

Univerza  
v Ljubljani  
Fakulteta  
*za gradbeništvo  
in geodezijo*



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

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

V zbirki je izvorna različica izdajatelja.

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

University  
of Ljubljana  
Faculty of  
*Civil and Geodetic  
Engineering*



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

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

This is a publisher's version PDF file.

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

Biro, A. 2016. Modeliranje vpliva površinskih vodotokov na gladino podzemne vode Prekmurskega polja. Magistrsko delo. = Modeling the influence of surface waters on the head of Prekmursko polje groundwater body. M. Sc. Thesis. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 101 str. (mentor: Brilly, M.).

<http://drugg.fgg.uni-lj.si/6151/>

Univerza  
v Ljubljani  
Fakulteta  
*za gradbeništvo  
in geodezijo*

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



UNIVERZITETNI PODIPLOMSKI  
ŠTUDIJSKI PROGRAM  
VARSTVO OKOLJA

MAGISTRSKI ŠTUDIJ

Kandidat:

**ANDREJ BIRO, univ. dipl. inž. vod. in kom. inž.**

**MODELIRANJE VPLIVA POVRŠINSKIH VODOTOKOV  
NA GLADINO PODZEMNE VODE PREKMURSKEGA  
POLJA**

**Magistrsko delo štev.: 264**

**MODELING THE INFLUENCE OF SURFACE WATERS  
ON THE HEAD OF PREKMURSKO POLJE  
GROUNDWATER BODY**

**Master of Science Thesis No.: 264**

**Člani komisije:**

prof. dr. Mihael J. Toman  
prof. dr. Marina Pintar  
prof. dr. Matjaž Mikoš

**Mentor in predsednik komisije:**

prof. dr. Mitja Brilly

Ljubljana, 6. september 2016

Ta stran je namenoma prazna.

## **STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA**

<b>Stran z napako</b>	<b>Vrstica z napako</b>	<b>Namesto</b>	<b>Naj bo</b>
-----------------------	-------------------------	----------------	---------------



Ta stran je namenoma prazna.

## IZJAVA O AVTORSTVU

Spodaj podpisani študent **Andrej Biro**, vpisna številka **74060447**, avtor pisnega zaključnega dela študija z naslovom: **Modeliranje vpliva površinskih vodotokov na gladino podzemne vode Prekmurskega polja**

### IZJAVLJAM

1. *Obkrožite eno od variant a) ali b)*

- a) da je pisno zaključno delo študija rezultat mojega samostojnega dela;
- b) da je pisno zaključno delo študija rezultat lastnega dela več kandidatov in izpolnjuje pogoje, ki jih Statut UL določa za skupna zaključna dela študija ter je v zahtevanem deležu rezultat mojega samostojnega dela;

2. da je tiskana oblika pisnega zaključnega dela študija istovetna elektronski obliki pisnega zaključnega dela študija;

3. da sem pridobil/-a vsa potrebna dovoljenja za uporabo podatkov in avtorskih del v pisnem zaključnem delu študija in jih v pisnem zaključnem delu študija jasno označil/-a;

4. da sem pri pripravi pisnega zaključnega dela študija ravnal/-a v skladu z etičnimi načeli in, kjer je to potrebno, za raziskavo pridobil/-a soglasje etične komisije;

5. soglašam, da se elektronska oblika pisnega zaključnega dela študija uporabi za preverjanje podobnosti vsebine z drugimi deli s programsko opremo za preverjanje podobnosti vsebine, ki je povezana s študijskim informacijskim sistemom članice;

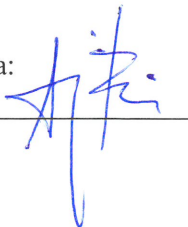
6. da na UL neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravico shranitve avtorskega dela v elektronski obliki, pravico reproduciranja ter pravico dajanja pisnega zaključnega dela študija na voljo javnosti na svetovnem spletu preko Repozitorija UL;

7. da dovoljujem objavo svojih osebnih podatkov, ki so navedeni v pisnem zaključnem delu študija in tej izjavi, skupaj z objavo pisnega zaključnega dela študija.

V: Ljubljani

Datum: 6. september 2016

Podpis študenta:



Ta stran je namenoma prazna.

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

**UDK:** 556.5:556.3(0.43.3)  
**Avtor:** Andrej Biro  
**Mentor:** prof. dr. Mitja Brilly  
**Naslov:** Modeliranje vpliva površinskih vodotokov na gladino podzemne vode Prekmurskega polja  
**Tip dokumenta:** Magistrsko delo  
**Obseg in oprema:** 101 str., 2 pregl., 15 sl., 10 graf., 4 pril.  
**Ključne besede:** Modeliranje, površinske vode, podzemne vode, HEC - RAS, MODFLOW

### **Izveček:**

Poudarek naloge je na simulaciji vpliva reke Mure na vodno telo vodonosnika Mursko in Prekmursko polje, ki leži ob reki Muri med Slovenskimi goricami in Goričkim. Obstoječi numerični model vodnega telesa podzemne vode smo dopolnili z geometrijo struge reke Mure. Analizirali smo visokovodni val reke Mure s programskim orodjem HEC - RAS ter rezultate uporabili kot vhodne podatke v programu ModFlow. S tem smo ugotovili kakšen je vpliv na gladino podzemne vode zaradi visokovodnega dogodka na reki Muri in do kam seže.

Ta stran je namenoma prazna.

## **BIBLIOGRAPHIC - DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT**

**UDC:** 556.5:556.3(0.43.3)  
**Author:** Andrej Biro  
**Supervisor:** prof Mitja Brilly, Ph.d.  
**Title:** Modeling the influence of surface waters on the head of Prekmursko polje groundwater body  
**Tip dokumenta:** M. Sc. Thesis  
**Notes:** 101 p., 2 tab., 15 fig., 10 graph., 4 ann.  
**Key words:** Modeling, surface water, groundwater, HEC - RAS, MODFLOW

### **Abstract:**

The focus of the thesis is the simulation of the impact of river Mura on a groundwater aquifer Mursko and Prekmursko polje, spreading along the river Mura, between Goričko and Slovenske gorice hills. The existing numerical groundwater model was upgraded with the geometry of the river. Using HEC - RAS software, a floodwave was analysed and the results were used as input data for the groundwater model, designed in ModFlow software. The results represent the impact of the floodwave on the groundwater level and its outreach.

Ta stran je namenoma prazna.

## **ZAHVALA**

Zahvaljujem se mentorju prof. dr. Mitji Brillyju za strokovno pomoč pri izdelavi naloge.

Zahvaljujem se doc. dr. Goranu Vižintinu za strokovno pomoč, nasvete in nesebično podporo pri nastajanju naloge.

Posebno zahvalo namenjam družini za spodbudo in podporo skozi ves čas študija.

Hvala!



Ta stran je namenoma prazna.

## KAZALO VSEBINE

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA.....	III
IZJAVA O AVTORSTVU.....	V
BIBLIOGRAFSKO - DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK.....	VII
BIBLIOGRAPHIC - DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT.....	IX
ZAHVALA.....	XI
KAZALO VSEBINE.....	XIII
KAZALO PREGLEDNIC.....	XV
KAZALO SLIK.....	XVII
KAZALO GRAFIKONOV.....	XIX
OKRAJŠAVE IN OZNAKE.....	XXI
1. UVOD.....	1
2. GEOGRAFSKI PREGLED.....	3
3. GEOLOŠKI PREGLED.....	5
4. HIDROGEOLOŠKI PREGLED.....	6
4.1 Prekmursko polje.....	6
4.2 Mursko polje.....	7
4.3 Meje vodonosnika.....	8
4.4 Poroznost in efektivna poroznost (specifična izdatnost).....	9
4.5 Koeficient prepustnosti.....	9
4.6 Odvzemi podzemne vode.....	10
5. HIDROLOŠKI PREGLED.....	11
6. PADAVINE.....	13
7. HEC-RAS.....	16
7.1 Teoretične osnove.....	16
7.2 Opis modela v programu HEC-RAS.....	18
7.3 Implicitna metoda končnih razlik za račun nestalnega toka.....	21
7.4 Vhodni podatki za umerjanje.....	26
7.4.1 Viri.....	26
7.4.2 Obdelava podatkov za pripravo geometrije struge za račun stalnega toka.....	26
7.4.3 Obdelava podatkov za pripravo geometrije struge za račun nestalnega toka.....	28
7.4.4 Hidrološki podatki.....	29
7.4.4.1 Viri hidroloških podatkov.....	31
7.4.4.2 Obdelava podatkov.....	31
7.4.4.2.1 Stalni tok.....	31
7.4.4.2.2 Nestalni tok.....	31
7.4.4.3 Vnos podatkov.....	32

---

7.4.5	Račun stalnega toka .....	32
7.4.5.1	Umerjanje - stalni tok .....	33
7.4.5.2	Umerjanje - nestalni tok .....	34
8	ModFlow .....	35
8.1	Teoretične osnove .....	35
8.1.1	Zahtevani podatki .....	36
8.1.2	Robni pogoji .....	37
8.2	Opis modela v programu ModFlow .....	38
8.3	Umerjanje.....	40
8.4	Dopolnitev modela.....	42
9	ZAKLJUČEK.....	45
	VIRI.....	47

## **KAZALO PREGLEDNIC**

Preglednica 1: Povprečni avgustovski pretoki 1961 – 2005 (ARSO) .....	31
Preglednica 2: Umerjanje modela za stalni tok .....	33

Ta stran je namenoma prazna.

## KAZALO SLIK

Slika 1: Potek modeliranja vpliva reke Mure na podzemne vode Murskega in Prekmurskega polja .....	2
Slika 2: Geografska lega modelskega območja, s prikazano topografijo površine aluvialne ravnice.....	3
Slika 3: Debelina aluvialnega vodonosnika .....	5
Slika 4: Odvzemi podzemne vode na območju modeliranja Mursko - Prekmurskega polja [2].....	10
Slika 5: Elementarni kontrolni volumen za izpeljavo kontinuitetne enačbe .....	16
Slika 6: Prikaz razdelitve toka na tok po strugi in tok po poplavnih območjih v programu HEC-RAS	19
Slika 7: Shema implicitne metode končnih razlik za račun nestalnega toka, ki jo uporablja program HEC-RAS .....	22
Slika 8: Prečni profili (izmerjeni in interpolirani) za račun stalnega toka znotraj osnovnega korita. ...	27
Slika 9: Površina pravokotne poglobitve dna struge kakor prikazuje skica, za 1.05 m od vodne gladine (glede na vodostaj na dan meritve) je v enaka povprečni pretočni površini izmerjenega prečnega profila (povprečje primerjanih profilov). .....	27
Slika 10: Situacija prečnih profilov za račun nestalnega toka med visokovodnimi nasipi.....	28
Slika 11: Primer prečnega profila za račun nestalnega toka z osnovnim koritom in poenostavljenim dnom poplavnega območja med visokovodnimi nasipi. ....	29
Slika 12: Zasnova modela, ki je bil podlaga za dodelavo [12].....	40
Slika 13: Območja različnih hidravličnih prepustnosti. [2].....	41
Slika 14: Delovno okolje programa ModFlow s prikazom reke Mure (modro) na Murskem in Prekmurskem polju (rdeče). Z belo barvo je predstavljeno območje modeliranja.....	42
Slika 15: Prikaz odsekov, s pomočjo katerih smo v ModFlowu definirali reko Muro.....	43

Ta stran je namenoma prazna.

## KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 1: Sezonsko nihanje pretokov reke Mure na VP Gornja Radgona za obdobje 1961-2005 [2] .....	11
Grafikon 2: Podatki o padavinah na meteorološki postaji Murska Sobota za obdobje 1971-2008 (ARSO). Z zeleno je označena povprečna vrednost, z modro mokro leto, z rdečo pa sušno leto. Na abscisi so meseci leta.....	13
Grafikon 3: Kljub visokim vrednostim padavin v poletnih mesecih zaradi površinskega odtekanja beležimo negativno vodno bilanco. Razlog za to so relativno neprepustne struge reguliranih vodotokov in hitro odtekanje.....	14
Grafikon 4: Podatki o evapotranspiraciji z meteorološke postaje Murska Sobota za obdobje 1961-2010 (ARSO). Z zeleno je označena povprečna vrednost, z modro mokro leto, z rdečo pa sušno leto. Na abscisi so meseci leta.....	14
Grafikon 5: Vodna bilanca za obdobje 1971 – 2008 s podatkov z meteorološke postaje v Murski Soboti. Z zeleno je označena povprečna vrednost, z modro mokro leto, z rdečo pa sušno leto. Na abscisi so meseci leta.....	15
Grafikon 6: Q - H krivulja za VP Gornja Radgona po podatkih meritev iz leta 2009 .....	29
Grafikon 7: Q - H krivulja za VP Petanjci po podatkih meritev iz leta 2009.....	30
Grafikon 8: Q - H krivulja za VP Mursko Središče po podatkih meritev iz let 2012 in 2014. Za nizke pretoke do 110 m <sup>3</sup> /s so uporabljeni podatki iz leta 2012, za ostale pa podatki iz leta 2014. Opazna je manjša nezveznost med krivuljama.....	30
Grafikon 9: Zgornji robni pogoj za račun nestalnega toka, pretoki na VP Gornja Radgona med 11. in 25.7.2012 (ARSO) s sintetičnimi dodanimi 15 dnevi stalnega toka .....	32
Grafikon 10: Umerjen model, izračunana krivulja Q-H sovpada z izmerjenimi podatki.....	34



Ta stran je namenoma prazna.

## **OKRAJŠAVE IN OZNAKE**

HEC – RAS ... Hydraulic Engineering Center – River Analysis System

USACE ... United States Army Corps of Engineers

ModFlow ... Visual MODFLOW

DEM ... Dravske elektrarne Maribor

ARSO ... Agencija Republike Slovenije za okolje

DHMZ ... Državni hidrometeorološki zavod Republike Hrvaške

MS Access ... Microsoft Access

PEST ... Parameter estimation

Ta stran je namenoma prazna.

## 1. UVOD

Poudarek naloge je na modeliranju vpliva reke Mure na vodonosnika Prekmurskega in Murskega polja, ki ležita na levem in desnem bregu reke Mure med Goričkim in Slovenskimi goricami. V zadnjih desetletjih je bilo veliko sprememb morfologije površinskih vodotokov, med njimi osuševanje na kmetijskih zemljiščih in regulacije vodotokov. Ti posegi so vplivali na intenzivnejšo odvodnjo površinskih voda in posledično skrajšali čas infiltracije v medzrnski vodonosnik pod površino.

V magistrskem delu smo predvsem z rezultati simulacij ugotavljali vplive reke Mure na podzemno vodo. V obdobju med 2010 in 2013 je bil postavljen ekspertni sistem za podporo odločanju na aluvialnih telesih podzemnih voda Slovenije [1,] ki je bil del projekta z naslovom: Nadgradnja sistema za spremljanje in analiziranje stanja vodnega okolja v Sloveniji, ki bo omogočil boljše spremljanje in poznavanje stanja vodnega okolja v Sloveniji in posledično bolj kakovostne hidrološke in meteorološke napovedi ter predvidevanja, kar bo dolgoročno omogočilo boljše varstvo in ohranjanje vodnih virov [2].

V času postavitve modela (2011 - 2013) reka Mura ni bila določena iz merskih prečnih profilov [2], kar smo v magistrskem delu dopolnili. Z geometrijsko dopolnitvijo reke Mure v modelu smo dobili bistveno bolj realne vplive reke Mure na podzemno vodo in s tem izboljšali zanesljivost napovedi.

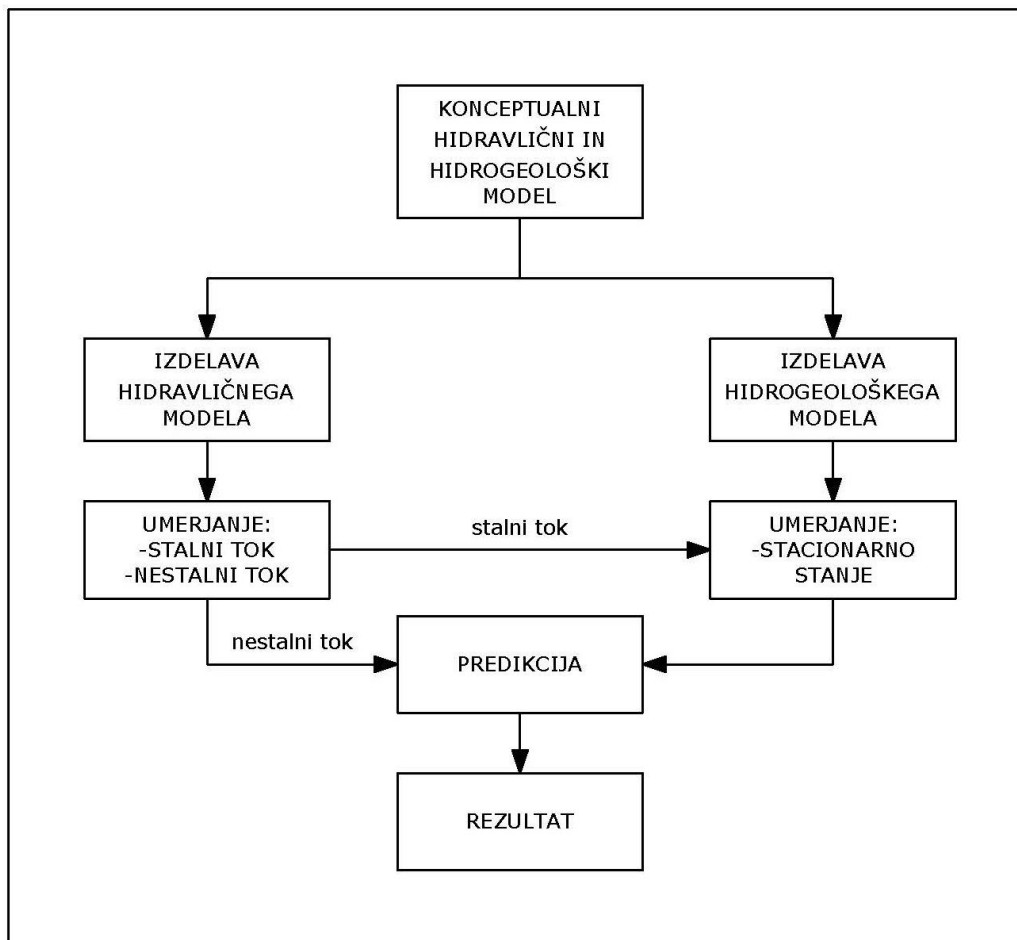
Pri izdelavi modela smo ModFlow povezali s HEC - RAS-om. To povezavo smo postavili s pomočjo programa MS Access in v njem postavljenega podatkovnega modela, kjer smo rečne celice modela ModFlow povezal s profili v HEC - RAS-u.

V osnovi smo že postavljen model nadgradili z na novo določeno reko Muro, ga na novo umerili in s pomočjo HEC-RAS-a simulirali visokovodni val iz leta 2012. Simulacija visokega vodnega vala nam je služila za izdelavo napovedi vplivov reke Mure na podzemne vode.

Za izdelavo simulacij smo uporabili nekaj različnih programskih orodij. Za simuliranje dogajanja v reki Muri smo uporabil orodje HEC - RAS, za dogajanje v podzemni vodi pa Visual ModFlow. Oba modela smo povezal s podatkovnim orodjem MS Access.

Umerjanje numeričnega modela toka podzemne vode smo izvedli s pomočjo ročne in avtomatske kalibracije (metoda Pilot Points), umerjanje toka površinske vode pa s pomočjo ročne kalibracije (spreminjanje koeficienta hrapavosti) in podatkov, pridobljenih s vodomernih postaj.

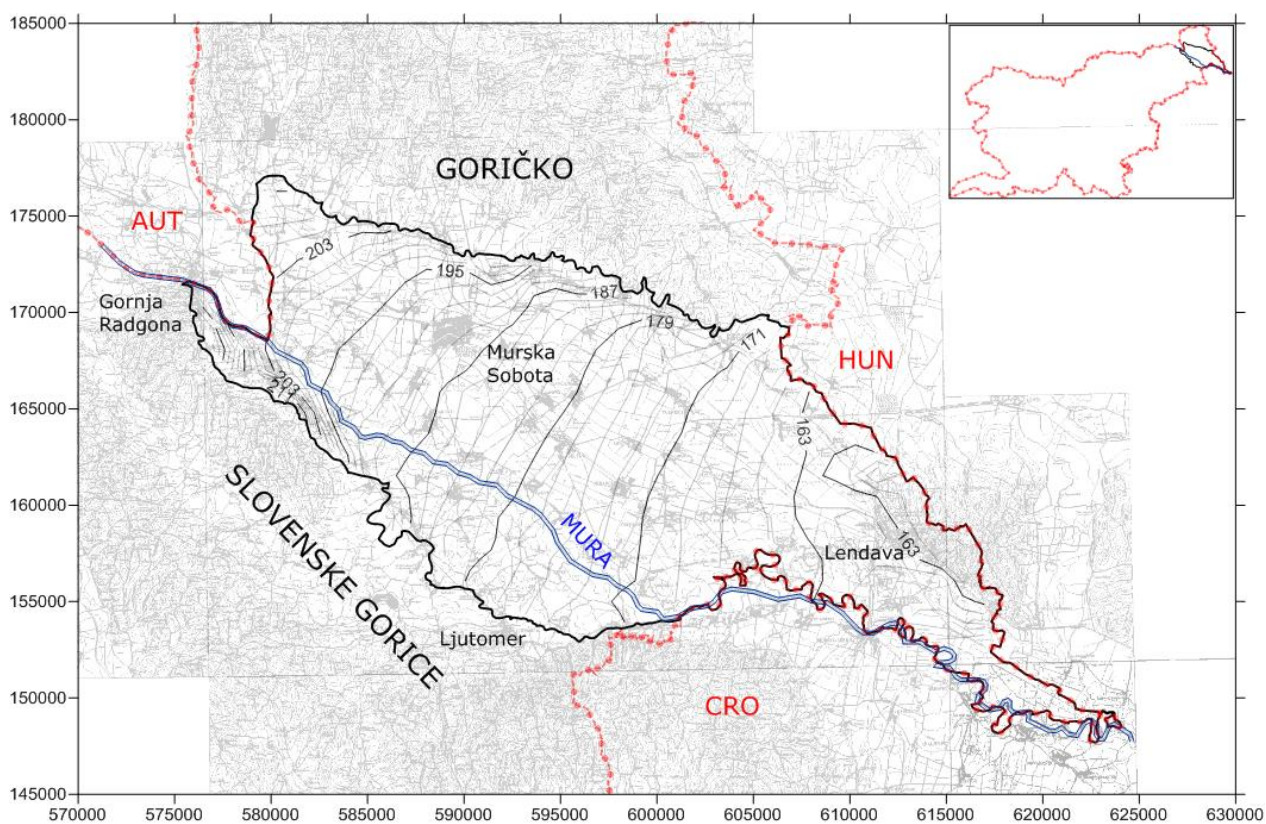
Rezultati naloge bodo pripomogli k boljšemu razumevanju vpliva morfoloških sprememb strug površinskih voda na količinsko stanje podzemne vode v vodonosniku.



Slika 1: Potek modeliranja vpliva reke Mure na podzemne vode Murskega in Prekmurskega polja

## 2. GEOGRAFSKI PREGLED

Skrajno severovzhodno pokrajino v Sloveniji imenujemo Pomurje. Reka Mura predstavlja edini večji vodotok na območju, po katerem se pokrajina tudi imenuje. Raba prostora je večinoma kmetijska. Mesto Murska Sobota predstavlja središče regije, manjša lokalna središča so še Lendava, Ljutomer in Gornja Radgona. Morfološko gledano gre za ravninsko nižino, ki je zelo slabo razčlenjena. Geomorfološko lahko Pomurje razdelimo na aluvialno ravnico in gričevnata območja, ki ravnico obdajajo. Ta gričevja so predvsem Goričko (severno obrobje ravnice), Lendavske gorice (vzhodno obrobje) in Slovenske gorice, ki obdajajo južni in zahodni del aluvialne ravnice. (Slika 2)



**Slika 2:** Geografska lega modelskega območja, s prikazano topografijo površine aluvialne ravnice

Pretežno ravninsko aluvialno ravnico delimo na dva dela, in sicer: Mursko polje (omejeno s Slovenskimi goricami) na desnem bregu in Prekmursko polje (Ravensko in Dolinsko polje, omejeno z Goričkim in Lendavskimi goricami) na levem bregu Mure. Ravensko polje predstavlja območje v okolici Murske Sobote, jugovzhodno od Ravenskega (Lendavski kot) pa se imenuje Dolinsko.

Območje je preprejeno s številnimi površinskimi vodotoki, ki so bodisi v svojem naravnem stanju, bodisi v reguliranih strugah. Najpomembnejši vodotok je reka Mura, ki v aluvialne zasipe Murskega in Prekmurskega polja vstopa na severozahodnem robu polja pri mestu Gornja Radgona in izstopa na tromeji med Slovenijo, Madžarsko in Hrvaško. Od Razkrižja pa do tromeje predstavlja reka Mura

naravno mejo med Republiko Slovenijo in Republiko Hrvaško. Poleg reke Mure so s hidrogeološkega vidika pomembni trije vodotoki, Ledava s Kučnico in Ščavnica.

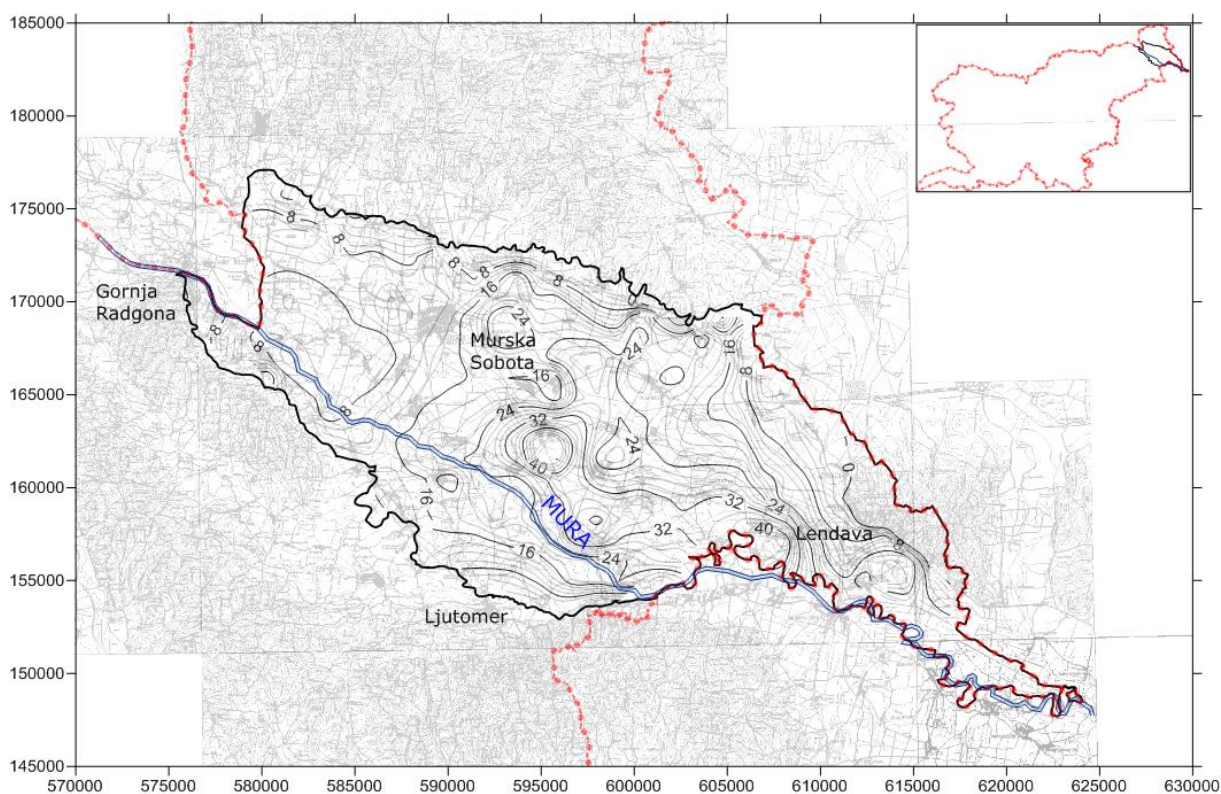
Slovenija je padavinsko bogata dežela, količina letnih padavin proti vzhodu izrazito upada. Podnebne razmere na območju spodnje Mure so bistveno drugačne kot v planinskih območjih povirja in srednje Mure. Na obravnavanem območju najmanj padavin zapade v januarju ali februarju, največ pa v poletnih mesecih, v juniju in juliju.

Rečni režim, t.j. vodnatost reke med letom, je pri reki Muri snežni. Za snežni režim sta značilna po en minimum in en maksimum. Minimum nastopi v času zimskih nizkih voda (januar, februar) in je predvsem posledica snežnega zadržka. Ta je povezan z zaledjem visokih gora, kjer se zimske padavine nabirajo in obležijo kot sneg do pomladi. Nadpovprečne vode nastopijo aprila in dosežejo maksimum pozno pomladi, do poletnega sušnega obdobja. Pri pritokih reke Mure (Ledava in Ščavnica s pritoki) je režim drugačen, saj so pretočne razmere neposredno odvisne od padavin.

### 3. GEOLOŠKI PREGLED

V geološkem smislu leži širše ozemlje Murske depresije na vzhodnem podaljšku Vzhodnih in delno Južnih Alp. S tektonskim pogrezanjem predmiocenske podlage vzhodnega dela omenjenih Alp je nastala Murska depresija, ki je sestavni del zahodnega dela Panonskega bazena. Predmiocenska podlaga je bila v srednjem miocenu dezintegrirana v posamezne enote. Pozneje, v pliocenu in kvartarju, je prišlo do oblikovanja končne tektonske razdelitve. V interglacialnem obdobju je reka Mura odnašala prod in pesek iz območij metamorfnih masivov Vzhodnih Alp in obilno zasipavala Mursko ravnino [3].

Za tok podzemne vode je bistvenega pomena napajanje in dreniranje vodonosnika, teksturna in granulometrijska sestava plasti ter razporeditve mej med njimi. Aluvialni zasipi Prekmurskega in Murskega polja so pretežno kvartarne starosti. Gre za relativno dobro prepustne plasti, ki se sestojijo pretežno iz peskov, prodov, meljev in glin. V teh dobro prepustnih zasipih se nahaja podzemna voda, ki je hidravlično povezana z reko Muro. Ti aluvialni zasipi ležijo na slabo prepustnih miocenskih in pliocenskih sedimentih, ki jih sestavljajo predvsem peščeni laporji, laporji, peščenjaki in tudi tufi [3].



Slika 3: Debelina aluvialnega vodonosnika



## 4. HIDROGEOLOŠKI PREGLED

Na obravnavanem območju lahko vodonosnik glede na Muro razdelimo na levi breg (Prekmursko polje) in desni breg (Mursko polje).

### 4.1 Prekmursko polje

Široka ravnica med levim bregom Mure in Goričkim, na zahodnem delu poimenovana Ravensko polje in na vzhodnem delu Dolinsko polje, zajema mlado tektonsko udorino, ki jo zapolnjujejo kvartarni - pleistocenski in še mlajši holocenski peščeno prodnati zasipi reke Mure in njenih pritokov Kučnice, Ledave s pritoki, Bukovnice in Kobiljskega potoka [3]. Proti jugu jo omejuje levi breg Mure, na zahodu sega do levega brega Kučnice. Proti severu in severovzhodu sega do vzhodnega Goričkega, na skrajnem vzhodu jo omejujejo Lendavske gorice. Na zahodnem robu, ob Kučnici je ravnica široka 7,5 km. Ob Muri nastopa na zahodnem robu na nadmorski višini 199 m in se proti severu do Goričkega dvigne na nadmorsko višino 212 m. V osrednjem delu, pod Mursko Soboto je ravnica široka 7,7 km. Ob Muri je v osrednjem delu ravnice površje na nadmorski višini 182 m, od tu se proti severu do vzhodnega Goričkega rahlo dvigne do nadmorske višine 190 m. Vzhodni rob ravnice leži pred vzhodnim Lendavskih goric, širok je 4,6 km. Površje ravnice na vzhodnem robu nastopa na nadmorski višini 160 m. Ravnico zapolnjujeta nizki in višji peščeno prodnati zasip. Nizki peščeno prodnati zasip nastopa v ozkem pasu vzdolž Mure (pogosto poplavno območje). Osrednji del ravnice gradi višji peščeno prodnati zasip. Nad črto Cankova, Lemerje, Brezovci, Puconci, Martjanci, Moravske Toplice se nad višji peščeno prodnati zasip dviguje nižja terasa in nad njo višja terasa.

Podlago kvartarnega prodnega zasipa gradijo pliocenski sedimenti, ki so po svoji sestavi praktično vodoneprepustni. Nastopajo plasti sive gline, sivkasto zelene peščene gline, sivkasto zelene peščeno meljaste gline, sivega lapornato meljastega glinovca, sivega glinastega melja, sivega peska z meljem, sivega meljastega peska, in sivim peščenim prodom. Pogoste so plasti lapornate gline s karbonatnimi koncentracijami. Gline vsebujejo pole organske gline in tanke vložke lignita debele do 0,5 m. Po podatkih raziskav za mineralno vodo na območju Radencev in naftnih vrtin na širšem območju Lendave, so pliocenske plasti nagnjene pod kotom, ki je manjši od  $10^\circ$  v smeri jugovzhoda. Na jugovzhodnem robu ravnice nastopa v podlagi kvartarnega proda gosto odložen in ponekod zaglinjen pliocenski prod. Površina pliocenskih plasti ni ravna, temveč valovita, mestoma tudi močnejše razčlenjena, a v povprečju enakomerno pada s smerjo rečnega korita Mure. Na zahodnem robu polja, ob Kučnici je na nadmorski višini 199 m in položno pada proti jugovzhodu do Murske Sobote, kjer je na nadmorski višini 179 do 180 m. Pod Mursko Soboto se strmo spusti do nadmorske višine 170 m. Globoka depresija nastopa ob Muri med Dokležovjem in Dolnjo Bistrico. Površje podlage se tu spusti do nadmorske višine 151 m. Večja depresija je na območju Gaberja, kjer klastične plasti podlage

peščeno prodnatega zasipa nastopajo na globinah pod nadmorsko višino 141 m. Na jugovzhodnem robu ravnice pod Lendavo je podlaga na nadmorski višini 149 m.

V zahodnem delu ravnice Ravenskega in Dolinskega polja (Prekmursko polje) je peščeno prodnati zasip debel 5 do 12 m. Pod Mursko Soboto, na osrednjem delu ravnice je peščeno prodnati zasip ob Muri debel od 20 do 30 m in na severnem robu, pod Goričkim, do 25 m. Na območju Lendave (jugovzhodni rob ravnice) je peščeno prodnati zasip debel tudi več kot 18 m in se do vzhodnega roba stanjša na 7 m [4], [5].

V peščeno prodnih zasipih nastopa medzrnski vodonosnik s prosto gladino in z bogatimi zalogami podzemne vode. Koeficient prepustnosti (k) peščeno prodnatega zasipa je od  $1,1 \cdot 10^{-3}$  do  $5,3 \cdot 10^{-3}$  m/s. Podzemna voda nastopa ob nizkem nivoju na globini do 2,5 m.

V zahodnem delu polja je omočeni sloj debel 5 do 6 m in se postopno debeli proti osrednjemu delu polja, kjer doseže debelino 17 do 27 m. Podzemna voda teče v smeri od zahoda, severozahoda proti vzhodu, jugovzhodu, skoraj vzporedno s tokom Mure.

Peščeno prodnati zasipi so prekriti z različno debelo plastjo gline, melja in peska, ki je ponekod skoraj odnešena, drugod pa preseže tudi debelino 2 m in na severnem robu 7 m. Ta, v večjem delu plitev pokrov (< 2 m), je za vodo slabo do zelo slabo prepusten.

Po podatkih dosedanjih raziskav se podzemna voda Murskega, Ravenskega in Dolinskega polja napaja v glavnem iz padavin. Mura prispeva k obnovi zalog podzemne vode v ozkem pasu vzdolž rečne struge. Del podzemne vode se napaja z dotoki iz gričevnatega zaledja Goričkega, Lendavskih in Slovenskih goric na robovih polj. Studenčnice, ki tečejo preko ravnice praktično vzporedno s tokom Mure imajo funkcijo napajanja in dreniranja podzemne vode. Te studenčnice nosijo veliko zelo finega materiala, zrnivosti finega peska in melja ter v suspenziji gline. Brežine so zato močno kolmatirane in slabo prepustne [4], [5].

## **4.2 Mursko polje**

Mursko polje je ravnica, ki jo je Mura izoblikovala na desnem bregu reke na severozahodu pri Gornji Radgoni in na jugovzhodu pri Gibini. Zasuta je s kvartarnim - pleistocenskim in holocenskim peščeno prodnatim zasipom. Reka Mura je v ravnico vrezala dve terasi. Nizko in visoko teraso. Terasi sta najbolj izraziti med G. Radgono, Radenci, Vučjo vasjo in Križevci. Proti jugozahodu in zahodu se ravnica visoke terase naslanja na severovzhodne obronke Slovenskih Goric. Obronki Slovenskih Goric

se dvigujejo do 100 m nad ravnico visoke Murske terase in dosežejo nadmorsko višino 310 m. Nizka terasa zajema 500 m do 2000 m široki pas vzdolž rečnega korita. V osrednjem in jugovzhodnem delu polja se nizka terasa deli na nizki (ob sami Muri) in višji peščeno prodnati zasip. Površje terase položno pada v smeri toka reke Mure. Od severozahodnega robu pri Šratovcih kjer je na nadmorski višini 201 m se do Vučje vasi, v smeri jugovzhoda spusti na nadmorsko višino 188 m. Do osrednjega dela polja pri Veržeju pade na 181 m. Pri Moti, na jugovzhodni polovici se spusti na nadmorsko višino 173 m. Na skrajnem jugovzhodnem robu polja pri Gibini, je površje nizke terase na nadmorski višini 165 m. Visoka Murska terasa se razprostira med severovzhodnim vznožjem Slovenskih Goric in cesto G. Radgona – Radenci – Veržej – Vučja vas - Stara Nova vas - Ilijaševci - Boreci – Lukavci. Površje terase zajema 1000 do 3500 m širok pas. Položno pada od Radgone proti Vučji vasi in do Lukavcev, kjer se spusti na nizko teraso. Pri Radgoni je na nadmorski višine 210 m, pri Vučji vasi je na nadmorski višini 190 m in pri Lukavcih na nadmorski višini 180 m [4], [5].

V peščeno prodnatih zasipih Murskega polja nastopa medzrnski vodonosnik s prosto gladino in z bogatimi zalogami podzemne vode. Koeficient prepustnosti ( $k$ ) je na območju nizke Murske terase od  $2 \cdot 10^{-3}$  do  $8 \cdot 10^{-3}$  m/s. Na območju visoke Murske terase na Murskem polju je  $k$  od  $1,4 \cdot 10^{-5}$  do  $1 \cdot 10^{-3}$  m/s.

Ob nizkem nivoju nastopa gladina podzemne vode na Murskem polju na globini 2 do 3 m. Debelina omočenega sloja v zgornjem delu (zahodnem delu polja) doseže ob nizkem nivoju do 5 m, v osrednjem delu polja do 19 m in v južnem delu do 20 m.

V severozahodnem delu polja, med Radenci in Vučjo vasjo se podzemna voda pretaka v smeri od zahoda proti vzhodu. Pod robom visoke terase, med Radenci in Turjanci, tok podzemne vode zavije proti severovzhodu. Med Turjanci in Hrastjem – Moto teče tok podzemne vode v smeri od jugozahoda proti severovzhodu in pod Hrastjem postopno zavije v smeri jugovzhoda, praktično vzporedno s tokom Mure. To smer zadrži do severozahodnega roba polja na sotočju Mure in Ščavnice. Peščeno prodnati zasip je prekrit z različno debelo plastjo gline, melja in peska, ki je ponekod skoraj odnešena, drugod pa preseže tudi debelino 2 m. Ta sicer plitev pokrov je za vodo slabo do zelo slabo prepusten. Podlago kvartarnih prodnih zasipov gradijo za vodo zelo slabo do praktično neprepustni pliocenski in miocenski drobnozrnati sedimenti [4], [5].

### 4.3 Meje vodonosnika

Padavine predstavljajo pozitivno napajanje, ki poteka na zgornji strani prve modelske plasti. Za določitev t.i. kritičnega hidrološkega obdobja so bili uporabljeni podatki o padavinah in ETP iz

obdobja 1971 do 2008. Za modelsko analizo bo tako na osnovi prej omenjene uporabljeno obdobje med majem in septembrom leta 2000. To pomeni, da se vodonosnik prvenstveno napaja iz reke Mure, ki v danem času vzdržuje nivo podzemne vode.

Mura, v času srednje nizkih vod vodonosnik od Radencev do Dokležovja najprej prazen, od Melincev do meje s Hrvaško pa vodonosnik napaja in od meje dalje spet prazen. Ledava je po vsej vertjetnosti kolmatirana. Ostale fizične meje vodonosnika so vezane na gričevnata območja Goriškega na severu in Slovenskih goric na jugu. Predvsem s strani Goriškega je možno pričakovati napajanje podzemne vode vodonosnika na Murskem in Prekmurskem polju [2].

#### **4.4 Poroznost in efektivna poroznost (specifična izdatnost)**

Iz dosedanjih hidrogeoloških raziskav prodnega zasipa je bila na podlagi granulometrije privzeta ocena o 25 % poroznosti. Najpogosteje [4], [5] je za prodni sediment privzeta poroznost  $n = 25-30\%$ , za peščeni sediment  $n = 30-50\%$ , vendar litološke nehomogenosti vodonosnika, neenakomerna zrnastost sedimenta povzročajo prostorsko variabilnost tega parametra.

Efektivna poroznost pomeni delež prostornine z vodo zapoljenih por sedimenta, ki lahko gravitacijsko drenira glede na celotno prostornino sedimenta. Efektivna poroznost ali tudi specifična izdatnost je definirana z volumnom vode, pridobljenim na enoto površine vodonosnika in pri enoti znižanja nivoja podzemne vode, opisuje pa sposobnost vodonosnika, da sprejme in zadrži ali odda vodo. Za peščeno prodnate sedimente Murskega in Prekmurskega polja lahko po Eckis-u privzamemo 5 % koeficient retenzijske sposobnosti, torej je privzeti faktor efektivne poroznosti  $m \gg 20\%$ .

#### **4.5 Koeficient prepustnosti**

Na obravnavanem območju Murskega in Prekmurskega polja je bilo v peščeno prodnem vodonosniku opravljeno veliko hidrogeoloških testiranj [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13]. Plasti kvartarnega peščeno prodnega zasipa so dobro vodoprepustne.

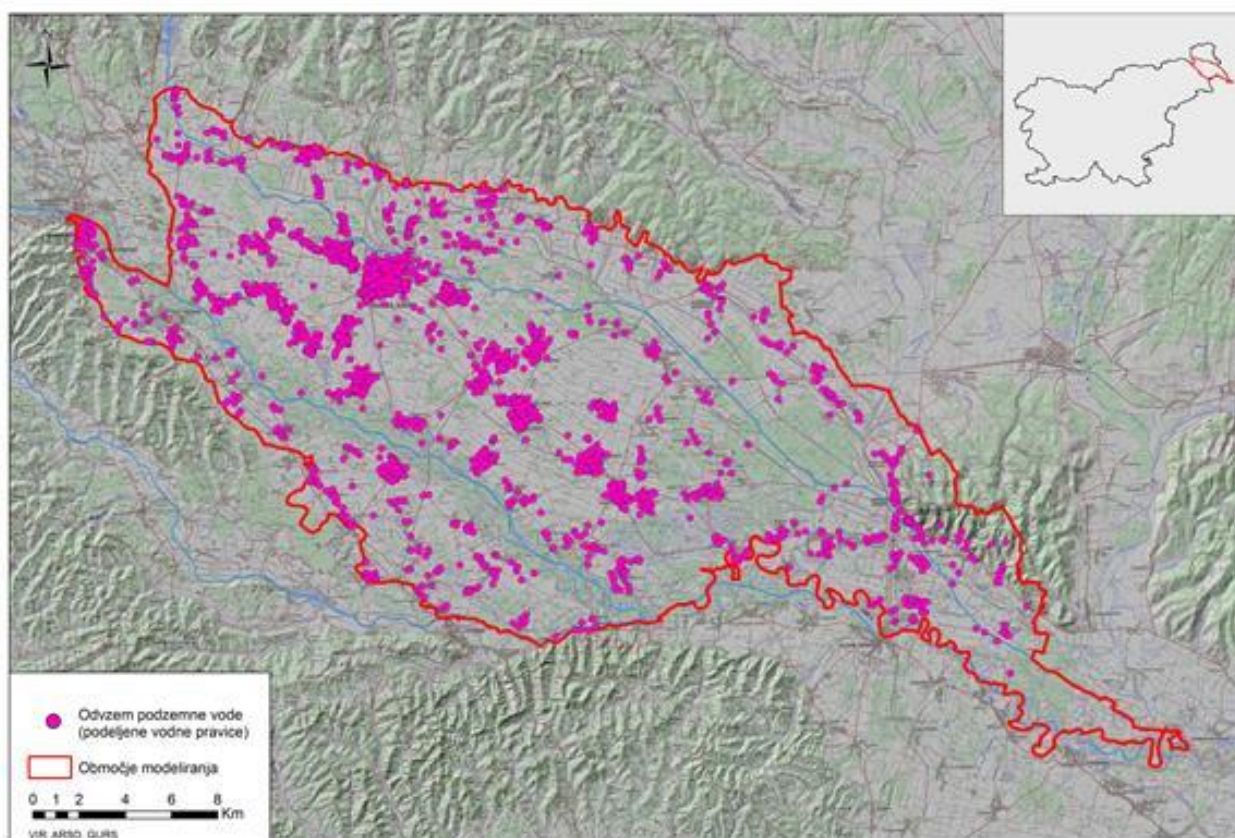
Koeficient prepustnosti ( $k$ ) je na Murskem polju na območju nizke Murske terase od  $2 \cdot 10^{-3}$  do  $8 \cdot 10^{-3}$  m/s. Na območju visoke Murske terase je  $k$  od  $1,4 \cdot 10^{-5}$  do  $1 \cdot 10^{-3}$  m/s [4], [5].

Koeficient prepustnosti ( $k$ ) peščeno prodnatega zasipa Prekmurskega polja je od  $1,1 \cdot 10^{-3}$  do  $5,3 \cdot 10^{-3}$  m/s. koeficient prepustnosti ima srednjo vrednost  $4,8 \cdot 10^{-4}$  m/s [4], [5].

#### 4.6 Odvzemi podzemne vode

Na Murskem in Prekmurskem polju v sušnih mesecih potekajo številni evidentirani in domnevno tudi neevidentirani občasni odvzemi podzemne vode tako za oskrbo s pitno vodo kot za kmetijsko in industrijsko rabo.

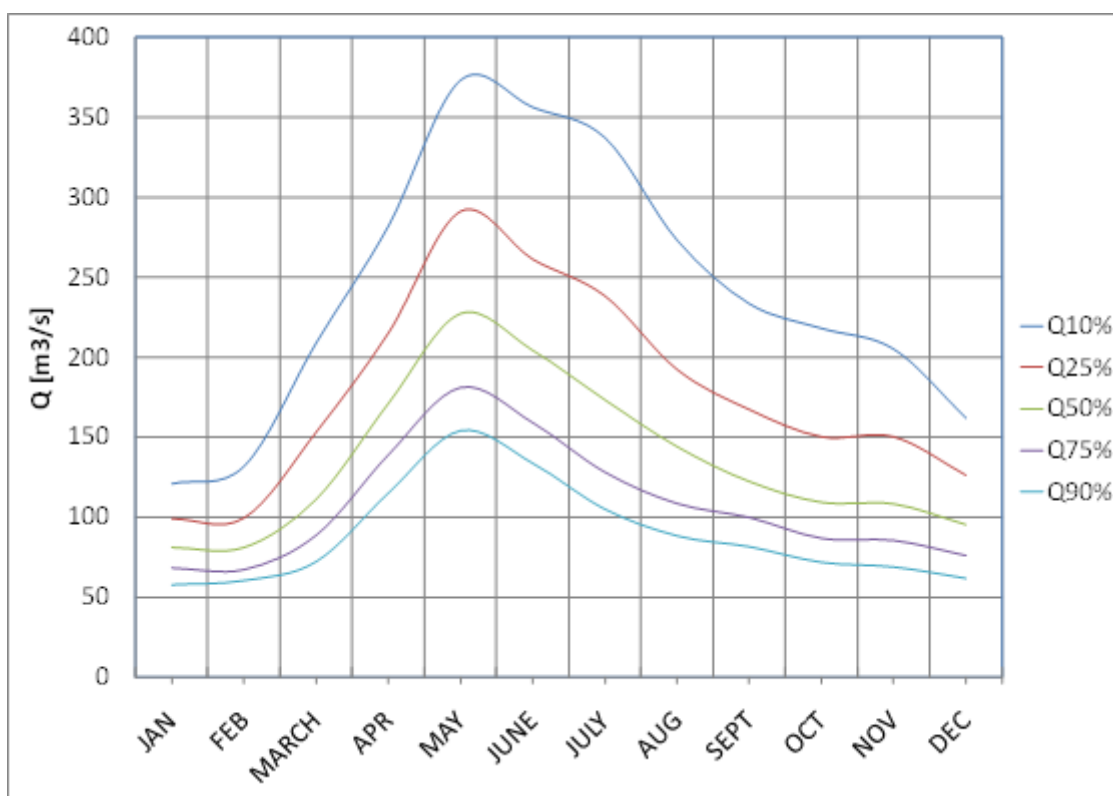
Pri evidentiranih uporabnikih so podatki o odvzemih uporabljeni tako, da je njihova količina črpanja smiselna porazdeljena na določeno časovno obdobje. Poseben problem predstavljajo odvzemi vode za hlajenje, ta voda se po uporabi vrača v vodonosnik in pri tem ohranja vodno bilanco vodonosnika. Kljub temu pa je ta odzvem lahko lokalno moten ali moti drugega.



Slika 4: Odvzemi podzemne vode na območju modeliranja Mursko - Prekmurskega polja [2].

## 5. HIDROLOŠKI PREGLED

Obravnavano območje, vodonosnik in režim voda na Murskem in Prekmurskem polju je oblikovala reka Mura s prodom, ki ga je naplavila. Pri tem so pomembni predvsem mlajši holocenski nanosi, starejše formacije proda so se v vmesnem času zapolnile s peskom in meljem ter so manj prepustne. Količine vode in tudi njihova dinamika so v veliki meri odvisne od dinamike površinskih voda Mure in njenih pritokov. Poleg reke Ščavnice (293 km<sup>2</sup>) je največji vodotok porečja Mure v Sloveniji Ledava (891 km<sup>2</sup>), ki se izliva v Veliko Krko (1.762 km<sup>2</sup>) [14]. Na režim podzemne vode vplivajo tudi številni kanali, gramoznice, stari rečni rokavi in studenčnice.



**Grafikon 1:** Sezonsko nihanje pretokov reke Mure na VP Gornja Radgona za obdobje 1961-2005 [2]

V spodnjem toku je reka Mura meandrirala po široki aluvialni ravnini in povzročala škodo na obdelovalnih površinah v neposredni bližini reke. Prvi zapisi o ureditvenih delih na Muri izvirajo iz druge polovice 18. stoletja. Posegi lokalnega značaja so bili izvedeni le v interesu zaščite takratnih veleposesti ob Muri. V letih 1860 do 1874 so na tedanjem avstrijskem odseku reke Mure do Veržeja izvedli tako imenovano delno sistematično regulacijo, ki so jo sestavljala obrežna zavarovanja, jezbece, vodilne zgradbe in zapiranja stranskih rokavov. Cilj je bil preprečiti spremembe toka in zagotoviti splavarjenje. Ker pa vodogradbena situacija kljub temu ni bila zadovoljiva (objekti so bili vedno znova porušeni), so med letoma 1874 in 1891 izvedli sistematično regulacijo Mure. Pri tem so od izliva reke Sulm navzdol do ogrske meje (pri Veržeju) določili normalno širino 76 m, traso so čim

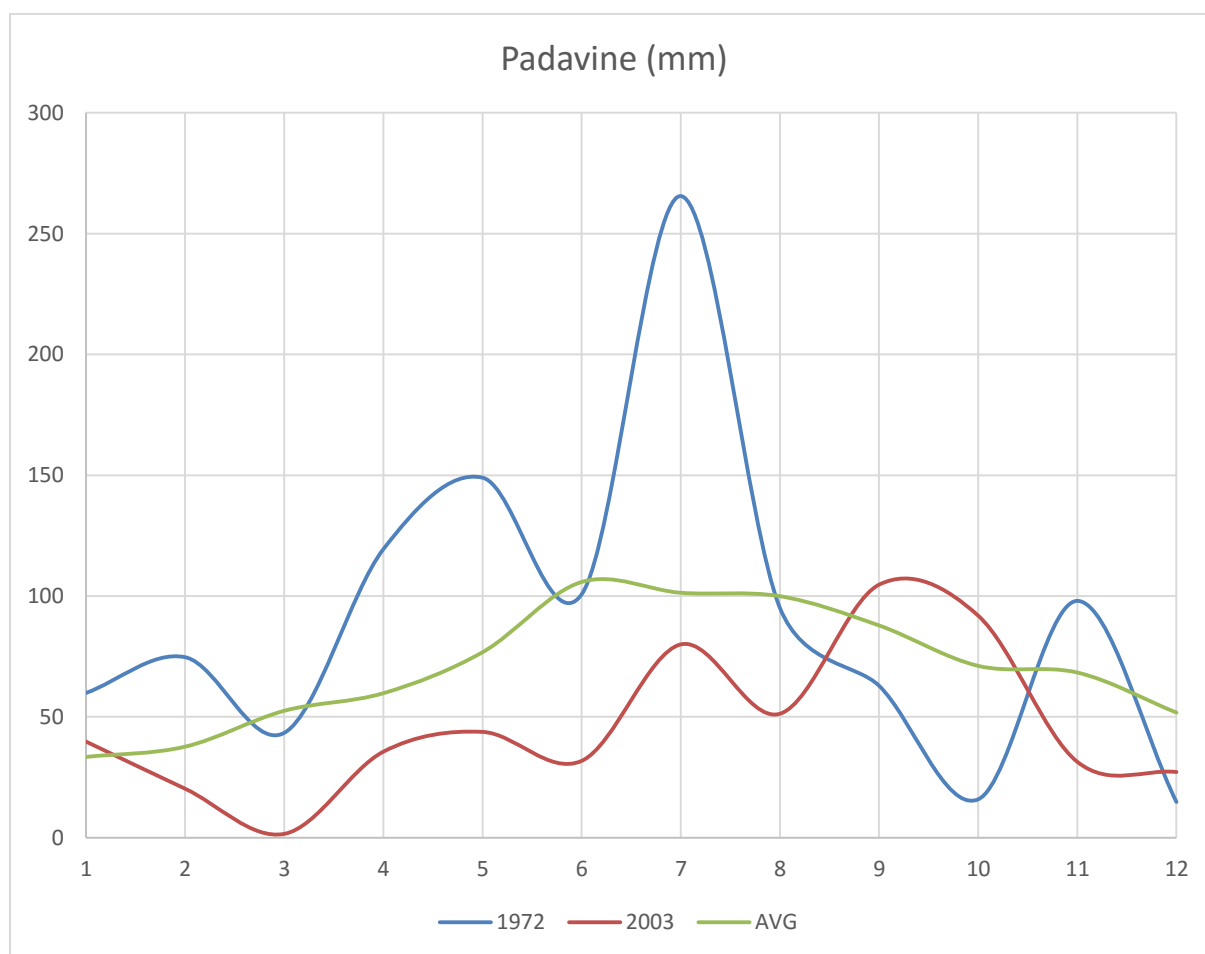
bolj skrajšali in bregove utrdili ter jih pravilno oblikovali. Med letom 1891 in prvo svetovno vojno so kljub načrtovanim visokovodnim zaščitnim ukrepom izvajali le najnujnejša vzdrževalna dela. Izdelana sta bila dva pragova za potrebe odvzema vode za papirno industrijo (Ceršak, Sladki vrh) [14].

Obsežna dela na sistematičnih regulacijah reke na območju Slovenije so bila izvedena od leta 1972 do 1990 v dolžini 27,17 km do Bakovcev. Na delu reke Mure dolvodno od Murskega Središča, na meji med Hrvaško in Slovenijo, so bili posamezni meandri ločeni od glavne struge reke [14]. Zaradi omenjenih regulacijskih ukrepov se je Mura nekoliko poglobila, kar vpliva tudi na podzemno vodo Murskega in Prekmurskega polja.

## 6. PADAVINE

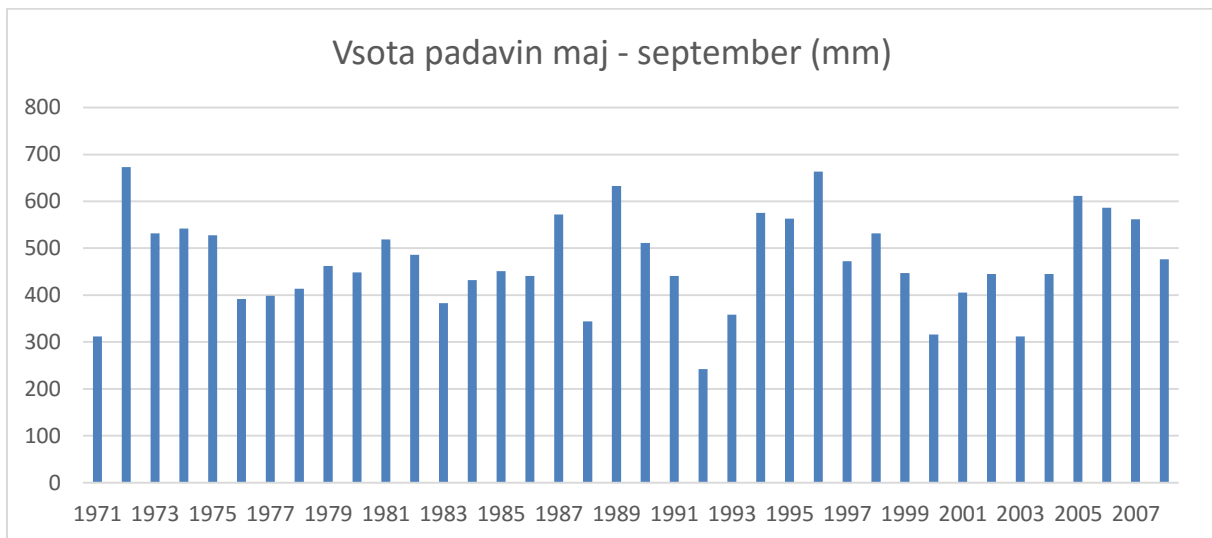
Glavni in najpomembnejši vir napajanja podzemne vode na Murskem in Prekmurskem polju so padavine. [2].

Osrednja meteorološka postaja na območju Pomurja je Murska Sobota, locirana v Rakičanu pri Murski Soboti. Primerjali smo podatke o padavinah in evapotranspiraciji v obdobju 1971 – 2008 (ARSO). Letna vsota padavin je v tem obdobju bila med 559,4 mm in 1101,1 mm, povprečne letne padavine znašajo 846, 4 mm. Največ padavin pade v poletnih mesecih [2].



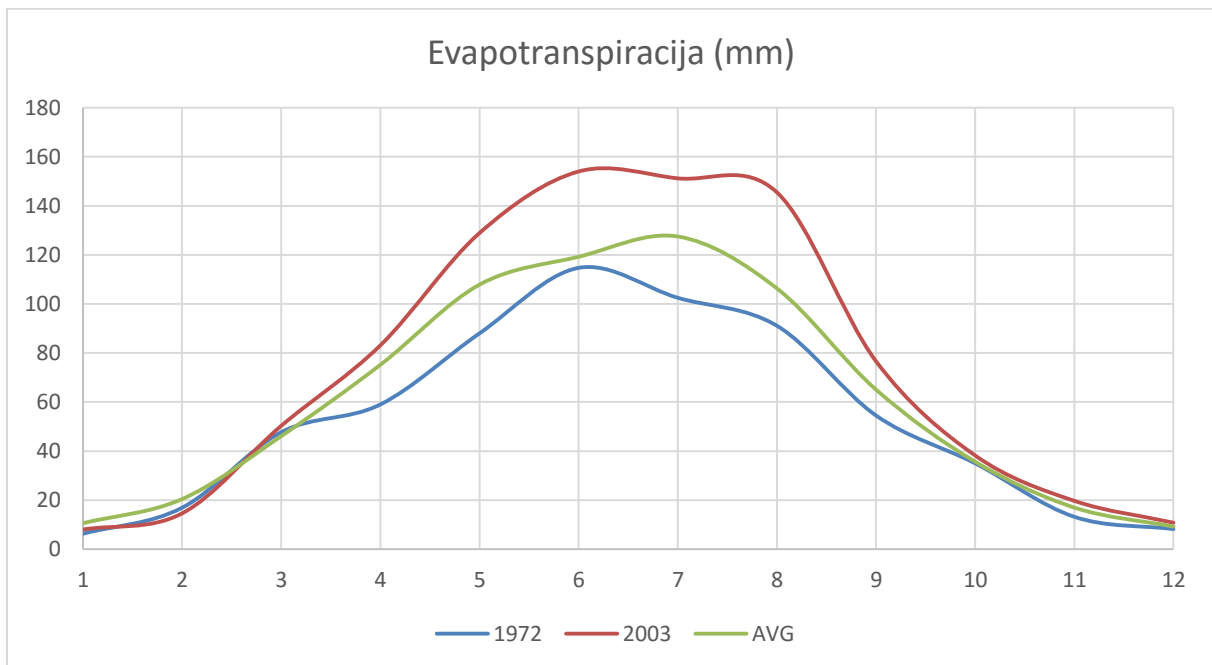
**Grafikon 2:** Podatki o padavinah na meteorološki postaji Murska Sobota za obdobje 1971-2008 (ARSO). Z zeleno je označena povprečna vrednost, z modro mokro leto, z rdečo pa sušno leto. Na abscisi so meseci leta.





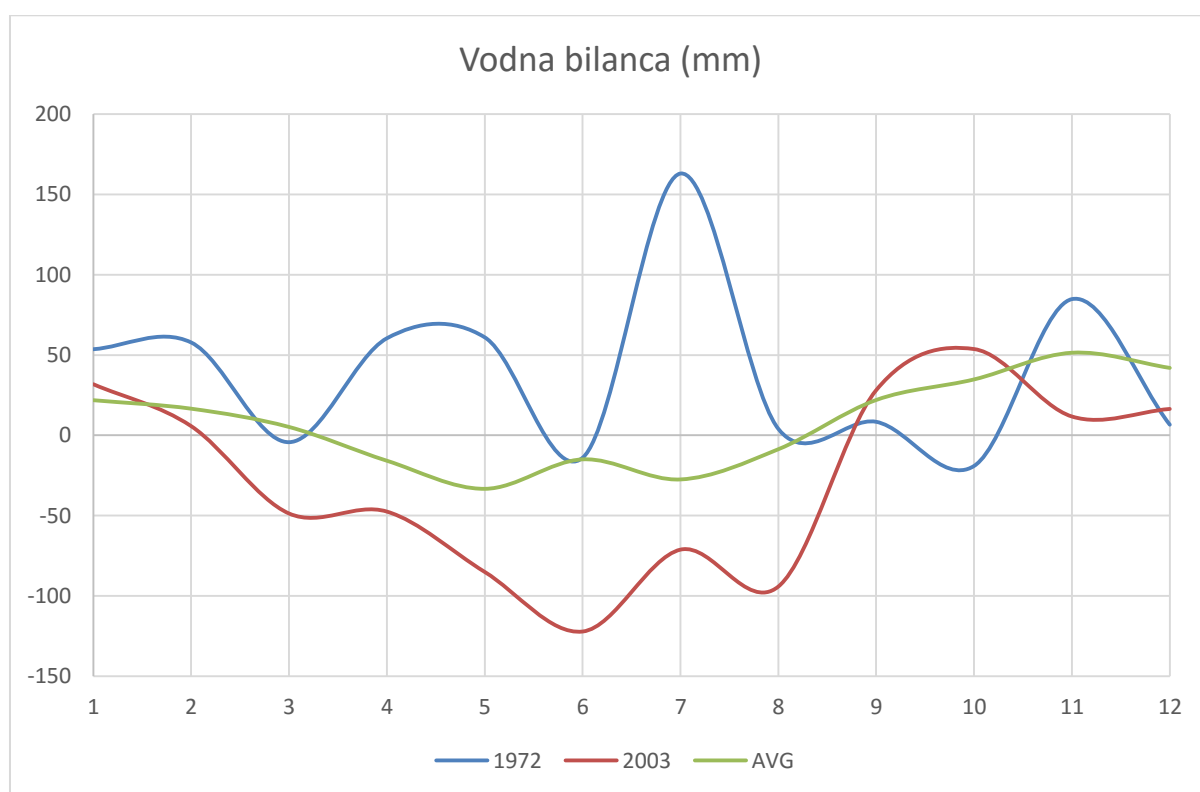
**Grafikon 3:** Kljub visokim vrednostim padavin v poletnih mesecih zaradi površinskega odtekanja beležimo negativno vodno bilanco. Razlog za to so relativno neprepustne struge reguliranih vodotokov in hitro odtekanje.

Povprečna evapotranspiracija, izračunana na podlagi podatkov o temperaturi in vlažnosti zraka ter podatkov o vetru in radiaciji (Izračunano na ARSO po prilagojeni Penmanovi metodi) v enakem obdobju 1971 – 2008 znaša 753 mm, maksimalna je dosegla 880,9 mm, minimalna pa 637,1 mm. ETR je najvišja v poletnih mesecih [2].



**Grafikon 4:** Podatki o evapotranspiraciji z meteorološke postaje Murska Sobota za obdobje 1961-2010 (ARSO). Z zeleno je označena povprečna vrednost, z modro mokro leto, z rdečo pa sušno leto. Na abscisi so meseci leta.

Pri izračunu mesečne vodne bilance za obravnavano obdobje se pojavljajo negativne vrednosti v mesecih april, maj, junij, julij in avgust. V teh mesecih prihaja do zmanjševanja zalog podzemne vode. Kljub visokim vrednostim padavin v tem času pa padavinska voda po reguliranih in kolmatiranih strugah pomurskih vodotokov odteče relativno hitro in brez posebnega vpliva na podzemno vodo. Izjema je reka Mura, katere vodni režim je odvisen od taljenja snega v povirju reke, to je v vzhodnih Alpah. Rečno dno in brežine so prodnate Reka Mura ima zaradi omenjenega v mesecih, ko je vodna bilanca padavin in evapotranspiracije negativna, najvišje pretoke [2].



**Grafikon 5:** Vodna bilanca za obdobje 1971 – 2008 s podatkov z meteorološke postaje v Murški Soboti. Z zeleno je označena povprečna vrednost, z modro mokro leto, z rdečo pa sušno leto. Na abscisi so meseci leta.

## 7. HEC-RAS

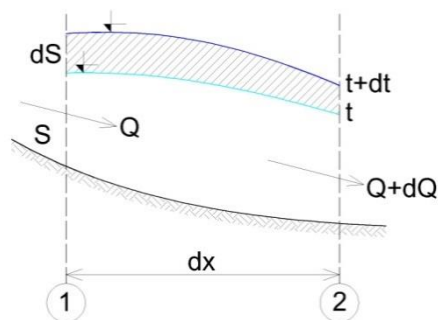
### 7.1 Teoretične osnove

Pri hidravliki nestalnega toka predstavlja fizikalno-matematično osnovo kontinuitetna in dinamična enačba. V nadaljevanju sta predstavljena načina, kako sta izvedeni do oblike ki jo imenujemo prva in druga Saint-Venantova enačba.

Kontinuitetna enačba (osnovna enačba):

$$\iint_S \rho \vec{v} d\vec{S} = -\frac{\partial}{\partial t} \iiint_P \rho dP \quad 1.$$

Razlika med masnim dotokom in iztokom iz obravnavne prostornine  $P$  (elementarni kontrolni volumen) je enaka časovni spremembi mase v tej prostornini. Ker velja predpostavka, da je voda nestisljiva tekočina je gostota  $\rho = konst.$  lahko obravnavamo le prostornino  $P$  in (volumski) pretok  $Q$ .



**Slika 5:** Elementarni kontrolni volumen za izpeljavo kontinuitetne enačbe

V reki obravnavamo odsek dolžine  $dx$  med profiloma 1 in 2. Skozi profil 1 priteče v času  $dt$  prostornina  $P$ ,

$$Q dt$$

v istem času odteče skozi profil 2

$$\left(Q + \frac{\partial Q}{\partial x} dx\right) dt$$

Ker pa se v času  $dt$  spremeni presek z  $S$  na  $S + \frac{\partial S}{\partial t} dt$  in je razlika presekov  $-\frac{\partial S}{\partial t} dt$ , je časovna sprememba prostornine enaka

$$\frac{\partial S}{\partial t} dt dx$$

Po osnovni kontinuitetni enačbi, ki smo jo krajšali z gostoto  $\rho$  se prostornina  $P$ , ki nastane zaradi spremembe preseka  $S$  po vsem odseku  $dx$  izenači z razliko prostornin, ki nastane zaradi razlike med dotokom in iztokom

$$-\frac{\partial S}{\partial t} dt dx - \frac{\partial Q}{\partial x} dx dt = 0$$

Torej dobimo

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

To kontinuitetno enačbo (2.2.) imenujemo I. St. Venantova enačba [15], [16].

### Dinamična enačba:

Izvedemo jo iz osnovne Eulerjeve za idealno tekočino, kjer ni notranjega trenja, ki se glasi

$$\frac{dv}{dt} = X - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \quad 3.$$

$X$  pomeni komponento zunanjih sil, reducirano na enoto mase (pospešek),  $v$  pa komponento hitrosti v smeri  $x$ -osi.

Zaradi komponente teže, ki deluje v smeri paralelni z dnom (zaradi hipoteze o »majhnem naklonu« dna) je to v smeri  $x$ -osi, je komponenta pospeška

$$X_1 = g \sin \alpha \cong g \operatorname{tg} \alpha = g I_0$$

kjer je  $\alpha$  naklonski kot dna s horizontalo in  $I_0 = \operatorname{tg} \alpha$  (»naklon dna«, po dogovoru ga štejemo za pozitivnega, če se dno spušča v smeri toka).

Sila trenja tekočine ob stene je enaka

$$F_{tr} = \tau O dx = \gamma S \Delta E_{tr}$$

kjer je  $\tau$  strižna napetost in  $O$  omočeni obod,  $\gamma$  specifična teža vode,  $S$  prečni presek in  $\Delta E_{tr}$  izgube energije na enoto teže zaradi trenjske sile na odseku  $dx$ . Na enoto mase

$$X_2 = \frac{-F_{tr}}{m} = \frac{-F_{tr}}{\rho g dx} = \frac{\gamma S \Delta E_{tr}}{\rho g dx} = -g I$$

kjer je  $m$  enota mase in  $I = \frac{\Delta E_{tr}}{dx}$  naklon energijske črte, ki je po hipotezi o obravnavi sile trenja med tekočino in stenami kot zunanje sile izrazimo za nestalni tok isto kot pri stalnem toku (De Chézyjeva in Manningov izraz za koeficient  $C$ )

$$I = \frac{v^2}{C^2 R} = \frac{v^2 n^2}{R^{\frac{4}{3}}}$$

Enačbo pišemo navadno v obliki

$$I = \frac{v |v| n^2}{R^{\frac{4}{3}}}$$

zato, da bi ostal ohranjen predznak smeri hitrosti, ki mu je sila trenja po smeri vedno nasprotna.

Osnovno enačbo lahko pišemo torej v obliki

$$\frac{dv}{dt} = g I_0 - g I - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x}$$

ker je po hipotezi o hidrostatični razporeditvi pritiskov v preseku  $p = \rho g h$  ( $h$  je globina) je tudi

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \rho g \frac{\partial h}{\partial x}$$

in ker je  $v = f(x, t)$  je odvod  $\frac{dv}{dt}$  enak

$$\frac{dv}{dt} = \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v}{\partial x} \frac{dx}{dt} = \frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x}$$

Dinamična enačba dobi končno obliko

$$\frac{dv}{dt} + v \frac{\partial v}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} = g(I_0 - I) \quad 4.$$

in je znana pod imenom II. St. Venantova enačba (4.) [15].

## 7.2 Opis modela v programu HEC-RAS

HEC-RAS je računalniški program za modeliranje stalnega in nestalnega toka površinskih vodotokov. Razvili so ga pri Hidrološkem inženirskem središču, ki je oddelek ameriške vojske (USACE), izšel je leta 1995.

Kot večina komercialnih programov za račun nestalnega toka uporablja Preissmanovo implicitno metodo končnih razlik, saj je stabilna in robustna, vendar je potrebno poznati omejitve metode. Za dober model nestalnega toka je tako potrebno razumeti, kako in zakaj lahko rešitve nestalnega toka postanejo nestabilne, saj nam to pomaga pri izdelavi točnejšega in stabilnega modela.

V programu sta osnovni enačbi (kontinuitetna in dinamična) predstavljeni v konservativni obliki, dinamična enačba je izražena po izreku o gibalni količini, poimenovana je »Momentum equation« in interpretirana: »Vsota vseh sil, ki delujejo na kontrolni volumen je enaka neto spremembi gibalne

količine (razlika med iztokom in vtokom gibalne količine) plus časovni spremembi gibalne količine v kontrolnem volumnu. Sile, ki delujejo na kontrolni volumen so tri: sila težnosti, sila pritiska in sila trenja.

HEC – RAS osnovni kontinuitetni enačbi (1.) dodaja 2 člena,

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q_l = 0$$

kjer so:

$x$  = razdalja v smeri toka

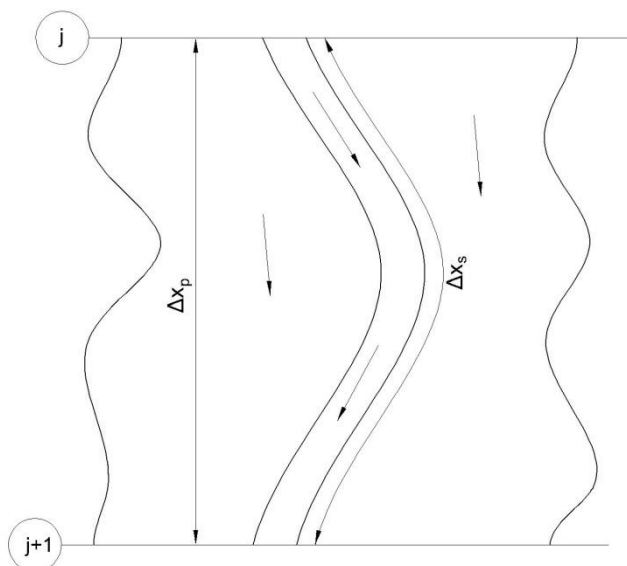
$t$  = čas

$Q$  = pretok

$S$  = površina preseka

$Z$  = količina vode, ki zastaja, ne odteče

$q_l$  = stranski dotok na enoto razdalje



**Slika 6:** Prikaz razdelitve toka na tok po strugi in tok po poplavnih območjih v programu HEC-RAS

Tok po strugi in poplavnih območjih deli HEC – RAS na dve enoti, tok po strugi in tok po poplavnem območju. Tako lahko zapišemo kontinuitetno enačbo posebej za tok po strugi in posebej za tok po poplavnih območjih:

$$\frac{\partial S_s}{\partial t} + \frac{\partial Q_s}{\partial x_s} = q_p$$

in:

$$\frac{\partial S_p}{\partial t} + \frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{\partial Q_p}{\partial x_p} = q_s + q_l$$

kjer se indeksa  $s$  in  $p$  nanašata na strugo in poplavno območje, oziroma  $q_l$  na bočni dotok na dolžinsko enoto za poplavno območje,  $q_s$  in  $q_p$  pa na izmenjavo vodnih količin med strugo in

poplavnim območjem. Z uporabo implicitne metode končnih razlik zgornji enačbi aproksimiramo in združimo v:

$$\Delta Q + \frac{\Delta S_s}{\Delta t} \Delta x_s + \frac{\Delta S_p}{\Delta t} \Delta x_p + \frac{\Delta Z}{\Delta t} \Delta x_p - \bar{Q}_l = 0 \quad 2.1.$$

kjer je  $\bar{Q}_l$  povprečni bočni dotok.

**Dinamično** enačbo obravnava v konservativni (»konservativna« se imenuje zaradi načela ohranitve gibalne količine) obliki:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(vQ)}{\partial x} + gS \left( \frac{\partial z}{\partial x} + I \right) = 0$$

kjer so:

$g$  = težnostni pospešek

$I$  = padec

$v$  = hitrost

Kot kontinuitetno, tudi dinamično enačbo obravnava ločeno za strugo in poplavno območje:

$$\frac{\partial Q_s}{\partial t} + \frac{\partial(v_s Q_s)}{\partial x_s} + gS_s \left( \frac{\partial z}{\partial x_s} + I_s \right) = M_s$$

in

$$\frac{\partial Q_p}{\partial t} + \frac{\partial(v_p Q_p)}{\partial x_p} + gS_p \left( \frac{\partial z}{\partial x_p} + I_p \right) = M_p$$

kjer sta  $M_s$  in  $M_p$  gibalni količini za strugo in poplavno območje. Za aproksimacijo so uporabljene naslednje oblike:

Po aproksimaciji z uporabo metode končnih razlik in združitvi enačb dobimo:

$$\frac{\Delta(Q_s \Delta x_s + Q_p \Delta x_p)}{\Delta t} + \Delta(Q_s v_s) + \Delta(Q_p v_p) + g(S_s + S_p) \Delta z + g \bar{S}_s \bar{I}_{ps} \Delta x_s + g \bar{S}_p \bar{I}_{pp} \Delta x_p = 0$$

Zadnja dva člena definirata silo trenja med brežinami in tekočino. Ekvivalentno lahko to silo definiramo kot:

$$g \bar{S}_p \bar{I}_{pp} \Delta x_e = g \bar{S}_s \bar{I}_{ps} \Delta x_s + g \bar{S}_p \bar{I}_{pp} \Delta x_p$$

Kjer so:

$\Delta x_e$  = ekvivalentna pot toka

$I_p$  = padec za celoten prečni profil

$$\bar{S} = \bar{S}_s + \bar{S}_p$$

Nato definiramo faktor porazdelitve hitrosti:

$$\beta = \frac{(v_s^2 S_s + v_p^2 S_p)}{v^2 S} = \frac{(v_s Q_s + v_p Q_p)}{Q v}$$

In

$$\Delta(\beta v Q) = \Delta(v_s Q_s) + \Delta(v_p Q_p)$$

Tako dobi dinamična enačba končno obliko:

$$\frac{\Delta(Q_s \Delta x_s + Q_p \Delta x_p)}{\Delta t} + \Delta(\beta v Q) + g \bar{S} \Delta z + g \bar{S} \bar{I}_p \Delta x_e = 0$$

Oz. obliko

$$\frac{\Delta(Q_s \Delta x_s + Q_p \Delta x_p)}{\Delta t \Delta x_e} + \frac{\Delta(\beta v Q)}{\Delta x_e} + g \bar{S} \left( \frac{\Delta z}{\Delta x_e} + \bar{I}_p \right) = 0$$

če jo delimo z  $\Delta x_e$ .

V to enačbo HEC – RAS vstavlja še dva izraza, »dodano silo« ki definira lokalne izgube (ob npr. mostnih opornikih ali drugih lokalnih trenjskih izgubah, ki jih ni možno zajeti z trenjem ob stene korita) in »gibalna količina stranskega vtoka«, ki definira dodatno gibalno količino zaradi dotokov (ki se uporabi le ob računih razvejanih korit v sotočjih). Končno obliko dinamične enačbe z dodanima izrazoma tako zapišemo kot:

$$\frac{\Delta(Q_s \Delta x_s + Q_p \Delta x_p)}{\Delta t \Delta x_e} + \frac{\Delta(\beta v Q)}{\Delta x_e} + g \bar{S} \left( \frac{\Delta z}{\Delta x_e} + \bar{I}_p + \bar{I}_l \right) = \xi \frac{Q_v v_v}{\Delta x} \quad 2.2.$$

$\bar{I}_l$  = naklon ob lokalnih izgubah

$\xi \frac{Q_v v_v}{\Delta x}$  = dodaten vztrajnostni moment stranskega vtoka, pri čemer so:

$Q_v$  = pretok vtoka

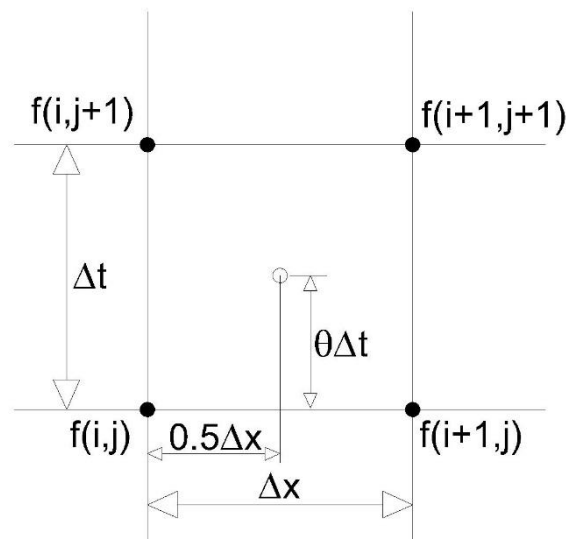
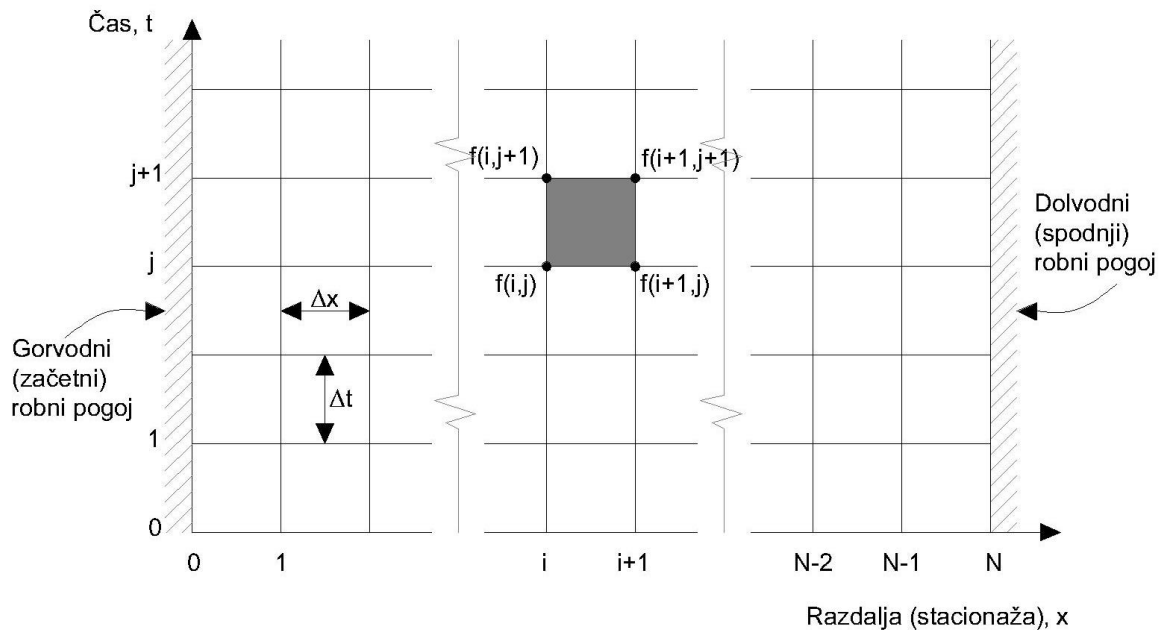
$v_v$  = povprečna hitrost vtoka

$\xi$  = delež vztrajnostnega momenta, ki vstopa v osnovni tok

### 7.3 Implicitna metoda končnih razlik za račun nestalnega toka

Računalniški program HEC – RAS uporablja za račun nestalnega toka implicitno metodo končnih razlik (Implicit Finite Difference Scheme). Za reševanje enačb uporablja štiritočkovno implicitno shemo. Implicitna metoda končnih razlik računa rešitev po časovnih korakih za vse točke (razdalje, stacionaže) za posamezen časovni korak. Predstavljen postopek linearizacije sta razvila Preissmann in Chen (1973), vsi parcialni odvodi so nadomeščeni z linearnimi izrazi [17].





**Slika 7:** Shema implicitne metode končnih razlik za račun nestalnega toka, ki jo uporablja program HEC-RAS

V tej shemi so štiri točke z dveh časovnih korakov ( $t$  in  $t + \Delta t$ ) uporabljene za aproksimacijo izrazov iz diferencialne enačbe s točko znotraj kvadrata  $(t + \theta)\Delta t$ . " $\theta$ " predstavlja »utežnostni koeficient« (ang. weighing factor) in je uporabljen za aproksimacijo vseh izrazov razen časovnih odvodov. Te vrednosti vstopajo pri  $(t + 1)\Delta t$  v vse izraze v enačbah. Za celoten odsek nastane sistem simultanih

enačb, kar je pomembna značilnost te sheme, saj je s tem omogočeno informacijam s celotnega odseka, da vplivajo na rešitev v vsaki točki (vsakem profilu).

Za vsak odsek obstaja  $N$  računskih točk (profilov), ki zapadejo v  $N-1$  celic končnih razlik. Za odsek reke tako nastane sistem simultanih rezultatov enačb, ki jih je  $2N-2$ . Ker pa imamo  $2N$  neznank ( $\Delta Q$  in  $\Delta h$  za vsak profil), potrebujemo dve dodatni enačbi. Ti dve enačbi definirajo robni pogoji, ki morajo biti za mirni tok definirani na gorvodnem in dolvodnem robu odseka, za deroči tok pa le na gorvodnem. Gorvodni robni pogoj predstavlja hidrogram  $Q - t$ , za dolvodnega pa imamo na voljo 4 možnosti:

- $h - t$  (hidrogram gladina – čas)
- $Q - t$  (hidrogram pretok – čas)
- $Q - h$  (pretočna krivulja)
- Višina normalne gladine iz Manningove enačbe

Z analizami stabilnosti sheme (Von Neumannova analiza stabilnosti) je bilo ugotovljeno, da je shema stabilna pri vrednostih  $0,5 < \theta \leq 1$ , pogojno stabilna pri  $\theta = 0,5$  in nestabilna pri  $\theta < 0,5$ . Pri analizah konvergenca je bilo ugotovljeno, da »numerično dušenje« (ang. numerical damping) narašča, kakor se zmanjšuje razmerje  $\frac{\lambda}{\Delta x}$ , torej razmerje med dolžino vala in razdaljo med profiloma. V programu HEC – RAS imamo pri simulaciji nestalnega toka možnost spreminjanja vrednosti  $\theta$ , in sicer od 0,6 do 1.

V praksi lahko tudi drugi dejavniki vplivajo na nestabilnost računske sheme. Nagle spremembe lastnosti zaporednih prečnih profilov, nenadne spremembe padca dna struge, objekti v strugi (mostovi, zapornice, prepusti...) lahko bistveno vplivajo na stabilnost sheme, zato je priporočeno opraviti analizo občutljivosti (ang. sensitivity study), pri kateri se preizkuša točnost in stabilnost rešitve z različno dolgimi časovnimi koraki ter različno dolgimi razdaljami med profili [17].

Točnost modela lahko opredelimo na osnovi razlike med rezultati osnovnih enačb in rezultati numeričnih rešitev enačb. Razlika med rezultati je odvisna od:

- Predpostavke in omejitve modela (enodimenzijski tok, konstantna gladina v prečnem profilu,...)
- Točnost geometrijskih podatkov (prečni profili, koeficient hrapavosti, mostovi, prepusti,...)
- Točnost podatkov o pretoku in robnih pogojev (hidrogrami, pretočne krivulje,...)
- Numerična točnost računske sheme (rešitve enačb nestalnega toka) – če predpostavimo, da so enačbe enodimenzijskega nestalnega toka točen prikaz naravnega toka, lahko točno rešitev dobimo le z analitičnim reševanjem. Metode končnih razlik so približne, vendar se uporabljajo, saj analitično reševanje enačb za zapletene rečne sisteme ni izvedljivo.

Stabilnost modela (numerična): Ker pri metodah končnih razlik odvodov ne moremo nadomestiti s točnimi vrednostmi, ampak so to le aproksimacije, nastanejo pri vsakem računu napake. Pri vsakem naslednjem časovnem koraku naredimo dodatno napako. Nova skupna napaka je lahko večja od prejšnje in se v vsakem naslednjem koraku dodatno poveča, tako dobimo nesmiselne rezultate. Takšni metodi pravimo, da je nestabilna. Lahko pa kljub napaki pri vsakem naslednjem časovnem koraku rešitev konvergira k točni vrednosti, s tem ostane napaka omejena. Sicer so vse rešitve približne, vendar so točne do neke majhne napake. Lastnosti, ki vplivajo na stabilnost:

Razdalja med prečnimi profili: Prečni profili morajo biti na lokacijah, kjer kakovostno ponazorijo obliko struge ter spremembe v njej. Dodatni profili se morajo postaviti na odsekih, kjer prihaja do naglih sprememb geometrije (sprememb padca, pretoka, hitrosti, hrapavosti) ter lokacijah objektov v strugi (mostovi, prepusti,...) Padec dna struge ima vedno pomembno vlogo pri postavitvi prečnih profilov, strmi odseki zahtevajo manjšo razdaljo med profili. Za hitro tekoči vodotoki je potrebno prečne profile postaviti na manj kot 20m, med tem ko je za velike, počasi tekoče reke z minimalnim padcem možno prečne profile postaviti na več km medsebojne razdalje. Če so prečni profili med seboj preveč oddaljeni ter razlike med hidravličnimi značilnostmi velike, lahko postane rešitev nestabilna. Težave lahko povzročijo tudi profili, ki so preveč blizu. Aproksimacije odvodov so namreč v tem primeru precenjene (nakloni so bolj strmi, predvsem na naraščajoči strani poplavnega vala) ter lahko vodijo do nestabilnosti. Ena prvih nalog za stabilizacijo modela nestalnega toka je tako pravilna določitev razdalj med profili. HEC – RAS. Burner (2002), [17] navaja dve empirični enačbi, kateri nudita dobro oporno točko za začetek razdelbe odseka na prečne profile. *Dr. Danny Fread* navaja enačbo, kjer je maksimalna razdalja med profiloma odvisna od časa naraščanja vala in hitrosti vala (prevedena iz angleških enot):

$$\Delta x \leq 0,01524 c T_r$$

Kjer je  $\Delta x$  največja razdalja med profiloma,  $c$  hitrost potovanja vala v m/s ter  $T_r$  čas naraščanja vala (do vrha). *P. G. Samuel* pa navaja enačbo (prevedena iz angleških enot):

$$\Delta x \leq \frac{0,04572 D}{I}$$

Kjer je  $\Delta x$  največja razdalja med profiloma,  $D$  povprečna globina struge v m ter  $I$  povprečen padec. Enačba *P.G.Samuela* je lažja za uporabo, saj je potrebno oceniti povprečen padec in povprečno globino struge, med tem ko je pri enačbi *Dr. Freada* težje oceniti hitrost potovanja vala.

- Dolžina časovnega koraka: Stabilnost in točnost ustreznega časovnega koraka opisuje *Courantov pogoj*:

$$C_r = V_w \frac{\Delta t}{\Delta x} \leq 1.0$$

Oziroma:

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{V_w}$$

Kjer predstavljajo členi  $V_w$  hitrost vala,  $C_r$  Courantovo število (vrednost 1 je optimalna),  $\Delta x$  razdaljo med prečnima profiloma,  $\Delta t$  pa časovni korak. Za približen izračun hitrosti vala so v priročniku za uporabo programa HEC - RAS podane empirične enačbe, ki jih tukaj ne bomo navajali. Primerjavo različnih časovnih korakov ponazarja Tabela? iz primera v 5. poglavju.

Za praktično uporabo priporočajo v priročniku programa HEC – RAS [17] uporabo empirične enačbe

$$\Delta t \leq \frac{T_r}{20}$$

Kjer je  $T_r$  čas naraščanja vala (na hidrogramu). Vsekakor pa je potrebno časovni korak skrajšati, v kolikor imamo v modelirani strugi objekte, kot so preliv, zapornice oziroma sotočja in raztočja. V primeru simulacije porušitve pregrade oz. nasipa, je potrebno časovni korak dodatno skrajšati, tudi do 5 sekund.

- Utežnostni koeficient  $\theta$ : Teoretično lahko, kot smo že omenili, utežnostni faktor varira med vrednostmi 0,5 in 1, vendar je praktična uporaba omejena na interval 0,6 – 1. Vrednost 1 nudi najvišjo stabilnost in robustnost, vendar nižjo numerično točnost. Priporoča se, da se vrednost pri izdelanem modelu znižuje od 1 do 0,6 dokler ostane model stabilen. V primerih, kadar je spodnji robni pogoj omejen z plimovanjem (npr. ustje reke), se priporoča uporaba vrednosti čim bližje 0,6, če želimo opisati vpliv protitočnega vala [17].

Ostale značilnosti modela, na katere je potrebno biti pozoren in jih razumeti pri modeliranju v izogib nestabilnosti, so:

- Prelivi
- Strmi odseki/mešani pretočni režim
- Dolvodni robni pogoji
- Lastnosti prečnih profilov
- Mostovi, prepusti
- ...

## 7.4 Vhodni podatki za umerjanje

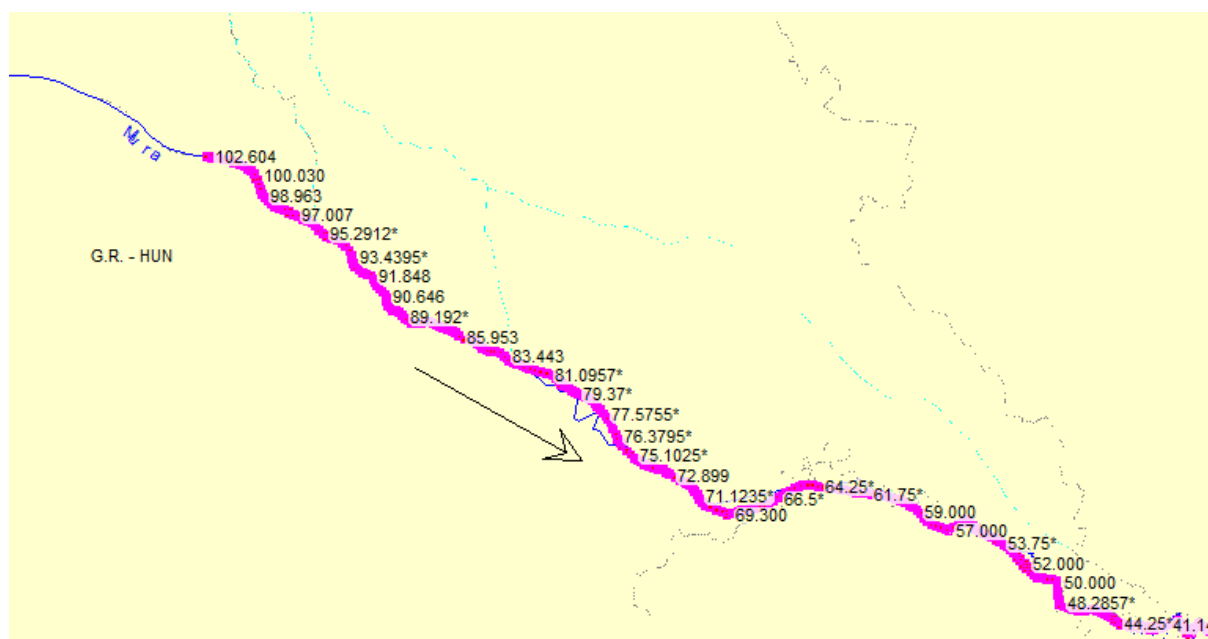
### 7.4.1 Viri

Pretežen del podatkov za definiranje struge reke Mure sta nam posredovala DEM in ARSO. Na Dravskih elektrarnah so v sklopu izdelave študij vpliva načrtovanih HE na Muri večkrat posneli reko (2010 in 2013), vendar natančneje, obširneje zgolj na odseku med državno mejo z Avstrijo in avtocesto. Na ostalem območju smo si pomagali z lidarskimi posnetki območja, ki jih je na svoji spletni strani 2015 objavil ARSO. Pri primerjavi klasično izmerjenih profilov ter profilov, izdelanih s pomočjo lidarskih posnetkov so nam v veliko pomoč bili prečni profili reke Mure, posneti v letu 2007 v sklopu projekta Biomura [18].

### 7.4.2 Obdelava podatkov za pripravo geometrije struge za račun stalnega toka

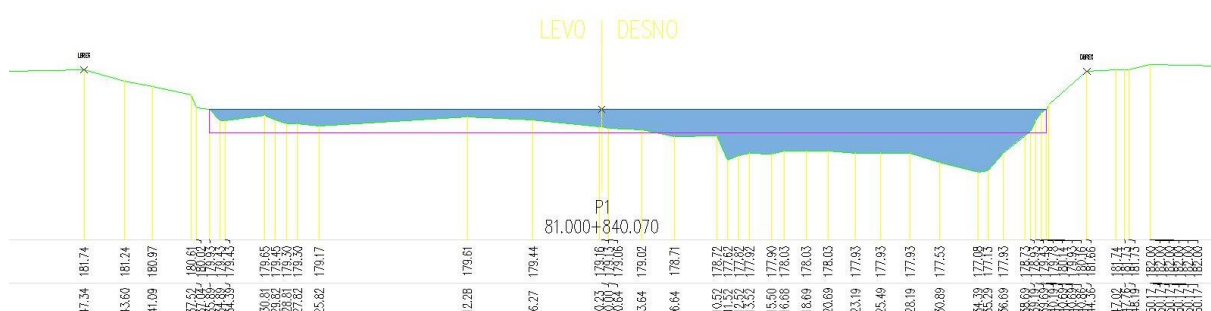
Obdelava geometrijskih podatkov je temeljila na zahtevah programa HEC – RAS. Pri modeliranju stalnega toka smo se omejili na nizke in srednje pretoke, s poudarkom na srednjem avgustovskem pretoku reke Mure za obdobje 1961 – 2005 na vodomerni postaji Petanjci, kar znaša  $178,1 \text{ m}^3/\text{s}$ . Ker navedeni pretok ne preliva iz osnovnega korita, pri simulaciji stalnega toka bilo potrebe po izdelavi geometrije poplavnega prostora.

Izdelali smo model reke Mure na odseku od Gornje Radgone do madžarsko – hrvaške meje, dolžina odseka je 65,604 km (Od km 37+000 do km 102+604). Ta odsek v celoti pokriva območje modela vodnega telesa Mursko in Prekmursko polje v programu ModFlow, v katerega smo vnašali rezultate iz programa HEC-RAS ter ga z njimi dopolnjevali. Odsek je sestavljen in 96 prečnih profilov, skupaj z interpoliranimi jih je 277. Z interpolacijo smo razdaljo med sosednjimi profili zmanjšali na največ 300 m (Slika 8). Od 96 prečnih profilov jih je 44 (km 102+604 do km 81+974) izmerjenih na terenu, pri teh je bilo tudi dno struge izmerjeno. Ostalih 52 smo izdelali na osnovi lidarskih posnetkov, posnetih leta 2013 in 2014.



**Slika 8:** Prečni profili (izmerjeni in interpolirani) za račun stalnega toka znotraj osnovnega korita.

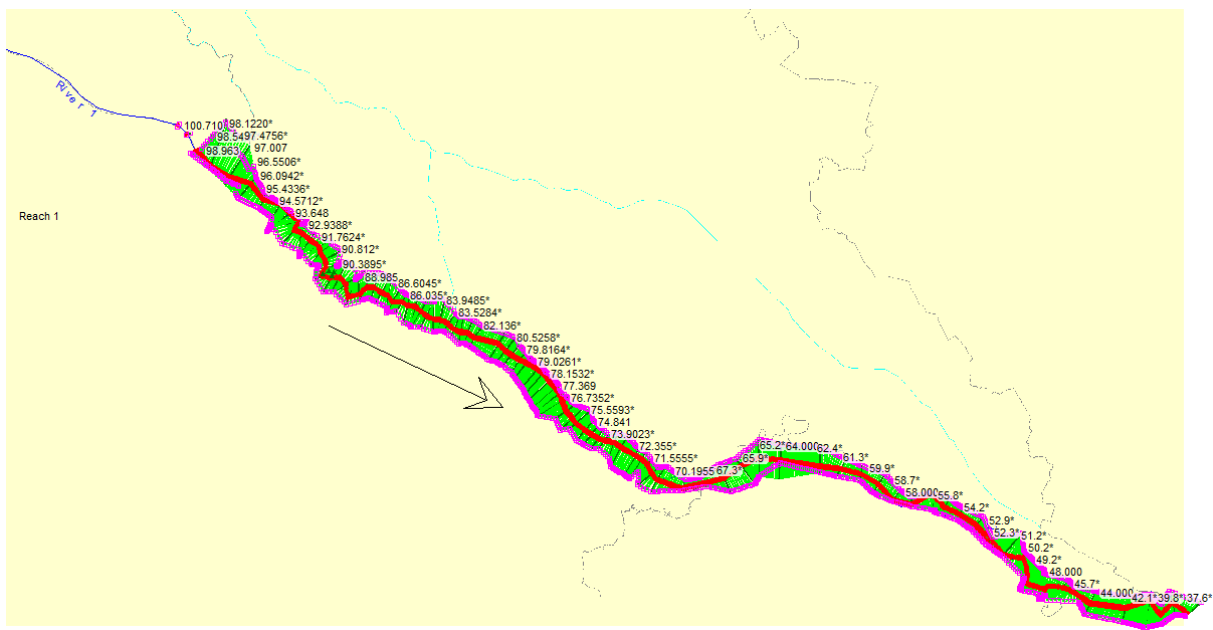
Pri prečnih profilih, ki jih je izdelal DEM, je bilo dno reke izmerjeno, kakor tudi pri profilih z območja projekta Biomura. Pri prečnih profilih, izdelanih na podlagi lidarskih posnetkov, teren pod vodno gladino ni viden. Prečne profile smo tako dopolnili z dnem osnovne struge. Prvi korak je bil primerjava 8 izmerjenih profilov [18] in izdelanih iz lidarskega posnetka, na istih stacionažah, z upoštevanjem gladine vode na dan snemanja. Površina toka v vsakem izmerjenem profilu je bila osnova za dodajanje dna korita k lidarsko izdelanim prečnim profilom. Izvrednoteno je bilo, da je potrebno glede na gladino reke na dan snemanja pri dani širini reke in površini toka, dodati pravokotno korito povprečne globine 1.05 m (Slika 9). Ta model transformacije lidarskih prečnih profilov je bil uporabljen na odseku med km 80+803 do km 37+000.



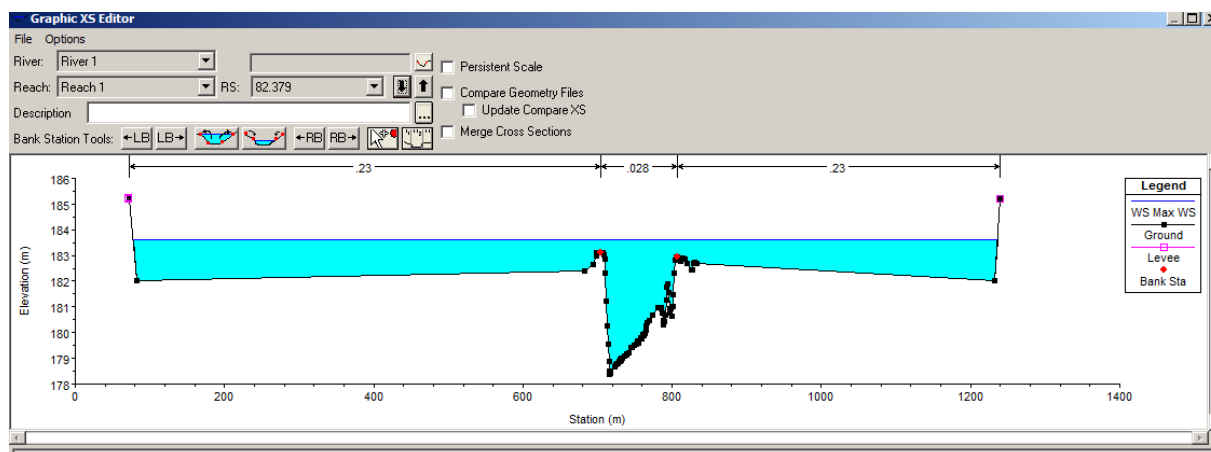
**Slika 9:** Površina pravokotne poglobitve dna struge kakor prikazuje skica, za 1.05 m od vodne gladine (glede na vodostaj na dan meritve) je v enaka povprečni pretočni površini izmerjenega prečnega profila (povprečje primerjanih profilov).

### 7.4.3 Obdelava podatkov za pripravo geometrije struge za račun nestalnega toka

Obdelava geometrijskih podatkov je temeljila na zahtevah programa HEC – RAS. Pri modeliranju nestalnega toka smo kot vhodni hidrološki podatek uporabili poplavni val iz julija 2012. Ker je navedeni visokovodni val prelival iz osnovnega korita, ki je bilo upodobljeno v primeru stalnega toka, smo geometrijo dopolnili s poenostavljeno topografijo poplavnega prostora. Poenostavljeno geometrijo poplavnega prostora smo uporabili zaradi zahtev programskega orodja ModFlow, ki za vnos podatkov o reki potrebuje le podatke o širini reke in koti gladine. Potek terena v poplavnem prostoru ustreza linearni trendni črti glede na potek terena, povzetega iz lidarskih posnetkov. Tak pristop je bil uporabljen zaradi značilnosti geometrije poplavnega prostora reke Mure, ki je ograjen z visokovodnimi nasipi, med katerimi je poglobljen del osnovna struga, širine med 80 in 120 m. Kadar voda prestopi bregove osnovne struge, kmalu poplavi pretežni del ravninskega, poplavnega prostora do visokovodnih nasipov. Širina poplavnega prostora znaša na obravnavanem odseku v povprečju 1100 m.



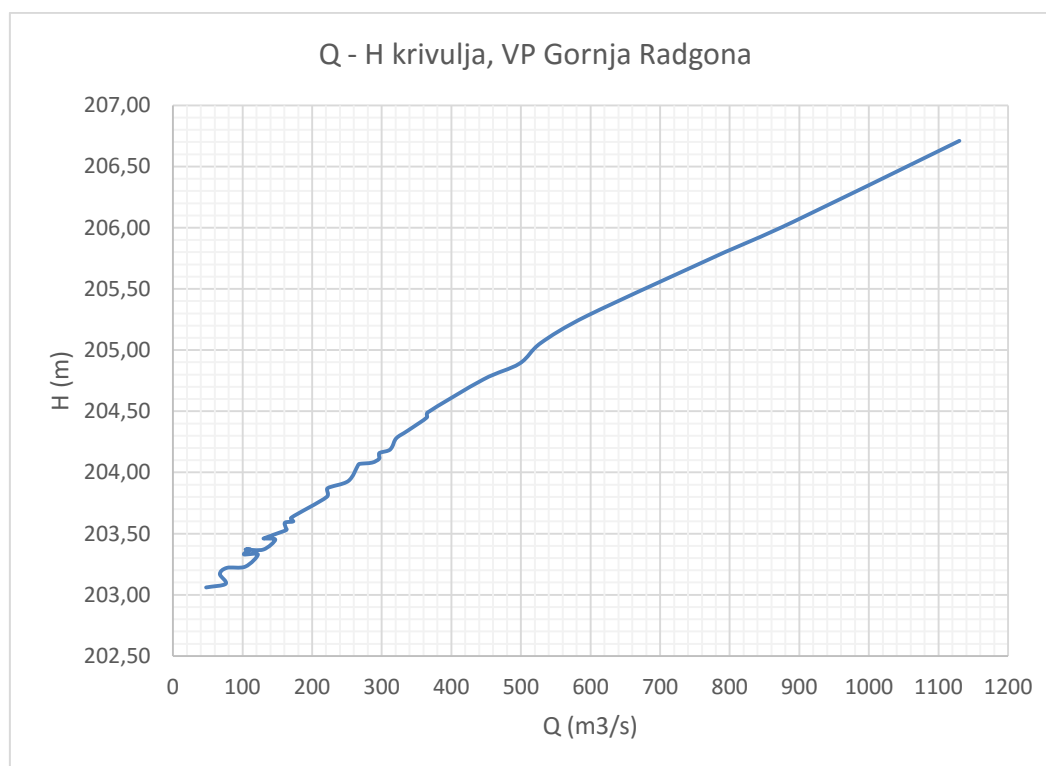
**Slika 10:** Situacija prečnih profilov za račun nestalnega toka med visokovodnimi nasipi



**Slika 11:** Primer prečnega profila za račun nestalnega toka z osnovnim koritom in poenostavljenim dnom poplavnega območja med visokovodnimi nasipi.

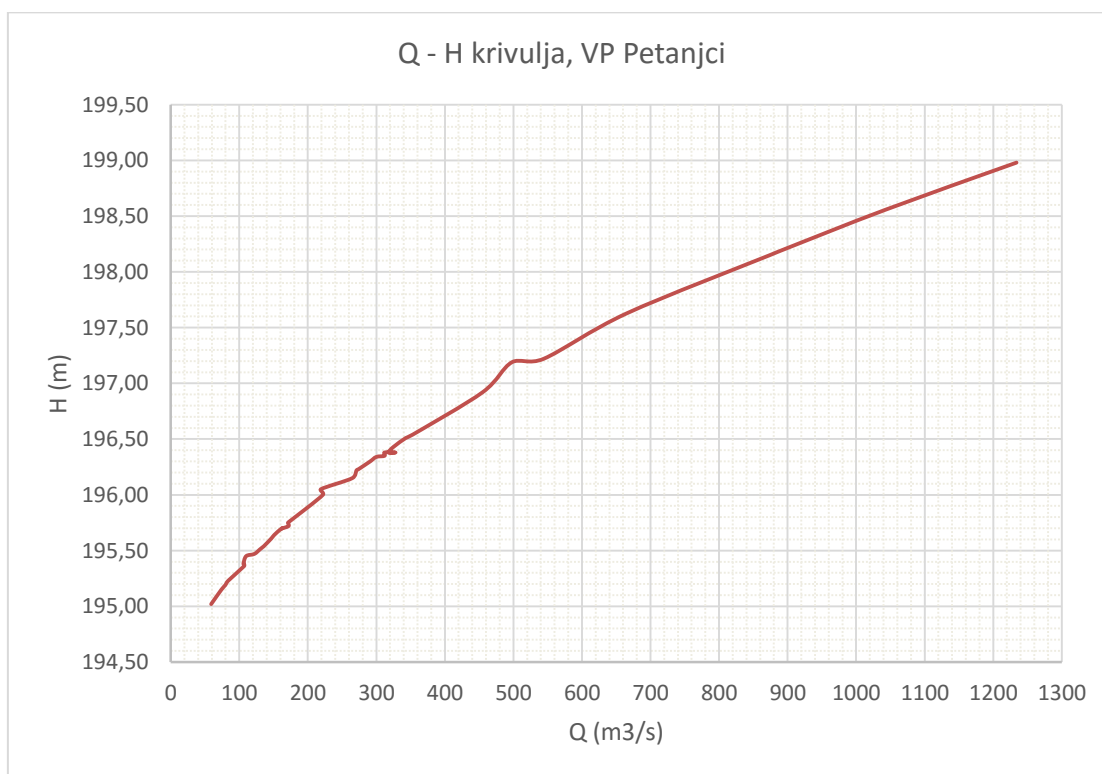
#### 7.4.4 Hidrološki podatki

Za potrebe umerjanja smo izdelali pretočne krivulje za vodomerne postaje na območju modela. Podatke smo povzemali s spletnih strani hidroloških služb. Vodomerne postaje na obravnavanem območju so Gornja Radgona (podatki iz leta 2009), Petanjci (podatki iz leta 2009) in Mursko Središče (podatki iz leta 2012 in 2014). Časovni okvir izbranih podatkov smo izbrali glede na pojavnost čim večjih razlik med pretoki v čim krajšem časovnem obdobju. S tem smo zmanjšali verjetnost spremembe struge in poteka Q - H krivulje. Pri nižjih pretokih je odstopanje vseeno opazno.

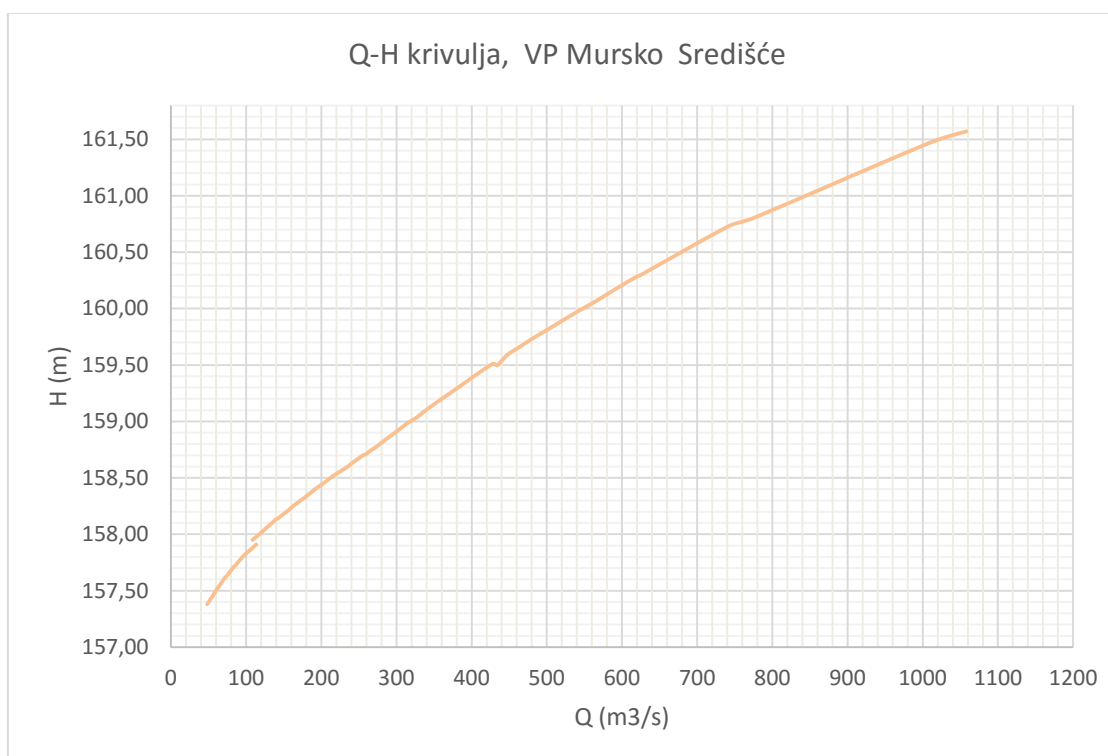


**Grafikon 6:** Q - H krivulja za VP Gornja Radgona po podatkih meritev iz leta 2009





**Grafikon 7:** Q - H krivulja za VP Petanjci po podatkih meritev iz leta 2009



**Grafikon 8:** Q - H krivulja za VP Mursko Središče po podatkih meritev iz let 2012 in 2014. Za nizke pretoke do 110 m<sup>3</sup>/s so uporabljeni podatki iz leta 2012, za ostale pa podatki iz leta 2014. Opazna je manjša nezveznost med krivuljama.

#### 7.4.4.1 Viri hidroloških podatkov

Statistični podatki s spletnih strani hidrometeoroloških služb Republike Slovenije (ARSO) in Republike Hrvaške (DHMZ) so bili osnova za izdelavo pretočnih krivulj. Uporabljen vir je bil tudi Hidrološka študija Mure [14]. Odločili smo se za obdelavo podatkov med leti 1961 – 2005, saj je za to časovno obdobje bilo mogoče pridobiti neprekinjen niz podatkov za vse tri vodomerne postaje.

Za modeliranje nestalnega toka je bil uporabljen primer visokovodnega vala iz julija 2012. Poplavni dogodek je imel obliko dvojnega vala, dveh visokovodnih konic v skupnem trajanju 15 dni.

#### 7.4.4.2 Obdelava podatkov

##### 7.4.4.2.1 Stalni tok

Glede na obstoječ model podzemne vode, ki smo ga dopolnjevali z natančnejšimi podatki reke Mure, smo se osredotočili na pretoke reke Mure v mesecu avgustu. Iz hidrološkega arhiva smo izbrali srednje avgustovske pretoke, njihova srednja mesečna vrednost za obdobje med leti 1961 – 2005 je:

**Preglednica 1:** Povprečni avgustovski pretoki 1961 – 2005 (ARSO)

Gornja Radgona (km 100+710)	Petanjci (km 94+185)	Mursko Središče (km 57+000)
174,5 m <sup>3</sup> /s	178,1 m <sup>3</sup> /s	183,04 m <sup>3</sup> /s

##### 7.4.4.2.2 Nestalni tok

Iz arhiva podjetja VGP Mura smo pridobili podatke, ki so jih s spletne strani ARSO in DHMZ shranjevali v času poplavnega dogodka. DHMZ objavlja na svoji spletni strani le podatke o višini gladine za vsako polno uro, med tem ko so podatki s slovenskih vodomernih postaj ažurirani vsakih 30 min, poleg podatka o gladini so na voljo tudi podatki o pretoku. Za vhodni podatek smo uporabili zabeležen visokovodni val na VP Gornja Radgona. Časovno okno dejanskega visokovodnega vala traja 335 ur, od 11. julija 2012 (12:00) do 25. julija 2012 (11:00), časovni korak je pol ure. Zaradi spremljanja stanja podzemne vode po poplavnem dogodku smo valu dodali še sintetičnih 15 dni stalnega toka (srednja mesečna vrednost za obdobje med 1961 - 2005 na VP Petanjci). Skupno trajanje simulacije je tako 720 ur oz. 30 dni. Hitrost potovanja konice visokovodnega vala je med 35 in 40 km na dan, območje modela podzemnega toka (od km 97+007 do km 50+000) prepotuje v 30 urah.



**Grafikon 9:** Zgornji robni pogoj za račun nestalnega toka, pretoki na VP Gornja Radgona med 11. in 25.7.2012 (ARSO) s sintetičnimi dodanimi 15 dnevi stalnega toka

#### 7.4.4.3 Vnos podatkov

Vnos podatkov se je pričel z izdelavo vhodne datoteke v \*.txt obliki, ki jo je bilo potrebno obdelati do oblike, katero podpira program. Podatki, ki smo jih dobili od DEM so bili pripravljene ustrezno, nakar smo iz lidarskih posnetkov izpisovali nove prečne profile in jih dodajali. Naknadno smo jih morali še reducirati do oblike, ki ne vsebuje več kot 500 točk na posamezen prečni profil, vendar ohranjajo oblikovne karakteristike (izbris dvojnih točk, zmanjšanje števila točk na območju izven osnovne struge). Po interpolaciji smo enako storili tudi z interpoliranimi prečnimi profili.

#### 7.4.5 Račun stalnega toka

Račun stalnega toka smo opravili z nekaj karakterističnimi nizkimi in srednjimi pretoki. Le te prikazuje Preglednica 2. Ker smo bili pri modeliranju podzemne vode vodnega telesa Murskega in Prekmurskega polja v programu ModFlow osredotočeni na razmere, ki se največkrat pojavijo avgusta, smo tudi pri reki poudarili dolgoletni srednji avgustovski pretok, ki znaša 178,1 m<sup>3</sup>/s na VP Petanjci.

#### 7.4.5.1 Umerjanje - stalni tok

Dolžina celotnega odseka za modeliranje stalnega toka je 65,604 km (Od km 37+000 do km 102+604). Ta odsek v celoti pokriva območje modela vodnega telesa Prekmursko polje v programu Modflow, v katerega smo vnašali rezultate iz progama HEC-RAS ter ga z njimi dopolnjevali. Odsek je sestavljen in 96 prečnih profilov, skupaj z interpoliranimi jih je 277. Obdelane prečne profile smo interpolirali na način, da njihova medsebojna razdalja ne presega 300m. Spodnji robni pogoj predstavlja padec dolvodno od obravnavanega odseka, ki znaša 0,45 ‰.

Model smo umerjali s simulacijo stalnega toka s pomočjo petih različnih pretokov na vsaki od treh vodomernih postaj. S spreminjanjem Manningovega koeficienta hrapavosti ( $n_g$ ) smo izračunane gladine približali izmerjenim. Vrednost  $n_g$  je med 0,025 in 0,035. Odstopanje pri vodomernih postajah znaša:

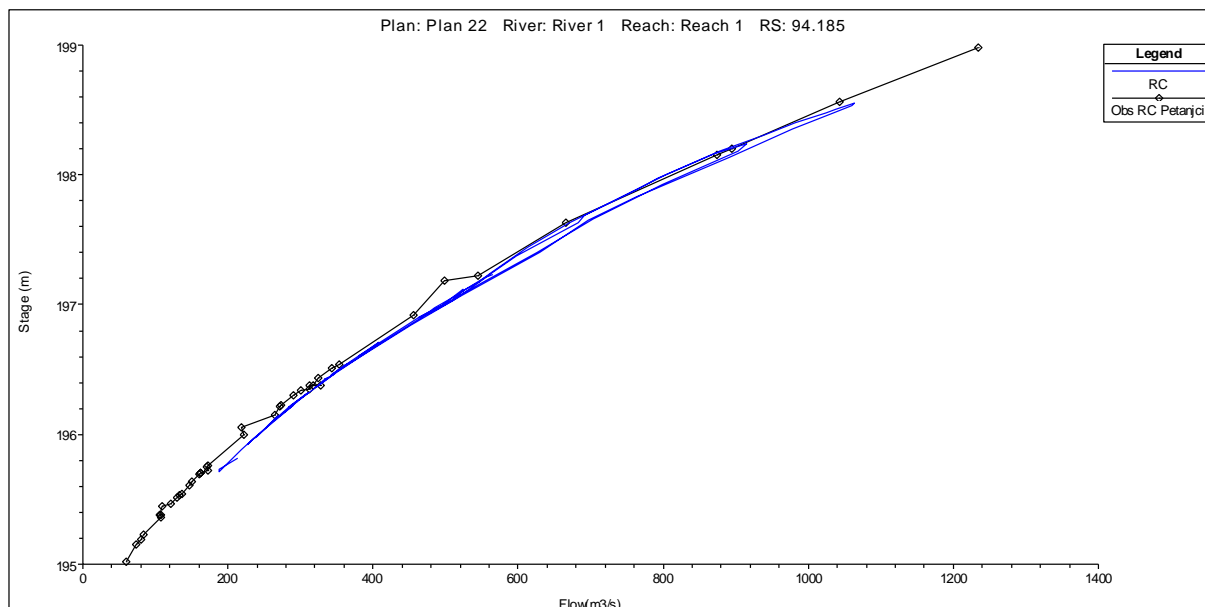
**Preglednica 2:** Umerjanje modela za stalni tok

	<b>Pretok</b> (m <sup>3</sup> /s)	<b>Kota dna</b> (m)	<b>Izračunana gladina</b> (m)	<b>Izmerjena gladina</b> (m)	<b>Razlika</b> (m)
<b>VP G. Radgona</b>	68	202.00	203.13	203.17	0.04
	137	202.00	203.57	203.41	-0.16
	163	202.00	203.72	203.6	-0.12
	274	202.00	204.25	204.08	-0.17
	<b>178.1</b>	<b>202.00</b>	<b>203.80</b>	<b>203.88</b>	<b>0.08</b>
<b>VP Petanjci</b>	68	193.59	194.91	195.10	0.19
	137	193.59	195.49	195.54	0.05
	163	193.59	195.68	195.70	0.02
	274	193.59	196.38	196.23	-0.15
	<b>178.1</b>	<b>193.59</b>	<b>195.79</b>	<b>195.79</b>	<b>0.00</b>
<b>VP M. Središče</b>	68	156.63	157.59	157.57	-0.02
	137	156.63	158.18	158.11	-0.07
	163	156.63	158.37	158.27	-0.10
	274	156.63	159.07	158.79	0.28
	<b>178.1</b>	156.63	<b>158.47</b>	<b>158.33</b>	<b>-0.14</b>

#### 7.4.5.2 Umerjanje - nestalni tok

Dolžina celotnega odseka za modeliranje nestalnega toka je 63,710 km (Od km 37+000 do km 100+710). Tudi ta odsek v celoti pokriva območje modela vodnega telesa Mursko in Prekmursko polje v programu ModFlow, v katerega smo vnašali rezultate izračuna. Odsek je sestavljen in 94 prečnih profilov, skupaj z interpoliranimi jih je 655. Obdelane prečne profile smo interpolirali na način, da njihova medsebojna razdalja ne presega 100m. Spodnji robni pogoj predstavlja padec dolvodno od obravnavanega odseka, ki znaša 0,45 ‰. Zgornji robni pogoj predstavlja Q - H krivulja prečnega profila pri vodomerni postaji Gornja Radgona. Zaradi zgornjega robnega pogoja smo skrajšali obravnavani odsek struge glede na primer stalnega toka, saj smo prvi gorvodni profil postavili na lokacijo VP Gornja Radgona (km 100+710). Za pomoč pri umerjanju so nam služili podatki s še dveh vodomernih postaj: VP Petanjci (km 94+185) in VP Mursko Središče, HR (km 57+000), ki sta v programu definirana kot notranja robna pogoja. Za vse omenjene vodomerne postaje smo izdelali Q - H krivulje s pomočjo hidroloških arhivov merjenih podatkov ARSO (SLO) in DHMZ (HR) (Poglavje 7.2.4).

Model smo umerjali s pomočjo prilagajanja koeficienta hrapavosti. Ugotavljanje odstopanj izračunanih in izmerjenih gladin je potekalo s pomočjo primerjave vnesenih in izračunanih Q - H krivulj na treh lokacijah vodomernih postaj (km 100+710, km 94+185 in km 57+000). Po nekaj iteracijah smo obliko izračunanih približali obliki izmerjenim do napake, manjše kot 10 cm. Rezultati so grafično prikazani v Prilogi A).



**Grafikon 10:** Umerjen model, izračunana krivulja Q-H sovпада z izmerjenimi podatki

## 8 ModFlow

### 8.1 Teoretične osnove

Modflow (McDonald in Harbaugh, 1988) je računalniški program, razvit v ZDA po letu 1980. Program rešuje osnovno enačbo toka na osnovi masne bilance po metodi končnih razlik, z leti je postal preverjen standard za modeliranje toka podzemne vode. Koda je brezplačna, so pa z leti razvili večje število (plačljivih) uporabniških vmesnikov, ki uporabniku olajšajo vnos podatkov ter interpretacijo ter vizualizacijo rezultatov.

Program uporablja numerično metodo končnih razlik mreže z vozlišči v centrih blokov. Tridimenzionalni sistem vodonosnika je prikazan z več sloji. Vodoravna ravnina (mreža) je določena z dimenzijami v smereh  $x$  in  $y$  in je v vsakem sloju enaka. Vertikalne komponente  $\Delta z$  ni potrebno določiti, saj se jo določi posredno. Uporabnik namreč vnese transmisivnost v sloju, ki je enaka produktu med horizontalno hidravlično prevodnostjo in debelino sloja ( $\Delta z$ )

Reševanje parcialne diferencialne enačbe poteka po metodi končnih razlik, vodonosnik mora biti zato razdeljen na celice (diskretiziran). Osnovna enačba obravnava tok vode skozi kontrolni volumen. Poleg začetnih in robnih pogojev celicam pripišemo vrednosti koeficientov, ki so lahko različni - odvisno od lege celice (krajevno odvisne). Voda je obravnavana kot medij s konstantno gostoto in dinamično viskoznostjo (ter posledično temperaturo).

Obstaja več tehnik reševanja diferencialnih parcialnih enačb z metodo končnih razlik. Vodonosnik je razdeljen na mrežo, v posameznih elementih (celicah) predpostavljamo, da ima center take celice povprečne vrednosti hidravličnega potenciala. ModFlow omogoča izvedbo diskretizacije prostora le s pravilno pravokotno mrežo. Vsaki celici je dodeljen indeks, s katerim je določena pripadajoča transmisivnost  $T$  (produkt med srednjim koeficientom prepustnosti in debelino omočene plasti). Koeficient uskladiščenja  $S$  in podatki o izviri/ponorih  $Q/-Q$  so povprečne vrednosti  $T$  in  $S$  in celotne vsote  $Q$  posamezne celice.

Osnovna enačba, ki opisuje tok podzemne vode na osnovi masne bilance se glasi

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right] + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

kjer predstavljajo

$K_{xx}, K_{yy}$  in  $K_{zz}$  ... koeficiente prepustnosti v smeri osi  $x$ ,  $y$  in  $z$  [m/s]

$h$  ... hidravlični potencial [m]

$W$  ... tok (volumski), ki predstavlja izvore ali ponore vode (negativni predznak predstavlja odvzem) [1/s]

$S_s$  ... specifična hramba (prostornina vode, ki se sprosti na enoto prostornine vodonosnika na enoto spremembe hidravličnega potenciala) [1/m]

$t$  ... čas [s]

Enačba, ki jo program rešuje po metodi končnih razlik je izvedena iz osnovne enačbe in opisuje tok podzemne vode, za posamezno celico diskretiziranega vodonosnika pa ima obliko

$$\begin{aligned} & CR_{i,j-\frac{1}{2},k} (h_{i,j-1,k}^m - h_{i,j,k}^m) + CR_{i,j+\frac{1}{2},k} (h_{i,j+1,k}^m - h_{i,j,k}^m) + \\ & CC_{i-\frac{1}{2},j,k} (h_{i-1,j,k}^m - h_{i,j,k}^m) + CC_{i+\frac{1}{2},j,k} (h_{i+1,j,k}^m - h_{i,j,k}^m) + \\ & CV_{i,j,k-\frac{1}{2}} (h_{i,j,k-1}^m - h_{i,j,k}^m) + CV_{i,j,k+\frac{1}{2}} (h_{i,j,k+1}^m - h_{i,j,k}^m) + \\ & P_{i,j,k} h_{i,j,k}^m + Q_{i,j,k} = SS_{i,j,k} (\Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k) \frac{h_{i,j,k}^m - h_{i,j,k}^{m-1}}{t^m - t^{m-1}} \end{aligned}$$

kjer predstavljajo

$CV, CR, CC$  ... koeficienti prepustnosti med celico  $i,j,k$  in sosednjo celico

$h_{i,j,k}^m$  ... hidravlični potencial v celici  $i,j,k$  v časovnem koraku  $m$

$P_{i,j,k}$  ... vsota koeficientov hidravličnega potenciala vseh izrazov za izvore in ponore

$Q_{i,j,k}$  ... vsota konstant hidravličnega potenciala vseh izrazov za izvore in ponore (negativen zapis predstavlja tok iz sistema (npr. črpanje), pozitiven pa dodajanje v vodonosnik (npr. napajanje))

$SS_{i,j,k}$  ... specifična hramba

$(\Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k)$  ... dimenzije celice  $i,j,k$ . Zmnožene predstavljajo prostornino celice.

$t^m$  ... čas pri časovnem koraku  $m$

Ta enačba je nato še preoblikovana v sistem enačb, program rešuje matriko.

Zavedati se je potrebno omejitev te predstavljene oblike enačbe oz. predpostavk. Voda je obravnavana kot medij s konstantno gostoto in dinamično viskoznostjo (ter posledično temperaturo). Prostor je razdeljen na celice in obdelan s približnim izračunom, napaka tega računa je sorazmerna z velikostjo celice.

### 8.1.1 Zahtevani podatki

Podatke, potrebne za modeliranje v splošnem delimo v dve kategoriji. V prvi so geometrijski podatki, v drugi pa hidravlični. Geometrijski določajo lego in dimenzije slojev, hidravlični pa prevodnost, piezometrične višine, pretoke, obremenitve (črpanje/bogatenje),... Pri ModFlowu- je potrebno določiti

tip sloja (arteški, s prosto gladino). Večja negotovost je pri izboru - določitvi hidravličnih podatkov, saj se lahko le-ti med izmerjenimi in dejanskimi razlikujejo tudi za nekaj stopenj, kar lahko posledično vpliva tudi na velika odstopanja pri rezultatih.

### 8.1.2 Robni pogoji

Matematični model je sestavljen iz osnovne enačbe, robnih pogojev in začetnih pogojev. Robni pogoji so matematični izrazi, ki določajo odvisno spremenljivko (npr. piezometrično višino) ali njen odvod (npr. pretok) na robu obravnavanega, modeliranega območja. Izbira netočnih robnih pogojev vodi k velikim napakam. Pri stacionarnih simulacijah robni pogoji zelo vplivajo na tokovni vzorec, pri nestacionarnih simulacijah pa imajo veliko vlogo, kadar v določenem času vpliv obremenitve (npr. črpanja) doseže rob modela. Za čim bolj realne rezultate simulacij morajo tako biti robni pogoji pravilno definirani.

Poznamo fizične (npr. neprepustne kamnine) in hidravlične (npr. podzemne razvodnice) robne pogoje modela. Vsi hidravlični robni pogoji so nestalni (v času in prostoru), lahko pa celo izginejo, če pride do večjih hidroloških sprememb. Hidrogeološki robni pogoji so predstavljeni z več tipi matematičnih robnih pogojev, predstavljamo nekaj najpogostejših:

- Tip 1: Dirichletov robni pogoj je robni pogoj, pri katerem so določene piezometrične višine. Na meji je določena odvisna spremenljivka piezometrična višina ali gladina podzemne vode (konstantna nivojska meja). Te robne pogoje upoštevamo, kadar je gladina na robu vodonosnika neodvisna od pogojev toka v vodonosniku (npr. stik vodonosnika z morjem, jezerom, močvirjem, reko). Voda prosto doteka in izteka iz vodonosnika, odvisno od pogojev toka znotraj vodonosnika. Gladina vodnega telesa na meji vodonosnika ostaja nespremenjena (zaradi tega jo tudi imenujemo »trda« meja). Dirichletov pogoj lahko uporabimo tudi pri modeliranju slabo prepustnega poroznega prostora v stiku z izredno prepustnim in vodnatim prostorom [19].
- Tip 2: Neumannov robni pogoj je robni pogoj z določenimi pretoki. Nanašajo se na prvi odvod odvisne spremenljivke. Na meji je določen prvi odvod piezometrične višine oz. gradient ali pretok vode. Te robne pogoje upoštevamo, ko je na meji znan pretok vode ali specifični pretok na enoto dolžine ali površine meje vodonosnika. Pri tem ločimo neprepustno mejo (robni pogoj »brez toka«) in določen pretok vode skozi mejo. Neprepustno mejo uporabljamo na stiku s podlago ali na neprepustni meji na robu vodonosnika. Mejo z določenim pretokom skozi njo uporabljamo v primerih ponazoritve infiltracije padavin, ipd [19].
- Tip 3: Fourierjev (Cauchy-jev) pogoji, ki se nanaša na neodvisno spremenljivko in njen prvi odvod. Z njimi s srečujemo pri analizi infiltracije vode iz vodotoka z zablatenim dnom. Dirichletovega pogoja v tem primeru ne moremo uporabiti, ker je tlak v podtalnici odvisen tudi od količine vode v vodotoku [19].



- Tip 4: Pogoj, ki predstavlja črpalni ali nalivalni vodnjak. Uporablja se za ponazoritev točkovnega injektiranja in črpanja.
- Tip 5: Pogoj, ki se uporablja za ponazoritev površinskega napajanja in evapotranspiracije. Ker ModFlow ponazoritve za Neumann-ov robni pogoj (Tip 2) nima, se namesto njega uporablja Tip 5, ki predstavlja tok iz obrobij modela v obliki padavin.

## 8.2 Opis modela v programu ModFlow

Osnovo za nadgradnjo je predstavljal model, podrobneje predstavljen v poročilu »Konceptualni model za Mursko in Prekmursko polje-P1B« [2] in »Postavitev numeričnega modela toka podzemne vode za Mursko in Prekmursko polje [20]« zgrajen na podlagi sledečih ugotovitev:

Celoten peščeno prodni zasip Murskega in Prekmurskega polja je v modelu predstavljen z eno modelsko plastjo, razdeljeno na pravokotno mrežo velikosti 500 x 390 celic (100 m x 100 m).

Čas modeliranja je določen na 153 dni.

Vhodni podatki, za napajanje podzemne vode za infiltracijo iz padavin na Mursko – Prekmurskem polju so določeni na osnovi meteorološke postaje Murska Sobota - Rakičan, izbrano je obdobje maj – september 1992.

Vhodni podatki za evapotranspiracijo so določeni na osnovi meritev na državni meteorološki merilni postaji Murska Sobota - Rakičan, izbrano je obdobje maj – september 1992.

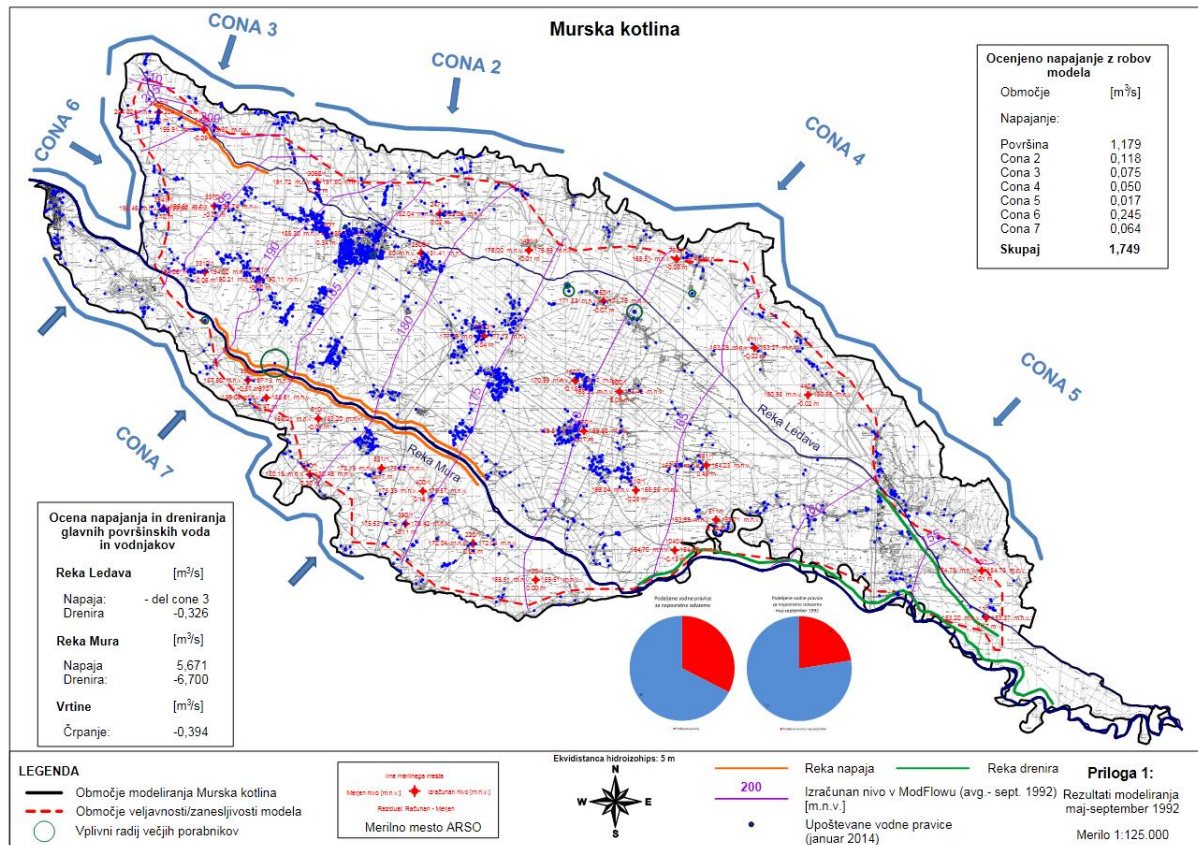
Vhodni podatki zajemajo tudi gladine podzemne vode in nivoje reke Mure, ki so bili izmerjeni v avgusta 1992. Izmerjenih je bilo 50 točk gladine reke, širina in globina struge ter hidravlična prevodnost dna so bili ocenjeni.

Mursko polje je zgrajeno iz medzrnskega vodonosnika s prosto gladino in z bogatimi zalogami podzemne vode. Koeficient prepustnosti ( $k$ ) na območju nizke Murske terase znaša od  $1 \cdot 10^{-3}$  do  $2 \cdot 10^{-2}$  m/s (Petauer et al. 2007). Na območju visoke Murske terase na Murskem polju je koeficient prepustnosti ( $k$ ) od  $1,4 \cdot 10^{-5}$  do  $1 \cdot 10^{-3}$  m/s [4], [5]. Ob nizkem nivoju nastopa gladina podzemne vode na Murskem polju na globini 2 do 3 m pod terenom. Debelina omočenega sloja v zgornjem delu (zahodnem delu polja) doseže ob nizkem nivoju do 5 m, v osrednjem delu polja do 40 m in v južnem delu do 20 m [4], [5]. V severozahodnem delu polja (med Radenci in Vučjo vasjo) se podzemna voda pretaka v smeri od zahoda proti vzhodu. Pod robom visoke terase (med Radenci in Turjanci) tok podzemne vode zavije proti severovzhodu. Med Turjanci in Hrastjem – Moto teče tok podzemne vode v smeri od jugozahoda proti severovzhodu in pod Hrastjem postopno zavije v smeri jugovzhoda, praktično vzporedno s tokom Mure. To smer zadrži do severozahodnega roba polja na sotočju Mure in Ščavnice. Peščeno prodnati zasip je prekrit z različno debelo plastjo gline, melja in peska, ki je ponekod skoraj odnesena, drugod pa preseže tudi debelino 2 m. Ta sicer plitev pokrov je slabo do zelo

slabo prepusten. Podlago kvartarnih prodnih zasipov gradijo zelo slabo do praktično neprepustni pliocenski in miocenski drobnozrnati lapornati sedimenti [4], [5].

Na Prekmurskem polju, po do sedaj znanih podatkih, je koeficient prepustnosti ( $k$ ) peščeno prodnatega zasipa na severozahodnem robu polja od  $1,6 \cdot 10^{-3}$  do  $5,16 \cdot 10^{-3}$  m/s. V osrednjem delu ravnice ob Muri, med Krogom in Dokležovjem je  $k$  od  $1,13 \cdot 10^{-3}$  do  $4,13 \cdot 10^{-3}$  m/s. V osrednjem delu ravnice, na območju Murske Sobote znaša  $k$  od  $2,37 \cdot 10^{-3}$  do  $4,2 \cdot 10^{-3}$  m/s. Na severnem robu osrednjega dela ravnice pri Mlajtincih in Tešanovcih je  $k$  do  $1,6 \cdot 10^{-3}$  m/s. Na jugovzhodni polovici ravnice, ob Muri med Beltinci in Melinci meri  $k$  od  $2,6 \cdot 10^{-3}$  do  $5,3 \cdot 10^{-3}$  m/s in na vzhodnem robu polja, na območju Gaberja ter Petišovcev  $1,1 \cdot 10^{-3}$  m/s [4], [5]. Podzemna voda Prekmurskega polja teče v smeri od zahoda, severozahoda proti vzhodu, jugovzhodu, skoraj vzporedno s tokom Mure [4], [5]. Podzemna voda Prekmurskega polja se napaja iz padavin, reke Mure in iz obrobij polja. Mura prispeva k obnovi zalog podzemne vode predvsem v ozkem pasu vzdolž rečne struge. Del podzemne vode se napaja z dotoki iz gričevnatega zaledja Goriškega na severnem robu polja. Studenčnice, ki tečejo preko ravnice praktično vzporedno s tokom Mure imajo funkcijo napajanja in dreniranja podzemne vode. Te studenčnice nosijo veliko zelo finega materiala, zrnivosti finega peska in melja ter v suspenziji glin. Brežine so zato močno zakolmatirane in slabo prepuščajo pretok podzemne vode.

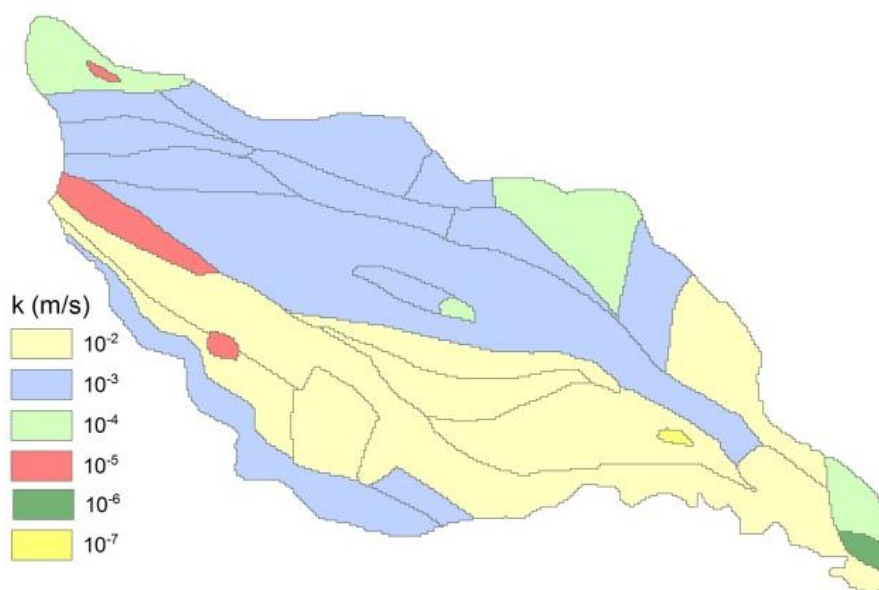
Poleg prikazanih hidrodinamičnih mej smo na zgornjo ploskev predpisali napajanje s padavinami značilnimi za t.i. kritično hidrološko obdobje iz leta 1992 (242,5 mm/leto) [2]. Kot nasprotje napajanju, ki za razliko od padavin predstavlja praznjenje na zgornji strani prve modelske plasti, smo v modelu določili ETP v velikosti 562,3 mm/leto [2]. Globinski vpliv ETP smo določili na osnovi podatkov GROWA-SI [21], izračunanih za leto 1992. GROWA-SI pokaže za leto 1992 vrednost napajanja z robne površine modela  $1,02 \text{ m}^3/\text{s}$ , ta vrednost nam je v modelu služila kot orientacijska vrednost za skupno površinsko napajanje, ki v našem modelu znaša  $1,179 \text{ m}^3/\text{s}$  (Priloga 1). Analogno, kot pri površinskem napajanju, so nam bili, v času kalibracije, v pomoč izračuni GROWA-SI pri določanju dotokov iz stranskih robov modela. Na osnovi tako postavljenega modela smo izvedli umerjanje modela, rezultate katerega prikazujemo v naslednjih poglavjih. Na zahodnem robu modela (Cona 6 in delno Cona 3), na robu modela, ki meji na Goričko in Lendavske gorice (Cone 2, 4, 5 in delno Cona 3) ter na jugozahodnem območju modela (Cona 7), smo postavili meje napajanja, ki so ekvivalentne t.i. Neumann-ovemu robnemu pogoju.



Slika 12: Zasnova modela, ki je bil podlaga za dodelavo [12].

### 8.3 Umerjanje

Model je bil umerjen s pomočjo orodja PEST. Za potrebno umeritev je model bil zagnan več 100 krat. V primerih, ko s PEST – om ni bilo izboljšanja do pogoja  $NORM\ RMS < 5\%$ , so bile spreminjane hidrodinamične meje modela, območja dotokov v model in območja k-jev (spremembe v konceptualnem modelu) [2]. Tako so v modelu, ki je na začetku imel 21 območij hidravlične prepustnosti prišli do končnega modela, ki ima 30 območij s hidravlično prepustnostjo, v katerih je možno spreminjati vrednosti k-jev (Slika 13), s pomočjo PEST-a ali ročno.



**Slika 13:** Območja različnih hidravličnih prepustnosti. [2]

Za osnovo kalibracije modela so bile uporabljene simultane meritve gladin podzemne vode, ki so jo opravili na Sektorju za hidrogeološke analize ARSO, leta 1992. Izbira 34 opazovalnih mest z opazovalne mreže ARSO, je bila opravljena s ciljem skrajšanja časa kalibracije v PEST-u in zaradi zmanjšanja vpliva merskih objektov, ki so pod direktnim vplivom črpanja ali pa so meritve v njih slabše kakovosti zaradi same narave objekta [2].

Pri validaciji merjenih podatkov je treba še posebej izpostaviti problem površinskih vodotokov. Na območju Murskega in Prekmurskega polja ne obstajajo recentni podatki o prečnem profilu rek Mure, Ledave in Kučnice. Zadostovali bi podatki izmerjeni na vsakih 250 metrov, meritve pa bi morale vključevati: koto gladine reke, koto dna reke in za potrebe modela tudi debelino in prepustnost sedimentov dna reke [2].

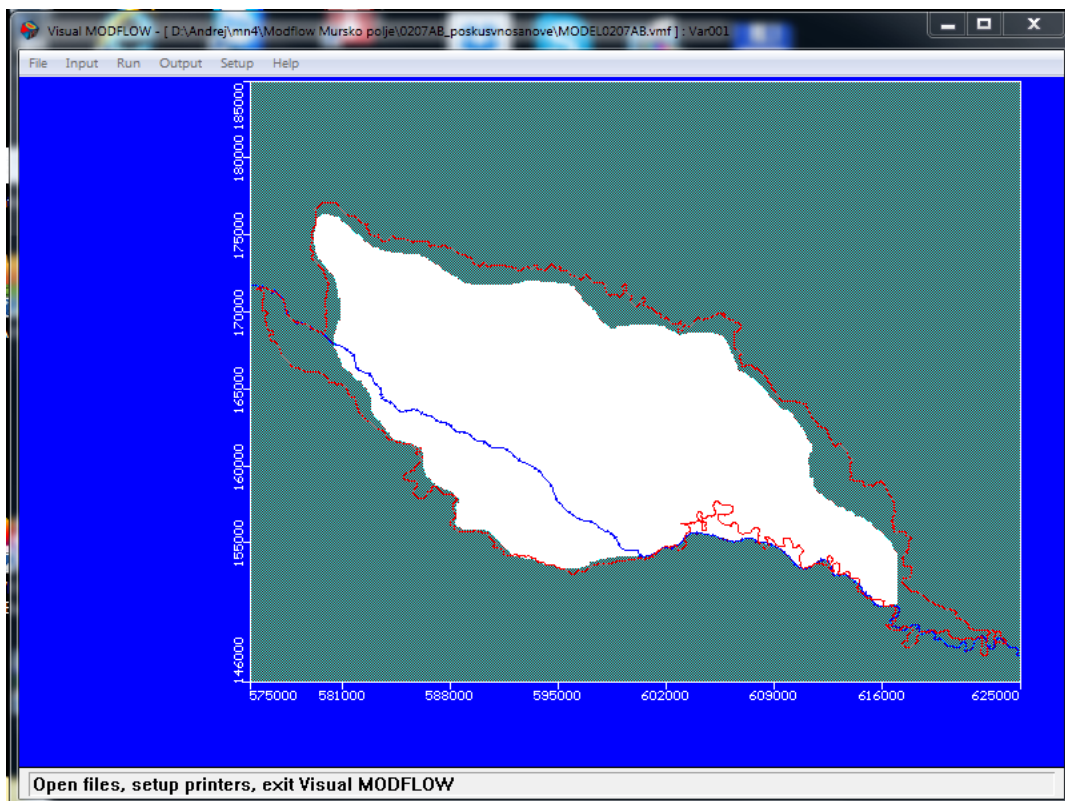
- Model je umerjen na stopnjo NORM RMS = 0,416 % in s tem zadovoljivo umerjen za potrebe določitve količinskega stanja.
- Maksimalen rezidual dosega vrednost 0,674 m (merilno mesto 990/1 na Murskem polju. Izračunana debelina omočenega sloja na tem mestu je 6 m, in ob upoštevanju bližine robnih pogojev predstavlja zadovoljiv rezultat.
- Ocenjeno napajanje z robov modela je 1,749 m<sup>3</sup>/s, od tega je večina napajanja iz površine (infiltracija padavin).

- Napajanje reke Mure, ki ima lokalni vpliv znaša  $5,671 \text{ m}^3/\text{s}$ , napajanje Ledave pa je ocenjeno na nekaj deset litrov.
- Dreniranje reke Mure je ocenjeno na  $7 \text{ m}^3/\text{s}$ , Ledave pa na  $0,326 \text{ m}^3/\text{s}$ .
- Funkcija optimizacije se je približala izravnavi in zato nadaljnja optimizacija ni več smiselna [2].

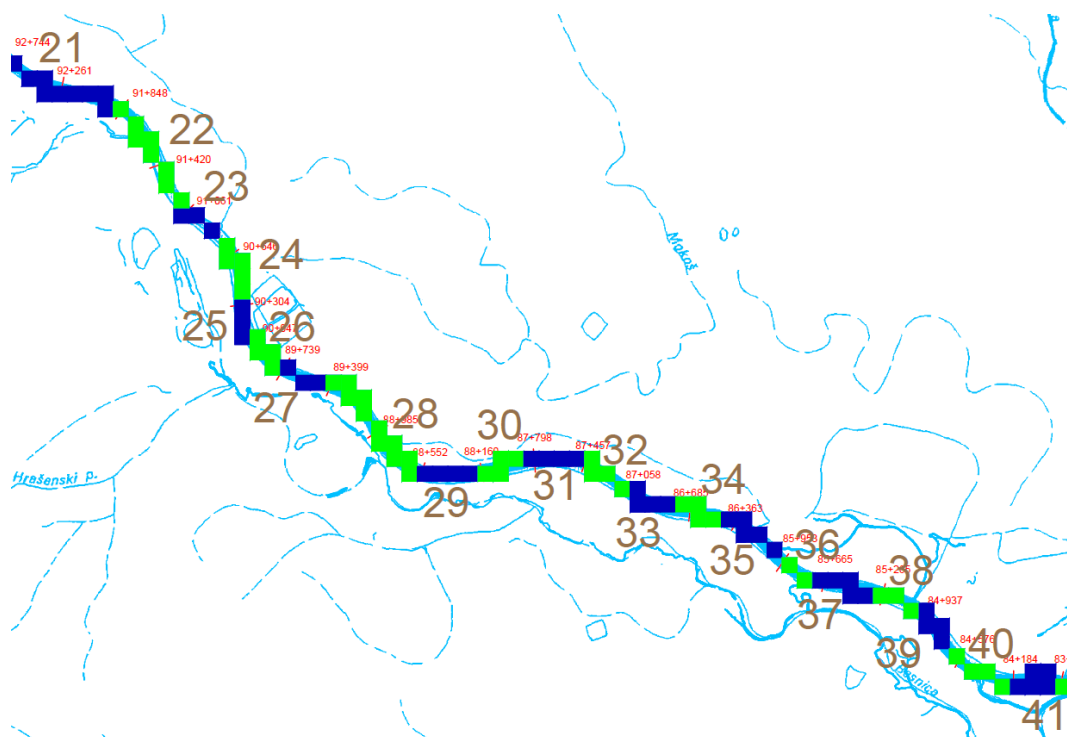
#### 8.4 Dopolnitev modela

Ravno zaradi manjkajočih podatkov o površinskih vodotokih smo pričeli z zbiranjem geodetskih posnetkov, prečnih profilov in analiz lidarskih posnetkov terena, ki smo jih združili in obdelali.

Za vnos podatkov smo morali rezultate, pridobljene iz HEC – RAS-a obdelati do oblike, katere vnos podpira program ModFlow. Model podzemne vode je pokriva krajši odsek reke, kot smo ga modelirali s HEC – RAS-om, uporabili smo rezultate za odsek reke med km 97+007 in km 50+000, ki ga konica visokovodnega vala prepotuje v 30 urah.



**Slika 14:** Delovno okolje programa ModFlow s prikazom reke Mure (modro) na Murskem in Prekmurskem polju (rdeče). Z belo barvo je predstavljeno območje modeliranja.



**Slika 15:** Prikaz odsekov, s pomočjo katerih smo v ModFlowu definirali reko Muro.

Podatki za analizo stacionarnega stanja, katerih vnos smo opravili, so bili sestavljeni iz kote dna, kote gladine, širine reke ter GK koordinat za posamezne prečne profile. Vnašali smo reko po odsekih (62 odsekov), za vsak odsek smo določili reko nekaj celicam modela podzemne vode, na. Zahtevani podatki pri vnosu odseka so bili kote dna in gladin začetne in končne točke, širina odseka ter debelino in konduktivnost (prevodnost sedimentov rečnega dna). Program iz geometrijskih podatkov bodisi sam izračuna konduktivnost posamezne celice reke, ali pa se le ta že določena vnese. ModFlow izračunava se po spodnji enačbi:

$$c = \frac{K \times L \times W}{M}$$

kjer so:

$c$  ... konduktivnost, prevodnost sedimentov rečnega dna [ $m^2/dan$ ,  $m^2/s$ ]

$K$  ... vertikalna hidravlična prepustnost dna [ $m/dan$ ,  $m/s$ ]

$W$  ... širina reke [ $m$ ]

$L$  ... dolžina reke v celici [ $m$ ]

$M$  ... debelina rečnih sedimentov [ $m$ ]

Vrednost debeline rečnih sedimentov je bila konstantna za celotno strugo, znaša 0,2 m. Določena je bila na podlagi opazovanj in analize 5 vzorcev, ki jih je podjetje Mura - VGP, d.d. odvzelo na obravnavanem območju leta 2015 za potrebe sejnalnih analiz.

Te podatke smo vnesli na podlagi geometrijskih podatkov in rezultatov izračuna programa HEC-RAS. Iz računa v HEC - RAS-u smo povzeli rezultate za vsakih 6 ur. Pri računu nestacionarnega stanja smo vnašali različne gladine in konduktivnosti za vsako celico za vsakega od 180 časovnih korakov simulacije. Dolžina časovnega koraka je bila 6 ur. Vsakemu posameznemu odseku reke pri vnosu v programu ModFlow smo za začetno in končno celico pripisali rezultate iz prečnega profila, s katerim se prostorsko najbolj ujema.



## 9 ZAKLJUČEK

Simulirali smo vpliv visokovodnega vala reke Mure na gladino podzemne vode Murskega in Prekmurskega polja. Model podzemne vode je bil umerjen na srednje nizko hidrogeološko stanje, kar v meteorološko povprečnih letih ustreza obdobju proti koncu poletja. Razlog za izbiro tega obdobja je običajno največje povpraševanje po vodi in najmanjša naravna sposobnost obnavljanja podzemne vode.

V model podzemne vode v programu ModFlow smo vnesli izboljšano geometrijo struge, ki smo jo izdelali s pomočjo geodetskih meritev in lidarskih posnetkov. Lidarske posnetke smo za izdelavo prečnih profilov uporabili na območjih, kjer nismo imeli na voljo klasično izmerjenih profilov. Za združevanje in ujemanje obojih smo klasično izmerjene profile in profile, izdelane s pomočjo lidarskih posnetkov primerjali pri istem pretoku. Profili, izdelani na podlagi lidarskih posnetkov namreč ne vsebujejo podatkov o geometriji struge pod vodno gladino, zato smo dimenzije pomanjkljivega dela struge določili s primerjavo 8 profilov na 3 km dolgem odseku. Transformacija, s katero smo izdelali izboljšane podatke o strugi kjer ni bilo klasičnih meritev, je temeljila na oceni povprečne površine pretočnega profila. S podatkov o širini gladine v istem prečnem profilu smo dobili globino pravokotne struge, ki površinsko ustreza izmerjeni. Povprečno znižanje dna po tem postopku je znašalo 1,05m pri pretoku 300 m<sup>3</sup>/s.

Za simulacijo visokovodnega vala reke Mure v hidravličnem modelu, izdelanem v programu HEC – RAS, smo morali najprej umeriti model pri stalnem toku. Sledilo je umerjanje pri nestalnem toku in izdelava pretočnega režima, s katerim želeli spremljati gladino podzemne vode glede na pretok v reki ob različnih razmerah. Ta sestavljeni pretočni režim je imel trajanje 30 dni. Prične se z izmerjenimi podatki visokovodnega vala iz julija 2012 (15 dni), ki smo mu dodali še 15 dni stalnega toka pri povprečnem avgustovskem pretoku za VP Petanjci (178,1 m<sup>3</sup>/s).

Vnos izboljšanih podatkov o reki v model podzemne vode smo izvedli v več fazah. Sprva smo v podatkovnem modelu (MS Access) podatke o reki iz hidravličnega modela pripisali najbližji celici iz modela podzemne vode. Sledilo je povezovanje celic v odseke, ki so združeni predstavljali celotno reko v modelu podzemne vode. Za vsak odsek smo iz prečnih profilov hidravličnega modela vnesli zahtevane podatke za opis reke. Nadalje smo iz podatkov o širini in globini reke ter debelini in prepustnosti dna struge je za vsako celico izračunali konduktivnost rečnega dna, pri simulaciji visokovodnega vala pa postopek ponovili še za vsakega od 1440 polurnih časovnih korakov 30 dnevne simulacije. Sledilo je umerjanje in kalibracija modela.



Za prikaz rezultatov izračuna smo uporabili podatke o padcu gladine glede na začetno stanje in jih s pomočjo programa Surfer 12 vizualizirali.

Ugotavljamo, da ima sicer vodnat, dolgotrajen visokovodnega val izrazit vpliv na gladino podzemne vode v nekajkilometerskem pasu ob reki, kjer je debelina aluvialnega vodnosnika največja. Ob robovih modeliranega območja, kjer debelina aluvija ne presega 10 m pa reka Mura nima večjega vpliva (to je na več kot polovici celotnega modelskega območja). Nadalje ugotavljamo, da se na območjih, kjer je vpliv na gladino podzemne vode znaten, kmalu po umiku visokovodne konice pričenja dreniranje podzemne vode nazaj v strugo reke, zaradi visoke vrednosti koeficienta hidravlične prepustnosti, ki je v tem območju reda velikosti  $10^{-2}$  m/s.

Količina podzemne vode je v zahodnem delu bistveno manjša kot v vzhodnem, saj gre na zahodu za relativno plitek vodonosnik. Model je izdelan tudi zaradi numerične stabilnosti za obdobje, ko so še prisotni dotoki na robovih. Tisto res nizko stanje, ko se na zahodu vodonosnika nivoji nevarno spustijo in mnogi vodnjaki presahnejo pa je zelo težko modelirati, saj pomanjkanje vode, ki je na tem vodonosniku lahko zelo pereče, ne omogoča izdelavo stabilnega numeričnega modela.

## VIRI

- [1] Souvent, P., Vižintin, G., Celarc, S., Čenčur Curk, B. 2014. Ekspertni sistem za podporo odločanju na aluvialnih telesih podzemnih voda Slovenije. *Geologija* 57, 2: 245 - 252 str.
- [2] Vižintin, G., Tancar, M., Supovec, I. 2011. BOBER - Konceptualni model za Mursko-Premursko polje : poročilo P1B. Ljubljana, HGEM: 35 str.
- [3] Mioč, P., Marković, S. 1998. Osnovna geološka karta Republike Slovenije in Republike Hrvaške, list Čakovec, 1:100.000. Inštitut za geologijo, geotehniko in geofiziko, Ljubljana in Zagreb, Inštitut za geološka istraživanja:1 str.
- [4] Petauer, D., Sadnikar, J., Juren, A. 2007. Ureditev celovite oskrbe prebivalstva s pitno vodo in varovanje vodnih virov Pomurja – Mursko polje. Ljubljana, GEOKO.
- [5] Petauer, D., Sadnikar, J., Juren, A. 2007. Ureditev celovite oskrbe prebivalstva s pitno vodo in varovanje vodnih virov Pomurja – Ravensko in Dolinsko polje. Ljubljana, GEOKO.
- [6] Tancar, M., Supovec, I., Vižintin, G. 2009. Geološko, tehnično in hidrogeološko poročilo o izvedbi dveh piezometrov na lokaciji VMP Rakičan. Ljubljana, HGEM: 25 f.
- [7] Tancar, M., Supovec, I., Vižintin, G. 2009. Geološko, tehnično in hidrogeološko poročilo o izvedbi dveh piezometrov na lokaciji VMP Odranci. Ljubljana, HGEM: 22 f.
- [8] Tancar, M., Supovec, I., Vižintin, G. 2009. Geološko, tehnično in hidrogeološko poročilo o izvedbi dveh piezometrov na lokaciji VMP Krapje. Ljubljana, HGEM: 22 f.
- [9] Tancar, M., Supovec, I., Vižintin, G. 2009. Geološko, tehnično in hidrogeološko poročilo o izvedbi dveh piezometrov na lokaciji VMP Veščica. Ljubljana, HGEM: 22 f.
- [10] Vižintin, G. 2002. Hidrogeološko poročilo za območje vodarne Hraščice v Občini Beltinci. Ljubljana, IRGO: 16 f.
- [11] Vižintin, G., Tancar, M. 2009. Hidrogeološko poročilo za pridobitev vodnega dovoljenja za neposredno rabo vode – vodnjak Dokležovje. Ljubljana, HGEM: 22 f.

- [12] Vižintin, G., Tancar, M. 2009. Hidrogeološko poročilo za pridobitev vodnega dovoljenja za neposredno rabo vode – vodnjak Melinci. Ljubljana, HGEM: 22 f.
- [13] Vižintin, G., Tancar, M., Supovec, I. 2010. Analiza tveganja za gramoznico Ivanci. Ljubljana, HGEM: 19 f.
- [14] Brilly, M. 2012. Hidrološka študija reke Mure. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za splošno hidrotehniko: 163 str.
- [15] Rajar, R. 1980. Hidravlika nestalnega toka. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 279 str.
- [16] Rajar, R. 1997. Hidromehanika. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 235 str.
- [17] Burner, G. W. 2002. HEC-RAS Hydraulic Reference Manual, ZDA, Kalifornija, Davis, USACE: .
- [18] Globevnik, L., Vidmar, A., Ajdič, M. 2010. Opis uporabe podatkov topografskega načrta, prečnih profilov strug ter izbranih koeficientov hrapavostiv inundacijskem prostoru reke Mure za 2D hidravlično modeliranje visokih voda. MVD, 2010, 20: 159 - 165 str.
- [19] Brilly, M. URL: [ftp://ksh.fgg.uni-lj.si/students/podz\\_vode.zip](ftp://ksh.fgg.uni-lj.si/students/podz_vode.zip)
- [20] Vižintin, G., Tancar, M., Supovec, I. 2012. BOBER - Postavitev numeričnega modela toka podzemne vode za Mursko in Prekmursko polje: poročilo P2B. Ljubljana, HGEM: 35 str.
- [21] Andjelov, M. 2012. Razvoj in uporaba regionalnega vodnobilančnega modela GROWA za modeliranje napajanja vodonosnikov Slovenije. Slovenski vodar, 2012, 25: 99 - 102 str.

### **Ostali viri:**

Brilly, M. 1983. Matematični model za simulacijo toka podtalnice Mursko-Ljutomerskega polja. Ljubljana, FGG, Laboratorij za mehaniko tekočin. 16 f.

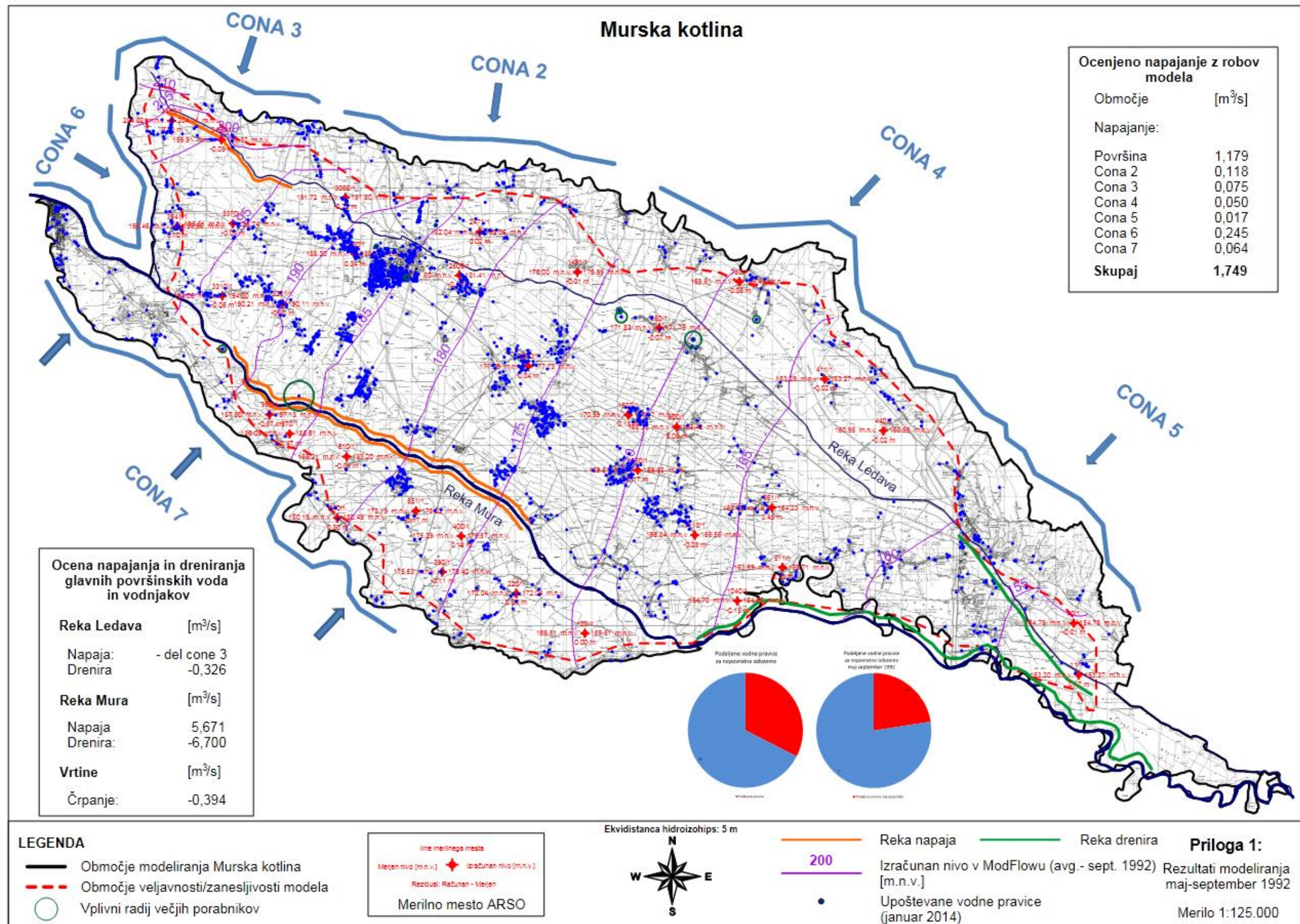
BOBER. 2010. Boljše opazovanje za boljše ekološke rešitve, Nadgradnja sistema za spremljanje in analiziranje stanja vodnega okolja v Sloveniji. Ljubljana, ARSO.

**SEZNAM PRILOG**

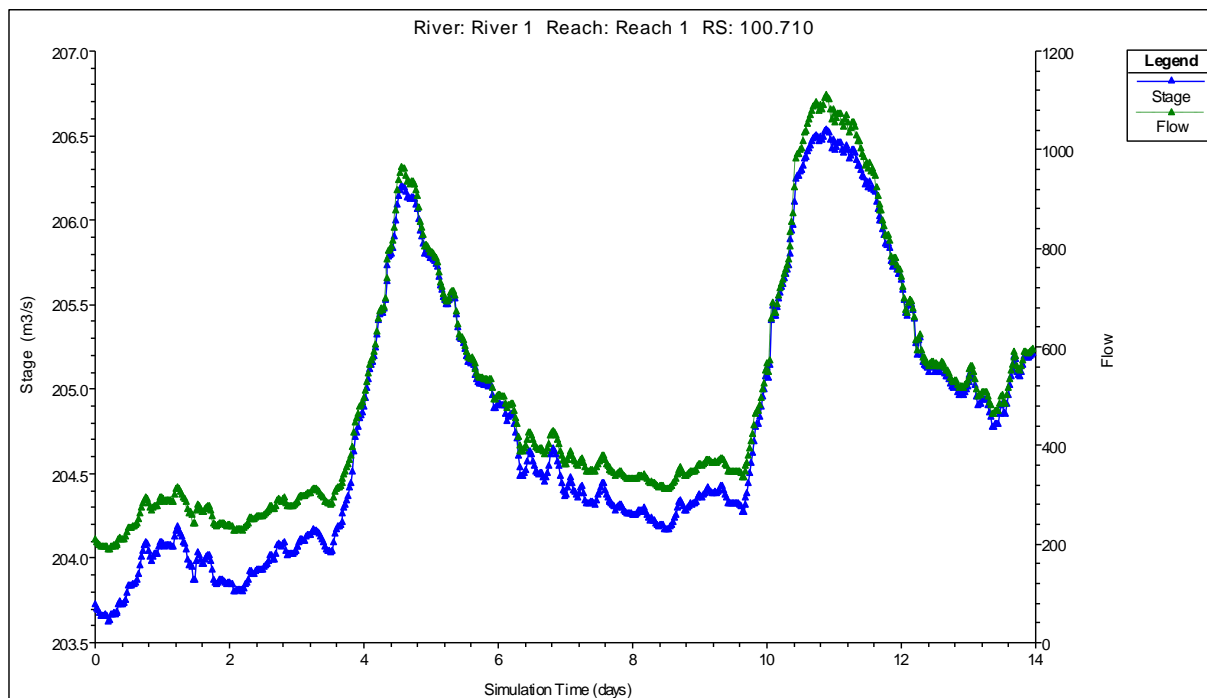
- A) MURSKO IN PREKMURSKO POLJE, ZASNOVA MODELA**
- B) REZULTATI RAČUNA S PROGRAMOM HEC-RAS ZA NESTALNI TOK**
- C) REZULTATI RAČUNA S PROGRAMOM MODFLOW**
- D) SLIKE REKE MURE**



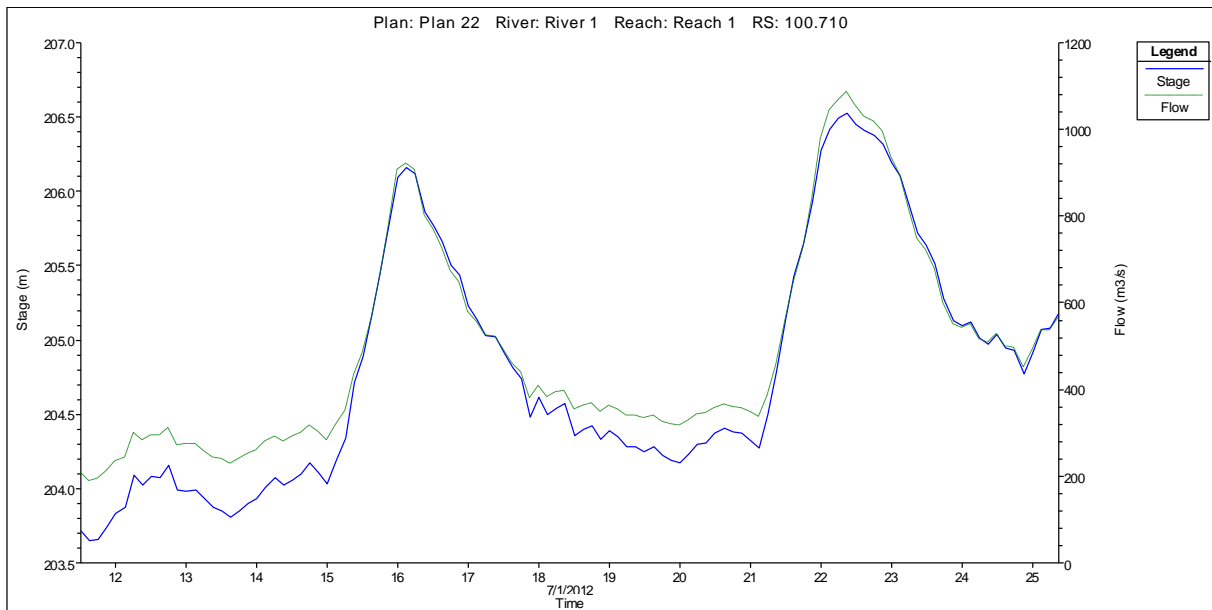
A) MURSKO IN PREKMURSKO POLJE, ZASNOVA MODELA



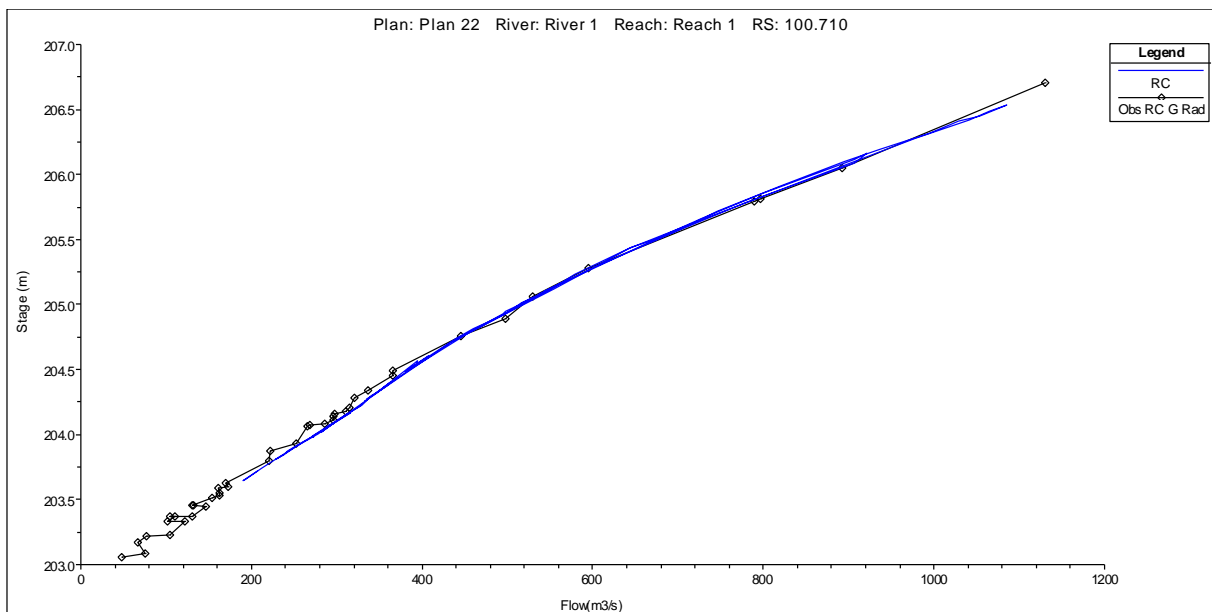
## B) REZULTATI RAČUNA S PROGRAMOM HEC-RAS ZA NESTALNI TOK



Vhodni hidrogram (dvotedenski visokovodni val z dvema konicama). Dejanski izmerjeni podatki na VP Gornja Radgona iz julija 2012.

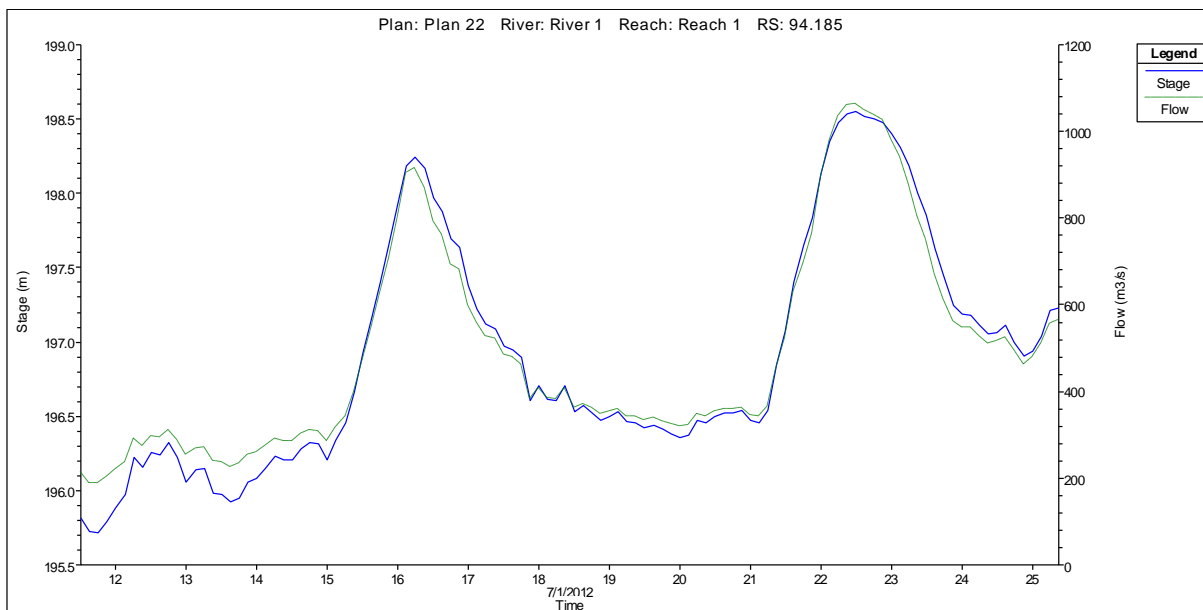


Izračunane gladine in pretoki v Gornji Radgoni (vhodni hidrogram)

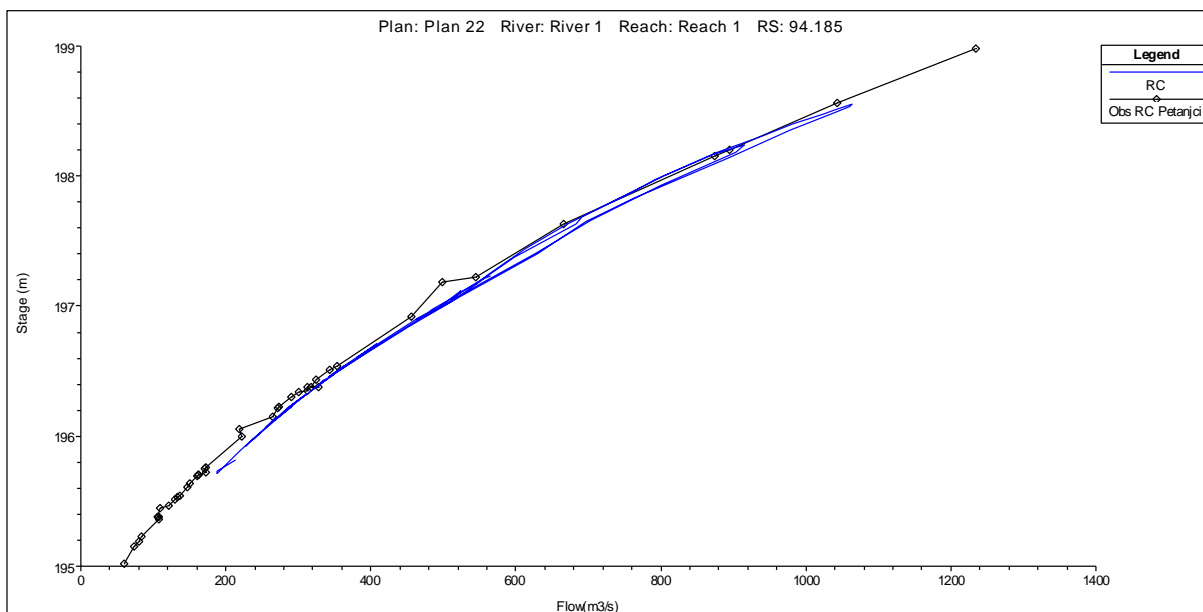


Umerjenost Q-H krivulje (Gornja Radgona), modro je izračunano, črno je merjeno

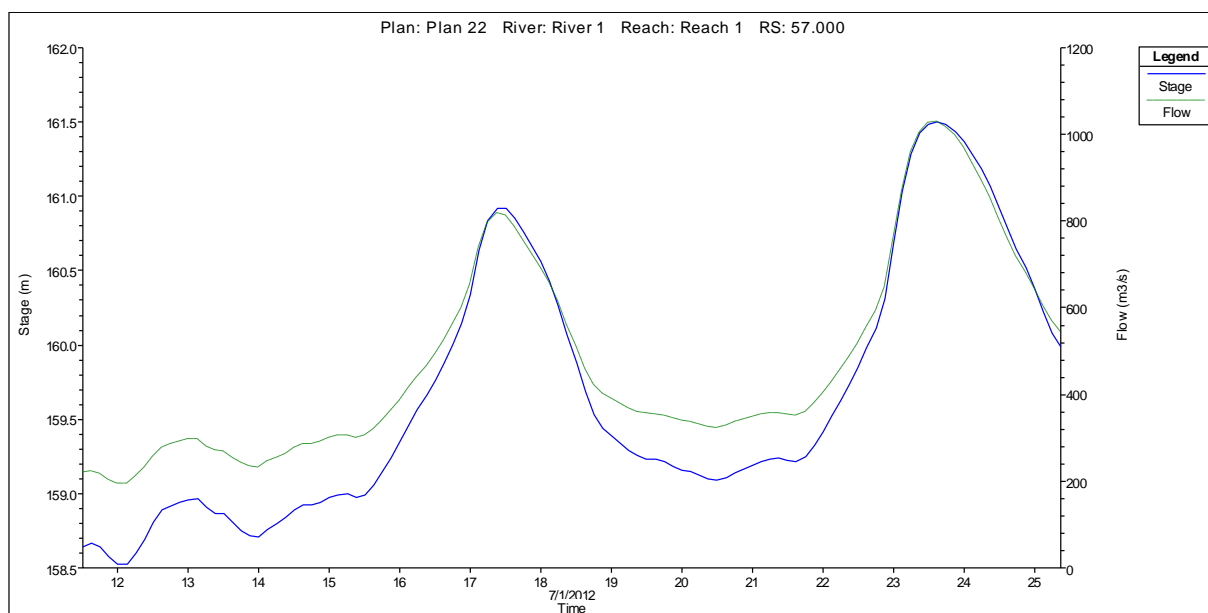




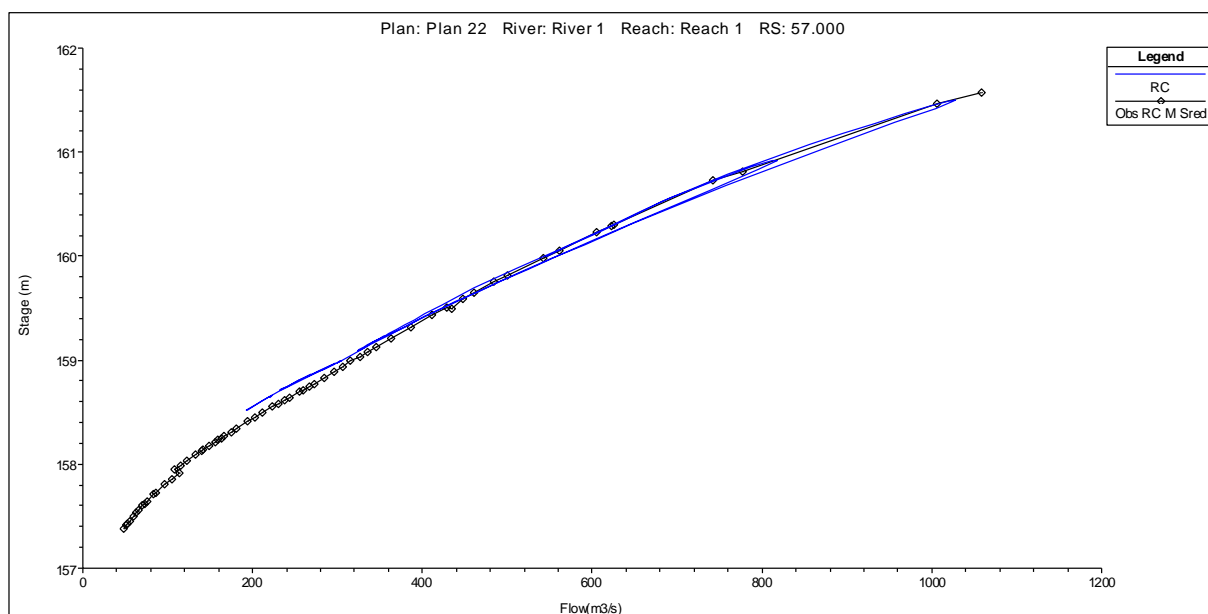
Izračunane gladine in pretoki v Petanjcih



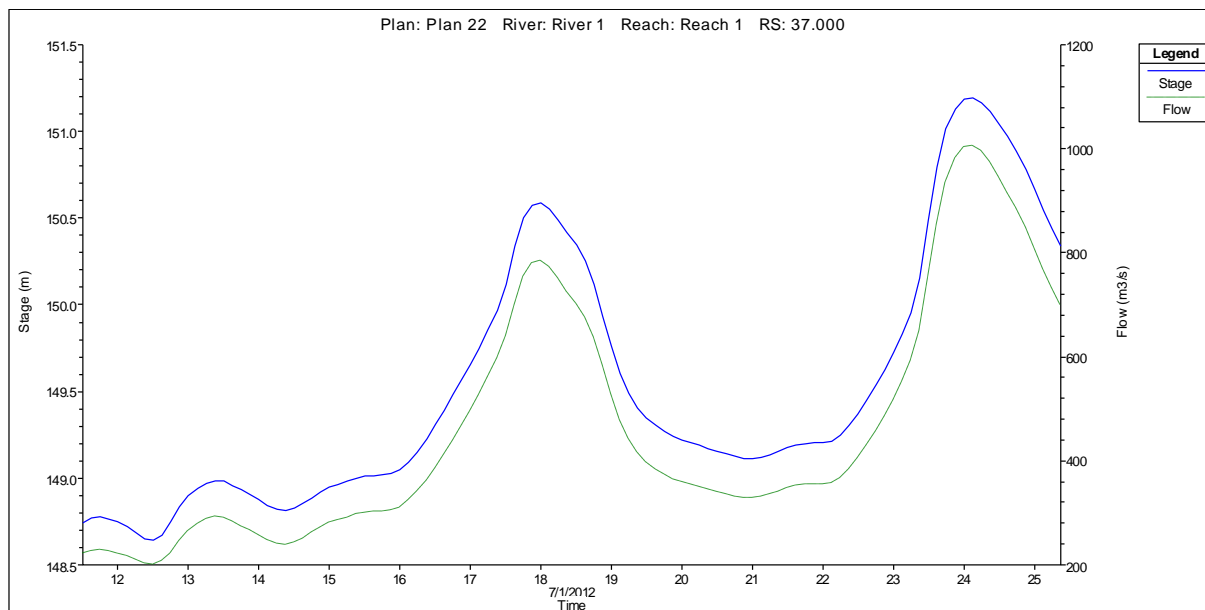
Umerjenost Q-H krivulje (Petanjci), modro je izračunano, črno je merjeno



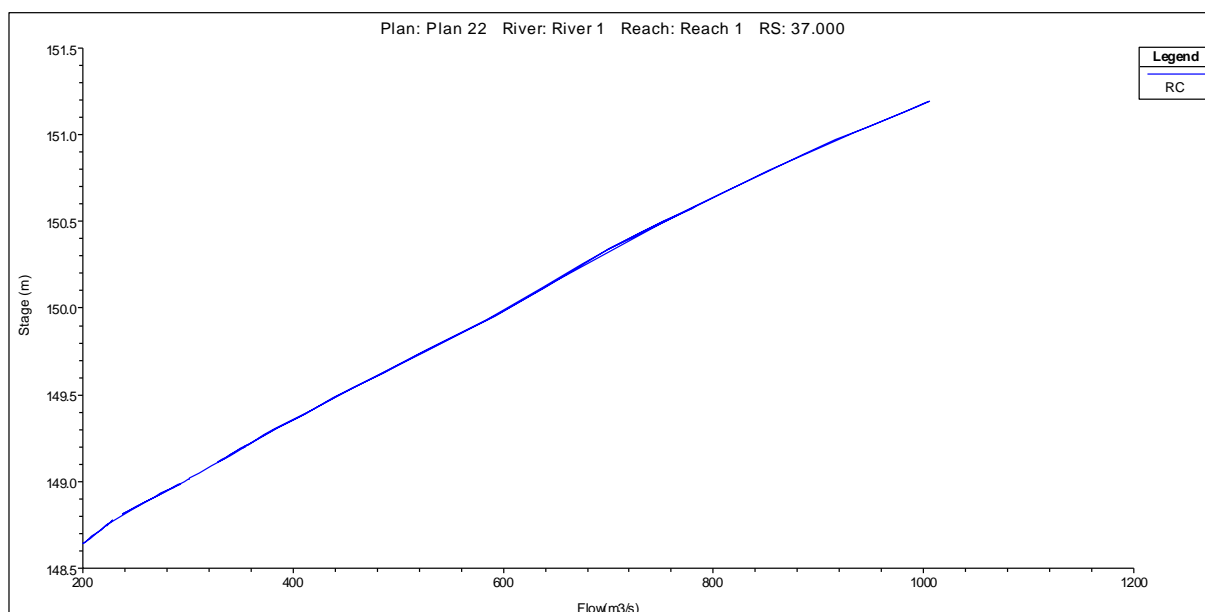
Izračunane gladine in pretoki v Murske Središču



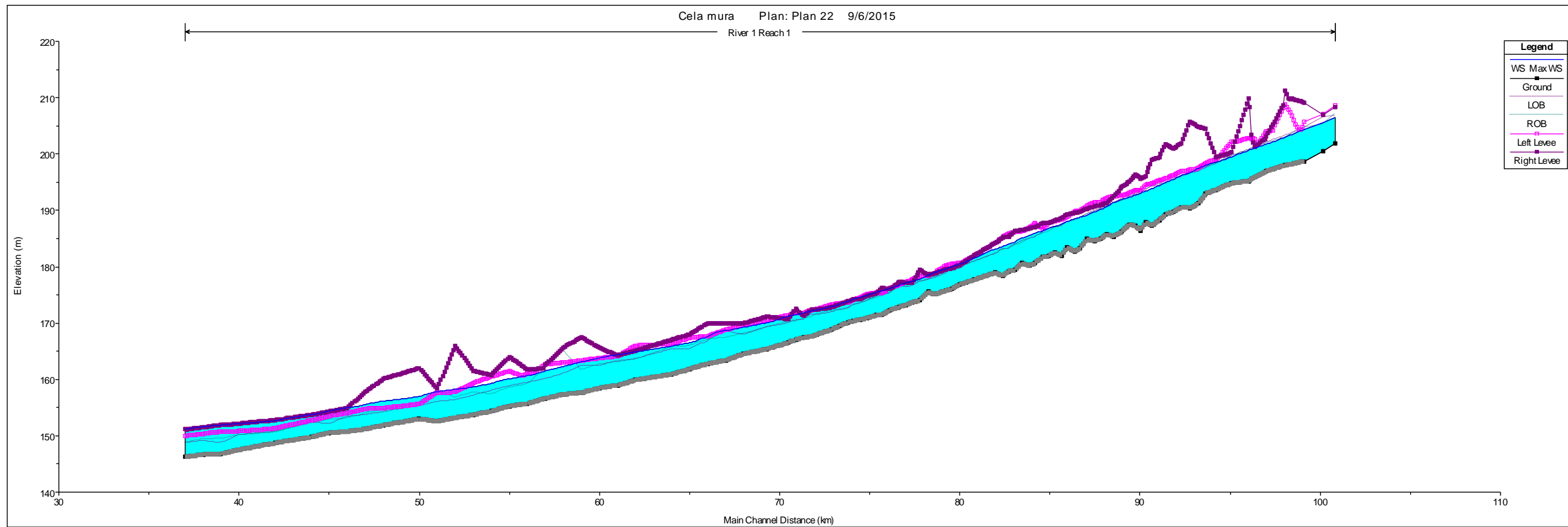
Umerjenost Q-H krivulje (Mursko Središće), modro je izračunano, črno je merjeno



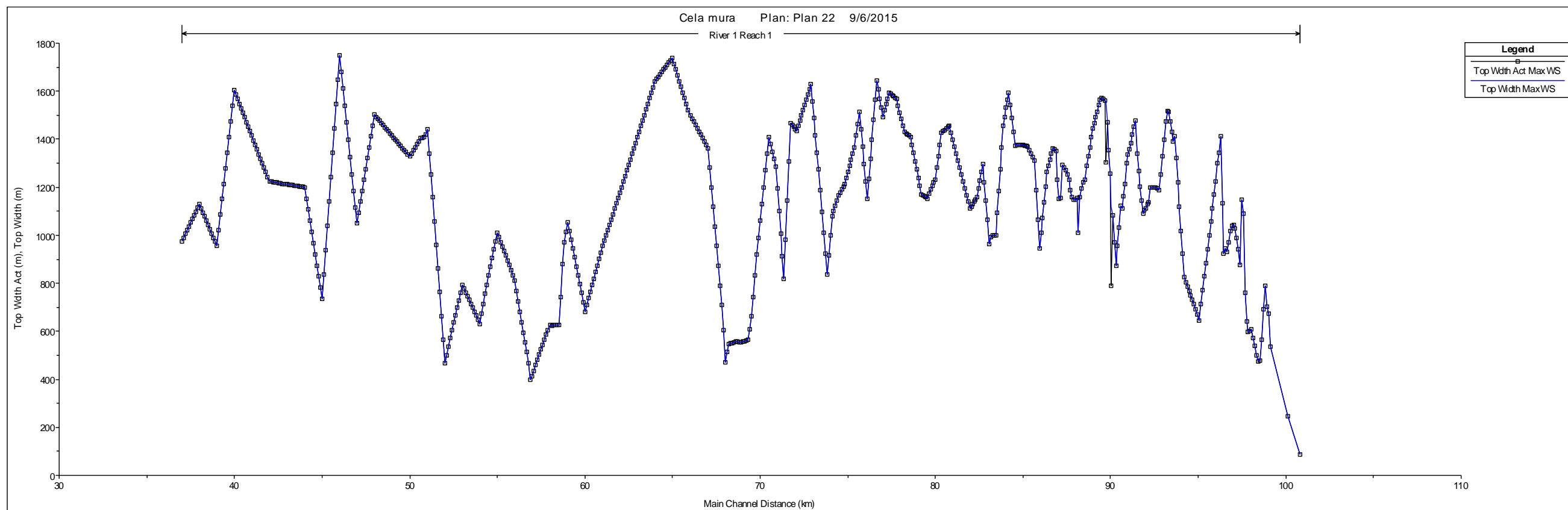
Izračunane gladine in pretoki na Madžarski meji (spodnji konec modela)



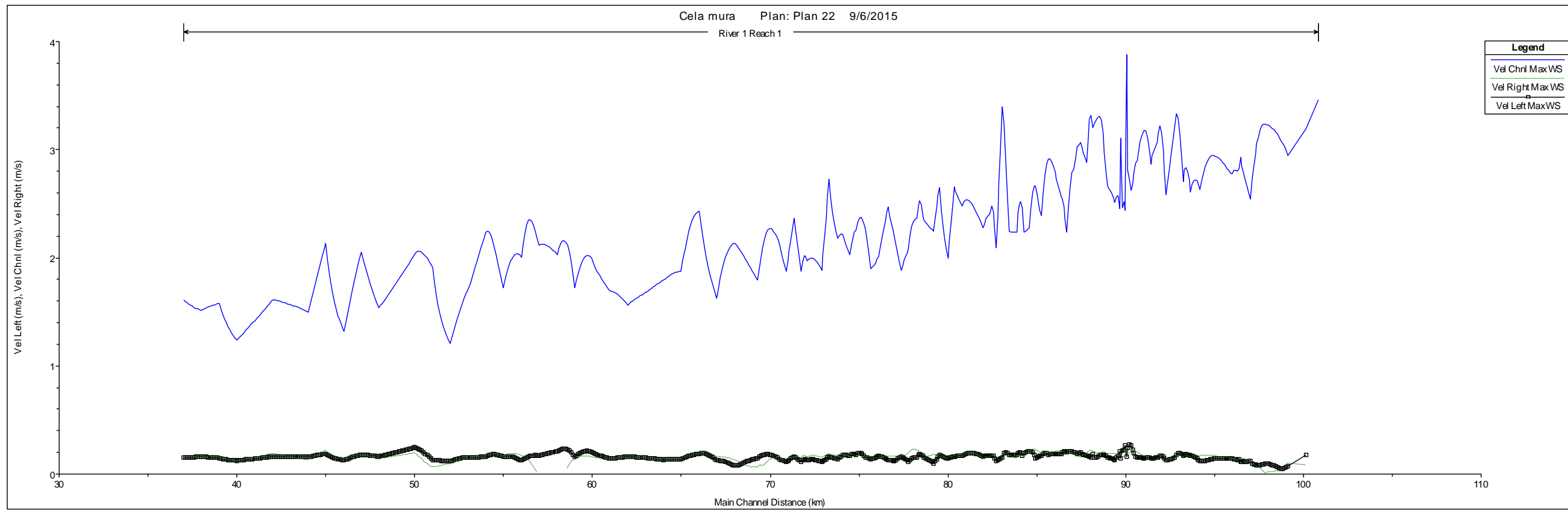
Q-H krivulja v zadnjem dolvodnem profilu (spodnji konec modela)



Gladine pri maksimalnem pretoku



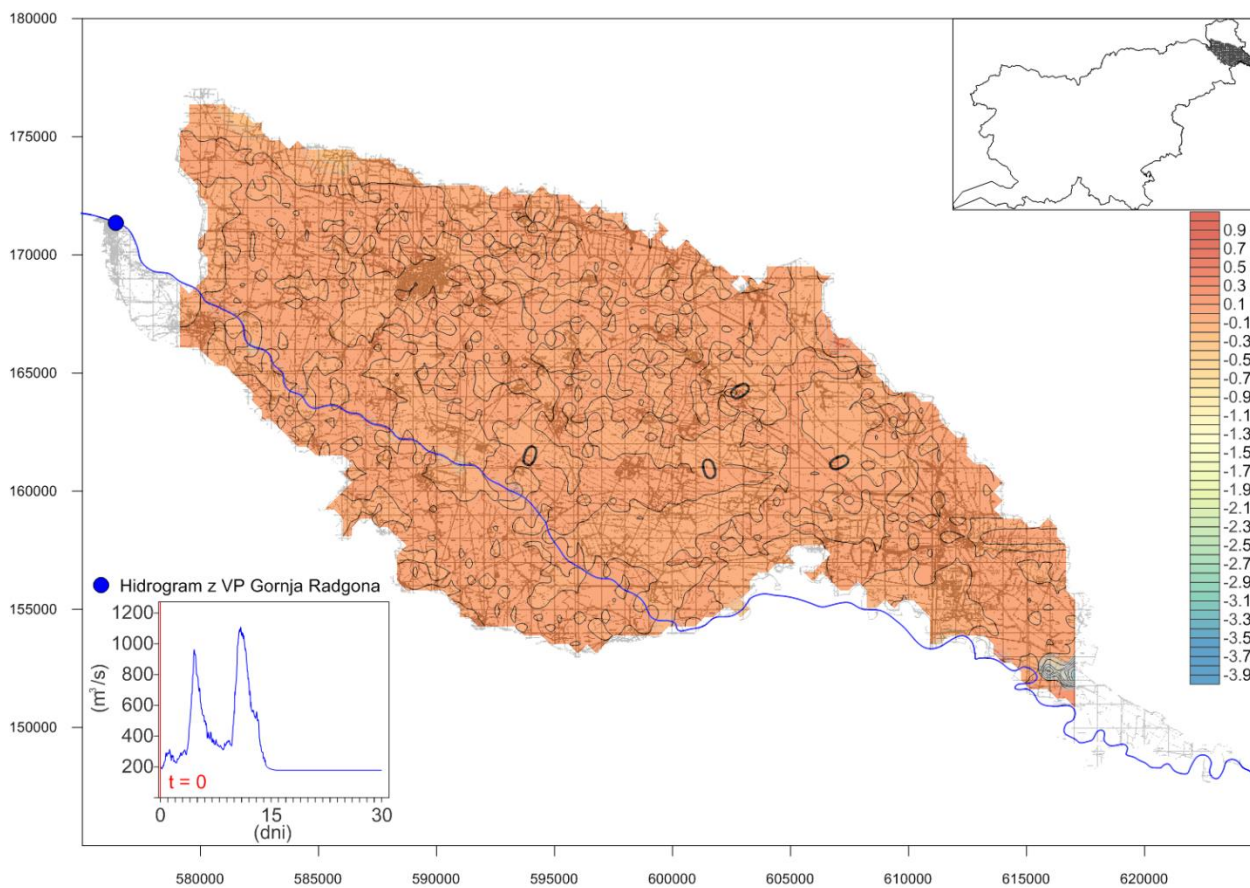
Širina reke pri maksimalnem pretoku.

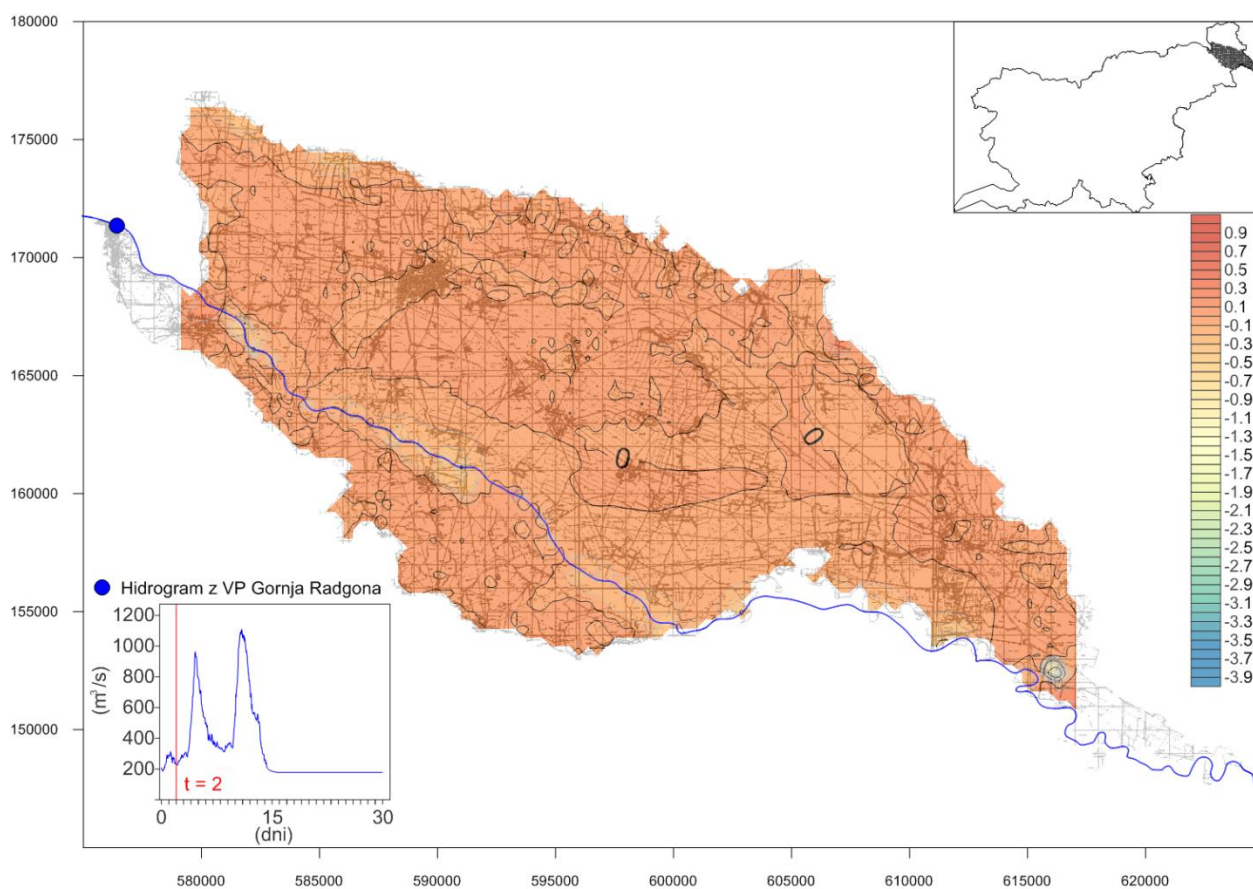
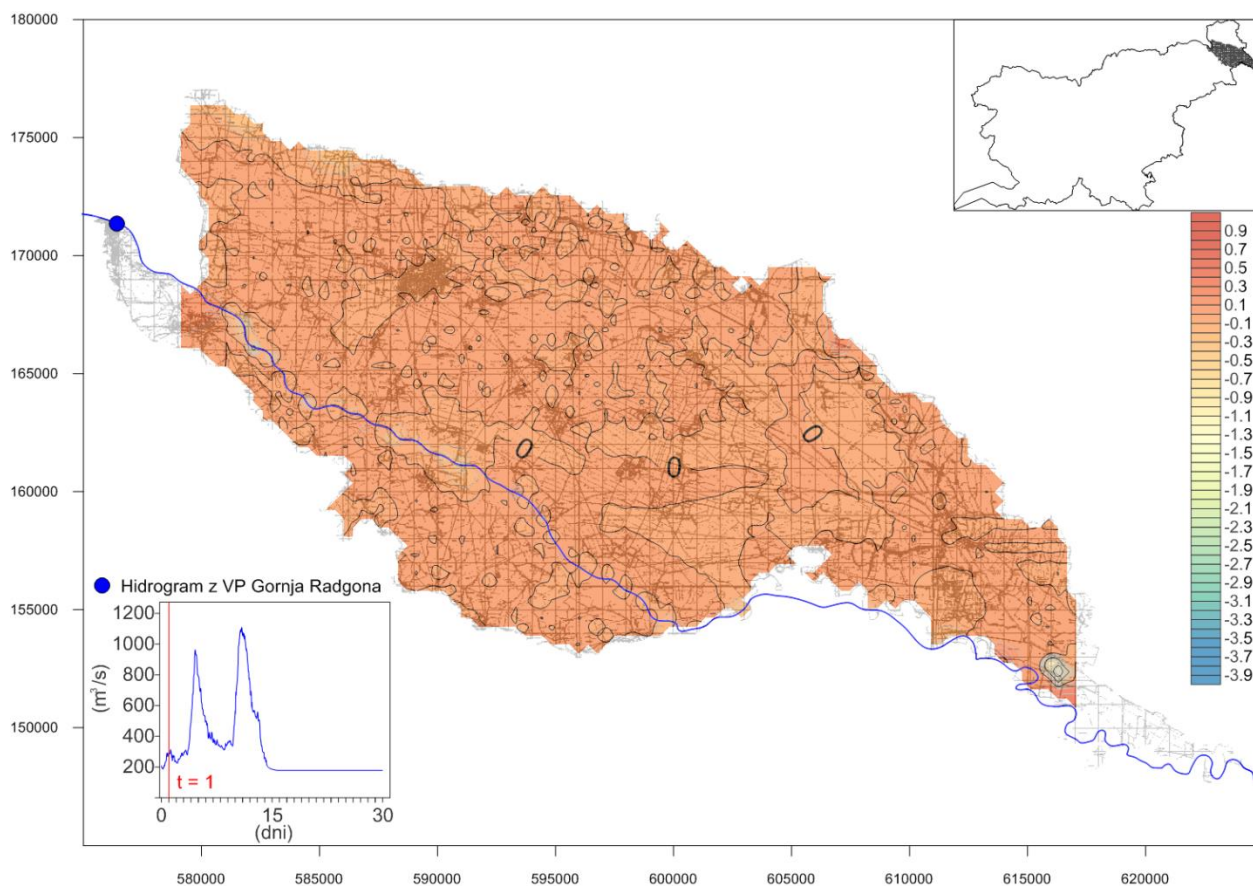


Pretočne hitrosti pri maksimalnem pretoku.

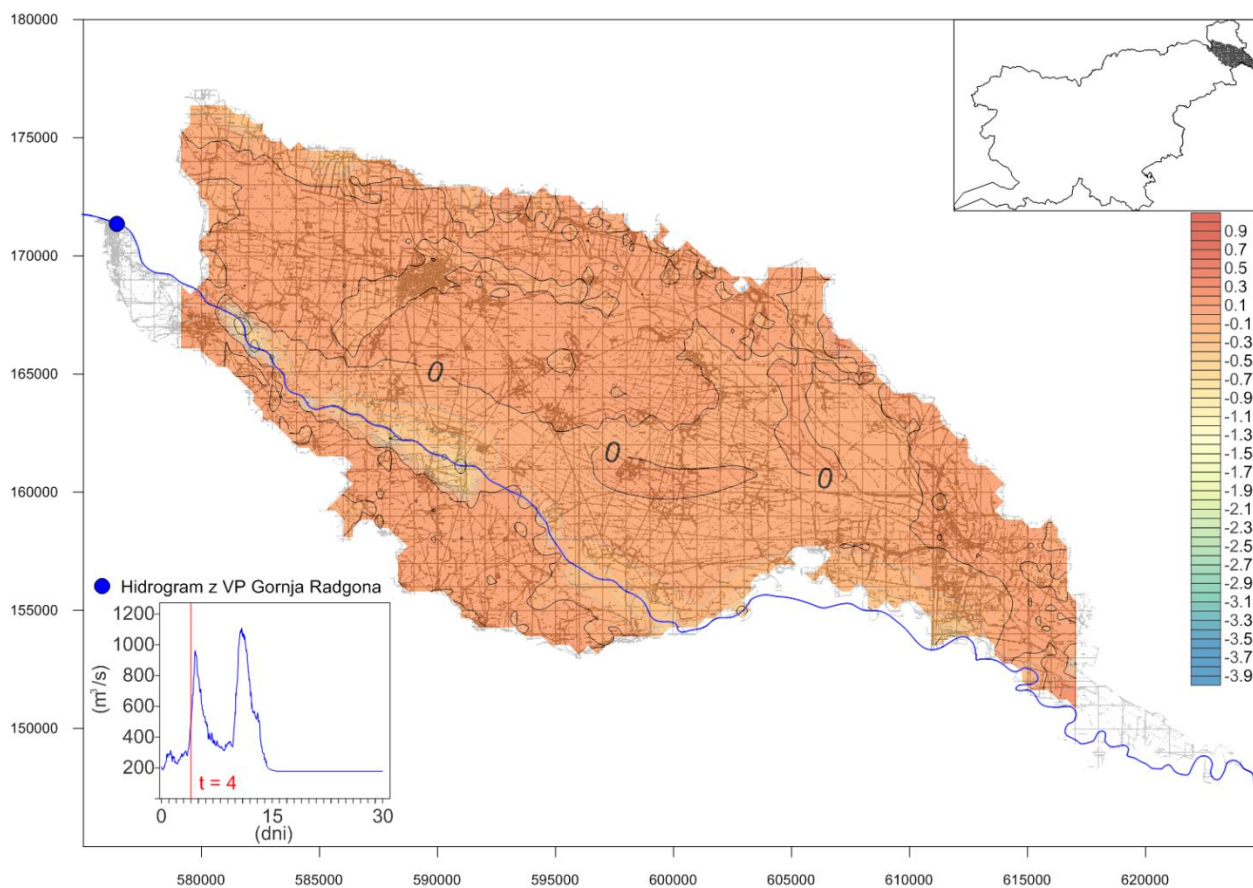
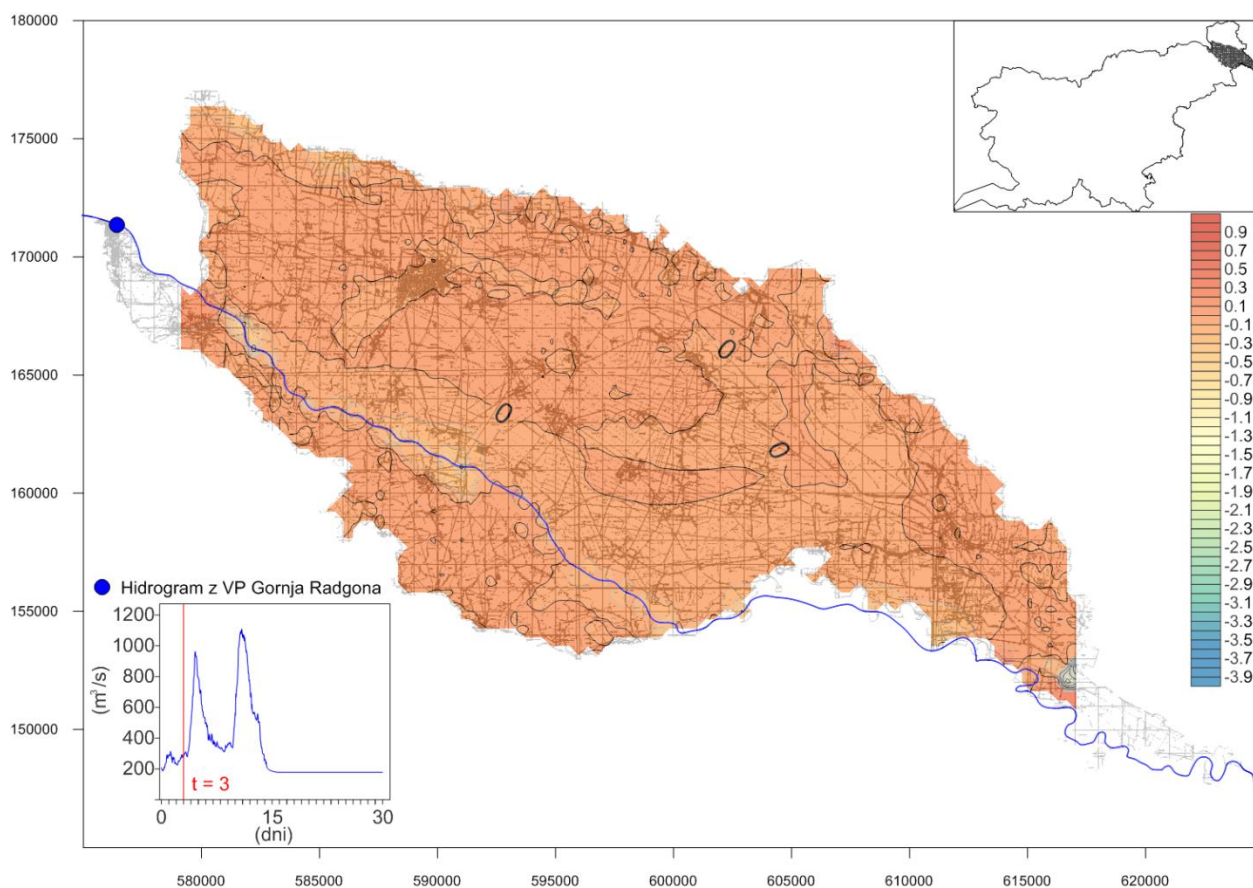
## C) REZULTATI RAČUNA S PROGRAMOM MODFLOW

Slike prikazujejo padec gladine (v metrih) podzemne vode glede na začetno stanje. Negativna vrednost pomeni dvig gladine. Hidrogram v okvirju prikazuje čas (v dnevih od pričetka simulacije) in pretok na VP Gornja Radgona

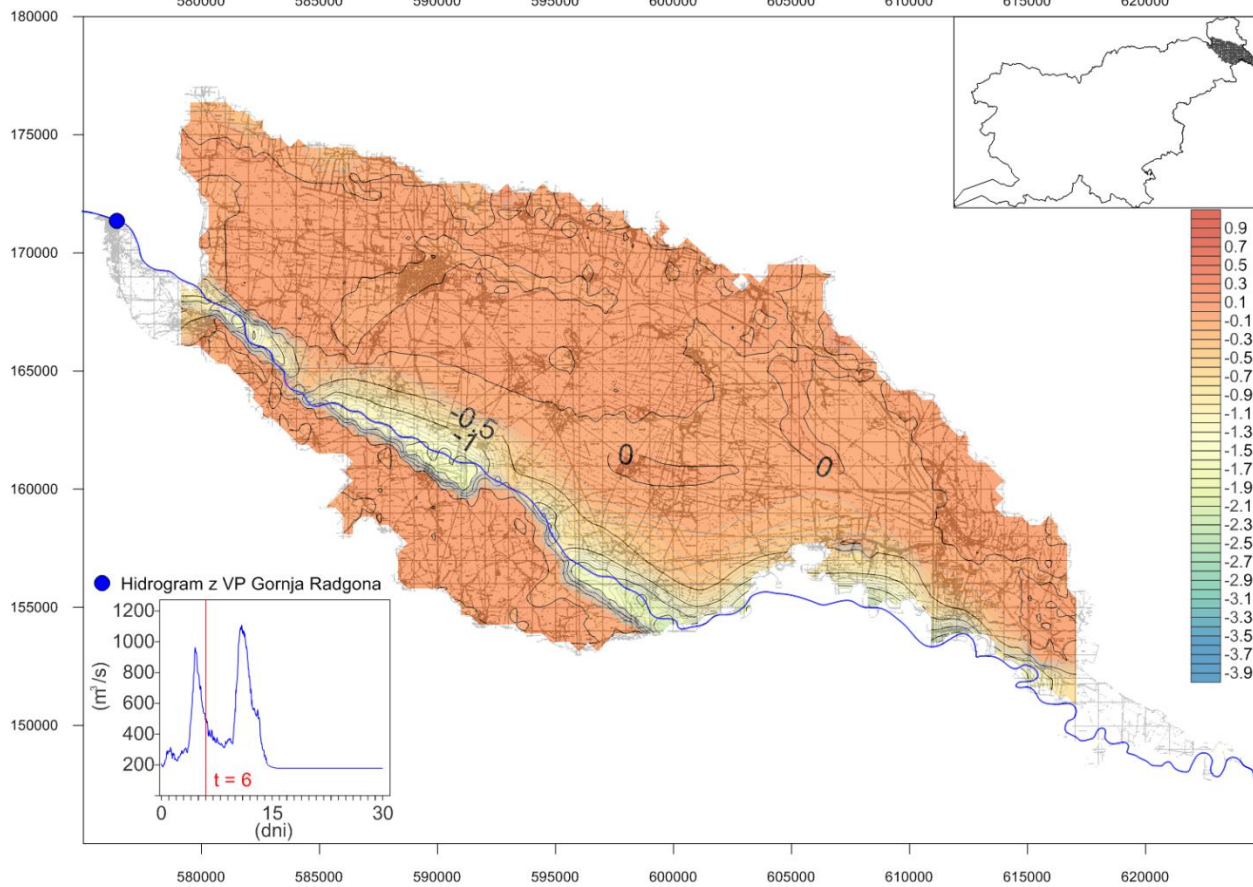
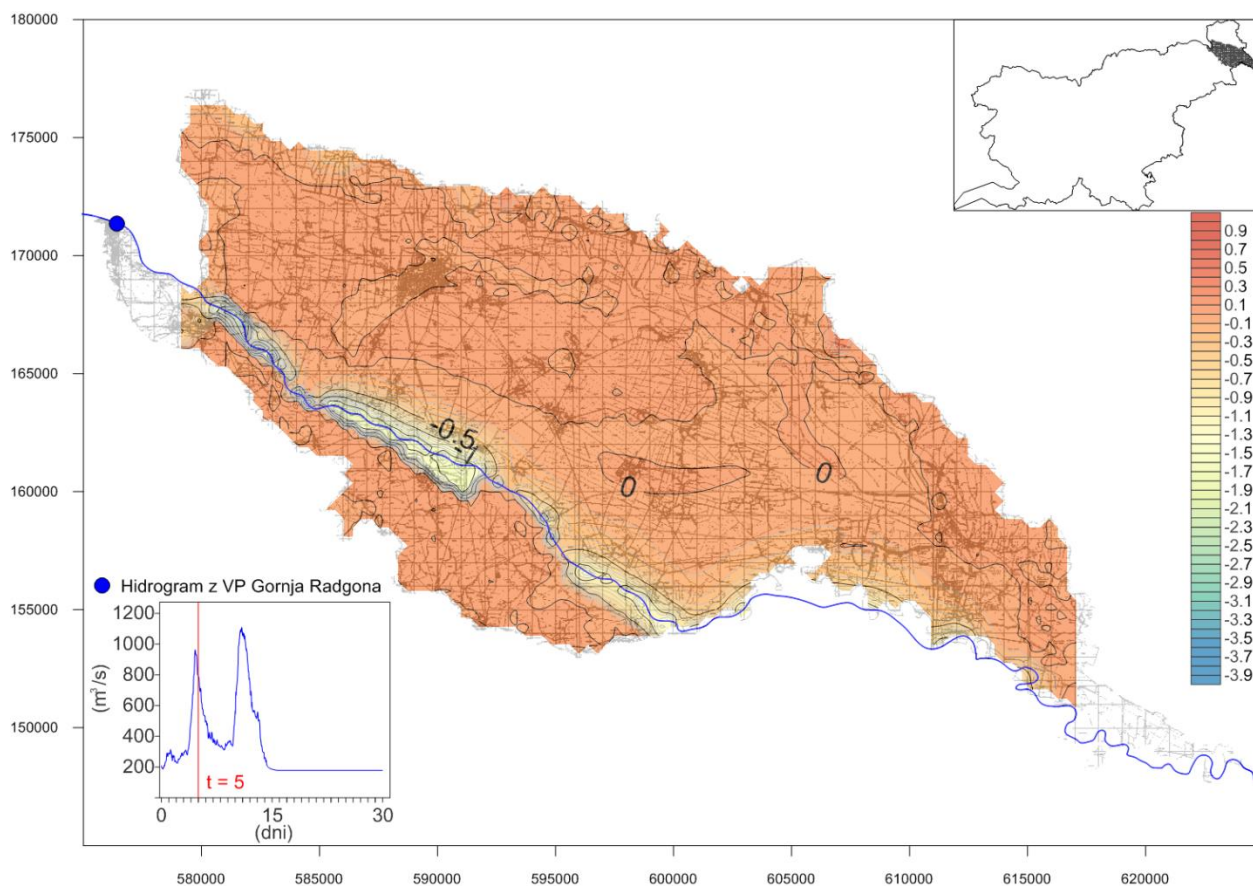


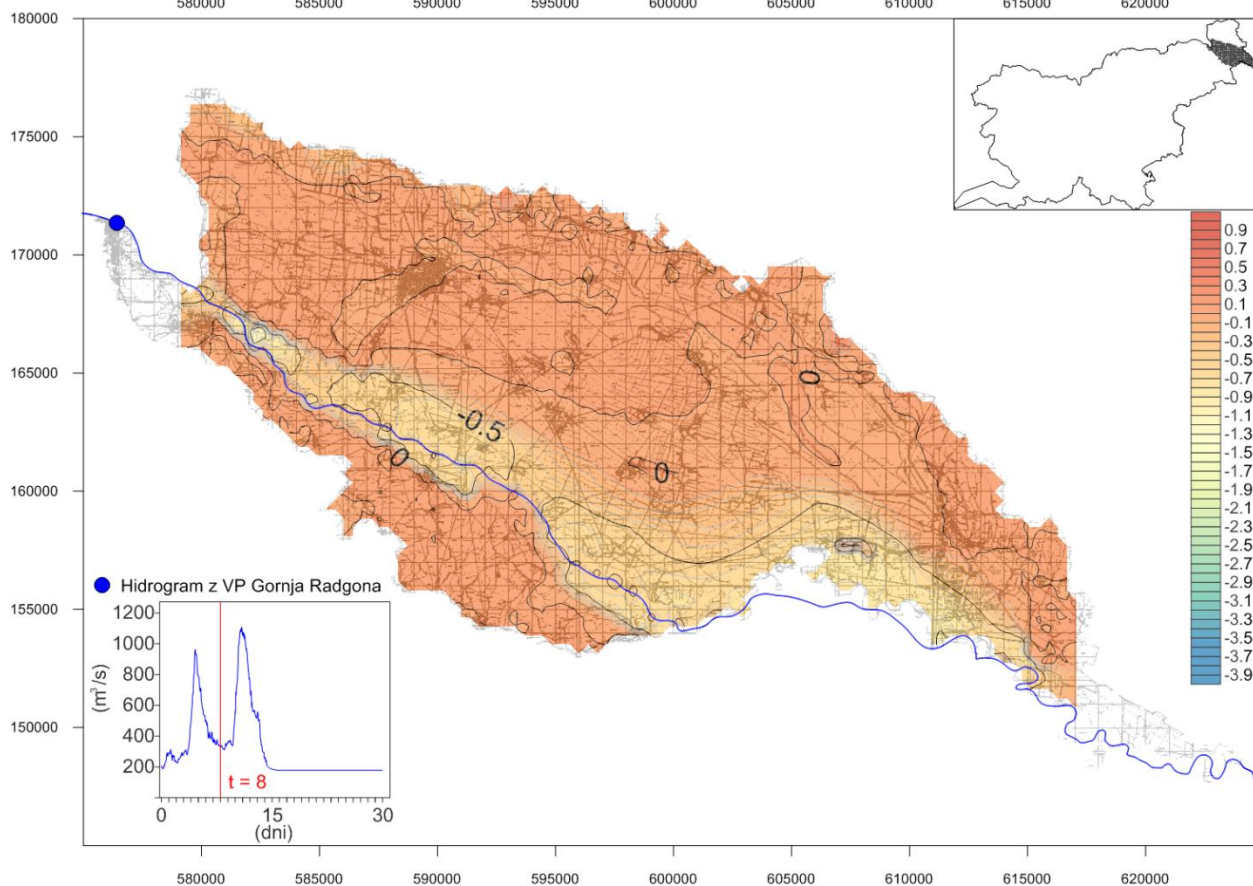
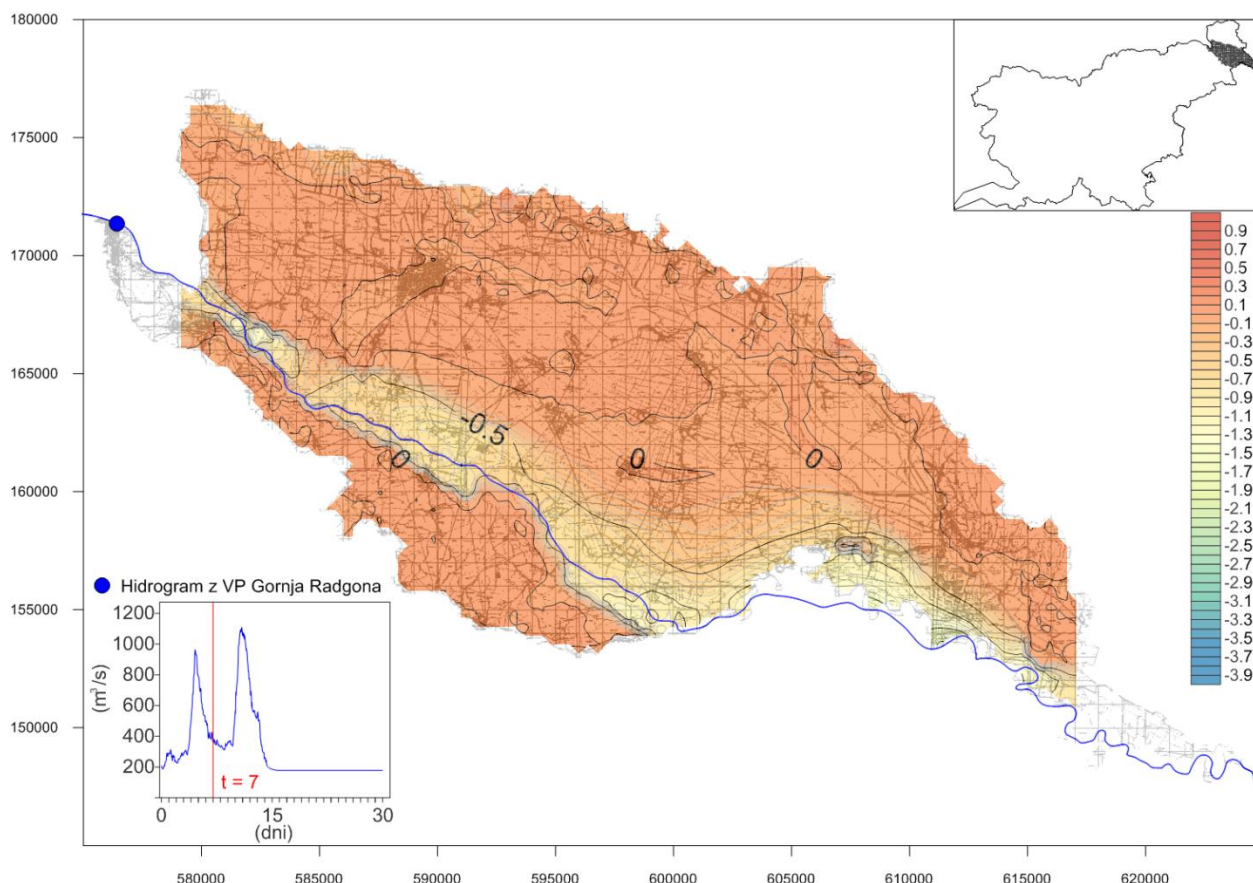




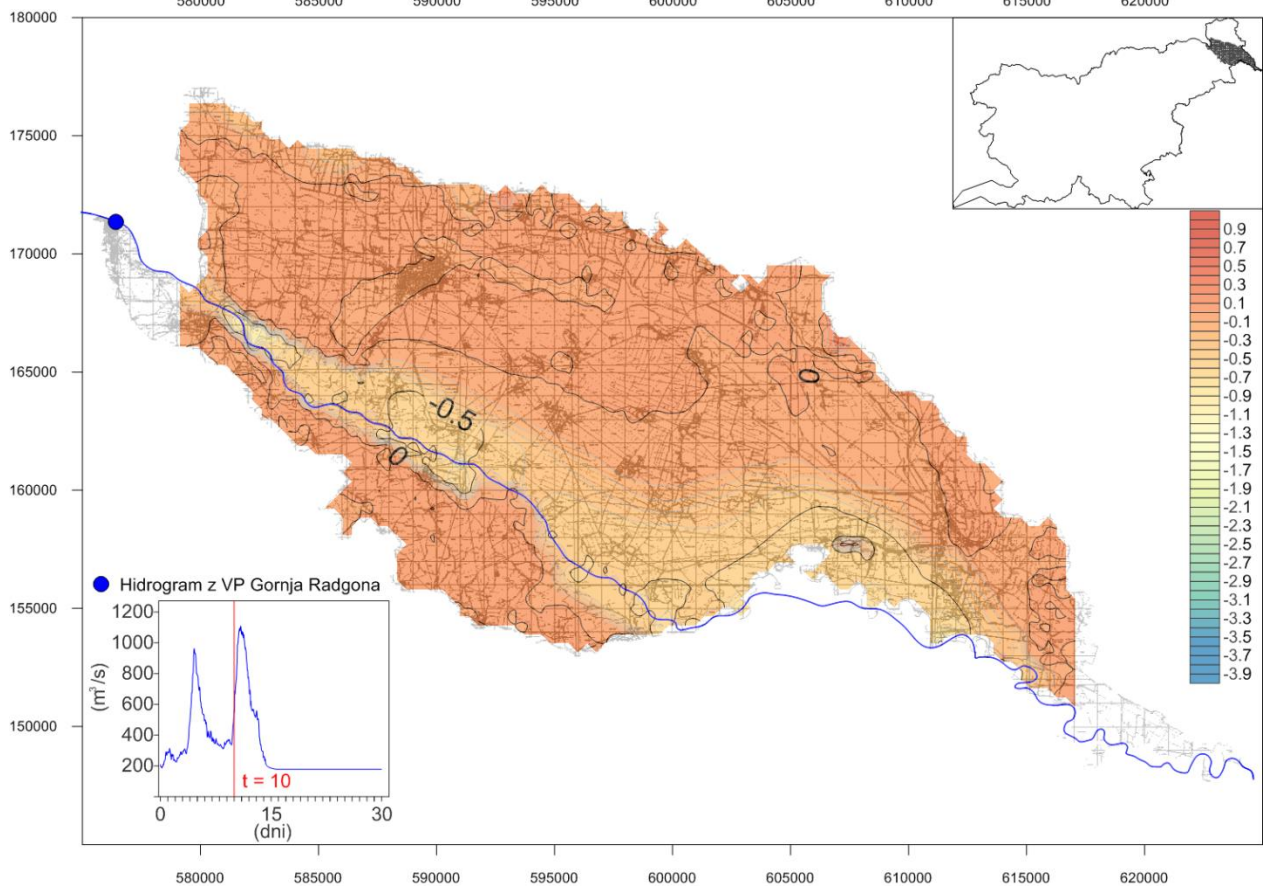
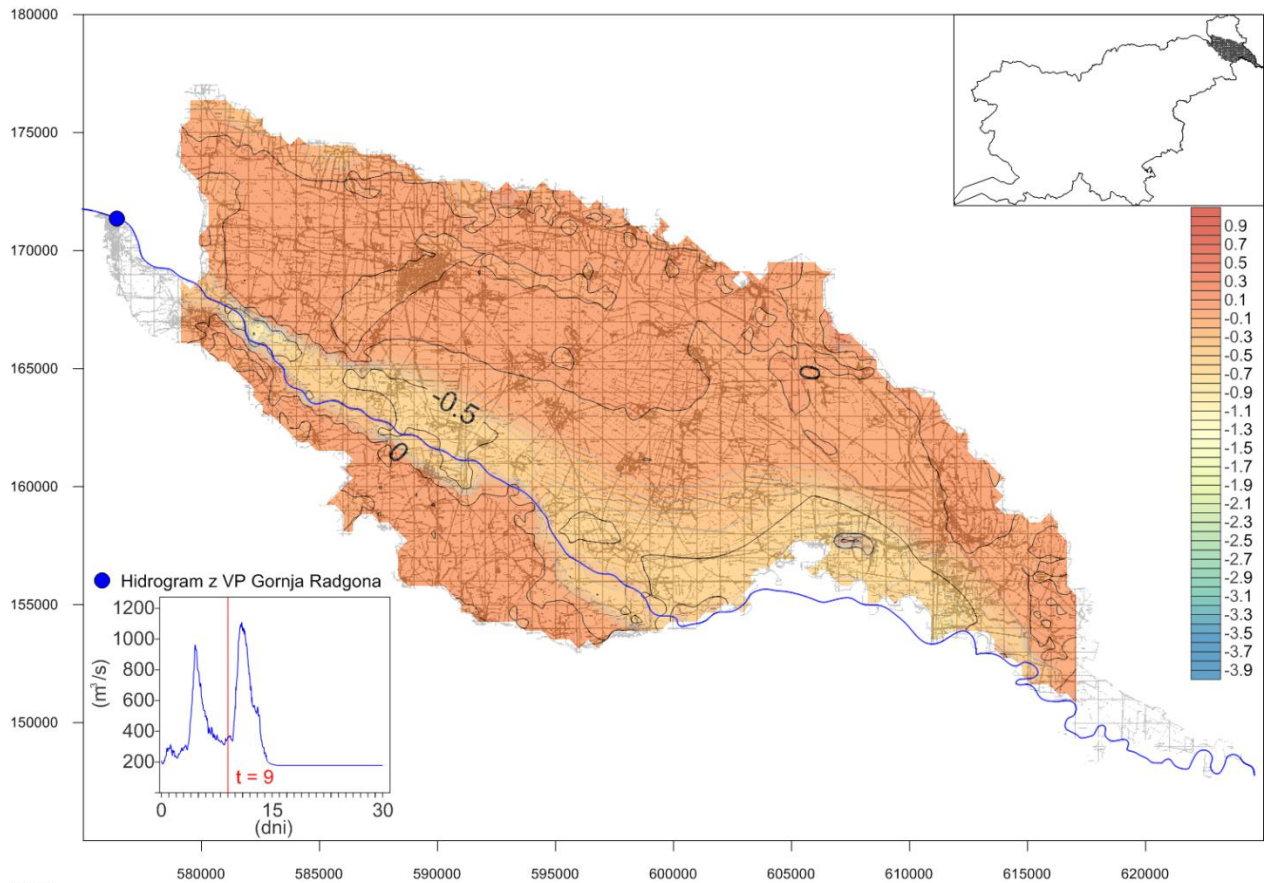


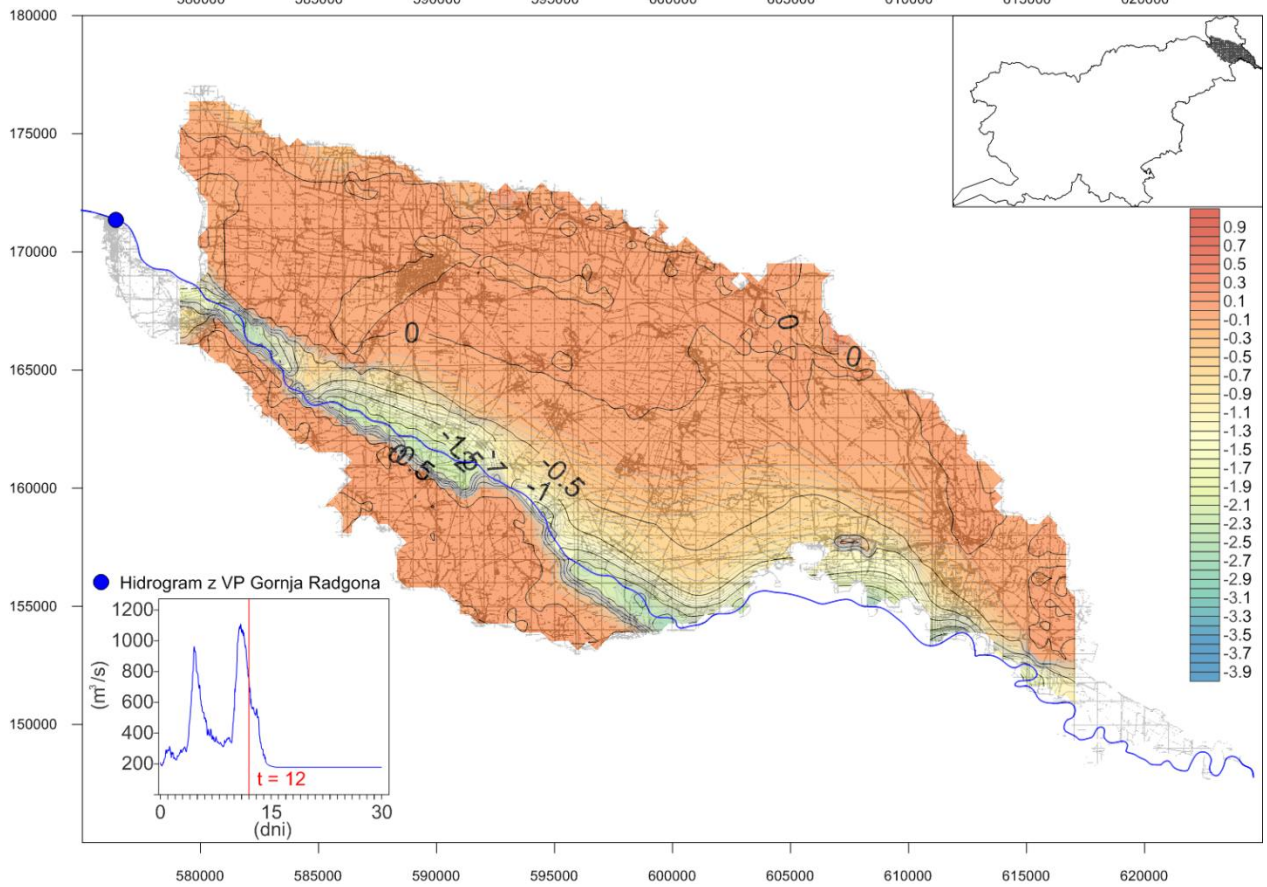
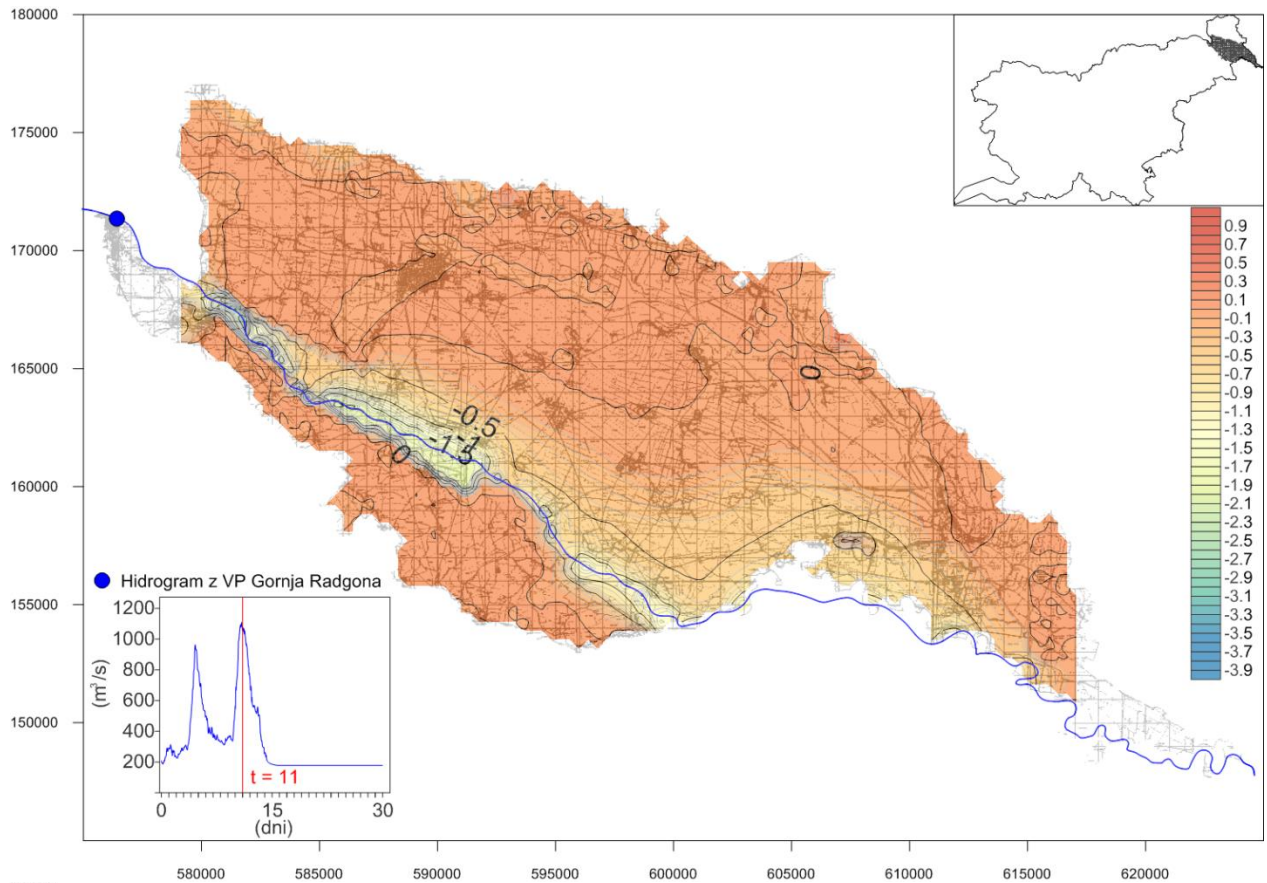




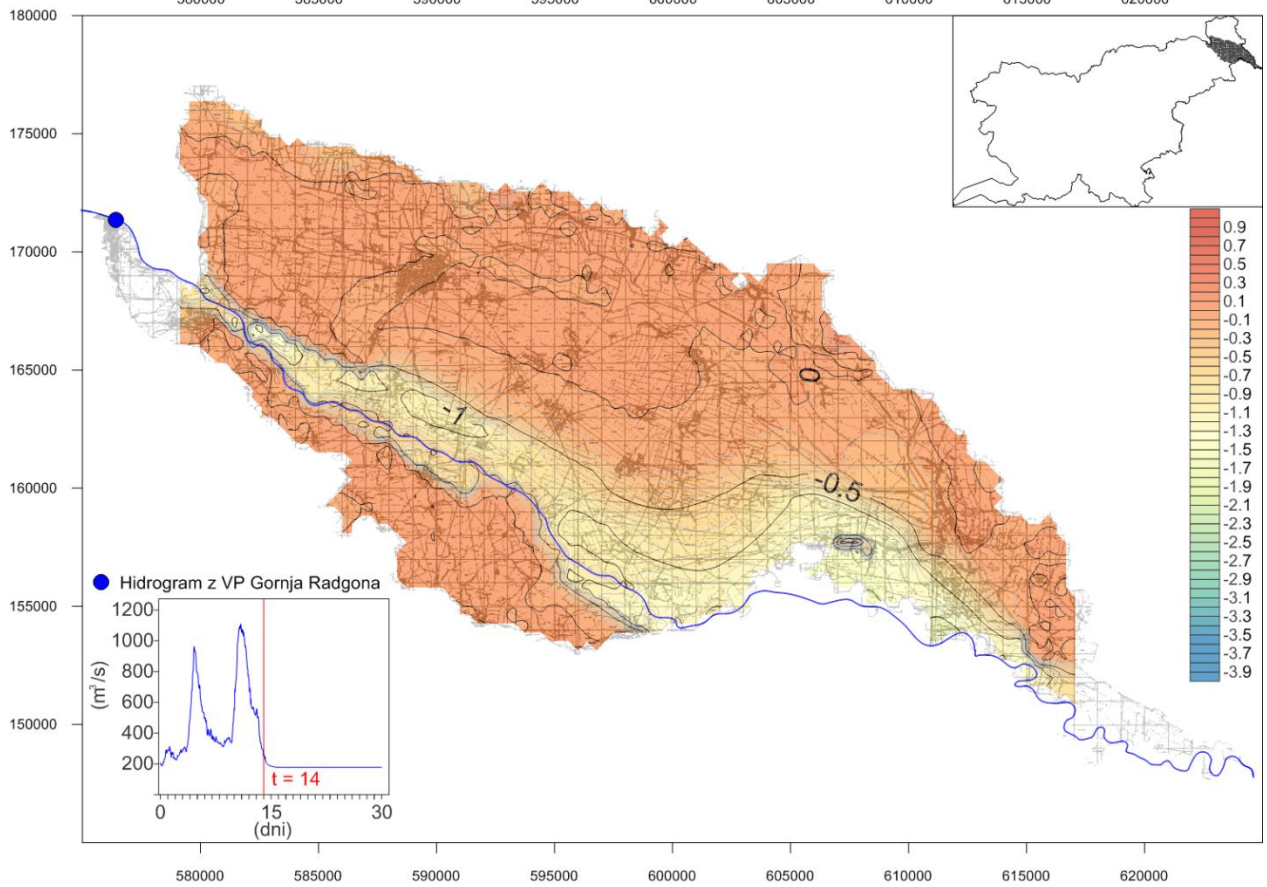
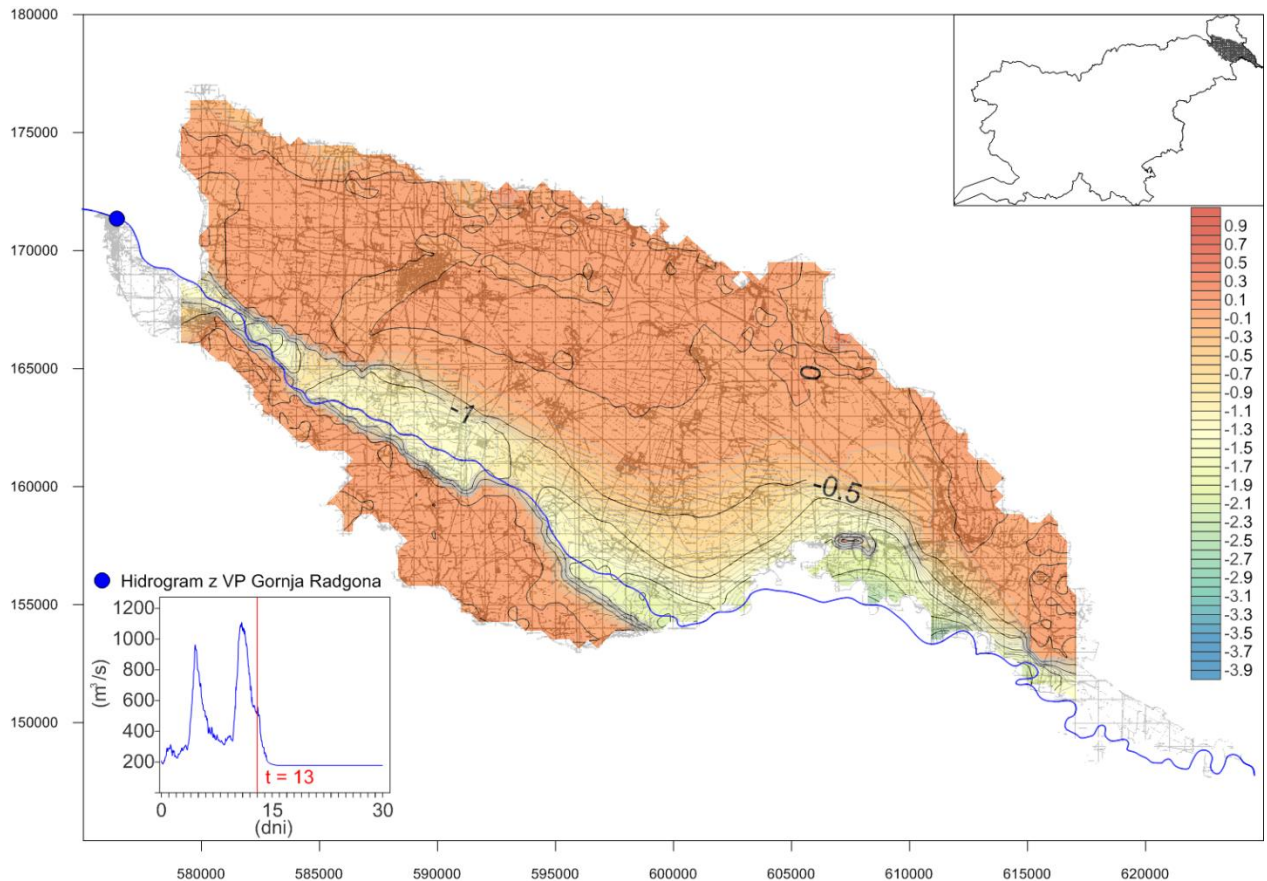


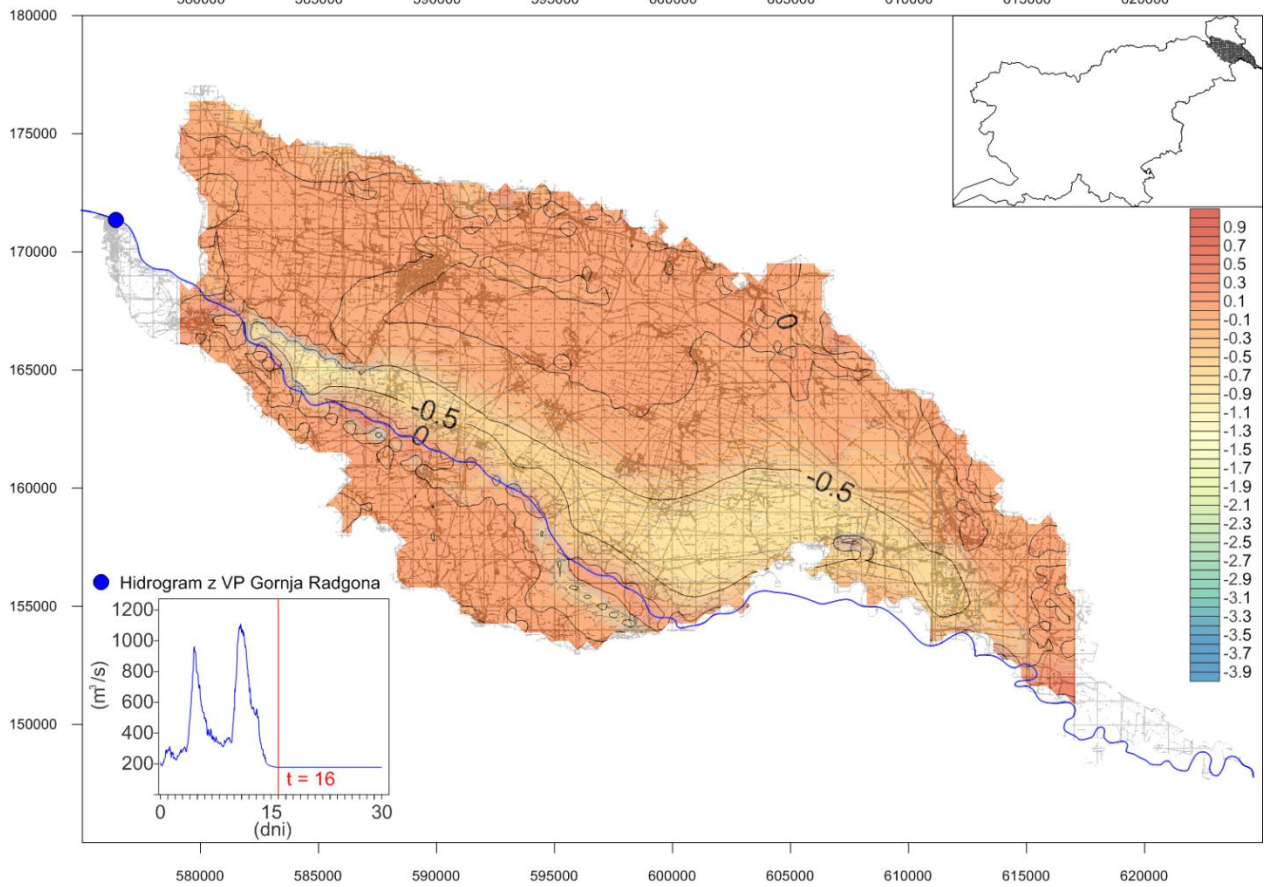
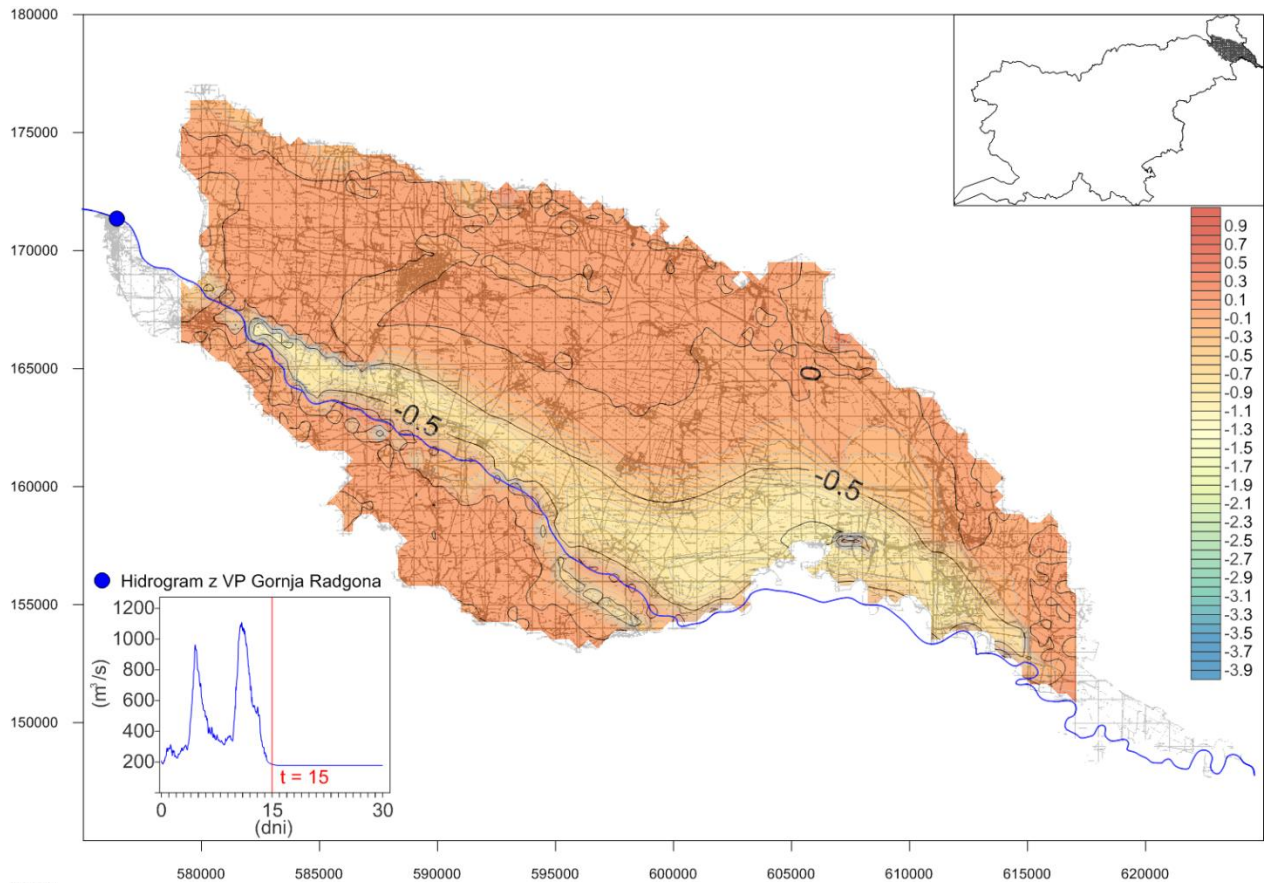




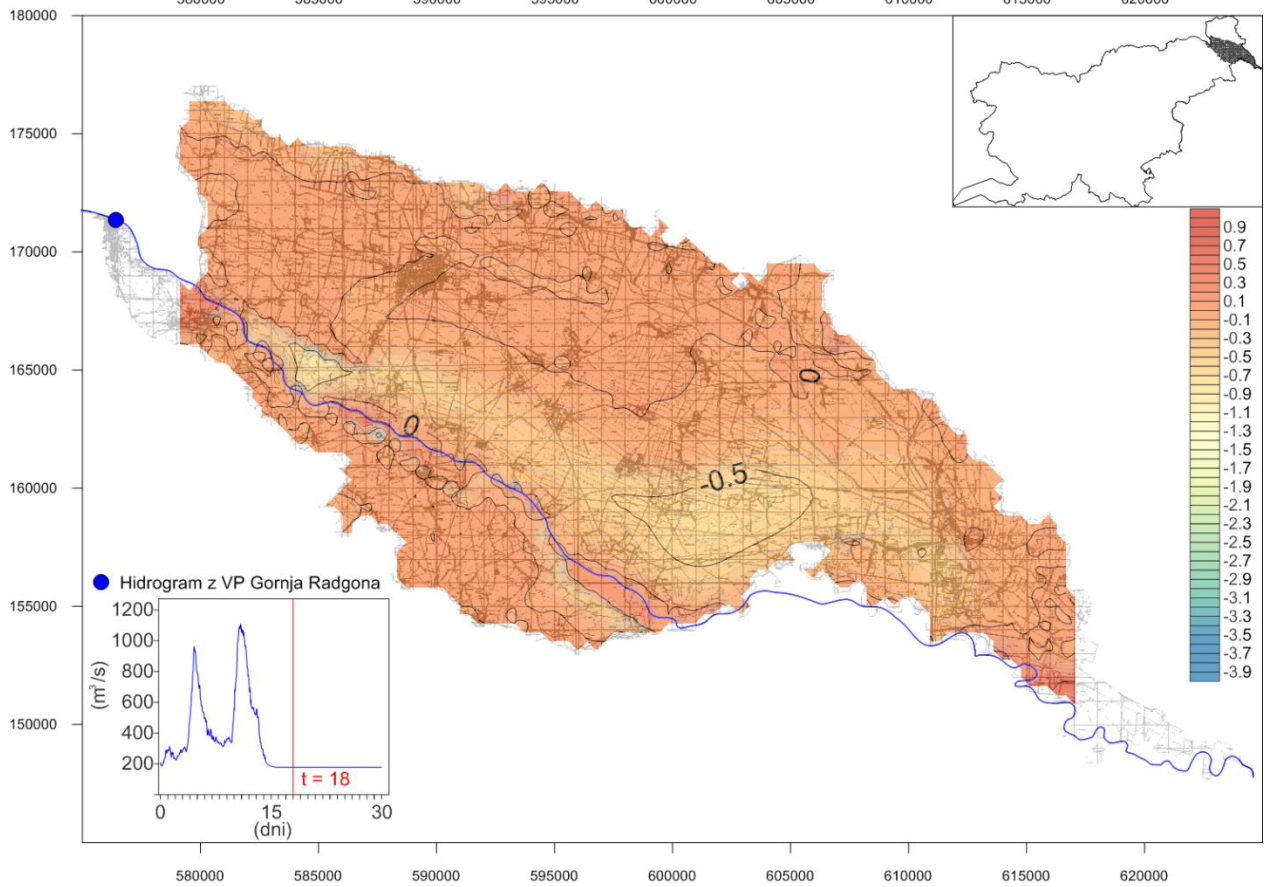
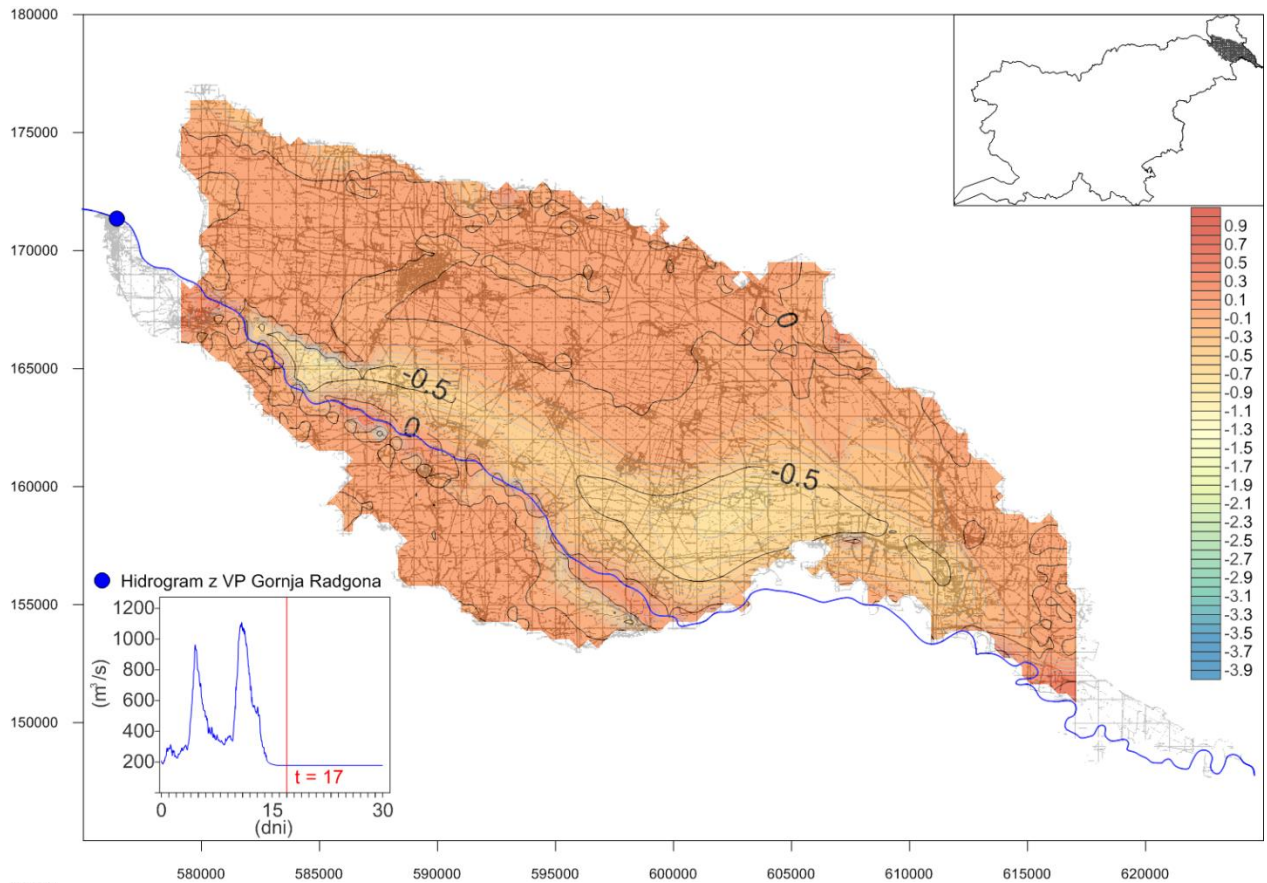


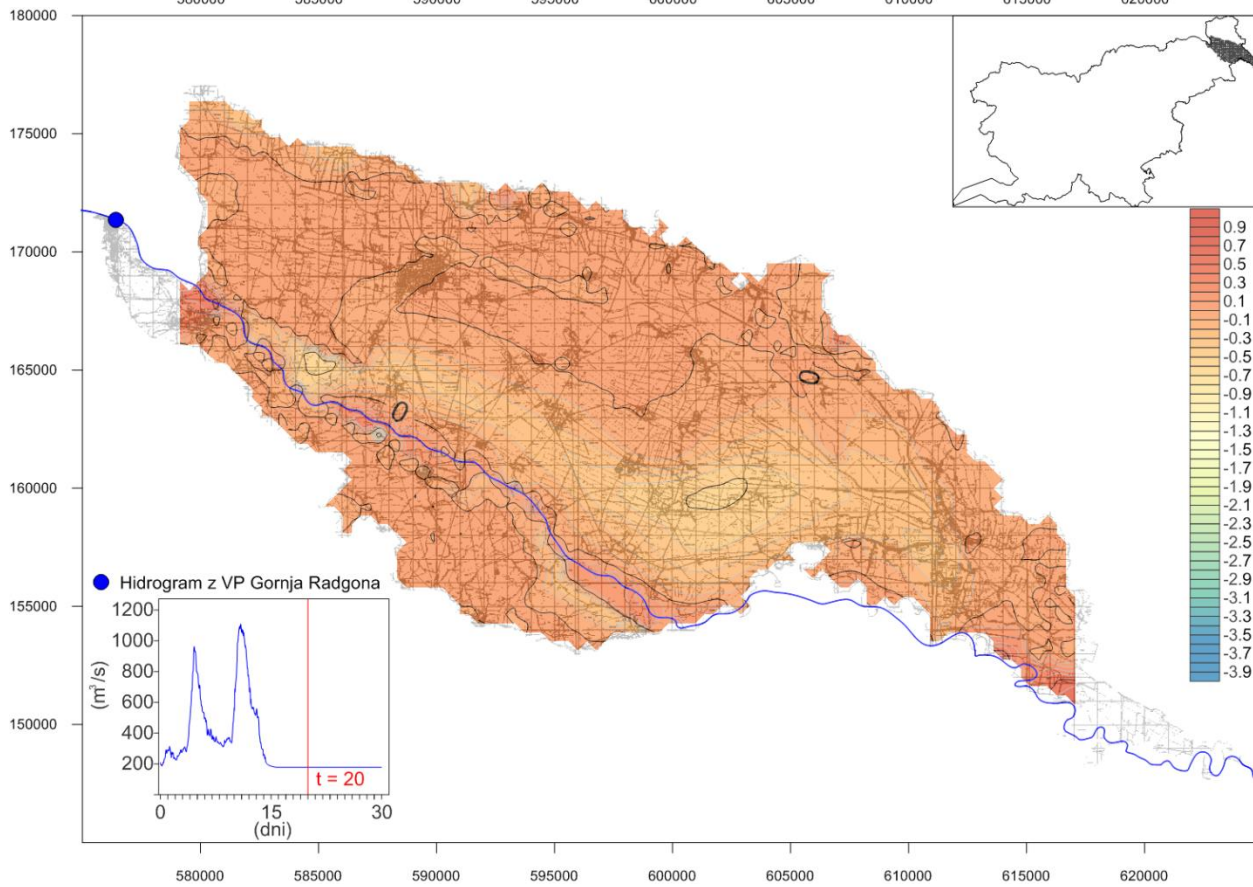
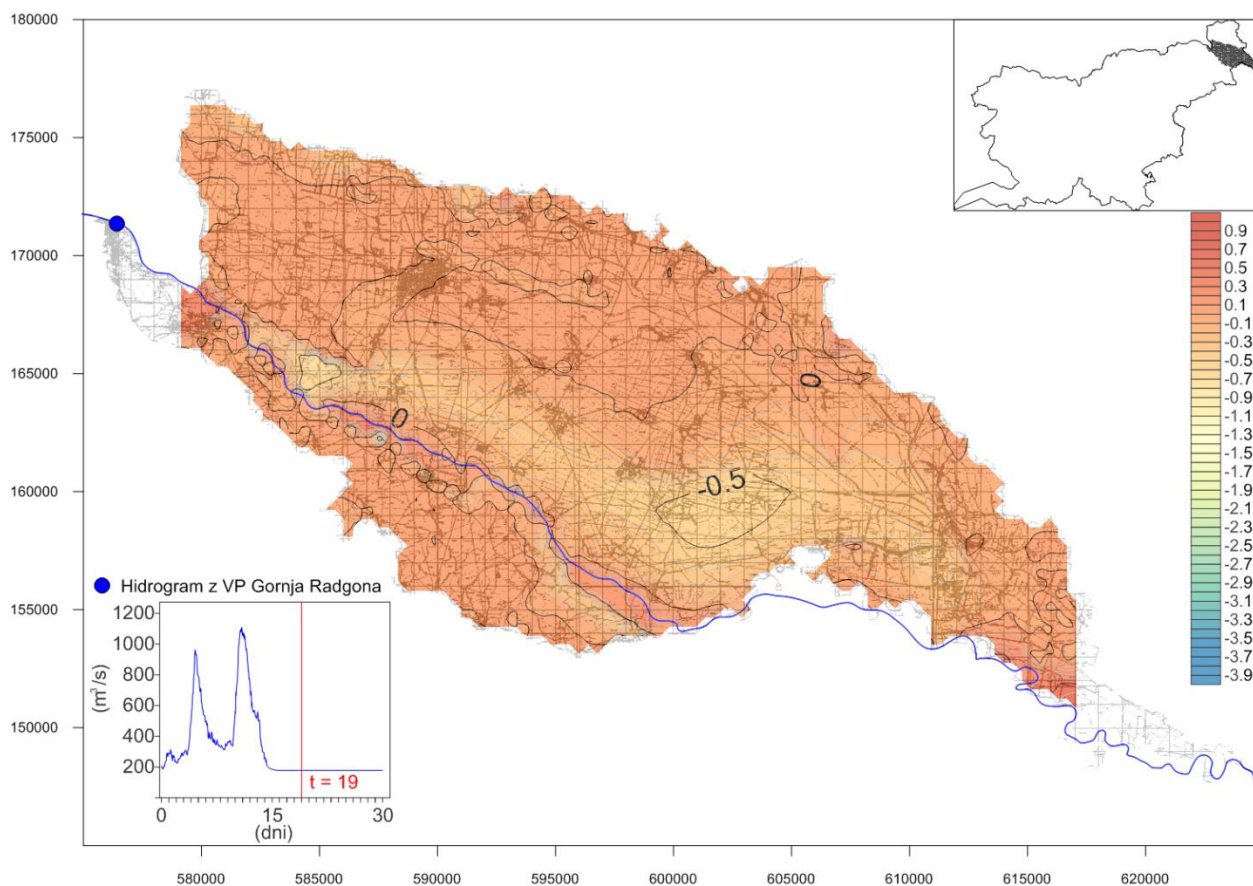




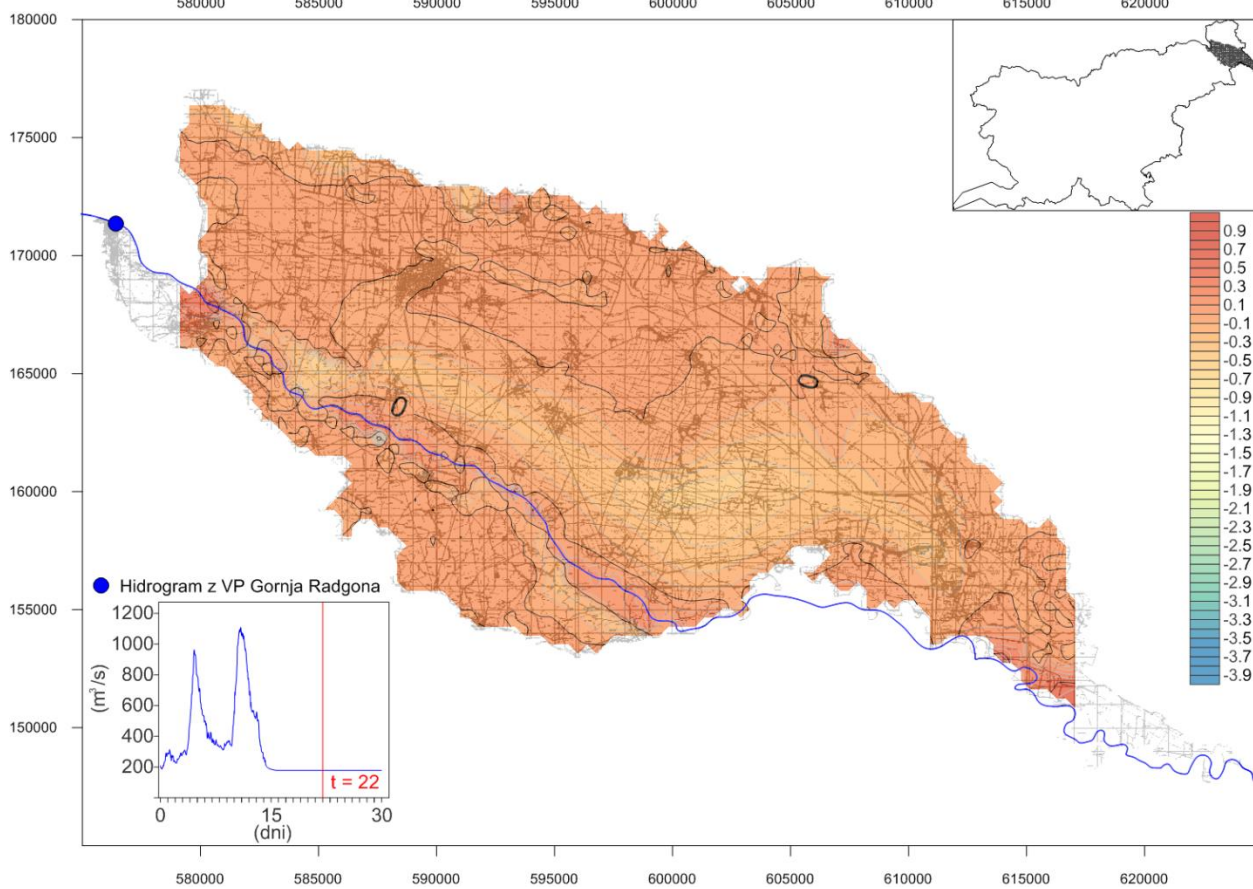
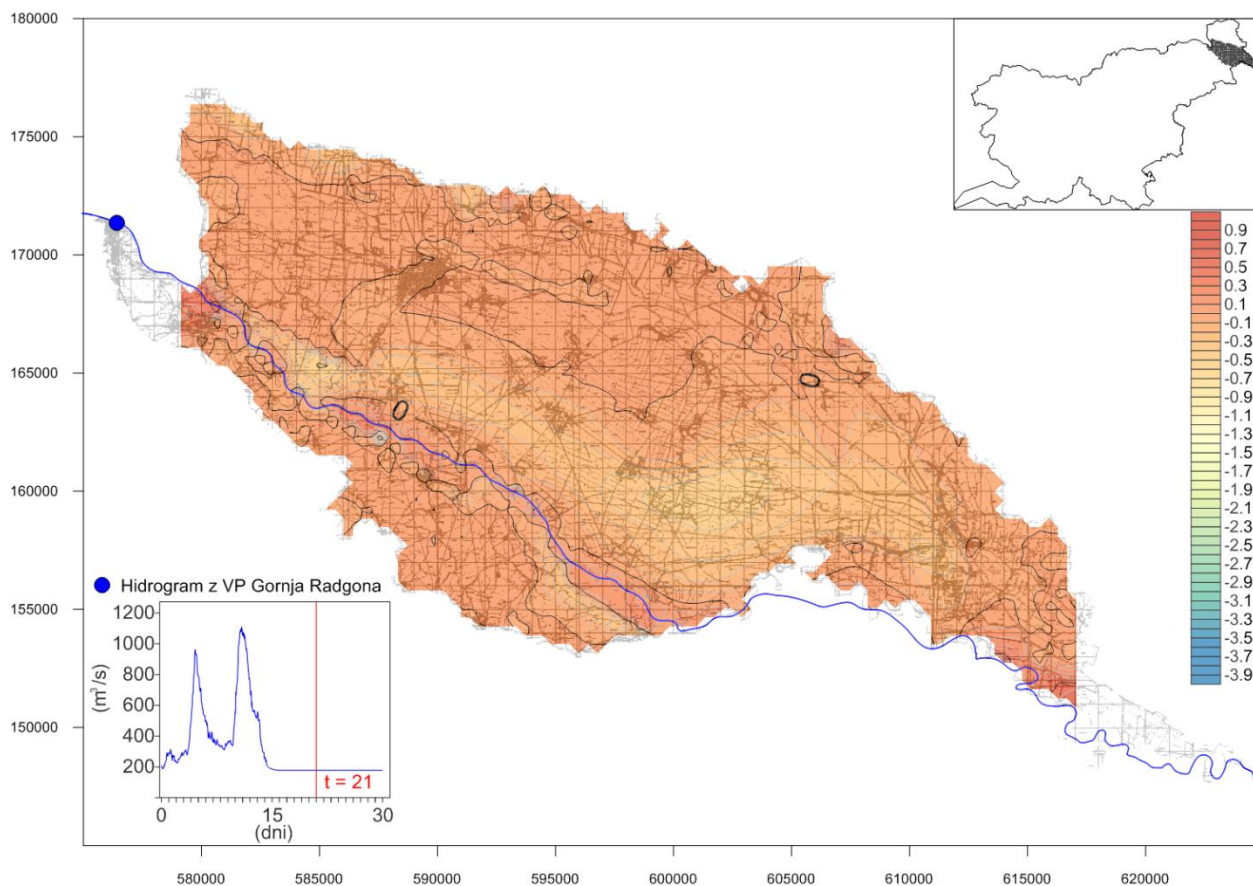


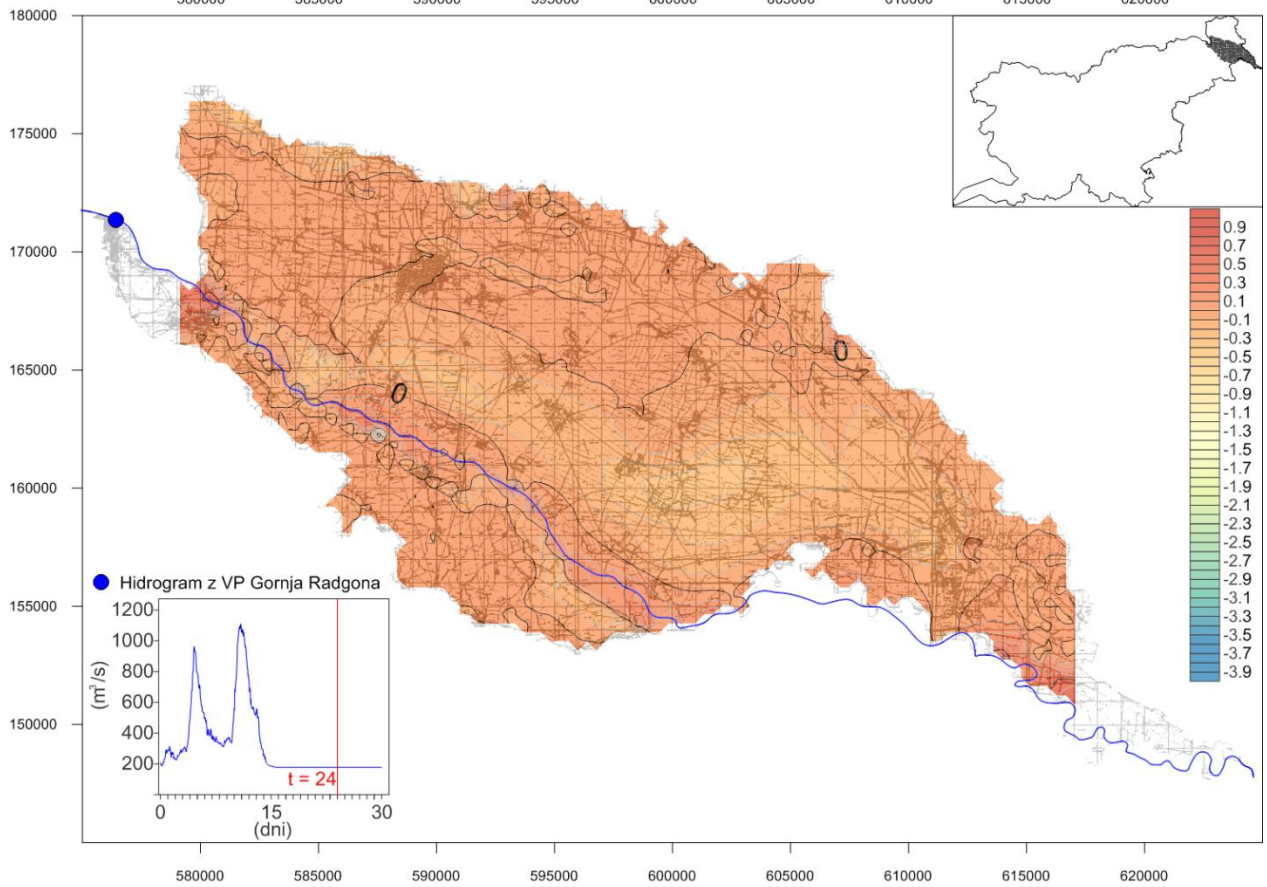
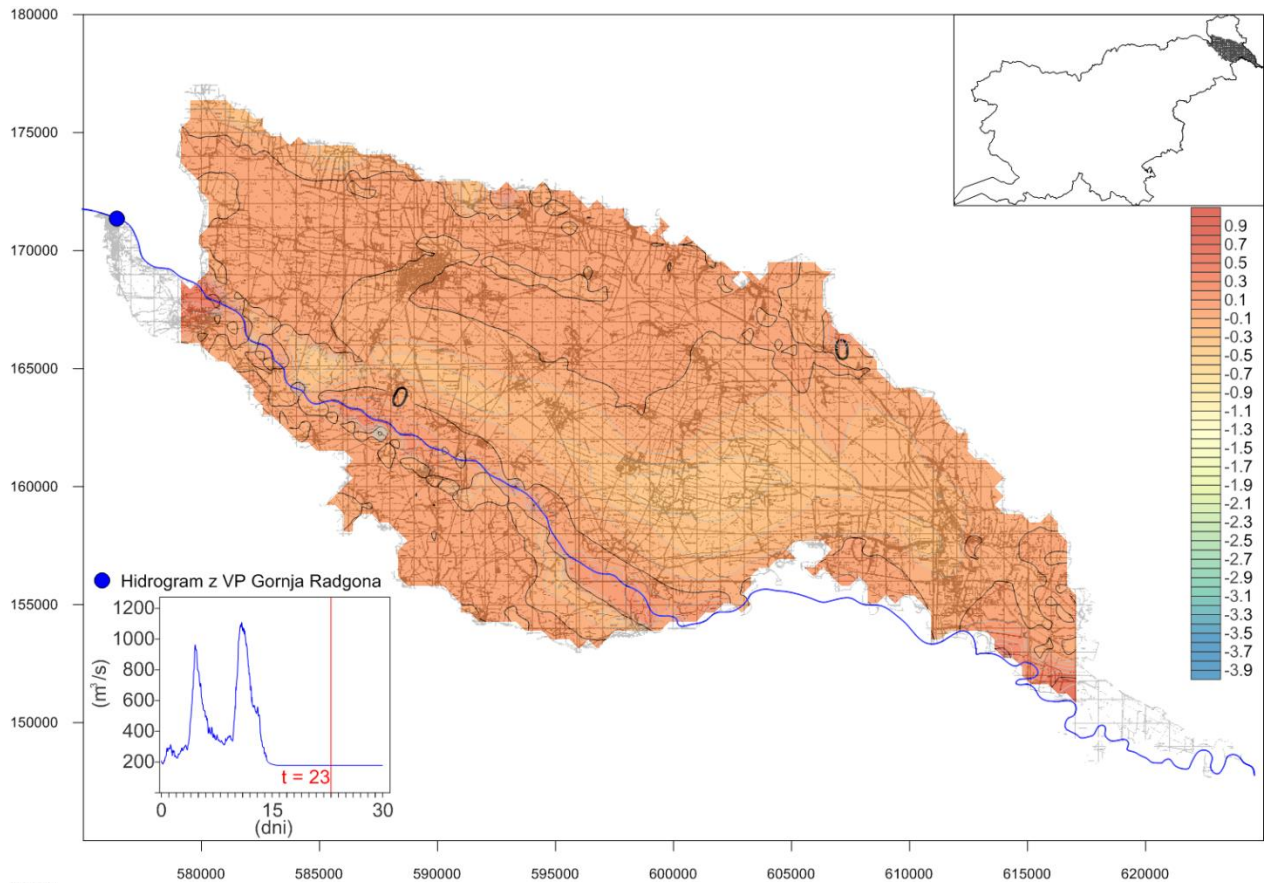




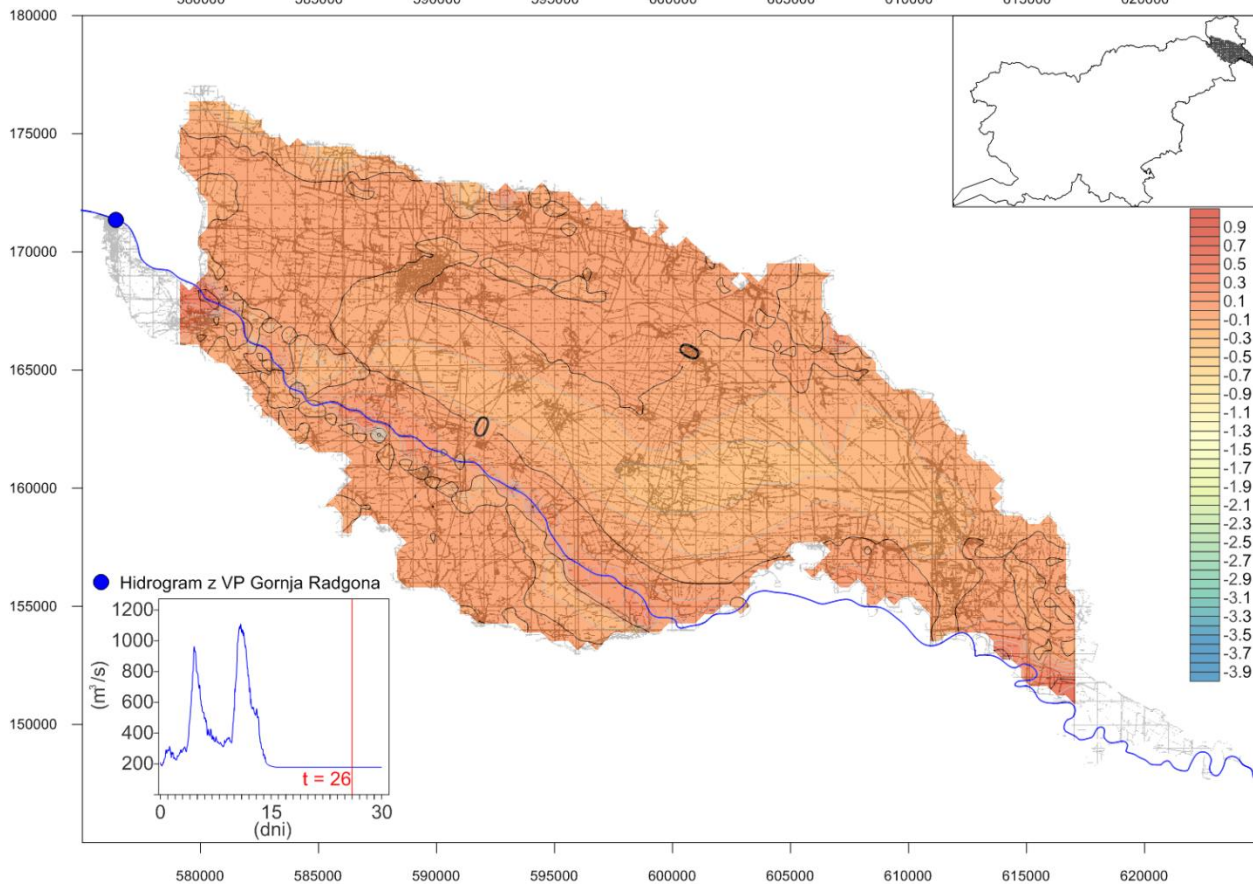
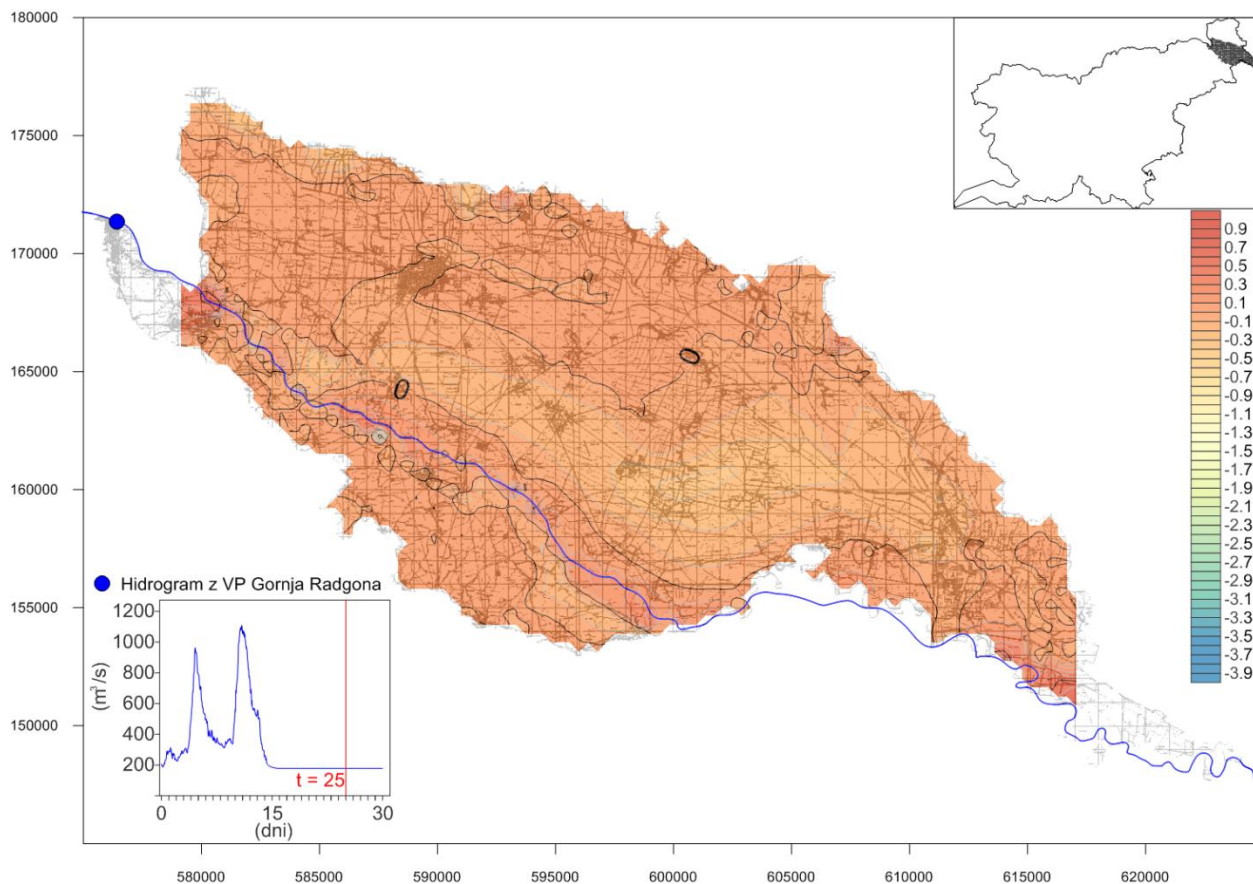


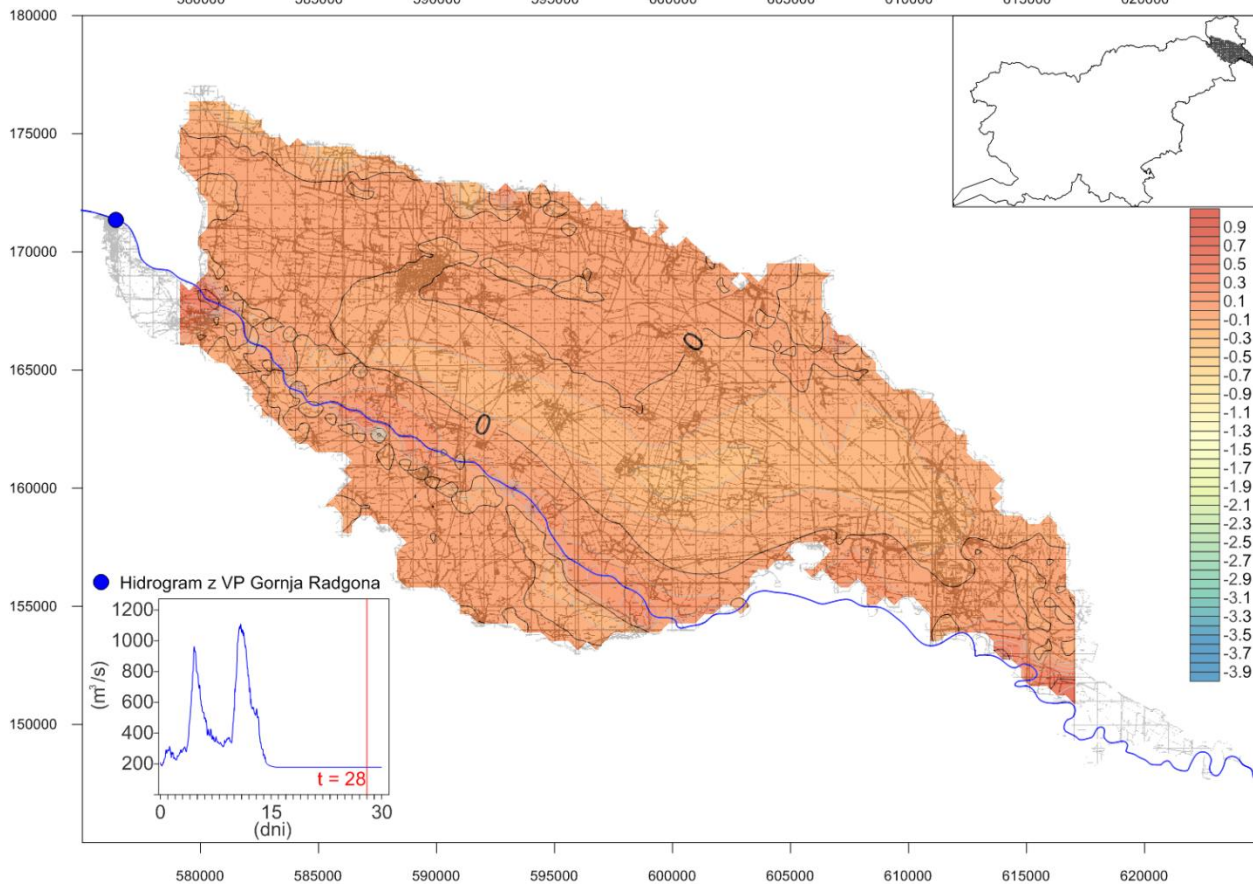
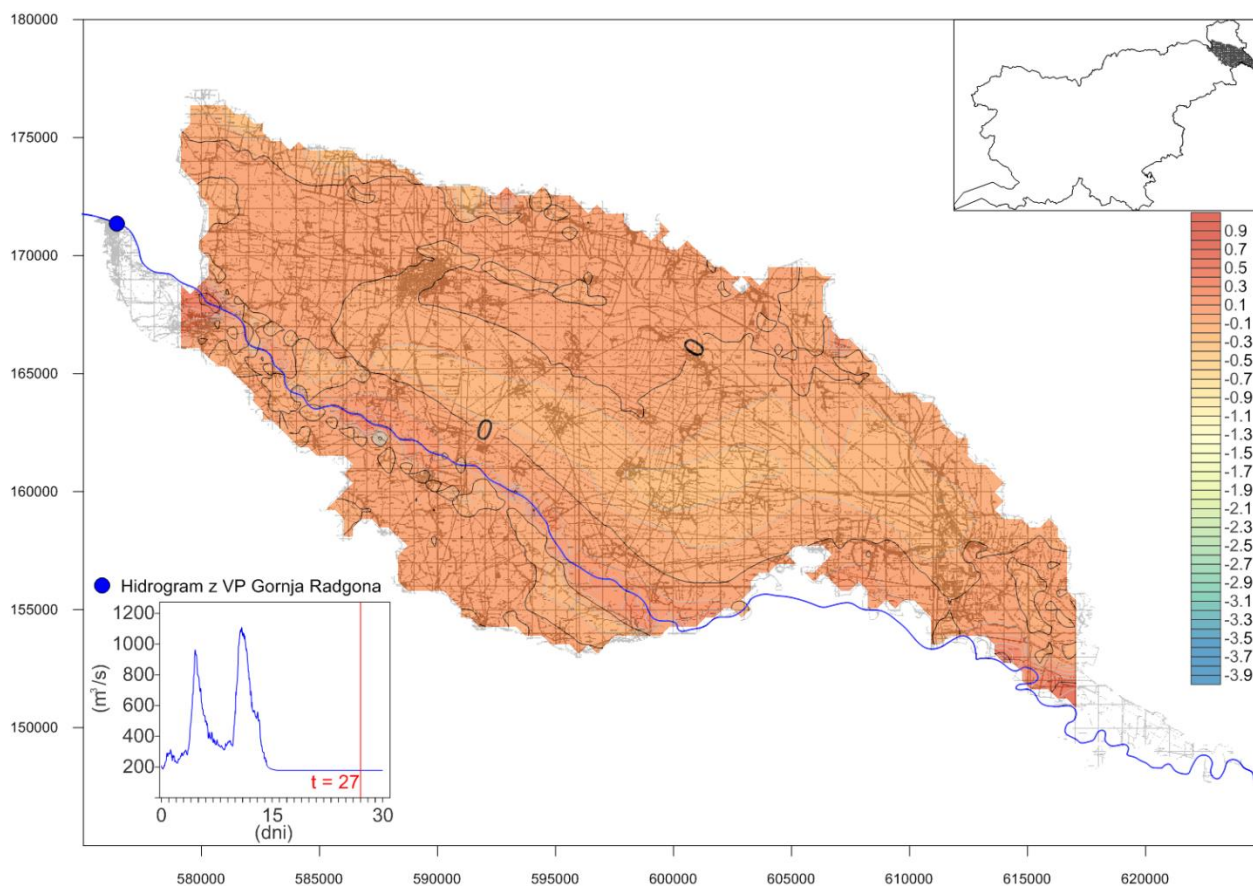




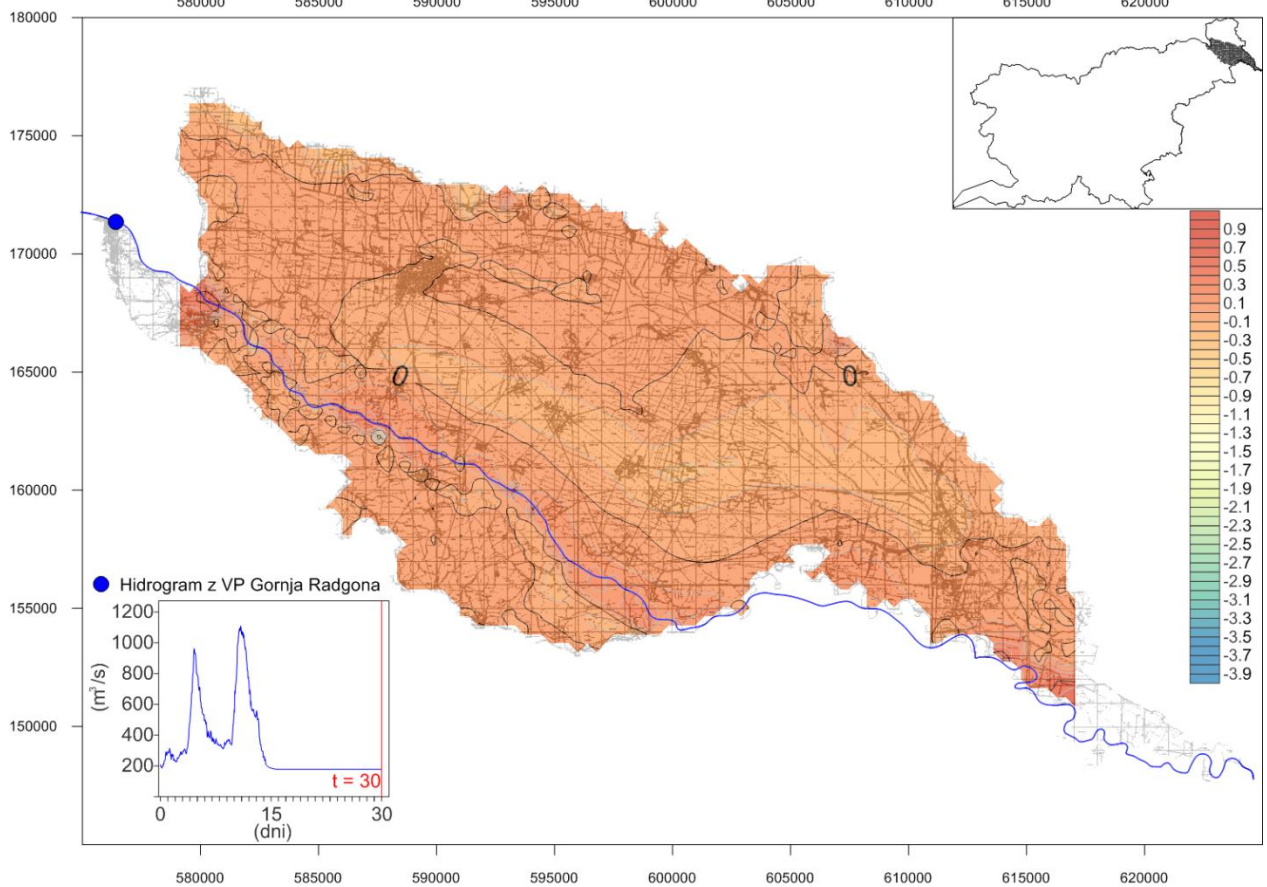
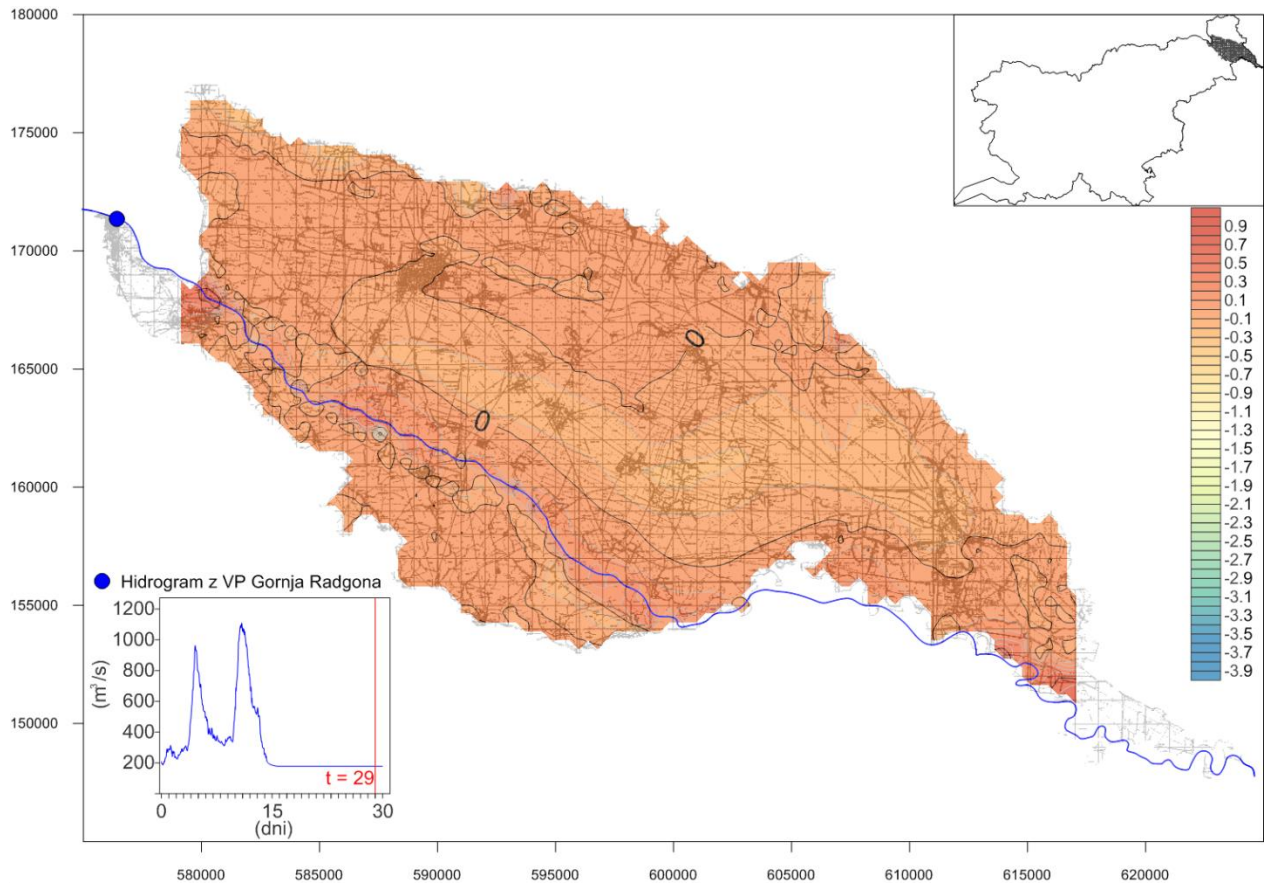












## D) SLIKE REKE MURE



Rečna struga v času nizke vode.



Rečna struga v času nizke vode, pod večjimi prodniki so praviloma peski in melji.





Rečna struga Mure v času nizke vode, obrežno zavarovanje



Rečna struga v času nizke vode, sipina v strugi reke Mure



Regulirani vodotoki ob visokih vodah hitro odvedejo vodo. Ledava in poplavljeno zaledje.



Poplavljanje Mure znotraj visokovodnih nasipov





Poplavljanje Mure po inundacijskem območju, poplavni log.



Poplavljanje Mure znotraj nasipov, reka se razlije tudi do širine 2 km.



Izdanek terciarne podlage kot meja vodonosnika Prekmurskega polja na spodnjem robu modela (desni breg reke Mure na meji med Slovenijo in Hrvaško, dolvodno od Murskega Središča)



Reka Mura na spodnjem robu modela dolvodno od Murskega Središča (km 57+000) pri pretoku  $178\text{m}^3/\text{s}$  (09.06.2016), izmerjenem na VP Petanjci (ARSO)