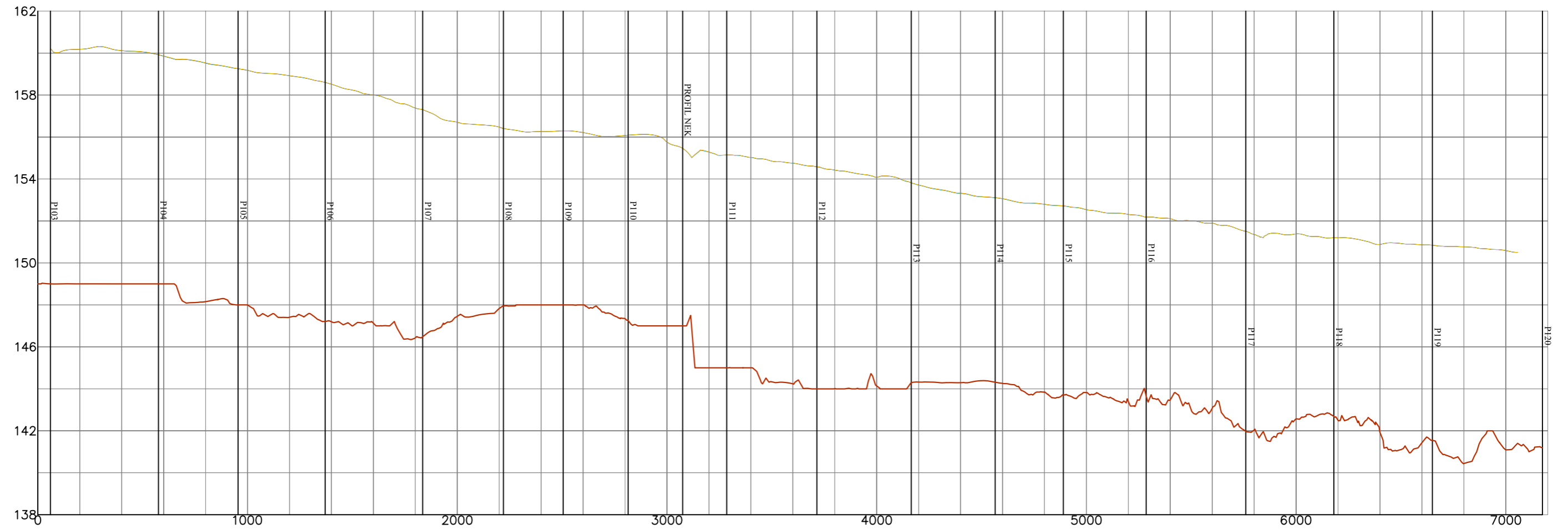

**Univerza v Ljubljani**  
**Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo**  
 Katedra za mehaniko tekočin

Diplomska naloga: Dvodimenzijsko modeliranje ekstremnih poplav Save v območju NE Krško  
 Mentor: prof. dr. Matjaž Četina  
 Somentorja: asist. dr. Mario Krzyk in dr. Andrej Širca  
 Izdelal: Tomaž Balut  
 Risba: Izolinije globin in hitrostno polje za varianto C pri pretoku  $Q=7081\text{m}^3/\text{s}$   
 Številka priloge: C5 Merilo: 1:20000




**Univerza v Ljubljani**  
**Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo**  
 Katedra za mehaniko tekočin

Diplomska naloga: Dvodimenzijsko modeliranje ekstremnih poplav Save v območju NE Krško  
 Mentor: prof. dr. Matjaž Četina  
 Somentorja: asist. dr. Mario Krzyk in dr. Andrej Širca  
 Izdelal: Tomaž Balut  
 Risba: Prečni profili gladin za varianto C pri pretoku  $Q=7081\text{m}^3/\text{s}$   
 Številka priloge: C6 Merilo: 1:20000



ŠTEVILKA PROFILA	P103	P104	P105	P106	P107	P108	P109	P110	P111	P112	P113	P114	P115	P116	P117	P118	P119	P120
RELATIVNA STACIONAŽA (m)	60	575	955	1370	1835	2220	2505	2815	3285	3715	4165	4565	4890	5285	5760	6180	6650	7175
STACIONAŽA (m)	957	442	62	647	182	797	512	202	732	302	852	452	127	732	257	837	367	842
KILOMETRAŽA (km)	☒	748	☒	747	☒	746	☒	745	☒	744	☒	743	☒	742	☒	741	☒	740
KOTA DNA (m n.m.)	149.00	149.00	148.00	147.20	146.48	147.95	148.00	147.26	145.00	144.00	144.29	144.32	143.71	143.65	141.98	142.65	141.54	141.19
MERITVE I.1990	158.41	158.26 157.78	157.24	157.11	156.78 156.56	156.14	155.80	155.36	154.99	155.10	154.81	154.02	153.50	153.21	149.86			

## LEGENDA

- Dno
- Varianta A  $Q_{PMF} = 7081 \text{ m}^3/\text{s}$
- Varianta B  $Q_{PMF} = 7081 \text{ m}^3/\text{s}$
- Varianta C  $Q_{PMF} = 7081 \text{ m}^3/\text{s}$

Univerza v Ljubljani  
 Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo  
 Katedra za mehaniko tekočin

Diplomska naloga: Dvodimenzijsko modeliranje ekstremnih poplav Save v območju NE Krško

Mentor: prof. dr. Matjaž Četina  
 Somentorja: asist. dr. Mario Krzyk in dr. Andrej Širca  
 Izdelal: Tomaž Balut  
 Risba: Vzdolžni profil gladin v osi struge za bodoče stanje

Številka priloge: C7

Merilo: 1:200/20000