

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*

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



Univerzitetni program Gradbeništvo,
Hidrotehniška smer

Kandidat:

Uroš Lesjak

Analiza hidroloških in hidravličnih razmer na povodju Koprivnice 18.9.2007

Diplomska naloga št.: 3030

Mentor:

prof. dr. Matjaž Mikoš

Somentor:

viš. pred. mag. Rok Fazarinc

Ljubljana, 17. 9. 2008

STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisani **UROŠ LESJAK** izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom:
**»ANALIZA HIDROLOŠKIH IN HIDRAVLIČNIH RAZMER NA POVODJU
KOPRIVNICE 18.09.2007«.**

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

Celje, 31.08.2008

Uroš Lesjak

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

- UDK:** 556.16(497.4 Koprivnica):007.3:(043.2)
- Avtor:** Uroš Lesjak
- Mentor:** prof. dr. Matjaž Mikoš
- Somentor:** viš. pred. mag. Rok Fazarinc
- Naslov:** Analiza hidroloških in hidravličnih razmer na povodju Koprivnice
18.09.2007
- Obseg in oprema:** 54 str., 19 pregl., 18 sl., 6 en.
- Ključne besede:** Koprivnica, HEC-HMS, Mike11, hidravlični model, hidrološki model, nestalni tok

Izvleček:

Diplomska naloga obravnava visokovodni dogodek na vodotoku Koprivnica, na dan 18.09.2007. V prvem delu so opisana povodja Koprivnice, Sušnice in Ložnice, v katerem podajamo vse glavne topografske, hidrografske in hidrološke lastnosti. V nadaljevanju je podrobneje opisan obravnavani odsek Koprivnice ter razvoj padavinskega dogodka na tem območju. V drugem delu je prikazano in opisano izbrano programsko orodje za izračun hidrološkega modela HEC-HMS, za katerega so podani in obrazloženi tudi postopki, vhodni podatki in rezultati. Rezultati hidrološkega modela so podani v obliki hidrogramov in so uporabljeni v nadaljevanju, kot začetni robni pogoji hidravličnega modela nestalnega toka, ki je izdelan z enodimenzijskim programom Mike11. V hidravličnem modelu, ki je v prid natančnosti modeliran v kombinaciji odsekov Koprivnice, Ložnice in Sušnice, je analiziran odsek Koprivnice od avtocestnega odseka Hoče-Arja vas, do izliva v Ložnico. Opravili smo več preračunov, od dejanskega stanja pa do situacije z izboljšanimi pretočnimi razmerami, ter situacije z upoštevanjem zmanjšanja pretoka Sušnice. Rezultate smo analizirali in naredili medsebojno primerjavo.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC: 556.16(497.4 Koprivnica):007.3:(043.2)
Author: Uroš Lesjak
Supervisor: Prof. Dr. Matjaž Mikoš
Co – supervisor: Assist. Prof. Rok Fazarinc, M. Sc.
Title: Analysis of hydrologic and hydraulic conditions in the Koprivnica river watershed on 18.09.2007
Notes: 54 p., 19 tab., 18 fig., 6 eq.
Key words: Koprivnica, HEC-HMS, Mike11, hydraulic model, hydrologic model, unsteady flow

Abstract:

Flooding at the Koprivnica river, which occurred on 18.09.2007 is the subject of interest in our graduation thesis. In the first part, most important topographic, hydrographic and hydrologic data of the Koprivnica, Sušnica and Ložnica watersheds are presented. Further on, detailed description of the calculation area and rainfall events are defined. In the second part, we describe the chosen hydrological computer program HEC-HMS. According to the program, computational methods and input parametric data, are introduced as well as output results. These results are then used as boundary conditions in hydraulic model of unsteady flow made in one dimensional Mike11 computer program. Detailed analysis is made on branch Koprivnica from highway section Hoče-Arja vas to confluence of the Koprivnica and Ložnica rivers. There were several computational cases, from real circumstances to improved flow rates situation and situation with deflated Sušnica flow rates. All results were analysed and mutually compared.

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorju red. prof. dr. Matjažu Mikošu in somentorju mag. Roku Fazarincu za pomoč pri nastajanju diplomske naloge. Hvala Darku Burji in Darku Anzeljcu za strokovno pomoč pri delu s hidrološkim modelom, podjetju Hidrosvet za posredovanje potrebnih podatkov, Zdenku Zupančiču za terenske podatke in vsem ostalim, ki so mi pomagali.

Največja zahvala gre družini, za razumevanje, skrb in podporo v času celotnega študija.

KAZALO VSEBINE

1 UVOD	1
2 OPIS OBMOČJA	3
2.1 Porečje Koprivnice	3
2.1.1 Umestitev v prostor	3
2.1.2 Topografija in hidrografija	3
2.1.3 Hidrologija	5
2.1.4 Meteorologija	6
2.1.5 Podrobni opis obravnavanega območja Koprivnice	7
2.2 Porečje Ložnice	9
2.2.1 Umestitev v prostor	9
2.2.2 Hidrologija	11
2.2.3 Opis pomembnejših delov odseka Ložnice	11
2.3 Porečje Sušnice	12
2.3.1 Umestitev v prostor	12
2.3.2 Hidrologija	12
3 VISOKE VODE	13
3.1 Splošno	13
3.2 Visoke vode na Koprivnici	15
3.3 Visokovodni dogodek 18. in 19.9.2007	15
3.3.1 Koprivnica pod pregrado Loče	17
4 HIDROLOŠKI MODEL POVODJA KOPRIVNICE	19
4.1 Hidrološki modeli–splošno	19
4.2 Računalniški program HEC-HMS 3.2.0	21
4.3 Računske metode	21
4.4 Vhodni podatki	22
4.4.1 Padavine	22
4.4.2 SCS metoda padavinskih izgub	24
4.4.3 SCS metoda–določanje časa zakasnitve	26
4.4.4 Propagacija valov–metoda zakasnitve	26
4.4.5 Prispevna področja	27

4.4.5.1	Splošno.....	27
4.4.5.2	Akumulacija Šmartinsko jezero.....	28
4.4.5.3	Avtocestni odsek Hoče–Arja vas	29
4.4.5.4	Ostalo prispevno področje Koprivnice brez Sušnice.....	30
4.4.5.5	Prispevo območje Sušnice	31
4.5	Analiza rezultatov	32
4.5.1	Hidrogrami prispevnih področij	32
4.5.1.1	Iztok iz akumulacije Šmartinsko jezero	32
4.5.1.2	Avtocestni odsek Hoče–Arja vas	33
4.5.1.3	Prispevno območje Koprivnice brez Sušnice pod pregrado Loče.....	34
4.5.1.4	Prispevno območje Sušnice.....	35
4.5.2	Izvrednotenje posameznih vplivov na skupni hidrogram	35
4.5.3	Zanesljivost računa	38
5	HIDRAVLIČNI MODEL RAČUNSKEGA OBMOČJA	39
5.1	Računalniški programi.....	39
5.1.1	Aquaterra	39
5.1.2	Mike11	39
5.2	Opis hidravličnega modela Koprivnice	40
5.2.1	Splošno.....	40
5.2.2	Geometrija računskega modela.....	41
5.2.3	Začetni in robni pogoji.....	43
5.2.4	Manningovi koeficienti.....	44
5.2.5	Koeficienti zožitve in razširitve	46
5.2.6	Mostovi	47
5.3	Računski primeri za visokovodno situacijo z dne 18.9.2007	47
5.3.1	Računski primer brez hidroloških in hidravličnih modifikacij	48
5.3.2	Računski primer z upoštevanjem zadrževalnika na Sušnici in zvišanjem premostitvenih objektov	48
5.4	Analiza rezultatov	48
5.4.1	Rezultati računskega primera brez hidroloških in hidravličnih modifikacij	48
5.4.2	Rezultati računskega primera z nadvišanimi mostovi in upoštevanjem zadrževalnikov na Sušnici.....	51
5.5	Komentar.....	52
6	ZAKLJUČEK	53

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Hidrografske karakteristike povodja Koprivnice brez Sušnice, dolvodno od pregrade Loče	5
Preglednica 2: Merjeni pretoki na vodomerni postaji Loče (1967-1973) (ARSO,2007)	5
Preglednica 3: Pretoki vodotoka Koprivnica (Hidrosvet, 2007)	6
Preglednica 4: Srednje letne in maksimalne dnevne padavine na padavinskih postajah Celje in Vojnik, za obdobje od 1923 do 2007 (ARSO, 2007)	6
Preglednica 5: Prispevne površine povodja Ložnice	10
Preglednica 6: Pretoki Ložnice pred sotočjem s Koprivnico (Hidrosvet, 2005)	11
Preglednica 7: Pretoki Sušnice pri izlivu v Koprivnico (Hidrosvet, 2005)	12
Preglednica 8: Stopnja infiltracijskih izgub v odvisnosti od vrste zemljine.....	25
Preglednica 9: Časovna razporeditev pretokov iz pregrade Loče na dan 18.09.2007.....	29
Preglednica 10: Prispevne površine avtocestnega odseka med km 45,1+20 in km 45,6 + 40 in koeficienti CN	29
Preglednica 11: Vhodni podatki preračuna padavinskih izgub na območju avtoceste Hoče – Arja vas.....	30
Preglednica 12: Računski iztok iz zadrževalnika v odvisnosti od višine vode (Hidrosvet, 2000).....	30
Preglednica 13: Prispevne površine Koprivnice brez Sušnice dolvodno pregrade Loče in koeficienti CN	31
Preglednica 14: Vhodni podatki preračuna padavinskih izgub na prispevnem območju Koprivnice	31
Preglednica 15: Prispevne površine Sušnice in koeficienti CN	32
Preglednica 16: Vhodni podatki preračuna padavinskih izgub na prispevnem območju Sušnice	32
Preglednica 17: Volumenska in procentualna razporeditev hidrogramov posameznih prispevnih področij Koprivnice brez Sušnice, glede na skupni hidrogram v obdobju od 18.9.2007 do 19.9.2007	36
Preglednica 18: Kote merjenih in umerjenih gladin, za vodotoka Ložnica in Koprivnica	45

Preglednica 19: Primerjava gladin dejanskega stanja z gladinami pri možnih ukrepih za povečanje poplavne varnosti	50
---	----

KAZALO SLIK

Slika 1: Porečje vodotoka Koprivnica	4
Slika 2: Zadrževalnik visokih voda	7
Slika 3: Most Sveti suh.....	7
Slika 4: Most (Lesjak, 2008)	8
Slika 5: Most na obvoznici (Lesjak, 2008).....	8
Slika 6: Most pri Ljubici (Lesjak, 2008)	8
Slika 7: Most pri Ljubici (Lesjak, 2008)	8
Slika 8: Lesena brv (Lesjak, 2008).....	9
Slika 9: Razlivno območje (Lesjak, 2008)	9
Slika 10: Kanal (Lesjak, 2008).....	9
Slika 11: Sotočje Koprivnice in Sušnice (Lesjak, 2008).....	9
Slika 12: Podporečja vodotoka Ložnica	10
Slika 13: Sotočje Ložnice in Savinje (Lesjak, 2008).....	11
Slika 14: Sotočje Ložnice in Koprivnice (Lesjak, 2008).....	11
Slika 15: Poplavna območja na ozemlju Republike Slovenije (www.sos112.si).....	14
Slika 16: Dnevna količina padavin od 8. ure 18. septembra 2007 do 8. ure 19. septembra 2007 (ARSO, 2007).....	16
Slika 17: Radarska slika padavin 18.9.2007 ob 16:10 (ARSO, 2007)	23
Slika 18: Računski model v programu Mike11, izrisan na podlagi TTN 5000.....	42

KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 1: Iztok iz pregrade Loče.....	32
Grafikon 2: Vtočni in iztočni hidrogram avtocestnega zadrževalnika	33
Grafikon 3: Hidrogram prispevnega območja Koprivnice brez Sušnice, pod pregrado Loče .	34
Grafikon 4: Hidrogram prispevnega območja Sušnice	35
Grafikon 5: Skupni hidrogram odtoka na povodju Koprivnice 18. in 19.09.2007.....	36
Grafikon 6: Izračunani in merjeni hidrogrami – vhodni robni pogoji hidravličnega modela ..	44
Grafikon 7: Umerjeni Manningi za vodotok Ložnica na dan 18.09.2007.....	46
Grafikon 8: Umerjeni Manningi za vodotok Koprivnica na dan 18.09.2007.....	46
Grafikon 9: Primerjava gladin med dejanskim stanjem in primerom z zvišanimi mostovi, ki so povzročali zaježbo	51

OKRAJŠAVE IN SIMBOLI

ARSO Agencija Republike Slovenije za okolje

IzVrs Inštitut za vode Republike Slovenije

MO Celje Mestna občina Celje

1 UVOD

Slovenija je država s pestro geografsko raznolikostjo. Leži namreč na stičišču štirih večjih geografskih enot: Alp, Panonske kotline, Dinarskega gorovja in Sredozemlja ter ima tri prevladujoče tipe podnebja: submediteransko, zmerno celinsko in alpsko, kar ji daje poseben čar. Zaradi bližine Sredozemskega morja in Atlantskega oceana, prevladujoči jugozahodni vetrovi nad ozemlje prinašajo velike količine navlaženih zračnih mas, ki med svojo potjo najprej trčijo v Alpsko visokogorje na severozahodu države. Posledično so v severozahodu države padavine količinsko najobilnejše, s povprečjem 2500 mm na leto, ter se proti vzhodu, kjer prevladuje nižinski svet, zmanjšujejo proti povprečju 800 mm na leto. Izrazito suhega ali mokrega obdobja pri nas sicer ni, vendar so razlike med različnimi meseci in letnimi časi močno opazne. V Evropi sodi Slovenija v sam vrh pogostosti pojavljanja neviht in te številke se z leti še povečujejo. Najpogostejše so kratkotrajne zelo intenzivne padavine (5, 10, 15 in 30 minutne) vendar se vse pogosteje pojavljajo tudi večurna oz. večdnevna obdobja intenzivnih padavin (Uhan in Bat, 2003).

Po oceni ARSO (Agencija Republike Slovenije za okolje), znaša skupna dolžina vodotokov na ozemlju Slovenije okoli 28 000 km (2003). Po tej mreži se letno pretoči okoli 34 milijard m³ vode, kar Slovenijo glede na razmerje količina vode – delež kopnega, uvršča med najbolj vodnate države na svetu. Po Zakonu o vodah te vode pripadajo dvema povodjema. Večina, 81 %, črnorskemu povodju in manjši del, 19% , jadranskemu (2003). Omeniti velja dejstvo, da so bili do sedaj izvedeni vodnogospodarski posegi le na 9% skupne dolžine vodotokov (Steinman, Banovec, 2004).

Glede nihanja vodnega stanja med letom, ki je predvsem posledica časovne razporeditve padavin, izhlapevanja in zadrževanja podzemnih voda, lahko razvrstimo slovenske vodotoke v 4 odtočno/pretočne režime: snežni, snežno dežni, dežno snežni in dežni režim. Večina vodotokov ima tudi oz. predvsem hudourniške značilnosti. Relief, pedološka raznolikost in padavinske značilnosti, namreč botrujejo hitremu dvigu in upadu vodotokov ob vodnih ujmah, kar se kaže predvsem v razmerju med maksimalnimi in minimalnimi pretoki.

V diplomski nalogi se bomo osredotočili na dogodek, ki se je zgodil 18.9.2007 na vodotoku Koprivnica v Celju. Ob močnem deževju je bilo zaradi omenjenih lastnosti vodotokov ožje

območje Koprivnice poplavljeno. Dogodek bomo preverili tako v hidrološkem kot hidravličnem smislu ter ovrednotili prispevek posameznih vplivov na visokovodno situacijo.

2 OPIS OBMOČJA

2.1 Porečje Koprivnice

2.1.1 Umestitev v prostor

Koprivnica je vodotok skupne dolžine okoli 9,7 km. Izvira na obronkih južnega Pohorja, v okolici Šmartnega v Rožni dolini, na severozahodnem delu Celjske kotline. Je eden izmed mnogih dotokov v vodno akumulacijo Šmartinsko jezero, ki je bilo narejeno za omilitev poplav v Celju in okolici, ter njegov edini iztok. Na zgornjem delu se vanjo z desne strani steka potok Lenartov graben, na nižinskem delu pa ima dva glavna pritoka. Kot prvi se v kraju Dobrava kot levi pritok vanjo izliva Lahovniški potok, le nekaj sto metrov pred izlivom v Ložnico, v kraju Babno, pa še vodotok Sušnica, kot desni pritok. Poleg omenjenih pritokov se v Koprivnico stekajo še mnogi neimenovani potoki, ki so večinoma suhi, oživijo pa običajno le ob različnih padavinskih dogodkih. Koprivnico uvrščamo med vodotoke 4. reda, saj se sama kot levi pritok v kraju Ložnica izliva v vodotok Ložnico, ta pa se kot levi pritok, pri naselju Modra laguna, izliva v Savinjo.

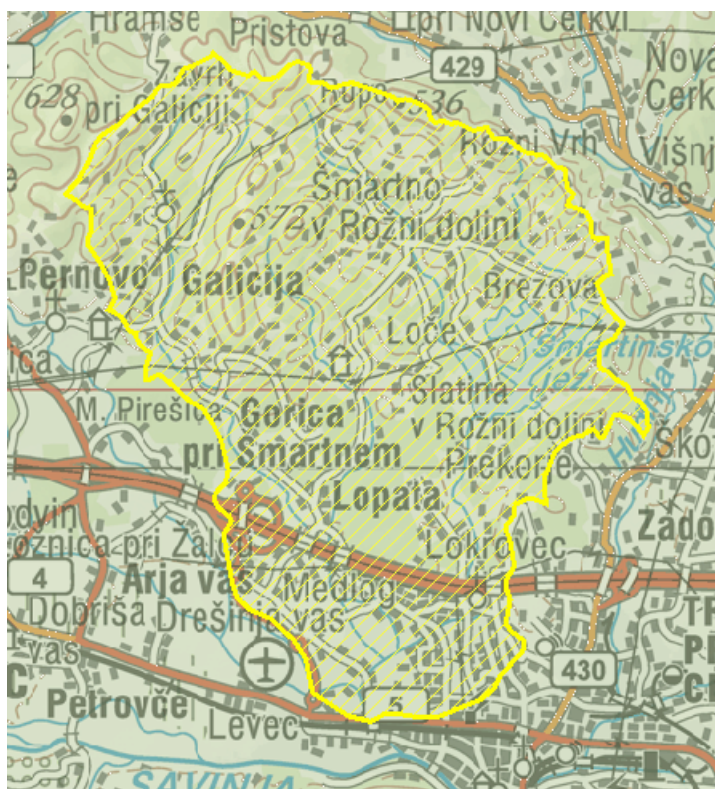
Sama struga Koprivnice v zgornjem delu, do Šmartinskega jezera, ni urejena. Dolvodno od pregrade Loče do križanja z avtocestnim odsekom Hoče – Arja vas, teče po naravni strugi, kjer se že pojavljajo lokalne ureditve, nadalje, skozi naselje Ostrožno do izliva v vodotok Ložnica, pa je v celoti regulirana. Regulacije so bile urejene v obdobju od leta 1965 do 1970, ko so se izvajala obsežna dela na sklopu celjskega vodnega vozlišča.

2.1.2 Topografija in hidrografija

Zgornji del vodozbirnega področja Koprivnice je večinoma razbrazdano hribovje z velikim deležem gozdne površine ter redkejšo poselitvijo, od koder v položnejši spodnji del vodijo strme grape in struge. Področje v osnovi tvorijo neprepustne kamenine, ki v povezavi z reliefom povzročajo hiter odtok padavinskih voda v obliki hudourniških vodotokov. (Natek, 2005).

Vodna akumulacija Šmartinsko jezero je bila narejena z namenom zadrževanja visokih hudourniških pretokov in njihovim kasnejšim postopnim izpustom dolvodno, kjer se sestava tal, relief ter porazdelitev poseljenosti bistveno spremeni. Pod površjem najdemo v večji meri

rečne naplavine s prevladujočimi peščenimi in ilovnato prodnatimi plastmi, pomešanimi z nanosi blata in mivke, kar ustreza splošni podobi Celjske kotline kot izrazitega nasutega vršaja. Poselitev je precej večja kot na višjeležečih delih povodja, največja pa je pri avtocestnem odseku Hoče – Arja vas na območju pri Cerkvi Svetega duha, kjer se zadnja leta na eni strani širi elitno naselje Ostrožno, na drugi strani pa blokovsko naselje Nova vas.



Slika 1: Porečje vodotoka Koprivnica

Vodozbirno področje je področje, ki ga omejuje orografska razvodnica in s katerega vode gravitirajo v hidrološki profil vodotoka. Razvodnica Koprivnice je bila določena glede na potek plastnic na podlagi Temeljnega topografskega načrta M 1:5000 (slika 1).

Po ugotovitvah, zapisanih v glavnem projektu Regulacije Koprivnice (1968), znaša vodozbirno področje Koprivnice brez Sušnice relativno majhnih $19,7 \text{ km}^2$. Večji del gravitira k dotočni strugi gorvodno od Šmartinskega jezera ($12,2 \text{ km}^2$), manjši del ($7,5 \text{ km}^2$) pa na strugo dolvodno od pregrade Loče, ki zajezuje vodno akumulacijo. Dolžina vzdolžne osi vodotoka, za obravnavani odsek od izliva v Ložnico do avtoceste Hoče–Arja vas, znaša, glede

na karte merila M 1:5000, okoli 2,5 km. Pomemben podatek predstavlja tudi padec vodotoka. Celoten padec vodotoka je ocenjen na 1,7‰. Razvodnica znotraj povodja, ki ločuje prispevno področje gorvodno in prispevno področje dolvodno od pregrade Loče, predstavlja hkrati tudi razmejitveno črto padca vodotoka. Zgornji, gričevnat del, ima namreč znatno večji (1,8%) padec, za nas pa je predvsem pomemben padec na nižinskem odseku dolvodno od križanja z avtocesto, ki je po podatkih projekta Izdelava idejne zasnove ureditve Savinje s pritoki na območju MO Celje (2005), ocenjen na 1,2‰ (preglednica 1).

Preglednica 1: Hidrografske karakteristike povodja Koprivnice brez Sušnice, dolvodno od pregrade Loče

Oznaka/enote	A [km ²]	I[%]	L[km]
Vrednosti	7,5	1,2	2,5

2.1.3 Hidrologija

Visoki pretoki se na Koprivnici pojavljajo v različnih mesecih. Najpogostejši so zgodaj spomladi (marec, april) in pozno jeseni (november) ter pozimi (januar), občasno tudi v drugih mesecih, kar nakazuje dežno – snežni vodni režim. Pretoki praviloma naraščajo izredno hitro, imajo kratkotrajen vrh ter hitro tudi usahnejo, kar kaže na izrazito hudourniški značaj. V spodnjem toku imata na kote visoke vode Koprivnice precejšen vpliv vodotoka Savinja in Ložnica, saj kota njunih visokih vod, do določene stacionaže, vplivata na gorvodno koto vode pritokov.

Merjeni hidrološki podatki za zgornji del povodja Koprivnice so dosegljivi za leta med 1967 in 1973, ko je na pregradi Loče delovala vodomerna postaja (ARSO, 2007) in so razvidni iz preglednice 2. Za del povodja dolvodno od pregrade, merjeni podatki niso na voljo.

Preglednica 2: Merjeni pretoki na vodomerni postaji Loče (1967-1973) (ARSO, 2007)

Vodomerna postaja	sQs [m ³ /s]	sQn [m ³ /s]	vQv [m ³ /s]
Loče	0,199	0,004	32

Izračun 100-letnih pretokov z upoštevanjem zadrževanja visokovodnega vala v akumulaciji Šmartinsko jezero, je bil prvič opravljen leta 1968 v projektu Regulacija Koprivnice. Kasneje

je bil večkrat popravljen, nazadnje leta 2007 v hidravlični študiji (Hidrosvet, 2007), ko so bile dopolnjene tudi mnoge druge karakteristike (preglednica 3).

Preglednica 3: Pretoki vodotoka Koprivnica (Hidrosvet, 2007)

Povratna doba	Q100	Q20
Pretoki [m ³ /s]	18	11

2.1.4 Meteorologija

Na povodju Koprivnice ni padavinske postaje, zato se bomo navezali na najbližji meteorološki oziroma padavinski postaji Celje in Vojnik, ki ju upravlja MOP-ARSO.

Avtomatska meteorološka postaja Celje - Levec je locirana ob vodotoku Savinja, na severozahodu Celja, padavinska postaja Vojnik pa v istoimenskem kraju severno od Celja, tako da obravnavano povodje Koprivnice objemata z leve in desne strani. Dosegljivi podatki ARSO so na voljo za obdobje med letoma 1923 in 2007, vendar za postajo Vojnik le v obliki 24 urnih kumulativnih padavin (od 07:00 zjutraj prvega dne, do 07:00 zjutraj naslednjega dne), medtem ko so za postajo Celje na voljo vsi najpomembnejši podatki, vključno s 5 minutno intenziteto padavin. V preglednici 4 so za obe postaji zapisane vrednosti srednjih letnih količin padavin ter maksimalne dnevne vrednosti padavin za obdobje od leta 1923 do leta 2007.

Preglednica 4: Srednje letne in maksimalne dnevne padavine na padavinskih postajah Celje in Vojnik, za obdobje od 1923 do 2007 (ARSO, 2007)

Padavinska postaja	H _{srednje letne} [mm]	Leto	H _{max dnevne} [mm]	Leto
Celje	1130,4	2003	1933	sept. 1933
Vojnik	1120,6	2003	2007	sept. 2007

2.1.5 Podrobni opis obravnavanega območja Koprivnice

Karakteristični prečni profil ima obliko sestavljenega trapezoida, s širino dna 3,0 m. Brežine so zavarovane s kamnitim lomljencem do višine 0,4 m, nakloni pa so urejeni v razmerju 1:1,5 v primarni strugi in 1:2,5 na razširjenem delu. Detajl je razviden iz priloge A.

Rastje v sami strugi je sestavljeno iz goste, na nekaterih mestih visoke in mehke trave ter redkih zaplat trstičja, medtem ko se drevje in grmičevje pojavi predvsem na sotočjih z Ložnico in Sušnico.

Računski odsek se začne pri avtocestnem odseku Hoče–Arja vas, kjer Koprivnica prečka traso skozi obstoječi cestni podhod. Takoj nato je vanjo z leve brežine z izpustom in prelivom zadrževalnika speljana meteorna voda omenjenega avtocestnega odseka (slika 2). Os vodotoka se nadaljuje v rahlem desnem loku mimo cerkve Svetega duha na desnem bregu pod mostom, ki ga bomo imenovali Sveti duh (slika 3) in ki povezuje naselje Nova Vas z vzhodnim delom naselja Ostrožno, proti naselju Lava. Na tem odseku je celoten desni breg močno poseljen, medtem ko se na levem bregu po trgovskem centru Lidl, izmenjujejo zaraščene travnate površine in redki stanovanjski objekti, ki jih z Ostrožnim povezuje most (slika 4). Do povezovalne ceste Lava – Ostrožno, odsek zavija z rahlim levim lokom, ki se pri mostu na obvoznici in pri Ljubici (slike 5, 6 in 7) izravna.



Slika 2: Zadrževalnik visokih voda
(Lesjak, 2008)



Slika 3: Most Sveti suh
(Lesjak, 2008)



Slika 4: Most (Lesjak, 2008)



Slika 5: Most na obvoznici (Lesjak, 2008)

Starejši most pri Ljubici je v precej slabem stanju ter kot tak zaprt za težja vozila, predstavlja pa tudi dokajšnjo zožitev za prečni prerez vodotoka. Na desni brežini v svetli profil na razdalji cca. 100m gorvodno in dolvodno posega navpični zid, ki predstavlja varovalni zid bližnjim hišam in gostinskemu objektu Ljubica, dodatno pa pretočno odprtino zmanjšujejo še podmostne instalacije (slika 7). Po 300 metrih vodotok prečka še zadnji premostitveni objekt – lesena brv (slika 8), locirana neposredno v svetli profil vodotoka, ki omogoča neposredno povezavo gostemu naselju na levem bregu, segajočem vse do Lave, z Ostrožnim. Neposredno za leseno brvjo se na desnem bregu odpira ravan kmetijskih površin, ki v primeru visokih voda služi kot razlivno območje. Temu ustrezno je z manjšimi višinskimi kotami prilagojen tudi desni nasip (slika 9).



Slika 6: Most pri Ljubici (Lesjak, 2008)



Slika 7: Most pri Ljubici (Lesjak, 2008)



Slika 8: Lesena brv (Lesjak, 2008)



Slika 9: Razlivno območje (Lesjak, 2008)

Vzdolž celotnega odseka so v vodotok speljani številni meteorni in drugi odtočni kanali, na katerih povečini ni nameščenih povratnih loput (slika 10). Pomemben podatek predstavlja tudi dejstvo, da sta nasipa na obeh straneh struge večinoma dvignjena nad koto okoliškega terena.



Slika 10: Kanal (Lesjak, 2008)



Slika 11: Sotočje Koprivnice in Sušnice,
(Lesjak, 2008)

2.2 Porečje Ložnice

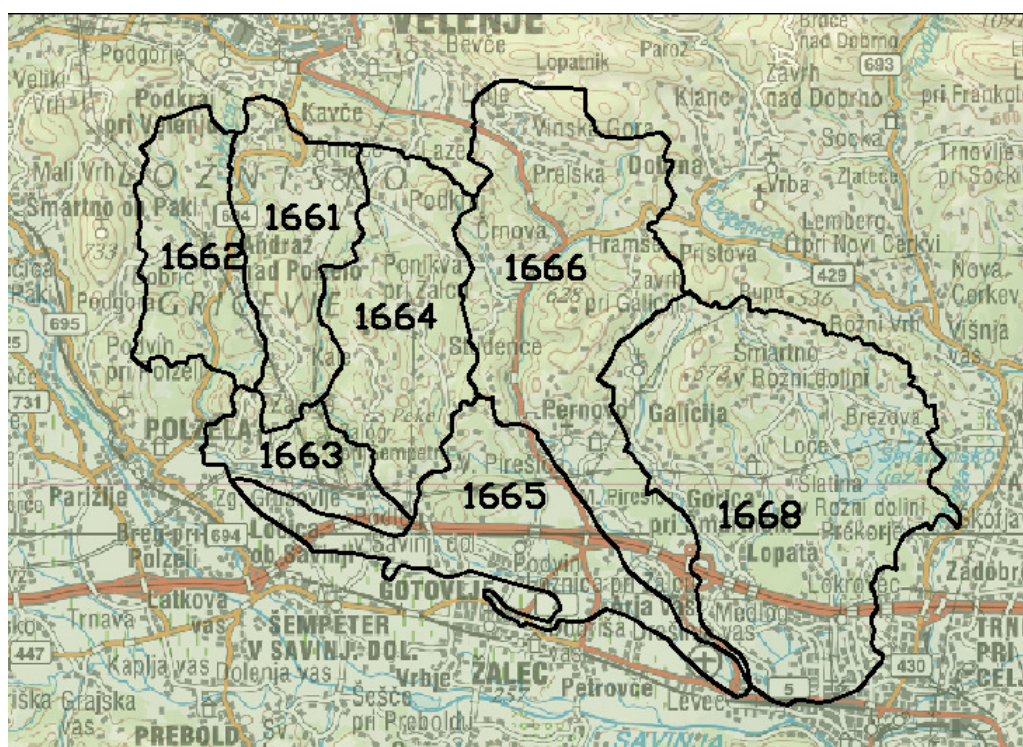
2.2.1 Umestitev v prostor

Vodotok Ložnica izvira v okolici Šmartnega ob Paki, površina njenega povodja pa znaša dobrih 102 km². Izliva se v reko Savinjo, vanjo pa gravitirajo tako vode z območja južnega

Pohorja kot tudi predalpskega območja Savinjskih Alp. Obsega osem podpovodij (preglednica 5 in slika 12), ki so razdeljena po šifrantu četrte stopnje.

Preglednica 5: Prispevne površine povodja Ložnice

Šifra	R3	R4
166	Ložnica	
1661		Grušoveljska Ložnica
1662		Hotunjščica
1663		Medloška Ložnica
1664		Pirešica
1665		Sevčniška Ložnica
1666		Trnava
1667		Zaloška Ložnica
1668		Koprivnica



Slika 12: Podporečja vodotoka Ložnica

2.2.2 Hidrologija

V Ložnico se zbirajo vode s severozahodnega dela okolice Celja in se na Špici izlivajo v Savinjo. Osnove urejanja njenega območja segajo v leto 1963, ko so bile prvič pripravljene resne protipoplavne rešitve, ki so se v naslednjih letih tudi začela izvajati. V letu 1998 je PUV izvedel študijo, iz katere je razvidno prevajanje visokih vod z le 20-letno povratno dobo, kasneje, leta 2005, pa so bile v Hidrosvetu izdelane naknadne študije poplavne varnosti.

Računski pretoki Ložnice so bili nazadnje popravljene po katastrofalni poplavi leta 1998. Popravljeni vrednosti so precej manjše od prvotno določenih vrednosti v hidrološki študiji leta 1994, ki jo je opravil VGI, zapisane pa so v preglednici 6.

Preglednica 6: Pretoki Ložnice pred sotočjem s Koprivnico (Hidrosvet, 2005)

Povratna doba	Q ₁₀₀	Q ₂₀	Q ₁₀	Q ₅
Pretoki [m ³ /s]	116	78	65	55

2.2.3 Opis pomembnejših delov odseka Ložnice

Točki na odseku Ložnice, ki je kasneje uporabljen v hidravličnem modelu, in sta za nas najpomembnejši, sta sotočje med Savinjo in Ložnico in sotočje med Ložnico in Koprivnico. Predstavljata namreč stični točki v povezanem sistemu obravnavanih rek (sliki 13 in 14).



Slika 13: Sotočje Ložnice in Savinje
(Lesjak, 2008)



Slika 14: Sotočje Ložnice in Koprivnice
(Lesjak, 2008)

2.3 Porečje Sušnice

2.3.1 Umestitev v prostor

Potok Sušnica izvira na obronkih južnega Pohorja, približno 10 kilometrov od sotočja s Koprivnico. Na začetku zelo strm vodotok s padcem 2,1‰ se umiri približno 2 km pred sotočjem s Koprivnico, ko doseže povprečen padec 1,3‰. Površina povodja znaša 20,2 km². Na začetku teče po zelo ozki strmi grapi, pri sotočju s potokom Podsevčnico pa se razširi in takšna nadaljuje pot proti Koprivnici. Ob vodotoku ni strnjenih naselij temveč zgolj občasne stanovanjske gradnje, prevladuje pa kmetijska raba površin.

2.3.2 Hidrologija

Že v sedemdesetih letih prejšnjega stoletja, so se pod okriljem podjetja Nivo na povodju pod avtocestnim odsekom Hoče-Arja vas opravljala regulacijska dela (1972), pri katerih so se izvedli visokovodni nasipi. Po regulacijah na pretok 39 m³/s, je bila hkrati predvidena izgradnja akumulacijske pregrade na vodotoku v kraju Šmartno, kar pa na žalost ni bilo izvedeno. Po najnovejših podatkih (Hidrosvet, 2005), znaša ocenjeni 100 letni pretok 43 m³/s, vrednosti ostalih pa so določene v preglednici 7.

Preglednica 7: Pretoki Sušnice pri izlivu v Koprivnico (Hidrosvet, 2005)

Povratna doba	Q ₁₀₀	Q ₂₅
Pretoki [m ³ /s]	43	30

3 VISOKE VODE

3.1 Splošno

Visoke vode so naraven, dinamičen pojav, ki v povezavi z nekaterimi drugimi geološkimi procesi igrajo pomembno vlogo pri preoblikovanju zemeljskega površja (Brilly, Mikoš, Šraj, 1999).

V Sloveniji in po svetu so statistično gledano poplave najštevilčnejše naravne nesreče, ki letno prizadenejo največ ljudi ter povzročajo ogromno gmotno škodo. Njihova pogostost vsako leto še narašča, kar je v glavnem posledica hidrometeoroloških sprememb ozračja ter vedno večje koncentracije in s tem izpostavljenosti ljudi na poplavno ogroženih območjih. Za območje Evrope lahko vzroke za poplave iščemo v dveh skupinah meteoroloških dogodkov. V prvi vrsti so to frontalne padavine, pri katerih je značilno povečanje pretokov velikih rečnih sistemov, ki praviloma trajajo več dni, v drugi vrsti pa lokalno razpršene padavine velikih intenzivnosti. V povezavi z majhnimi do srednje velikimi porečji z velikimi padci ponavadi vodijo do hudourniških poplav, kjer največji pretoki praviloma trajajo krajši čas. K slednjim, z izjemo območja Drave in Mure, sodijo tudi slovenski vodotoki (Kobold, 2005).

Med drugim lahko visoke vode povzroči tudi zelo visoka morska plima, ki hitro poplavi obalna področja. Iz vsega tega lahko torej ugotovimo, da se v slovenskem prostoru pojavljajo hudourniške, rečne, nižinske, kraške ter morske poplave. Sam hidrološki postopek oblikovanja površinskega odtoka in drugih dejavnikov, ki vplivajo na visoke vode je precej zapleten in je podrobneje opisan v poglavju 4 – *Hidrološki model*. Vseeno pa velja omeniti, da je v slovenskih razmerah za površinski odtok poleg padavin bistvenega pomena predhodna vlažnost zemljine (Brilly, Mikoš, Šraj, 1999).

Zakon o vodah v 86. členu definira poplavno območje kot vodno, priobalno in drugo zemljišče, kjer se voda zaradi naravnih dejavnikov občasno prelije izven vodnega zemljišča. Ta območja so sestaven del vodotokov in vodnega ekosistema ter imajo pomemben vpliv tako na vodni režim, kot na biotsko raznolikost vodnih rastlin in živali. Namenska poplavna območja imajo pomemben vpliv na zmanjševanje konic poplavnih valov kakor tudi na bogatnje podtalnice. V Sloveniji je po grobih ocenah za okoli 300 000 hektarjev takšnih

zemljišč, kar predstavlja okoli 15% celotnega slovenskega ozemlja. Največji del (54%) odpade na povodje Save, malce manj (43%) na povodje Drave, ostanek (4%) pa na povodje Soče (www.zrc-sazu.si).

Poplavno območje z največjo površino leži na ljubljanskem barju, kjer večjih človeških posegov v vodno območje ni zaznati. Večja poplavna območja so sicer na ravninskih in nižinskih predelih severovzhodne Slovenije, območja ob Ledavi, Muri, Ščavnici in Dravi s pritoki. Na Dolenjskem se poplavni predeli pojavljajo ob reki Krki, Kolpi, Temenici in Mirni, v severni Sloveniji pa v ozkih predalpskih dolinah in kotlinah (slika 15) (www.sos112.si).



Slika 15: Poplavna območja na ozemlju Republike Slovenije (www.sos112.si)

Z namenom zmanjševanja tistih negativnih posledic visokih vod, ki se jih z opozorili da omiliti, se iz leta v leto izboljšujejo hidrološki modeli, s pomočjo katerih poskušamo napovedati bistvene hidrološke spremenljivke. Maksimalne pretoke, višino poplavnih valov ter čas nastanka je seveda težko napovedati, saj topografija terena, pedološke razmere ter močni orografski vplivi tvorijo izredno pester naravni sistem s pestrimi hidrološkimi pojavi. V vsakem pogledu pa je popolno varnost pred visokimi vodami nemogoče doseči. Poskušamo lahko le čimbolj omejiti škodo ter preprečiti človeške žrtve (Kobold, 2005).

3.2 Visoke vode na Koprivnici

V skladu s splošnim poplavnim stanjem Celjske kotline, so se tekom let tudi na povodju Koprivnice pojavljale številne poplave. V zadnjem obdobju velja, poleg lanskoletne poplave, omeniti predvsem dve veliki poplavi, ki sta se dogodili 1.novembra 1990 in 4.septembra 1998, ko je bilo poplavljen tudi veliko območij v samem mestnem jedru Celja.

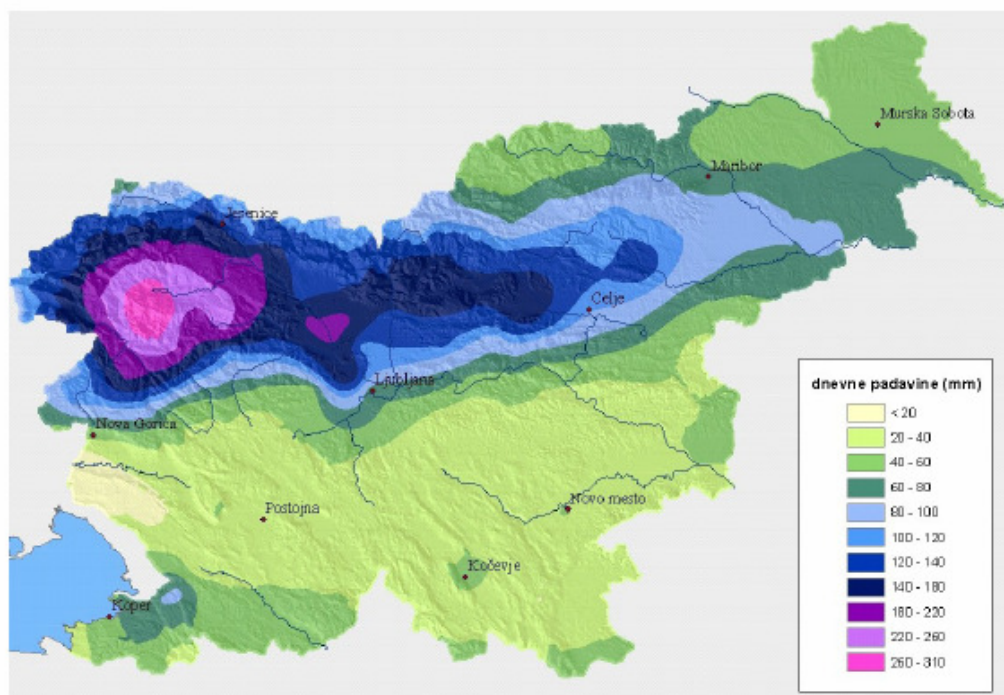
V obeh primerih je prišlo do poplavitve obširnih območij ob vodotoku. Na območju od avtocestnega odseka Hoče-Arja vas do sotočja s Sušnico so bila takrat poplavljena le območja na desnem obrežnem pasu Koprivnice, gorvodno avtoceste tudi na levem obrežnem pasu, za razliko od leta 2007, ko so bila vzdolž celotne trase poplavljena tudi določena območja na levem obrežnem pasu. Primerjava zabeleženih kot visokih voda na določenih objektih kaže, da je bil vodostaj leta 2007 v povprečju precej višji (do 30 cm), kar nas vodi do zaključka, da je bila poplava leta 2007, na območju Koprivnice, najhujša v novejši zgodovini Celja.

3.3 Visokovodni dogodek 18. in 19.9.2007

V torek, 18. septembra 2007, so močne in izdatne padavine zajele območje zahodne, severozahodne in severne Slovenije, ter se pomikale proti vzhodnemu delu države. Povzročile so hiter porast pretokov rek, kar je zlasti na določenih odsekih vodilo do pravega razdejanja.

Najhujše razmere so bile na območju Škofjeloškega in Cerkljanskega hribovja, Baške grape ter Davče, kjer so vodotoki Selška Sora, Davča in Kroparica za sabo pustili pravo opustošenje. Močne poplave so bile tudi drugod po Sloveniji: na območju Karavank ter Kamniško-Savinjskih Alp, kranjskem in domžalskem polju, Tuhinjski dolini, širšem celjskem območju, v srednjem in spodnjem toku Savinje in Dravinje, ...

Kot je značilno za takšne hidrološke situacije, se je po Sloveniji sprožilo tudi veliko število zemeljskih plazov, kar je še povečalo že tako veliko materialno škodo. Po umiritvi razmer je bilo ugotovljeno, da je naravna ujma zahtevala 6 človeških življenj.



Slika 16: Dnevna količina padavin od 8. ure 18. septembra 2007 do 8. ure 19. septembra 2007 (ARSO, 2007)

Po analizi razmer je bilo ugotovljeno, da se je nad severno Evropo zadrževalo območje nizkega zračnega pritiska. Alpam se je preko severozahoda približevala hladna fronta, hkrati se je proti vzhodu pomikala višinska dolina s hladnim zrakom. Glavni vzroki za nastale padavinske razmere so torej najverjetneje bili:

- razgibanost terena,
- stalen dotok vlažnega zraka z jugozahoda,
- močna nestabilnost ozračja,
- striženje vetra v plasti do višine 6 km od tal.

Interakcije posameznih vplivov so se začele kazati s pojavljanjem močnih konvektivnih sistemov in s tem močnih neviht z začetkom med 5. in 7. uro zjutraj. Tekom dneva so se nato po celi Sloveniji proti vzhodu pomikale nevihtne celice, vse dokler niso padavine med 2. in 3. uro naslednjega dne povsod popolnoma prenehale. Za opazovani dogodek je bila, po podatkih meteoroloških postaj ARSO (2008), krajevna razporeditev padavin precej različna, z vrhom med 200 in 300 mm na območju Bohinja ter Cerkljanskem in Škofjeloškem hribovju.

Zanimiva je tudi ugotovitev, da je večina padavin padla v intervalih od 6 do 12 ur, s čimer so bile ponekod, na nekaterih meteoroloških postajah, dosežene tudi najvišje povratne dobe in s tem rekordne vrednosti padavin (Davča – povratna doba nad 250 let,...)

Na širšem celjskem področju, so se padavine pričele med 10. in 11. uro dopoldan ter pnehale med 22. in 23. uro ponoči. Na tem področju trenutno obratujeta dve padavinski postaji. Po podatkih ARSO (2007), je na postaji Celje – Levec v 24 urah padlo 105,4 mm padavin, kar ustreza povratni dobi 20 let, na padavinski postaji Vojnik, pa so bile padavine bistveno večje in sicer kar 150 mm. Podrobnejši pogled na histogram padavin razkrije, da je v polovico krajšem času, torej 12 urah, na postaji Celje padlo 104,3 mm padavin, kar pa že predstavlja povratno dobo 100 let. Podoben razpored najverjetneje velja tudi za padavinsko postajo Vojnik, a podatkov za krajše časovne intervale žal ni bilo mogoče pridobiti, saj ta postaja za razliko od padavinske postaje Celje – Levec, ni opremljena z ombrografom.

Visoke vode Savinje so v Celju in njegovi bližnji okolici dosegle najvišjo vrednost v noči na sredo 19.09. Takrat so dosegle robove nasipov in jih začele tudi mestoma prelivati. Poplavljeni so bili nižinski predeli med naseljem Lava in črpališčem pitne vode v Medlogu, predel okoli medloške betonarne, predel pred športnim objektom na Špici ter seveda mestni park. Voda je preplavila tudi objekte v naseljih Zagrad ter Polule, locirane na levi in desni brežini Savinje pod mostom do Polul. Razveseljivo je dejstvo, da samo središče mesta ni bilo poplavljeno, za kar gre v veliki meri zahvala sistemu črpališč zgrajenih prav v ta namen ter seveda dejstvu da se je kota visoke vode ustavila točno na temenu visokovodnega nasipa (ARSO, 2007).

3.3.1 Koprivnica pod pregrado Loče

Sam vremenski dogodek se je odvijal praktično enako kot po vsej celjski kotlini. Gladina Koprivnice se je tekom dneva nenehno zviševala, ter dosegla višek v večernih urah 18.09.2007.

Visoke vode so najprej prelile nižan nasip pri prelivnem območju dolvodno gostišča Ljubica in zalile razlivno področje. Ob naraščajočem pretoku so se pod vodo znašle še marsikatero kmetijske površine, vse dokler ni Koprivnica na določenih mestih prestopila bregov

visokovodnih nasipov. Leve brežine so bile prelite na daljšem odseku pri leseni brvi ob Valvasorjevi ulici, kjer je voda preplavila večinoma ceste in zunanje ureditve, v manjši meri tudi objekte, ter pri mostu dolvodno Lidla, kjer je zalila kmetijske površine. Kote teh visokih voda so označene na objektih Valvasorjeva 60a ter Valjavčeva 6. Preliti so bili tudi desni bregovi, na območju lesene brvi in med mostovoma na obvoznici in dolvodno Lidla, pri hišni številki Koprivnica 49, v dolžini okoli 30 metrov. Te vode so poplavile novo naselje Ostrožno, ter naselje med staro in novo cesto med mostovoma pri Ljubici in na obvoznici. Voda je segala vse do ulice Alme Karlin, najvišja pa je bila med ulicama Ob Koprivnici in Cvetlično ulico. Po podatkih Krajevne skupnosti Ostrožno (2007), je znašala višina vode na poplavnem območju med 90 in 120 cm. Gorvodno od mostu dolvodno Lidla in mostu pri Cerkvi svetega duha vodotok ni poplavljal (ARSO, 2007).

4 HIDROLOŠKI MODEL POVODJA KOPRIVNICE

4.1 Hidrološki modeli – splošno

Hidrološke modele v splošnem uporabljamo za modeliranje kompleksnih naravnih hidroloških sistemov ali njihovih komponent, v katerih se prepletajo fizikalni, kemijski in biološki procesi. Pri tem se v največji meri poslužujemo množice matematičnih in logičnih izrazov – torej matematičnih modelov, s katerimi natančno določimo potrebne spremenljivke in parametre, ki tvorijo te sisteme. Laično povedano to pomeni, da z njimi lahko ocenimo odtok z določenega povodja pri podanih padavinskih podatkih in znanih povezavah med njima.

V splošnem lahko matematične modele delimo na deterministične, stohastične, konceptualne in empirične, vendar je v praksi meje med njimi težko določiti. Ti modeli se nadalje ločijo še na osnovi dimenzij spremenljivk – torej na eno, dvo in tri dimenzijske. V konceptualnih modelih, so matematični in logični izrazi določeni na podlagi naravnih fizikalnih in kemijskih zakonitosti. To nam omogoča, da se na spremembe zunanjega sistema odzovemo s spreminjanjem ustreznih parametrov matematičnega modela. Na ta način ugotavljamo vpliv sprememb parametrov na izhodne podatke, kar je v večini primerov tudi naš cilj. Nasprotno velja za empiričnega, saj tu za dane izraze nimamo jasne naravne podlage, ampak jih razvijemo na podlagi izkustva. Za determinističen model je značilno, da ne vsebuje slučajnih spremenljivk, kar pomeni da nam model ob enakih začetnih podatkih vrne vedno enak rezultat. To za stohastičnega ne moremo trditi, saj tu slučajne spremenljivke vedno poskrbijo za drugačen rezultat (Brilly, Šraj, 2005).

Hidrološke spremenljivke, padavine so seveda najpomembnejše, v splošnem pridobimo z merjenjem v naravi. Osnovni vhodni podatek nam predstavlja histogram padavin, s katerim grafično prikažemo intenziteto izmerjenih padavin v določenih časovnih korakih. Merimo jih s pomočjo različnih merskih instrumentov: ombrometrov, ombrografov, totalizatorjev ter vremenskih radarjev, kjer se lahko podatki zajemajo bodisi ročno bodisi avtomatsko. Najbolj pogosti problemi, ki pri tem nastanejo, so premajhna časovna doba opazovanj, nezadostno število merskih točk in sistematične napake. Vzorci s takšnimi napakami namreč niso reprezentativni, kar bi že v osnovi precej zmanjšalo zanesljivost rezultatov. V izogib prekratki

dobi opazovanj pogosto uporabljamo statistične metode in metodo korelacije, s katerimi iz manjšega vzorca proizvedemo večjega z enakimi statističnimi vrednostmi, sistematične napake pa poskušamo zmanjšati z enačbami za korigiranje padavin. Natančnost izmerjenih padavin lahko tako ocenimo na $\pm 10\%$.

Površinski odtok je del hidrološkega kroga, ki pomembno vpliva na vodni režim. Sam proces odtoka se prične s pričetkom padavin, tvori pa ga tisti del padavin, ki ne izhlapi nazaj v ozračje ali se zadrži v rastlinski odeji in lokalnih depresijah na površini. Imenujemo jih efektivne (neto) padavine. Ta del padavin odteče bodisi površinsko bodisi podpovršinsko proti najnižji točki prispevnega območja določenega vodotoka. S pojmom podpovršinski odtok označujemo del padavin, ki se infiltrira v tla in pod površino zemeljskega površja odteka v mrežo vodotokov. K celotnemu odtoku s povodja svoje prispevata tudi tok podtalnice ter padavine, ki padejo direktno na vodno gladino vodotoka. Padavine, ki nimajo direktnega vpliva na površinski odtok in jih imenujemo prestrežene padavine, predstavljajo precejšen izziv, saj ob nepravilni izbiri računske metode lahko precej zmanjšajo natančnost izračuna.

V končni fazi, ko imamo vse potrebne podatke ter določimo shemo hidrološkega modela, ga moramo ustrezno umeriti. Najlažje to storimo s preračunom predhodno preverjenih podatkov in rezultatov, kjer tako dolgo usklajujemo vhodne parametre, dokler napaka pri računu ne doseže še sprejemljive vrednosti (Brilly, Šraj, 2005).

Hidrogram, to je diagram časovnih sprememb pretoka v vodotoku, predstavlja izhodni parameter hidrološkega modela. Najpogosteje nam predstavlja podlago za nadaljnje hidravlične preračune, predvsem ob primerjavi s histogramom pa nam omogoča tudi grafični pregled nad določenimi parametri kot so čas zakasnitve in čas koncentracije povodja, deleže posameznih odtokov, začetne in končne točke trajanja baznega in površinskega odtoka in podobno (Brilly, Šraj, 2005).

4.2 Računalniški program HEC-HMS 3.2.0

Program je produkt Hidrološkega inženirskega centra (HEC), ki je sestavni del inženirske enote ameriške vojske in je v osnovi namenjen modeliranju padavinskega odtoka s povodij, kjer nam kot izhodni podatek poda izračunane hidrograme. Uporaben je tudi za vrsto drugih operacij, kot so: določevanje vodnih zalog, določevanje vplivov na odtok voda, regulacijo poplavnih območij, modeliranje zadrževalnih objektov, analize rabe tal (urbanizacija, pedogeološke posebnosti) na odtok voda,...

Obravnavani problem modeliramo z grafičnim uporabniškim vmesnikom, kjer z uporabo ikon določimo postavitev ter potek celotnega sistema. Po določitvi pozicij, jih med seboj le še povežemo ter poženemo izračun.

Za izračun zelenih količin izbranega povodja, je najprej potrebno v program vnesti zahtevane podatke, ki jih lahko razdelimo na več glavnih sekcij. V sekciji povodja je potrebno podati topološke in hidrografske lastnosti, sekcija meteoroloških razmer zahteva padavinske podatke, v sekciji kontrola pa določimo čas simulacije in določene medsebojne povezave. Dodatne medsebojne povezave definiramo še s pomočjo sekcije za časovne, primerjalne in mrežne podatke, ki skrbijo za nemoten potek računa.

V diplomski nalogi bomo uporabili najnovejšo prosto dosegljivo različico HEC-HMS 3.2.0. Sam program je zaradi preprostosti uporabe, dostopnosti (program je brezplačen) ter zanesljivosti, med najbolj priljubljenimi programi za izvajanje hidroloških analiz. Uporabniški vmesnik je namreč dovolj intuitiven ter grafično dodelan, da povprečnemu uporabniku ne povzroča prevelikih težav. Navsezadnje je na voljo tudi obsežna knjižica s pomočjo, kjer so podrobno opisane praktično vse možnosti, ki jih program ponuja. (HEC).

4.3 Računske metode

Za račun padavinskih izgub, transformacije padavin v hidrogram površinskega odtoka in propagacijo valov vzdolž struge, se je razvilo veliko empiričnih in semiempiričnih metod. Njihova uporabnost je odvisna od mnogih dejavnikov, zato so pogosto najbolj uporabne za točno določeno zvrst oziroma pokrovnost tal, na podlagi katere so bile razvite.

Najpomembnejše metode za izračun padavinskih izgub, ki so povzročene z infiltracijo padavin so:

- Začetne in konstantne izgube,
- Metoda SCS ,
- Holtanova metoda,
- Green – Amptova metoda,
- metoda eksponentno razporejenih izgub.

Temu sledijo glavne metode za transformacijo neto padavin v hidrogram površinskega odtoka, ki so:

- Metoda Clark,
- Metoda Snyder,
- Metoda SCS.

Ter nazadnje metode za simuliranje propagacije valov vzdolž vodotokov, ki so:

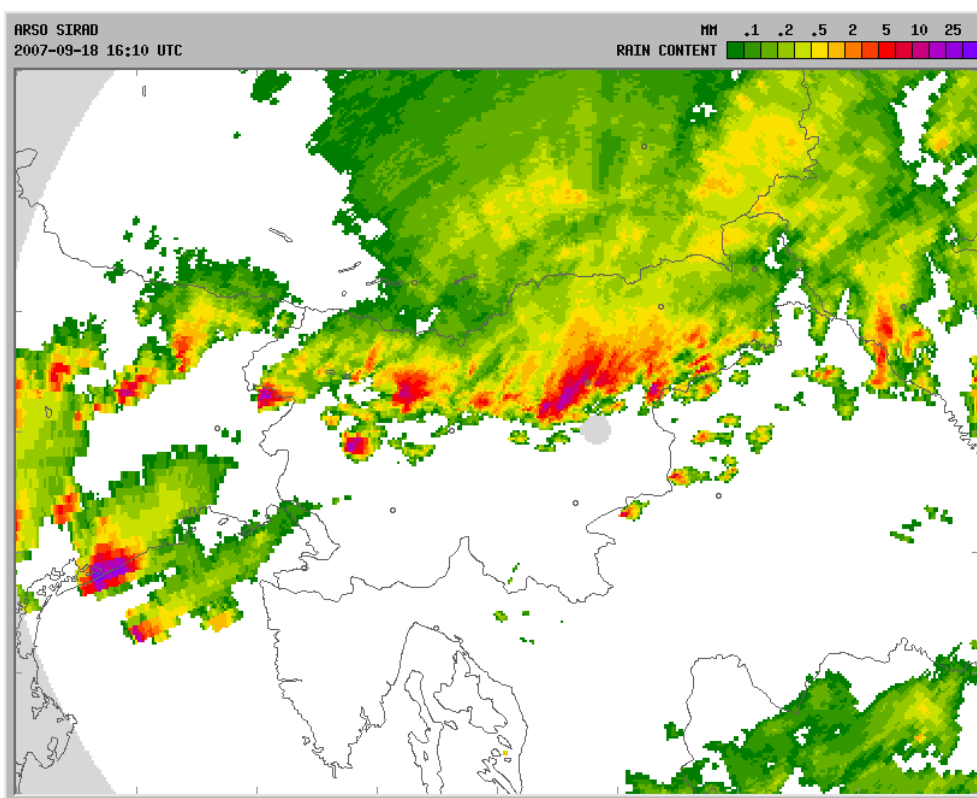
- Metoda Muskingum,
- Metoda Muskingum-Cunge,
- Metoda kinematičnega vala.

4.4 Vhodni podatki

4.4.1 Padavine

Ker so padavine eden ključnih parametrov hidrološkega modela, jih je potrebno skrbno določiti. Pri nas se bomo tega zaradi posrednih padavinskih podatkov lotili nekoliko drugače.

ARSO (2008) nam je posredovala padavinske podatke za postaji Celje in Vojnik, ki so obsegali 5-minutne intenzitete padavin za prvo in 24-urne padavine za drugo postajo, ter radarske slike meteorološkega radarja na Lisci, iz katerih je razvidno potovanje nevihtnih celic in intenziteta padavin v celicah dimenzij 1km^2 (slika 17). Radarske slike so bile beležene vsakih 15 minut, iz njih pa je razvidno, da se intenziteta padavin na povodju Koprivnice povečuje iz zahoda proti vzhodu. Iz tega podatka lahko sklepamo, da se kumulativna količina padavin nahaja med vrednostima padavinske postaje Celje na zahodni strani in Vojnik na vzhodni strani, ki znašata 105,4 in 150mm.



Slika 17: Radarska slika padavin 18.9.2007 ob 16:10 (ARSO, 2007)

Naša predvidevanja lahko dodatno podkrepimo z ugotovitvami Burje (2008), ki ugotavlja da je na vodozbirnem območju do pregrade Loče, tega dne padlo od 140 do 150 mm padavin. Za območje dolvodno pregrade Loče, bomo torej zaradi neenakomerne prostorske intenzitete padavin privzeli dnevno vrednost padavin 140 mm. Povratna doba padavin, ki ustreza tem vrednostim, presega 100 let pri trajanju padavin 24 ur, za polovico krajši čas, torej 12 ur, pa znaša povratna doba 1000 let (Burja, 2008).

Za merodajno razporeditev padavin predpostavimo razporeditev padavinske postaje Celje, potrebno jih je le še ustrezno uskladiti, da bosta količina in časovni vzorec razporeditve ustrezala privzetemu izhodišču. To dosežemo s principom proporcionalnosti, kjer vsakemu merjenemu intervalu pripišemo določeno procentualno vrednost glede na skupno vrednost vsote intervalov (enačba (1.)).

$$\alpha_j(t) = \frac{\alpha_i(t) \cdot \sum_1^t \alpha_j(t)}{\sum_1^t \alpha_i(t)} ; t \in C \quad (1.)$$

kjer je:

$\alpha_j(t)$ - proporcionalna količina padavin izmerjena v času t

$\alpha_i(t)$ - dejanska količina padavin izmerjena v času t

$\sum_1^t \alpha_j(t)$ - vsota proporcionalno določenih padavin

$\sum_1^t \alpha_i(t)$ - vsota dejanskih padavin

Padavinski podatki v obliki histograma so s tem postopkom pripravljene za uporabo v hidrološkem modelu, grafični in tabelarni zapis pa je razviden iz priloge B. Začetek računskega intervala smo uskladili z začetkom padavin in ga podaljšali do sredine naslednjega dne, saj se povodje izceja še precej dolgo po prenehanju padavin.

4.4.2 SCS metoda padavinskih izgub

The Soil Conservation Service (SCS) metodo za računanje padavinskih izgub, je na osnovi poskusov izdelala Agencija ameriškega ministrstva za kmetijstvo in po izsledkih raziskav daje najboljše rezultate na majhnih, nizko do srednje poseljenih območjih. Čeprav so za določitev padavinskih izgub na voljo tudi številne druge metode, nam z avtorjevo parametričnih omejitev (velikost in padeč povodja, raba tal,...) najbolj ustreza prav metoda SCS.

Osnovni parameter predstavlja koeficient CN, s katerim na obravnavanem območju določimo lastnosti zemljin na podlagi vpliva pedologije, predhodne vlažnosti tal in njihove rabe. Vrednosti, ki jih razdelimo v štiri razrede (preglednica 8), se gibljejo med 30 (prepustne zemljine visokih infiltracijskih sposobnosti) in 100 (vodna telesa), ocenimo pa jih s pomočjo tabel ali SCS krivulj.

Preglednica 8: Stopnja infiltracijskih izgub v odvisnosti od vrste zemljine

Razred zemljine	Odočni potencial	Izgube [mm/h]
A	Nizek	7,5 - 11,5
B	Povprečni do nizek	3,85 - 7,5
C	Visok do zmeren	1,3 - 3,85
D	Visok	0,0 – 1,3

Na povodjih kjer raba tal ni enotna in se na njih izmenjuje več vrst rastlin, je za hidrološki model potrebno določiti enoten CN. Izračunamo ga s pomočjo enačbe (2.).

$$CN_{skupen} = \frac{\sum A_i \cdot CN_i}{\sum A_i} ; i \in C \quad (2.)$$

kjer pomeni:

A_i - površina pripadajočega podpovodja

CN_i - CN posamezenega dela podpovodja

CN_{skupen} - skupni faktor CN za izračun odтока

Izračunani parameter nam v nadaljevanju služi pri določitvi maksimalnega zadrževanja S , ki ga opišemo kot mero povodja za sposobnost zadrževanja in odvzemanja padavin. Parametra med sabo povezuje enačba 3.

$$S = \frac{25400 - 254 \cdot CN}{CN} \quad (3.)$$

V tej točki, nam neznanko predstavljajo le še začetne izgube padavin z oznako I_a . Ta koeficient opisuje izgube padavin, na površini povodja, pred infiltracijo vode v zemljino, zveza s parametrom S , pa je določena izključno eksperimentalno (enačba 4.).

$$I_a = 0,2 \cdot S \quad (4.)$$

Vse do sedaj izračunane parametre v končni fazi uporabimo za določitev akumuliranih efektivnih padavin (P_e), ki predstavljajo padavine, ki aktivno sodelujejo pri ustvarjanju površinskega odtoka. Za njihovo določitev uporabljamo enačbo 5. (Brilly, Šraj, 2005).

$$P_e = \frac{(P - 0,2 \cdot S)^2}{P - I_a + S} \quad (5.)$$

kjer pomeni:

P_e – akumulirane efektivne padavine

P – višina padavin

I_a – začetne izgube

S – maksimalno zadrževanje

4.4.3 SCS metoda – določanje časa zakasnitve

Čas zakasnitve, to je čas od težišča histograma efektivnih padavin do vrha hidrograma, predstavlja parameter SCS hidrograma. V osnovi je postopek izračuna enak kot pri metodi Snyder, vendar je mogoče čas zakasnitve določiti tudi po enačbi določeni prav za SCS metodo (Brilly, Šraj, 2003). Zaradi večje prilagodljivosti enačbe in s tem večje natančnosti pri izračunu, bomo le tega opravili po metodi Snyder (enačba 6). Koeficienta C_t in C_p je v tem primeru potrebno določiti empirično, saj sama po sebi nimata fizikalne podlage.

$$T_p = 0,7516 \cdot C_t (L \cdot L_c)^{0,3} \quad (6.)$$

kjer pomeni:

T_p - čas zakasnitve [h]

C_t - koeficient povodja [1,8 – 2,2]

L - dolžina glavnega toka od iztočnega profila do razvodnice (km)

L_c - dolžina glavnega toka od iztočnega profila do prereza na vodotoku, ki je najbližje centroidu povodja [km]

4.4.4 Propagacija valov – metoda zakasnitve

S pojmom propagacija valov, označujemo potovanje toka po strugi vodotoka. V hidroloških modelih uporabljamo enostavnejše metode kot v hidravličnih modelih, saj nas v splošnem

zanimajo le spremembe na vtočnem in iztočnem profilu obravnavanega odseka ne pa tudi podrobne informacije v posameznih prečnih prerezih. Postopki za izračun iztočnih hidrogramov temeljijo na poenostavljenih St. Venantovih enačbah, ki jih skupaj tvorita momentna in kontinuitetna enačba, kjer za robni pogoj uporabimo vtočni hidrogram.

Najenostavnejša metoda propagacije valov je metoda zakasnitve. Pri njej predpostavimo, da je iztočni hidrogram enak vtočnemu, a z določeno časovno zakasnitvijo. Prav tako velja, da se pretok in oblika hidrograma med potovanjem po izbranem odseku ne zmanjšata oziroma spremenita. Zakasnitev najlaže določimo z opazovanjem merjenjih hidrogramov, kjer jo ocenimo kot čas med centroidoma površin obeh hidrogramov oziroma njunih vrhov.

4.4.5 Prispevna področja

4.4.5.1 Splošno

Čeprav v praksi pogosto stremimo k poenostavitvam inženirskih problemov, se nekje pojavlja meja do koder je to početje smiselno. Prispevno območje obravnavanega odseka bomo torej poskušali opisati čim bolj točno a vendar na najenostavnejši način.

Ker nas med drugim zanimajo količinski doprinosi določenih delov povodja k vhodnemu hidrogramu, bomo celoten sistem zastavili kot kumulativni seštevek treh elementov, kateri izstopajo že na prvi pogled. Prvi element, akumulacija Šmartinsko jezero, predstavlja stalen vir pretoka, ki zadostuje vsaj potrebam ekološkega minimuma in se določa ročno na sami pregradi. Drugi element, del avtocestnega odseka Hoče-Arja vas, je prek zadrževalnika priključen neposredno v sam vodotok, poleg tega pa nam ostane kot tretji element še vsa ostala prispevna površina, ki je sestavljena iz različnih vrst pokrovnosti tal in je po tlorisni površini največja. Hidrogram Sušnice bomo določili posebej, saj v celoten sistem vstopa kasneje.

V nadaljevanju bodo opisane tehnične podrobnosti in podatki za posamezne prispevne površine, preračun kumulativnih padavin za obravnavani padavinski dogodek ter izrednotenje rezultatov tako za posamezne elemente kot za celotno povodje, kjer ti elementi nastopajo združeni v enoten hidrogram odtoka.

4.4.5.2 Akumulacija Šmartinsko jezero

Šmartinsko jezero je umetni večnamenski zadrževalnik padavin s povodja Koprivnice, dokončan leta 1970 po načrtih narejenih leta 1960. Prvotno je bil predviden za zadrževanje visokih voda Koprivnice, akumuliranje padavinske vode za takratne potrebe celjske industrije (Cinkarna, EMO, Železarna Štore,...), rekreacijske namene, ribištvo in turizem. Pregrada je klasičnega nasutega tipa, zgrajena iz 3 vrst materialov, katere višina sega 15 metrov nad teren v skupni dolžini 205,00 metrov. Kota maksimalne gladine vode je na 266,50 m.n.v, kota krone pregrade pa en meter više, torej 267,50 m.n.v. V takem stanju bi se v zadrževalniku nahajalo 6,5 milijonov m³ vode. V normalnem obratovalnem stanju, se v akumulaciji voda zadržuje na koti 264,50 m.n.v., kar v volumenskem smislu predstavlja 4,4 milijone m³ vode, ki se razteza na površini 102,40 ha.

Za odvod visoke vode skrbita talni izpust z odvzemnim cevovodom premera 1000 mm in bočni preliv dolžine 40,0 + 6 m z izpustom v podslapje ter naprej v vodotok Koprivnica, ki se upravljata ročno. Pri maksimalni koti vodne gladine lahko pretok skozi talni izpust doseže 7 m³/s, čez preliv pa bi lahko odteklo tudi do 75 m³/s.

Glede na zapisnik operativnega oddelka Nivo Celje (21.09.2007), je bila gladina vode v akumulaciji pred nastopom visokih voda na koti okoli 263,70 m.n.v., talni izpust pa je bil 5% odprt. Zaradi napovedi obilnih padavin so talni izpust, v skladu z navodili upravljanja pregrade, ob 15:00 priprli na biološki minimum, ki znaša do 60 l/s. Ob 17:20 so talni izpust popolnoma zaprli, zaprte pa so bile tudi zapornice na prelivnem kanalu. Voda v akumulaciji se je, zaradi zaprtih iztokov v času visokih voda, dvignila za 1,31 m.

Za določitev hidrograma iztoka do 15:00 ure, bomo uporabili krivuljo vsebine in površine jezera, iz katere lahko za poljubno koto vode določimo pretok skozi talni izpust, če je le ta 100% odprt. Za koto 263,82 m.n.v., kolikor je znašala ob 15:00 uri, ta odčitana vrednost znaša 3,6 m³/s. Vrednosti talnega izpusta do 15:00 ure bomo kljub postopnemu zviševanju gladine in posledično spremenjenemu pretoku, zaradi zanemarljive razlike, upoštevali kot konstantno, maksimalno vrednost. Časovna razporeditev pretokov je razvidna iz preglednice 9 (Nivo d.d., 2004).

Preglednica 9: Časovna razporeditev pretokov iz pregrade Loče na dan 18.09.2007

Pregrada Loče			
Čas [hh:mm]	Kota vode [m.n.v.]	Odprtost ventila	Iztok [m ³ /s]
__:__ do 13:00	263,71	5%	0,18
13::00 do 17:20	263,82	Biol. min.	0,022 – 0,06
17:20 do __:__	264,14	0%	0

4.4.5.3 Avtocestni odsek Hoče – Arja vas

Odvodnjavanje padavinskih voda iz avtocestnih območij je v splošnem urejeno s sistemom zadrževalnih bazenov, ki to vodo zadržijo in hkrati služijo kot lovilec olj ter usedalnik trdnih delcev, preko katerih se vode izpuščajo v lokalno mrežo vodotokov.

Enaka rešitev je uporabljena tudi v našem primeru, saj se v profilu P35 v Koprivnico priključi izpust zadrževalnega bazena št. ZB BCP 40.9–5/1, v katerem se zbirajo padavinske vode avtocestnega odseka Hoče–Arja vas med stacionažama km 45,1+20 in km 45,6+40. Koeficiente CN za posamezne prispevne površine smo določili na osnovi SCS tabel, pri čemer smo zaradi utrjenosti spodnjega in zgornjega ustroja avtoceste, predpostavili največji (D) odtočni potencial. Vrednosti so zapisane v preglednici 10.

Preglednica 10: Prispevne površine avtocestnega odseka med km 45,1+20 in km 45,6+40 in koeficienti CN

Prispevna površina	F [ha]	CN
Vozni pas - asfalt	0,613	99
Ločilni pas	0,104	80
Bankina	0,057	91
Koritnica	0,070	98
Jarek	0,052	80
Nasip	0,138	80
Usek	0,931	80
Zaledne površine	0,263	81
	$\Sigma = 2,227$	CN _{skupni} = 86,3

Vhodne podatke za preračun padavinskih izgub lahko z uporabo enačb (2.), (3.) in (4.) določimo na podlagi znanega koeficienta CN_{skupni} . Zapisani so v preglednici 11.

Preglednica 11: Vhodni podatki preračuna padavinskih izgub na območju avtoceste Hoče – Arja vas

Koeficient	Vrednost
CN_{skupni}	86,3
S	40,3
Ia	8,06
Tp	28min

Zadrževalni bazen v zemeljski izvedbi je dimenzioniran na 15-minutne padavine z intenziteto 156 l/s/ha, kar predstavlja padavine z enoletno povratno dobo. Skupna dolžina znaša 76,5 metrov, bruto višina 2,5 metra, koristni volumen pa 292,3 m³. Za izpust vode imamo na voljo talni izpust na višini 0,1 metra in preliv na višini 1,37 metra. Iztok, v odvisnosti od višine vode do 0,5 metra absolutne višine, je podan v preglednici 12 (Hidrosvet, 2000).

Preglednica 12: Računski iztok iz zadrževalnika v odvisnosti od višine vode (Hidrosvet, 2000)

Višina [m]	Iztok [l/s]
0,1	1,4
0,2	1,98
0,3	2,43
0,4	2,8
0,5	3,13

4.4.5.4 Ostalo prispevno področje Koprivnice brez Sušnice

Za merodajno prispevno območje, privzamemo območje dolvodno pregrade Loče. Površino, ki odpade na avtocestne površine, v tem delu ne upoštevamo, saj smo jo preračunali v prejšnji točki.

Za določitev vrste pokrovnosti oziroma rabe tal in njihovih dimenzij, smo uporabili interaktivni naravoslovni atlas (sloj pokrovnosti tal (CLC 2006)) in TTN merila 1:5000. Osredotočili smo se na povodje dolvodno pregrade Loče, vključno do zadnjega prečnega profila (P1), ki je še spada na povodje Koprivnice. Določitev površin in koeficientov CN je razvidna iz preglednice 13, vrednosti vhodnih podatkov za preračun padavinskih izgub izračunane s pomočjo enačb (2.), (3.), (4.) in (6.), pa iz preglednice 14.

Preglednica 13: Prispevne površine Koprivnice brez Sušnice dolvodno pregrade Loče in koeficienti CN

Pokrovnost	Površina [ha]	CN
Iglasti gozd	250	73
Mešani gozd	110	70
Pašniki	100	61
Mešane kmetijske površine	200	73
Urbanizacija	60	98
	$\Sigma = 720$	$CN_{skupni} = 73$

Preglednica 14: Vhodni podatki preračuna padavinskih izgub na prispevnem območju Koprivnice

Koeficient	Vrednost
CN_{skupni}	73
S	93,9
Ia	18,8
Tp	150min

4.4.5.5 Prispevno območje Sušnice

V računu je obravnavano celotno prispevno območje Sušnice. Postopek priprave vhodnih podatkov je identičen kot v točki 4.4.5.4. *Ostalo prispevno območje Koprivnice brez Sušnice.* Površine in koeficienti CN ter vrednosti vhodnih podatkov za preračun padavinskih izgub so razvidni iz preglednic 15 in 16.

Preglednica 15: Prispevne površine Sušnice in koeficienti CN

Pokrovnost	Površina (ha)	CN
Iglasti gozd	285	73
Mešani gozd	750	70
Pašniki	200	61
Mešane kmetijske površine	600	73
Urbanizacija	15	98
	$\Sigma = 1850$	$CN_{skupni} = 70,6$

Preglednica 16: Vhodni podatki preračuna padavinskih izgub na prispevnem območju Sušnice

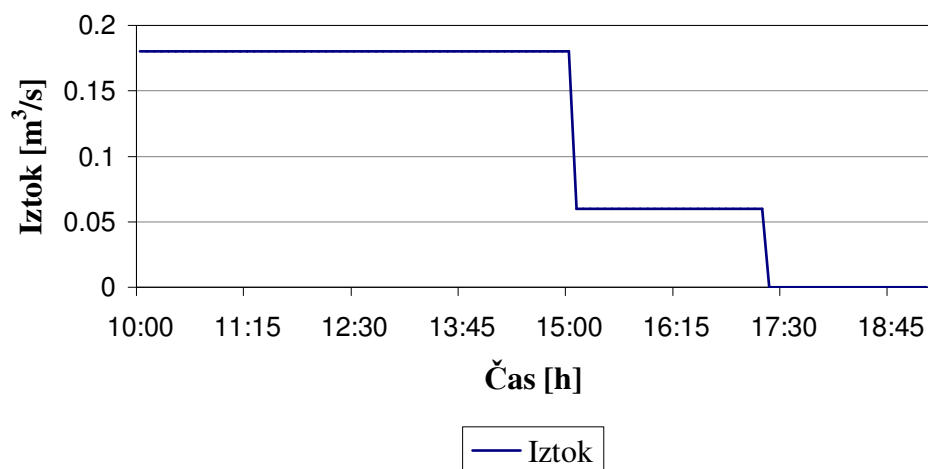
Koeficient	Vrednost
CN_{skupni}	70,6
S	105,8
Ia	21,15
Tp	210 min

4.5 Analiza rezultatov

4.5.1 Hidrogrami prispevnih področij

4.5.1.1 Iztok iz akumulacije Šmartinsko jezero

Iztok iz pregrade Loče

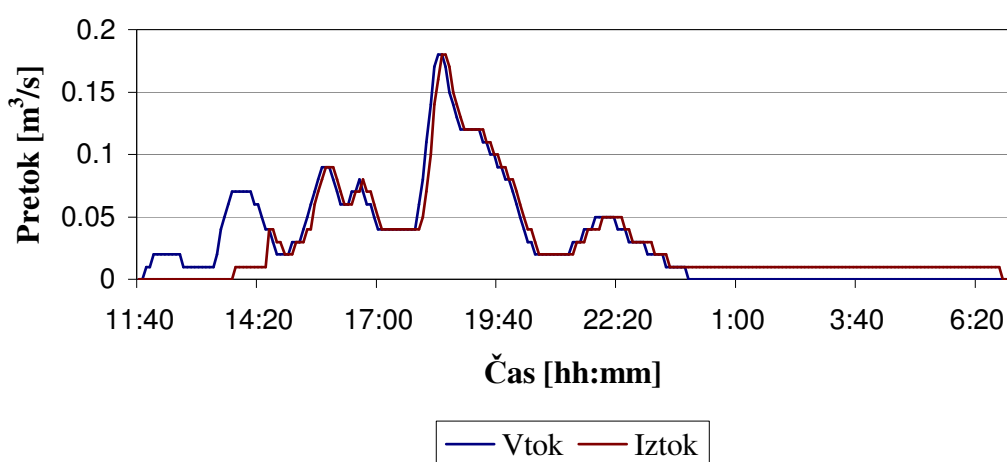


Grafikon 1: Iztok iz pregrade Loče

Grafikon 1 nam prikazuje iztok iz pregrade Loče v m^3/s , v odvisnosti od časa dneva [hh:mm]. Iz njega je razvidno, da je bil pretok večino časa konstanten. Vse do 15:00 je znašal $0.18 \text{ m}^3/\text{s}$, kar predstavlja zgornjo mejo biološkega minimuma. Kasneje je iztok odsekoma padal, kar je posledica zapiranja izpustnih objektov na pregradi. Ob 17:20 je iztok popolnoma prenehal.

4.5.1.2 Avtocestni odsek Hoče – Arja vas

Vtočni in iztočni hidrogram avtocestnega zadrževalnika



Grafikon 2: Vtočni in iztočni hidrogram avtocestnega zadrževalnika

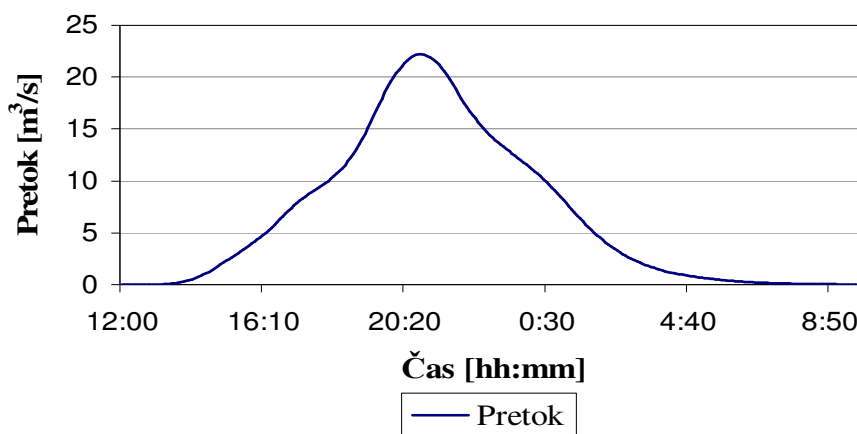
Iz grafikona 2 lahko enostavno določimo časovno spreminjanje vtoka in iztoka iz zadrževalnika padavinskih voda. Začetni del vtoka zadrževalnik učinkovito pokrije ter pri tem hkrati izpušča reducirane količine vode glede na zmogljivost izpusta. V začetnih urah do 15:00 se zadrževalnik ne napolni popolnoma, kar je v skladu s samim nihanjem intenzitet padavin, ki so v začetni fazi precej manjše od padavin uporabljenih pri določitvi volumna zadrževalnika. Kasneje se njegov volumen popolnoma zapolni kar posledično vodi do dejstva, da v takem primeru pri zadrževalniku ne pride več do retenzije padavin, ampak celotna količina iztoka sledi količini dotoka. Maksimalni iztok se pojavi ob 18:20 uri in znaša $0.18 \text{ m}^3/\text{s}$, kasneje po prenehanju padavin pa se zadrževalnik prazni do začetnega stanja.

Sama oblika hidrograma je morda nekoliko nenavadna, saj konice kljub modifikaciji računskega intervala močno skačejo ter s tem praktično z določenim zamikom sledijo intenzitetam padavin. Pojav lahko razložimo z dejstvom, da ima območje avtoceste visok

koeficient odtoka CN, kar ob povezavi z majhno prispevno površino in kratkim časom zakasnitve vodi do zelo aktivnega hidrograma. Pojav smo poskušali umiriti z uporabo daljših, 30 minutnih računskih intervalov, kar se izkazalo za dobro odločitev, saj so bili rezultati kljub volumensko ekvivalentni rešitvi, enakomerneje porazdeljeni kot pri rezultatih dobljenih pri 5-minutnih intervalih.

4.5.1.3 Prispevno območje Koprivnice brez Sušnice, pod pregrado Loče

Hidrogram prispevnega območja Koprivnice pod pregrado

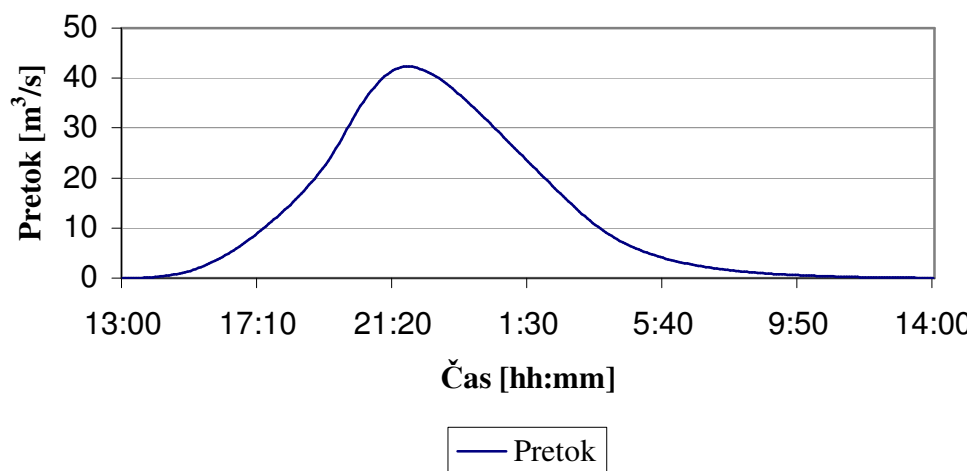


Grafikon 3: Hidrogram prispevnega območja Koprivnice brez Sušnice, pod pregrado Loče

Grafikon 3 prikazuje izračunane pretoke za prispevno območje brez upoštevanja izpusta pregrade Loče in izpusta iz zadrževalnika avtocestnih padavinskih voda. Vrh doseže 18.09.2007 ob 20:45, pri maksimalnem pretoku 22,3 m³/s. Zaradi relativno majhne prispevne površine in časa zakasnitve je graf dokaj simetričen, kar pa je značilnost majhnih povodij.

4.5.1.4 Prispevno območje Sušnice

Hidrogram prispevnega območja Sušnice



Grafikon 4: Hidrogram prispevnega območja Sušnice

Iz grafikona 4 lahko razberemo, da se maksimalni odtok s prispevnega območja Sušnice, to je $42,7 \text{ m}^3/\text{s}$, pojavi 18.09.2007 ob 21:45. Iz primerjave z grafikonom 3 sta razvidna daljši čas koncentracije in daljši čas zakasnitve, kar je posledica večjih dimenzij povodja.

4.5.2 Izvrednotenje posameznih vplivov na skupni hidrogram

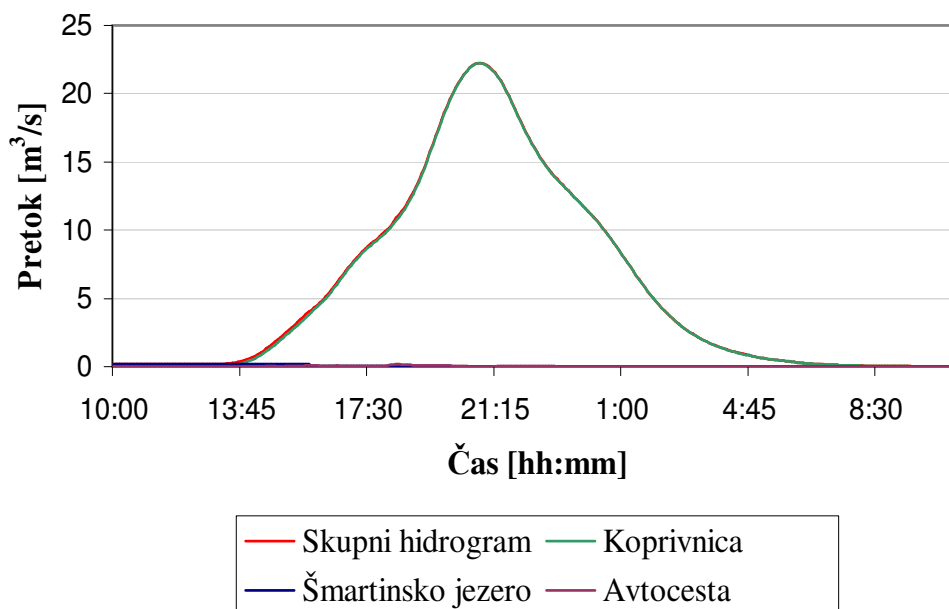
Skupni hidrogram odtoka predstavlja seštevek hidrogramov odtoka za povodje Koprivnice dolovodno pregrade Loče, avtocestnega odseka Hoče–Arja vas in iztoka iz zadrževalnika Šmartinsko jezero. Iz grafikona 4 in preglednice 15 je razvidno, da ima upoštevajoč volumenska razmerja prevladujoč vpliv hidrogram povodja Koprivnice, ki gledano v celoti, predstavlja kar 99% skupnega hidrograma. Zanimljiv delež odpade na ostali prispevni področji. Avtocesta namreč k skupnemu hidrogramu prispeva le 0,43%, izpust iz pregrade Loče pa 0,5%. Omenjene vrednosti so določene za obdobje od začetka hidrograma površinskega odtoka (12:35, 18.09.2007), do konca časa koncentracije vseh prispevnih površin (10:30, 19.09.2007).

Preglednica 17: Volumenska in procentualna razporeditev hidrogramov posameznih prispevnih področij Koprivnice brez Sušnice, glede na skupni hidrogram v obdobju od 18.9.2007 do 19.9.2007

Prispevno področje	Volumen odtoka [1000m ³]	Delež glede na skupni odtok [%]
Avtocestni odsek	2,3	< 0.5
Iztok iz pregrade Loče	5,4	1
Ostalo prispevno območje	508	> 98
Skupaj	515,7	100

S pomočjo tabelarnih izpisov programa HEC-HMS, lahko določimo tudi časovno in količinsko razporeditev hidrogramov podpovodij. Pri iztoku iz pregrade Loče je razvidno, da je ob upoštevanju obratovanja izpusta in potovanja vala dolvodno struge, do zadnjega profila hidravličnega modela, kjer hidrogram služi kot njegov robni pogoj, propagirala zadnja količina izpuščene vode (0,06 m³/s) ob 16:00, ko je znašal skupni pretok 9,89 m³/s. H kasnejšim poplavnim vrednostim pretoka ni prispeval nič, saj so bili vsi izpusti iz pregrade zaprti.

Skupni hidrogram odtoka



Grafikon 5: Skupni hidrogram odtoka na povodju Koprivnice 18. in 19.09.2007

Zbrana voda iz območja avtocestna odseka, je največji pretok $0,18 \text{ m}^3/\text{s}$ dosegla ob 18:20, trajal pa je 10 minut. Vrednost skupnega pretoka je takrat znašala od $10,88$ do $11,14 \text{ m}^3/\text{s}$. Kasneje je pretok hitro padal in ob skupnem pretoku $18 \text{ m}^3/\text{s}$, torej 100 letnem pretoku, znašal $0,09 \text{ m}^3/\text{s}$, kar predstavlja $0,5\%$ delež. Ob konici poplavnega vala, pri $22,2 \text{ m}^3/\text{s}$, je ta delež padel na $0,09\%$ oz. $0,02 \text{ m}^3/\text{s}$. Po koncu padavin je zadržana voda iz zadrževalnika iztekala do 06:45 naslednjega dne, glede na vrednosti določene v preglednici 12.

Količinsko največji delež v skupnem hidrogramu, delež ostalega povodja Koprivnice, je vrh pri $22,24 \text{ m}^3/\text{s}$ dosegel ob 20:45, pretoki nad 100-letno vodo, torej $18 \text{ m}^3/\text{s}$, pa so trajali 2,3 ure. Zaradi sorazmerno majhne prispevne površine in pokrovnosti tal, sta dokaj kratka tudi čas zakasnitve in koncentracije. Tako je iz grafa 3 razvidno, da se površinski odtok konča že zgodaj naslednjega dne.

Vse omenjene količine, tako volumenske kot procentualne, je potrebno interpretirati z določeno distanco. V splošnem, je potrebno vse rezultate, kjer prihaja do neposredne računske interakcije med vhodnimi podatki, zapisati oziroma določiti z natančnostjo najmanj natančnega vhodnega podatka. S tem poskušamo omiliti napake, ki se v vsakem primeru pojavijo zaradi nepopolnih vhodnih podatkov, računskega postopka ipd. Ker v našem primeru nismo mogli natančno umeriti hidrološkega modela, saj za območje ki smo ga obravnavali ne obstajajo potrebni merjeni podatki, lahko na podlagi vseh razpoložljivih meteoroloških, topografskih in hidroloških podatkov, po naših ocenah, z zadovoljivo natančnostjo določimo maksimalni skupni pretok na $\pm 1 \text{ m}^3/\text{s}$. V izvrednotenju posameznih vplivov na skupni hidrogram odtoka, smo tako poskušali le čimbolj nazorno, procentualno in predvsem grafično, prikazati njihov doprinos k skupnemu hidrogramu, seveda pa realno gledano takšne natančnosti rezultatov ne moremo doseči.

Iz dosedaj razvidnega, lahko torej trdimo, da je vpliv avtocestnega odseka Hoče – Arja vas in iztoka iz pregrade Loče na skupni hidrogram površinskega odtoka zanemarljivo majhen, pravzaprav nič. Iztok iz pregrade je bil v vsakem pogledu pravočasno zaustavljen, saj k vrednostim pretoka nad 100 letno povratno dobo ni prispeval nič, hidrogram iz avtocestnega odseka pa je zaradi kratkega časa koncentracije prav tako prispeval večji del, čeprav količinsko praktično zanemarljiv, k vrednostim pretoka pod 100-letno povratno dobo. Več

pojasnil o povezavi hidrogram odtoka – poplavne površine je na voljo v zaključku točke 5. Hidravlični model.

4.5.3 Zanesljivost računa

Izdelani hidrološki model, bi bilo potrebno zavoljo verificiranja rezultatov umeriti. Ker v našem primeru za povodje Koprivnice razen kratkega niza merjenih podatkov na pregradi Loče med leti 1967 in 1973 ne obstajajo drugi dosegljivi merjeni podatki, je umerjanje praktično nemogoče izvesti. Glede na to, da v nalogi obravnavamo enkratni padavinski dogodek, bi za umerjanje potrebovali nek drug padavinski dogodek, pri katerem bi poznali merjene meteorološke podatke ter izmerjene hidrograme, s pomočjo katerih bi nato fino umerili model.

Kljub vsemu, lahko z precejšnjo gotovostjo trdimo, da je izdelani hidrološki model na podlagi vseh uporabljenih podatkov in informacij podan z zadostno natančnostjo, da učinkovito zadosti potrebam diplomske naloge.

5 HIDRAVLIČNI MODEL RAČUNSKEGA OBMOČJA

5.1 Računalniški programi

5.1.1 Aquaterra

Kot član programske skupine CGS plus, ki jo med drugim sestavljajo tudi medsebojno združljivi programi Plateia, Plateia Geo, Ferrovia in Elektra, je program Aquaterra namenjen načrtovanju regulacij in ureditev vodotokov. Integriramo ga v znano programsko okolje AutoACAD ali Autodesk Map, kjer ga uporabljamo pri risanju načrtov, pripravi tehnične dokumentacije in hidravličnih izračunih.

Osnovni gradniki, oziroma moduli programa Aquaterra so moduli: Situacija, Osi, Vzdolžni profili, Prečni profili, Vmesnik za HEC-RAS in Vmesnik za MIKE11, s pomočjo katerih obdelujemo podatke v obliki risb, ASCII datotek ter ostalih oblik dokumentov. Vsi dokumenti oziroma podatki, načeloma pripadajo istemu projektu, za kar poskrbimo s pomočjo Upravljavca projektov, kjer lahko zbrane dokumente medsebojno urejamo in spreminjamo. Za nas morda najpomembnejša lastnost pa se skriva v uporabi GIS sistemov, kjer nam program močno olajša delo z geodetsko izmerjenimi detajlnimi točkami in točkami v prečnih oziroma vzdolžnih profilih (CGS Plus).

5.1.2 Mike 11

Računalniški program Mike11 je enodimenzionalni matematični model, ki ga je razvil Danish Hydraulic Institute (DHI) in ga lahko v osnovi uporabljamo za modeliranje hidroloških, hidravličnih in kakovostnih problemov voda. V teh okvirih se največkrat uporablja za:

- modeliranje poplavnih valov,
- analize porušitev pregrad,
- premeščanje plavin v vodotokih,
- upravljanje zadrževalnikov,
- izdelavo ekoloških modelov rek.

Osnovna značilnost programa Mike11 je njegov robustno zasnovan modul nestalnega toka, ki omogoča povezavo večjega števila vodotokov in zagotavlja kakovosten dinamični preračun neenakomernega toka. V izračunu so zaradi 1D zasnove upoštevane le komponente hitrosti

vzodlž osi vodotoka. V povezavi z nekaterimi drugimi dvodimenzionalnimi programi DHI (Mike flood, Mike21), omogoča tudi natančno modeliranje retenzijskih oziroma poplavnih površin.

Osnova matematičnega modela Mike11 sta St. Venantovi enačbi gibalne količine in kontinuitete masnega toka v enodimenzijski obliki. Model tvorita še kontinuitetna enačba vozlišč računske mreže ter modificirane St. Venantove enačbe s katerimi je matematično podan tok skozi različne objekte v samih strugah. Prednosti uporabe modela Mike11 se tako izkažejo predvsem v natančnem in stabilnem modeliranju enodimenzijskih tokov tudi na zelo dolgih sestavljenih rečnih sistemih, slabosti pa v težavnem simuliranju robnih dogajanj in potrebah po uvedbah določenih poenostavitev toka (DHI).

V diplomski nalogi bomo uporabili omejeno 'študentsko' verzijo programa Mike11, katere hidrodinamični modul omogoča uporabo le 75 prečnih profilov, zaradi česar bomo prisiljeni uvesti določene poenostavitve pri samem modeliranju.

5.2 Opis hidravličnega modela Koprivnice

5.2.1 Splošno

Obravnani odsek Koprivnice kljub relativno majhni obsežnosti, predstavlja dokaj zapleten hidrografski sistem. Na majhnem območju namreč prihaja najprej do sotočja Koprivnice in Sušnice, nato Ložnice in Koprivnice, ter nazadnje Savinje in Ložnice.

Ti trije vodotoki imajo pretoke različnih redov velikosti, kar pomeni da pogosto prihaja do občutnejših vplivov med njimi ne samo v sotočjih, ampak tudi više, gorvodno vodotokov. Savinja kot največji vodotok zajezuje Ložnico, ta pa zajezuje Koprivnico. Vanjo se že prej izliva Sušnica, katere pretoki pa so praviloma precej večji od pretokov Koprivnice. Za verodostojen hidravlični model Koprivnice je torej, upoštevaje pomanjkanje kvalitetnih robnih pogojev na območjih križanj vodotokov, priporočljivo model izdelati do izliva Ložnice v Savinjo, kjer imamo za podan dogodek na voljo uporaben robni pogoj v obliki maksimalne izmerjene vodne višine.

Za določitev realne slike vodnega režima Koprivnice dolvodno avtocestnega odseka Hoče-Arja vas, smo torej upoštevali gorvodni in dolvodni vodni režim, merjene in izračunane hidrološke podatke ter določene poenostavitve, ki so opisane v nadaljevanju.

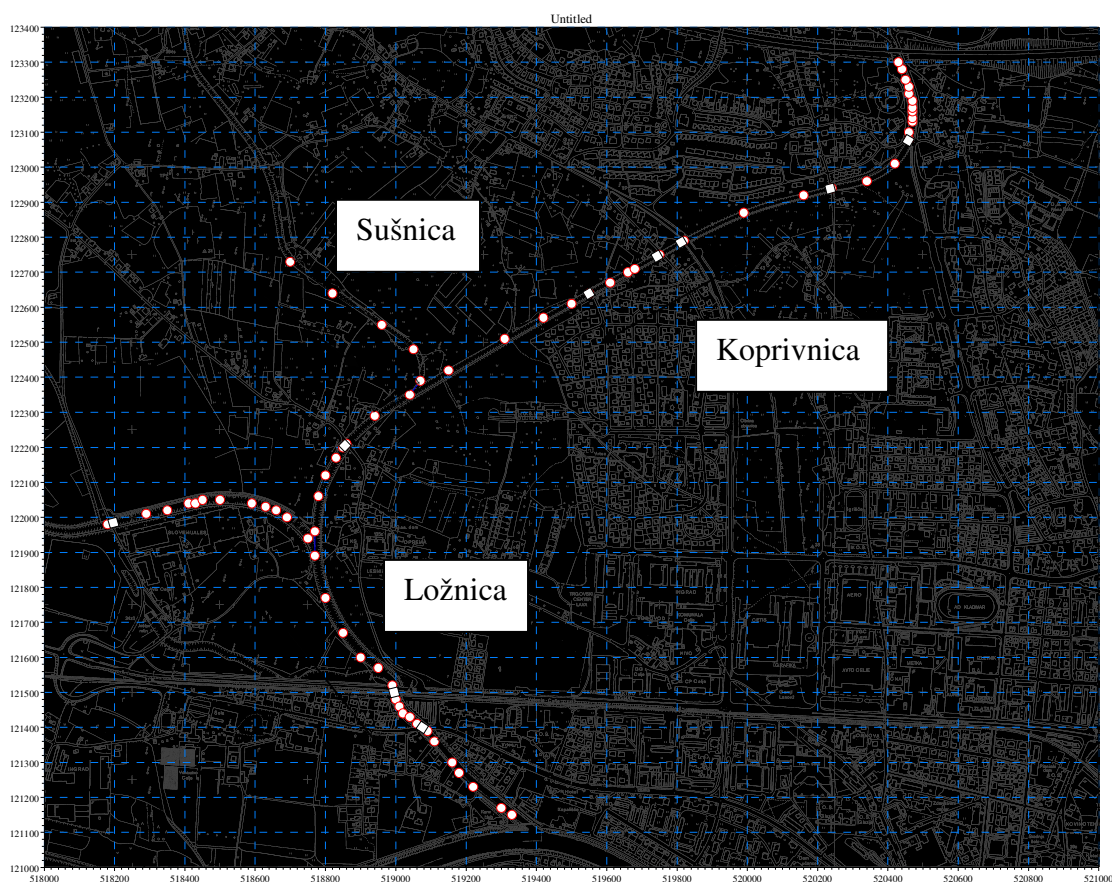
5.2.2 Geometrija računskega modela

Geometrija celotnega hidravličnega modela je skupek geodetsko in lastno merjenih oziroma modificiranih profilov. Delovno osnovo so tvorili dosegljivi prečni profili predhodno izdelanih študij, Temeljni topografski načrti M 1:5000 (TTN 5000), ortofoto posnetki ter merjene geodetske točke. Situacijo sem na terenu tudi osebno preveril.

Sam postopek sestave geometrije je v prvi fazi obsegal ureditev dostopnih geodetskih točk v programu Aquaterra in prenosu le teh v program Mike11. Ker so bili na ta način obdelani le naknadno merjeni profili, je bilo potrebno ostale profile v program vnesti kasneje. Temu je sledilo popravljanje določenih profilov, vnos prečnih objektov in pa podaljševanje prečnih profilov na poplavno območje, saj so bili prvotni prečni profili določeni le za samo strugo. Te točke smo določili ročno s pomočjo TTN 5000, z letom izdelave 1998, kjer smo na mestih prečnih profilov iskali presečišča podaljšanih osi profilov in izohiet. Podaljšane profile smo preprosto raztegnili do kot terena koder se voda ne more več povzpeti. Vsemu je sledila le še povezava vodotokov v homogeno celoto (slika 18).

Geometriji strug Koprivnice in Ložnice sta delno povzeti po izdelanih modelih Koprivnice in Ložnice v študiji Izdelava idejne zasnove ureditve Savinje s pritoki (Hidrosvet, 2005), delno pa po dodatno merjenih geodetskih posnetkih Koprivnice (Nivo, 2006). Upoštewane so bile določene spremembe na nasipih zaradi lokalnih ponižanj ter vplivov erozije in vaškega vandalizma.

Topografija Sušnice je najslabše pokrita. Prečne profile je bilo potrebno prilagoditi, saj je program zaradi neustrezne geometrije javljal napako. Prilagojeni so bili na podlagi terenskega ogleda in uporabe ortofoto posnetka.



Slika 18: Računski model v programu Mike11, izrisan na podlagi TTN 5000

Zaradi omejitev naše verzije programa Mike11, ki omejuje število profilov na 75, smo bili prisiljeni sklepati kompromise. Na zgornjem območju Koprivnice, od mosta Sveti duh do avtocestnega odseka, smo iz računa izpustili vsak drugi prečni profil. Območje namreč ni bilo poplavljeno, kar je dokazoval tudi test, ki smo ga na tem odseku opravili z hidrološko izračunanim pretokom, kar pomeni da je ukrep smiseln in ne vpliva bistveno na dolvodne izračune. Prav tako smo na določenih odsekih Ložnice izpuščali prečne profile, a le med medsebojno podobnimi profili. Geometrija terena je seveda s tem postala slabše določena, a rezultat bi po vseh kazalcih moral vseeno biti bistveno bolj realen, kot pa brez upoštevanja Ložnice in Sušnice. Profili v glavnem računskem delu Koprivnice, niso količinsko reducirani.

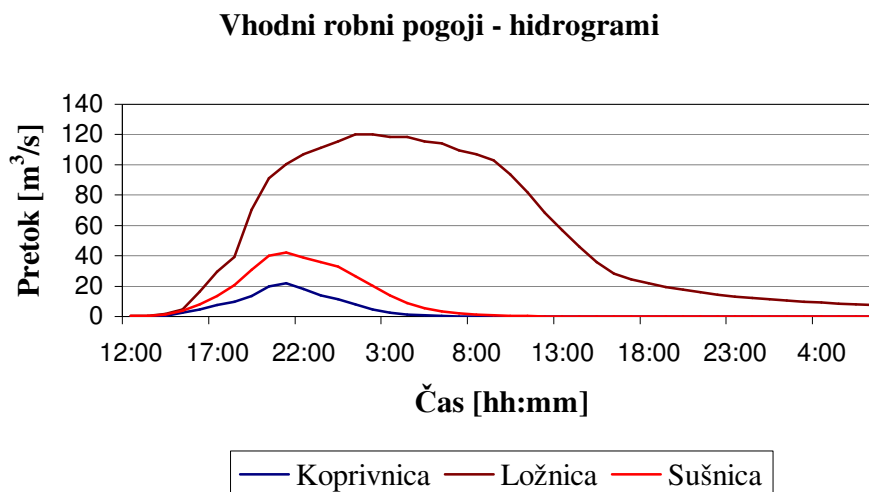
Od skupnega seštevka 75 prečnih profilov, jih 35 odpade na Ložnico, 34 na Koprivnico ostalih 6 pa je bilo uporabljenih pri modeliranju Sušnice.

5.2.3 Začetni in robni pogoji

Izračuni v hidravličnem modelu so bili opravljeni za nestalni tok. Robne pogoje, ki so pri tem potrebni, predstavljajo vhodni hidrogrami na vhodnih profilih modeliranih rečnih strug in povezava med pretokom in izmerjeno gladino vode na končnem iztočnem profilu.

Robni pogoj na začetnem profilu Koprivnice predstavlja hidrološko izračunani hidrogram (graf 4) za obravnavani padavinski dogodek, v katerem so v celoto združeni vsi gradniki povodja razen Sušnice. Za določitev vhodnega hidrograma Sušnice smo prav tako uporabili izračunani hidrogram (grafikon 5), ki v izračun vstopa kot robni pogoj Sušnice, neodvisen od ostalih hidrogramov.

Za robni pogoj na začetnem profilu Ložnice so bile uporabljene dejanske merjene vrednosti pretokov, ki so bili izmerjene na limnigrafski postaji v Levcu. Postaja se namreč nahaja pred sotočjem Ložnice in Koprivnice in zato predstavlja kvaliteten vhodni podatek. Maksimalni pretok iz teh podatkov svoj vrh doseže s krajšim približno enournim zamikom, v primerjavi z ostalima hidrogramoma, kar je glede na velikost povodij povsem razumljivo (grafikon 6).



Grafikon 6: Izračunani in merjeni hidrogrami – vhodni robni pogoji hidravličnega modela

Večja povodja imajo namreč daljši čas zakasnitve in posledično tudi daljši čas koncentracije. Merjen hidrogram ki je na voljo, je določen v enournih časovnih intervalih. Ker smo v

vhodnih hidroloških podatkih v Mike11 uporabili izračunane hidrograme z računskim intervalom pet minut, program podatke z daljšim časovnim intervalom, prilagodi krajšemu računskemu intervalu z linearno interpolacijo računskih vrednosti.

Robni pogoj na iztočnem profilu Ložnice smo določili s pomočjo Q-h krivulje, ki je vgrajena v program Mike11. Na podlagi podane geometrije struge in podatkov o padcu struge ter koeficientov n_g , program določi krivuljo višine vode v odvisnosti od pretoka, katero smo dopolnili glede na označeno kote visokih vod po poplavi na iztočnem profilu. S tem smo zagotovili časovno kontinuirano podajanje višine vode na iztočnem profilu.

5.2.4 Manningovi koeficienti

Manningov koeficient hrapavosti n_g , predstavlja upor oziroma vpliv na tok vode s strani hrapavosti ostenja, ovir v vodi, rastja ipd. Glede na poročila Rečne nadzorne službe podjetja Nivo (2007), je bilo za začetni približek Manningovega koeficienta, na dan 18.9.2007, privzeto število 0,04 za samo strugo in 0,1 za poplavno območje. Struge vseh treh rek so bile v glavnem obrasle z naravnim rastjem v obliki višjih in nižjih trav, ponekod se je pojavljalo trstičje, predvsem v nižje ležečih delih sistema in sotočjih, pa se je pojavljalo tudi grmovno rastje in drevesa. Na kratkem odseku na Koprivnici med mostovoma pri Ljubici, je struga na desnem bregu omejena z betonskim zidom.

Model smo umerili glede na izmerjene kote visokih voda z dne 18.9.2007, ki so podane za območje Koprivnice in Ložnice. Na Ložnici smo imeli na voljo 5 maksimalnih merjenih visokovodnih gladin, na Koprivnici 2, medtem ko za Sušnico teh gladin ni bilo na voljo. Dodatno smo si pomagali z opazovanimi gladinami na točno določenih lokacijah, katere so nam zaupali Nivo-jevi rečni nadzorniki, za katere sicer ni bilo na voljo točnih višinskih kot, a so nam služile kot dodatna preverba pri umerjanju. Graf porazdelitve umerjenih Manningovih koeficientov za posamezne reke z dne 18.9.2007, je razviden iz grafikonov 7 in 8. V preglednici 18 so podane točke merjenih gladin za posamezne vodotoke in kote naših umerjenih gladin.

Preglednica 18: Kote merjenih in umerjenih gladin, za vodotoka Ložnica in Koprivnica

Ložnica			
Stacionaža [m]	H _{mer} [m]	H _{umer} [m]	Razlika[m]
1590	239,59	239,59	0
1405	239,72	239,70	-0,02
1077	240,25	240,25	0
463	240,65	240,72	+0,07
0	242,47	242,46	-0,01
Koprivnica			
2107	241,08	241,05	-0,03
510	241,99	242,02	+0,03

Za umerjene kote visoke vode smo določili red natančnosti ± 3 cm. To nam je uspelo v vseh točkah, razen na stacionaži 463m, na profilu Ložnice, kjer umerjena kota vode od dejansko merjene odstopa za 7 cm. Vzrok temu lahko leži v merjenju točke na gospodarskem objektu, kjer je v realnosti prišlo do umiritve oziroma zastoja vode, v računski simulaciji pa tega ne moremo upoštevati in se na tem območju predpostavi prosti pretok vode.

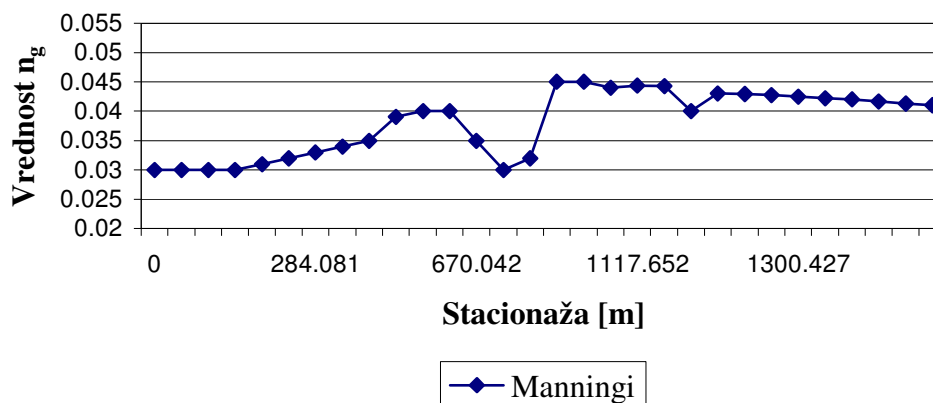
V profilu Koprivnice smo si še dodatno pomagali z ugotovitvami, da gorvodno mostu Sveti duh vodotok ni prestopil brežin, pri sotočju s Sušnico pa se je kljub prelitju desne brežine, na levi brežini ustavila na temenu nasipa.

Manningove koeficiente za Sušnico, smo določili na vrednost 0,035.

Če primerjamo naše umerjene koeficiente, za dan 18.09.2007, s koeficienti uporabljenimi pri hidravličnem modelu v projektu Idejna zasnova ureditve Savinje s pritoki (Hidrosvet, 2005) ugotovimo, da so naši umerjeni koeficienti malenkost višji. Za Koprivnico je bila namreč leta 2005 določena enakomerna vrednost $n_g= 0,03$, za Ložnico $n_g=0,032$ in za Sušnico $n_g=0,028$. Ti koeficienti so bili verjetno le približno določeni s terenskimi ogledi, upoštevati pa je potrebno tudi naravno rastje, ki je bilo 18.9.2007 vsekakor vsaj malenkost drugačno kot dve leti poprej. Glede na terensko ocenjene vrednosti n_g in naše računsko umerjene za dan 18.9.2007, lahko zato trdimo, da se vrednosti n_g med seboj dovolj dobro ujema in dovolj

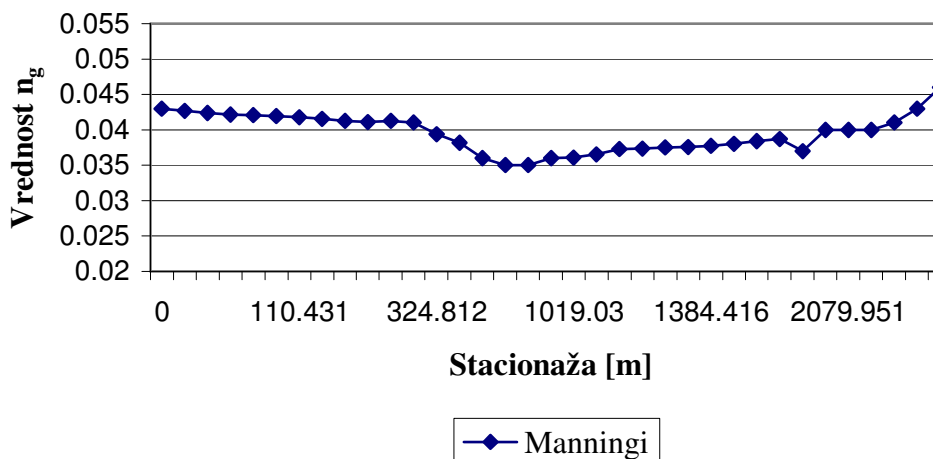
dobro odsevajo realno stanje. Iz grafikonov 7 in 8 je razvidno, da pride ob stacionažah premostitvenih objektov do občutnih skokov vrednosti n_g .

Umerjeni Manningi za vodotok Ložnica za dan 18.9.2007



Grafikon 7: Umerjeni Manningi za vodotok Ložnica za dan 18.9.2007

Umerjeni Manningi za vodotok Koprivnica za dan 18.9.2007



Grafikon 8: Umerjeni Manningi za vodotok Koprivnica za dan 18.9.2007

5.2.5 Koeficienti zožitve in razširitve

Hidravlične izgube, do katerih prihaja zaradi razširitev in zožitev toka, predpostavimo konstantne po celotnem računskem odseku. Pri prečnih profilih znašajo te vrednosti 0,1 za

zožitev in 0,3 za razširitev, pri mostnih konstrukcijah pa 0,3 za koeficient zožitve in 0,5 za koeficient razširitve.

5.2.6 Mostovi

Mostovi lahko predstavljajo pomemben doprinos k hidravličnim razmeram v vodotoku. V naš hidravlični model je bilo potrebno vnesti osem mostov, od katerih smo jih pet vnesli na odsek Koprivnice, tri pa na odsek Ložnice. Ker so razponi večinoma majhni, so mostovi na Koprivnici sorazmerno enostavne konstrukcije. Dva mostova sta sestavljena le iz glavne povozne mostne plošče s temelji v brežinah, trije pa poleg tega še slonijo na ozkih mostnih opornikih. Leseno brv na Koprivnici, v profilu P13, smo v programu modelirali kot most brez ograje z debelejšo pohodno ploščo, saj smo predpostavili da se ograja zapolni s plavinami in kot taka ne prepušča večjih količin vode. Na Ložnici so mostovi precej večji ter kompleksneje grajeni.

Program omogoča podajanje geometrije mostu za gorvodni in dolvodni profil, pri čemer je pomembno, da sta ta profila čimbliže sami mostni konstrukciji. Med drugim lahko določimo zgornje in spodnje točke brežin, najnižjo točko struge ter višinske kote mostu. Glede na podane tabele v programu, lahko določimo koeficiente v primeru prelitja mostu, ter tudi koeficiente, ki predstavljajo vpliv mostnih opornikov. Geometrije mostov so povzete po projektu Izdelava idejne zasnove ureditve Savinje s pritoki na območju MO Celje (Hidrosvet 2005).

5.3 Računski primeri za visokovodno situacijo z dne 18.9.2007

V računskem primeru je obravnavana dejanska visokovodna situacija na dan 18.9.2007. Račun v hidravličnem modelu smo naredili za obdobje od 18.9.2007 ob 14:00 do 19.9.2007 ob 02:00, s čemer smo zajeli fazo naraščanja pretokov, maksimalne pretoke in fazo padanja pretokov.

Za izbrano prvo visokovodno situacijo bo predstavljena analiza visokovodnih hidravličnih razmer, pri čemer bo prikazana in primerjana višina maksimalnih gladin vzdolž osi vodotoka ter časovno spreminjanje višine vode v dveh pomembnih karakterističnih profilih. Ovrednoten bo tudi vpliv nižjeležečih vodnih teles in vpliv premostitvenih objektov na gorvodno

visokovodno situacijo. V drugi situaciji bomo preverili hidravlične razmere pri spremenjenih dimenzijah premostitvenih objektov, spremenjenem režimu pritoka Sušnice in določenih lokalnih spremembah.

5.3.1 Računski primer brez hidroloških in hidravličnih modifikacij

Hidravlični model je sestavljen iz predhodno zastavljenih in opisanih podatkov hidrološkega modela. Geometrija modela je enaka prvotno določeni, ki ustreza dejanskemu stanju na terenu in je bila uporabljena za umerjanje.

5.3.2 Računski primer z upoštevanjem zadrževalnika na Sušnici in zvišanjem premostitvenih objektov

V nasprotju z modelom v prejšnji postavki, bomo tu kot vhodni hidrogram Sušnice, namesto izračunanega upoštevali teoretični zmanjšani hidrogram kot posledico zadrževalnikov na povodju Sušnice v Šmartnem, ki sicer niso zgrajeni, bili pa so približno določeni. Zmanjšanje konice Q100 vala Sušnice do sotočja s Podsevčnico, je bilo tako ocenjeno na vrednost 1 do 2 m³/s. (Hidrosvet, 2005), pri čemer pretok Q100 Podsevčnice ni bil naknadno korigiran. Ker se zanj ocene močno razlikujejo bomo, glede na določeno vrednost Sušnice na sotočju z Ložnico in predpostavljene teoretične vrednosti zadrževanja, v tej točki kot vhodni hidrogram Sušnice upoštevali pretok s konico 22,5m³/s.

Upoštevali bomo tudi primer s povečanimi odprtini premostitvenih objektov in določili spremembo vodnega režima. Mostne konstrukcije za katere smo ugotovili, da povzročajo zaježbo, bomo zvišali na višinsko koto, kjer nimajo več vpliva na vodni režim.

5.4 Analiza rezultatov

5.4.1 Rezultati računskega primera brez hidroloških in hidravličnih modifikacij

S pomočjo hidravličnega modela lahko s precejšnjo natančnostjo, seveda z omejitvami, ki so vezane na natančnost vhodnih podatkov, ovrednotimo visokovodno situacijo na računskem območju.

Kot prvo je potrebno ovrednotiti vpliv vodotokov Ložnica in Sušnica na gorvodni vodni režim Koprivnice. Izračunana vodna gladina je bila na sotočju Koprivnice in Sušnice na koti

241,33 cm, na sotočju z Ložnico pa na koti okoli 240,7 cm. Če ti gladini primerjamo z vodnima gladinama na mestih sotočij, ki bi bile teoretično dosežene pri obravnavi le z upoštevanjem geometrije in pretoka Koprivnice, brez ostalih vodotokov, torej 239,82m na sotočju s Sušnico in 239,23m na sotočju z Ložnico, lahko ugotovimo sledeče. Na obeh lokacijah je bila zaradi pritokov močno zvišana gladina vode. V prvem primeru za 70% glede na prvotno, v drugem pa 72%. Iz hidravličnega modela je razvidno, kar smo tudi predvidevali, da oba vodotoka pomembno prispevata k zviševanju gladine gorvodno sotočij in s tem zmanjšanju poplavne varnosti, saj vpliv zajeze zaradi pritokov, v našem primeru sega do profila P21, torej slaba dva kilometra gorvodno od sotočja Ložnice in Koprivnice.

Za pravilno se je izkazalo tudi naše domnevanje glede premostitvenih objektov, ki jih je na obravnavanem odseku kar pet. Lesena brv, ki je postavljena globoko v profil vodotoka, namreč povzroča zajezo v višini 25 cm (preglednica 19), zaradi česar voda v gorvodnih profilih P13 do P16 prelije tako desni kot tudi levi breg. Prav tako se zaradi tega dviga vode pojavi še dodatna zajeza na mostu pri gostišču Ljubica v višini 15 cm, kjer voda prelije desno brežino med gostiščem Ljubica in mostom na obvoznici (P18), do prelitja pa pride tudi pred tem mostom med profiloma P18 in P19. Most na obvoznici in most pri Svetem duhu po naših izračunih nista povzročala zajeze, medtem ko je most pri trgovskem objektu Lidl povzročil majhno zajezo (6 cm), ki pa ni povzročila prelitja brežin gorvodno.

Po pregledu časovnega spreminjanja gladine vode v prečnih profilih P17 in P21 (priloga E), lahko, zaradi računa z nestalnim tokom, z induktivnim sklepanjem razkrijemo dinamiko voda na desnem poplavnem območju, gorvodno lesene brvi, od profila P13 vse do profila P22, kjer se razteza novo naselje Ostrožno, kar sicer iz modela zaradi enodimenzijskega računa ne moremo direktno razbrati. Ker se za profilom P13 razteza površina namenjena prelitju visokih voda, ki se kontinuirano polni že pri pretokih nad $5 \text{ m}^3/\text{s}$, lahko ob poznani topografiji terena, na kratkem delu poplavnega območja se kota površja namreč precej zniža, izpeljemo nekaj zanimivih ugotovitev.

Ocenjena kota najnižjega dela prehoda med profili P16 do P19, ki je sicer zavarovan z nasipom, znaša 241,5m, iz rezultatov pa je razvidno, da vodna gladina v profilu P17 to koto doseže in preseže malo po osmi uri. Takrat je bila kota visoke vode med profili P19 in P20 še

dobrih 10 cm pod koto nasipov. Iz danih podatkov je torej razvidno, da so visoke vode prebile del nasipa, ki omejuje razlivno območje, in se zaradi topografije terena iz dolvodnega območja razlile gorvodno, na naselje Ostrožno. Dodatno količino vode je na isti način prispevalo prelitje brežin struge med profiloma P17 in P18. K dodatnemu dvigu vode pa je poleg tega prispevalo tudi kasnejše prelitje desnega nasipa med profiloma P19 in P20, ki ležita neposredno ob naselju.

Preglednica 19: Primerjava gladin dejanskega stanja z gladinami pri možnih ukrepih za povečanje poplavne varnosti

Profil	Stacionaža [m]	Hmax-prvotni[m]	Hmax-zvišani mostovi [m]	Sušnica-zadrževalnik in zvišani mostovi	Sušnica-zadrževalnik
P35	0	242.55	242.46	242.44	242.48
P33	40.081	242.49	242.38	242.36	242.42
P31	74.193	242.47	242.36	242.33	242.39
P30	98.057	242.45	242.34	242.3	242.37
P29	110.431	242.44	242.32	242.29	242.36
P28	123.073	242.43	242.31	242.27	242.35
P27	146.301	242.42	242.29	242.25	242.33
P26	171.477	242.39	242.25	242.21	242.3
P25	209.51	242.37	242.22	242.18	242.27
P24	227.629	242.34	242.18	242.13	242.23
Sveti duh					
P24_2	237.63	242.29	242.13	242.08	242.19
P23	324.812	242.24	242.04	241.97	242.11
P22	386.441	242.21	241.99	241.91	242.07
P21	500.699	242.13	241.86	241.74	241.96
Most					
P21_2	510.7	242.02	241.81	241.68	241.88
P20	599.185	242.02	241.81	241.68	241.88
P19	736.112	242	241.76	241.61	241.84
P18	936.413	241.95	241.69	241.5	241.77
Obvoznica					
P18_2	956.41	241.92	241.65	241.46	241.74
P17	1019.03	241.9	241.61	241.4	241.71
Pri Ljubici					
P17_2	1035.03	241.76	241.58	241.36	241.58
P16	1098.401	241.76	241.57	241.34	241.57
P15	1115.162	241.73	241.55	241.3	241.55
P14	1177.401	241.72	241.52	241.26	241.52
P13	1250.512	241.7	241.49	241.2	241.49
Brv					
P13_2	1252.51	241.46	241.46	241.16	241.16
P12	1294.401	241.46	241.46	241.16	241.15

...se nadaljuje

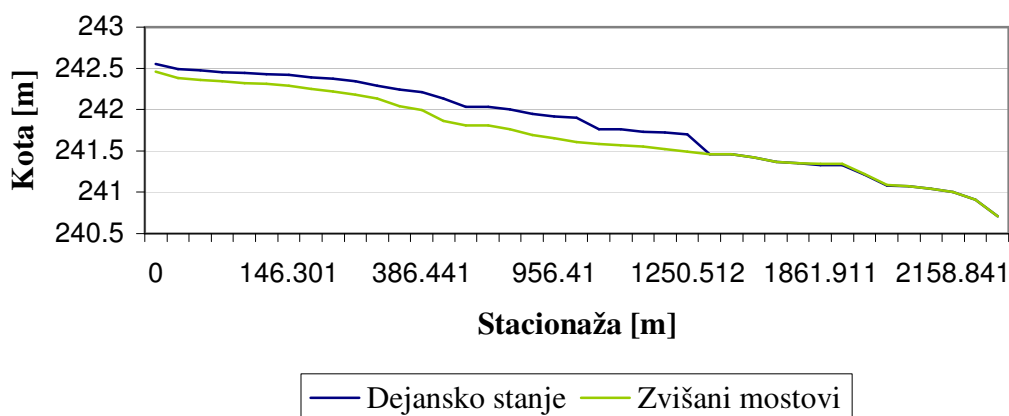
...nadaljevanje

P11	1384.416	241.42	241.42	241.1	241.09
P10	1543.109	241.37	241.37	241.01	241
P9	1719.294	241.35	241.35	240.97	240.96
P8	1861.911	241.33	241.34	240.94	240.93
P7	1977.211	241.21	241.22	240.83	240.83
P6	2067.911	241.08	241.09	240.74	240.73
Babno					
P5	2079.951	241.07	241.07	240.71	240.71
P4	2107.931	241.04	241.04	240.69	240.69
P3	2158.841	241	241	240.66	240.66
P2	2214.401	240.91	240.91	240.6	240.6
P1	2349.401	240.71	240.71	240.47	240.47

5.4.2 Rezultati računskega primera z nadvišanimi mostovi in upoštevanjem zadrževalnikov na Sušnici

Ker smo v prejšnji točki prikazali vpliv mostov na zvišanje gladine vode gorvodno, nas posledično zanima situacija pri stanju, ko so mostovi na zadostni varnostni višini, ki omogoča prost pretok vode brez zajeze.

Primerjava gladin med dejanskim stanjem in primerom z zvišanimi mostovi



Grafikon 9: Primerjava gladin med dejanskim stanjem in primerom z zvišanimi mostovi, ki so povzročali zajezbo

Primerjava rezultatov s prvotnim stanjem (preglednica 19), nam razkrije, da bi se ob dvigu lesene brvi, mosta pri Ljubici in mosta v profilu P21, maksimalna vodna gladina na območju med profili P13 in p21, znižala do 30 cm, gorvodno do avtoceste pa do 16 cm. To pomeni, da bi voda na tem odseku, na najnižjih kotah brežin kjer jih je v prejšnji točki prelila, ostala v glavni strugi, saj bi se robu nasipa približala na cca. 6 centimetrov. Od začetka odseka pa do lesene brvi, se s tem ukrepom, razen minimalnega dviga v profilih P6, P7 in P8, višina maksimalne gladine ne bi povečala (grafikon 8) in tako ne bi poslabšala položaja.

Preverili smo tudi profil P17, kjer je v prejšnji točki voda prelivala prečni nasip in se izlivala gorvodno. Podobno lahko ugotovimo tudi za ta primer. Maksimalna kota vode se povzpne na 241,60 m, kar je natanko 30 cm nižje kot prej, vendar vseeno 10 cm nad koto nasipa, kar spet rezultira k razlitju v naselje Ostrožno.

Ob primeru upoštevanja zadrževalnikov na Sušnici ugotovimo, da se vodna gladina na sotočju z Ložnico zniža za okoli 40 do 50 centimetrov, kar ugodno vpliva na zmanjšanje gladine gorvodno. Kljub temu pa bi ob primeru nespremenjenih mostnih odprtin prišlo do zajezbe, ki bi prelila bregove na enakih lokacijah kot v prvi točki. Najbolj ugodne rezultate da seveda kombinacija zadrževalnik-povečanje mostnih odprtin. V tem primeru se vodna gladina ne bi približala kronam nasipov na manj kot 10 cm.

5.5 Komentar

Po pregledu rezultatov lahko trdimo, da se hidravlični model na odsekih Koprivnice, Ložnice kot tudi Sušnice dovolj dobro ujema z dejanskim stanjem oz. merjenimi podatki na dan 18.9.2007. Za točno določitev dinamike voda, torej tudi tok v prečnih smereh in s tem natančnejše modeliranje dogodka, bi bilo mogoče uporabiti tudi dvodimenzionalni model. Zanj je potrebno bistveno več natančnih vhodnih podatkov, ki pa na žalost niso bili na voljo oziroma bi zahtevali dodatna terenska merjenja ter pripravo podatkov in s tem precejšnje finančne stroške. Glede na to, da gre za sorazmerno majhno računsko območje, bi si lahko želeli večjo gostoto merjenih prečnih profilov, vendar smo tudi z obstoječimi podatki lahko uresničili zastavljene cilje diplomske naloge pod to točko, torej preverbo dejanskih hidravličnih visokovodnih razmer.

6 ZAKLJUČEK

V diplomski nalogi smo poskušali analizirati visokovodni dogodek na reki Koprivnici dne 18.9.2007. Za to je bilo najprej potrebno izdelati hidrološki in hidravlični model, ki bi kar najbolj ponazarjala dejansko visokovodno situacijo.

Hidrološki model smo izdelali s programom HEC-HMS, v katerega smo vnesli dejanske merjene podatke za visokovodno padavinsko situacijo 18.09.2007, ki so obsegali intenzitete padavin ter topografske in hidrografske karakteristike povodja. Rezultate smo prikazali v obliki hidrogramov, ki smo jih nato uporabili kot vhodne podatke v hidravličnem modelu. Hidrološkega modela zaradi pomanjkanja merjenih meteoroloških in hidroloških podatkov, ki jih lahko pridobimo le z ustreznim monitoringom, ni bilo mogoče umeriti, ob čemer velja pripomniti, da bi bil zaradi dejstva, da gre za poplavno ogroženo območje, v prihodnje monitoring teh podatkov zelo zaželen. Pri analizi rezultatov smo ugotovili, da so se v najpomembnejšem računskem intervalu (12ur) visokovodnega padavinskega dogodka, zvrstile padavine s povratno dobo okoli 1000 let. Za (ciklonske) nevihte kot je bila v našem primeru, je značilna majhna jakost padavin na začetku padavinskega intervala, ki se kasneje sprevrže v močne padavine. Takšna razporeditev padavin je načeloma najbolj neugodna, saj daje večje konice odtoka kot intenzitetno ekvivalenten naliv z drugačno razporeditvijo padavin. Končni rezultat razporeditve in količine padavin je tako bil zelo velik površinski odtok s povodja Koprivnice, pri čemer je največji del glede na volumen skupnega odtoka odpadel na del brez avtocestnega odseka, medtem ko sta slednji in pa iztok iz pregrade Loče k skupnemu volumnu prispevala manj kot 1%, torej praktično zanemarljivo vrednost. Hidrogram odtoka s Koprivnice je imel vrh pri $22,3 \text{ m}^3/\text{s}$, hidrogram Sušnice pa pri $42,7 \text{ m}^3/\text{s}$.

V hidravlični model odseka Koprivnice, ki smo ga modelirali v programu Mike11, smo v prid natančnosti vključili še odsek Sušnice in odsek Ložnice do izliva v Savinjo. Kot gorvodne robne pogoje smo vnesli hidrograme padavinske situacije izračunane s programom HEC-HMS, dolvodni robni pogoj pa je predstavljala časovna odvisnost pretok-gladina. Obravnavali smo tri variante visokovodnega dogodka: osnovno stanje, stanje s povečanimi mostnimi odprtini, ter varianto z zadrževalniki na Sušnici. Ugotovili smo, da je v visokovodni situaciji 18.09.2007, prišlo do ekstremnih vodnih količin, ki so v kombinaciji z zajezbami

premostitvenih objektov in vodotokov Ložnice in Sušnice, vodile do poplavitve naselja Ostrožno in bližnje okolice. Vpliv zajeze Ložnice in Koprivnice se je namreč poznal vse do profila P21 in pripomogel k občutnemu dvigu vodnega nivoja Koprivnice. Ugotovili smo tudi, da je pri naselju Ostrožno prišlo tudi do poplavitve s strani dolvodnega odseka, kjer je voda prestopila nasip, ki loči naselje od razlivne ravnice.

Za zaključek lahko izpeljemo sklep, da bi bilo potrebno v prihodnje, za zagotovitev ugodnih visokovodnih razmer, urediti predvsem premostitvene objekte, ki povzročajo zajeze, zmanjšati pretoke Sušnice (kar bi bilo mogoče doseči z ustreznimi zadrževalniki) ter, kar je najtežje, znižati poplavne vode reke Savinje.

VIRI

Uporabljeni viri

Aristovnik, B. (ur.). 2005. Mesto v objemu voda – Poplave v Celju v 20. stoletju. Celje. Zgodovinski arhiv Celje: 103 str.

Brilly, M., Mikoš, M., Šraj, M. 1999. Vodne ujme - varstvo pred poplavami, erozijo in plazovi. 1. izdaja. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 186 str.

Brilly, M., Šraj, M. 2005a. Modeliranje površinskega odtoka in navodila za program HEC-HMS. Ljubljana. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 172 str.

Brilly, M., Šraj, M. 2005b. Osnove hidrologije. Ljubljana. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 286 str.

Geodetska uprava Republike Slovenije. Hidrografija

<http://www.geopedia.si/> (21.05.2008)

HIDROSVET. 2005. Izdelava idejne zasnove ureditve Savinje s pritoki na območju MO Celje. Idejna zasnova. Celje. Mestna občina Celje

Inženiring za vode Republike Slovenije. 2008. Ekološka sanacija Šmartinskega jezera. 3. Hidrološke obdelave. Strokovne podlage. Ljubljana. Ministrstvo za okolje in prostor: 28 f.

Krajevna skupnost Ostrožno. Poplave na območju KS Ostrožno 18. in 19.09.2007

http://www.ks-ostrožno.si/aktualnosti/aktualnosti_29_okt.htm (21.05.2008)

Mike 11 – A Modeling System for Rivers and Channels. 2007. DHI Water & Environment.

Mikoš, M. 2000. Urejanje vodotokov. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 182 str.

Natek, K. 2005. Poplavna območja v Sloveniji, Geografski obzornik, letn. 52, št.1, str. 13-19

NIVO. 2004. Priprava evidenc in pregled obstoječih obratovalnih pravilnikov vodne infrastrukture (akumulacij) ter priprava programa posodobitve in uskladitve pravilnikov. II – Akumulacija Šmartinsko jezero - Loče. Načrt inženirskih gradenj. Celje. Nivo - Gradnje in ekologija d.d.

PUV Nizke in vodne gradnje. 2001. AC Koper-Lendava s priključnimi kraki – odsek Hoče-Arja vas, pododsek Celje-Arja vas. Predlog poslovnika za vodotoke. Celje. Dars d.d. Celje, Družba za avtoceste v Republiki Sloveniji

Sklep o določitvi poplavnega območja. UL RS št. 57/2008: 86

Steinman, F., Banovec. P. 2004. Hidrotehnika – vodne zgradbe I. Ljubljana. Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 126 str.

Uhan, J. (ur.), Bat, M. (ur.). 2003. Vodno bogastvo Slovenije. Ljubljana, Agencija Republike Slovenije za okolje: 131 str.

Uprava RS za zaščito in reševanje. Poplava

<http://www.sos112.si/slo/page.php?src=og12.htm> (21.05.2008)

Zveza geografskih društev Slovenije. Poplavna območja v Sloveniji

<http://www.zrc-sazu.si/Zgds/1-6-06.htm> (21.05.2008)

Ostali viri

Knapič, M., 2007. Vpliv zadrževalnika Brezje na poplavne vode reke Horjulščice. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Hidrotehnična smer: 64 f.

Ministrstvo za okolje in prostor. Šest mesecev po poplavah 18. septembra 2007

<http://www.mop.gov.si/si/splosno/cns/novica/article/1994/6266/?cHash=afa742abd6>
(21.05.2008)

Rejc, P. 2005. Povezava hidrološkega in hidravličnega modela reke Savinje na območju Spodnje savinjske doline. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Hidrotehnična smer: 85 f.

US Army Corps of Engineers. HEC – RAS User's Manual

<http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/hecras-document.html> (23.05.2008)

Wikipedia. Geografija Slovenije

http://sl.wikipedia.org/wiki/Geografija_Slovenije#Koli.C4.8Dina_padavin (21.05.2008)