

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*



Podiplomski program Gradbeništvo  
Hidrotehnična smer

Kandidatka:

**Anja Horvat**

# **Vloga snega v hidrološkem krogu na porečju Save**

**Magistrska naloga št. 210**

**Mentor:**  
prof. dr. Mitja Brilly

**Somentor:**  
doc. dr. Mojca Šraj

Ljubljana, 19. 6. 2009

Univerza  
v Ljubljani  
Fakulteta  
za gradbeništvo  
in geodezijo



Jamova c. 2  
1000 Ljubljana, Slovenija  
[fgg@fgg.uni-lj.si](mailto:fgg@fgg.uni-lj.si)  
Podiplomski študij  
hidrotehnike

Kandidatka:

**ANJA HORVAT**

## **Vloga snega v hidrološkem krogu na porečju Save**

Magistrska naloga št.

## **The role of snow in the hydrological cycle on the Sava River basin**

Master Degree Thesis No.

### **Hidrotehnična smer**

**Mentor:**

prof.dr. Mitja Brilly

**Somentorica:**

doc. dr. Mojca Šraj

**Predsednik komisije:**

prof. dr. Matjaž Četina

Datum zagovora: Ljubljana, xx.xx.2009



## **IZJAVA O AVTORSTVU**

Podpisana Anja Horvat izjavljam, da sem avtorica magistrske naloge z naslovom: »**VLOGA SNEGA V HIDROLOŠKEM KROGU NA POREČJU SAVE**«.

Anja Horvat

Ljubljana, 08.06.2009



## **IZJAVE O PREGLEDU NALOGE**

Nalogo so si ogledali učitelji hidrotehnične smeri:

- prof. dr. Matjaž Četina, predsednik komisije,
- prof. dr. Mitja Brilly, mentor,
- doc. dr. Mojca Šraj, somentorica,
- prof. dr. Jože Rakovec, UL FMF,
- prof. dr. Boris Kompare.



## **BIBLIOGRAFSKO–DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK**

**UDK:** 556.12:556.52(282.243.743)(043.3)  
**Avtor:** Anja Horvat  
**Mentor:** red. prof. dr. Mitja Brilly  
**Naslov:** Vloga snega v hidrološkem krogu na porečju Save  
**Obseg in oprema:** 103 str., 16 preg., 29 sl., 7 prilog  
**Ključne besede:** porečje Save, vodni ekvivalent snega, tajanje, pretoki, spomladanska odjuga, satelitski posnetki, model HBV

### **Izvleček**

Namen magistrske naloge je bil ugotoviti vlogo snega v hidrološkem krogu na porečju Save. Porečje Save smo izbrali, ker je največje porečje v Sloveniji in ima zaledje v hribovitem svetu, kjer je snežna odeja prisotna vsako zimo. Vodnatost reke Save je pomembno poznati in znati napovedati iz različnih razlogov, med katerimi sta najpomembnejša poplavna ogroženost stanovanjskih in industrijskih objektov ter pridobivanje električne energije iz že obstoječih in številnih še načrtovanih hidroelektrarn vzdolž toka. V nalogi smo najprej predstavili geološke, hidrogeološke, hidrografske ter meteorološke lastnosti porečja Save ter tako določili možnost vpliva tajanja snežne odeje na pretoke. Nadalje smo predstavili meritve snežne odeje ter nize razpoložljivih meritev snežne odeje. Med meritvami snežne odeje in pretoki je bila izračunana korelacija, iz katere smo zaključili, da med dvema spremenljivkama ni neposredne povezave. Podrobneje smo primerjali meritve snežne odeje in pretokov v 40 zimah ter posamezna obdobja spomladanske odjuge. Prišli smo do zaključka, da se pretoki v času prisotnosti snežne odeje v spomladanskem času v povprečju dvignejo ter zadržijo trend naraščanja do popolnega odtajanja, ko pa je vpliv tajanja snežne odeje na pretoke reke težko določiti zaradi prisotnosti spomladanskega deževja. Proces tajanja smo tudi modelirali z obstoječim modelom reke Save, tj. IHMS-HBV, pri čemer se je izkazalo, da se model precej slabše obnese pri večji časovni natančnosti podatkov. Kljub temu so bili rezultati primerjave med rezultati modela in meritvami zadovoljivi in na več merilnih mestih celo boljši kot rezultati določanja snežne odeje iz satelitskih posnetkov.



**BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION**

**UDC:** 556.12:556.52(282.243.743)(043.3)  
**Author:** Anja Horvat  
**Supervisor:** prof. dr. Mitja Brilly  
**Title:** The role of snow in the hydrological cycle on the Sava River basin  
**Notes:** 103 p., 16 tab., 29 fig., 7 enclosures  
**Key words:** Sava River Basin, snow water equivalent, snow melt, river flow, spring thaw, satellite image, HBV model

**Abstract**

The purpose of the master degree thesis was to determine the role of snow in the hydrological cycle on Sava River basin. The reason for choosing the Sava River basin is two-fold: it is the largest basin in Slovenia and its hinterland is in the mountains, where snow cover is present each winter. It is important to know and to be able to predict the flow of the Sava River because of flood safety and hydropower production of many hydropower plants on the Sava River. First, we discuss the geological, hydrogeological, hydrographical and meteorological characteristics of the Sava River Basin helping us to determine the snow melt impact on the Sava River flow. We calculated the correlations between the Sava River flow and snow cover and concluded that there was no direct link between the two variables. Furthermore, we compared the measurements of flow and snow cover in winter season and in spring thaw. During spring thaw there is a rise in river flow but it is hard to determine the exact impact of snowmelt on the flow as a result of spring precipitation. We also made a simulation of spring thaw with our IHMS-HBV model of the Sava River basin and concluded that the model gives better results with lower local and time resolution. We then compared the model results with measurements and concluded that the model, having a higher local resolution, gives better results of snow pack determination than satellite images.

## **ZAHVALA**

Za pomoč pri nastajanju magistrske naloge se zahvaljujem mentorju prof. dr. Mitji Brillyju in vsem na katedri, ki so mi omogočili prijetno delovno vzdušje.

Hvala tudi mojemu partnerju in družini za podporo ves čas študija.



**KAZALO**

<b>1</b>	<b>UVOD .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>POREČJE SAVE .....</b>	<b>3</b>
<b>2.1</b>	<b>Geološke in hidrogeološke značilnosti Posavja .....</b>	<b>4</b>
<b>2.1.1</b>	<b>Alpsko območje.....</b>	<b>5</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Predalpsko hribovito območje.....</b>	<b>5</b>
<b>2.1.3</b>	<b>Ozemlje visokega Krasa .....</b>	<b>5</b>
<b>2.1.4</b>	<b>Ljubljanska kotlina .....</b>	<b>6</b>
<b>2.2</b>	<b>Hidrografske značilnost reke Save.....</b>	<b>7</b>
<b>2.2.1</b>	<b>Zgornja Sava .....</b>	<b>7</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Srednja Sava .....</b>	<b>9</b>
<b>2.2.3</b>	<b>Spodnja Sava.....</b>	<b>12</b>
<b>2.3</b>	<b>Hidrološke značilnosti reke Save .....</b>	<b>14</b>
<b>2.4</b>	<b>Meteorološke razmere na porečju Save.....</b>	<b>16</b>
<b>2.4.1</b>	<b>Padavine .....</b>	<b>16</b>
<b>2.4.2</b>	<b>Temperature.....</b>	<b>19</b>
<b>2.5</b>	<b>Podpovodja reke Save .....</b>	<b>20</b>
<b>3</b>	<b>SNEG .....</b>	<b>25</b>
<b>3.1</b>	<b>Snežna odeja.....</b>	<b>25</b>
<b>3.2</b>	<b>Snežne razmere v Sloveniji .....</b>	<b>26</b>
<b>3.2.1</b>	<b>Povprečno število dni s snežno odejo .....</b>	<b>26</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Najvišje debeline snežne odeje.....</b>	<b>28</b>
<b>3.2.3</b>	<b>Merjenje snežne odeje .....</b>	<b>30</b>
<b>3.2.4</b>	<b>Snežni ekstremi .....</b>	<b>33</b>
<b>4</b>	<b>SNEG NA POREČJU SAVE .....</b>	<b>35</b>
<b>4.1</b>	<b>Izhodišča študije .....</b>	<b>35</b>
<b>4.1.1</b>	<b>Merilna mesta snežne odeje .....</b>	<b>36</b>
<b>4.1.1.1</b>	<b>Razpoložljivi podatki.....</b>	<b>37</b>

4.1.1.1.1	Izmerjeni maksimumi tajanja snežne odeje .....	40
4.1.1.2	Merjenje pretokov.....	41
4.1.2	Ključni parametri snežne odeje .....	43
4.1.3	Daljinsko zaznavanje snežne odeje.....	46
4.1.3.1	Vpliv oblačnosti.....	48
4.1.3.2	Vpliv pokrovnosti.....	50
4.1.3.3	Verifikacija satelitskih posnetkov s terenskimi meritvami .....	51
4.2	Modeliranje snežne odeje na porečju Save.....	53
4.2.1	Uporaba modela HBV za modeliranje odтока .....	53
4.2.1.1	Umerjanje modela reke Save .....	54
4.2.1.2	Računski postopek za sneg .....	60
4.2.1.3	Vhodni in izhodni parametri računa snežnih procesov.....	62
4.2.1.4	Vhodni podatki za sneg.....	63
5	REZULTATI .....	66
5.1	Vpliv tajanja snega na odток reke Save .....	66
5.1.1.	Korelacije med pretoki in višino snežne odeje .....	67
5.1.1.1	Primerjave med pretoki vodomerne postaje Jesenice in višino snežne odeje na postaji Kredarica.....	67
5.1.1.2	Primerjave med pretoki vodomerne postaje Bodešče in višino snežne odeje na postaji Vogel .....	68
5.1.2	Sezonske primerjave pretokov in višine snežne odeje .....	70
5.1.2.1	Primerjava med merilnima mestoma Jesenice in Kredarica.....	70
5.1.2.2	Primerjava med merilnima mestoma Bodešče in Vogel.....	71
5.1.3	Primerjave pretokov in višine snežne odeje v obdobju tajanja .....	73
5.1.3.1	Primerjava med merilnima mestoma Jesenice in Kredarica .....	73
5.1.3.2	Primerjava med merilnima mestoma Bodešče in Vogel.....	74
5.1.4	Modeliranje vpliva tajanja snežne odeje .....	75
5.1.4.1	Občutljivost modeliranja tajanja snega na porečju Save.....	78
5.1.4.2	Faktorji vpliva na tajanje snežne odeje .....	80
5.1.4.3	Modeliran vpliv tajanja snežne odeje na pretok .....	83
5.2	Uporabnost satelitskih posnetkov.....	85

<b>5.2.1</b>	<b>Primerjava satelitskih posnetkov in rezultatov zasneženosti modela.....</b>	<b>86</b>
<b>5.3</b>	<b>Pronicanje vode v času prisotnosti snežne odeje .....</b>	<b>89</b>
<b>6</b>	<b>ZAKLJUČKI .....</b>	<b>94</b>
<b>7</b>	<b>POVZETEK.....</b>	<b>96</b>
<b>8</b>	<b>SUMMARY .....</b>	<b>98</b>
<b>VIRI</b>	<b>.....</b>	<b>100</b>
<b>PRILOGE.....</b>	<b>.....</b>	<b>105</b>

**KAZALO PREGLEDNIC**

Preglednica 1:	Seznam devetih podpovodij reke Save z velikostjo porečja ter deležem velikosti prispevnega območja glede na celotno porečje Save.
Table 1:	List of nine subbasins of the Sava River with area data.
Preglednica 2:	Nekatere geografske lastnosti podpovodij reke Save.
Table 2:	Some geographical characteristics of subbasins of the Sava River.
Preglednica 3:	Največje izmerjene vrednosti.
Table 3:	Measured maximums.
Preglednica 4:	Merilna mesta v Sloveniji, za katera so na voljo podatki o višini snežne odeje.
Table 4:	Measurement stations in Slovenia with available data on snow height.
Preglednica 5:	Izmerjeni maksimumi tavanja snega v 24 urah na postajah na porečju Save.
Table 5:	Measured 24-hour snow melt maximums on the Sava River basin.
Preglednica 6:	Seznam vodomernih postaj in podpovodij.
Table 6:	List of water level gages and sub basins.
Preglednica 7:	Seznam razpoložljivih SCA posnetkov.
Table 7:	List of available SCA images.
Preglednica 8:	Merilna mesta za padavine – ombrografi.
Table 8:	Precipitation gages – ombrographs.
Preglednica 9:	Rezultati korelacije za posamezne sezone (Kredarica – Jesenice).
Table 9:	Results of correlations for different winter seasons (Kredarica – Jesenice).

Preglednica 10:	Rezultati korelacije za posamezne sezone (Vogel – Bodešče).
Table 10:	Results of correlations for different winter seasons (Vogel – Bodešče).
Preglednica 11:	Merilna mesta snežne odeje, nadmorska višina, izmerjena debelina snežne odeje ter izračunan vodni ekvivalent.
Table 11:	Locations of snow cover height measurement stations, height above sea level, measured snow cover height and calculated snow-water equivalent.
Preglednica 12:	Parametri iz umerjenega dnevnega modela.
Table 12:	Parameters of the calibrated daily model.
Preglednica 13:	Pregled višine snežne odeje meteoroloških postaj z dne 24. 2. 2003.
Table 13:	Measured snow cover heights on 24 Feb. 2003.
Preglednica 14:	Izračunana količina vode v snežni odeji na dan 24. 2. 2003 za posamezna podpovodja.
Table 14:	Calculated snow water equivalent on 24 Feb. 2003 for all subbasins.
Preglednica 15:	Merilna mesta debeline snežne odeje in pripadajoče podpovodje.
Table 15:	Locations of snow cover height measurements and subbasins.
Preglednica 16:	Primerjava izračunane in izmerjene višine snežne odeje na dan 24. 2. 2003.
Table 16:	Comparison of calculated and measured snow cover height on 24 Feb. 2003.



**KAZALO SLIK**

- Slika 1: Porečje Save s podpovodji v Sloveniji.  
Figure 1: The Sava River basin and its subbasins.
- Slika 2: Modul odtoka za reko Savo za meritve iz obdobja 1971–2000.  
Figure 2: Runoff module for the Sava River for period 1971 to 2000.
- Slika 3: Podpovodja reke Save.  
Figure 3: Subbasins of the Sava River.
- Slika 4: Maksimalna višina snežne odeje na Kredarici.  
Figure 4: Maximum snow cover measured on the Kredarica station.
- Slika 5: Sezonsko trajanje snežne odeje – Kredarica (1955/1956–2005/2006).  
Figure 5: Seasonal duration of snow cover on the Kredarica station (1955/1956–2005/2006).
- Slika 6: Sezonsko trajanje snežne odeje – Ljubljana (1948/1949–2005/2006).  
Figure 6: Seasonal duration of snow cover – the Ljubljana station (1948/1949–2005/2006)
- Slika 7: Odstotek opazovalnih postaj in delež reliefa na določeni nadmorski višini.  
Figure 7: Percentage of measurement stations and relief area on a given height above sea level.
- Slika 8: Merilna mesta snežne odeje na porečju Save.  
Figure 8: Measurements stations of snow cover height on the Sava River basin.
- Slika 9: Zastopanost postaj glede na nadmorsko višino.  
Figure 9: Measurement stations on different heights above sea level.

Slika 10: Tajanje snega za maksimalne, povprečne in minimalne največje izmerjene vrednosti na Kredarici v obdobju 1955–2003.

Figure 10: Maximum, average and minimum measured snow melt values on the Kredarica station for period 1955–2003.

Slika 11: Leta 2007 umerjen poplavni val novembra 1998 na Savi pri Krškem.

Figure 11: In 2007 calibrated flood wave of November 1998 on the Sava River at Krško.

Slika 12: Umerjen poplavni val septembra 2007 na Savi pri Krškem.

Figure 12: The calibrated flood wave of September 2007 on the Sava River at Krško.

Slika 13: Umerjen poplavni val novembra 1998 na Savi pri Krškem.

Figure 13: Calibrated flood wave on November 1998 on the Sava River at Krško.

Slika 14: Umerjen volumen vala pri Krškem – povodje Sava 3 za leto 2007.

Figure 14: Calibrated flood wave volume at Krško – subbasin Sava 3 for 2007.

Slika 15: Umerjen volumen vala pri Krškem – povodje Sava 3 za leto 1998.

Figure 15: Calibrated flood wave volume at Krško – subbasin Sava 3 for 1998.

Slika 16: Verifikacija modela za poplavni val novembra 1990 na Savi pri Krškem.

Figure 16: Model verification of flood wave of November 1990 on the Sava River at Krško.

Slika 17: Verifikacija vala leta 1990 z urnimi podatki za 53 merilnih mest padavin.

Figure 17: Model verification for flood wave of 1990 for hourly data for 53 precipitation gage data.

Slika 18: Ponoven izračun vala leta 1998 z urnimi podatki za 53 merilnih mest padavin.

Figure 18: Re-calculated flood wave of 1998 for 53 available precipitation gage data.

- Slika 19: Prikaz podpovodij Save Dolinke in Save Bohinjke z označenimi merilnimi mesti za snežno odejo in pretok.
- Figure 19: Subbasins of the Sava Dolinka and the Sava Bohinjka with locations of measurement stations for snow cover height and river flow.
- Slika 20: Primerjava pretokov (Jesenice) in višine snežne odeje (Kredarica) za zimo 1990–91.
- Figure 20: Comparison of river flow (Jesenice) and snow cover height (Kredarica) for winter season 1990–91.
- Slika 21: Primerjava pretokov (Bodešče) in višine snežne odeje (Vogel) za zimo 1990–91.
- Figure 21: Comparison of river flow (Bodešče) and snow cover height (Vogel) for winter season 1990–91.
- Slika 22: Primerjava pretokov (Jesenice) in višine snežne odeje (Kredarica) za leto 1991.
- Figure 22: Comparison of river flow (Jesenice) and snow cover height (Kredarica) for 1991.
- Slika 23: Primerjava pretokov (Bodešče) in višine snežne odeje (Vogel) za leto 1991.
- Figure 23: Comparison of river flow (Bodešče) and snow cover height (Vogel) for 1991.
- Slika 24: Rezultati modela za porečje Sava 1.
- Figure 24: Modelling results for subbasin Sava 1.
- Slika 25: Simulirani rezultati modela za porečje Sava 1.
- Figure 25: Simulated modelling results for subbasin Sava 1.
- Slika 26: Simulacija tajanja snežne odeje in pretok reke Savinje.
- Figure 26: Modelling simulation of snow melt and river flow of the Savinja River.
- Slika 27: Lokaciji merilnih mest infiltracije in padavin.

Figure 27: Locations of infiltration and precipitation measurements.

Slika 28: Primerjava meritev padavin, infiltracije ter višine snežne odeje za sezono 2004/2005.

Figure 28: Comparison of precipitation, infiltration and snow cover height for winter season 2004/2005.

Slika 29: Primerjava meritev padavin, infiltracije ter višine snežne odeje za sezono 2005/2006.

Figure 29: Comparison of precipitation, infiltration and snow cover height for winter season 2005/2006.

## **KAZALO PRILOG**

Priloga A1: Korelacije med pretoki izmerjenimi na vodomerni postaji Jesenice na Gorenjskem in višino snežne odeje na postaji Kredarica.

Priloga A2: Korelacije med pretoki izmerjenimi na vodomerni postaji Bodešče in višino snežne odeje na postaji Vogel.

Priloga B1: Grafična primerjava pretokov na vodomerni postaji Jesenice na Gorenjskem in višine snežne odeje na postaji Kredarica.

Priloga B2: Grafična primerjava pretokov na vodomerni postaji Bodešče in višine snežne odeje na postaji Vogel.

Priloga C1: Grafična primerjava pretokov na vodomerni postaji Jesenice na Gorenjskem in višine snežne odeje na postaji Kredarica v obdobju tajanja snežne odeje..

Priloga C2: Grafična primerjava pretokov na vodomerni postaji Bodešče in višine snežne odeje na postaji Vogel v obdobju tajanja snežne odeje.

Priloga D: Rezultati modela: prisotnost snežne odeje na posameznih podpovodjih od 24.2. do 31.3.2003.

## 1 UVOD

Sneg je ena od oblik padavin (dež, rosa, slana, ivje, toča ali sneg) oziroma agregatskih stanj in glede na to se oblikuje tudi vpliv na hidrološki krog. Značilno za snežne padavine je, da se lahko dalj časa zadržijo na površini, preden se vključijo v hidrološki krog (infiltrirajo v tla, odtečejo po površju ali izhlapijo v ozračje).

Sneg ima pomembno vlogo v vodnem krogu v območjih, kjer se zaloge snega kopičijo v zimskem obdobju in nato v spomladanskem in zgodnjem poletnem obdobju sprostito in bogatijo vodotoke. V temu primeru je vloga snega oziroma taljenja snega izjemnega pomena za vodnatost rek v nižinah (Aizen et al., 1996).

V Sloveniji se v zadnjih letih pojavljajo vse bolj obsežna sušna obdobja, ki zmanjšujejo proizvodnjo hidroenergije in slabšajo kvaliteto kmetijstva. Po drugi strani pa so vse pogostejše tudi poplave. Glede na prisotnost snega v Sloveniji v višjeležečih krajih bi lahko z večjim poznavanjem vloge snega v vodnem krogu pripomogli k racionalnejši rabi vode poleti in napovedovanju povečanega vodostaja spomladi. Izpostavljena je predvsem reka Sava, ki ima zaledje v Alpah, kjer je sneg prisoten vsako zimo oziroma vsaj 5 mesecev na leto.

Vpliv taljenja snega na povečano vodnatost rek se da simulirati s hidrološkimi modeli, ki jih lahko tako uporabimo tudi za napovedovanje potencialne nevarnosti poplav zaradi pospešenega tajanja snežne odeje (Stanzel et al., 2008). Za švicarske Alpe je bil na primer razvit model, ki kombinira simulacijo snežne odeje, GIS-a in satelitskih posnetkov in je bil razvit z namenom, da bi z njim napovedovali naravne nesreče, kot so snežni plazovi in poplave, možno proizvodnjo hidroenergije ali za namene turizma (Weibel et al., 2002, 179).

V nalogi bomo na podlagi razpoložljivih podatkov razložili vlogo snega v hidrološkem krogu na porečju reke Save. Snežne padavine so v Sloveniji nekoliko zapostavljene, njihova vloga pa je izrednega pomena zaradi akumuliranja večjih količin vode. Pri opazovanju in merjenju snežnih padavin je najpomembnejši podatek vodni ekvivalent snega, ki nam pove, koliko vode bi dobili, če bi sneg v celoti stalili. Reka Sava ima namreč zaledje v hribovitem področju

Slovenije, kjer je snežna odeja prisotna vsako zimo, kljub temu pa se meritve vodnega ekvivalenta izvajajo le enkrat letno, in sicer ob koncu sezone, ko se izdelava prereza snežne odeje na meteorološki postaji Kredarica.

Cilj naloge je podrobneje opisati procese, povezane s snežnimi padavinami na porečju Save. Ugotoviti želimo, kaj se dogaja s snežno odejo na različnih nadmorskih višinah. Ključno vprašanje je, koliko prispeva tajanje snega v visokogorju k pretoku reke Save ter koliko prispeva tajanje snega k napajanju vodonosnikov. Končni cilj naloge je ugotovitev možnosti napovedovanja povečanih pretokov na podlagi podatkov o snežni odeji in tajanju le-te, to je vpliv tajanja snežne odeje v visokogorju na količino vode v reki Savi ter poplavni potencial reke Save.

Hipoteza, ki jo želimo preveriti, je, da snežna odeja v visokogorju prispeva nek delež k pretokom rek z zaledjem v visokogorju. Ta delež se še poveča, ko na snežno odejo padejo spomladanske padavine. Ko se snežna odeja zasiči z vodo, se sprostijo večje količine vode, ki lahko ob ugodnih razmerah povzročijo poplave (Sui et al., 2007).

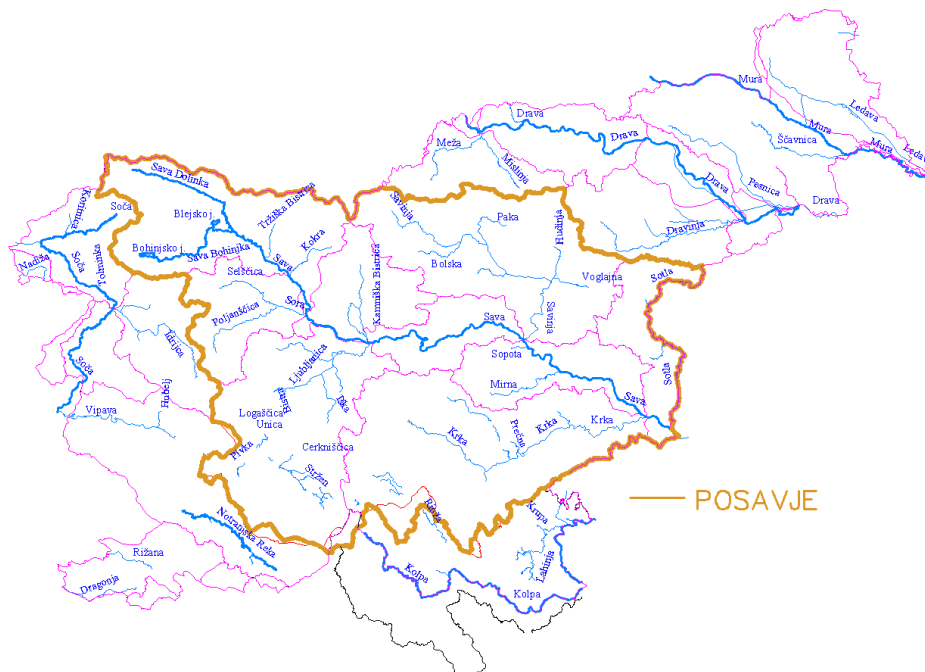
Modeliranje vpliva tajanja snežne odeje na pretoke reke Save pa bo tudi dobra strokovna podlaga za načrtovanje protipoplavnih ukrepov in optimizacijo obratovanja bodočih hidroelektrarn.

## 2 POREČJE SAVE

Posavje je največje porečje v Sloveniji. Obsega 10.746 km<sup>2</sup>, kar je 53 % deleža ozemlja Slovenije. Dolžina rečnega omrežja znaša 13.950 km oziroma 1,3 km/km<sup>2</sup>. Z dolžino toka 221 km je Sava tudi najdaljša slovenska reka. (Kryžanowski et al., 2007)

Sava vzdolž svojega toka prečka geološko, geomorfološko, orografsko, klimatsko in vegetacijsko razgibano območje, ki ga sestavljajo naslednje hidrogeološke enote: alpsko, predalpsko hribovje, porečje Savinje, ravninska dela Ljubljanske in Krške kotline ter porečji Ljubljanice in Krke. Značilnosti, ki bolj ali manj izrazito nastopajo na posameznih območjih, povzročajo različne rečne režime odtoka, od snežnodežnega (nivalpluvialnega) do dežnosnežnega (pluvionivalnega).

Pomembnejši pritoki Save v Sloveniji so Tržiška Bistrica, Kokra, Sora, Kamniška Bistrica, Ljubljanica, Savinja, Mirna, Krka in Sotla (slika 1).



Slika 1: Porečje Save s podpovodji v Sloveniji.

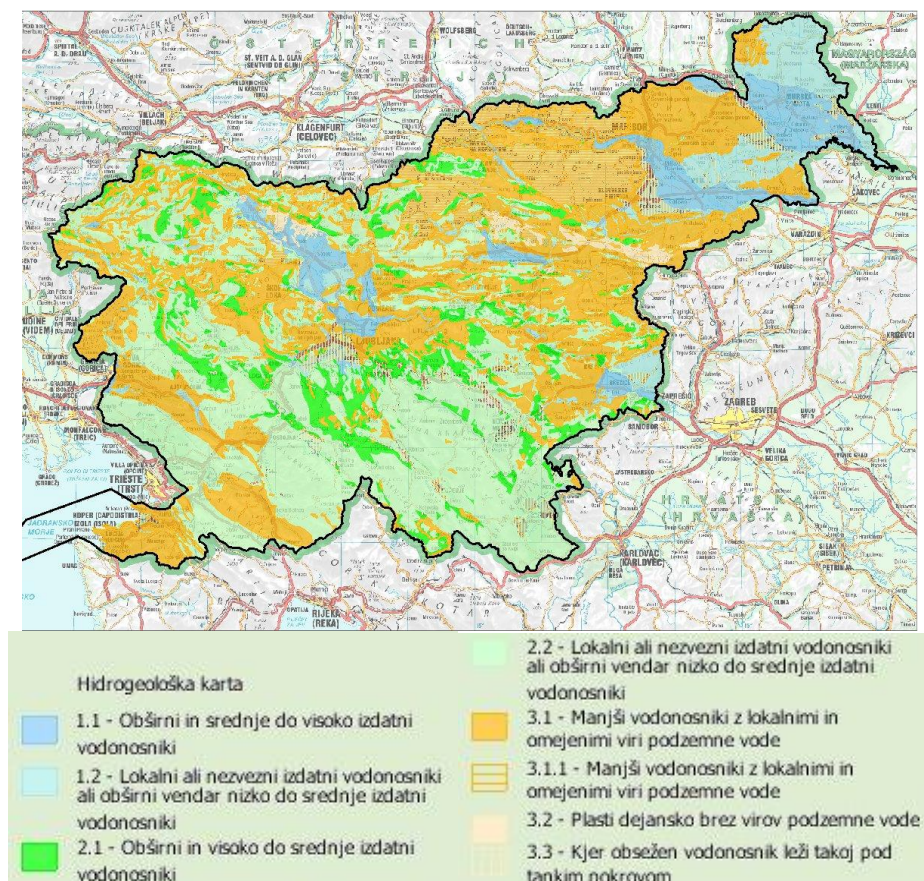
Figure 1: The Sava River basin and its subbasins.



## 2.1 Geološke in hidrogeološke značilnosti Posavja

Glede na geološke in hidrogeološke karakteristike (slika spodaj) lahko razdelimo porečje Save v glavnem na naslednje hidrogeološke enote:

- alpsko območje,
- predalpsko hribovito območje,
- ozemlje visokega Krasa, ki ga odvodnjavata Ljubljanica in Krka,
- porečje Savinje in Zasavsko območje,
- ravninski predeli Ljubljanske in Krške kotline,
- porečje Sotle in porečje Kolpe. (Kryžanowski et al., 2007)



Hidrogeološka karta. (<sup>1\*</sup> ARSO, 2009)

Hydrogeological map. (<sup>1\*</sup> ARSO, 2009)

Opisi naštetih hidrogeoloških enot porečja Save sledijo v podglavljih 2.1.1–2.1.5.

### **2.1.1 Alpsko območje**

Območje srednje Save zajema značilnosti alpskega, predalpskega hribovitega območja, območje visokega Krasa ter ravninskih predelov Ljubljane.

Območje Alp, kamor spadajo Julijske in Savinjske Alpe ter del Karavank, je grajeno v glavnem iz prepustnih karbonatnih kamnin, ki so posebno na visokih planotah močno zakrasele. Večji del padavinske vode zato ponikne v zakraselo notranjost ter prihaja na dan v številnih večjih ali manjših izviroh ob vznožju visokih alpskih masivov oziroma v globoko zarezanih dolinah ob stiku z neprepustnimi kameninami in ob prelomih. Prav te ozke hidrogeološke pregrade zaježujejo in usmerjajo pretakanje podzemnih voda. Območje visokogorskega sveta odvodnjavajo Sava, Tržiška Bistrica, Kokra in Kamniška Bistrica s pritoki. (Kryžanowski et al., 2007)

### **2.1.2 Predalpsko hribovito območje**

Predalpsko hribovito območje sestavljajo Idrijsko-Žirovski hribi, Škofjeloško-Polhograjsko hribovje in Posavske gube. To ozemlje je grajeno iz različnih vrst kamenin z zelo zapleteno tektonsko zgradbo, kar je tudi vzrok za zapletene hidrogeološke razmere. Prevladujejo neprepustne, flišu podobne kamenine različne starosti, apnenec in dolomit nastopata le v podrejeni vlogi. Karbonatne kamenine so ob prelomih pogosto stisnjene med slabo prepustne in neprepustne kamenine, ki jih sestavljajo razni skrilavci, laporovci, peščenjaki, tufi in predornine. V teh karbonatnih masivih so zato akumulirane le manjše količine podzemne vode. Ta voda se drenira v številnih stičih in prelivnih izviroh oziroma izviroh kraškega tipa. Na tem ozemlju ni večjih akumulacij podzemne vode. (Kryžanowski et al., 2007)

### **2.1.3 Ozemlje visokega Krasa**

V ozemlje visokega Krasa spadata porečji Ljubljane in Krke. Ozemlje je v glavnem zgrajeno iz prepustnih karbonatnih kamnin, različno starih apnencev in dolomitov. Mednje so vložene plasti neprepustnih kamnin, terciarni flišni lapor in peščenjak, mezozojske in paleozojske klastične kamenine itd., ki si slede v glavnem v dinarsko usmerjenih pasovih.

Porečje Ljubljanice lahko v glavnem razdelimo na tri enote: povirni del zgornje Pivke in Postojnske kotline, povirno območje na notranjskih kraških poljih do Vrhnike in Ljubljansko barje s svojim obrobjem. Zgornja Pivka zbira vode z obrobja Javornikov in fliša Postojnske kotline. Zapletena geološka zgradba tega območja je vzrok, da se v Pivko iz Javornikov preliwa le manjši del vode, večji del pa odteka v izvir Malenščice na Planinskem polju. Vode, ki se zberejo na območju Postojnske kotline, poniknejo v Postojnski jami ter izvirajo ponovno na Planinskem polju. Prav tako pritekajo na Planinsko polje tudi vode iz izvirov pri Prezidu, ki jih napajajo podzemne vode Snežnika. Vode pri Prezidu poniknejo in se pojavijo na obrobju Cerknjske doline. Izvire jugozahodnega obrobja napajajo tudi vode Bloške planine.

Na Cerknjskem polju ponikuje voda v skupinah požiralnikov. Požiralniki na severozahodnem robu odvajajo vodo mimo Rakovega Škocjana na Planinsko polje, kjer ta ponikne v severovzhodnem delu kotline. Ta voda napaja neposredno izvire na obrobju Ljubljanskega barja. Izviri pri Vrhniki, izviri Male in Velike Ljubljanice, Ljubije in Bistre so osrednji izviri v porečju Ljubljanice. Vanje se stekajo vode s Planinskega in Loškega polja, ponikovalnice pri Hotedrščici, potoki z Logaških rovt itd. (Kryžanowski et al., 2007)

#### **2.1.4 Ljubljanska kotlina**

Ravninske predele Ljubljanske kotline tvorijo večja polja oziroma kotline, prekrte v večji debelini s kvartarnim prodom, peskom in konglomeratom. Prodni zasipi so porozni in prepustni ter predstavljajo velike zbiralnike podtalnice.

Ljubljanska kotlina obsega dva važnejša rezervoarja podtalnice: Kranjsko-Sorško in Ljubljansko polje. V prodnem zasipu Kranjsko-Sorškega polja je poleg globokega, dokaj debelega vodonosnega sloja še plitvejši horizont, ki se napaja izključno s padavinami. Tudi Ljubljansko polje je pomemben zbiralnik vode. Na neprepustnih paleozojskih skrjavcih in peščenjakih leže debele plasti kvartarnega proda in konglomerata z vložki gline. Vodonosna plast je debela od 8 m pri Mednem do 70 m v Klečah. Napaja se delno iz padavin, ki padejo na polje, delno pa iz Save. (Kryžanowski et al., 2007)

## 2.2 Hidrografske značilnosti reke Save

Reko Savo lahko glede na lastnosti toka razdelimo na tri dele, in sicer na zgornjo, srednjo in spodnjo Savo. Zgornja Sava je tok od izvira do Medvod oziroma do vtoka Sore, srednji del je od Medvod do vtoka Savinje, spodnja Sava pa je od sotočja s Savinjo do državne meje.

### 2.2.1 Zgornja Sava

Povirje Save, ki ga tvorita Sava Dolinka in Sava Bohinjka s pritoki, je bogato s padavinami. Količine vod tega dela porečja zgornje Save so nadpovprečno velike. V nekaterih delih Julijskih Alp znaša letni odtok v povprečju tudi preko 3500 l/m<sup>2</sup>. Ozke doline z velikimi vzdolžnimi padci dajejo rekam hudourniški značaj. Padavine hitro odtečejo in vodno stanje zelo niha. Prepustnost in močna zakraselost karbonatnih kamnin v območju Julijskih Alp, kamor segata porečji Dolinke in Bohinjke, so vzrok, da je gostota rečne mreže tega območja nizka; okrog 0,7 km/km<sup>2</sup>. Porečje Save Dolinke meri 521 km<sup>2</sup>, Save Bohinjke pa 381 km<sup>2</sup> do njunega sotočja. Navkljub manjšemu povodju je Bohinjka mnogo bolj vodnata od Dolinke. (Kryžanowski et al., 2007)

Sava Dolinka izvira na dnu planega sveta, ki se razteza od Zelencev do belopeškega zaselka Pod klancem in predstavlja razvodnico med porečjem Save Dolinke in porečjem Jezernice /Rio del Lago/. Voda iz Tamarja teče v prodovju pod površino in odteka na obe strani, proti Savi in proti Jezernici (Trbižu). Kot Sava Dolinka prihaja na dan v obsežnih tolmunih v Zelencih, med Podkorenem in Ratečami na višini 837 m. Površinski dotok v Zelence je le ob deževju, zlasti pa na pomlad, ko se topi sneg. (Kryžanowski et al., 2007)

Od izvirov teče Dolinka proti vzhodu po sorazmerno prostrani dolini, ki je zasuta z morenskimi drobirjem, gruščem in prodom. Dolina se zoži pri kraju Gozd Martuljek in vodi Savo do Žirovnice, kjer je zajezena v akumulacijskem jezeru hidroelektrarne Moste. Pod pregrado zavije proti jugu na Radovljiško kotlino, ki je zgornji del Ljubljanske kotline in je bila čelna kotanja ledenikov Julijskih Alp in Karavank iz podkorenske, radovljiške in

bohinjske doline. Kotlina je debelo zasuta s fluvio-glacialnim materialom, v katerem je struga Save vrezana 70–90 m globoko, prav do miocenske ilovice. (Kryžanowski et al., 2007)

Pritoki Dolinke z leve strani iz Karavank so krajši in izrazito hudourniškega značaja. Pritoki z desne strani segajo v osrčje Julijskih Alp in tečejo deloma podzemno v globoko vrezanih dolinah, napolnjenih z drobirjem in gruščem. Največji desni pritok Save Dolinke je Radovna, ki se do Save prebije skozi tesen Vintgar. (Kryžanowski et al., 2007)

Sava Bohinjka izvira v pobočju Komarče kot Slap Savica in se kot Savica izliva v ledeniško Bohinjsko jezero (523 m n. m.). Iz jezera teče proti Bohinjski Bistrici po sorazmerno široki dolini. V tem odseku dobi manjše pritoke, z leve Mostnico, z desne pa Bistrico in Belco. Pri Nomnju se dolina zoži v tesno Sotesko do Bohinjske Bele, ki so jo vode reke vrezale med zakraseli planoti Pokljuko in Jelovico. Pod Bohinjsko Belo se dolina prične širiti v Blejsko–Radovljiško kotlino, ki je prekrita s kvartarnim zasipom. Na tem odseku si je Bohinjka izdolbla globoko strugo, ki doseže pri Bodeščah globino 80 m. V dolino Save Bohinjske priteka velik del vode po podzemlju skozi zakraselo notranjost visokih planot in ima le nekaj površinskih pritokov. (Kryžanowski et al., 2007)

Pri Radovljici se Sava Bohinjka (380 km<sup>2</sup>) in Sava Dolinka (521 km<sup>2</sup>), združeni v Savo, prebijeta iz ledeniških dolin v širok svet. Po sotočju teče Sava po zgornjem delu Ljubljanske kotline, do Podnarta, vijugavo, naprej pa v sorazmerno ravnem toku proti jugovzhodu. Na tem odseku večino podzemnih voda z Jelovice zbira z desne Lipnica (44 km<sup>2</sup>). (Kryžanowski et al., 2007)

Pri Naklem se z leve strani v Savo izliva Tržiška Bistrica (146 km<sup>2</sup>), ki se s 27 km dolgim tokom izpod Karavank prebije prek Kamniško-Savinjskih Alp proti izlivu v Savo. V bližini Kranja dobi dolina obliko tesne debri, vrezane v debele sklade labore, ki prekrivajo celotno Sorško–Kranjsko ravan. (Kryžanowski et al., 2007)

V Kranju se z leve strani, v območju akumulacijskega bazena hidroelektrarne Mavčiče, izliva v Savo Kokra (221 km<sup>2</sup>). S povirjem sega v vznožje Karavank, nato se prebije skozi

Kamniško-Savinjske Alpe do Preddvora, kjer se vreže v nanose lastnega vršaja. (Kryžanowski et al., 2007)

Vse padavine na Sorško-Kranjsko polje med Kranjem in Smlednikom tu pronicajo v tla ter prehajajo v podzemno vodo. Struge Save pod Kranjem do Smlednika ne doseže noben površinski vodotok. (Kryžanowski et al., 2007)

Gorvodno od Medvod se je Sava po epigenezi vrezala v konglomerat in njena struga se je v tem odseku zožila. Povečan padec je bil izkoriščen do izliva Sore, ki je desni pritok Save, s hidroenergetskima stopnjama HE Mavčiče in HE Medvode. (Kryžanowski et al., 2007)

## **2.2.2 Srednja Sava**

Območje srednje Save po hidrovidikih je osrednji del Ljubljanske kotline in Zasavje.

Ljubljanska kotlina je na debelo zasuta s prodom, ki ga je Sava s svojimi pritoki nanese v mlajši pliocenski in zlasti kvartarni dobi.

Sora se izliva v Savo z desne strani dolvodno od Zbiljskega jezera, ki je akumulacijski bazen hidroelektrarne Medvode. Od nekdaj je Sora pritekala iz neledeniškega predela, zato se je morala umikati pred prodno poplavo Save in se držati tesno južnega roba kotline. Sora s Poljansko in Selško Soro odvaja vode iz Škofjeloškega hribovja, na katerem je zaradi geološke sestave tal bogato razvita mreža površinskih voda. Povirje Sore se nahaja v predalpskem hribovju, ki tu zajema Škofjeloško-Polhograjsko, Idrijsko-Cerkljansko hribovje. Pobočja so zelo strma in zelo razgibana. Geološka zgradba je neenotna iz pretežno neprepustnih kamnin, med katere so stisnjene ali narinjene manj prepustne karbonatne kamnine, apnenec in dolomit. Na stikih kamnin prihaja na dan podzemna voda v številnih izvirih. Sora je hudourniška in pogosto visoka. Površina porečja je 636 km<sup>2</sup>, njena rečna mreža pa je dolga 1285 km. (Kryžanowski et al., 2007)

Sava teče od izliva Sore do izliva Ljubljanice po Ljubljanskem polju. Tu ni več vrezana v konglomerat, temveč pretežno v prodnate zasipe kvartarnih sedimentov. Ljubljansko polje je obsežen savski vršaj, nasut v dobi würmske poledenitve. Tu teče Sava danes po severni strani, na robu ravnine vršaja, kjer je zašla na škrljevece obrobja pri Mednem, v Tacnu in Črnučah. (Kryžanowski et al., 2007)

V območju Ljubljanskega polja dobiva Sava do Kamniške Bistrice in Ljubljanice le manjše pritoke, pri Mednem z desne strani Marelščico (21 km<sup>2</sup>), nad Ježico pa z leve Gameljščico (78 km<sup>2</sup>). (Kryžanowski et al., 2007)

Največja pritoka Save na Ljubljanskem polju sta oba na spodnjem delu. To sta Kamniška Bistrica in Ljubljanica, ki je sploh največji pritok Save. Pritoka se izlivata v Savo, po toku le malo vsaksebi, Bistrica z leve, Ljubljanica z desne strani.

Kamniška Bistrica je 33 km dolga reka s 540 km<sup>2</sup> velikim porečjem (5 % porečja Save). Izvira v tipični kraški kropi ob vznožju Kamniških Alp, kjer prihaja na dan iz votlikave notranjosti karavanškega masiva kot kraški odtok, vendar z gorskim značajem. Pod Kamnikom se dolina Kamniške Bistrice močno razširi. Med Mengšem, Trzinom in Lukovico je najobsežnejša. Kamniška Bistrica je s fluvio-glacialnim prodromom v preteklosti na debelo prekrila svojo dolino, najbolj pa jo je zasipala v času diluvialne poledenitve. (Kryžanowski et al., 2007)

Ljubljanica, tipično kraška reka ponikalnica, sodi med tri največje pritoke Save, ob Savinji in Krki. Zbira vode s Cerkniskega kraka, ki sega od izvira Trbuhovica na Hrvaškem in s pivškega izpod Knežaka. Ponikle vode pridejo spet na dan na Loškem polju v izvirih Obrha, ki ponikne v Golobji jami in prihaja na dan na Cerknisko polje pri Gornjem jezeru kot Stržen. Vode s Cerkniskega jezera, ki ob povprečni ojezeritvi pokriva 25 km<sup>2</sup> s 76 milijoni m<sup>3</sup> vode (največji 40 km<sup>2</sup>), poniknejo v zakraselo Rakovsko-Javorniško podzemlje, tečejo proti Vrhniki in izvirajo v izvirih Ljubije in Bistre. (Kryžanowski et al., 2007)

V Malograjski jami se Rakovsko-Javorniškem toku pridruži Postojnsko-Javorniški podzemni tok in reka Pivka, ki je drugo povirno območje Ljubljanice. Pivka ponika v Postojnsko jamo

in izvira v Planinski jami kot Unica. V nadzemnem toku se vije po Planinskem polju, kjer sprejme mrzlo Malenščico. Tudi Unica ponikne, v podzemlju se združi s poniklima Hotenjko in Logaščico, vse skupaj pa privrejo kot Ljubljanica na dan v izvirih Močilnika in Retovja na Vrhniki. (Kryžanowski et al., 2007)

Od izvirov na jugozahodu Ljubljanskega barja teče Ljubljanica sklenjeno do izliva v Savo. Preko Barja (površina Barja je  $167 \text{ km}^2$ ) teče že od časa Rimljanov regulirana z minimalnim padcem. Od pritoka hudourniške Gradaščice v Ljubljani se njen značaj spremeni. Vreže se v prodni nasip Ljubljanskega polja. Zasipavanje Ljubljanske kotline s prodom Save je strugo Ljubljanice odmikal na njen južni rob in se izliva v Savo šele v zožitvi kotline. (Kryžanowski et al., 2007)

Velikost porečja Ljubljanice je po do sedaj opravljenih raziskavah  $1890 \text{ km}^2$ , kar pomeni slabo desetino površja Slovenije. Njeno porečje obsega velikost 18 % porečja Save, kar jo uvršča na drugo mesto po velikosti. Ljubljanica je po obsegu porečja enakega velikostnega razreda kot Sava do trosotočja in meri  $2300 \text{ km}^2$ . Po sotočju pripada Savi kar 40 % deleža iz porečja Ljubljanice od skupno  $4714 \text{ km}^2$  porečja Save. (Kryžanowski et al., 2007)

Med Zalogom in Dolskim zdrkne Sava v dolino Savskega hribovja Zasavje. Dolina se s tokom Save postopoma zožuje. Na začetnem delu je še sorazmerno široka in na debelo terasasto prekrita s kvartarnim prodom. Do Ponovič dobi Sava z obeh strani krajše in manjše pritoke. Desni so Gradolski potok, Gostinca ( $11 \text{ km}^2$ ), Lučna, Slapnica, Jevnica ( $11 \text{ km}^2$ ), Slatnarjev, Cvarjev in Presenčev potok, Potoški graben, Drnik, Berečanov in Bedenov graben ter največji pritok Reka ( $96 \text{ km}^2$ ). Levi pritoki so Mlinščica ( $27 \text{ km}^2$ ), Grabnarjev in Tamackov graben, Stajski potok, Močilnik, Zaloški, Lovšetov, Dešenski in Loki potok, Prihudnik, Ravbarjev in Rafelnov graben. (Kryžanowski et al., 2007)

Med Ponovičami in Spodnjim Logom prestopi Sava iz karbonskega ozemlja v apniško-dolomitno območje. Značaj njene doline se takoj spremeni. Od tu dalje teče Sava po tipični debri, večinoma v tesni soteski, kjer ni več prodne in ilovnate nasipine. Pobočja se vzpenjajo zelo strmo. Na mnogih strminah so obširne goljave. (Kryžanowski et al., 2007)



Številni, povečini kratki hudourniki pritekajo neposredno v Savo. Omembe vredni desni pritoki so Maljek, Pasjek (14 km<sup>2</sup>), Šumnik, Smeškovec, Šklendrovec (16 km<sup>2</sup>), Mitovski slap, Ribnik in Koritnikov graben. Z leve strani so večji pritoki Konjski potok, Vidrnica, Savski potok (10 km<sup>2</sup>), Mošnjak, Mošenik (12 km<sup>2</sup>), Medija (98 km<sup>2</sup>), Trboveljščica (25 km<sup>2</sup>), Boben (31 km<sup>2</sup>) in Suhadolski graben. S širšega območja odvodnjavajo teren le trije največji od naštetih potokov: Medija, Trboveljščica in Boben oz. Bobnarica. (Kryžanowski et al., 2007)

Meja med spodnjim in zgornjim Zasavjem poteka med Hrastnikom in Radečami na območju, kjer je Sava prerezala apniško-dolomitno triado, ter načela v njihovi osnovi würfenske škriljevce. Do Zidanega mosta teče Sava večinoma po živoskalni strugi dna doline. (Kryžanowski et al., 2007)

### **2.2.3 Spodnja Sava**

Savinja se v Savo izliva pri Zidanem mostu. Porečje Savinje zajema v povirnem zgornjem toku, v Logarski dolini, območje vzhodnih Karavank in Savinjskih Alp, grajenih iz karbonatnih kamnin, zakraselega apnenca in iz dolomita. Pod Lučami do Celja in Zidanega mosta gradijo ozemlje manj prepustni skrilaenci, tufi ter peščenjaki in gline. Le delno se med njimi pojavljajo prepustni apnenci in dolomiti. Neprepustne terciarne, mezozojske in paleozojske kamnine sestavljajo pretežni del ozemlja porečja Voglajne, ki zbira vode z najbolj vzhodnega dela porečja Savinje. Neprepustni terciarni sedimenti, ki obdajajo Celjsko kotlino, sestavljajo tudi njeno dno, prekrito s prodno plastjo, ki je pomemben vodni vir podzemne vode. (Kryžanowski et al., 2007)

Savinja je od pritokov Save tretja po velikosti porečja, njena dolžina pa presega 100 km. Na porečje Savinje odpade 17 % ozemlja porečja Save ali 1848 km<sup>2</sup>. Zaradi odtočnih značilnosti ima Savinja največji vpliv na visoke vode Save, večji od pritokov kraške Ljubljani in Krke, pri katerih so visoke vode zadrževane. (Kryžanowski et al., 2007)

Dolvodno od pritoka Savinje teče Sava proti Radečam po še odpornejših kamninah, apnencih in dolomitih. Pri izlivu Sopote prestopi v karbonsko jedro litijske antiklinale. Dolina se razširi in ostane taka do Sevnice, kjer se zoži v kratko deber, ki se ob izlivu Mirne nekoliko razširi. Dolvodno od izliva Mirne (295 km<sup>2</sup>) in Sevnice (44 km<sup>2</sup>) preide ponovno v triadni apnenec, najprej v školjkovitega, proti Brestanici pa je vrezana v dachsteinski apnenec in dolomit. (Kryžanowski et al., 2007)

Med Sevnico in Krškim se izteka v Savo nekaj predvsem hudourniških pritokov, večja od njih sta Blanščica (28 km<sup>2</sup>) in Brestanica (76 km<sup>2</sup>). Dolina Save je strma vse do Vidma, ki je zadnja prava soteska v savskem toku. Od Vidma dalje teče Sava samo še po ravnini (do izliva v Donavo). Sava se najprej umiri v prostrani Krško-Brežiški ravnini, kjer teče v plitvi strugi po svoji nasipini. Krška kotlina je prekriti z debelo plastjo kvartarnega proda in konglomerata. Vmes se nahajajo večji ali manjši vložki gline. Dno kotline sestavljajo neprepustne terciarne plasti. Na Krškem polju vse padavine poniknejo in napajajo zaloge podzemne vode, ki so pomembne predvsem za vodooskrbo. Z leve strani se le izteka v Savo več potokov, med njimi je največji Močnik (42 km<sup>2</sup>). (Kryžanowski et al., 2007)

Krka se izteka v Savo pri Čatežu in je po velikosti porečja največji pritok Save z 21 % porečja Save ali 2315 km<sup>2</sup> površine (ob upoštevanju večjega kraškega dela Ljubljane, ki obsega okrog 1100 km<sup>2</sup>, je Ljubljana večja od Krke, katere podzemni del je velikosti okrog 800 km<sup>2</sup>). Porečje Krke zajema ozemlje visokega krasa. Grajeno je pretežno iz močno razpokanih, zakraselih in prepustnih karbonatnih kamnin apnenca in dolomita. Vode hitro poniknejo in pritekajo na dan v številnih izviri na obrobju dolin. Na porečju Krke je iz manj prepustnih kamnin grajeno le ozemlje, ki pripada pretežno pripadajočemu Krškemu hribovju. (Kryžanowski et al., 2007)

Prostrana Krško-Brežiška ravnina prehaja ob spodnji Sotli v hrvaško Posavino. Evropska meja Slovenije sega tu na levi strani Save do izliva Sotle, na desni strani Save pa nekoliko dolvodneje, do izliva potoka Bregana.

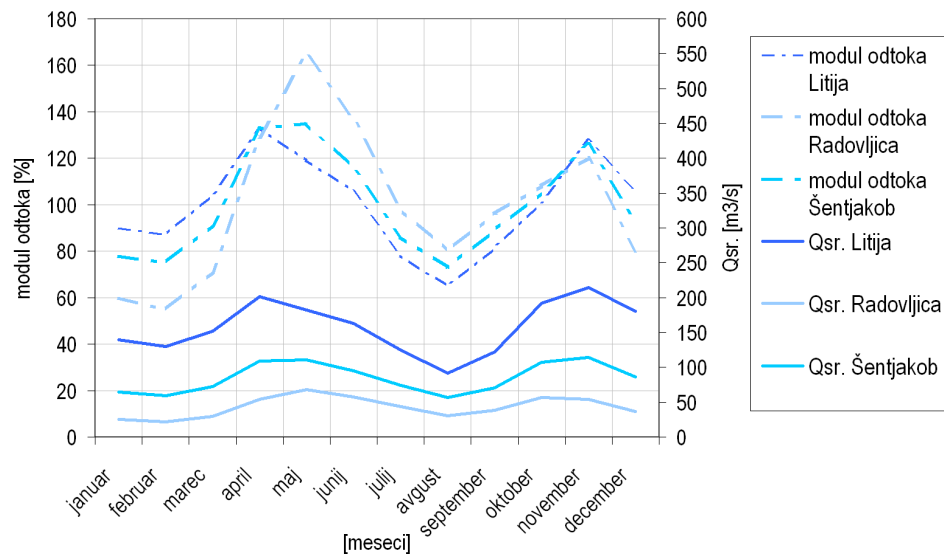
## 2.3 Hidrološke značilnosti reke Save

Veliko rek na porečju Save ima hudourniški značaj. To pomeni, da pretoki zelo hitro narastejo in tudi hitro upadejo, večji del vode pa odteče ob visokovodnih ali celo poplavnih valovih. Na večini rek nastopajo visoke vode najpogosteje pozno spomladi-poleti in jeseni. Ponavadi nastanejo ob odjugi, taljenju snežne odeje in izdatnih padavinah. Intenzivne lokalne padavine povzročijo lokalne poplave hudourniškega značaja, ki prizadenejo le manjša porečja. Vodotoki s hudourniškim značajem so še posebej ranljivi v času malih pretokov in hidrološke suše. Le-ti niso tako očitno vezani na določen letni čas, najbolj običajni so v poznem poletju in zgodnji jeseni.

Vodostaji in pretoki so v primeru suše lahko zelo nizki v mesecu oktobru in novembru ter nasprotno zelo visoki v primeru deževne jeseni. Na zgornji vodomerni postaji Radovljica je zimski minimum izrazitejši od poletno-jesenskega zaradi večji nadmorskih višin, medtem ko je v profilu Šentjakob že primaren minimum v septembru. Bolj ko se oddaljujemo od visokogorskega povirja Save, bolj izrazit postaja primarni poletno-jesenski minimum. (ARSO, 2008)

V enakem smislu kot pri minimumu so prisotni tudi maksimalni pretoki, ki so v Radovljici spomladi (april, maj, junij), kot posledica topljenja snega, in jeseni (oktober, november), ko odteče 21 % celoletnega odtoka (slika 2). V profilu Šentjakob pa se okrepi pluvialna komponenta odtoka in tudi jesenski odtok je večji kot spomladanski. Dotok Ljubljanice pomeni končno prevlado pluvialnega odtoka. (ARSO, 2008)

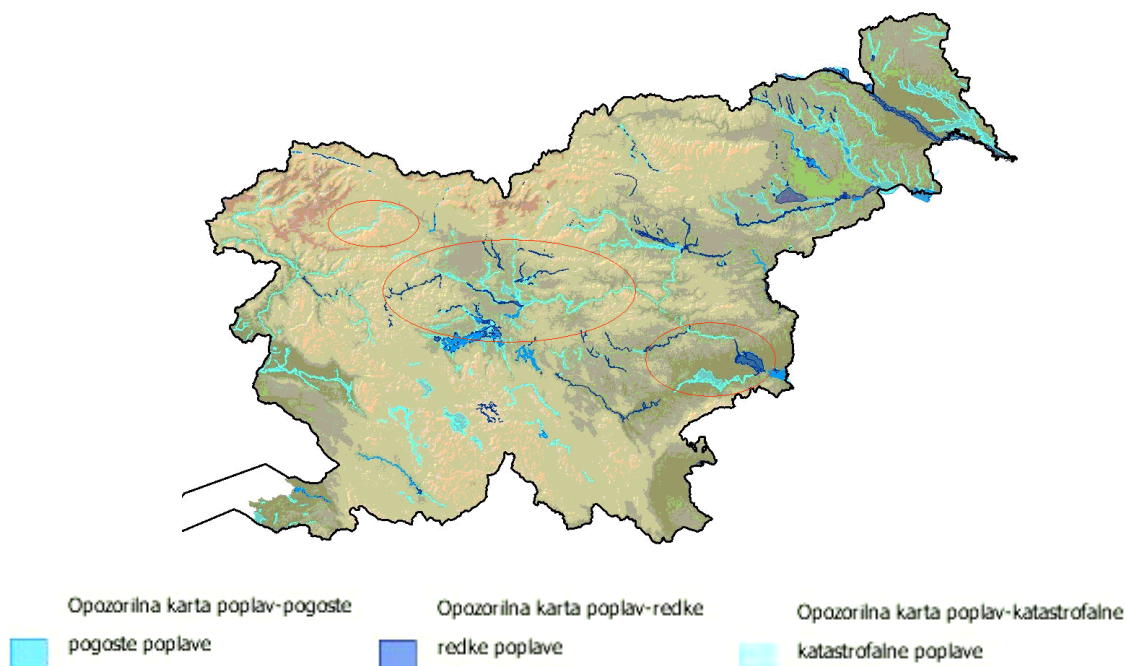
Izrazito visok koeficient variacije januarja, februarja, avgusta in septembra kaže na odvisnost nastopa visoke vode od padavinskih in meteoroloških pogojev. Zaradi hudourniškega značaja zgornjega dela Save za večino njenih pritokov predstavljajo visoke vode običajno katastrofo z različnimi posledicami. (ARSO, 2008)



Slika 2: Modul odtoka za reko Savo za meritve iz obdobja 1971–2000.

Figure 2: Runoff module for the Sava River for period 1971 to 2000.

Vsakoletne poplave zalijejo okrog 2300 hektarjev površin. Več kot polovica (54 %) vsega poplavnega sveta je v porečju Save, ki mu pripada 58 % ozemlja države. Več manjših poplavnih predelov na porečju Save je ob Krki, Temenici, Mirni in ob njihovih pritokih. Ljubljansko barje, ki je na meji med alpskim in dinarskim gorskim sistemom, pa je najboljšežnejše poplavno območje (URSZR, 2008) (slika na naslednji strani). Poplave ogrožajo predvsem hudourniške grape, dolinska dna in aluvialne ravnice, ki so marsikje pozidane (Komac et al., 2008).



Opozorilna karta poplav – obkrožena so poplavna območja reke Save. (<sup>1\*</sup> ARSO, 2009)

Flood endangered area along the Sava River – circled in red. (<sup>1\*</sup> ARSO, 2009)

## 2.4 Meteorološke razmere na porečju Save

Predstavljeni sta meteorološki spremenljivki, ki v največji meri vplivata na snežno odejo in tajanje snežne odeje, to sta količina padavin in temperatura zraka, ki sta tudi najpomembnejša vhodna podatka pri modeliranju hidroloških procesov.

### 2.4.1 Padavine

Največ padavin pade v Sloveniji tedaj, ko pride nad naše kraje iznad Sredozemlja vlažen in relativno toplejši zrak. Zaradi prisilnega dviganja ob alpsko-dinarski gorski pregradi se zrak ohlaja in iz njega se v obliki padavin izloči vsa odvečna vodna para. To je vzrok, da leži maksimum letne vsote padavin v zahodnih predelih Julijcev in na alpsko-dinarski pregradi. Drugi, nekoliko manjši maksimum pa beležimo v Kamniško-Savinjskih Alpah. Količina padavin od morja proti severovzhodu pada in v krajih blizu meje z Madžarsko povprečna

7letna višina padavin ne doseže niti 900 mm. V najbolj namočenih predelih Slovenije pade v povprečju štirikrat več padavin kot v najbolj sušnih. Zahodni Julijci, kjer povprečna letna višina padavin krepko presega 3000 mm, sodijo po količini padavin med najbolj namočena območja v Evropi. (<sup>1\*</sup>Habjan, 2006)

Zbirna površina povodja Save, ki meri v Sloveniji preko 10 000 km<sup>2</sup>, ima nedvomno velik vpliv na padavinsko problematiko. Pri velikih povodjih je bistvena prostorska komponenta oziroma porazdelitev padavin po povodju. To, da prehaja povodje Save iz alpskega sveta preko sredogorja v ravninski svet, pa pomeni dodatno težavo pri obravnavanju padavinske problematike.

Na obravnavanem porečju na padavine vplivajo parametri, kot so (Primožič, 2007):

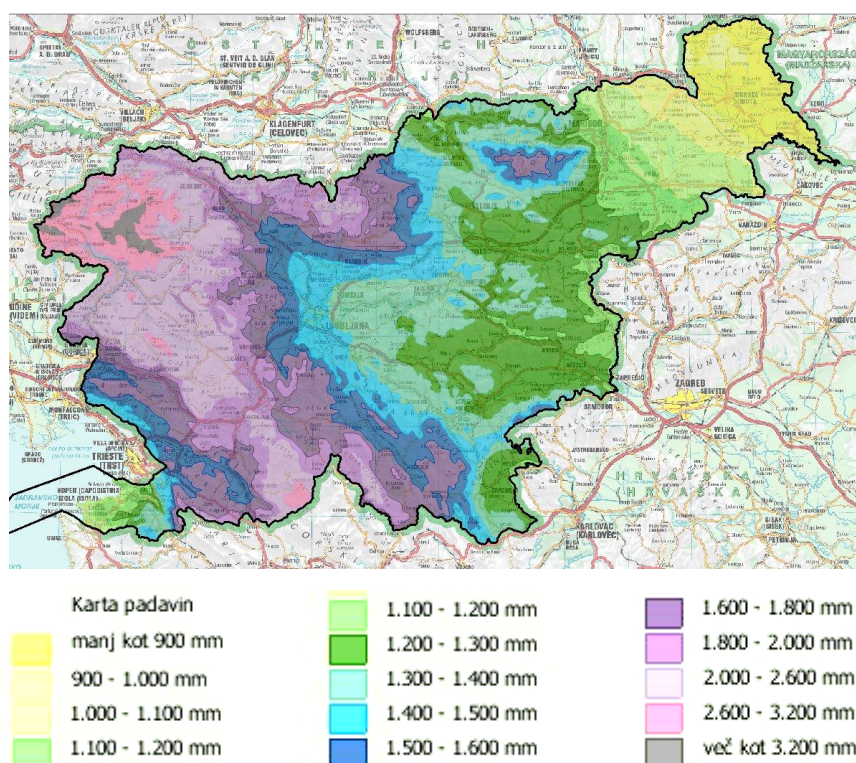
- Relief – količina padavin z nadmorsko višino običajno narašča, vendar le do višine 2500 m. Nad to višino se količina padavin zmerno povečuje ali celo zmanjšuje.
- Biosfera – del padavin se zadrži na biosferi. Večji del teh padavin izhlapi in niti ne prispe do tal. Količina prestreženih padavin je odvisna od lastnosti padavin (intenziteta, trajanje), vrste in gostote rastlin (drevje, grmovje) ter od obdobja v letu (vegetacijsko ali zunajvegetacijsko obdobje). Na območju, ki je gosto poraščeno z gozdom, lahko drevesa prestrežejo tudi do 25 odstotkov letnih padavin.
- Večja mesta – imajo pogosto nekoliko višje padavine od okolice. V mestih so padavine tudi pogostejše.

Na območje Posavja pade letno v povprečju 1567 mm padavin, od tega izhlapi 641 mm, kar predstavlja 41 %, torej znaša odtočni količnik 59 % (obdobje 1961–90) (ARSO, 2008). Letna višina padavin pada od severozahoda (prve orografske ovire prihajajočim vremenskih frontam) proti vzhodu ali vzdolž toka reke Save (slika na naslednji strani). Padavine praviloma zajamejo celotno povodje, pri čemer je intenziteta padavin na zgornjem delu povodja Save in Savinje bistveno višja kot na ostalem delu. V povprečju je trajanje padavin štiri do sedem dni in v celotnem obdobju padavin sta en ali dva dneva, ko so padavine izredno intenzivne (obdobje 1951–87) (VGO, 1987). Odtočni koeficienti so visoki zaradi prehodnih padavin oziroma zimskih odtočnih pogojev. Srednji letni odtok Save iz Slovenije v obdobju 1961–1990 je znašal 301 m<sup>3</sup>/s (ARSO, 2008).

Padavinske podatke poseduje Hidrometeorološki zavod Slovenije, ki je že v svojih preteklih študijah podal oceno problematike zbiranja padavinskih podatkov na povodju Save, ki je naslednja:

- padavinski podatki postaj do nadmorske višine 1000 m,
- padavinski podatki postaj od nadmorske višine 1000 m do 1600 m,
- padavinski podatki postaj nad nadmorsko višino 1600 m.

V prvi skupini je razmeroma veliko padavinskih postaj, ki merijo padavine vsakih 24 ur, v drugi skupini je mreža že znatno redkejša, v porečju Save jih je samo šest. Na osnovi teh podatkov je težko določiti intenzivnejše nalive kratkih trajanj, ki vsaj na pritokih Save povzročajo hude katastrofe. V tretji skupini pa je analiza padavin problematična, saj praktično ni merskih točk razen posameznih totalizatorjev, ki dajejo le letne višine padavin, pa še to le na področju Julijskih Alp. (Primožič, 2007)



Povprečna letna višina padavin za obdobje 1971–2000. (<sup>1\*</sup> ARSO, 2009)

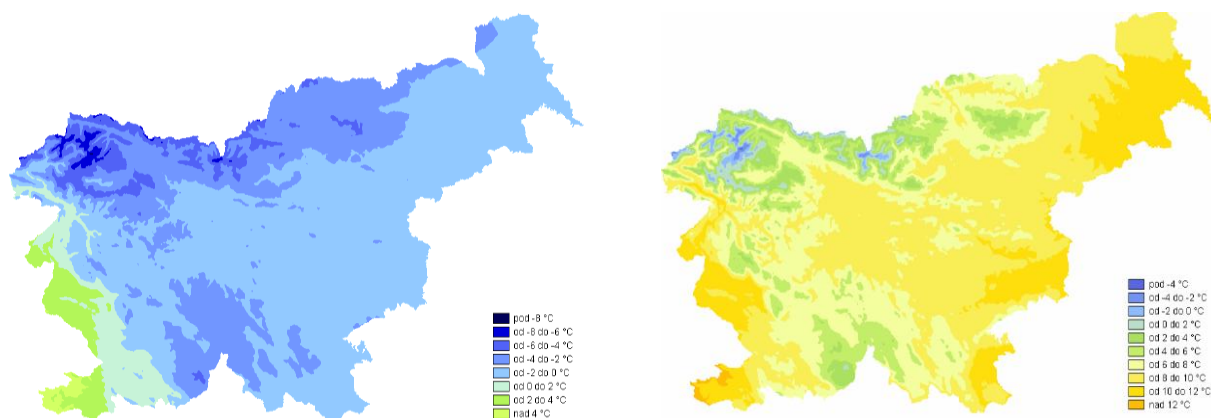
Arithmetic mean of annual precipitation for period 1971–2000. (<sup>1\*</sup> ARSO, 2009)

## 2.4.2 Temperature

Temperatura zraka je poleg padavin ena najpomembnejših meteoroloških spremenljivk, ki opredeljujejo klimo nekega območja. Na slikah na naslednji strani sta predstavljeni povprečna januarska in povprečna aprilaska temperatura zraka za Slovenijo za izbrano obdobje 1961–1990, ki je po priporočilih Svetovne meteorološke organizacije (WMO) referenčno klimatološko obdobje.

Temperatura zraka v Sloveniji ima značilen dnevni in letni hod. Najvišje dnevne vrednosti temperatura doseže zgodaj popoldne, običajno med 14. in 15. uro, najnižje vrednosti pa tik pred sončnim vzhodom. Najpogosteje je najtoplejši mesec v letu julij, najnižje temperature pa običajno zabeležimo v januarju z izjemo visokogorja, kjer je temperaturni nižek dosežen v mesecu februarju. Temperatura zraka v splošnem z nadmorsko višino pada, v povprečju se povprečna letna temperatura zraka na vsakih 1000 m zniža za 5,3 °C. Poleg nadmorske višine na temperaturo vplivajo še površje oziroma mikrolokacija postaje, večje vodne površine in poseljenost. Vpliv mikrolokacije je najbolj izrazit pri najnižji, posredno pa tudi pri povprečni temperaturi zraka. Ob jasnih in mirnih nočeh je v kotlinah in dolinah pogost pojav nastanka t. i. jezer hladnega zraka. Pojav temperaturnih inverzij je zlasti opazen pozimi, neredko se zgodi, da jezera hladnega zraka v kotlini vztrajajo več dni in tako vplivajo ne le na najnižjo, ampak tudi na povprečno in najvišjo temperaturo zraka. V topli polovici leta je vpliv kotlinske lege manj izrazit. (<sup>2\*</sup>Habjan, 2006)





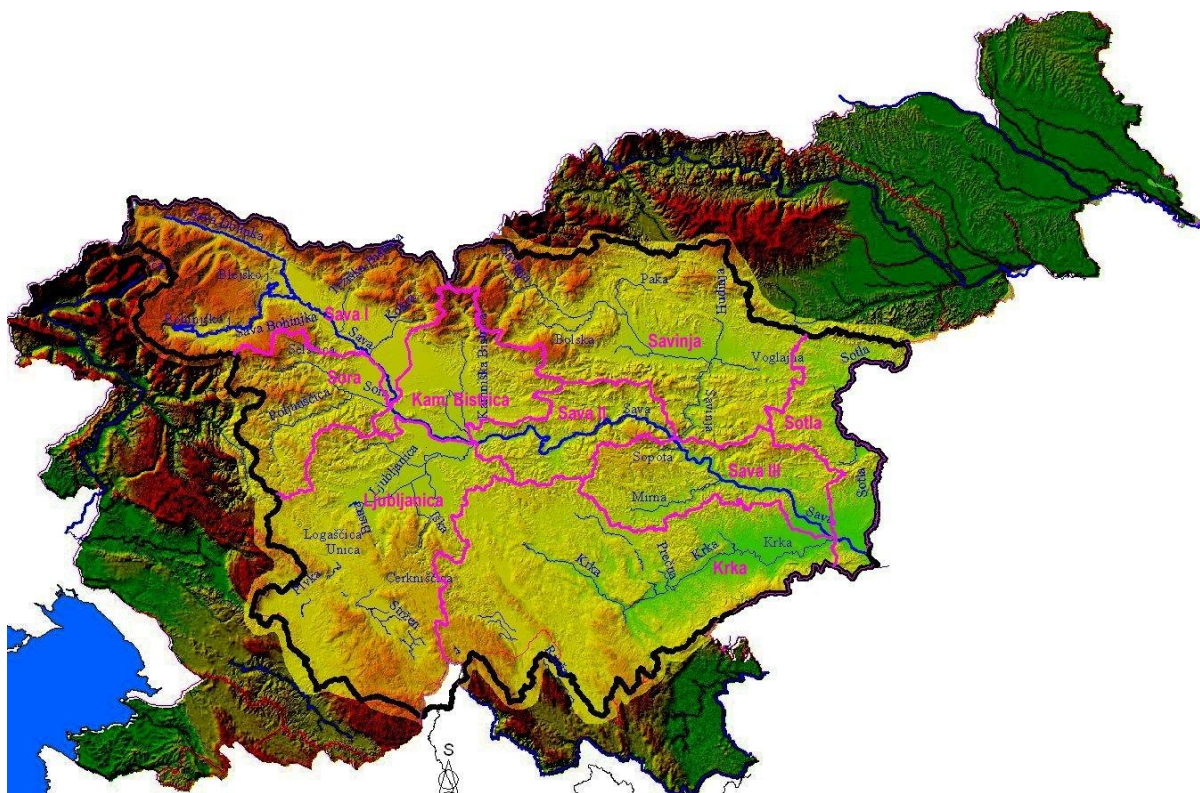
Povprečna januarska (levo) in povprečna aprilaska (desno) temperatura za obdobje 1961–1990.  
(<sup>2\*</sup>Habjan, 2006)

Arithmetic mean temperature for January (left) and February (right) for period 1961–1990.  
(<sup>2\*</sup>Habjan, 2006)

Iz prikaza povprečne januarske temperature vidimo, da so temperature na porečju Save od –6 do 0 °C, v aprilu pa so v visokogorju temperature od 0 do 4 °C, na večini porečja Save pa med 6 in 10 °C. To pomeni, da so v januarju v povprečju temperature ugodne za obstanek snežne odeje po celotnem porečju Save, v aprilu pa je na večini porečja že obdobje tajanja snežne odeje, le v visokogorju se izmenjujeta še obdobji zmrzovanja in tajanja snežne odeje, možne pa so seveda tudi še snežne padavine.

## 2.5 Podpovodja reke Save

Za nadaljnjo obdelavo podatkov smo porečje Save razdelili na 9 podporečij glede na prispevna območja (slika 3). Podporečja imajo določene velikosti in pa deleže prispevnega območja glede na celotno porečje Save (preglednica 1). Iz preglednice 1 je razvidna velikost prispevnega območja posameznega podporečja, ki pa ne pomeni tudi deleža prispevne količine vode podporečja.



Slika 3: Podpovodja reke Save.

Figure 3: Subbasins of the Sava River.

Že iz slike 3 lahko s poznavanjem razmer določimo rečne režime posameznih podporečij reke Save. Predvidimo lahko, da je vpliv tajanja snega na vodnatost reke Save najbolj prisotno v zgornjem podporečju z zaledjem v Alpah, to je podporečje Sava I. Glede na prispevni delež podporečja pa je treba določiti, koliko se ta vpliv sploh lahko pozna nižje vzdolž toka reke Save.

V preglednici 1 so naštetna vsa podpovodja reke Save s podatki o velikosti ter deležem prispevnega območja glede na celotno porečje reke Save.

Preglednica 1: Seznam devetih podporečij reke Save z velikostjo porečja ter deležem velikosti prispevnega območja glede na celotno porečje Save.

Table 1: List of nine subbasins of Sava River with area data.

Št.	Ime porečja	Velikost porečja v km <sup>2</sup>	Delež velikosti prispevnega območja glede na celotno porečje Save v %
1	Porečje Save Dolinke in Save Bohinjke	1526	14
2	Porečje Kamniške Bistrice	540	5
3	Porečje Sore	636	6
4	Porečje Ljubljanice	1890	18
5	Porečje srednje Save	523	5
6	Porečje Savinje	1853	17
7	Porečje Krke	2250	21
8	Porečje Sotle	771	7
9	Porečje spodnje Save	757	7
	Skupaj	10746	100

Velikost podpovodja Sava I predstavlja 14 % glede na celotno porečje reke Save, kar pa ne pomeni, da je tudi prispevna količina vode iz tega podpovodja 14 %. Največji delež velikosti prispevnega območja in podpovodja reke Krke, za katero vemo, da ni hkrati tudi največji pritok reke Save.

Pri obravnavanju vpliva snega na povodju Save je pomembno poznati tudi pokrovnost povodja. Pri obravnavanju snežne odeje je to namreč pomemben podatek, saj se snežna odeja na različnih površinah tudi obnaša različno. Na površinah, pokritih z gozdovi, se določene količine snega zadržijo že na krošnjah, medtem ko na travnatih površinah pokrijejo tla. To nadalje vpliva tudi na hidrološke procese snežne odeje; tajanje snega poteka odvisno od izpostavljenosti na površini in temperature podlage. V preglednici 2 so zato prikazani višinski razredi posameznih podpovodij in njihova pokrovnost. S temi podatki bomo povezali vpliv vegetacije na tajanje snežne odeje na posameznih podpovodjih. Gozdovi so z dobrimi 60

odstotki (vključuje tudi grmičaste gozdove) prevladujoča kategorija pokrovnosti v porečju Save.

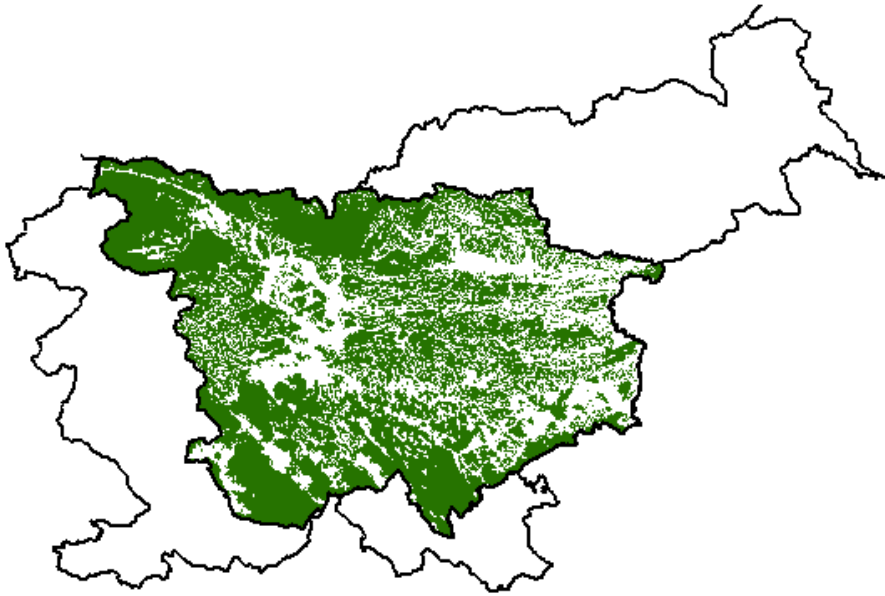
Preglednica 2: Nekaterne geografske lastnosti podpovodij reke Save.

Table 2: Some geographical characteristics of subbasins of Sava River.

	Površina [km <sup>2</sup> ]	Povprečna nadm. višina [m]	% gozd	% ostalo
Sava 1	1526,42	1259,9	63,27	36,74
Kamniška Bistrica	647,81	978,25	74,91	25,09
Ljubljanska	656,69	1094,33	57,11	42,89
Sava 2	1883,79	573,5	60,22	39,78
Sr. Sava	523,49	485	75	25
Savinja	3711,78	782,77	64,32	35,68
Sava 3	1852,67	902,85	55,45	44,55
Krka	757,13	378,57	44,98	55,02
Sp. Sava	2250,47	395,6	57,24	42,76
Skupaj	10019,85	559	54,65	45,35

Največja sklenjena območja gozda pokrivajo dinarsko-kraške planote južne in jugozahodne Slovenije ter pobočja Alp na severu in zahodu. Aluvialne ravnine in rečne doline so gosteje naseljene in v glavnem namenjene kmetijstvu. Tako se večina podpovodij pred izlitiem v reko Savo konča z večjo ravnico, ki je izkoriščena v kmetijske namene, medtem ko so zaledja hribovita in porasla z gozdom.

Na sliki na naslednji strani je prikazana pokritost porečja Save z gozdom po klasifikaciji CORINE.



Pokritost z gozdom po klasifikaciji CORINE. (<sup>2\*</sup>Brilly, 2008)

Vegetation cover according to CORINE classification. (<sup>2\*</sup>Brilly, 2008)

Na sliki zgoraj so vidne prevladujoče gozdne površine na povodju Save, predvsem v zaledjih posameznih podpovodij.

### 3 SNEG

Sneg je padavina v trdem stanju, ki nastaja v oblakih – nastaja iz ledenih kristalov, ko je zrak zasičen z vodno paro pod 0 °C temperature. Tedaj vodna para sublimira (takoj preide v trdo stanje). Če je sublimacija postopna, ledeni kristali dobivajo več ali manj pravilno obliko, se pri padanju spajajo in tako nastanejo snežinke.

#### 3.1 Snežna odeja

Snežne padavine nastanejo v hladnih oblakih iz podhlajenih vodnih kapljic pod vplivom vzgornikov, ki povzročajo gibanje kapljic v višje plasti oblaka. Tam se kapljice ohladijo in kondenzirajo (spremenijo svoje agregatno stanje), morda celo zmrznejo, nato pa zaradi prevladujoče sile teže padejo v nižje toplejše plasti oblaka, kjer se nekoliko odtajajo. Snežni kristali se med padanjem zlepljajo s kapljicami, pri nižjih temperaturah pa se po trkih zlepljajo med seboj. V hladni fronti se torej kapljice lahko nikoli ne odtajajo popolnoma, zato padejo na tla v obliki ledenih kristalov – snežink. Oblika, velikost in razvejanost posameznih snežnih kristalov je odvisna predvsem od temperaturnih in vlažnostnih razmer v oblaku, kjer je kristal nastal in rasel. Trdne padavine se na tla odlagajo v plasteh, snežni kristali pa se začnejo takoj ob pristanku na tla spreminjati.

Proces v snežni odeji, ki je zanimiv pri napovedovanju površinskega odtoka, je odjuga. Z odjugo je povezanih več procesov, ki so povezani s taljenjem snežne odeje. Poznamo več vrst odjuge: dnevno, deževno in pomladno odjugo. Pri napovedovanju visokih pretokov imata pomembni vlogi lahko deževna in pomladna odjuga. Pri dnevni odjugi gre namreč le za tajanje snežne odeje čez dan, ki pa čez noč znova pomrzne. Zjutraj je sneg trd in poledenel, čez dan pa se ob ponovnem sončnem vremenu stali. Z zaporednim taljenjem in zmrzovanjem vršne plasti snežne odeje postajajo vse bolj trde, ledene in povezane. (Rakovec, 1998)

Deževna odjuga: snežna odeja se lahko tali tudi zaradi dežja s temperaturo nad lediščem. Topli dež tali ledena zrna in ledene mostičke med njimi. Pri tem se tekoča voda hitro ohladi na temperaturo ledišča. Če so ob padanju toplega dežja visoke tudi temperature zraka, potem

se lahko odjužijo tudi debelejšje plasti snežne odeje. Del tekoče vode iz ledene kaše pronica v globlje plasti in tam rahla vezi med zrni in med plastmi. Pronicanje vode se ponavadi ustavi na ledenih plasteh v snežni odeji, voda pa ponavadi odteka vzdolž teh plasti. Če po dežni odjugi nastopi ohladitev, potem snežna odeja od zgoraj navzdol počasi zamrzne, zamrzne tudi voda, ki pronica v sneg. (Rakovec, 1998)

Pomladna odjuga je ponavadi kombinacija dnevne odjuge brez nočnega zmrzovanja, deževne odjuge in odjuge zaradi toplega zraka. V pomladnih mesecih je sončno obsevanje dovolj močno, da čez dan odjuži debele plasti snega. Če so tudi nočne temperature nad lediščem, če je zrak dovolj vlažen (nad lediščem mora biti tudi temperatura mokrega termometra), snežna odeja tudi ponoči ne zmrzuje in tajanje se iz dneva v dan stopnjuje. Če ob tem še toplo dežuje in ves čas piha topel veter, potem se snežna odeja na tleh pospešeno tali in izgineva. Snežnica pronica vse do tal, tam se vpija v prsti. Če pa so tla zamrznjena, potem snežnica pogosto odteče po površini tal pod snegom, dokler se tla ne odtajajo. (Rakovec, 1998) Zaradi dobre toplotne izolacije, ki jo predstavlja snežna odeja, so temperature v globini snežne odeje, posebno še blizu tal, pogosto blizu ledišča. Tla pod debelo snežno odejo so ponavadi zamrznjena.

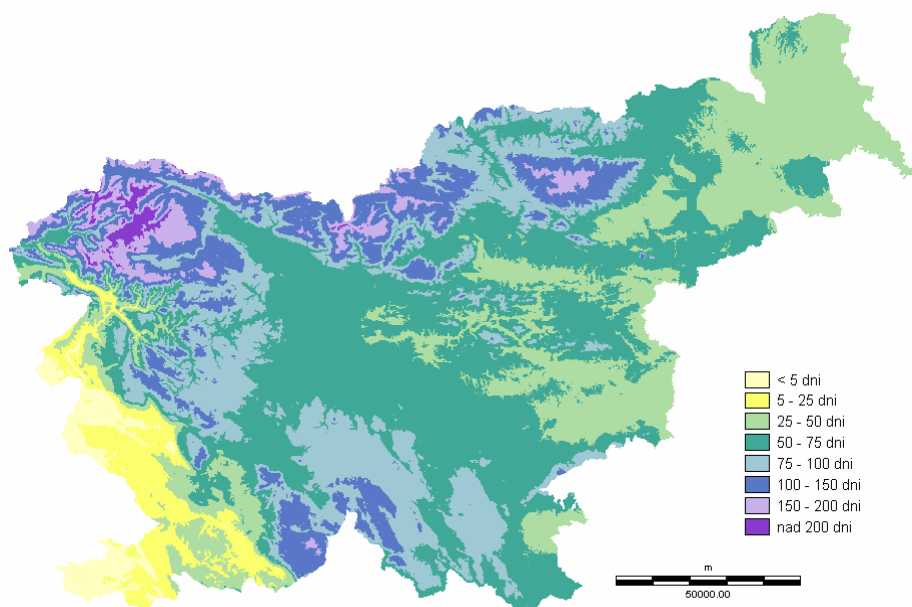
## **3.2 Snežne razmere v Sloveniji**

### **3.2.1 Povprečno število dni s snežno odejo**

Snežne razmere v Sloveniji so delno predstavljene s trajanjem snežne odeje. Obdelane so sezonske vrednosti trajanja snežne odeje obdobja 1961/62–1998/99 za 390 meteoroloških postaj. Manjkajoči podatki so interpolirani s podatki sosednjih postaj s podobno nadmorsko višino in podnebnimi razmerami. (Habjan, 2004)

Karta, na kateri je prikazano povprečno število dni s snežno odejo (slika na naslednji strani) je izdelana z metodo optimalne prostorske interpolacije. Trajanje snežne odeje v vsaki mrežni točki je izračunano na podlagi vrednosti na okoliških merilnih postajah in nadmorske višine mrežne točke. Karta je narejena na osnovi tridesetletnega povprečja, razlike med

posameznimi leti v obravnavanem obdobju so zelo velike. Predstavlja povprečno trajanje snežne odeje po Sloveniji. (Habjan, 2004)



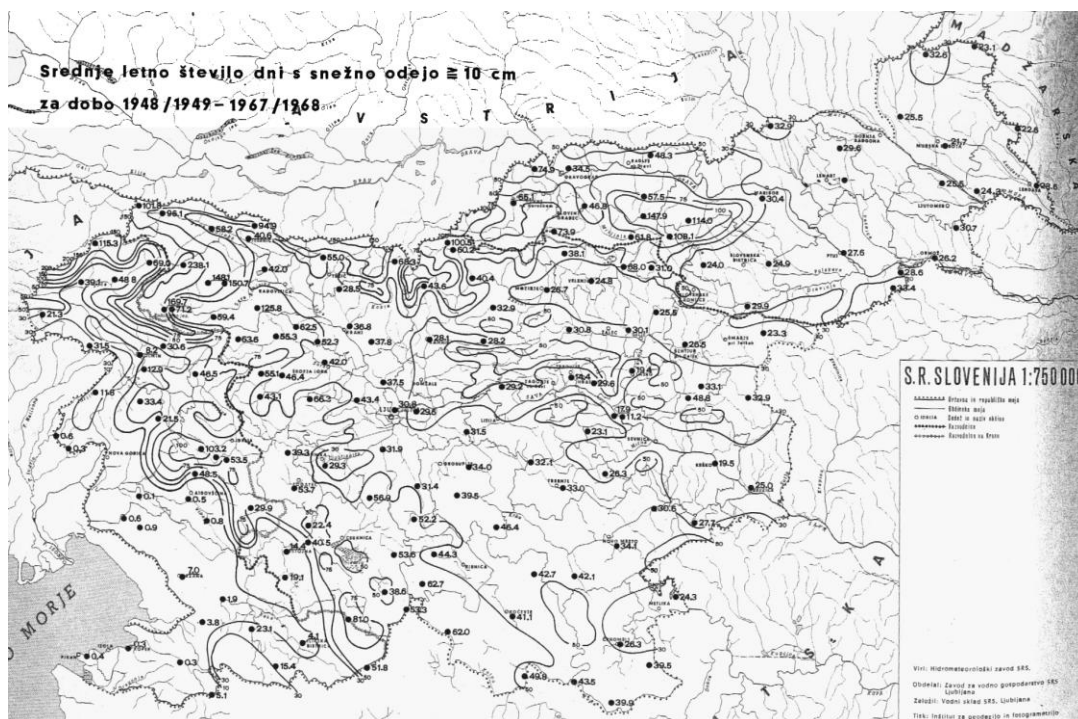
Prikaz povprečnega števila dni s snežno odejo za Slovenijo, povprečje let 79–96. (Habjan, 2004)

Average number of days with snow cover for Slovenia for period 79–96.

(Habjan, 2004)

Prikaz povprečnega števila dni s snežno odejo za Slovenijo je bil narejen tudi za obdobje let 48–68 (VGO, 1978), pri čemer se upošteva snežna odeja višja ali enaka 10 cm. Upoštevani so podatki za vsako postajo (209 postaj) za vsak mesec in vsako leto posebej. Če torej primerjamo sliko zgoraj in sliko na naslednji strani, ugotovimo, da je za obdobje 48–68 povprečno število dni s snežno odejo nižje, kot za obdobje 79–96, tj. tudi do 50 %. Največja odstopanja so na ravninskih območjih pri manj dnevih pokritosti s snežno odejo (Primorska, Prekmurje, Ljubljanska kotlina). Vzrok za razlike v številu dni s snežno pokritostjo predvsem v Primorju je najverjetneje prav v izhodiščih izbora prikazanih podatkov – upoštevani so samo dnevi s snežno pokritostjo 10 ali več cm.





Prikaz povprečnega števila dni s snežno odejo  $\geq 10$  cm za obdobje 48–68. (VGO, 1978)

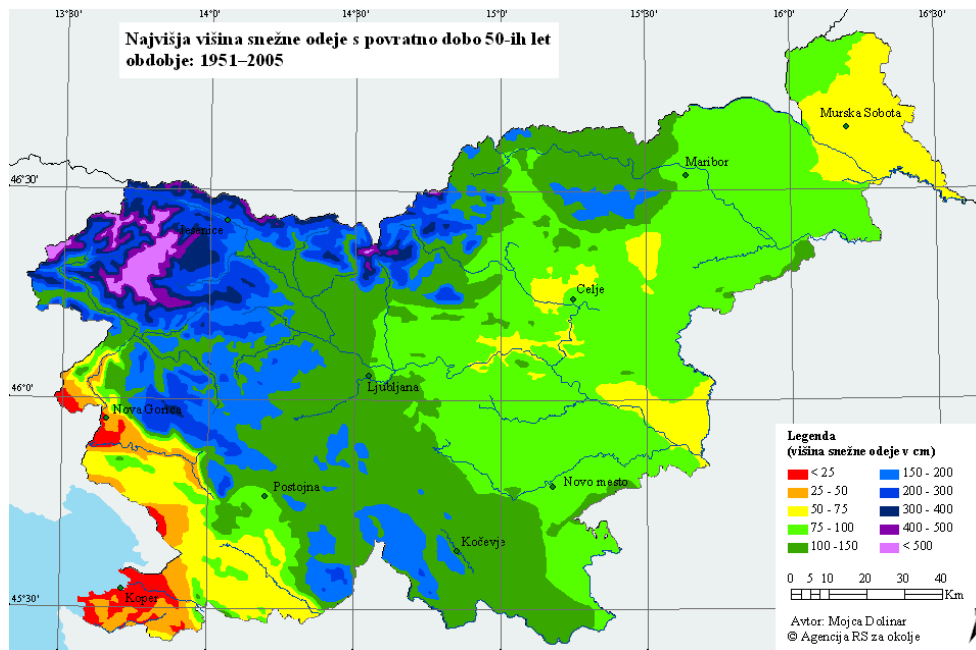
Average number of days with snow cover  $\geq 10$  cm for Slovenia for period 48–68.

(VGO, 1978)

### 3.2.2 Najvišje debeline snežne odeje

Karta najvišje debeline snežne odeje s povratno dobo 50 let je narejena na podlagi podatkov za obdobje 1951–2005 za 390 postaj. Na sliki na naslednji strani je lepo viden kontrast v debelini snežne odeje v visokogorju in nižinskih predelih.

V Sloveniji pade velik del padavin v obliki snega. V obmorskem pasu je sneg sicer redek pojav in snežna odeja se obdrži le izjemoma po več dni, vendar so tudi ob morju le izjemne zime, ko sploh ne bi snežilo. Drugi ekstrem je visokogorski svet, v katerem je sneg redek pojav tudi v poletnih mesecih. Snežna odeja se ohrani prav v poletje, na redkih snežiščih pa prek vsega leta. Maksimalna debelina odeje prek 4 m je tod reden vsakoleten pojav. (VGI, 1978)



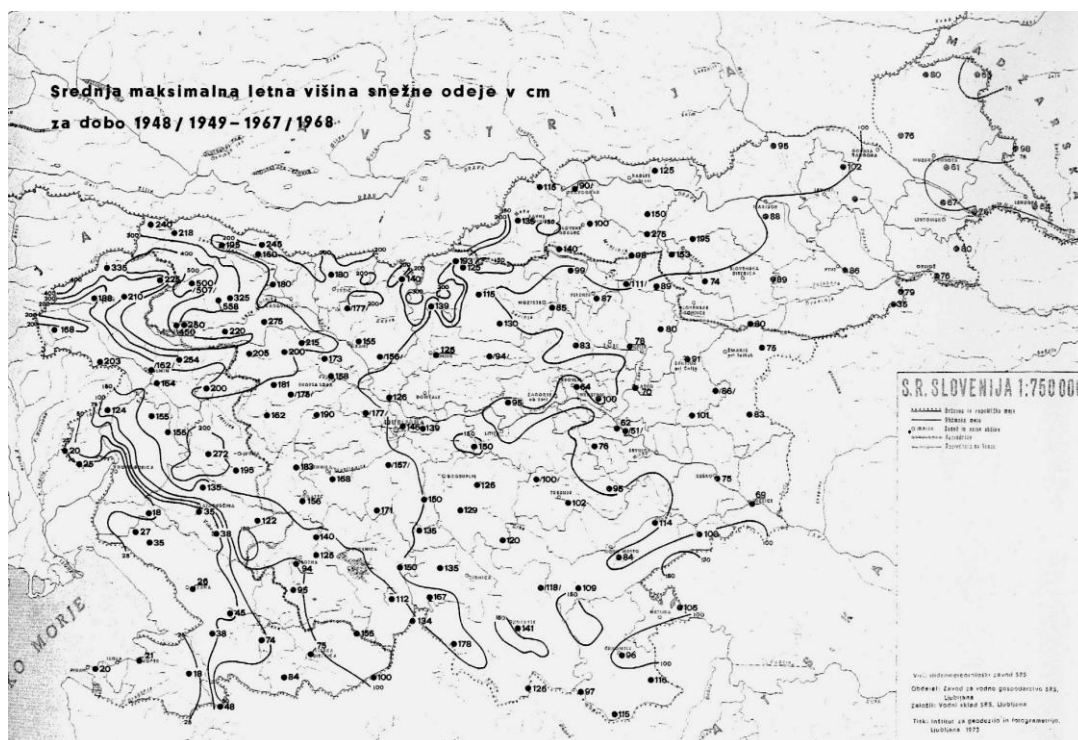
Prikaz najvišje višine snežne odeje s povratno dobo 50 let za obdobje 1951–2005.

(Habjan, 2004)

Arithmetic mean of snow cover height with a return period of 50 years for period 51–05.

(Habjan, 2004)

Če primerjamo karto najvišje snežne odeje s povratno dobo 50 let za obdobje 1951–2005 (slika zgoraj) s karto najvišje višine snežne odeje za obdobje 48–68 (slika na naslednji strani), vidimo, da vrednosti najvišje snežne odeje na sliki zgoraj sovpadajo z vrednostmi 50-letne povratne dobe na sliki na naslednji strani. Manjša odstopanja so opazna pri višini snežne odeje v Prekmurju, kjer so najvišje vrednosti (obdobje 48–68) nekoliko večje od vrednosti s 50-letno povratno dobo (obdobje 51–05).



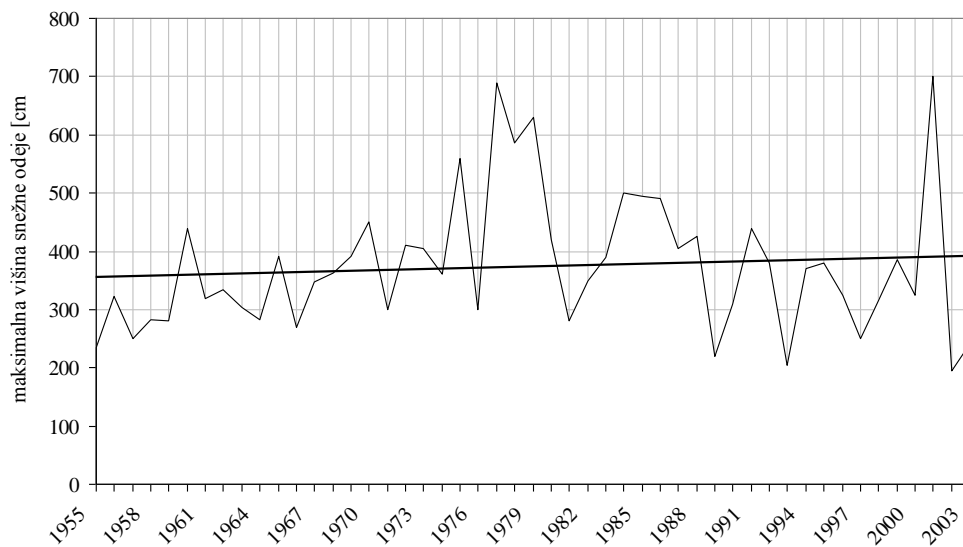
Prikaz najvišje višine snežne odeje za obdobje 48–68. (VGO, 1978)

The maximum snow cover heights for period 48–68. (VGO, 1978)

Iz primerjave kart najvišjih višin snežne odeje lahko zaključimo, da se snežne razmere v povprečju niso spremenile in da so višine snežne odeje enako razporejene, če vzamemo vrednosti 20 let ali 50 let.

### 3.2.3 Merjenje snežne odeje

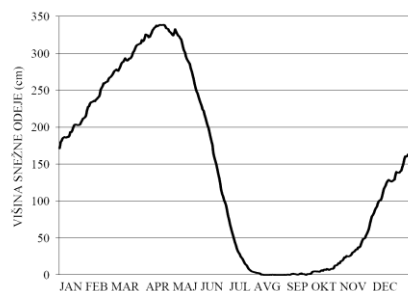
V Sloveniji se najvišje meri snežna odeja na postaji Kredarica, za katero so predstavljeni podatki o največji višini snežne odeje za obdobje 1955–2003 (sliki 4), sezonskem trajanju snežne odeje za obdobje sezon od 1955/56 do 2005/06 ter povprečna dnevna debelina snežne odeje (1961–1990). Za primerjavo sezonskega trajanja snežne odeje v visokogorju in nižinskih predelih so prikazani še podatki o sezonskem trajanju snežne odeje za obdobje sezon od 1955/56 do 2005/06 za postajo Ljubljana.



Slika 4: Maksimalna višina snežne odeje na Kredarici.

Figure 4: Maximum snow cover measured on the Kredarica station.

Najbolj zasnežena meteorološka postaja v Sloveniji je zagotovo Kredarica, ki je s svojo nadmorsko višino 2514 m tudi najvišja. V zimi 2006 je bila največja debelina snežne odeje 495 cm, kar je nad dolgoletnim povprečjem. Najmanjše debeline snega so bile izmerjene v letih 2002 (195 cm), 1993 (205 cm), 1989 (220 cm) in 1955 (235 cm). Rekordna višina snega, kar 7 m, je bila izmerjena v letu 2001, do tedaj pa 690 cm leta 1977, 587 cm leta 1978 in 560 cm leta 1975.



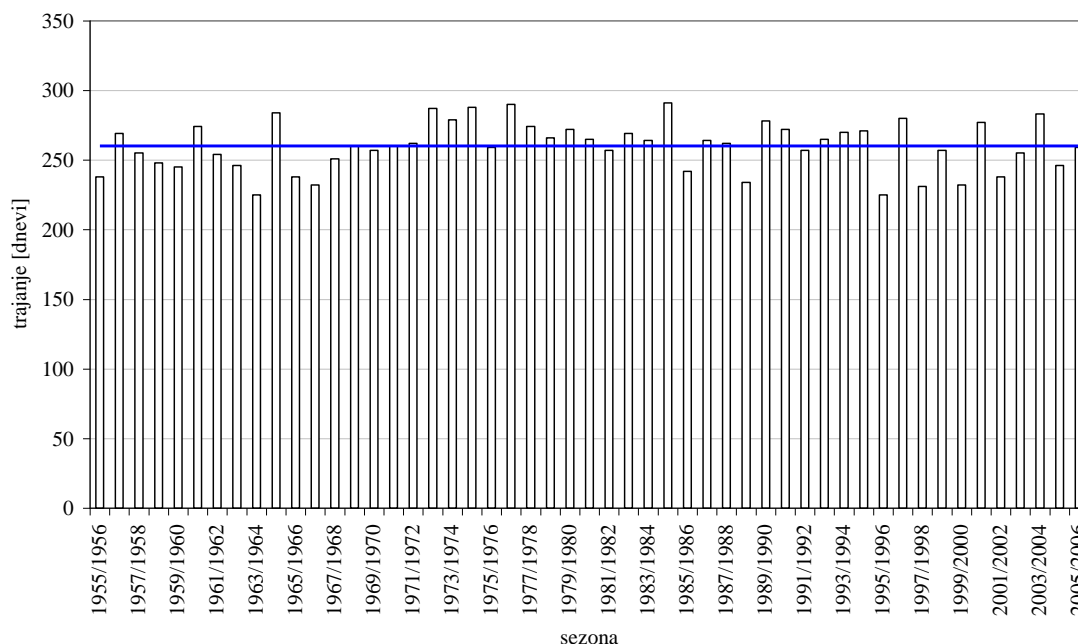
Povprečna dnevna debelina snežne odeje na Kredarici (1961–1990) (Habjan, 2004)

Average daily snow cover thickness measured on Kredarica station (1961–1990).

(Habjan, 2004)

Povprečna debelina snežne odeje na Kredarici za obdobje 1961–1990 (slika na prejšnji strani) kaže povprečno debelino okoli 350 cm ter trajanje snežne odeje od novembra do julija. Od aprila do julija je viden hiter upad višine snežne odeje, kar je posledica dviga temperatur oziroma spomladanske odjuge. V tem obdobju je odtok snežnice največji in ima največji vpliv na pretoke rek.

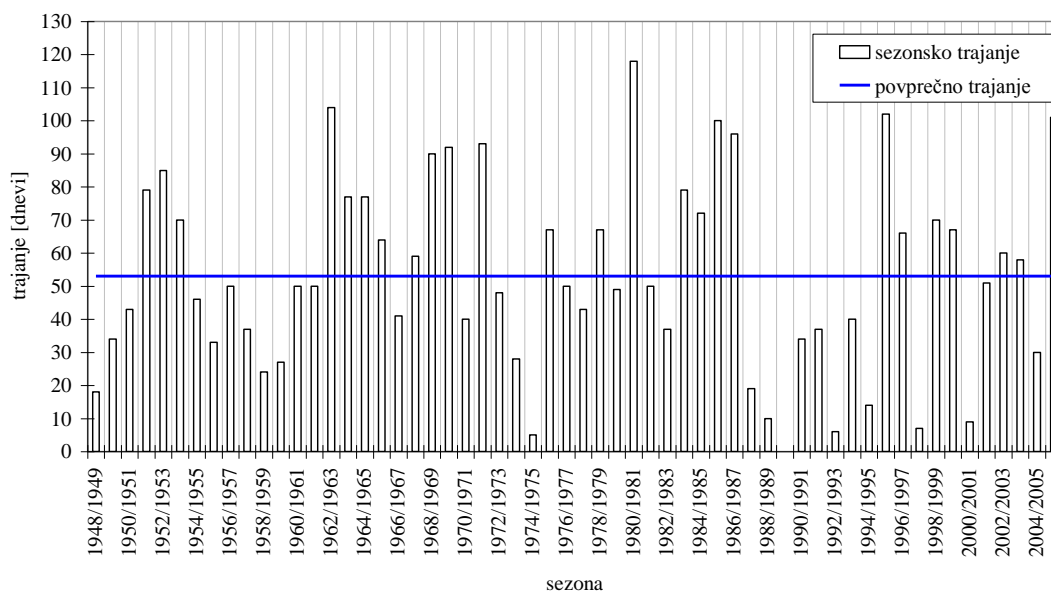
Število dni s snežno odejo na Kredarici znaša v povprečju približno 250, več takih dni je bilo le leta 1972 (305 dni), manj pa leta 1958 (228 dni) (slika 5).



Slika 5: Sezonsko trajanje snežne odeje – Kredarica (1955/1956–2005/2006).

Figure 5: Seasonal duration of snow cover on the Kredarica station (1955/1956–2005/2006).

V Ljubljani je bilo največ dni s snežno odejo zabeleženih leta 1996, in sicer 110 dni, le dan manj pa leta 1952. V letu 1989 je sneg tla prekrival le dva dni, leta 1949 13 dni, po 15 dni s snežno odejo je bilo v letih 1951 in 1974 (slika 6). Doslej najvišja izmerjena snežna odeja v Ljubljani je 146 cm iz leta 1952, sledi leto 1969 s 95 cm in leto 1987 z 89 cm (Habjan, 2004).



Slika 6: Sezonsko trajanje snežne odeje – Ljubljana (1948/1949–2005/2006).

Figure 6: Seasonal duration of snow cover – the Ljubljana station (1948/1949–2005/2006).

Trajanje snežne odeje v Sloveniji kaže veliko časovno in prostorsko variabilnost, saj na snežne razmere vpliva več dejavnikov. Opazovanje snežnih razmer vključuje dnevne meritve višine snežne odeje, višine novozapadlega snega, določitev maksimalne višine snežne odeje, meritve gostote snega in opazovanje snežne odeje. (Habjan, 2004)

### 3.2.4 Snežni ekstremi

Sneg običajno ne povzroča pretiranih težav. Vsakih nekaj let pa se zgodi, da je višina novega snega tako velika, da ohromi promet, da sneg lomi drevje in trga električne vode. Zima 1951/52 je bila zelo snežena, že konec januarja je bilo v Ljubljani 80 cm snega. Med 13. in 15. februarjem 1952 je po nižinah Slovenije zapadlo največ snega od začetkov merjenj, ki so se začela sredi 19. stoletja. Snežilo je nepretrgoma več dni skupaj in na koncu je bilo v Ljubljani 146 cm snega, v Ratečah 240 cm in v Bovcu 188 cm. Prenehali so voziti vlaki, cestni promet je bil popolnoma ohromljen, dolina reke Soče je bila cele tedne odrezana od drugih krajev. Uvedena je bila splošna mobilizacija. (Wikipedija, 2009)

Preglednica 3: Največje izmerjene vrednosti.

Table 3: Measured maximums.

Vrsta rekorda	Vrednost	Postaja	Čas
Največja višina snežne odeje	700 cm	Kredarica	22. 4. 2001
Največja višina novozapadlega snega <sup>1</sup>	125 <sup>2</sup> cm	Dom na Komni	29. 3. 1951, 4. 3. 1970
Največja višina novozapadlega snega v krajih pod 500 m n. v. <sup>1</sup>	105 cm	Soča	4. 3. 1970
Največja vsota višin novozapadlega snega v eni sezoni <sup>4</sup>	1662 <sup>3</sup> cm	Kredarica	2000/2001
Povprečno najdaljše sezonsko trajanje snežne odeje (št. dni) <sup>4</sup>	265 dni	Kredarica	1972/1973– 2000/2001
Najdaljše sezonsko trajanje snežne odeje (št. dni) <sup>4</sup>	290 dni	Kredarica	1984/1985, 1976/1977
Najzgodnejše sneženje v krajih pod 500 m n. v.	/	Kotlje, Šmartno pri Slovenj Gradcu	11. 9. 1972
Najpoznejše sneženje v krajih pod 500 m n. v.	/	Nomenj	10. 6. 1974

Opombe:

1 *Novozapadli sneg je sneg, ki pade v zadnjih 24 urah.*

2 *Ocenjena vrednost na podlagi poteka vremena in skupne višine snežne odeje.*

3 *V krajih pod 500 m n. v. je ocenjena rekordna vrednost okoli 500 cm.*

4 *Sezona je čas od 1. avgusta do 31. julija naslednje leto.*

V največji meri je trajanje snežne odeje odvisno od različnih dejavnikov reliefa. Nadmorska višina vpliva na porazdelitev temperatur zraka. V višjih legah je zaradi nižjih temperatur sneženje pogostejše kot v nižjih legah, sneg se tudi počasneje tali. Na trajanje snežne odeje vplivajo tudi oblika in tip reliefa ter orientacija terena, pa tudi bližina morja. (ARSO, 2007)

## 4 SNEG NA POREČJU SAVE

Preučevanje snežne odeje zahteva poznavanje hidroloških procesov povezanih v hidrološkem krogu, katerih karakteristike variirajo glede na lastnosti porečja. Zaradi tega je obnašanje snežne odeje odvisno od lastnosti porečja, torej klime, sestave tal, površinske rabe ... Velik pomen pri vplivu na opazovanje in obnašanje snežne odeje ima poraščenost, ki pa visoko v hribih ni prisotna, zato pa je vpliv toliko bolj opazen v nižjih predelih (Grayson et al., 2002). Poraščenost je najbolj problematična predvsem pri zaznavanju snežne odeje s pomočjo satelitskih posnetkov, ko snežna odeja leži pod krošnjami (<sup>2\*</sup>Brilly et al., 2008). V višjih legah na obnašanje snega najbolj vpliva stanje podlage, saj če so tla zmrznjena, se sneg ne more infiltrirati in lahko le odteče ali izhlapi (Hayashia et al., 2003). Te izsledke bomo tudi sami preverili na podlagi razpoložljivih meritev.

Snežno-dežni režim imajo vodotoki visokogorskega sveta Slovenije in njihovega neposrednega predgorja (Julijske Alpe, Karavanke, Kobansko, Pohorje). Pri daljših vodotokih, ki imajo pomemben delež zaledja v visokogorju, se poteze snežno-dežnega režima poznajo še daleč po toku navzdol: na Savi do sotočja Ljubljanice, na Soči do sotočja Idrijce in na Savinji do Nazarij. Pri dinamiki razporeditve odtoka sta značilna dva maksimuma in dva minimuma. Primarni maksimum nastopi v pozni pomladi, praviloma maja ali celo junija. Novembrski sekundarni porast pa je posledica jesenskega dežja. Primarni minimum je pozimi in traja od decembra do marca in je nižji od sekundarnega poletnega minimuma, ki običajno nastopi avgusta, redkeje septembra (Kolbezen, Pristov, 1998).

### 4.1 Izhodišča študije

Izkušnje, ki so bile pridobljene s preteklimi raziskavami v Avstriji, kažejo, da je preučevanje preteklih pojavov velikega pomena za določitev karakteristik tajanja snega in posledično vpliva na pretoke. Z analizo pojavov lahko določimo, kateri dejavnik na tajanje snega najbolj vpliva, kar je ključni podatek pri modeliranju vpliva na tajanje snega in pretoke rek (Singh et al., 1997). Pri ugotavljanju vpliva odjuge na tajanje snega se v tujini uporabljajo t. i.

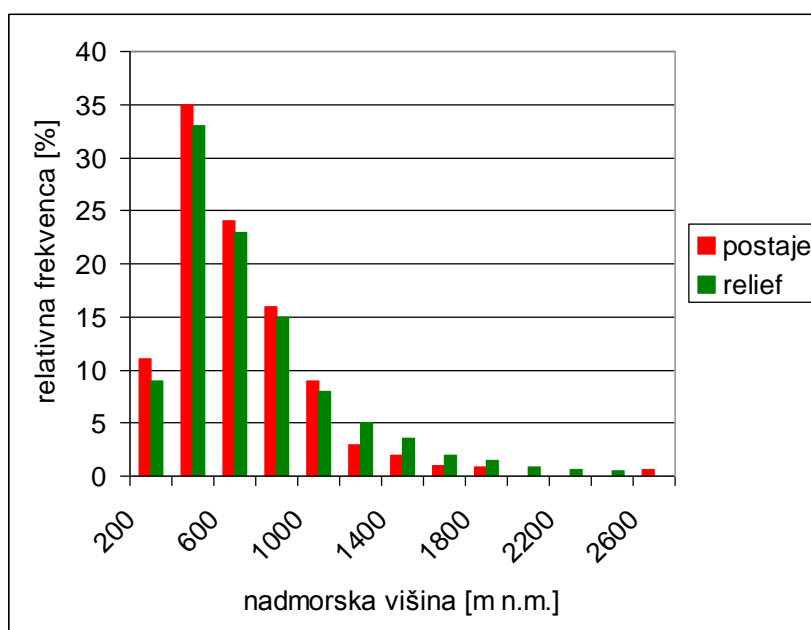


eksperimentalni ploti, kjer se meri debelina snega in infiltracija. Tako je bilo npr. v švicarskih Alpah ugotovljeno, da tajanje snega prispeva večji del vode k površinskemu pretoku rek z zaledjem v hribih (Bayarda et al., 2005), medtem ko so na Norveškem izmerili, da se večina snega infiltrira v podtalnico (Frencha, Binley, 2004). Na širšem območju klimatskega pasu so karakteristike odtoka spoznane za enake (Merz et al., 2006), kar v našem primeru veliko pomeni pri preučevanju pojavov v Sloveniji, kjer imamo zelo skromne podatke o snegu. Na tem področju v Sloveniji še nismo zasledili nobene študije, razen študije »Največje verjetne poplave Save«, ki je bila izdelana na Katedri za splošno hidrotehniko in upošteva vpliv tajanja snega na pretoke reke Save (Brilly et al., 2008). V študiji je bil pretok reke Save modeliran s švedskim hidrološkim modelom HBV (IHMS, 1999). Glede na rezultate študije je pojav tajanja snega smiselno podrobneje raziskati. V ta namen se bodo z modelom HBV simulirali pretoki na porečju reke Save v spomladanskem času.

Metode daljinskega zaznavanja snežne odeje s sateliti in letali omogočajo vedno bolj zanesljivo spremljanje obsega in lastnosti snežne odeje. Za področje Slovenije je bil analiziran vpliv oblačnosti in pokrovnosti na natančnost zaznavanja snežne odeje, glede na podatke o višini snežne odeje na meteoroloških postajah in posnetke satelitskega sistema MODIS.

#### **4.1.1 Merilna mesta snežne odeje**

Slovenija ima precej razgiban relief, zato je potrebno veliko meteoroloških merilnih postaj na različnih lokacijah, ki kažejo razmere na različnih nadmorskih višinah. Mikrolokacija pomembno vpliva na klimatske razmere in na trajanje snežne odeje.



Slika 7: Odstotek opazovalnih postaj in delež reliefa na določeni nadmorski višini.

Figure 7: Percentage of measurement stations and relief area on a given height above sea level.

Glede na podatke ARSO, ki so prikazani na sliki 7, je Slovenija razmeroma dobro pokrita s postajami za merjenje snežne odeje glede na relief na nižjih nadmorskih višinah, to je od 200 do 1000 m n. m., na višinah od 1200 do 2000 m n. m. se pokritost reliefa z merilnimi mesti razpolovi, medtem ko pa na nadmorskih višinah višjih od 2000 m ni nobene opazovalne postaje do najvišje postaje, ki je na Kredarici.

#### 4.1.1.1 Razpoložljivi podatki

Na voljo so nam bili podatki o višini snežne odeje iz 19 klimatoloških postaj, ki smo jih predstavili združeno s podatki o nadmorski višini merilnega mesta, uradno številko, ki jo merilno mesto nosi, ter točnimi podatki o lokaciji (preglednica 4).

Preglednica 4: Merilna mesta v Sloveniji, za katere so na voljo podatki o višini snežne odeje.

Table 4: Measurement stations in Slovenia with snow height data availability.

	Nadmorska višina [m]	Št.	Lokacija
Letališče Portorož	2	464	45.47556,13.62056
Bilje pri Novi Gorici	48	97	Ni podatka
Letališče Cerklje	154	749	45.89361,15.525
Črnomelj	157	257	45.56028,15.15083
Murska Sobota Rakičani	188	355	46.6525,16.19611
Metlika	210	432	45.65444,15.32361
Novo mesto	220	249	45.80194,15.18222
Celje	244	268	46.24472,15.2525
Ljubljana Bežigrad	299	192	46.06583,14.51722
Letališče Brnik	364	8	46.21778,14.4775
Šmartno pri Slov.Gradcu	455	321	46.49,15.11611
Kočevje	467	174	45.64528,14.85417
Lesce	515	403	46.36556,14.17917
Postojna	533	136	45.76639,14.1975
Rateče Planica	864	51	46.4975,13.7175
Lisca	943	452	46.06667,15.28333
Vojsko	1067	76	46.02528,13.90778
Vogel	1535	437	46.26389,13.84556
Kredarica	2514	48	46.37944,13.85389

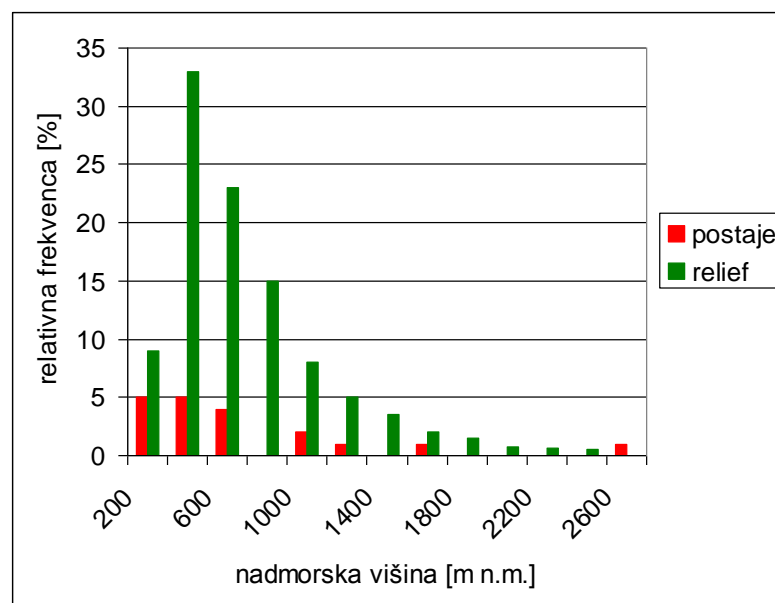
12 postaj je razporejenih po porečju Save, največ na podporečju zgornje Save – Save Bohinjke in Save Dolinke, kar 4 klimatološke postaje. (Slika 8)



Slika 8: Merilna mesta snežne odeje na porečju Save.

Figure 8: Measurements stations of snow cover height on the Sava River basin.

Zastopanost postaj glede na nadmorsko višino je predstavljena na sliki 9. Največ klimatoloških postaj je na nadmorskih višinah do 600 m n. m. – 14 merilnih mest. Najmanj merilnih mest pa je na višjih nadmorski višinah, višje od 1400 m n. m. (samo 2 merilni mesti).



Slika 9: Zastopanost postaj glede na nadmorsko višino.

Figure 9: Measurement stations on different heights above sea level.

#### 4.1.1.1 Izmerjeni maksimumi tajanja snežne odeje

V obdobju meritev smo poiskali največja tajanja snežne odeje v 24ih urah na razprošljivih merilnih mestih za obdobja od 1963-2006 (preglednica 5).

Preglednica 5: Izmerjeni maksimumi tajanja snega v 24-ih urah na postajah na porečju Save.

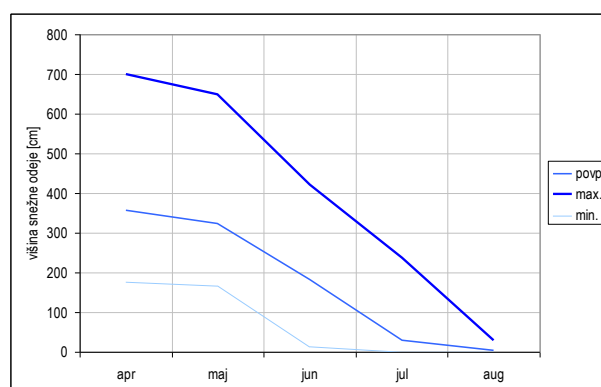
Table 5: Measured 24-hors snow melt maximum on Sava River basin.

Št. postaje	Ime postaje	Obdobje meritev	Tajanje v cm/dan	Izmerjen max.
8	Brnik	1963–2006	21	21.2.1969
48	Kredarica	1961–2006	124	7.6.1970
51	Rateče	1961–2006	40	20.12.1983
76	Vojsko	1961–2006	33	20.2.1969
136	Postojna	1961–2006	25	7.4.1970
174	Kočevje	1961–2006	33	20.2.1969
192	Lj. Bežigrad	1961–2006	19	21.2.1969
257	Črnomelj	1961–2006	44	9.3.1976
249	Novo Mesto	1961–2006	48	6.2.2003
268	Celje	1961–2006	65	10.2.1999
321	Šmartno pri SG	1961–2006	53	10.2.1999
403	Lesce	1961–2006	69	10.2.1999
437	Vogel	1979–2006	90	1.5.1994
452	Lisca	1984–2006	91	21.2.1991
432	Metlika	1981–2006	29	24.4.1988
749	Let. Cerklje	2005–2006	12	1.1.2006

Iz preglednice 5 vidimo, da je bilo največje tajanje snežne odeje v enem dnevu izmerjeno na Kredarici v začetku junija 1970, in sicer se je v 24 urah stajalo kar 124 cm snežne odeje. Vsekakor je na višjih merilnih mestih izmerjeno večje tajanje v 24 urah kakor v nižinah. Iz prikazanih podatkov lahko razberemo tudi obdobja najmočnejše odjuge, to so leta 1969, ko odjuga nastopi zelo zgodaj – konec februarja in so maksimumi tajanja prisotni na kar 4

postajah; leta 1970, ko odjuga nastopi v začetku junija in sta maksimuma tajanja prisotna na Kredarici in v Postojni; leta 1999, ko odjuga nastopi v prvi polovici februarja in so maksimumi tajanja prisotni na treh postajah.

Na sliki 10 so prikazana tajanja snežne odeje za maksimalne, povprečne in minimalne največje izmerjene vrednosti na Kredarici v obdobju 1955–2003.



Slika 10: Tavanje snega za maksimalne, povprečne in minimalne največje izmerjene vrednosti na Kredarici v obdobju 1955–2003.

Figure 10: Maximum, average and minimum measured snow melt values on the Kredarica station for period 1955–2003.

Tavanje snežne odeje na Kredarici v povprečju poteka od konca aprila do prve polovice avgusta. Ob minimalni snežni odeji je obdobje tavanja prisotno do začetka julija. Za določitev količine vode, ki jo prispeva tavanje snega, pa bi potrebovali podatke o vodnem ekvivalentu, ki je bil tedaj prisoten v snežni odeji.

#### 4.1.1.2 Merjenje pretokov

Zgodovina hidroloških opazovanj Save s pritoki je zelo pestra. Prve vodomerne postaje so bile postavljene že leta 1850 v Litiji, Krškem in Brežicah. Prvi limnigraf je bil postavljen na Savi v Tacnu leta 1897, drugi pa leto kasneje v Litiji. Število vodomernih postaj se je na Savi stalno spreminjalo. Spreminjale so se lokacije (makro in mikro), kar zmanjšuje vrednost starejših hidroloških podatkov (vodostajev). (ARSO, 2008)

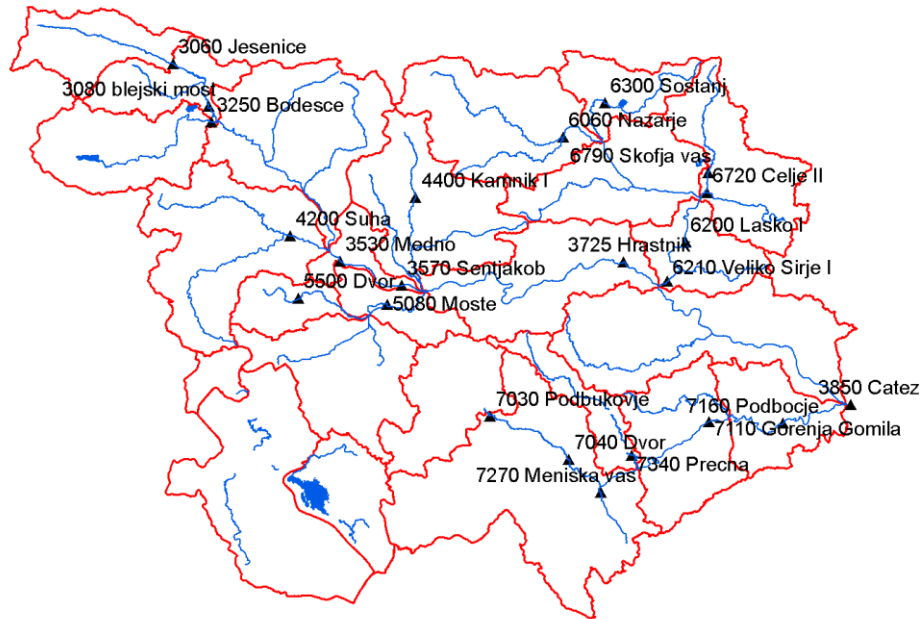
V študiji smo uporabili podatke 22 vodomernih postaj na reki Savi in njenih pritokih (preglednica 6).

Preglednica 6: Seznam vodomernih postaj in podpovodij.

Table 6: List of water level gage and subbasins.

Ime podpovodja	Ime vodomerne postaje	Šifra vodomerne postaje
Sava Dolinka I	Jesenice	3060
Sava Dolinka II	blejski most	3080
Sava Bohinjka	Bodešče	3250
Kokra	Medno - Suha	3530 - 4200
Sora	Suha	4200
Sava I	Šentjakob	3570
Gradaščica	Dvor	5500
Ljubljanica II	Moste	5080
Kamniška Bistrica	Kamnik I	4400
Sava II	Hrastnik	3725
Savinja izvir	Nazarje	6060
Paka	Šoštanj	6300
Savinja I	Laško I - (Škofja vas + Celje II)	6200 - (6790 + 6720)
Vogljajna	Škofja vas + Celje II	6790 + 6720
Savinja izliv	Veliko Širje I	6210
Sava III	Čatež - Podbočje	3850 - 7160
Krka izvir	Podbukovje	7030
Krka I	Dvor + Meniška vas	7040 + 7270
Temenica	Prečna	7340
Krka II	Gorenja Gomila	7110
Krka izliv	Podbočje	7160
Sava iztok	Čatež	3850

Na sliki spodaj so prikazane lokacije vodomernih postaj. Vidimo, da so merilna mesta večinoma locirana ob iztokih iz podpovodij, kar daje realne rezultate iztoka iz celotne prispevne površine podpovodja.



Izbrane vodomerne postaje. (Primožič, 2007)

Water level gages in the HBV model. (Primožič, 2007)

Za obravnavo rezultatov o vplivu tajanja snega in pretoka bomo uporabili vodomerne postaje, ki so locirane v hribovitem območju, kjer bi moral biti vpliv najbolj viden. Vse vodomerne postaje pa so uporabljene pri hidrološkem modeliranju z modelom HBV.

#### 4.1.2 Ključni parametri snežne odeje

Gostota snega je definirana kot masa na enoto volumna, izražena v  $\text{kg/m}^3$ , in je ena glavnih lastnosti snežne odeje. Gostota snega je odvisna od vrste snega oziroma količine zraka v snežni odeji, kar je pogojeno s temperaturo zraka med sneženjem, vlažnostjo in starostjo snežne odeje. Glede na temperaturo se tvorijo različni kristali različnih velikosti, gostota zapadlega snega zato niha med 50 do  $120 \text{ kg/m}^3$ . Nižje gostote se pojavljajo pri snegu,



nastalem pri nizkih temperaturah ( $-2\text{ °C}$  do  $-4\text{ °C}$ ) in suhih pogojih, višje vrednosti gostote pa pri vlažnih pogojih in toplejših temperaturah ( $-4\text{ °C}$  do  $+4\text{ °C}$ ). (Prapt, Vijay Singh, 2001) Novozapadli sneg je večinoma rahel, njegova gostota je med  $50\text{ kg/m}^3$  (suh rahel pršič) in  $3000\text{ kg/m}^3$  (južni sneg padel z dežjem) (Rakovec, Vrhovec, 1998) (preglednica spodaj).

Preglednica: klasifikacija vrst snega (<sup>2\*</sup> ARSO, 2009):

suh (1) - rahel, suh sneg

suh (2) - tanka rahla plast suhega snega na lomljivi skorji

suh (3) - tanka rahla plast suhega snega na skorji, ki nosi človeka

suh (4) - lomljiva skorja

suh (5) - skorja, ki nosi človeka

suh (6) - trd, suh sneg (strjen sneg v globino)

moker (1) - moker, mehak sneg

moker (2) - tanka plast mehkega, mokrega snega na lomljivi skorji

moker (3) - tanka plast mehkega, mokrega snega na lomljivi skorji, ki drži človeka

moker (4) - moker sneg, strjen v globino

Vse vrste snega. (Prapt, Vijay Singh, 2001)

All types of snow. (Prapt, Vijay Singh, 2001)

Tip snega	Gostota [ $\text{g/cm}^3$ ]
Novozapadel pršič	0,01–0,07
Novozapadel sneg	0,07–0,20
Uležan sneg	0,20–0,30
Kložast sneg	0,20–0,30
Napihan sneg	0,35–0,40
Moker sneg	0,40–0,65
Ledeniški sneg	0,70–0,80
Ledeniški led	0,85–0,91

Iz preglednice na prejšnji strani je razvidno, da ima starejši sneg večjo gostoto. To je posledica tega, da novejšje plasti v snežni odeji s svojo težo pritiskajo na globlje ležeče plasti snega in jih s tem stiskajo.

Količina proste vode v snegu je definirana kot maksimalna količina proste vode v snegu v danem času, ki še ne odteka pod vplivom gravitacije. Odvisna je od globine, gostote, števila plasti, oblike in velikosti kristalov. Normalno ima pri 0 °C vsebnost proste vode 2–5 % teže. Snežna odeja ima na ravni podlagi večjo vsebnost vode zaradi počasnejšega odtekanja kot snežna odeja na nagnjeni podlagi.

Vsebnosti proste vode v vrstah snega. (Prapt, Vijay Singh, 2001)

The amount of water in different types of snow cover. (Prapt, Vijay Singh, 2001)

Vrsta snega	Značilnosti	Vsebnost proste vode
Suh	$T < 0^{\circ}\text{C}$ , ni sprijemanja	0 %
Vlažen	$T = 0^{\circ}\text{C}$ , voda ni vidna pri povečavi 10x, sprijemanje	< 3 %
Moker	$T = 0^{\circ}\text{C}$ , voda vidna pri povečavi 10x, sprijemanje	3–8 %
Zelo moker	$T = 0^{\circ}\text{C}$ , vodo mogoče iztisniti, še vedno zrak v porah	8–15 %
Plundra	$T = 0^{\circ}\text{C}$ , nasičen z vodo, skoraj nič zraka	> 15 %

Najpomembnejši podatek pri modeliranju taljenja snežne odeje je vodni ekvivalent snega. Vodni ekvivalent snega (angl. snow water equivalent, *SWE*) je definiran kot višina vodnega stolpca v milimetrih, ki bi ga dobili, če bi stalili snežno odejo. Izračuna se iz višine snežne odeje  $d_s$  in gostote  $\rho_s$  po formuli:

$$SWE [mm] = 0,01 \cdot d_s \cdot \rho_s \quad (\text{Handbook of Hydrology, 1993})$$

Vodni ekvivalent je podan v mm, če je globina v cm in gostota v  $\text{kg/m}^3$ . V povprečju velja za novozapadel sneg gostota  $100 \text{ kg/m}^3$ , kar pomeni 1 enoto vode na 10 enot globine snega.

Podatek o vsebnosti vode v snežni odeji je zelo pomemben podatek za napovedovanje spomladanskih vodostajev.

Ker se sneg preko zime akumulira na površini, lahko v določenem obdobju preseže kritično debelino, kar pomeni, da vsebuje vso vodo, ki je padla v določenem obdobju (Ogrin, 2005). To pomeni, da nič vode ni pronicalo v zemljo, tudi kadar se sneg tali ali nanj dežuje, tako da se voda v celoti zadrži v snežni odeji. Takrat je možno z meritvami vodnega ekvivalenta snežne odeje dobiti podatke o celotni količini padavin oziroma količini vode od prvega sneženja do trenutka meritve (december–april). Če te podatke prenesemo na model taljenja snežne odeje, lahko natančneje predvidimo odtok ob nastopu taljenja, kar je s hidrološkega vidika zelo uporabno.

### **4.1.3 Daljinsko zaznavanje snežne odeje**

V Sloveniji bi bila uporaba satelitskih posnetkov snežne odeje uporabna predvsem pri določanju površine snežne odeje v višjih goratih predelih, kjer ni dovolj merilnih postaj. Na podlagi satelitskih posnetkov in GIS–orodij dobimo boljši pregled nad površino snežne odeje. Uporabnost in zanesljivost satelitskih posnetkov je odvisna od prostorske in časovne resolucije, predvsem pa od lokalnih omejitev, kot sta pojav oblačnosti in zaznavanje snega na območjih različnih pokrovnosti. V letu 2008 je bila na Katedri za splošno hidrotehniko izdelana diplomska naloga z naslovom Uporabnost satelitskih posnetkov za potrebe snežne hidrologije v slovenskem prostoru (Stušek, 2008), v kateri so bili predstavljeni prvi izsledki na tem področju v Sloveniji.

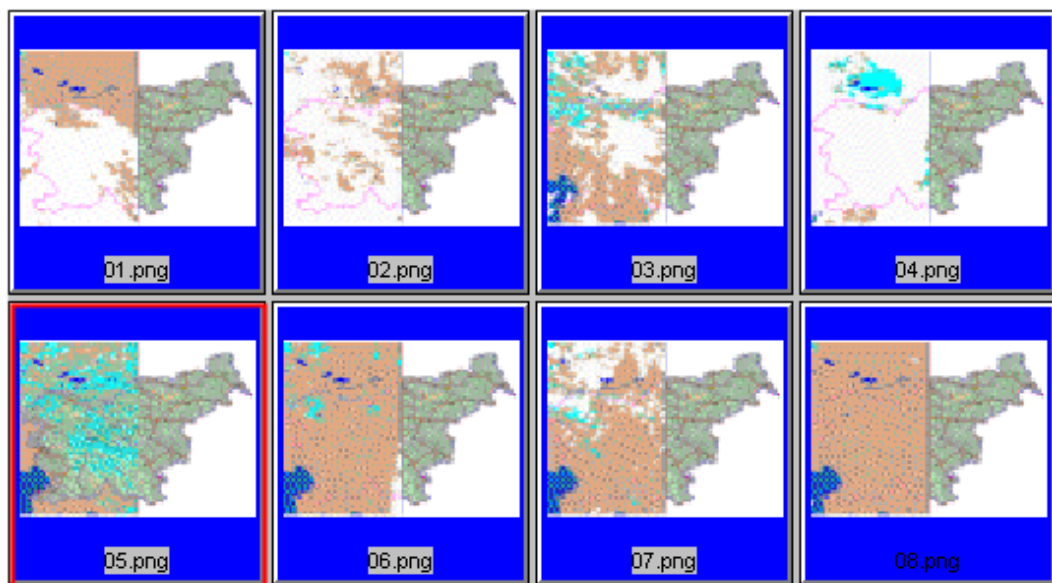
Za področje Slovenije je bila analizirana uporabnost satelitskih posnetkov sistema MODIS pri zaznavanju snežne odeje.

Analizirana je bila uporabnost 12 satelitskih posnetkov (preglednica 7, slike na naslednji strani).

Preglednica 7: Seznam razpoložljivih SCA posnetkov.

Table 7: List of available SCA images.

Št.	Ime SCA datoteke rastra	Čas posnetka	Ura	Datum	Kvaliteta
1	mod02hkm_2002299.1050_fuso33_sca3.tif	2002299_1050	10:50	26.10.2002	slaba
2	mod02hkm_2002324.1045_fuso33_sca3.tif	2002324_1045	10:45	20.11.2002	slaba
3	mod02hkm_2002363.1050_fuso33_sca3.tif	2002363_1050	10:50	29.12.2002	slaba
4	mod02hkm_2003014.1050_fuso33_sca3.tif	2003014_1050	10:50	14.1.2003	slaba
5	mod02hkm_2003055.1045_fuso33_sca3.tif	2003055_1045	10:45	24.2.2003	najboljša
6	mod02hkm_2003078.1050_fuso33_sca3.tif	2003078_1050	10:50	19.3.2003	boljša
7	mod02hkm_2003103.1045_fuso33_sca3.tif	2003103_1045	10:45	13.4.2003	boljša
8	mod02hkm_2003126.1050_fuso33_sca3.tif	2003126_1050	10:50	6.5.2003	zelo slaba
9	mod02hkm_2003162.1025_fuso33_sca3.tif	2003162_1025	10:25	11.6.2003	nična
10	mod02hkm_2003201.1030_fuso33_sca3.tif	2003201_1030	10:30	20.7.2003	nična
11	mod02hkm_2003229.1055_fuso33_sca3.tif	2003229_1055	10:55	17.8.2003	nična
12	mod02hkm_2003261.1055_fuso33_sca3.tif	2003261_1055	10:55	18.9.2003	nična



Pregled razpoložljivih SCA posnetkov zahodne Slovenije od oktobra 2002 do maja 2003.

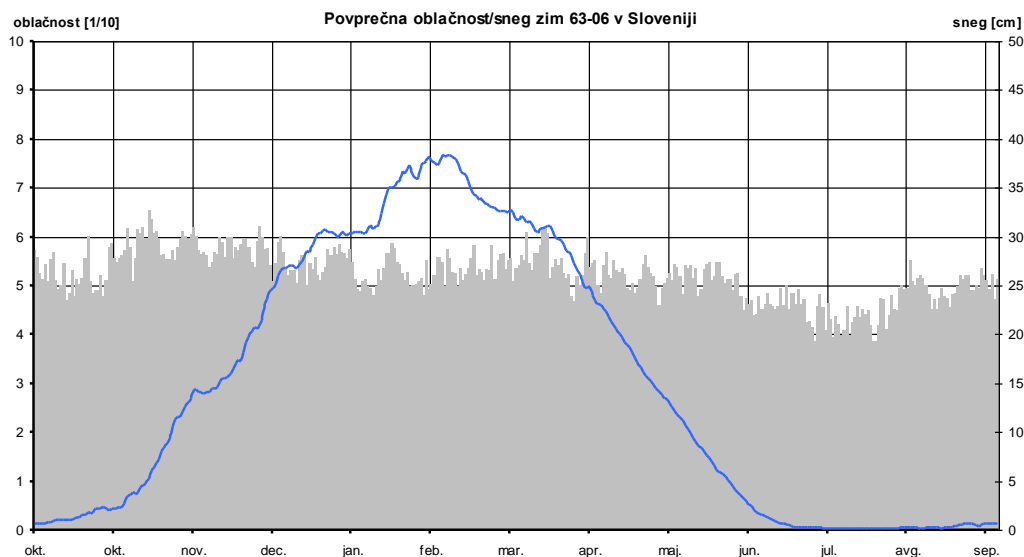
(<sup>2\*</sup>Brilly, 2008)

All available SCA images for western Slovenia from Oct. 2002 to May 2003. (<sup>2\*</sup>Brilly, 2008)

Izmed 12 razpoložljivih satelitskih posnetkov se je le en posnetek izkazal za uporabnega. Torej se je že takoj izkazalo, da je uporaben posnetek redek, saj je bilo kar več kot 50 % posnetkov pokritih z oblaki, dobrih 20 % pa brez snežne odeje. V nadaljevanju je bila preučena možnost uporabe satelitskih posnetkov zaradi klimatskih značilnosti v Sloveniji ter verifikacija s terenskimi meritvami ARSO.

#### 4.1.3.1 Vpliv oblačnosti

Pri obdelavi podatkov za obdobje triinštiridesetih let so bili dobljeni naslednji rezultati. Povprečna letna oblačnost je znašala 52 % (slika spodaj). Za potrebe snežne hidrologije nas je zanimala predvsem oblačnost v času najvišje snežne odeje. Na podlagi rezultatov se v povprečju obdobje z visoko snežno odejo razteza od januarja do aprila. Takrat znaša povprečna dnevna oblačnost 57 %, kar je nekoliko višje od povprečne letne vrednosti. Jasni dnevi se pri tako velikem zajemu podatkov v povprečju sploh ne pojavljajo. (Stušek, 2008)



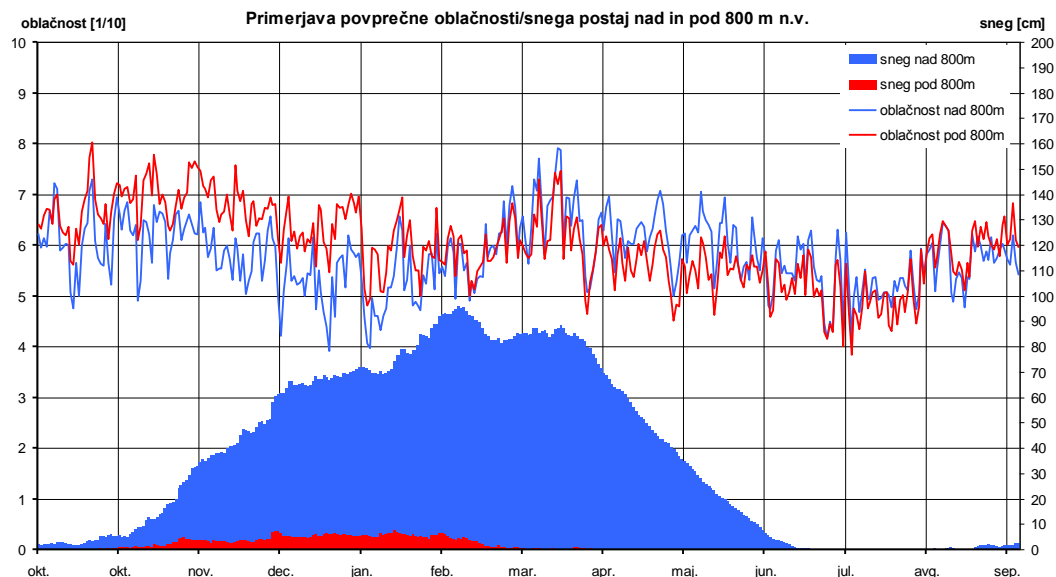
Povprečna oblačnost in višina snežne odeje za obdobje zim 1963 do 2006. (Stušek, 2008)

Arithmetic mean cloudiness and snow cover height for winter seasons from 1963 to 2006.

(Stušek, 2008)

Pri obdelavi podatkov se je s stališča oblačnosti pokazala očitna razlika med višje ležečimi in nižinskimi postajami (slika na naslednji strani). Stopnja oblačnosti oziroma povprečna oblačnost v času s snežno odejo na nižje ležečih in kotlinskih postajah znaša 69 %, na višje ležečih pa 60 %. Na nižje ležečih postajah predstavljajo jasni dnevi v povprečju le 8 % vseh dni s prisotno snežno odejo. Število dni, ko je snežna odeja prisotna, je manjše kot na višjeležečih postajah, zato je tudi verjetnost za nastanek jasnin manjša. Iz podatkov je razvidno, da je oblačnost v jutranjih urah višja kot v popoldanskih ali večernih. Jasna jutra se v povprečju pojavijo 8-krat, jasni popoldnevi pa 10-krat. Pri primerjavi števila jasnih juter, višje in nižje ležečih postaj podatki nakazujejo na prisotnost nizke oblačnosti in jutranje megle na nižje ležečih kotlinskih postajah. V večini primerov sta jutranja megla in nizka oblačnost posledica inverzije. Za satelitsko snemanje nižinskih postaj so po dobljenih podatkih primernejše pozne popoldanske ure med 14. in 21. uro. (Stušek, 2008)

Na višje ležečih postajah znaša v povprečju število dni s snežno odejo 143,6 dni, kar je trikrat več kot pri nižinskih postajah. Posledica tega je tudi večje število jasnih dni, saj je za pojav jasnine na razpolago več dni. Obratno kot pri nižje ležečih postajah je posledica inverzij na višje ležečih postajah več jasnine. Ker so inverzije značilne za jutranji in dopoldanski čas, je pričakovano v tem času na višje ležečih postajah več jasnine. V povprečju je v jutranjem času jasnih 41 dni, kar je petkrat več kot na nižje ležečih postajah. Nekaj manj jasnine se pojavi v popoldanskem času, ko je jasnih 32 dni. Po dobljenih podatkih so tako za snemanje višje ležečih postaj, ravno obratno kot pri nižje ležečih, primernejše zgodnje jutranje ure okoli 7.00. (Stušek, 2008)



Primerjava povprečne oblačnosti in višine snežne odeje med nižje ležečimi in višje ležečimi meteorološkimi postajami za obdobje zim 1996 do 2006. (Stušek, 2008)

Comparison of average cloudiness and snow cover height for areas with lower and areas with higher meteorological stations for winter seasons from 1996 to 2006. (Stušek, 2008)

Za uspešno satelitsko opazovanje snežne odeje, pri katerem bi bila verjetnost jasnine najvišja, tako pri višje ležečih kot pri nižje ležečih postajah, je važen čas snemanja. Najugodnejši čas za snemanje je med jutranjo jasnino na višje ležečih postajah in popoldansko jasnino na nižje ležečih postajah. Če tako na podlagi dobljenih podatkov določimo sredino med urama 7:00 in 16:00, dobimo optimalni čas snemanja ob 11:30, ki je ravno čas preleta satelitskega sistema MODIS. (Stušek, 2008)

#### 4.1.3.2 Vpliv pokrovnosti

Na gozdnatih površinah se sneg ob in po sneženju hitro sipa skozi krošnje na podlago in se tako skriva pred senzorji, ki ga zato težje ali pa sploh ne zaznajo. Satelit nad gozdom zazna le odbito svetlobo krošenj, algoritem za prepoznavanje snega tako ne prepozna snežne odeje pod krošnjami. Kot sem že omenil, je pojav najmočnejši predvsem v gostih iglastih in mešanih

gozdovih, ki ostanejo zeleni tudi preko zime. Nad gozdnatimi območji lahko tako pričakujemo največje napake pri zaznavanju snežne odeje. (Stušek, 2008)

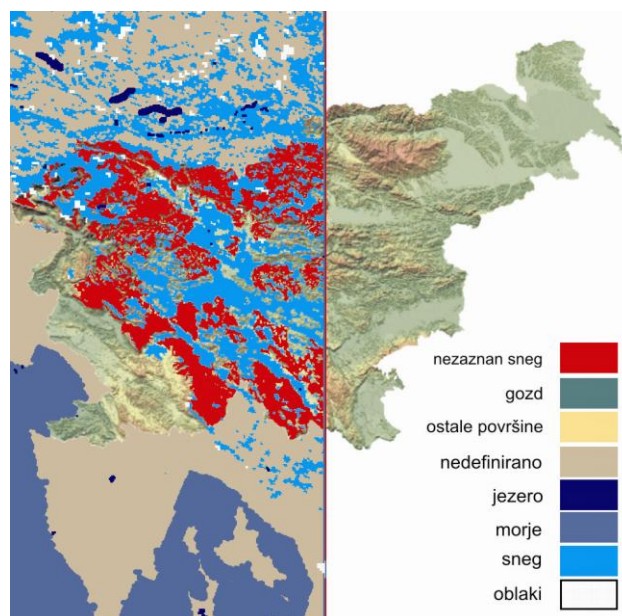
V Sloveniji, kot gozdnati deželi, bo verjetno zaznavanje snega v gozdu predstavljalo precejšen problem. Iz raziskave Statističnega urada RS o pokrovnosti tal v Sloveniji za leto 2000, narejeni s posnetki satelitov Landsat in Spot, je razvidno, da so gozdovi z 58 % (vključuje tudi grmičaste gozdove) prevladujoča kategorija pokrovnosti. Strukturno je od tega 22 % mešanih, 21 % listnatih in 12 % iglastih gozdov. Ti gozdovi niso enakomerno razporejeni po vsem ozemlju, največja sklenjena območja gozda pokrivajo dinarsko-kraške planote južne in jugozahodne Slovenije ter pobočja Alp na severu in zahodu. V Sloveniji je tako po zadnjih podatkih za leto 2007 skupno kar 66 % gozdnih površin (Stušek, 2008).

#### **4.1.3.3 Verifikacija satelitskih posnetkov s terenskimi meritvami**

Za analizo vpliva površin na natančnost zaznavanja snežne odeje je bil uporabljen posnetek mod02hkm\_2003055.1045\_fuso33\_sca3, narejen dne 24. 2. 2003, na katerem ni prisotne oblačnosti in je snežna odeja dobro vidna. Nad Evropo je bil ta dan močan anticiklon, zato nad Slovenijo ni bilo oblačnosti. (<sup>2\*</sup>Brilly, 2008)

Omenjeni satelitski posnetek je bil prekrit s površinami, poraslimi z gozdom, na sliki na naslednji strani. Na tej sliki se natančneje vidi, da je sistem na območjih z gozdom snežno odejo zaznaval slabše, ali pa je sploh ni zaznaval. V tem primeru zaznavanje snežne odeje s sistemom MODIS v strnjениh gozdovih pri višini snežne odeje do 25 cm ni zanesljivo. Sistem je snežno odejo zaznal le na odprtih in redkeje poraslih območjih nad gozdno in pod gozdno mejo. (<sup>2\*</sup>Brilly, 2008)





Prikaz dejanske površine snežne odeje glede na podatke z dne 24. 2. 2003. (<sup>2\*</sup>Brilly, 2008)

Measured snow cover on 24 Feb. 2003. (<sup>2\*</sup>Brilly, 2008)

Iz posnetka je razvidno, da sistem MODIS ni zaznal precejšnih površin snežne odeje, predvsem velja to za območja, porasla z neprekinjenim gozdom. Največja območja predstavljajo gozdovi Pokljuke, Jelovice, Polhograjskega ter Škofjeloškega hribovja, Snežniškega pogorja in Karavank. (<sup>2\*</sup>Brilly, 2008)

Na podlagi enega satelitskega posnetka ni mogoče podati povsem objektivne ocene velikosti napake, ki nastane pri zaznavanju snežne odeje. Za to bi potreboval večletne posnetke, obdelane z ustreznim GIS-orodjem. S podatki postaj o snežni odeji bi bilo treba oceniti stopnjo napake pri zaznavanju snežne odeje na različnih postajah. (<sup>2\*</sup>Brilly, 2008)

Upoštevati je trebna, da obstaja velika verjetnost, da je snežna odeja, ki je bila ponekod zelo nizka, do časa posnetka že skopnela. (<sup>2\*</sup>Brilly, 2008)

## 4.2 Modeliranje snežne odeje na porečju Save

Modeli so zasnovani glede na cilj modeliranja, razpoložljivost podatkov, znanja in merila obravnavanega pojava. Razvoj hidroloških modelov je prav tako pogojen s potrebami in zahtevami vodnega gospodarstva. Za modeliranje površinskega odtoka na porečju reke Save smo uporabili hidrološki model HBV, ki ob upoštevanju komponent hidrološkega kroga in karakteristik povodja omogoča oceno odtoka s povodja.

### 4.2.1 Uporaba modela HBV za modeliranje odtoka

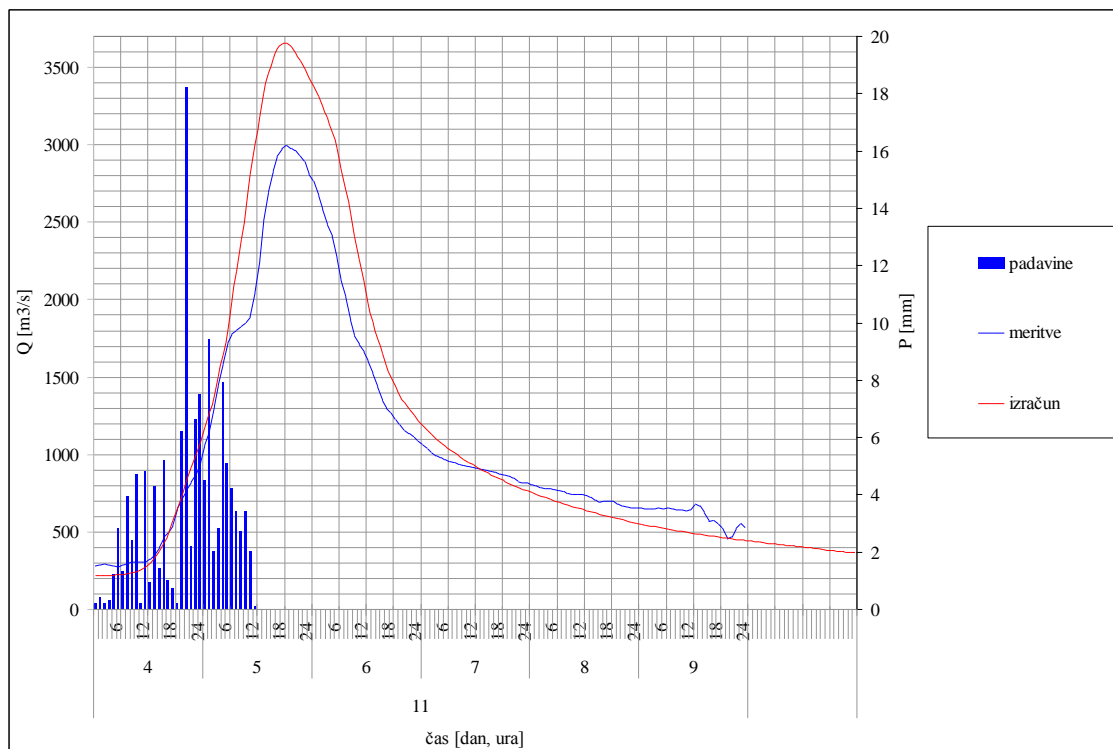
Švedski konceptualni model HBV je na porečju reke Save uporabljen za računanja odtoka s posameznih podpovodij in celotnega porečja ter ostalih hidroloških spremenljivk. Osnovni cilj je bil razviti model za hidrološko napovedovanje, ki je semidistribuiran konceptualni model padavine–odtok za kontinuirano računanje odtoka. V model so vgrajeni računski postopki za akumulacijo snega in taljenje, računanje vlage v tleh, generiranje in transformacijo odtoka. Vhodni podatki za model so padavine, temperatura zraka, potencialna evapotranspiracija, pretok (za umerjanje modela), izhodni podatki pa so odtok in ostale hidrološke komponente (ploskovne padavine, akumuliran sneg, evapotranspiracija, zaloga vode v tleh). Model omogoča kratkoročno in dolgoročno hidrološko napoved.

Model reke Save je bil izdelan v okviru diplomske naloge v letu 2007. Sprva so bile v modelu uporabljene dnevne vrednosti za obdobje 01. 01. 1990–31. 12. 2006 s časovnim korakom 1 dan, kasneje pa se je prešlo na urne vrednosti in skrajšano obdobje na leti 1998 in 1999 (Primožič, 2007).

Modelirano porečje obsega 10.098,49 km<sup>2</sup> in je razdeljeno na 26 podpovodij, velikosti od 0,26 km<sup>2</sup> do 1019,85 km<sup>2</sup>. Vsako podpovodje je nadalje razdeljeno še na elevacijske in vegetacijske cone.

### 4.2.1.1 Umerjanje modela reke Save

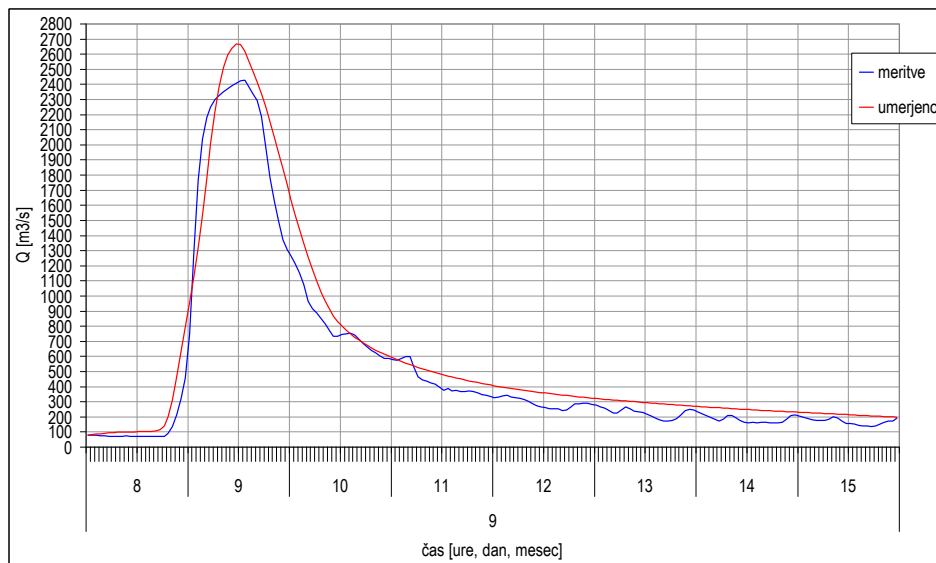
Modeliranje je bilo v naslednji fazi osredotočeno na čim boljše umerjanje poplavnega vala novembra leta 1998 (slika 11). Ta val bi namreč lahko kasneje služil kot dobro orodje za napovedovanje izrednih dogodkov kot je bil ta, leta 1998.



Slika 11: Leta 2007 umerjen poplavni val novembra 1998 na Savi pri Krškem.

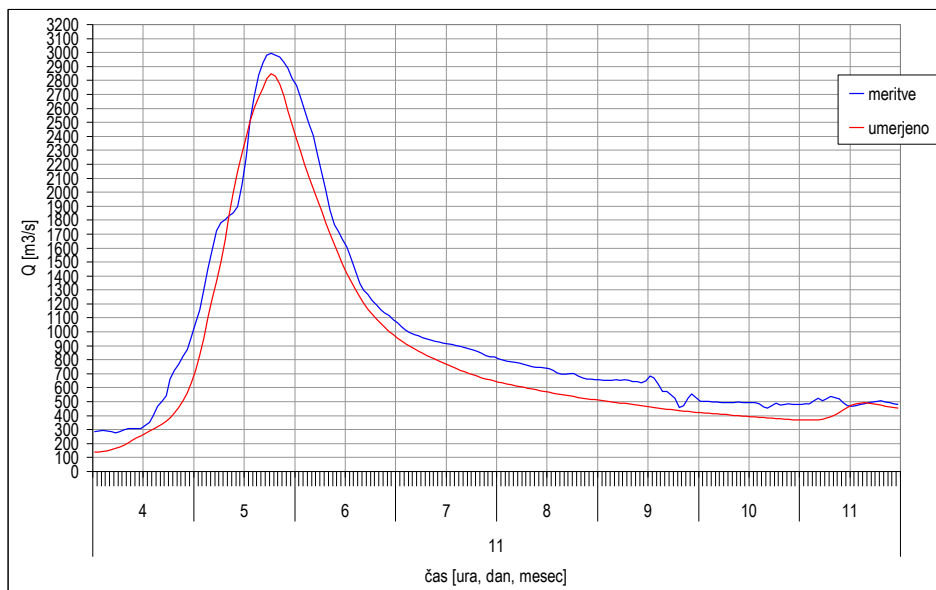
Figure 11: In 2007 calibrated flood wave of November 1998 on the Sava River at Krško.

V nalogi smo se osredotočili na dodatno umerjanje modela reke Save, s tem da smo ga razširili za dva poplavna vala, in sicer novembra 1990 ter septembra 2007. Pri tem smo težili k čim boljšemu umerjanju za poplavna vala leta 2007 in leta 1998, medtem ko je val novembra leta 1990 služil za verifikacijo modela. Za tako uporabo smo se odločili zaradi zelo pomanjkljivih podatkov pri poplavnem valu novembra 1990.



Slika 12: Umerjen poplavni val septembra 2007 na Savi pri Krškem.

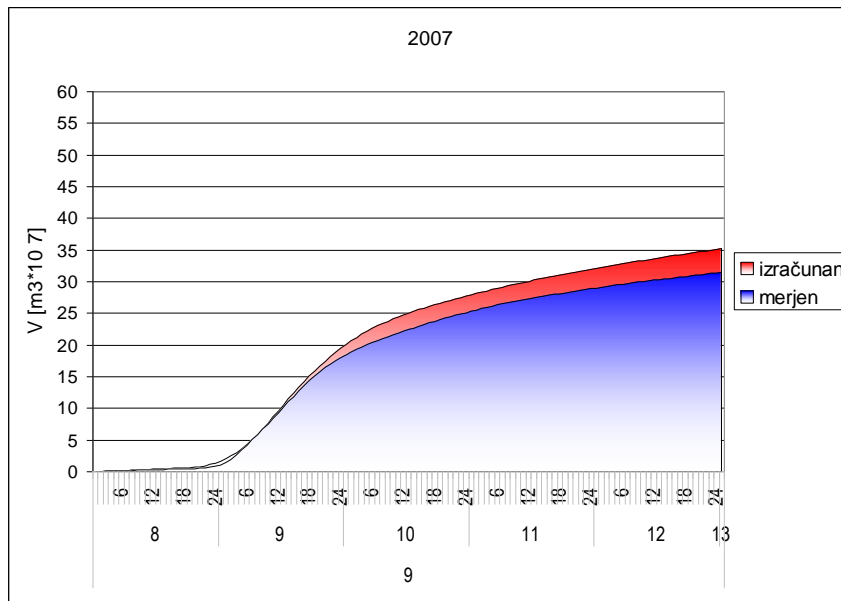
Figure 12: The calibrated flood wave of September 2007 on the Sava River at Krško.



Slika 13: Umerjen poplavni val novembra 1998 na Savi pri Krškem.

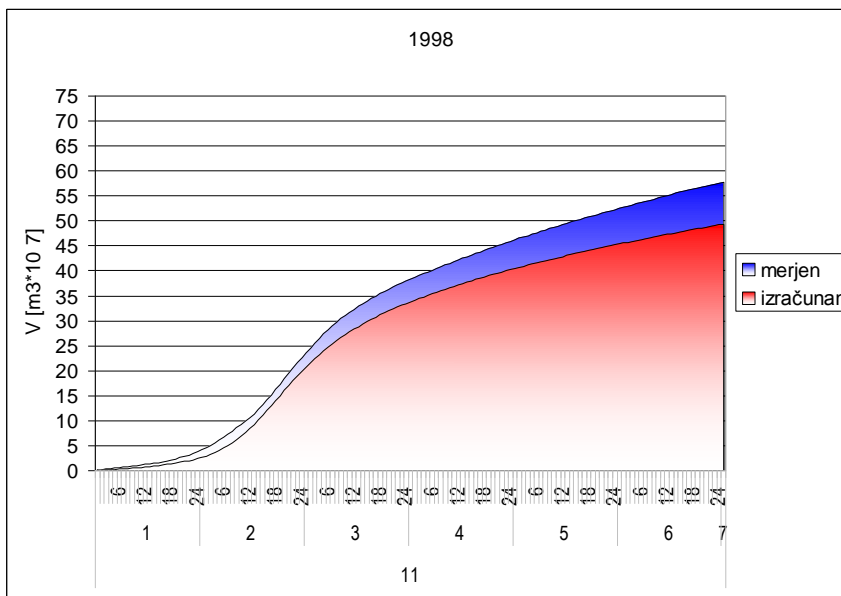
Figure 13: Calibrated flood wave on November 1998 on the Sava River at Krško.

Pri drugem umerjanju smo se osredotočili predvsem na obliko poplavnega vala, časovno usklajenost ter volumen vala (slike 12, 13, 14 in 15).



Slika 14: Umerjen volumen vala pri Krškem – povodje Sava 3 za leto 2007.

Figure 14: Calibrated flood wave volume at Krško – subbasin Sava 3 for 2007.

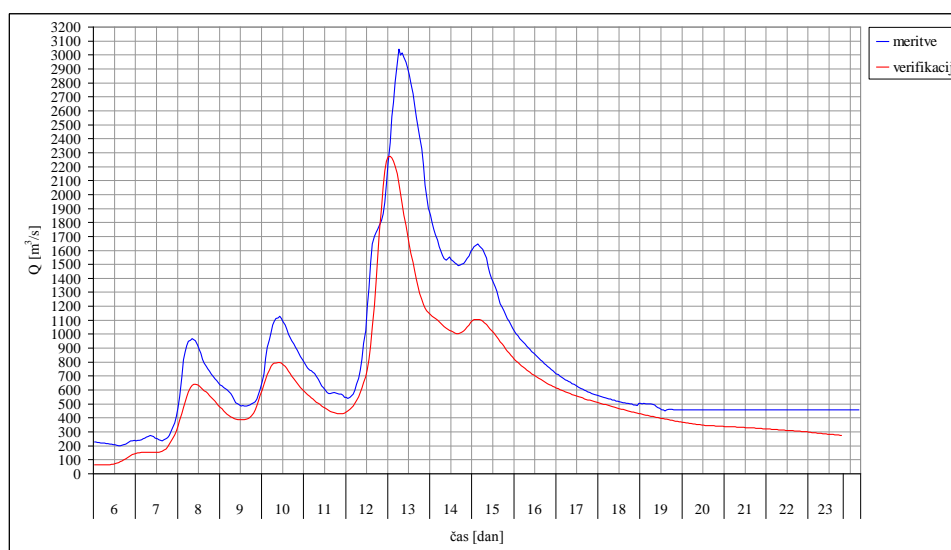


Slika 15: Umerjen volumen vala pri Krškem – povodje Sava 3 za leto 1998.

Figure 15: Calibrated flood wave volume at Krško – subbasin Sava 3 for 1998.

Volumna vala, prikazana na slikah 14 in 15, sta v zadovoljivi meji odstopanj. Prvi val za ujmo 2007 po volumnu odstopa 11 % od izmerjenega vala, in sicer je izračunani val večji. Drugi val za ujmo 1998 pa po volumnu odstopa 14 % od izmerjenega vala, in sicer je izračunani val manjši. Umerjanje modela se je v tej fazi zaključilo, saj je dodatno prilagajanje parametrov le povečevalo razlike na enem ali drugem valu.

Sledila je verifikacija modela, ki bi potrdila zadostnost za nadaljnjo uporabo. Model je bil verificiran s podatki za ujmo novembra leta 1990. Na sliki 16 je prikazan poplavni val leta 1990 pri Krškem.



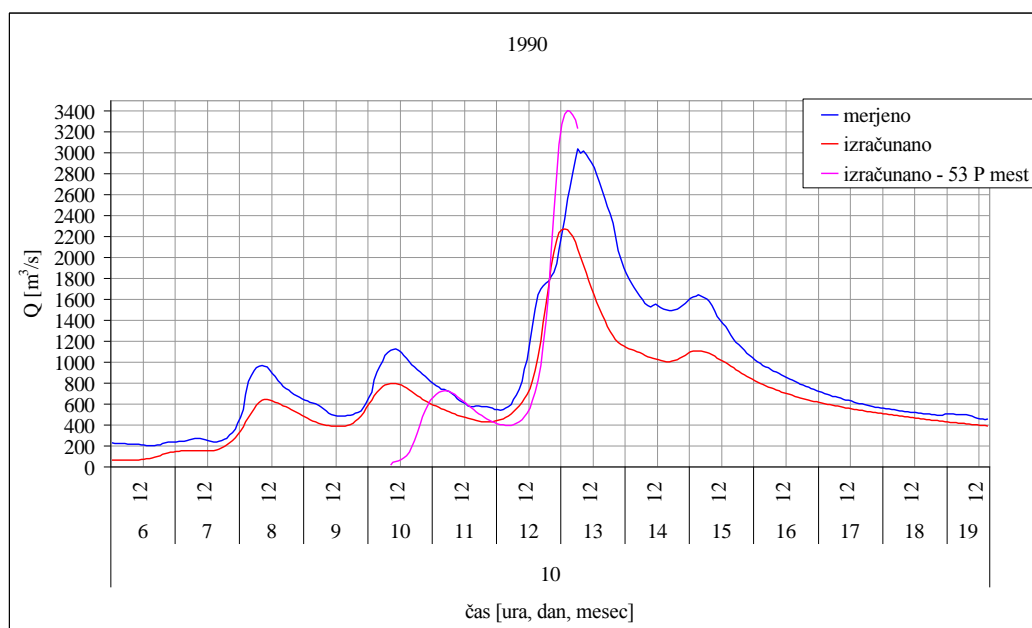
Slika 16: Verifikacija modela za poplavni val novembra 1990 na Savi pri Krškem.

Figure 16: Model verification of flood wave of November 1990 on the Sava River at Krško.

Na sliki 16 vidimo, da je verifikacija poplavnega vala za leto 1990 uspešna predvsem pri obliki samega vala. Količinsko pa je celoten val podcenjen in v konici je izračunan pretok pribl.  $700 \text{ m}^3/\text{s}$  manjši od izmerjenega. Glede na zadovoljivo umerjen model smo vzroke iskali v vhodnih podatkih o padavinah. Ti so gotovo najpomembnejši pri količini pretoka. Glede na to, da so v modelu podani vhodni podatki o padavinah samo na merilna mesta ombrografov, bi lahko bil razlog za prenizek val prav v prenizkih izračunanih padavinah na povodju. Pri iskanju prvega povodja, pri katerem pride do večjega odstopanja v višini vala,

smo naleteli na težavo pomanjkanja podatkov. Zaradi nezadostnih podatkov se celotnega vala na Savinji ni dalo verificirati. Gorvodno po porečju Save se odstopanje v višini vala pojavi pri podpovodju Sava 1, višje po toku pa prav tako ni bilo na voljo podatkov za verifikacijo.

V nadaljnji verifikaciji smo preoblikovali model, tako da smo v model vnesli več postaj, za katere bi lahko podali padavinske podatke. Po novem smo imeli v modelu 53 merilnih mest urnih padavin, kar je enako število kot v dnevnem modelu. Preračunane urne podatke smo dobili samo za ozko obdobje vseh treh valov, vendar je za vpogled v višino vala to zadoščalo. Prikazali smo oba poplavna vala, ki sta v modelu in za katera smo dobili urne podatke za vseh 53 postaj, zato da bi nove vhodne podatke in nove rezultate preverili tudi na umerjenem valu za leto 1998 (slika 17).



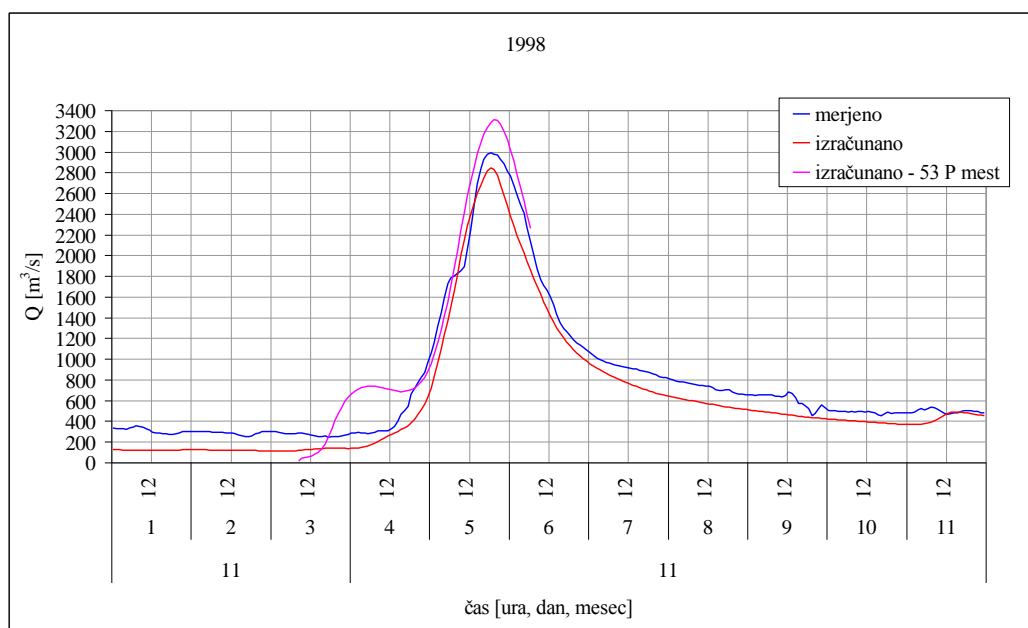
Slika 17: Verifikacija vala leta 1990 z urnimi podatki za 53 merilnih mest padavin.

Figure 17: Model verification for flood wave of 1990 for hourly data for 53 precipitation gage data.

Na sliki 17 vidimo, da je izračunan poplavni val, ki ima padavinske vhodne podatke iz 53 merilnih mest, precej višji, kot pa je bil verificiran val s padavinskimi podatki ombrografskih postaj. Nova konica presega merjene vrednosti za skoraj  $200 \text{ m}^3/\text{s}$ , medtem ko je bila

verificirana konica podcenjena za kar  $400 \text{ m}^3/\text{s}$ . Samega ujemanja poteka vala ne moremo verificirati, saj na voljo nismo dobili podatkov celotnega obdobja, zato se tudi na rezultate izračuna prvega dne ne moremo zanesti, saj je simulacija en dan pred konico še v začetnem stanju. Ti podatki so se torej izkazali za točnejše, saj po nekaterih študijah konica leta 1990 tudi ni bila le  $3000 \text{ m}^3/\text{s}$ , kot kažejo naše meritve, temveč naj bi bila več  $100 \text{ m}^3$  večja od te vrednosti. Uradnega poročila o novem izračunanem pretoku leta 1990 pa žal še nismo dobili na vpogled.

Glede na obetajoče boljše rezultate verifikacije vala leta 1990 z novimi gostejšimi padavinskimi podatki smo te preverili še na ponovnem izračunu poplavnega vala leta 1998 (slika 18).



Slika 18: Ponoven izračun vala leta 1998 z urnimi podatki za 53 merilnih mest padavin.

Figure 18: Re-calculated flood wave of 1998 for 53 available precipitation gage data.

Na sliki 18 je prikazan poplavni val leta 1998 pri Krškem z merjenimi podatki, umerjenimi podatki ter izračunom z dodatnimi vhodnimi podatki z gostejšo mrežo padavinskih postaj. Ujemanje oblike poplavnega vala je zadovoljivo, saj prvi dan vala lahko zanemarimo zaradi poznega začetka simulacije ter vpliva trenutnega stanja. Konica vala z dodatnimi



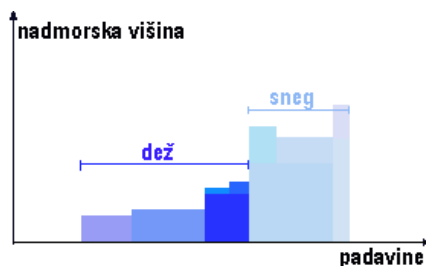
padavinskimi podatki preseže meritve za 300 m<sup>3</sup>/s, v predhodnem umerjanju z manj padavinskimi podatki pa je bila konica 200 m<sup>3</sup>/s podcenjena. Sama oblika vala se z novimi podatki lepše ujema, še vedno je vidna razlika pri meritvah v zakasnitvi merjenega vala zaradi pritoka Savinje, ki ga z modelom nikakor nismo uspeli prikazati. Žal je podatkov za vseh 53 merilnih mest premalo, da bi lahko simulirali celotne vale in izračunali še ujemanje po volumnu poplavnega vala. Prav tako na razpolago ni podatkov za poplavni val leta 2007, ki ga ne moremo ponovno izračunati in primerjati razlike z izračunom za leto 1998. Kljub vsemu smo z dobljenim rezultatom zadovoljni, saj se je izkazalo, da gostejša padavinska mreža da boljše rezultate in, najbolj pomembno, da je verifikacija uspešna z gostejšo padavinsko mrežo, kljub temu, da so novi vhodni padavinski podatki preračunani z interpolacijo iz meritev ombrografov. Tako umerjen model je bil torej uporabljen v nadaljnjem delu naloge za simuliranje tajanja snežne odeje in verifikacijo uporabe satelitskih posnetkov.

#### 4.2.1.2 Računski postopek za sneg

Snežne padavine v model podajamo v obliki dežnih padavin oziroma vodnega ekvivalenta snega. V grobem je ideja postopka za računanje snega taka, da se pod določeno temperaturo zraka padavine akumulirajo v obliki snega. Ko temperatura zraka zraste nad to mejo, se sneg tali. Model pri računanju upošteva le padavine in temperaturo zraka, pri čemer se upošteva spreminjanje temperature z nadmorsko višino. Temperatura zraka je glede na nadmorsko višino korigirana s faktorjem *TCALT*. Temperaturni prag (*TT*) je običajno okrog 0 °C in določi, kdaj pride do taljenja snega. Pri računanju snega se upošteva enostavno razmerje stopinja/dan. Taljenje snega po metodi stopinja/dan se opiše z enačbo:

$$\text{Taljenje snega} = CFMAX \cdot (T - TT), \quad (\text{IHMS, 1999})$$

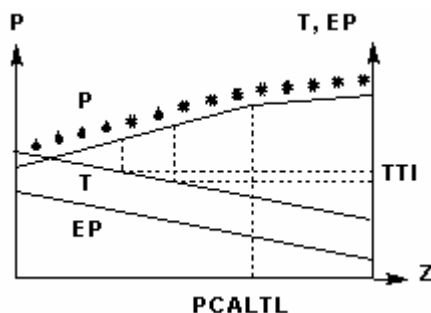
kjer je *T* temperatura elevacijske cone, *CFMAX* faktor taljenja snega in *TT* temperaturna meja, ko pride do taljenja snega. Parameter *FOCFMAX* upošteva različne faktorje taljenja snega za območja gozda in ostala območja. Računanje snega torej poteka posebej za vsako elevacijsko in vegetacijsko cono. Za območja brez snežne odeje se vegetacijskih con ne upošteva. (slika na naslednji strani)



Razdelitev računskega postopka za padavine (dežne, snežne) glede na elevacijske in vegetacijske cone. (IHMS, 1999)

Calculation method for precipitation. (IHMS, 1999)

Če se namesto parametra  $TT$  uporabi parameter  $TTI$ , se temperaturni prag raztegne v interval. Znotraj tega intervala se predpostavi, da so padavine mešanica snega in dežja. Količina snega se zmanjšuje linearno (slika spodaj), 100 % na začetku intervala do 0 % na koncu intervala.



Postopek za računanje snega. (IHMS, 1999)

Snow calculation. (IHMS, 1999)

Za snežno odejo je predpostavljeno, da zadržuje tekočo vodo, dokler količina vode ne preseže določene frakcije snega, ki je podana s parametrom  $WHC$  (vsebnost vode v snegu). Ko temperature zraka pade pod temperaturo praga  $TT$ , voda postopoma zmrzuje po enačbi:

$$\text{Zmrzovanje tekoče vode} = CFR \cdot CFMAX \cdot (TT - T), \quad (\text{IHMS, 1999})$$

kjer je  $CFR$  faktor zmrzovanja.

Podobno kot taljenje snega model računa tudi taljenje ledenika, le da je faktor taljenja drugačen:

$$\text{Taljenje ledu} = GMELT \cdot (T - TT), \quad (\text{IHMS, 1999})$$

kjer je *GMELT* faktor taljenja ledu.

V primeru, da je v elevacijski coni sneg, se taljenje ledu ne bo začelo. V posamezni coni lahko razporeditev snežnih padavin določimo s pomočjo parametra *SCLASS*, ki posamezno cono razdeli na število območij z različno akumulacijo snežnih padavin. Porazdelitev določimo s parametroma *SFDISTFO* in *SFDISTFI*.

#### 4.2.1.3 Vhodni in izhodni parametri računa snežnih procesov

Vhodni parametri s katerimi določimo procese povezane s snežno odejo so:

- pcorr* korekcijski faktor padavin (vsi vneseni padavinski podatki so pomnoženi s tem faktorjem) /1.0/,
- pcalt* korekcijski faktor padavin zaradi elevacijskih razlik (padavinski podatki so pomnoženi z  $1+h*pcalt$ , kjer je *h* višinska razlika v 100 metrih med elevacijskimi conami oz. srednja utež več postaj) /1.0/,
- pcaltl* najvišja višina za katero je uporabljen parameter *pcalt*; če je vrednost 0 je parameter *pcalt* uporabljen za vse višine, če pa ni 0, ga zamenja parameter *pcaltgl* (za ledenike) ali *pcaltup* (ostale zone) za večje višine, kot je največja višina *pcaltl*,
- pcaltup* korekcijski faktor padavin zaradi elevacijskih razlik, uporabljen pri višinah večjih od *pcaltl* za cone brez ledenikov,
- pcaltgl* korekcijski faktor padavin zaradi elevacijskih razlik, uporabljen pri ledeniških conah (nad *pcaltgl*),
- tcalt* spreminjanje temperature (°C/100m) /0.6/,
- rfcf* korekcija dežja (podatki o dežju so pomnoženi s tem faktorjem) /1.0/,
- sfcf* korekcija sneženja (podatki o sneženju so pomnoženi s tem faktorjem) /1.0/,
- fosfcf* faktor, ki je pomnožen s *SFCF* za cone tipa "gozd" /1.0/,
- cfmax* faktor tavanja snega v mm/°C in dan /3.5/,

<i>focfmax</i>	faktor, ki je pomnožen s CFMAX za cone tipa "gozd" /0.6/,
<i>tt</i>	temperaturna meja v °C, pod katero se upoštevajo snežne padavine,
<i>dtm</i>	vrednost, ki je dodana tt, da dobimo mejo tajanja snega (pogosto nič),
<i>tii</i>	dolžina temperaturnega intervala, v katerem del snežnih padavin pada linearno od 1.0 na najnižjem koncu intervala do 0 na najvišje koncu intervala (°C); sredina intervala je definirana s $tt / 2.0$ /,
<i>gmelt</i>	faktor tajanja za ledenike v mm/°C in dan /3.5/,
<i>cfr</i>	faktor ponovnega zmrzovanja pri računu snežne odeje /0.05/,
<i>whc</i>	vodna zadrževalna kapaciteta snega (maks. od wc/sp) /1.0/,
<i>sfdistfo</i>	porazdelitev snega v conah gozda, če je uporabljen parameter sclass; vrednost 0 da za vse razrede snežne odeje enako akumulacijo snega, medtem ko vrednosti med 0 in 1 pomenijo, da je sneg pomnožen s faktorjem, ki linearno narašča od $1 - sfdistfo$ v prvem razredu do $1 + sfdistfo$ v zadnje razredu /0.2/,
<i>sfdistfi</i>	velja enako kot pri <i>sfdistfo</i> za cone brez gozda; za cone jezer porazdelite snega ni možno določiti /0.5/,
<i>sclass</i>	število razredov snega; vsaka cona je razdeljena na podcone, za katere se določi porazdelitev snega glede na parameter <i>sfdistfo</i> ali <i>sfdistfi</i> ; znotraj cone imajo vse podcone enako površino /3/,
<i>wet</i>	če je parameter 1 bo tajanje snega računano s temperaturo kondenzacije, ki je računana iz vlažnosti zraka namesto iz običajne temperature zraka; ta parameter se lahko uporabi le, kadar poznamo vlažnost zraka.

Izhodni parametri, ki jih program izračuna, nam povejo delež zmrznjene vode v snegu (sp), delež vode v snegu zaradi taljenja (wc), vsebnost vode v snegu kot del zadrževalne kapacitete ( $relwc = wc/whc*sp$ ), infiltracijo iz snežne odeje (insoil) in količino tajanja snega (smelt – odvisno od zadrževalne kapacitete whc).

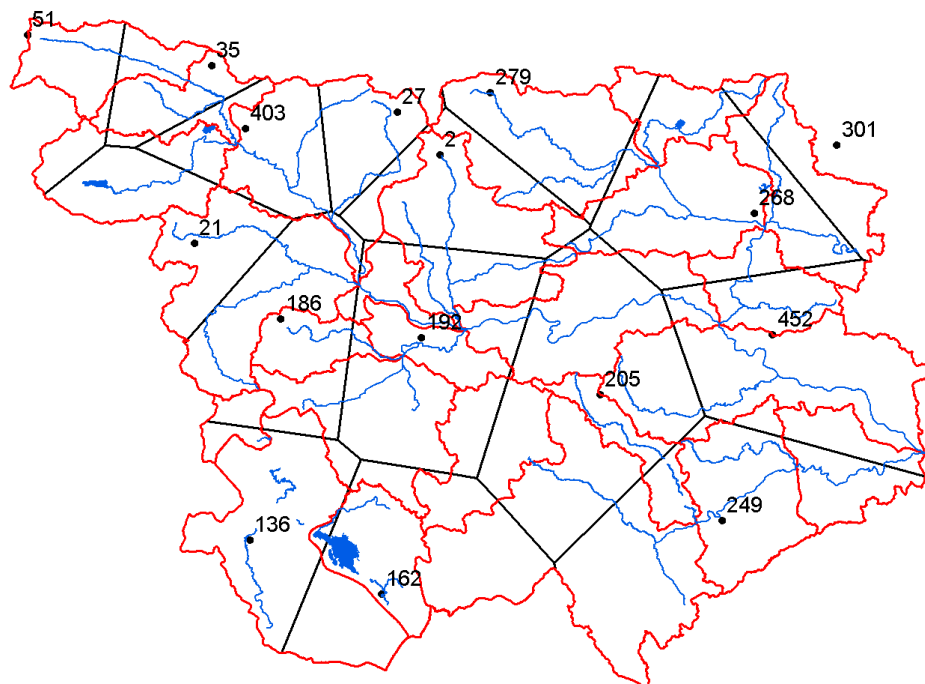
#### 4.2.1.4 Vhodni podatki za sneg

Snežne padavine se podajo v obliki vodnega ekvivalenta snega v mm na merilna mesta za padavine (preglednica 8, slika na naslednji strani).

Preglednica 8: Merilna mesta za padavine – ombrografi.

Table 8: Precipitation gages – ombrographs.

	Številka	Ime	Koordinate postaje		Nadmorska višina [m n.m.]
1	2	Kamniška Bistrica	468479	131752	601
2	21	Davča	428554	117455	960
3	27	Zgornje Jezersko	461465	138646	872
4	35	Javorniški Rovt	431344	146259	940
5	51	Rateče	401540	151150	864
6	136	Postojna	437588	69412	533
7	162	Šmarata	458962	60622	580
8	186	Črni vrh	442610	105174	830
9	192	Ljubljana	465468	102101	299
10	205	Sevno	494405	92962	545
11	249	Novo mesto	514175	72525	220
12	268	Celje	519469	122286	244
13	279	Solčava	476601	141841	658
14	301	Slovenske Konjice	532870	133325	330
15	403	Lesce	436850	136011	515
16	452	Lisca	522404	102670	943



Lokacije ombrografov z izrisanimi Thiessenovimi poligoni. (Primožič, 2007)

Locations of ombrographs and Thiessen's polygons. (Primožič, 2007)

## 5 REZULTATI

Cilj naloge je opredeliti pomembnost vpliva tajanja snežne odeje v višjeležečih krajih ter določiti možnost uporabe satelitskih posnetkov za namen zaznavanja snežne odeje v Sloveniji.

Glede na rezultate bomo predpostavili možni vpliv na pretoke reke Save ter poplavno ogrožena območja pri spomladanski odjugi.

Pridobljena spoznanja bodo omogočila natančnejše modeliranje oz. napovedovanje pretokov rek s hribovitim zaledjem in s tem vplivala na načrtovanje bodočih ukrepov v povodjih in planiranju rabe hidroenergije.

### 5.1 Vpliv tajanja snega na odtok reke Save

Za ugotavljanje vpliva tajanja snega na pretoke reke Save smo primerjali višino snežne odeje na visokogorski postaji ter pretok na reki Savi na istem povodju. Uporabili smo merilno mesto Kredarica in vodomerno postajo Jesenice na Gorenjskem za povodje Save Dolinke ter merilno mesto Vogel ter vodomerno postajo Bodešče za povodje Save Bohinjke (slika 19).



Slika 19: Prikaz podpovodij Save Dolinke in Save Bohinjke z označenimi merilnimi mesti za snežno odejo in pretok.

Figure 19: Subbasins of the Sava Dolinka and the Sava Bohinjka with locations of measurement stations for snow cover height and river flow.

## 5.1.1. Korelacije med pretoki in višino snežne odeje

### 5.1.1.1 Primerjave med pretoki vodomerne postaje Jesenice in višino snežne odeje na postaji Kredarica

Vpliv tajanja snežne odeje na pretoke reke Save smo najprej poskusili pokazati s korelacijo med dvema spremenljivkama. Za primerljivi spremenljivki smo izbrali višino snega, izmerjeno na merilni postaji Kredarica, ter pretok reke Save, izmerjen na vodomerni postaji Jesenice na Gorenjskem. Za koreliranje smo izbrali meritve 40 let, natančneje: določili smo 40 sezon oziroma obdobj, v katerih je prisotna snežna odeja. Spremenljivki smo torej korelirali v času, ko je na Kredarici debelina snežne odeje preseгла 10 cm do konca snežne odeje + 3 dni po tem, ko se snežna odeja odtaja.

Korelacijo dveh spremenljivk (višine snežne odeje in pretoka) smo izračunali za vse sezone s snežno odejo višjo od 400 cm (14 sezon). Koeficient korelacije se giblje med vrednostmi 0,008 (sezona 1984/1985) in 0,165 (sezona 1978/1979). (Preglednica 9) (Priloga A1)

Preglednica 9: Rezultati korelacije za posamezne sezone.

Table 9: Results of correlations for different winter seasons.

Sezona	Višina snežne odeje [cm]	Korelacijski koeficient $R^2$
1971/1972	> 400	0,079
1972/1973	> 400	0,018
1974/1975	> 500	0,346
1976/1977	> 600	0,016
1977/1978	> 500	0,098
1978/1979	> 600	0,165
1979/1980	> 400	0,159
1983/1984	> 400	0,081
1984/1985	> 400	0,008
1985/1986	> 400	0,049

... se nadaljuje



... nadaljevanje

1986/1987	> 400	0,168
1987/1988	> 400	0,078
1990/1991	> 400	0,093
2000/2001	> 600	0,053

Linearna korelacija nam poda nizke vrednosti korelacijskega koeficienta, kar pomeni, da med spremenljivkama ni linearne povezave. To pomeni, da povezava med spremenljivkama očitno obstaja, a ni linearna. Nelinearno povezavo si lahko razlagamo kot posledico vpliva več dejavnikov na višino snežne odeje in pretoke reke Save, med katerimi sta najpomembnejša vlažnost tal in temperatura ozračja.

### 5.1.1.2 Primerjave med pretoki vodomerne postaje Bodešče in višino snežne odeje na postaji Vogel

Korelacijo med dvema spremenljivkama, ki sta bili pretok in višina snežne odeje, smo izračunali še za primer vodomerne postaje Bodešče na Savi Bohinjki ter merilnega mesta snežne odeje Vogel. Tako smo skušali preveriti še drugo možno varianto korelacije med dvema postajama, ki ležita v zaledju porečja reke Save, ki je v hribovitem svetu (slika 19). Ti dve merilni mesti sta v primerjavi s prejšnjima dvema na večji zračni razdalji, vendar je med njima manjša nadmorska razlika. To je tudi glavni razlog zakaj na merilnem mestu Vogel ni bilo toliko snežne odeje kot na Kredarici.

Izračunali smo korelacijo med dvema spremenljivkama za 14 sezon, in sicer od sezone 1987/1988 do 200/2001. Pri tem smo znova ločili sezone z najvišjo višino snežne odeje po razredih: višina nad 300 cm, nad 200 cm ter nad 100 cm. Pri tem smo ugotovili, da je sezona z višino snežne odeje nad 300 cm le ena, medtem ko ima pet sezon snežno odejo višjo od 200 cm ter 12 sezon višjo snežno odejo od 100 cm. V dveh sezonah pa snežna odeja ne preseže 100 cm. Če te rezultate primerjamo z rezultati merilnega mesta Kredarica, vidimo, da je na Kredarici med 40 sezonami kar 29 sezon s snežno odejo višjo kot 300 cm, kar je občutna razlika med količino snega. Očitno je, da nadmorska višina zelo vpliva na količino zapadlega

snega. Med merilnima mestoma je približno 1000 m nadmorske višinske razlike, kar je očiten razlog za še enkrat večjo debelino snežne odeje na merilnem mestu Kredarica.

Glede na nižje višine snežne odeje na merilnem mestu Vogel smo se odločili, da bomo analizo podatkov izvedli za vse sezone s snežno odejo višjo od 100 cm (14 sezon). Tako smo enako kot za merilni mesti Jesenice in Kredarica izračunali korelacije za teh 14 sezon.(preglednica 10) (Priloga A2)

Preglednica 10: Rezultati korelacija za posamezne sezone.

Table 10: Results of correlations for different winter seasons.

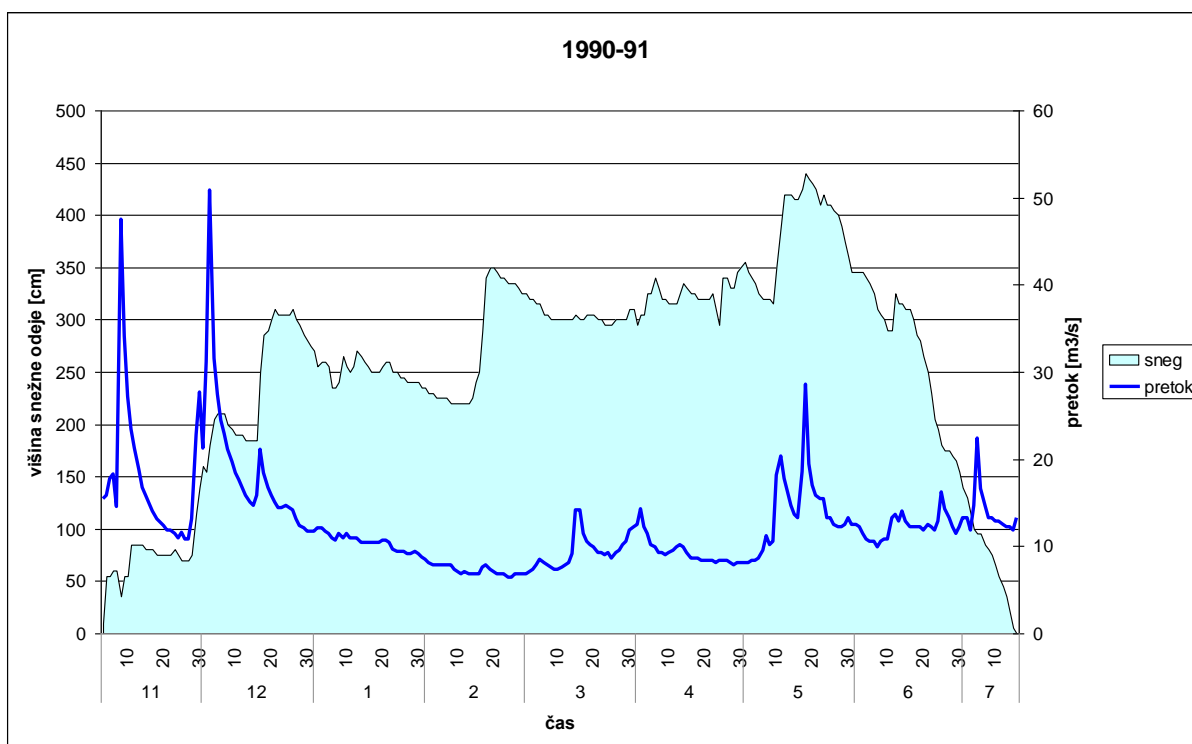
Sezona	Višina snežne odeje [cm]	Korelacijski koeficient $R^2$
1987/1988	> 200	0,125
1988/1989	> 100	0,006
1990/1991	> 200	0,234
1991/1992	> 200	0,014
1993/1994	> 200	0,006
1994/1995	> 300	0,008
1995/1996	> 200	0,003
1996/1997	> 100	0,052
1997/1998	> 100	0,017
1998/1999	> 100	0,015
1999/2000	> 100	0,096
2000/2001	> 100	0,098

Korelacije imajo vrednosti med 0,006 (sezona 1988/1989) in 0,234 (sezona 1990/1991). Nizke vrednosti korelacij nam spet dajo nelinearno povezavo med dvema spremenljivkama, ki sta pretok in višina snežne odeje. Pri tem vrednosti ne odstopajo od vrednosti korelacije med postajama Jesenice in Kredarica. Glede na vrednosti  $R^2$  v povezavi z višino snežne odeje lahko zaključimo tudi, da sama višina snežne odeje ne vpliva na velikost korelacijskega koeficienta.

## 5.1.2 Sezonske primerjave pretokov in višine snežne odeje

### 5.1.2.1 Primerjava med merilnima mestoma Jesenice in Kredarica

Glede na rezultate korelacije, ki nam je pokazala, da med spremenljivkama ni linearne povezave, smo se odločili, da podrobneje grafično primerjamo podatke o pretokih in višini snežne odeje. Na grafičnem prikazu se lažje določi časovno ujemanje tajanja snežne odeje in povečanja pretokov, iz česar lahko sklepamo na vpliv tajanja snega na Kredarici – na povečan pretok Save. Grafično smo primerjali enakih 14 sezon kot pri korelaciji. (Priloga B1)



Slika 20: Primerjava pretokov (Jesenice) in višine snežne odeje (Kredarica) za zimo 1990–91.

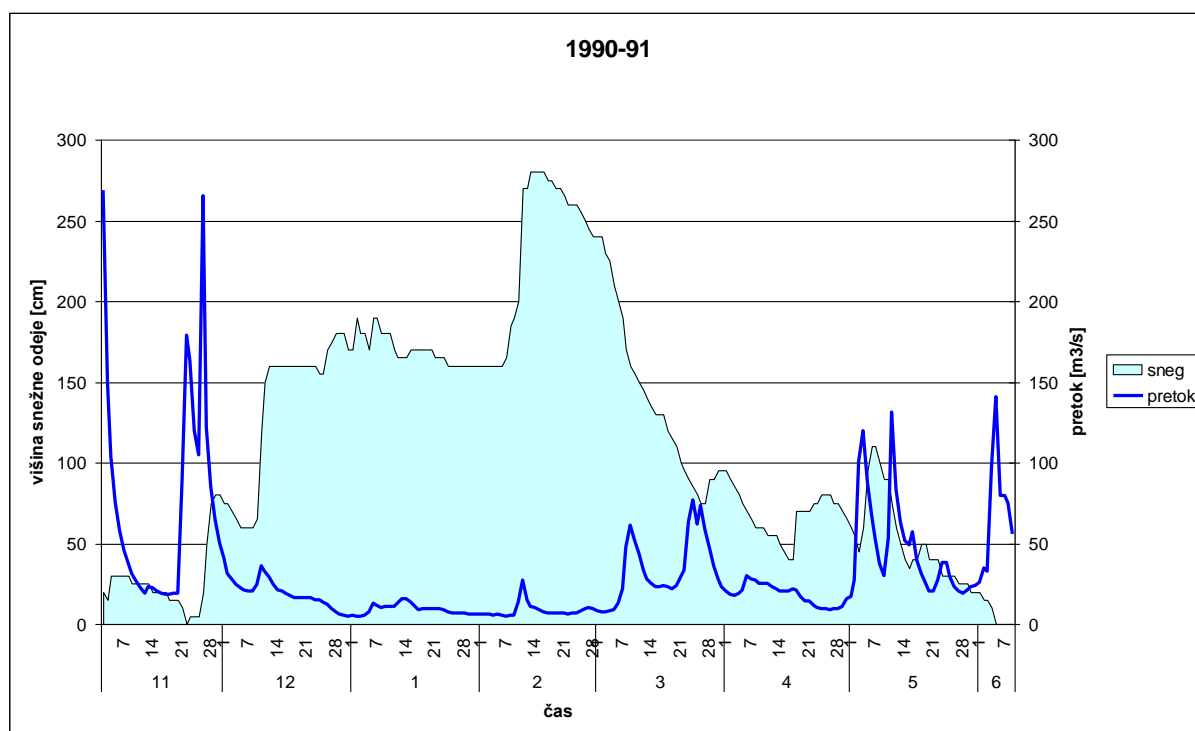
Figure 20: Comparison of river flow (Jesenice) and snow cover height (Kredarica) for winter season 1990–91.

Kot dober primer bi izpostavili sezono zime 1990–1991 (slika 20), ki se je začela s povečanim pretokom v prvi polovici novembra, ki je bil posledica jesenskega deževja. Tudi v začetku decembra je pretok Save Bohinjke narasel, kar je znova posledica deževnega obdobja, ki v

nižine prinese dež, na višjih legah pa sneg, kar lahko sklepamo iz časovnega ujemanja porasta pretoka in višine snežne odeje. Snežna odeja v sezoni 1990/91 je bila na merilnem mestu Kredarica neprekinjeno prisotna vse do sredine julija. Vmes se je debelila za tudi več kot 1 m v manj kot dveh dneh konec februarja. Ves čas so prisotna obdobja nihanja višine snežne odeje in pretoka. V maju sovpada obdobje povečanih pretokov in povečane višine snežne odeje, kar je lahko posledica spomladanskega deževja v nižinah, obenem pa še vedno nizkih temperatur v višinah, ki povzročijo snežne padavine. Od sredine maja se začne intenzivno obdobje tajanja snežne odeje, ki je prekinjeno še junija s ponovnimi snežnimi padavinami. V obdobju intenzivnega tajanja je opazno splošno povečanje pretokov na Savi Dolinki z vmesnimi konicami, ki so verjetno posledica deževnih padavin. Od zadnjih snežnih padavin na Kredarici, ki padejo 12. junija pa do popolnega odtajanja snežne odeje mine kar 34 dni oziroma dober mesec dni.

#### **5.1.2.2 Primerjava med merilnima mestoma Bodešče in Vogel**

Enako kot pri računu korelacij smo primerjavo med pretokom in višino snežne odeje naredili tudi za merilni mesti Bodešče in Vogel (Priloga B2) (slika 21), in sicer za enako leto kot pri primerjavi med merilnima mestoma Jesenice in Kredarica.



Slika 21: Primerjava pretokov (Bodešče) in višine snežne odeje (Vogel) za zimo 1990–91.

Figure 21: Comparison of river flow (Bodešče) and snow cover height (Vogel) for winter season 1990–91.

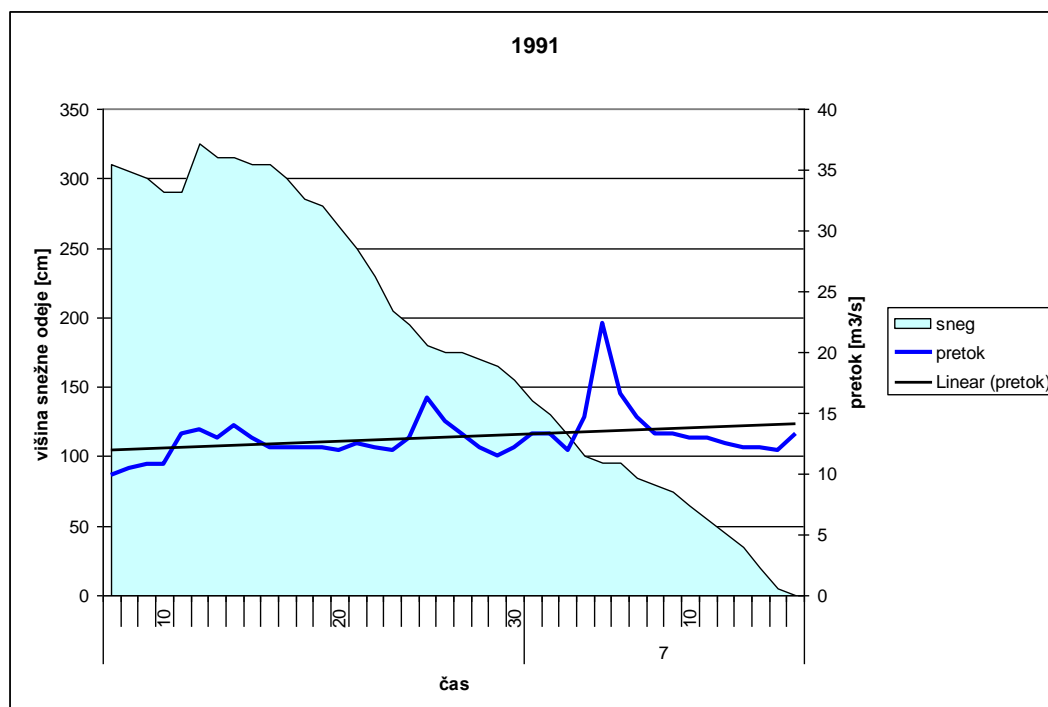
V sezoni 1990/91 je bila na Voglu dosežena višina snežne odeje nad 200 cm ter je bila enako kot na Kredarici prisotna vso zimo, neprekinjeno od konca novembra do začetka junija. Pretoki na Savi Bohinjski se pričnejo z dvema viškoma, enako kot na Jesenicah, ki sta posledica povečanih jesenskih padavin. Pri zadnjih jesenskih padavinah je tudi na merilnem mestu Vogel zabeležena snežna odeja, ki hitro doseže več kot pol metra. Do sredine februarja je višina snežne odeje bolj ali manj konstantne višine med 160 in 180 cm, v drugi polovici februarja pa naraste pri obilnejših snežnih padavinah za več kot 1 m. Enak pojav je zabeležen tudi pri primerjavi Kredarice in Jesenic, vendar je manj izrazit zaradi višje prvotne snežne odeje. V tem obdobju je pretok na Savi Bohinjski nizek –  $10 \text{ m}^3/\text{s}$  z nekaj manjšimi vmesnimi viški. Po dosegu maksimalne debeline snežne odeje prične ta hitro upadati. Taljenje se zaustavi konec marca, ko znova pade nekaj snežnih padavin, medtem ko v nižinah že lahko pade dež. Snežna odeja se obdrži do 4. junija. V mesecih intenzivnega tajanja je zabeleženih več povečanja pretokov, ki so posledica tajanj v kombinaciji s spomladanskimi padavinami.

Kljub temu je v mesecih, ko je prisotno tajanje – od marca dalje, opazno splošno povečanje pretoka Save Bohinjke.

### 5.1.3 Primerjave pretokov in višine snežne odeje v obdobju tajanja

#### 5.1.3.1 Primerjava med merilnima mestoma Jesenice in Kredarica

S primerjavo pretokov in višine snežne odeje v obdobju tajanja smo želeli podrobneje določiti vpliv tajanja snega na pretok. Primerjali smo snežno odejo višjo od 4 m enakih 14 sezon, za katere smo prej naredili korelacije. Obdobje smo vzeli približno od dosežene maksimalne debeline snežne odeje in do popolnega odtajanja snežne odeje. Ugotovili smo, da se v večini sezon pretok proti koncu povečuje, in sicer je trend pretoka v 10 od 14 obravnavanih sezon naraščajoč. Kljub temu, da na trend pretoka dodatno vplivajo spomladanske padavine, pa je opazen splošen dvig povprečnega pretoka v obdobju tajanja snežne odeje. (Priloga C1)



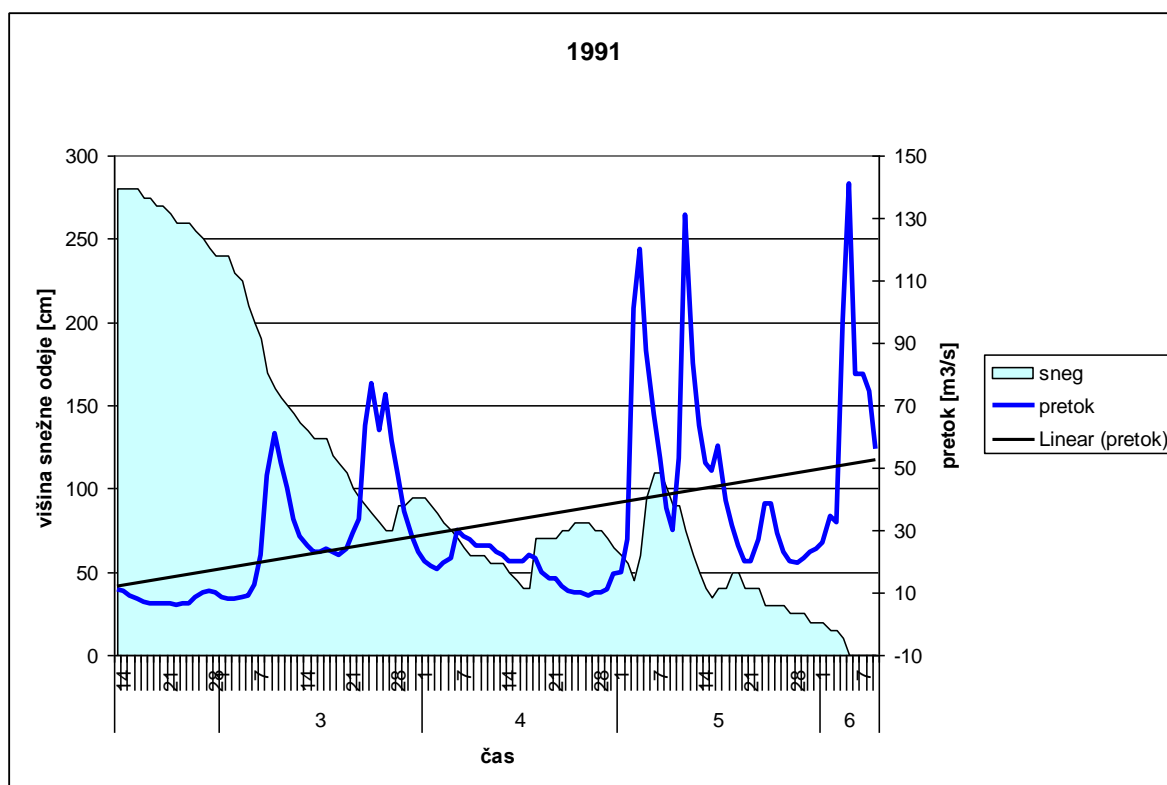
Slika 22: Primerjava pretokov (Jesenice) in višine snežne odeje (Kredarica) za leto 1991.

Figure 22: Comparison of river flow (Jesenice) and snow cover height (Kredarica) for 1991.

Pri podrobnejši primerjavi istega leta (slika 22), kot prej pri sezonski primerjavi lahko še bolj izrazito vidimo ujemanje obdobja tavanja na Kredarici s povečanjem pretokov na Jesenicah. Dodani trend kaže naraščanje pretokov v obdobju tavanja snežne odeje.

### 5.1.3.2 Primerjava med merilnima mestoma Bodešče in Vogel

V obdobju tavanja smo primerjali še pretoke in višino snežne odeje na merilnih mestih Bodešče in Vogel za sezono 1990/91 (Priloga C2) (slika 23). Želeli smo podrobneje pogledati v obdobje tavanja, v katerem se pri pregledu celotne sezone pretok poveča.



Slika 23: Primerjava pretokov (Bodešče) in višine snežne odeje (Vogel) za leto 1991.

Figure 23: Comparison of river flow (Bodešče) and snow cover height (Vogel) for 1991.

V obdobju tavanja snežne odeje je več valov povečanja pretoka, ki so lahko posledica tavanja ter dežnih padavin v nižinah. Predvsem za zadnja povečanja lahko trdimo, da so posledica

padavin, saj je snežna odeja v maju že zelo nizka in nikakor ne bi mogla vplivati na pretoke do take mere, kot kaže grafični prikaz.

#### 5.1.4 Modeliranje vpliva tajanja snežne odeje

Za podrobnejši vpogled v same hidrološke procese v obdobju prisotnosti snežne odeje, predvsem v obdobju tajanja, smo modelirali tavanje snežne odeje ter rezultate primerjali s terenskimi meritvami. V model reke Save smo vnesli na mesta ombrografov podatke o vodnem ekvivalentu snega na prvi dan obdobja simulacije. Vodni ekvivalent smo določili izkustveno, saj se meritve vodnega ekvivalenta na področju Slovenije ne izvajajo za nobeno drugo postajo kot za Kredarico, pa še tam le enkrat letno, običajno ob koncu zime. Prve vrednosti vodnih ekvivalentov smo preračunali sorazmerno glede na izkustveno vrednost 10 mm vodnega ekvivalenta v 10 cm snega (Brilly, 2005) (preglednica 11).

Preglednica 11: Merilna mesta snežne odeje, nadmorska višina, izmerjena debelina snežne odeje ter izračunan vodni ekvivalent.

Table 11: Locations of snow cover height measurement stations, level above the sea, measured snow cover height and calculated snow water equivalent.

Merilno mesto	Nadmorska višina	Izmerjena višina snežne odeje v cm	Vodni ekvivalent v mm
		10	10
Letališče Brnik	364	8	8
Kredarica	2514	195	195
Rateče Planica	864	18	18
Vojsko	1076	60	60
Bilje	46	0	0
Postojna	533	6	6
Kočevje	467	28	28
Lj. Bežigrad	299	15	15
Črnomelj	157	12	12

... se nadaljuje



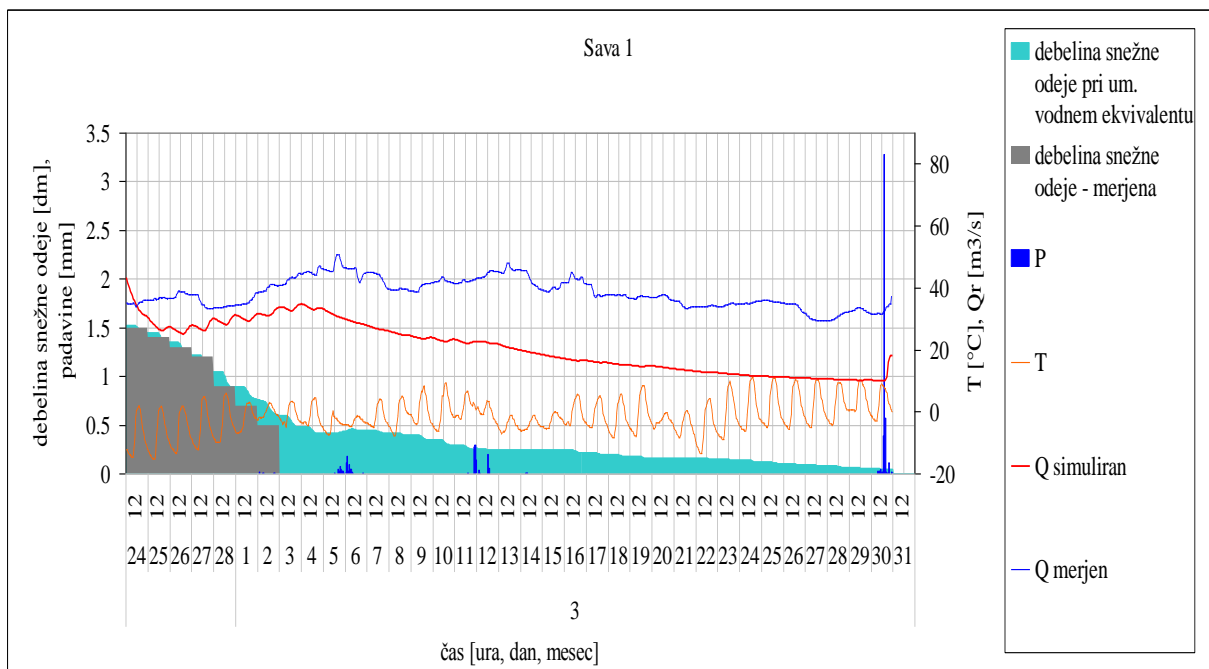
... nadaljevanje

Novo mesto	220	19	19
Celje	244	10	10
Šmartno pri SG	455	18	18
Rakičani MS	188	5	5
Lesce	515	8	8
Metlika	210	12	12
Vogel	1535	90	90
Lisca	943	52	52
Letališče Portorož	2	0	0

Merilna mesta snežne odeje se ne ujemajo povsem z lokacijami ombrografov, zato smo vzeli najbližje merilno mesto.

Obdobje simulacije je bilo 24. 2. 1999–31. 3. 1999, tako da je v obdobje zajet tudi dan, za katerega smo imeli satelitski posnetek snežne pokritosti, ki ga bomo preverjali z rezultati modela. Z umerjenim vodnim ekvivalentom bomo preverjali hitrost tajanja snežne odeje ter površinski pretok na reki Savi, in sicer za podpovodje Sava 1 v modelu HBV, ki je med manjšimi območji in ima najbolj zanesljive podatke o snežnih padavinah (merilno mesto snežnih in dežnih padavin je enako), ter pretoku (Šentjakob).

Prve rezultate vodnega ekvivalenta smo primerjali z meritvami in vodni ekvivalent snežne odeje umerili glede na dobljene vrednosti (slika 24). Želeli smo dobiti predvsem potek tajanja snežne odeje, za kar smo potrebovali čim točnejše podatke o vodnem ekvivalentu, ki je vhodni podatek za sneg v modelu.



Slika 24: Rezultati modela za porečje Sava 1.

Figure 24: Modelling results for subbasin Sava 1.

Na sliki 24 vidimo, da se simulirana snežna odeja, katere vodni ekvivalent smo določili 170 mm, prepočasi tali. Kljub temu vidimo, da je simulirani povečan pretok sorazmeren merjenemu v obdobju pospešenega tajanja snežne odeje. Na sliki je prikazana tudi temperatura, ki v obdobju popolnega odtajanja niha med  $-5$  in  $+5^{\circ}\text{C}$ . Ta temperatura je za dejansko stanje zadosti visoka, da popolnoma stali snežno odejo, medtem ko je modelirana snežna odeja še vedno prisotna. Vzrok za to je najverjetneje v parametrih snega, predvsem v določevanju faktorja za tajanje snega ( $CF_{MAX}$  v  $\text{mm}/^{\circ}\text{C}/\text{dan}$ ) in temperature, ki določa mejo sneženja ( $TT$ ). Vpliva lahko tudi parameter, ki določa temperaturo, pod katero model računa padavine kot sneg oziroma kot mešanico dežja in snega ( $TTINT$ ) in vrednost, ki se doda  $TT$  zaradi območja tajanja snega ( $TTINT$ ). Temperatura, pri kateri padejo snežne padavine, se lahko v realnem okolju tudi spreminja, saj je odvisna od drugih meteoroloških spremenljivk in ni vedno enaka, kot je obravnavana v modelu. Rezultati tajanja snega v modelu so tako trenutno najboljši možni.

### 5.1.4.1 Občutljivost modeliranja tajanja snega na porečju Save

Napovedljivost oziroma občutljivost modela določimo tako, da uporabimo neko začetno stanje in iz njega naredimo množico začetnih stanj, ki se od originala malo razlikujejo. Z vsakim od teh stanj izvedemo simulacijo in primerjamo rezultate. Če so si končna stanja blizu, potem je situacija dobro napovedljiva. Če pa si končna stanja zelo različna, je pojav nagnjen k determinističnemu kaosu in težko napovedljiv.

Glede na vzrok, ki smo ga določili kot izvirnega za prepočasno tajanje snežne odeje, smo iz tega tudi izviral pri oblikovanju poskusov za določevanje napovedljivosti modela. Najprej smo pogledali parametre modela, ki so bili umerjeni v fazi umerjanja dnevnega modela (preglednica 12).

Preglednica 12: Parametri iz umerjenega dnevnega modela.

Table 12: Parameters of calibrated daily model.

Parameter	Začetna vrednost	Priporočen interval	Vrednost v modelu
CFMAX	3,5	2–4,5	4,5 mm/°C/dan
TT	0	-2°C–2°C	-1,5 °C
DTTM	0	-2°C–2°C	0
TTINT	2	0°C–2,5°C	1

Oblikovali smo torej množico parametrov (preglednica 12), ki vplivajo na tajanje snežne odeje na porečju Sava 1. Izhajali smo iz rezultatov (slika 24), kjer se vidi, da je tajanje snežne odeje sprva dobro umerjeno, nakar pri nižji snežni odeji nastopi razlika, ko se snežna odeja popolnoma staja, medtem ko simulirana snežna odeja ostaja prisotna še ves mesec. Glede na to faktorja tajanja snega nismo spremenili, saj je očitno primeren.

Po popolnem odtajanju realne snežne odeje se pojavijo dežne padavine, ki po meritvah ne padejo kot sneg, oziroma tudi če, sneg takoj skopni. Po rezultatih modela se vidi, da model te dežne padavine računa kot snežne, saj se v tem času višina snežne odeje nekoliko poveča oziroma se tajanje zadrži. Glede na to smo predvidevali, da na prepočasno tajanje snežne odeje

vpliva parameter TT, ki je temperaturni prag, pod katerim padejo snežne padavine. Ta temperaturni prag je v modelu postavljen precej nizko ( $-1,5\text{ °C}$ ), saj vemo, da snežne temperature lahko padejo pri višjih temperaturah (do  $4\text{ °C}$ ). Vendar padavine, ki so vnesene v model, padejo ponoči, ko so prisotne nizke temperature, ob prvem deževju 6. marca nižje od praga, ki je  $-1,5\text{ °C}$ , ob drugem pa nad pragom. Torej se ob prvem deževju snežna odeja še nekoliko poveča, čeprav dejansko snežna odeja v tem času ni zabeležena, iz česar lahko zaključimo, da sneg pade kot mešanica dežja in snega, ki se ne obdrži na površju, ali pa da se sneg na površju ne oprime, ker se sprti stali oziroma se stali do meritev višine snežne odeje, ki se izvajajo zjutraj. Glede na vrednost TT in podrobnejši pogled v vhodne podatke smo se odločili, da parametra TT ne spreminjamo, saj v našem primeru ne bi vplival na rezultate.

Parameter, ki določa mejo, pri kateri pade mešanica snega in dežja, TTINT, glede na vhodne podatke v našem primeru ne vpliva bistveno na rezultate simulacije tajanja snežne odeje. Iz tega razloga smo parameter pustili na umerjeni vrednosti, to je  $0\text{ °C}$ .

Zadnji parameter, ki vpliva na tajanje snežne odeje je DTTM, ki je vrednost, katero se doda TT zaradi določitve temperaturnega območja tajanja snega. Glede na to, da je vrednost tega parametra v modelu  $0\text{ °C}$ , je ne bomo spreminjali, saj vnosa nižje vrednosti, kot zgornje meje mešanice dežja in snega, ne bi bilo smiselno uporabiti, višja vrednost pa ne bi vplivala na hitrost tajanja snežne odeje.

Glede na vse našete parametre lahko zaključimo, da tajanje snežne odeje povzroči temperatura tal oziroma same lastnosti mikrolokacije. Tega vzroka namreč nismo mogli vnesti v model. Problem bi lahko delno rešili s funkcijo modela, ki omogoča, da se merjena temperatura zraka nadomesti s temperaturo rosišča (parameter WET). Vendar pa bi za to kot vhodni podatek potrebovali podatke o vlažnosti, iz katerih bi model izračunal temperature rosišča. S podatki vlažnosti bi zagotovo dobili točnejše podatke o padavinah, vendar pa to ne bi popolnoma rešilo problema o tajanju snežne odeje, pri katerem bi morali upoštevati človeški faktor.

### 5.1.4.2 Faktorji vpliva na tajanje snežne odeje

Da bi poskusili določiti vpliv mikrolokacije, smo spremenili faktor taljenja snežne odeje. Ker smo izločili vse ostale možnosti prepočasnega tajanja, nam je preostalo le še, da spremenimo glavni parameter tajanja. Očitno je, da se snežna odeja v realnem stanju taja hitreje, vendar ne zaradi temperatur, ki so ves čas nizke. Hitrejše tajanje povzroča torej nek drug dejavnik, ki ima v našem primeru velik vpliv. Ta dejavnik bi bilo lahko kratkovalovno sevanje sonca ali pa odboj žarkov od sonca, v kolikor je prisotna oblačnost. Da preverimo to možnost, smo podrobneje pogledali razvoj vremena v marcu nad območjem Ljubljane v letu 2003.

Vremenska situacija v marcu 2003:

1. marec

Pretežno jasno, sprva ponekod zmerno oblačno. Nad srednjo in vzhodno Evropo je bilo območje visokega zračnega pritiska. S šibkimi jugozahodnimi vetrovi je pritekal razmeroma topel in suh zrak. Pretežno jasno je bilo, sprva ponekod še zmerno oblačno. Najvišje dnevne temperature so bile od 11 do 16 °C.

2.–3. marec

Pooblačitve z manjšimi padavinami. Iznad severozahodne Evrope se je nad Alpe in severno Sredozemlje razširilo območje nizkega zračnega pritiska. Oslabljena hladna fronta se je ponoči pomikala prek Slovenije. Tudi višinska dolina se je od severozahoda spustila proti Alpam in Jadranu. Njen južni del se je tam odcepil v manjše samostojno jedro hladnega zraka. Pooblačilo se je, prvi dan popoldne je ponekod v zahodni in osrednji Sloveniji že rahlo deževalo. V višjih legah je pihal jugozahodni veter. Ponoči je bilo oblačno, občasno so bile manjše krajevne padavine. Tudi drugi dan je prevladovalo pretežno oblačno vreme, sprva je v vzhodni Sloveniji še rahlo deževalo. Na Primorskem je pihala šibka burja. Količina padavin je bila majhna, v večjem delu države je padlo manj od milimetra padavin.

4.–5. marec

Delno jasno z občasno povečano oblačnostjo. Nad severovzhodno Evropo je bilo območje visokega zračnega pritiska, ki se je razširilo tudi nad vzhodne Alpe in Jadran. V višinah je z

razmeroma močnimi severozahodnimi vetrovi pritekal občasno bolj vlažen zrak. Prevladovalo je delno jasno vreme, občasno je bilo ponekod tudi zmerno do pretežno oblačno. Najvišje dnevne temperature so bile od 9 do 13, na Primorskem do 16 °C.

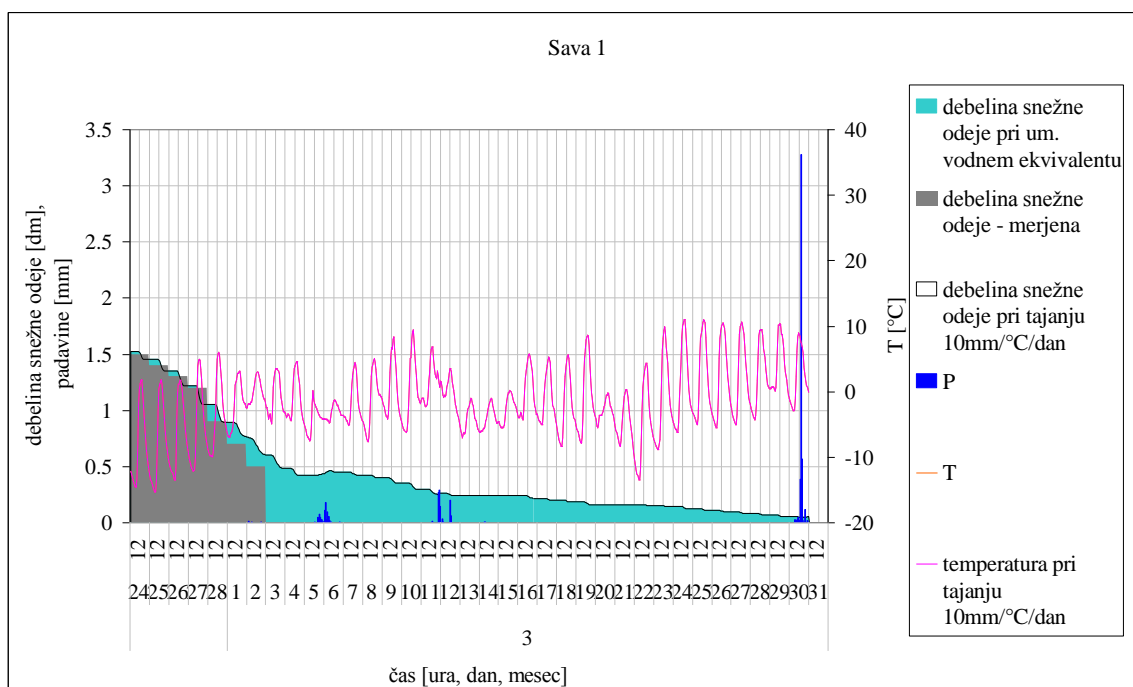
6. marec in noč na 7. marec

Pooblačitve in ponoči rahle padavine. Nad severozahodno Evropo je bilo območje nizkega zračnega pritiska. Oslabljena hladna fronta se je prek zahodne in srednje Evrope pomikala proti vzhodu. V višinah jo je spremljala manjša dolina s hladnim zrakom. Na Primorskem je bilo sprva delno jasno, vendar se je tudi tam kmalu pooblačilo. Drugod je bilo oblačno. Ponoči je ponekod v notranjosti države občasno rahlo snežilo. Zjutraj so bile temperature okoli ledišča, na Primorskem okoli 5 °C. (Markošek J., 2003)

Po pregledu vremenske situacije v začetku marca smo ugotovili, da je razlog za hitrejšo dejansko tajanje snega, kot je bilo modelirano, v dejansko višji temperaturi, kot jo izračuna model. Temperatura, ki jo računa model, se ves čas giblje med -5 in 5 °C, medtem ko je bilo dejansko čez dan do 10 °C. To je tudi razlog, zakaj se snežna odeja dejansko stali, v modelu pa ne. Razlog za tolikšno odstopanje v izračunu temperature je lahko dejstvo, da je območje Ljubljane toplotni otok ter da je temperatura v Ljubljani v temu obdobju dejansko višja od temperatur, izmerjenih na preostalih merilnih mestih za približno 5 °C. Model temperaturo preračuna glede na nadmorsko višino, kar se v našem primeru ni zgodilo, saj je podpovodje v eni sami coni, ter izračuna ploskovno temperaturo po metodi Thiessenovih poligonov. Pri tem preračunu lahko pride do tolikšnih odstopanj, saj so temperature na vseh ostalih merilnih mestih poligona precej nižje. Iz tega razloga se metoda Thiessenovih poligonov ni izkazala za najboljšo metodo preračunavanja podatkov. Pri pregledu Thiessenovih poligonov pa smo ugotovili, da tudi to ne more biti razlog za večje odstopanje od dejanskih vrednosti, saj je merilno mesto Ljubljana v poligonu, ki ga delita dve merilni mesti – Ljubljana (vpliv 70 %) in Brnik (30 %). Razlike v temperaturah na teh dveh merilnih mestih pa so zanemarljive.

Glede na dosedanje ugotovitve smo se odločili, da bomo poskusili pospešiti tajanje snežne odeje s povečanjem faktorja tajanja snega z 4,5 mm/°C/dan, ki je zgornja meja priporočenega intervala, na 10 mm/°C/dan, kar je tolikšna debelina snežne odeje, kot se je dejansko stopila zadnji dan, medtem ko je v simulaciji obstala. Pri pregledu rezultatov smo ugotovili, da ta

parameter ne povzroča nobenih sprememb (slika 25). Na sliki vidimo, da tudi izračunana temperatura ostaja enaka, torej prenizka, da bi pospešila tajanje snežne odeje.



Slika 25: Simulirani rezultati modela za porečje Sava 1.

Figure 25: Simulated modelling results for subbasin Sava 1.

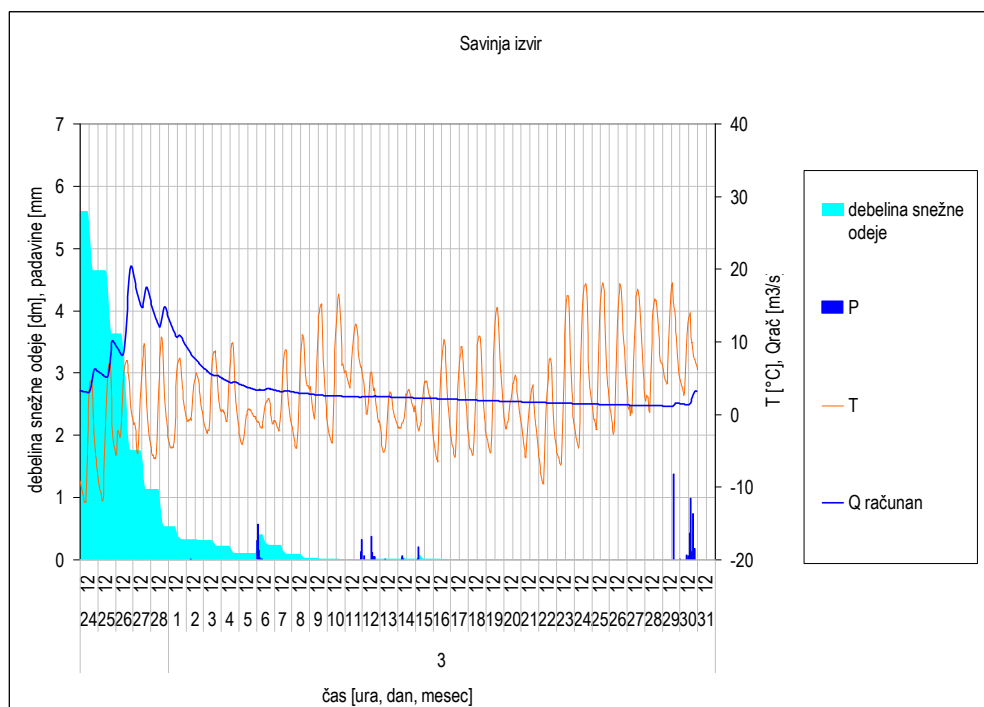
Glede na rezultate smo zaključili, da je razlog za prepočasno tajanje snežne odeje v samem izračunu modela, zato smo se nadalje podrobneje posvetili postopku izračuna. Tega nismo pričakovali, zato temu sprva tudi nismo posvečali pozornosti. Temperatura naj bi se preračunala le glede na višinski razred, v katerem se nahaja podpovodje, poraslost ter glede na Thiessenove poligone. To pa ne bi smelo dati takih razlik v temperaturi, kot so bile podane.

Po podrobnem pregledu postopka možnosti izračuna smo ugotovili, da ne glede na to, da možnost avtokorekcije podatkov ni aktivirana, model preračuna temperature. Razlog za to bi lahko bil večja količina snežne odeje v zgornjem delu porečja Save, ki je prisotna in lahko vpliva na temperature. Po pregledu vseh možnosti umerjanja smo torej lahko zaključili, da je modeliranje tajanja snežne odeje z modelom HBV dobro napovedljivo, saj nobena sprememba parametrov ni prinesla večjega odstopanja od prvega dobljenega rezultata.

### 5.1.4.3 Modeliran vpliv tavanja snežne odeje na pretok

V prilogi D so podani grafični prikazi izračunov prisotnosti snežne odeje na posameznih podpovodjih. Kot primer vidnega vpliva tavanja snežne odeje na pretok reke Save je na sliki 26 prikazano podpovodje Savinja izvir. To podpovodje smo izbrali, ker ima zadostno višino snežne odeje (60 cm), obenem pa v obdobju tavanja ni prisotnih večjih količin padavin, ki bi lahko vplivale na pretoke reke. Tako smo izločili možen dodaten vpliv padavin in se omejili le na tavanje.

Savinja ima na izviru majhne pretoke – v našem primeru med 2 in 10 m<sup>3</sup>/s, zato je vpliv tavanja snega bolj očiten kot pri velikih pretokih, ko je vtok snežnice zanemarljiv. Na sliki 26 je lepo vidno odtajanje snežne odeje v 10 dneh simulacije ter dvig pretoka reke Savinje. Najvišje dnevne temperature v obdobju tavanja so od 6 do 12 °C, kar je primerno za tavanje snežne odeje.



Slika 26: Simulacija tavanja snežne odeje in pretok reke Savinje.

Figure 26: Modelling simulation of snow melt and river flow of the Savinja River.



Na sliki 26 je vidno manjše povečanje pretoka že v prvem dnevu tajanja snežne odeje (13 cm). Tajanje snežne odeje se na pretoku odraža v obliki valov, ki so posledica različne intenzitete tajanja – čez dan je tavanje pospešeno, zato pretok naraste, ponoči pa temperature padejo in se tavanje zaustavi, glede na nizke temperature ponoči celo zmrzuje. Tako si sledi pet valov pretoka za pet najbolj intenzivnih dni tajanja, ko pretok doseže višek. Pretok ob vsakem tajanju zadrži višjo količino, kot je bila na začetku vala. Višek pretoka je dosežen peti dan, nato se začne pretok manjšati, ne glede na manjše količine tajanja snežne odeje. Pretok po odtajanju snežne odeje pade na začetno vrednost simulacije, kmalu zatem pa padejo ponovno padavine, ki jih model zabeleži kot snežno odejo debeline manj kot 7 cm. Znova se prične tavanje, ki je nekoliko upočasnjeno zaradi nižjih temperatur ( $-3$  do  $3^{\circ}\text{C}$ ) in traja dva dneva. To tavanje snežne odeje se na pretoku pozna samo toliko, da se višina pretoka zadrži na enaki vrednosti, ko pa je snežna odeja odtajana, prične pretok polagoma upadati. V primeru podpovodja Savinja izvir lahko torej iz simulacije zaključimo, da je tavanje snežne odeje v tem delu vplivalo na pretoke reke Savinje. Težko bi pa posplošili našo trditev na celotno porečje Savinje, saj je zaznani vpliv tavanja odvisen od prisotnosti snežne odeje, torej višine temperatur, ki določajo ali bodo padavine snežne ali dežne, ter pretoka reke, saj je pri velikih vodotokih z visokimi pretoki vpliv tavanja težko določljiv.

V prilogi D je na slikah prikazano simulirano tavanje snežne odeje, temperatura ter pretok na posameznem podpovodju. Vidimo, da se na vseh podpovodjih tavanje snežne odeje ne odraža z večjim povečanjem pretoka reke ter da se snežna odeja povsem različno časa obdrži na površini. Takoj lahko ločimo podpovodja z višjimi nadmorskimi višinami, kjer je prisotna višja snežna odeja, oziroma predvsem nižje temperature, ki omogočajo tudi nižji snežni odeji, da se dlje obdrži na površju.

S simulacijo smo prikazali vpliv tavanja na pretoke, vendar bi za točnejše rezultate morali zajeti celotno obdobje pokritosti s snežno odejo. Simulacija, ki se prične na sredini, ima namreč povsem drugačno začetno stanje, kot če bi gledali simulacijo, ki bi se pričela z začetkom sezone. Zato so možne tudi razlike v povečanju pretokov ob tajanju snežne odeje. Če primerjamo torej meritve tavanja snežne odeje in pretoke, ki so v prilogi B1 in B2, vidimo, da se pretok dvigne že med samo prisotnostjo snežne odeje na podpovodju in da končni vpliv tavanja ni tako izrazit kot pri simulaciji, ki se prične proti koncu prisotnosti snežne odeje.

Vsekakor pa smo s simulacijo želeli pokazati, da je vpliv tajanja na pretok prisoten in da se ga da simulirati z modelom, zaradi česar smo dosegli zastavljen cilj.

## 5.2 Uporabnost satelitskih posnetkov

Za analizo združljivosti satelitskih posnetkov in rezultatov, ki nam jih da HBV, smo uporabili posnetek mod02hkm\_2003055.1045\_fuso33\_sca3, narejen dne 24. 2. 2003, na katerem ni prisotne oblačnosti in je snežna odeja dobro vidna. Model HBV namreč sam na podlagi temperatur, ki jih vnesemo, določi prisotnost snežne odeje in njeno debelino.

Nad Evropo je bil ta dan močan anticiklon, zato nad Slovenijo ni bilo oblačnosti. Po podatkih meteoroloških postaj iz preglednice 13, lahko sklepamo, da je bila snežna odeja, čeprav nizka, prisotna po vsej državi, razen na Primorskem.

Preglednica 13: Pregled višine snežne odeje meteoroloških postaj dne 24. 2. 2003.

Table 13: Measured snow cover heights on 24th od Feb 2003.

Ime postaje	Nadmorska višina [m]	Sneg [cm]	Ime postaje	Nadmorska višina [m]	Sneg [cm]
Letališče Brnik	364	8	Novo mesto	220	19
Kredarica	2514	195	Celje	244	10
Rateče Planica	864	18	Šmartno pri Slov. Gradcu	455	18
Vojsko	1067	60	Murska Sobota Rakičani	188	5
Bilje	46	0	Lesce	515	8
Postojna	533	6	Metlika	210	12
Kočevje	467	28	Vogel	1535	90
Lj. Bežigrad	299	15	Lisca	943	52
Črnomelj	157	12	Letališče Portorož	2	0

Meteorološke podatke smo uporabili za določitev začetnega stanja v modelu, v katerem je simulacija potekala od 24. 2. 2003 do 31. 3. 2003. Uporabili smo podatke za vodni ekvivalent iz preglednice 13.

### 5.2.1 Primerjava satelitskih posnetkov in rezultatov zasneženosti modela

Med izhodnimi podatki modela HBV si lahko določimo tudi rezultate vodnega ekvivalenta za posamezna podpovodja. Tako smo za vsa podpovodja glede na rezultate vodnega ekvivalenta določili prisotnost snežne odeje in preverili, če se sklada z zaznano snežno odejo na satelitskih posnetkih. V preglednici 14 so podani podatki o izračunanem vodnem ekvivalentu v modelu za posamezna podpovodja ter preračunana debelina snežne odeje. Za preračun debeline snežne odeje smo uporabili vodni ekvivalent, ki smo ga ocenili izkustveno na podpovodju Sava (poglavje 5.1.4) in znaša 170 mm/10 cm.

Preglednica 14: Izračunana količina vode v snežni odeji na dan 24. 2. 2003 za posamezna podpovodja.

Table 14: Calculated snow water equivalent on 24 Feb. 2003 for all subbasins.

	Porečje	Vodni ekvivalent snega [mm]	Preračunana debelina snežne odeje [cm]
1	Cerkniško j.	28,48	16,75
2	Gradaščica	30,82	18,13
3	Kamniška Bistrica	15,64	9,20
4	Kokra	14,16	8,33
5	Kras 1	23,18	13,63
6	Kras 2	17,47	10,28
7	Krka izliv	34,88	20,52
8	Krka izvir	33,00	19,41
9	Ljubljanica 1	22,37	13,16
10	Ljubljanica 2	23,59	13,88

... se nadaljuje

... nadaljevanje

11	Sava 3	19,83	11,66
12	Paka	7,06	4,15
13	Sava 1	15,23	15,23
14	Sava 2	21,30	12,53
15	Sava B	23,38	13,75
16	Sava D1	12,49	7,35
17	Sava D2	11,54	6,79
18	Savinja 1	23,18	13,64
19	Sava izvir	10,88	6,4
20	Savinja izliv	12,7	7,47
21	Savinja izvir	10,14	5,96
22	Sora	31,32	18,42
23	Temenica	44,56	26,21
24	Vogljajna	11,29	6,64

Izračun modela nam pove, da je na dan 24. 2. 2003 sneg prisoten po vsem porečju reke Save. To se tudi sklada s terenskimi meritvami, po katerih je snežna odeja prav tako prisotna na vseh merilnih mestih. Podatke o preračunani višini snežne odeje v preglednici 14 smo nadalje primerjali še s terenskimi meritvami.

Preglednica 15: Merilna mesta debeline snežne odeje in pripadajoče podpovodje.

Table 15: Locations of snow cover height measurements and subbasin.

Merilno mesto	Porečje	Izmerjena višina snežne odeje [cm]
Letališče Brnik	Kamniška Bistrica	8
Kredarica	Sava D1	195
Rateče Planica	Sava D1	18
Postojna	Kras 1	6

... se nadaljuje

... nadaljevanje

Kočevje	Krka izvir	28
Lj. Bežigrad	Sava 1	15
Novo mesto	Krka izliv	19
Celje	Savinja 1	10
Lesce	Kokra	8
Vogel	Sava B	90
Lisca	Sava 3	52

Najprej smo za obstoječa merilna mesta, za katera smo dobili podatke o višini snežne odeje na dan 24. 2. 2003, določili ustrezno podpovodje v modelu. (preglednica 15) Dobili smo torej podatke o višini snežne odeje za 10 različnih podpovodij v modelu, ki smo jih lahko takoj primerjali z izračunom modela. (Preglednica 16)

Preglednica 16: Primerjava izračunane in izmerjene višine snežne odeje na dan 24. 2. 2003.

Table 16: Comparison of calculated and measured snow cover height on 24 Feb. 2003.

Porečje	Preračunana višina snežne odeje [cm]	Izmerjena višina snežne odeje [cm]
Cerkniško j.	16,75	
Gradaščica	18,13	
Kamniška Bistrica	9,20	8
Kokra	8,33	8
Kras 1	13,63	6
Kras 2	10,28	
Ljubljana 1	13,16	
Ljubljana 2	13,88	
Sava 3	11,66	52
Paka	4,15	
Sava 1	15,23	15

... se nadaljuje

... nadaljevanje

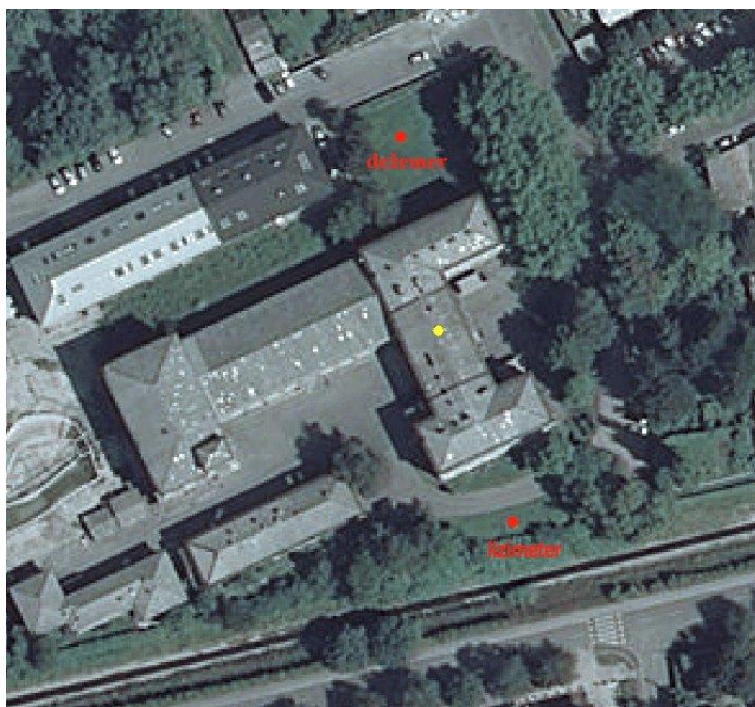
Sava 2	12,53	
Sava B	13,75	90
Sava D1	7,35	8
Sava D2	6,79	
Sava izliv	13,64	
Savinja 1	6,4	10
Savinja izliv	7,47	
Savinja izvir	5,96	
Sora	18,42	
Temenica	26,21	
Krka izliv	20,52	19
Krka izvir	19,41	28
Voglajna	6,64	

Dobili smo zadovoljivo ujemanje med izračunom debeline vodnega ekvivalenta ter meritvami na 10 merilnih mestih. Večja odstopanja se pojavijo le na podpovodjih Sava 3 ter Sava Bohinjka, kjer je velika razlika posledica velike višine merilnega mesta snežne odeje, zaradi česar tudi podatek ni primerljiv s podatkom izračuna. Odstopanja so prisotna še na podpovodjih Krka izvir ter Kras 1, ki pa sta nezanesljivo umerjeni podpovodji zaradi močnega vpliva kraškega sveta. Za odstopanje na podpovodju Savinja 1 pa lahko rečemo, da je posledica lokacije merilnega mesta – višina snežne odeje je izmerjena v mestu Celje, ki predstavlja toplotni otok, kar pomeni, da ima zaradi višjih temperatur nižjo višino snežne odeje od manj gosto poseljenega območja.

### 5.3 Pronicanje vode v času prisotnosti snežne odeje

Za podrobnejši vpogled v dejanske hidrološke procese ob prisotnosti in tajanju snežne odeje smo primerjali podatke lizimetra, višine snežne odeje ter dnevne količine padavin. Lizimeter se nahaja v Ljubljani, na Hajdrihovi 28, padavine pa smo uporabili iz bližnjega merilnega mesta (slika 27). Na merilnem mestu na Hajdrihovi 28 je bilo v sezonah 2004/2005 ter

2005/2006 opravljenih tudi več meritev vodnega ekvivalenta snežne odeje. Meritve infiltracije se na lokaciji Hajdrihove 28 izvajajo od druge polovice leta 2004, zato smo primerjali sezoni od 2004/2005 dalje. Višina snežne odeje je bila merjena s strani ARSO, na merilnem mestu Ljubljana Bežigrad.

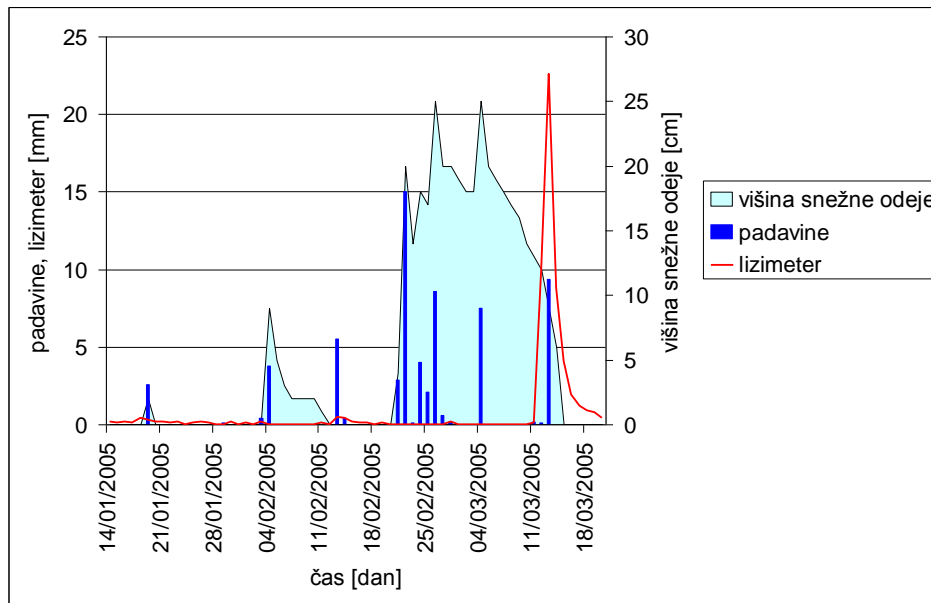


Slika 27: Lokaciji merilnih mest infiltracije in padavin.

Figure 27: Locations of infiltration and precipitation measurements.

S primerjavo smo želeli ugotoviti možnost infiltracije v času trajanja snežne odeje ter vpliv tajanja snežne odeje na količino infiltrirane vode.

V sezoni 2004/2005 je bila maksimalna višina snežne odeje 25 cm. Snežna odeja je bila prisotna od 4/2/2005 do 14/3/2005, neprekinjeno od 20/2/2005 do 14/3/2005. Od začetka decembra do začetka sneženja je padlo 136 mm dežnih padavin. Izmerjen vodni ekvivalent snežne odeje v februarju je bil med 20 in 40 mm. 12/3/2005 je na snežno odejo padlo še 45 mm dežnih padavin v štirih dneh.



Slika 28: Primerjava meritev padavin, infiltracije ter višine snežne odeje za sezono 2004/2005.

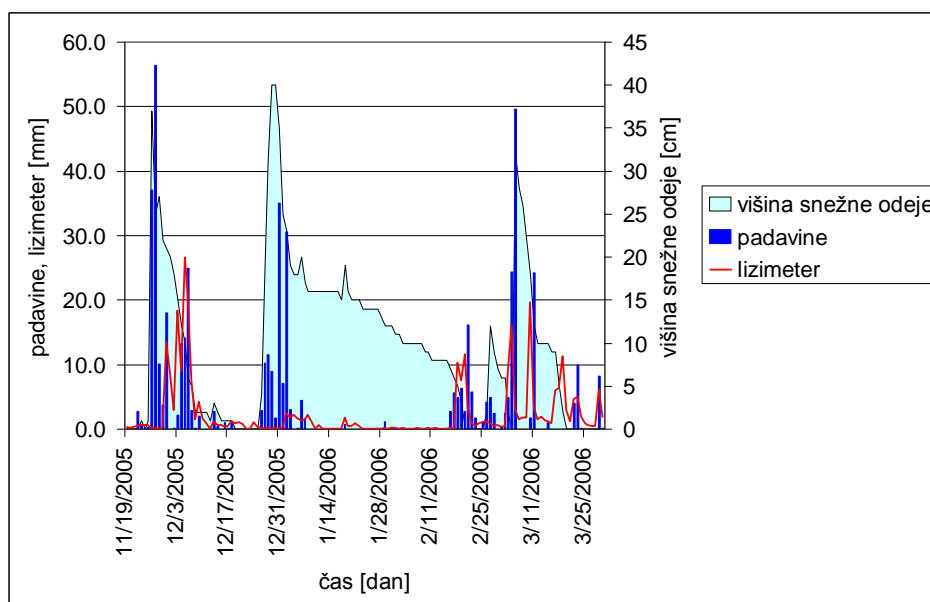
Figure 28: Comparison of precipitation, infiltration and snow cover height for winter season 2004/2005.

Iz slike 28 vidimo, da v času prisotnosti snežne odeje infiltracije skorajda ni. Izjemoma je opaziti manjšo infiltracijo konec februarja po deževju. Glede na to, da v tem času ni večje infiltracije, lahko sklepamo, da se vodni ekvivalent snega ne vpija v tla v samem obdobju prisotnosti snežne odeje v kombinaciji z nizkimi temperaturami – tla so zamrznjena in/ali zasičena. Glede na to, da ob koncu februarja padejo dežne padavine, pa lahko ugotovimo, da se voda ali zadrži v snežni odeji ali pa odteče po površju. Izmerjen vodni ekvivalent snega na začetku daljšega obdobja prisotnosti snežne odeje je bil 20 mm, po deževju pa je narasel na dokončnih 48 mm. Ob taljenju snežne odeje je opazno večje povečanje infiltracije istočasno, kot se pojavijo dežne padavine. Že dan pred padavinami je zabeležena večja infiltracija, v istem dnevu, kot so dežne padavine, pa infiltracija več kot enkrat preseže količino dežnih padavin. Infiltracija se nadaljuje še naslednjih 10 dni, ne glede na to, da ni dežnih padavin. Iz tega lahko sklepamo, da se ob tajanju snežne odeje začne infiltracija vode iz snežne odeje, ki jo še poveča deževje. Snežna odeja nekaj dežja zadrži, in to se kasneje tudi infiltrira, nekaj pa zaradi zasičenosti snega odteče po površini. Glede na to, da je infiltracija zabeležena šele 7.



dan od začetka tajanja snežne odeje, pa lahko sklepamo, da je v teh dneh snežna odeja bolj ali manj izhlapevala ali pa zaradi zamrznjene zemljine odtekla po površini.

V sezoni 2005/2006 je bila snežna odeja prisotna od 26/11/2005 do 19/3/2006. Najvišja snežna odeja je bila 37 cm. V obdobju prisotnosti snežne odeje je bilo več krajših obdobj pokritosti s snegom. Največ snega je padlo novembra, ko je bil izmerjen tudi vodni ekvivalent snega 60 mm. V začetku marca je padel sneg z dežjem. V zadnjem obdobju snežne pokritosti je bila infiltracija največja, preseгла je celo količino padavin. Infiltracija je bila prisotna tudi v januarju, ko je bil izmerjen vodni ekvivalent snega 50 mm.



Slika 29: Primerjava meritev padavin, infiltracije ter višine snežne odeje za sezono 2005/2006.

Figure 29: Comparison of precipitation, infiltration and snow cover height for winter season 2005/2006.

V prvem obdobju trajanja snežne pokritost je zapadel moker sneg, ki je imel vodni ekvivalent 60 mm, in v tem obdobju, ob tajanju, pride do višje infiltracije. Infiltracija je v tem primeru posledica vpijanja še nezamrznjene suhe zemljine, saj so bile pred tem prisotne višje temperature ter enomesečno sušno obdobje. Iz tega lahko sklepamo, da se voda večinoma infiltrira, nekaj snežne odeje pa tudi izhlapi v ozračje. Proti koncu tajanja pade še nekaj

snežnih padavin (16 cm v dveh dneh), vendar je vodni ekvivalent nizek – 20 mm, zato tudi ni opaziti večjega povečanja infiltracije.

V drugem obdobju trajanja snežne odeje ves čas ni opaziti večje infiltracije. Maksimalna snežna odeja je dosežena na začetku prisotnosti snežne odeje in izmerjen je vodni ekvivalent 30 mm. V prihodnjih devetih dneh sledi tajanje snežne odeje, ob čemer je opaziti rahlo povečanje infiltracije. Ob tajanju se poveča tudi vodni ekvivalent snežne odeje na 40 mm. V nadaljnjem poteku višina snežne odeje ostane bolj ali manj ista, od 18. 1. dalje pa se samo še taja. Vodni ekvivalent se ves čas giblje med 40 in 50 mm. Ob koncu prisotnosti snežne odeje je opazno večje povečanje infiltracije tudi med vmesnim obdobjem brez snežne pokritosti od 20. do 26. februarja

V zadnjem obdobju pokritosti s snežno odejo je infiltracija pogosteje prisotna, tudi zaradi pogostejših dežnih padavin in posledično višjega vodnega ekvivalenta snega. V tem obdobju opazimo tri večja povečanja infiltracija, prvega ob močnejših padavinah, drugega in tretjega pa ob povečanem tajanju snežne odeje. Glede na višino snežne odeje in količino infiltracije lahko sklepamo, da večji delež vode v snegu izhlapi oziroma v primeru zasičenosti snežne odeje odteče po površini. (slika 29)

## 6 ZAKLJUČKI

Namen magistrske naloge je bil prikazati vpliv tajanja snežne odeje na pretoke reke Save, ki ima hribovito zaledje ter snežno–dežni režim v zgornjem delu porečja. Pri tem smo že na začetku naloge naleteli na težave zaradi pomanjkanja podatkov, predvsem meritve vodnega ekvivalenta snega, ki bi nam dale dejansko vsebnost vode v snežni odeji, ki se tali in odteka. Prav tako je bila tudi zastopanost merilnih mest za snežno odejo po različnih nadmorskih višina nezadostna, saj so v večini merilna mesta pod 1000 m nadmorske višine (slika 9).

Vpliv tajanja snežne odeje smo najprej prikazali z izračunom korelacij za sezone med 1971 in 2007 med merilnima mestoma Jesenice in Kredarica ter za sezone med 1987 in 2001 med merilnima mestoma Bodešče in Vogel, in to med dvema spremenljivkama – višino snežne odeje in pretokom, iz česar smo glede na rezultate zaključili, da med dvema spremenljivkama ni direktne povezave (preglednici 9, 10, prilogi A1, A2). Zato smo nadalje za enaka obdobja in merilna mesta primerjali meritve snežne odeje in pretokov za sezone (prilogi B1, B2) in potem še za obdobja tajanja snežne odeje (prilogi C1, C2). Skupen zaključek vseh sezon je, da se v drugi polovici snežne pokritosti pretok v povprečju polagoma poveča (površinski odtok snežnice zaradi zamrznjene in zasičene podlage) in v večini sezon ostane naraščajoči trend do konca sezone, konec spomladanske odjuge pa spremljajo nenadna povečanja pretokov, ki so posledica spomladanskih padavin (sliki 20, 21). Pri podrobnejši primerjavi za krajša obdobja tajanja snežne odeje (prilogi C1, C2) je vpliv tajanja bolj opazen (sliki 22, 23). Prav tako je vpliv tajanja snega na pretoke bolj opazen pri manjših vodotokih – pretokih, kjer je delež dodatne vode glede na celotni pretok večji (manjša vodotoka v zaledju Save – Sava Bohinjka in Dolinka – imata izrazit snežni režim, ki pomeni tudi bolj opazen vpliv tajanja).

V nadaljevanju naloge smo poskusili modelirati tajanje snežne odeje z obstoječim modelom reke Save (IHMS-HBV) (Primožič, 2007) za porečje Sava 1. Kljub zadovoljivim rezultatom (slika 24) smo zaključili, da je modeliranje tajanja bolj primerno za manjšo časovno ločljivost, saj je model namenjen dnevni vhodni podatki in se občutljivost parametrov za račun snega pri urnih podatkih ne pozna (slika 25). Prikazali smo rezultate za vsa podpovodja v

modelu (priloga D), iz katerih se vpliv tajanja na pretoke lepo vidi predvsem na manjših podpovodjih, vodotokih z manjšimi pretoki.

V naslednjem koraku smo rezultate prisotnosti snežne odeje v modelu primerjali z meritvami in ugotovili približno 50 % ujemanje, ki je posledica slabega ujemanja merilnih mest v modelu in na terenu – primerjali smo lahko samo rezultate 10 merilnih mest, vendar še ta niso povsem sovpadala. Nekatera merilna mesta so imela različno nadmorsko višino, ki pa je pomemben dejavnik pri določanju snežne odeje. Pri nadaljnji primerjavi izračunov in satelitskih posnetkov smo ugotovili ujemanja – oba rezultata prikazujeta snežno pokritost po celotnem porečju Save. Kljub temu smo zaključili, da je modeliranje vseeno bolj uporabno pri določanju snežne pokritosti kot satelitski posnetki, predvsem zaradi številnih pomanjkljivosti daljinskega zaznavanja (pokrovnost tal, oblačnost). Večje pomanjkljivosti modeliranja pa so, da lahko podamo na eno podpovodje samo en podatek za snežni ekvivalent – dejansko je vodni ekvivalent lahko zelo različen, določiti moramo temperaturo, pri kateri sneži – dejansko zelo spremenljivo – dežuje lahko tudi pri  $-4$  (5.3.2006) (Vertačnik, 2007) in v model ne podamo podatka o temperaturi zemljine, ki pa je pri tajanju zelo pomembna. Modeliranje tajanja z modelom IHMS-HBV se je izkazalo za preveč kompleksen proces in morda bi bilo bolj uporabno za malo porečje z gosto mrežo postaj, z urnimi podatki za krajše obdobje – npr. en sam dogodek (v primeru več dogodkov so parametri preveč spremenljivi – pri enem dogodku pada dež še pri 0 pri drugem sneg pri 4 – velik vpliv gibanja zračnih mas na pojave).

Za določitev vpliva snežne odeje na pronicanje smo primerjali meritve lizimetra, padavin ter višino snežne odeje (sliki 28, 29). Ugotovili smo, da pri prisotnosti snežne odeje ter nizkih temperatur ni infiltracije, saj je zemljina zamrznjena in pri manjših tajanjih snežnica površinsko odteče. Višje temperature, pri katerih se sneg taja, so prisotne nekaj dni pred zabeleženo infiltracijo. Pri višjih temperaturah pride do tajanja najprej zaradi izhlapevanja, ob odtajanju zemljine pa do infiltracije snežne odeje in dežja. Ob koncu sezone je opazna povečana infiltracija, ki je posledica odtajanja zemljine. Lahko zaključimo, da sneg se infiltrira, ampak le delež, večinoma ob koncu tajanja, ko so prisotne tudi spomladanske padavine.

## 7 POVZETEK

Z magistrsko nalogo smo želeli ugotoviti vpliv tajanja snežne odeje na porečju Save na pretoke Save in njene pritoke. Pri tem smo najprej predstavili značilnosti porečja, predvsem hidrološke in meteorološke značilnosti. Podrobneje smo obravnavali snežne razmere za celotno Slovenijo, pri čemer smo poiskali daljše nize meritve na meteoroloških postajah Kredarica in Ljubljana ter grafično predstavili trajanja snežne odeje ter največje debeline snežne odeje. Preučili smo razpoložljive podatke o snežni odeje, tudi o izmerjenih največjih vrednostih, iz katerih smo razbrali zakonitosti prisotnosti snežne odeje na porečju Save. Pri zbiranju razpoložljivih podatkov smo izdelali tudi analizo uporabnosti podatkov, ki so se izkazali za dokaj slabo zastopane po različnih nadmorskih višinah.

Nalogo smo začeli z računom linearne korelacije med dvema spremenljivkama, ki sta višina snežne odeje in izmerjen pretok. V ta namen smo primerjali merilni mesti na Kredarici in na Jesenicah ter merilni mesti na Voglu in v Bodeščah. Korelacijo smo zaključili z ugotovitvijo, da med dvema spremenljivkama ni linearne povezave, kar je posledica preveč kompleksnih procesov tajanja in površinskega pretoka. Zato smo nadalje poskusili zveze med tema spremenljivkama dobiti z grafičnim prikazom za ista merilna mesta in enake sezone zim kot za korelacije. Iz prikazov smo ugotovili, da se pretok reke med drugo polovico zimske sezone poveča ter večinoma obdrži trend naraščanja do popolnega odtajanja snega. Nalogo smo nadaljevali tako, da smo podrobneje prikazali še posamezna obdobja tajanja in tako izostrili resolucijo prikaza.

V drugem delu naloge smo uporabili obstoječi model reke Save HBV, s katerim smo želeli preskusiti simuliranje tajanja snežne odeje. To smo prikazali za porečje Sava 1 v modelu, za katero smo imeli na razpolago največ podatkov. Modeliranje tajanja se je izkazalo prezahtevno za tako veliko časovno resolucijo podatkov, zato smo zaključili, da je simulacija zadovoljiva z upoštevanjem nekaterih pomanjkljivosti, ki smo jih opisali.

V zadnjem delu naloge smo želeli pogledati, kaj se dogaja s snežno odejo v času tajanja, zato smo za dve sezoni primerjali razpoložljive podatke višine snežne odeje, infiltracije pod

snežno odejo in padavin. Iz grafičnega prikaza podatkov smo zaključili, da sproščen vodni ekvivalent pri tajanju snežne odeje v hladnem obdobju zime izhlapi ali površinsko odteče, saj se infiltrirati zaradi zmrznjene zemljine ne more. V drugi polovici zime, ko se temperature dvignejo, pa se zemljina odtaja in začne se infiltracija vodnega ekvivalenta iz snežne odeje, ki izrazito naraste še ob prisotnosti prvih spomladanskih padavin.

Z magistrsko nalogo smo uspeli pokazati vlogo snežne odeje v hidrološkem krogu na porečju Save. Zaključili smo, da je vpliv tajanja snega na pretoke viden pri manjših vodotokih s hribovitimi prispevnimi površinami (Sava Dolinka, Sava Bohinjka), medtem ko se vpliv vzdolž toka porazgubi predvsem ob prisotnosti spomladanskih padavin, nikakor pa ta vpliv ni tako velik, da bi lahko ob najintenzivnejšem tajanju povzročil poplave.

## 8 SUMMARY

The purpose of this MSc thesis was to determine the role of snow in the hydrological cycle on the Sava River Basin. For this reason we first described the characteristics of the Sava River basin, especially the hydrological and meteorological attributes. First we collected all available data on snow cover measurements for meteorological stations Kredarica and Ljubljana. We presented the sets of data for the number of days with snow cover and maximum measured snow cover height. Then we described the snow presence characteristics for the case of Slovenia and, in greater detail, for the Sava River basin.

In the first part of the thesis we calculated linear correlations between two variables: surface flow and snow cover height. For comparison we chose four different stations: we compared snow cover height on stations Kredarica and Vogel with flow data measured on stations Jesenice and Bodešče. The correlation results showed that there was no linear correlation between the two variables. For this reason we decided to take a closer look at snow cover height and flow data. We presented the data graphically, showing the positive trend of runoff during the second half of winter season, when the temperatures are higher and snow melt occurs. Next we showed the impact of snow melt in more detail and elaborated graphs for shorter periods of snow melt.

In the second part of the thesis we used the existing Sava River basin HBV to simulate snow melt on the Sava River basin. The model results showed that the model was not very appropriate to simulate on hourly values, since you cannot input all the local impacts that tend to be significant when using hourly data. On the other hand the simulation was satisfying despite the disadvantages found and described.

In the last part of the thesis we presented data of snow cover height, precipitation and infiltration in greater detail. We wanted to see whether the snow-water equivalent evaporates, infiltrates or runs off. We compared the data for two winter seasons and concluded that in case of lower temperatures the snow-water equivalent evaporates or runs off because of

frozen soil. When the temperatures grow, the soil melts and infiltration starts. Infiltration increases especially when snow melt is accompanied by spring precipitation.

With the master degree thesis we successfully presented the impact of snow melt on surface runoff of the Sava River. Finally, we concluded that snow melt contributes a small amount of water to the flow. The impact is even smaller on large rivers and, in any case, cannot cause floods.



## VIRI

Aizen V.B., Aizen E.M., Melack J.M. 1996. Precipitation, melt and runoff in the northern Tien Shan. *Journal of Hydrology*, No. 186: 229-251.

ARSO (Agencija republike Slovenije za okolje) 2007. Slovenski vremenski rekordi. Ljubljana, Ministrstvo za okolje, Agencija RS za okolje: 5 str.

ARSO (Agencija republike Slovenije za okolje) 2008. Vodna bilanca Slovenije 1971–2000. Ljubljana, Ministrstvo za okolje, Agencija RS za okolje: 119 str.

<sup>1\*</sup> ARSO (Agencija republike Slovenije za okolje) 2009. Atlas okolja. Ljubljana, Ministrstvo za okolje, Agencija RS za okolje.  
[http://gis.arso.gov.si/atlasokolja/profile.aspx?id=Atlas\\_Okolja\\_AXL@Arso](http://gis.arso.gov.si/atlasokolja/profile.aspx?id=Atlas_Okolja_AXL@Arso).

<sup>2\*</sup> ARSO (Agencija republike Slovenije za okolje) 2009. Vreme. Napovedi in podatki. Ministrstvo za okolje in prostor RS, Agencija RS za okolje.  
<http://www.arso.gov.si/vreme/napovedi%20in%20podatki/>.

Bayarda D., Staehlib M., Parriaux A., Fluehler H. 2005. The influence of seasonally frozen soil on the snowmelt runoff at two Alpine sites in southern Switzerland. *Journal of Hydrology* No. 309: 66–84.

<sup>1\*</sup> Brilly M., Horvat A., Rakovec J., Kobold M., Širca A., Goršak D, Vertačnik G., Primožič M. 2008. Medsebojni vpliv infrastrukturnih in energetske ureditev na spodnji Savi v času izrednih hidroloških dogodkov – Model Save – Izračun verjetne visoke vode (PMF). Končno poročilo. Ljubljana, Ministrstvo za gospodarstvo: 94 f.

<sup>2\*</sup> Brilly M., Petan S., Horvat A., Vidmar A., Štravs L. 2008. Final report on the study The groundwater impact on runoff formation. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za splošno hidrotehniko: 104 f.

Brilly M., Šraj M. 2005. Osnove hidrologije, Univerzitetni učbenik. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za splošno hidrotehniko: 309 f.

Frencha H., Binley A. 2004. Snowmelt infiltration: monitoring temporal and spatial variability using time-lapse electrical resistivity. *Journal of Hydrology*, No. 297: 174–186.

Grayson R.B., Bloeschl G., Western A.W., McMahon T.A. 2002. Advances in the use of observed spatial patterns of catchment hydrological response, *Advances in Water Resources*, No. 25: 1313–1334.

Habjan P. 2004. Tajanje snežne odeje. Ljubljana, Ministrstvo za okolje in prostor, Agencija Republike Slovenije za okolje: 2 str.

<sup>1\*</sup>Habjan P. 2006. Klimatografija Slovenije. Povprečna višina padavin, obdobje 1961–1990. Ljubljana, Ministrstvo za okolje in prostor, Agencija Republike Slovenije za okolje, Urad za meteorologijo: 1 str.

<sup>2\*</sup>Habjan P. 2006. Povprečna temperatura zraka, obdobje 1961–1990. Ljubljana, Ministrstvo za okolje in prostor, Agencija Republike Slovenije za okolje, Urad za meteorologijo: 1 str.

Hayashia M., van der Kamp G., Schmidt R. 2003. Focused infiltration of snowmelt water in partially frozen soil under small depressions. *Journal of Hydrology*, No. 270: 214–229.

IHMS 1999. Integrated Hydrological Modelling System. Manual, Version 4.5., Norrköping, Sweden, Swedish Meteorological and Hydrological Institute.

Komac B., Zorn M. 2008. [http://giam.zrc-sazu.si/naravne\\_nesrece.htm#Poplave](http://giam.zrc-sazu.si/naravne_nesrece.htm#Poplave)

Kryžanowski A., Brilly M., Mikoš M., Horvat A. 2007. Umeščanje HE na srednji Savi v prostor. Poročilo študije. HSE, Ljubljana: 48 str.

Lundberg A., Calder I., Harding R. 1998. Evaporation of intercepted snow: measurement and modelling. *Journal of Hydrology*, No. 206: 151–163.

Markošek J. 2003. Razvoj vremena v marcu 2003. Ljubljana, Ministrstvo za okolje in prostor, Agencija Republike Slovenije za okolje, Urad za meteorologijo: 6 str.

Merz R., Bloeschl G., Parajka J. 2006. Spatio-temporal variability of event runoff coefficients. *Journal of Hydrology*, No. 331: 591–604.

Primožič M. 2007. Umerjanje HBV modela za porečje Save v Sloveniji. Diplomsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za splošno hidrotehniko: 81 str.

Ragette G. 1999. The evaporation of rain and snowfall in the subcloud layer. *Phys. Chem, Earth*, Vol. 24, No. 6: 619–622.

Rakovec J., Vrhovec T., Gregorič G. 2007. Osnove meteorologije. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za matematiko in fiziko, Katedra za meteorologijo: 313 str.

Singh P., Spitzbart G., Huebl H., Weinmeister H.W. 1997. Hydrological response of snowpack under rain-on-snow events: a field study. *Journal of Hydrology*, No. 202: 1–20.

Singh P. Vijay 2001. Snow and glacier hydrology, Volume 37, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht: 700 f.

Stanzel P., Haberl U., Nachtnebel H.P. 2008. Modelling snow accumulation and snowmelt in a continuous hydrological model for real time flood forecasting. V: 24th conference of Danubian countries. Bled, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 1–8.

Stušek S. 2008. Uporabnost satelitskih posnetkov za potrebe snežne hidrologije v slovenskem prostoru. Diplomsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za splošno hidrotehniko: 58 str.

Sui J., Koehler G. 2001. Rain-on-snow induced flood events in Southern Germany, *Journal of Hydrology*, Volume 252, Issues 1-4: 205-220.

Sui J., Koehler G. 2007. Impacts of Snowmelt on Peak Flows in a Forest Watershed. *Water Resour Managent*, No 21: 1263–1275.

Uprava RS za zaščito in reševanje 2008. Naravne nesreče.  
<http://www.sos112.si/slo/page.php?src=og12.htm>

Vertačnik G. 2007. Obilno sneženje 5. marca 2006. Ljubljana, Agencija Republike Slovenije za okolje: 6 str.

Wallace J. M., Hobbs P. V. 2006. Atmospheric science, an introductory survey. 2<sup>nd</sup> Edition. International geophysics series. Amsterdam, Boston : Elsevier Academic Press: 483 f.

Weibel D., Wunderle S., Kleindienst H., 2002. Snow Pack Simulation In The Swiss Alps – Combining Gis And Re-Mote Sensing To Model Snow Cover In Switzerland. V: Proceedings of EARSeL-LISSIG-Workshop Observing our Cryosphere from Space, University of Bern: 179–186.

Wikipedija, Prosta enciklopedija 2008.

<http://sl.wikipedia.org/wiki/Sneg> Wikipedija, Prosta enciklopedija, 2008.



## **PRILOGE**

Priloga A1: Korelacije med pretoki izmerjenimi na vodomerni postaji Jesenice na Gorenjskem in višino snežne odeje na postaji Kredarica

Priloga A2: Korelacije med pretoki izmerjenimi na vodomerni postaji Bodešče in višino snežne odeje na postaji Vogel

Priloga B1: Grafična primerjava pretokov na vodomerni postaji Jesenice na Gorenjskem in višine snežne odeje na postaji Kredarica

Priloga B2: Grafična primerjava pretokov na vodomerni postaji Bodešče in višine snežne odeje na postaji Vogel

Priloga C1: Grafična primerjava pretokov na vodomerni postaji Jesenice na Gorenjskem in višine snežne odeje na postaji Kredarica v obdobju tajanja snežne odeje.

Priloga C2: Grafična primerjava pretokov na vodomerni postaji Bodešče in višine snežne odeje na postaji Vogel v obdobju tajanja snežne odeje

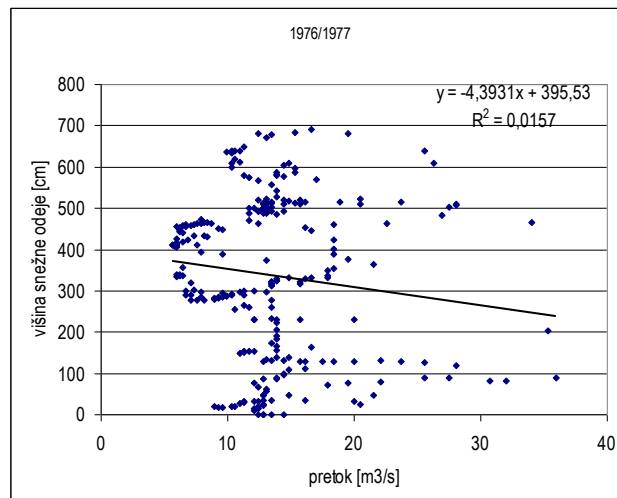
Priloga D: Rezultati modela: prisotnost snežne odeje na posameznih podpovodjih od 24.2. do 31.3.2003



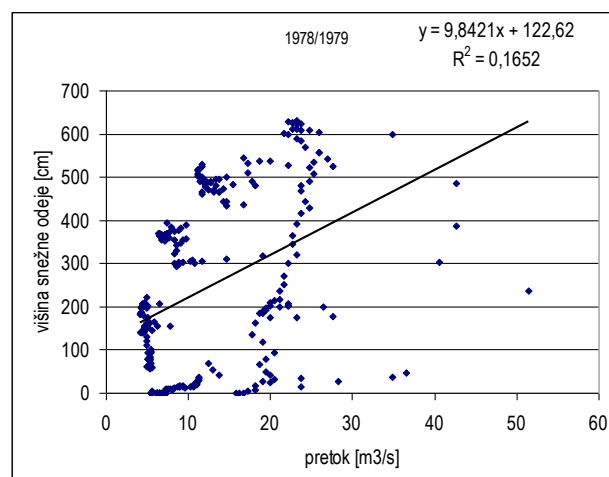
## PRILOGA A1

Korelacije med pretoki, izmerjenimi na vodomerni postaji Jesenice na Gorenjskem, in višino snežne odeje na postaji Kredarica.

Višina snežne odeje > 600 cm

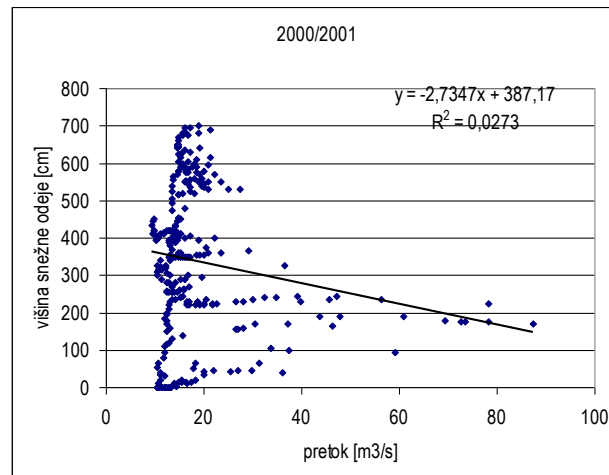


Slika 1: Korelacije med pretoki, izmerjenimi na vodomerni postaji Jesenice na Gorenjskem, in višino snežne odeje na postaji Kredarica v sezoni 1976-77.



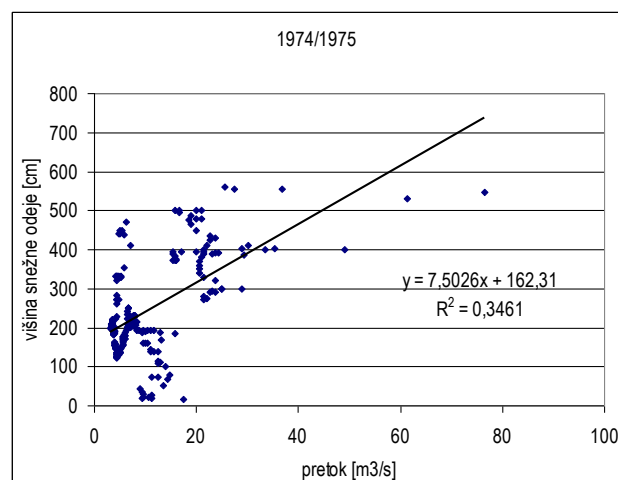
Slika 2: Korelacije med pretoki, izmerjenimi na vodomerni postaji Jesenice na Gorenjskem, in višino snežne odeje na postaji Kredarica v sezoni 1978-1979.



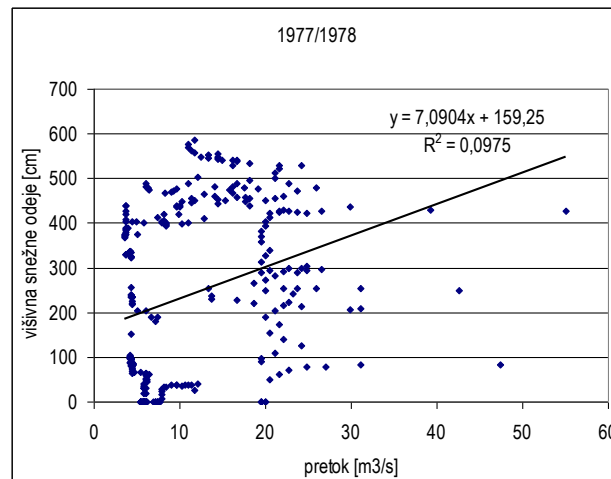


Slika 3: Korelacije med pretoki, izmerjenimi na vodomerni postaji Jesenice na Gorenjskem, in višino snežne odeje na postaji Kredarica v sezoni 2000-2001.

Višina snežne odeje > 500 cm

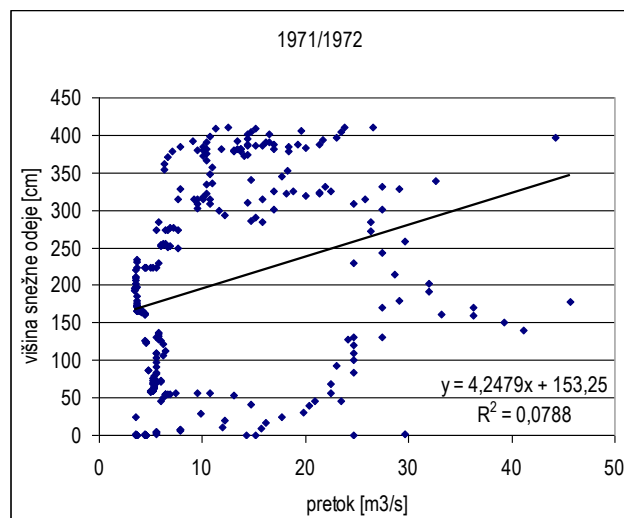


Slika 4: Korelacije med pretoki, izmerjenimi na vodomerni postaji Jesenice na Gorenjskem, in višino snežne odeje na postaji Kredarica v sezoni 1974-1975.

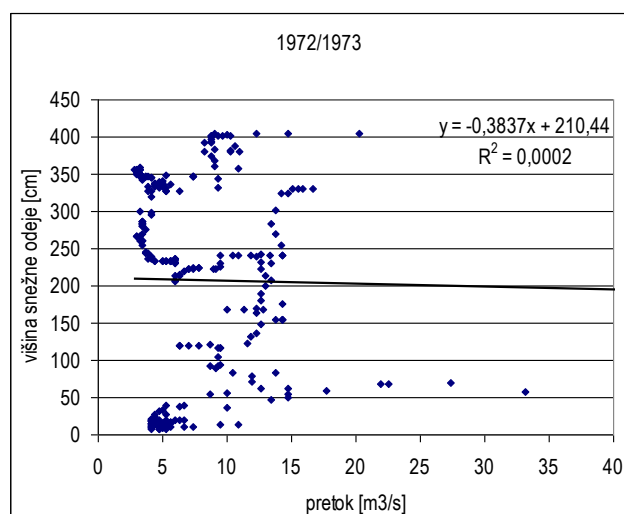


Slika 5: Korelacije med pretoki, izmerjenimi na vodomerni postaji Jesenice na Gorenjskem, in višino snežne odeje na postaji Kredarica v sezoni 1977-1978.

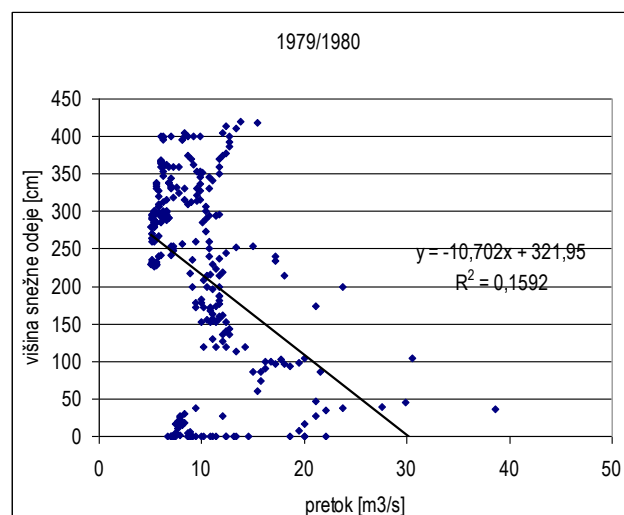
Višina snežne odeje > 400 cm



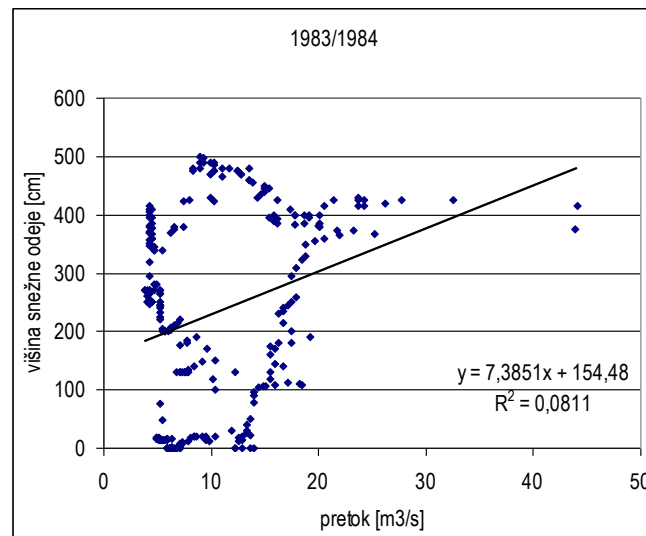
Slika 6: Korelacije med pretoki, izmerjenimi na vodomerni postaji Jesenice na Gorenjskem, in višino snežne odeje na postaji Kredarica v sezoni 1971-1972.



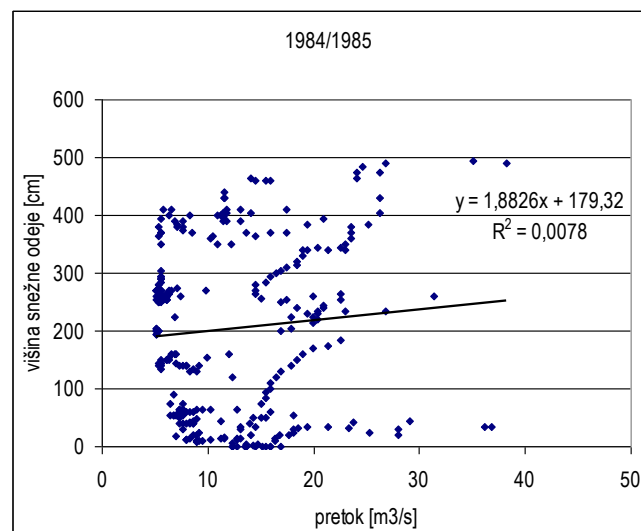
Slika 7: Korelacije med pretoki, izmerjenimi na vodomerni postaji Jesenice na Gorenjskem, in višino snežne odeje na postaji Kredarica v sezoni 1972-1973.



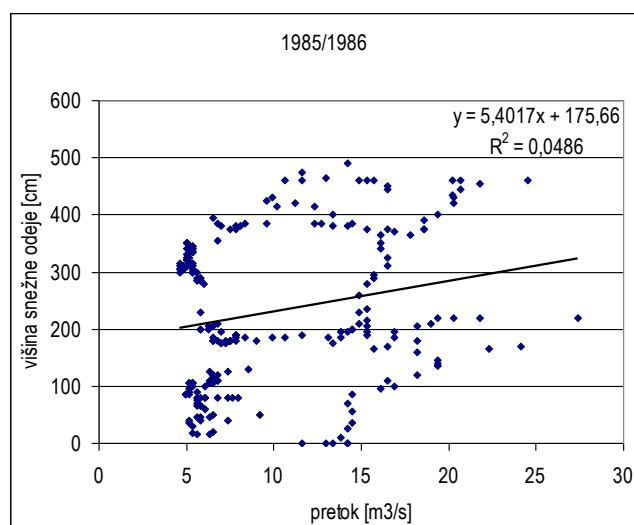
Slika 8: Korelacije med pretoki, izmerjenimi na vodomerni postaji Jesenice na Gorenjskem, in višino snežne odeje na postaji Kredarica v sezoni 1979-1980.



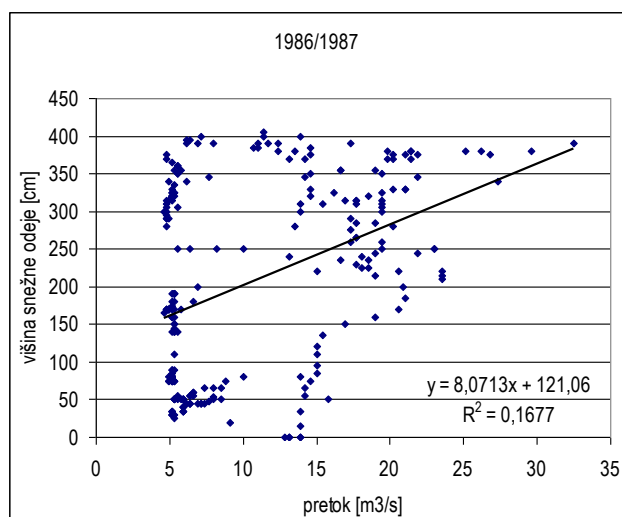
Slika 9: Korelacije med pretoki, izmerjenimi na vodomerni postaji Jesenice na Gorenjskem, in višino snežne odeje na postaji Kredarica v sezoni 1983-1984.



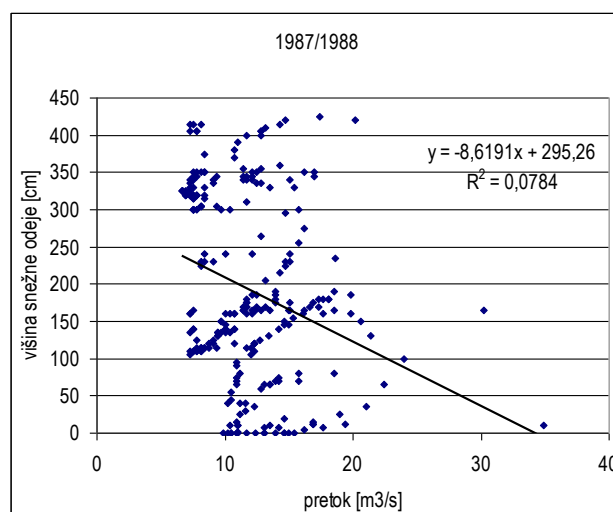
Slika 10: Korelacije med pretoki, izmerjenimi na vodomerni postaji Jesenice na Gorenjskem, in višino snežne odeje na postaji Kredarica v sezoni 1984-1985.



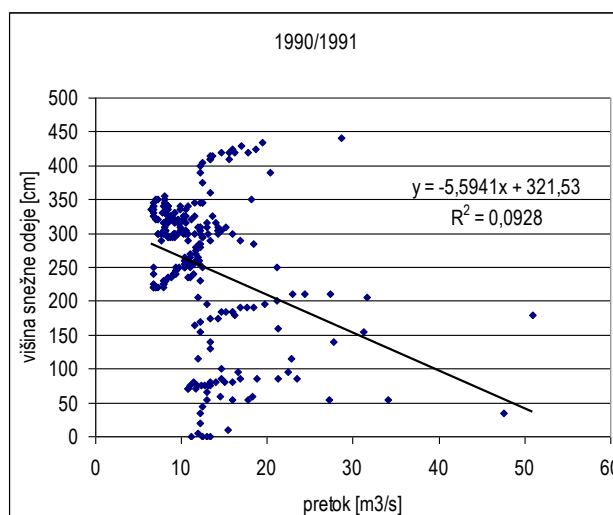
Slika 11: Korelacije med pretoki, izmerjenimi na vodomerni postaji Jesenice na Gorenjskem, in višino snežne odeje na postaji Kredarica v sezoni 1985-1986.



Slika 12: Korelacije med pretoki, izmerjenimi na vodomerni postaji Jesenice na Gorenjskem, in višino snežne odeje na postaji Kredarica v sezoni 1986-1987.



Slika 13: Korelacije med pretoki, izmerjenimi na vodomerni postaji Jesenice na Gorenjskem, in višino snežne odeje na postaji Kredarica v sezoni 1987-1988.



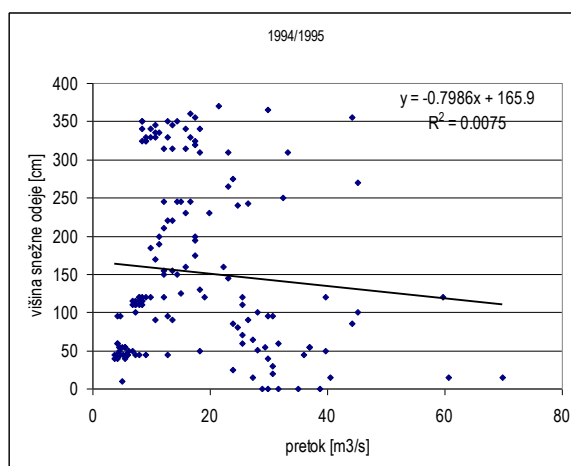
Slika 14: Korelacije med pretoki, izmerjenimi na vodomerni postaji Jesenice na Gorenjskem, in višino snežne odeje na postaji Kredarica v sezoni 1990-1991.



## PRILOGA A2

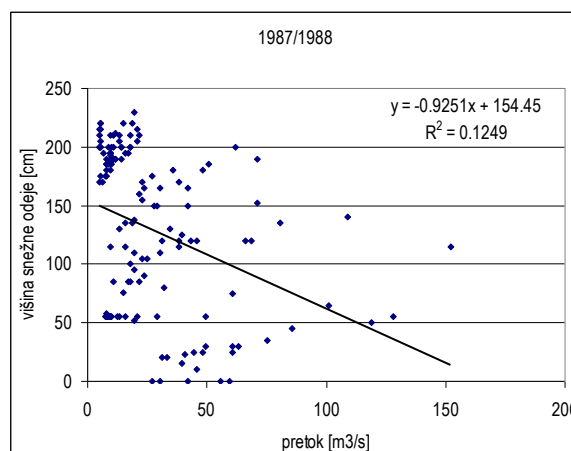
Korelacije med pretoki, izmerjenimi na vodomerni postaji Bodešče, in višino snežne odeje na postaji Vogel.

Višina snežne odeje > 300 cm



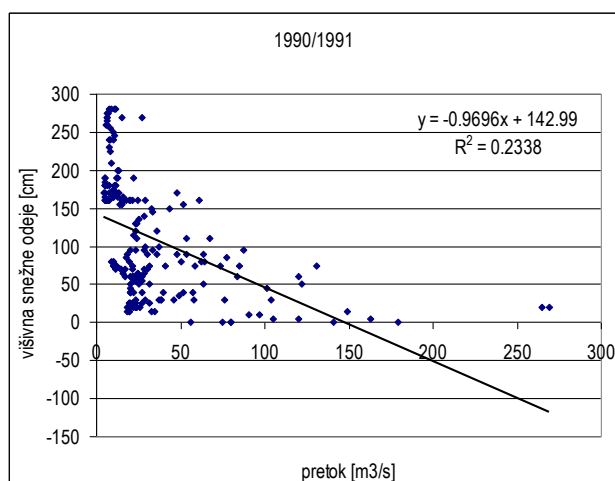
Slika 1: Korelacije med pretoki, izmerjenimi na vodomerni postaji Bodešče, in višino snežne odeje na postaji Vogel v sezoni 1994-1995.

Višina snežne odeje > 200 cm

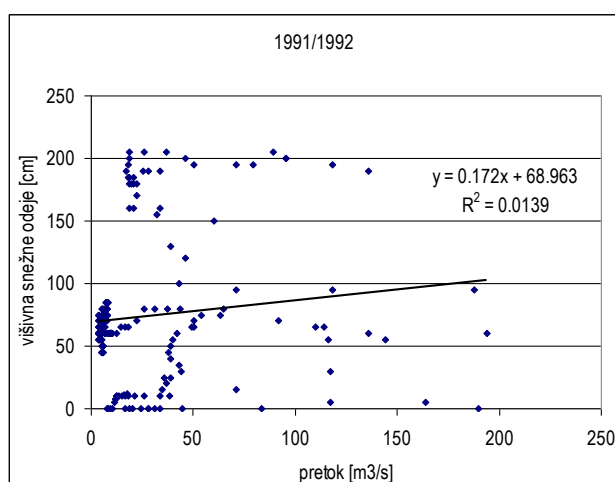


Slika 2: Korelacije med pretoki, izmerjenimi na vodomerni postaji Bodešče, in višino snežne odeje na postaji Vogel v sezoni 1987-1988.

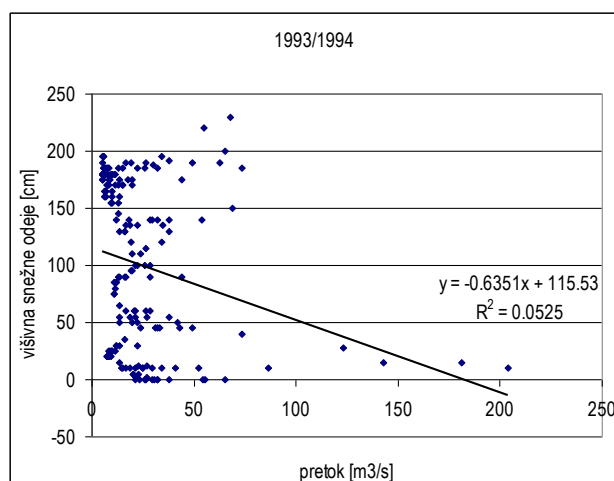




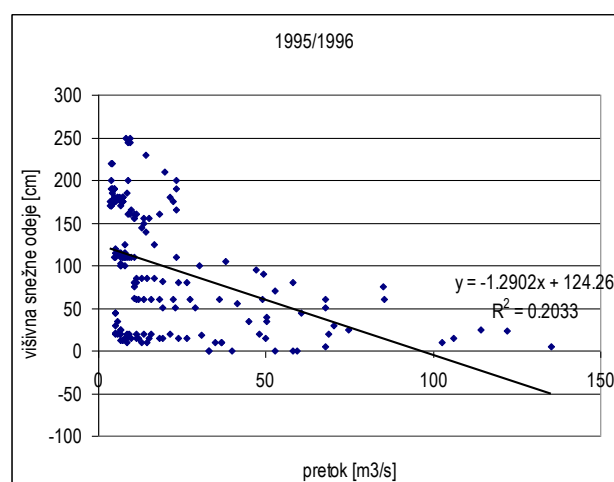
Slika 3: Korelacije med pretoki, izmerjenimi na vodomerni postaji Bodešče, in višino snežne odeje na postaji Vogel v sezoni 1990-1991.



Slika 4: Korelacije med pretoki, izmerjenimi na vodomerni postaji Bodešče, in višino snežne odeje na postaji Vogel v sezoni 1991-1992.

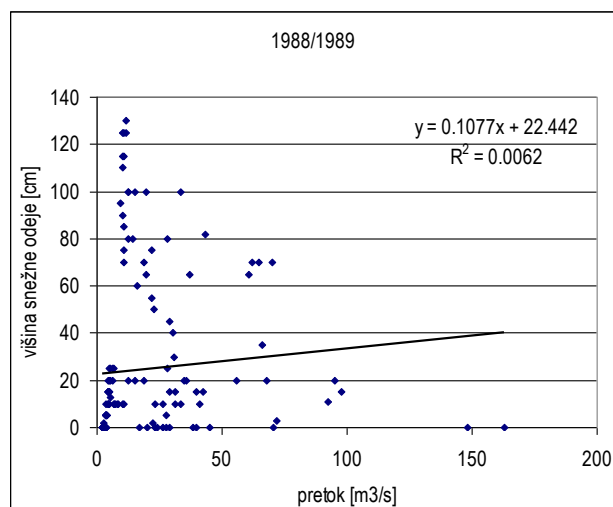


Slika 5: Korelacije med pretoki, izmerjenimi na vodomerni postaji Bodešče, in višino snežne odeje na postaji Vogel v sezoni 1993-1994.

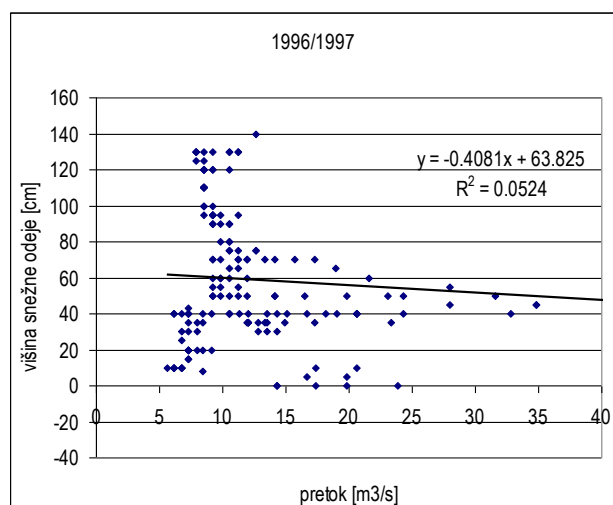


Slika 6: Korelacije med pretoki, izmerjenimi na vodomerni postaji Bodešče, in višino snežne odeje na postaji Vogel v sezoni 1995-1996.

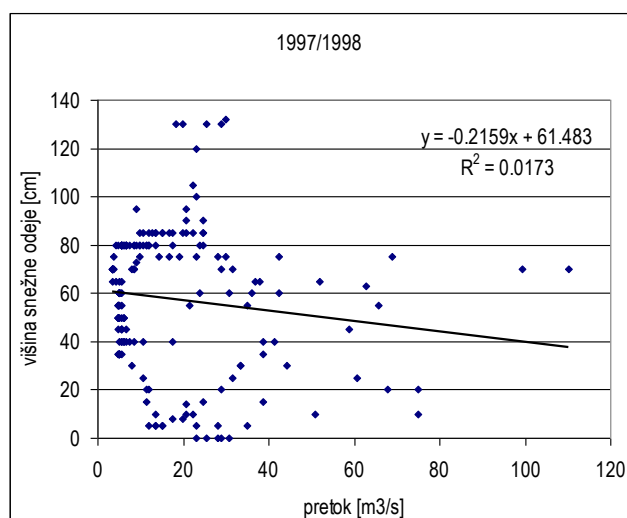
Višina snežne odeje > 100 cm



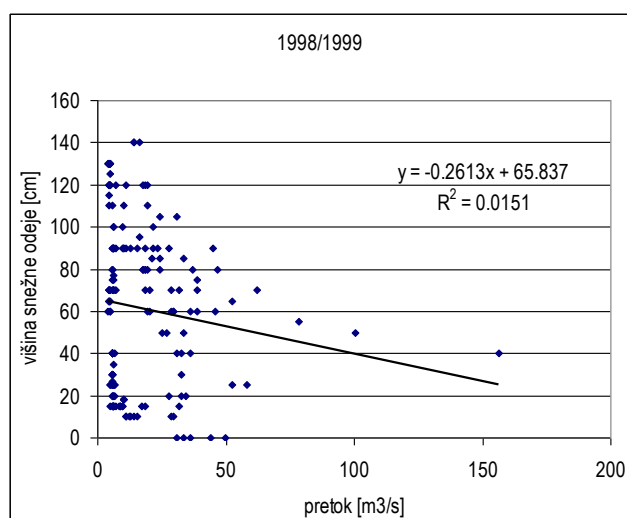
Slika 7: Korelacije med pretoki, izmerjenimi na vodomerni postaji Bodešče, in višino snežne odeje na postaji Vogel v sezoni 1988-1989.



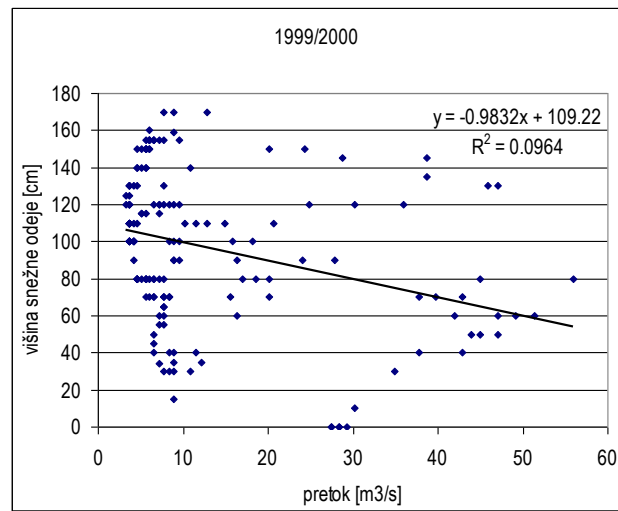
Slika 8: Korelacije med pretoki, izmerjenimi na vodomerni postaji Bodešče, in višino snežne odeje na postaji Vogel v sezoni 1996-1997.



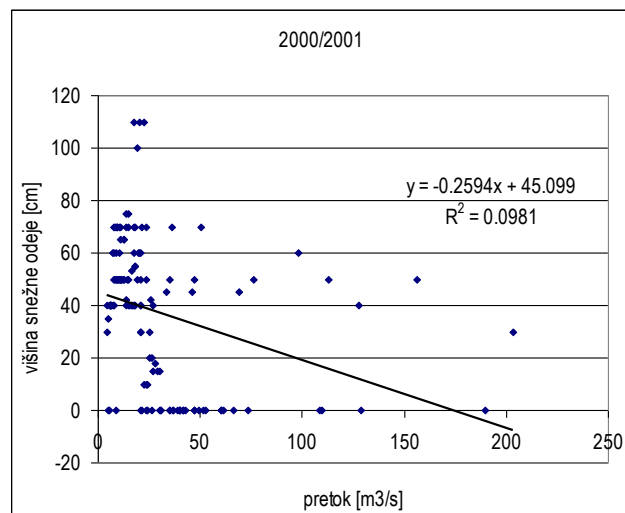
Slika 9: Korelacije med pretoki, izmerjenimi na vodomerni postaji Bodešče, in višino snežne odeje na postaji Vogel v sezoni 1997-1998.



Slika 10: Korelacije med pretoki, izmerjenimi na vodomerni postaji Bodešče, in višino snežne odeje na postaji Vogel v sezoni 1998-1999.



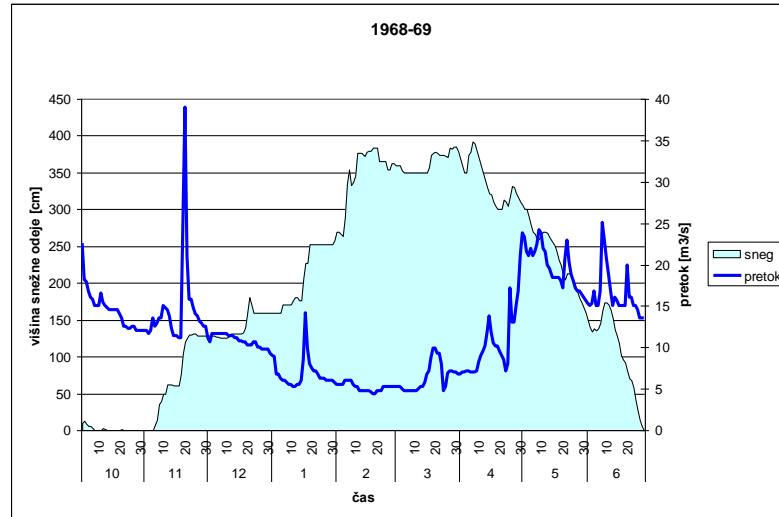
Slika 11: Korelacije med pretoki, izmerjenimi na vodomerni postaji Bodešče, in višino snežne odeje na postaji Vogel v sezoni 1999-2000.



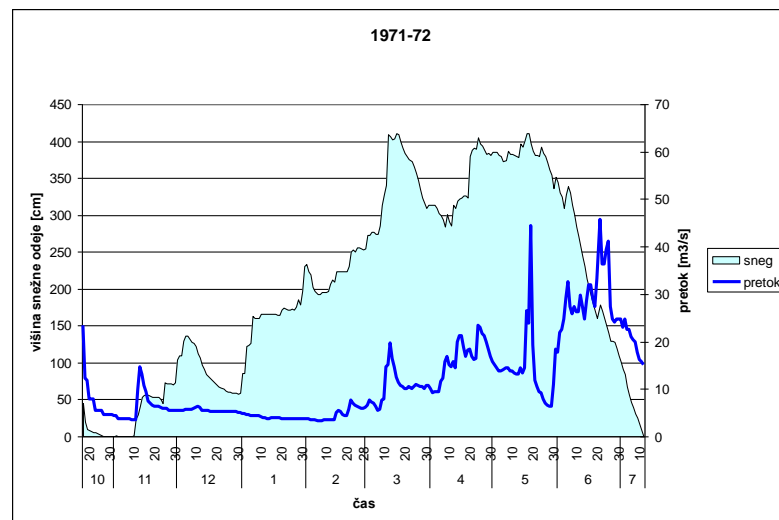
Slika 12: Korelacije med pretoki, izmerjenimi na vodomerni postaji Bodešče, in višino snežne odeje na postaji Vogel v sezoni 2000-2001.

## PRILOGA B1

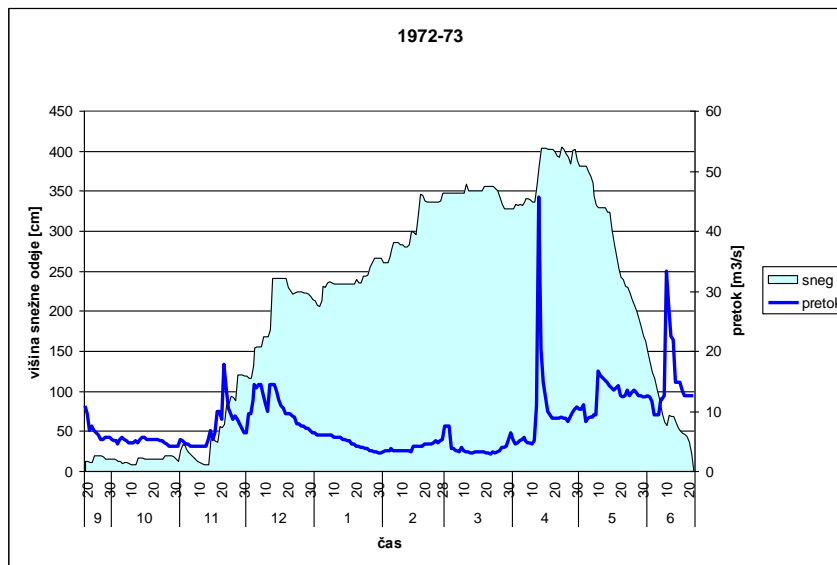
Grafična primerjava pretokov na vodomerni postaji Jesenice na Gorenjskem in višine snežne odeje na postaji Kredarica.



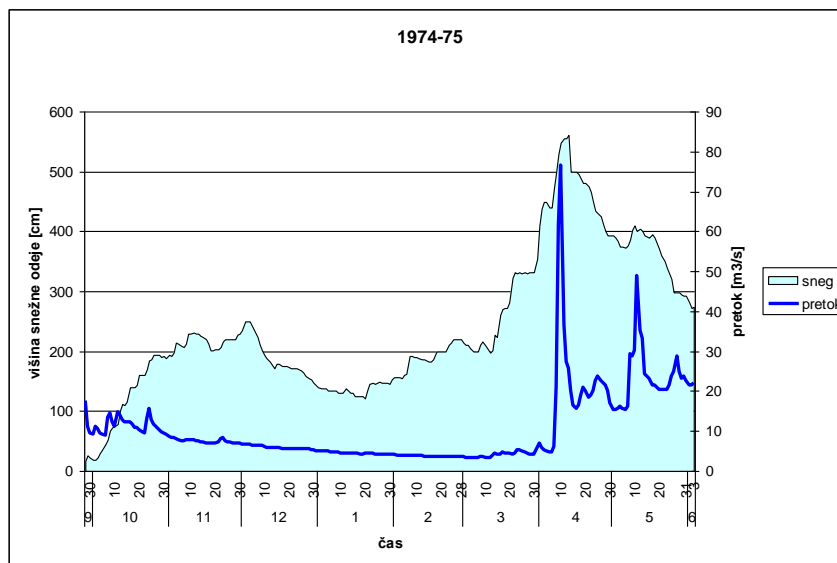
Slika 1: Primerjava pretokov na vodomerni postaji Jesenice na Gorenjskem in višine snežne odeje na postaji Kredarica v sezoni 1968-69.



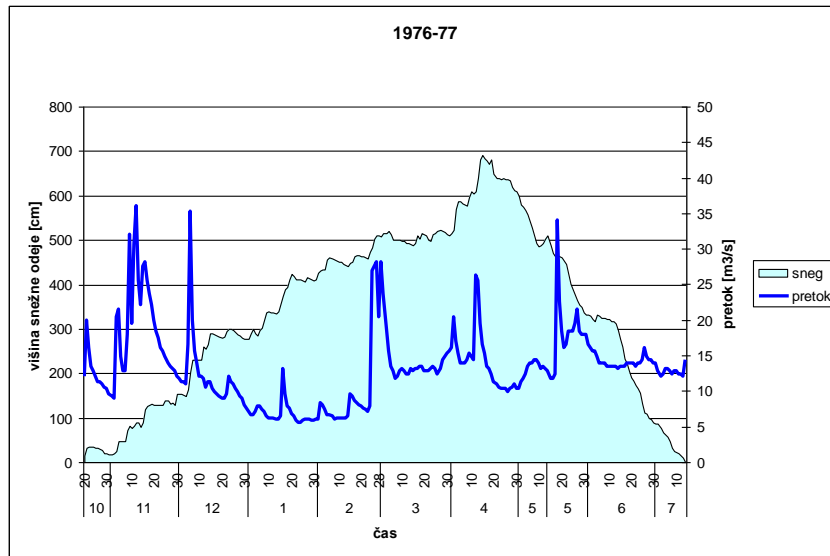
Slika 2: Primerjava pretokov na vodomerni postaji Jesenice na Gorenjskem in višine snežne odeje na postaji Kredarica v sezoni 1971-72.



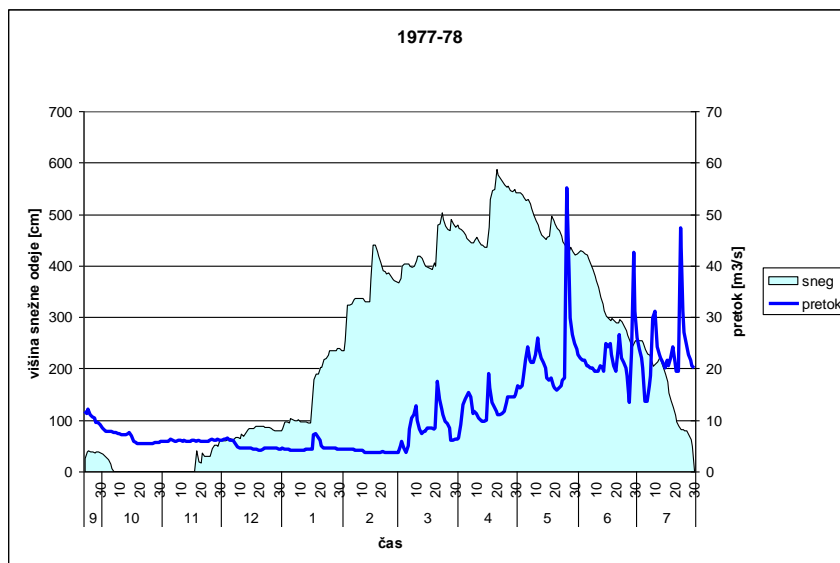
Slika 3: Primerjava pretokov na vodomerni postaji Jesenice na Gorenjskem in višine snežne odeje na postaji Kredarica v sezoni 1972-73.



Slika 4: Primerjava pretokov na vodomerni postaji Jesenice na Gorenjskem in višine snežne odeje na postaji Kredarica v sezoni 1974-75.

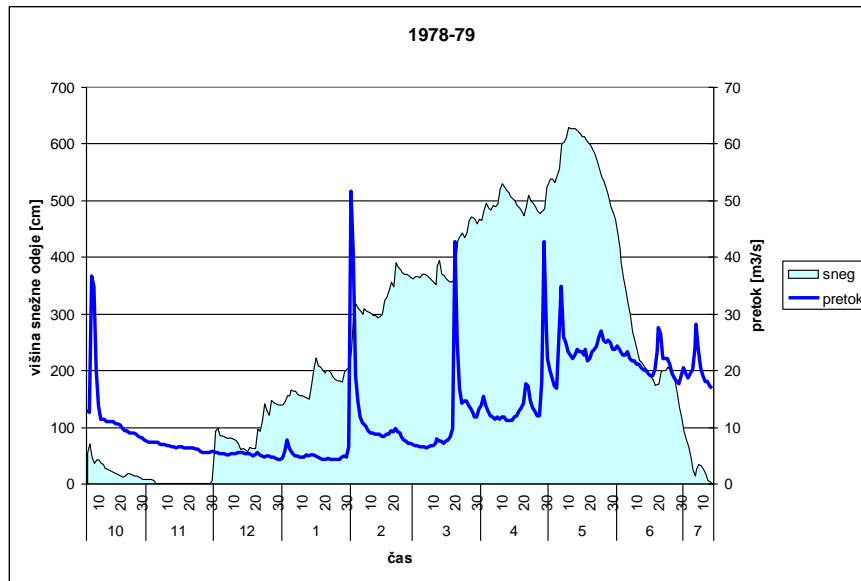


Slika 5: Primerjava pretokov na vodomerni postaji Jesenice na Gorenjskem in višine snežne odeje na postaji Kredarica v sezoni 1976-77.

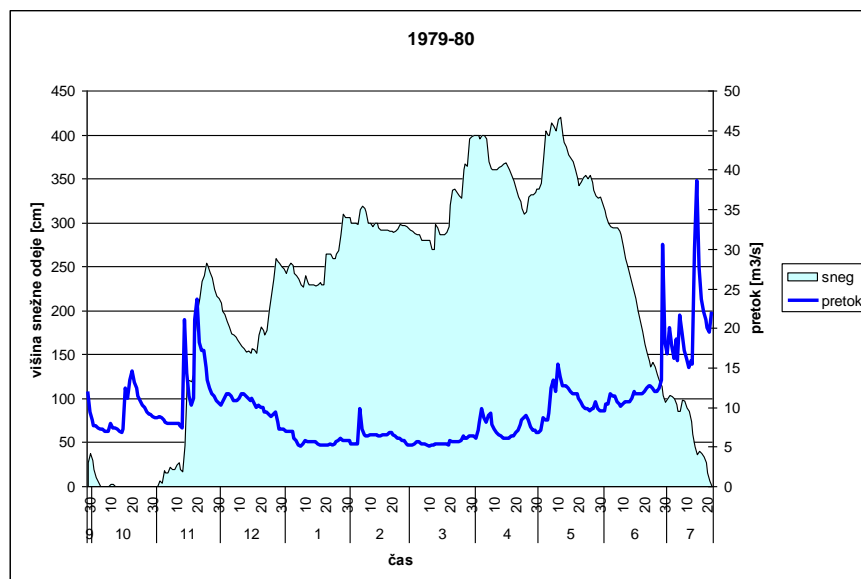


Slika 6: Primerjava pretokov na vodomerni postaji Jesenice na Gorenjskem in višine snežne odeje na postaji Kredarica v sezoni 1977-78.

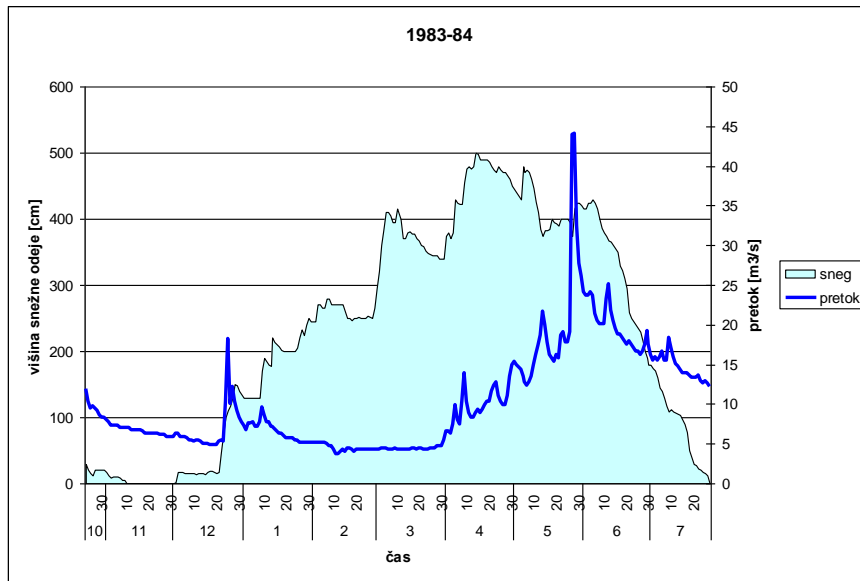




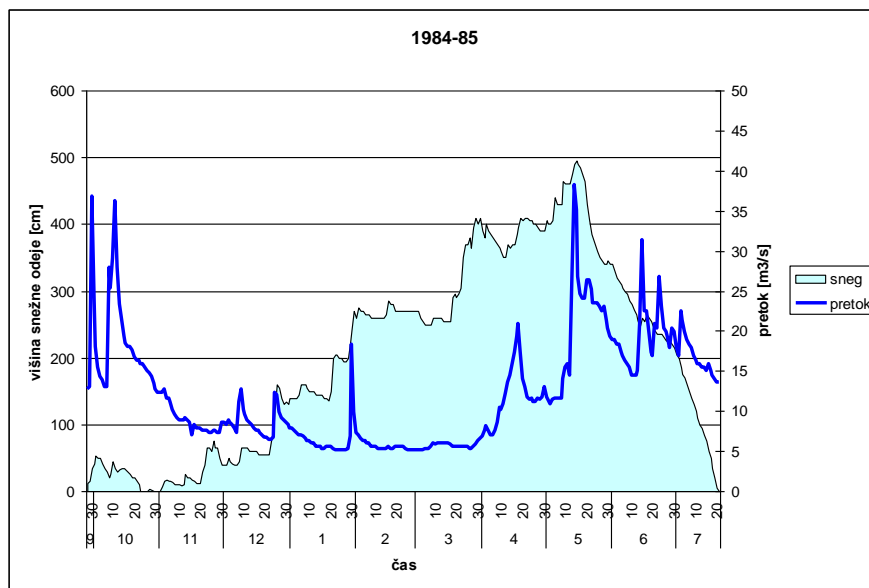
Slika 7: Primerjava pretokov na vodomerni postaji Jesenice na Gorenjskem in višine snežne odeje na postaji Kredarica v sezoni 1978-79.



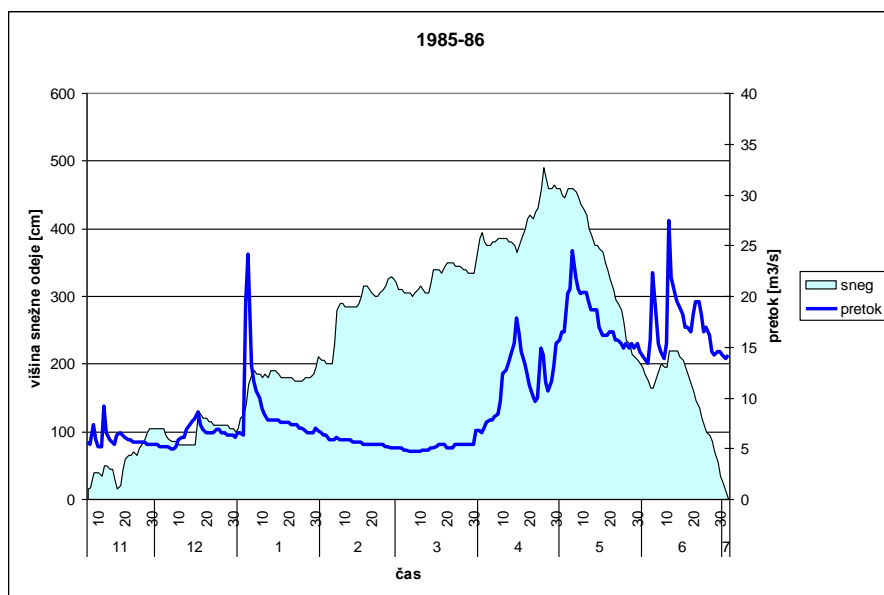
Slika 8: Primerjava pretokov na vodomerni postaji Jesenice na Gorenjskem in višine snežne odeje na postaji Kredarica v sezoni 1979-80.



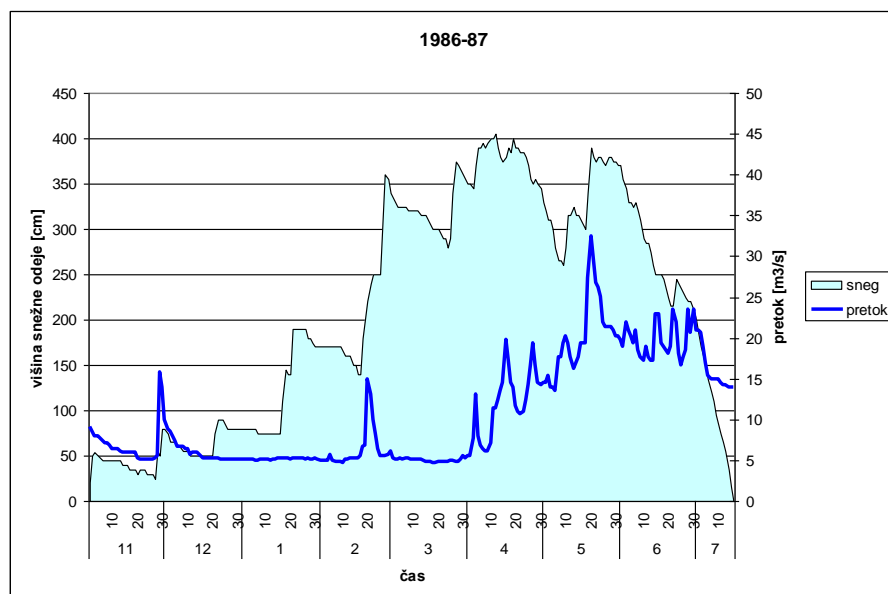
Slika 9: Primerjava pretokov na vodomerni postaji Jesenice na Gorenjskem in višine snežne odeje na postaji Kredarica v sezoni 1983-84.



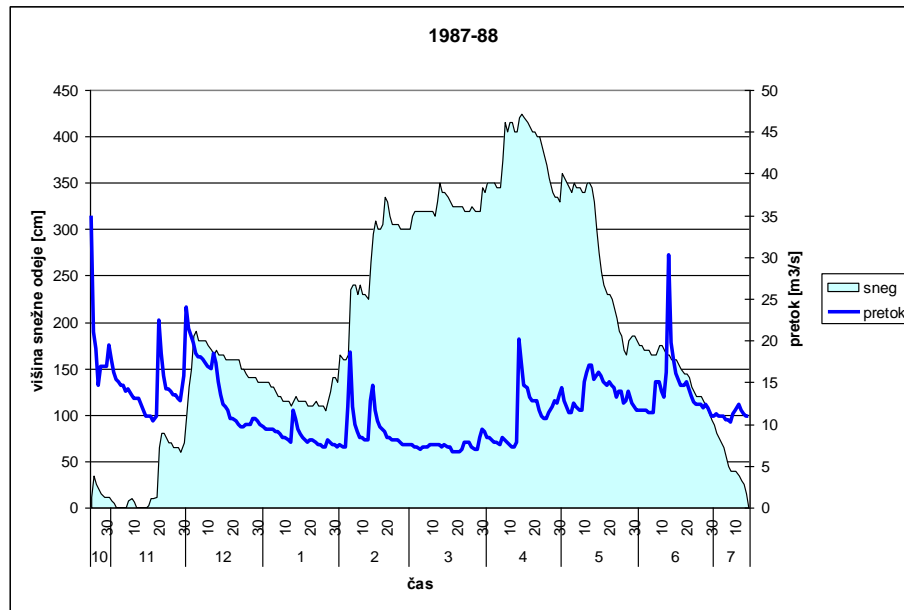
Slika 10: Primerjava pretokov na vodomerni postaji Jesenice na Gorenjskem in višine snežne odeje na postaji Kredarica v sezoni 1984-85.



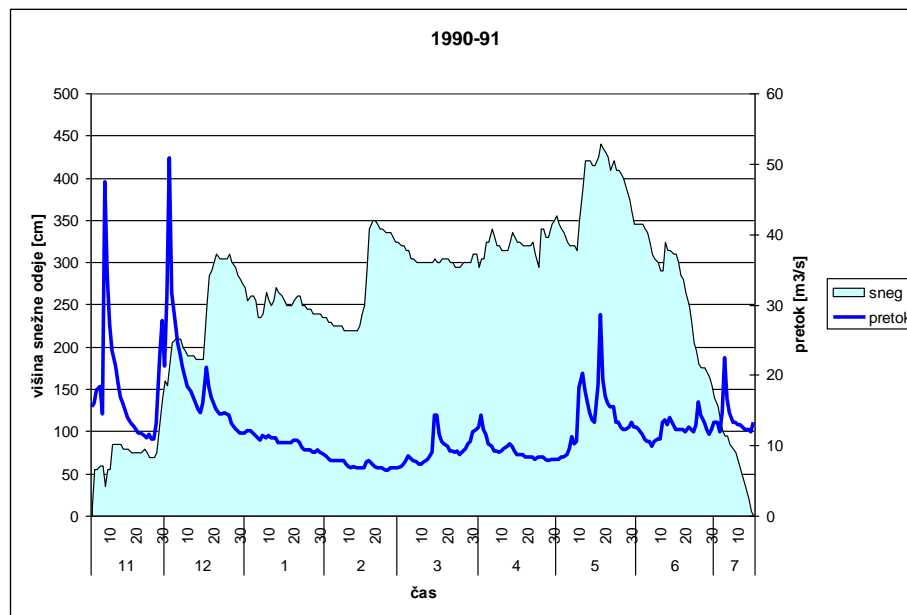
Slika 11: Primerjava pretokov na vodomerni postaji Jesenice na Gorenjskem in višine snežne odeje na postaji Kredarica v sezoni 1985-86.



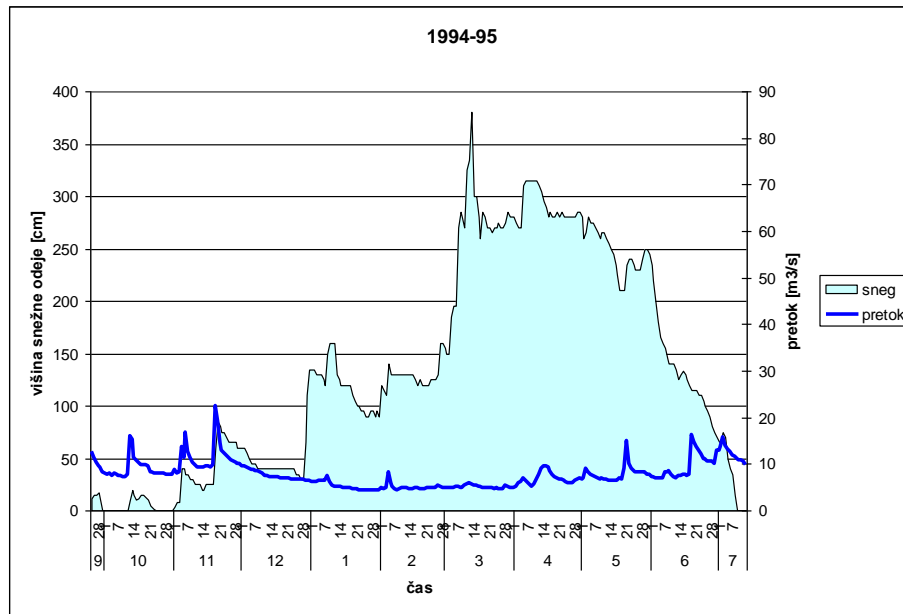
Slika 12: Primerjava pretokov na vodomerni postaji Jesenice na Gorenjskem in višine snežne odeje na postaji Kredarica v sezoni 1986-87.



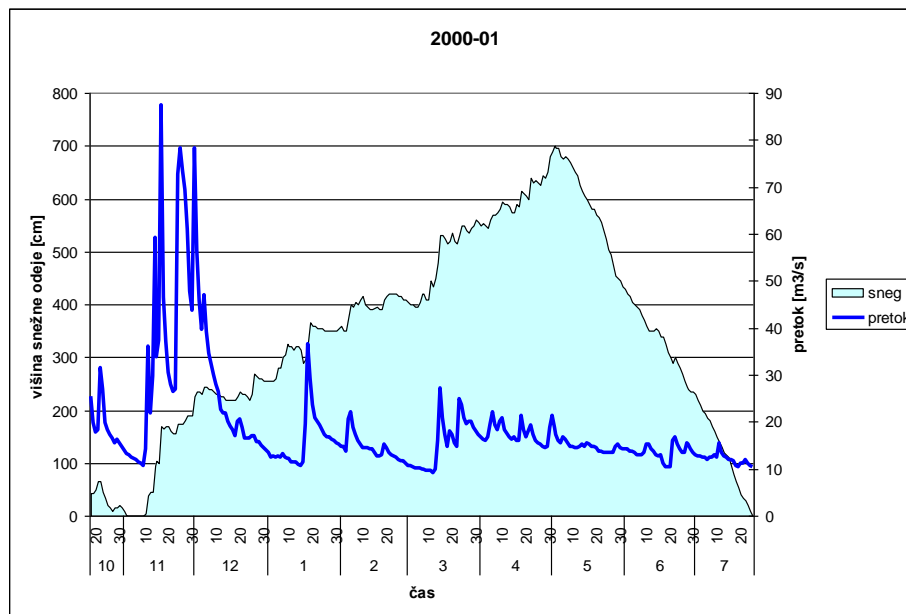
Slika 13: Primerjava pretokov na vodomerni postaji Jesenice na Gorenjskem in višine snežne odeje na postaji Kredarica v sezoni 1987-88.



Slika 14: Primerjava pretokov na vodomerni postaji Jesenice na Gorenjskem in višine snežne odeje na postaji Kredarica v sezoni 1990-91.



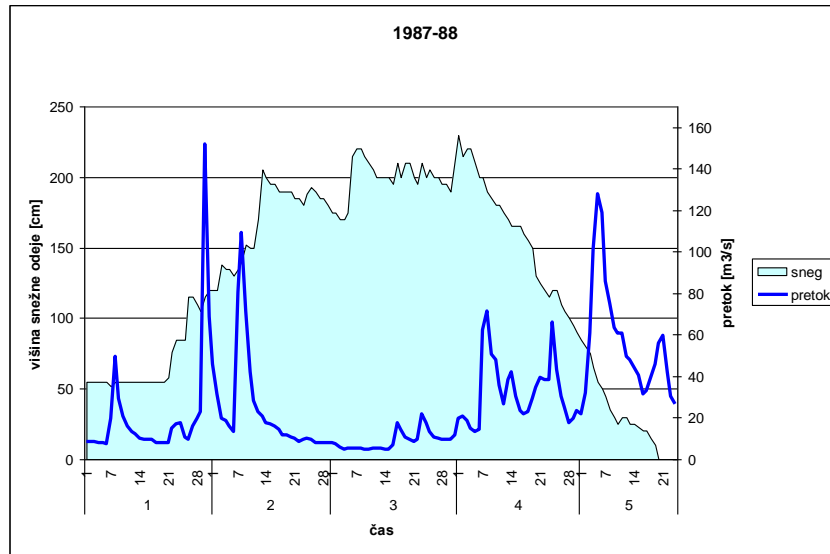
Slika 15: Primerjava pretokov na vodomerni postaji Jesenice na Gorenjskem in višine snežne odeje na postaji Kredarica v sezoni 1994-95.



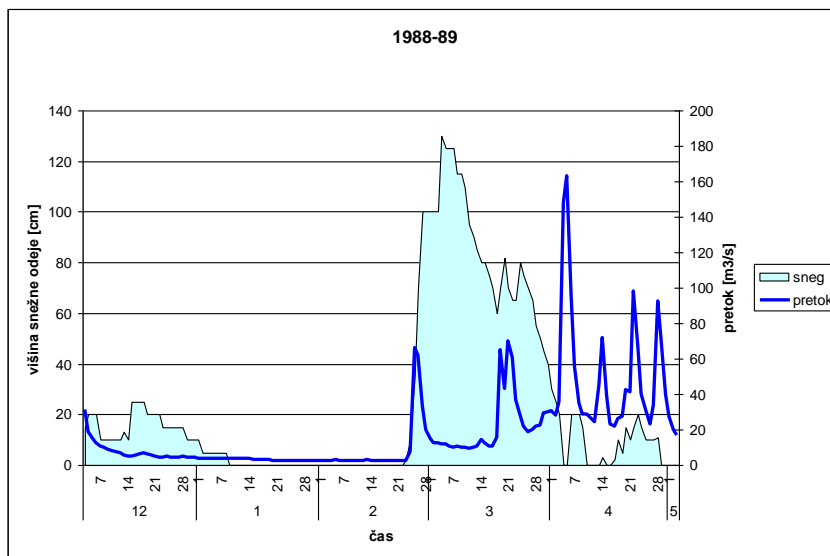
Slika 16: Primerjava pretokov na vodomerni postaji Jesenice na Gorenjskem in višine snežne odeje na postaji Kredarica v sezoni 2000-01.

## PRILOGA B2

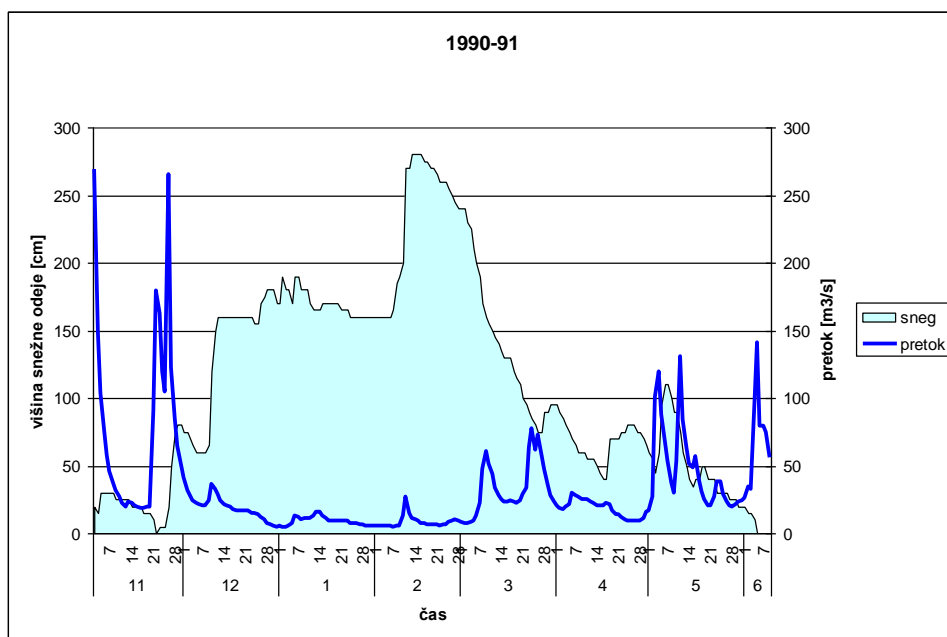
Grafična primerjava pretokov na vodomerni postaji Bodešče in višine snežne odeje na postaji Vogel.



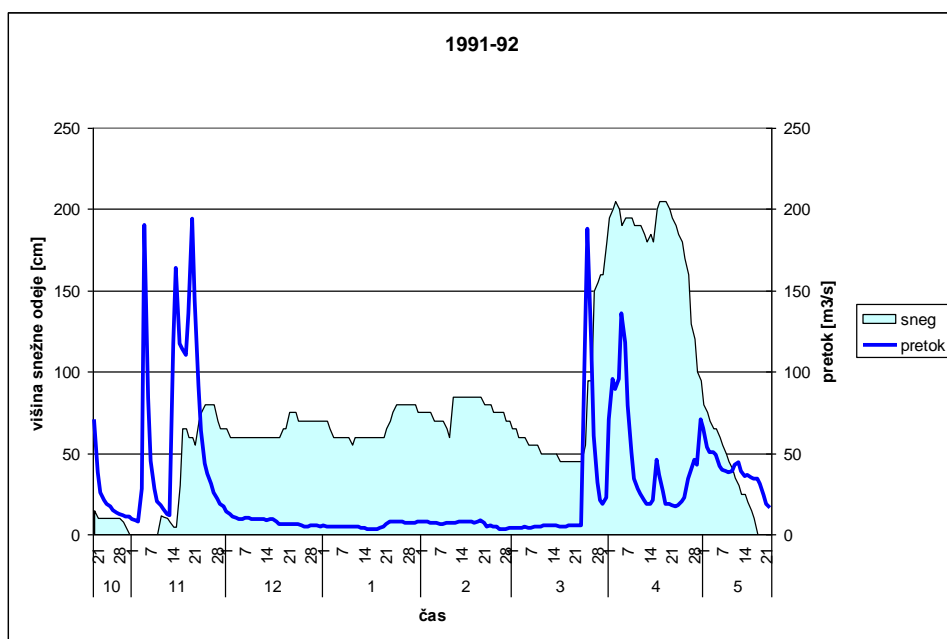
Slika 1: Primerjava pretokov na vodomerni postaji Bodešče in višine snežne odeje na postaji Vogel v sezoni 1987-88.



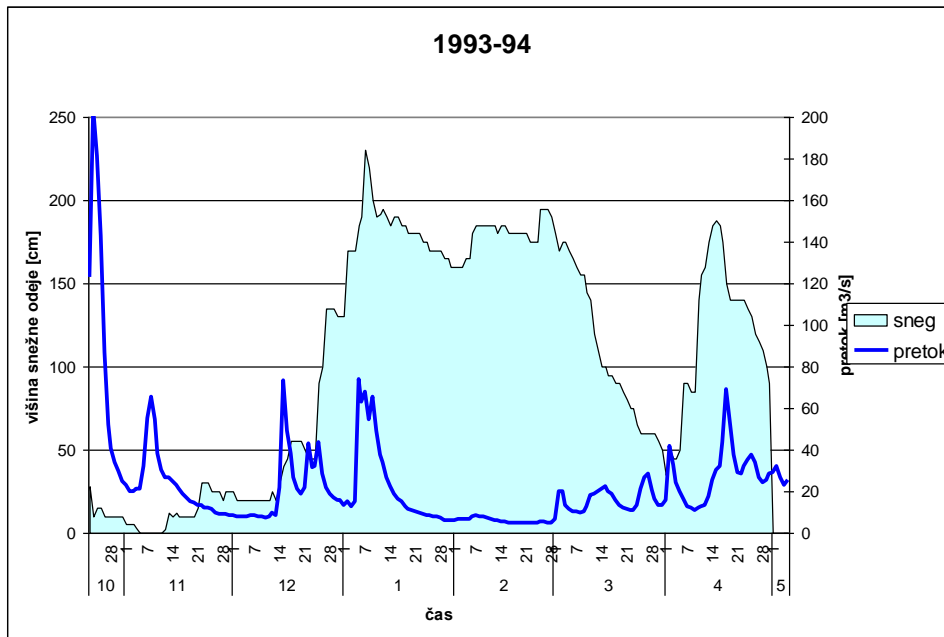
Slika 2: Primerjava pretokov na vodomerni postaji Bodešče in višine snežne odeje na postaji Vogel v sezoni 1988-89.



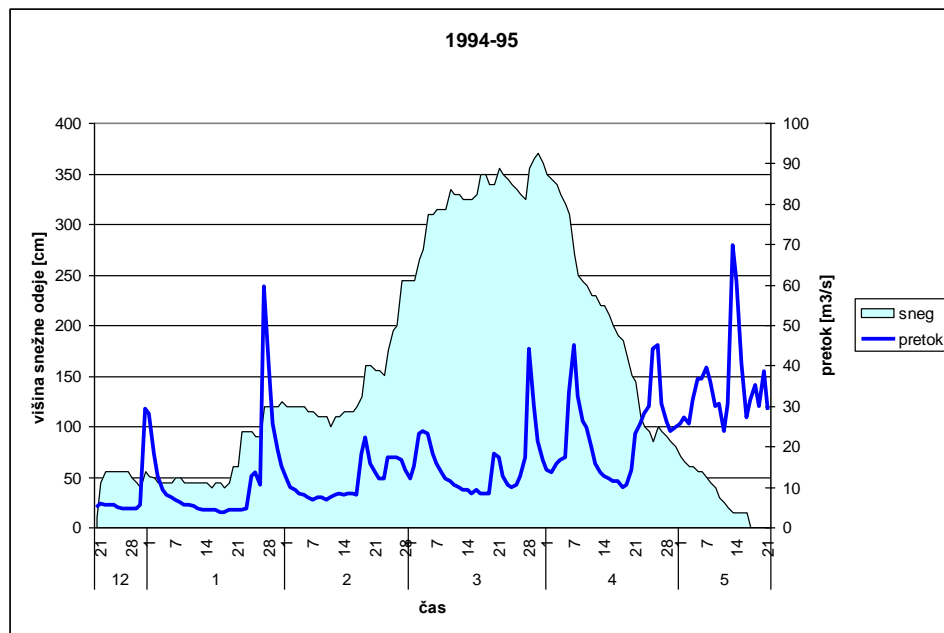
Slika 3: Primerjava pretokov na vodomerni postaji Bodešče in višine snežne odeje na postaji Vogel v sezoni 1990-91.



Slika 4: Primerjava pretokov na vodomerni postaji Bodešče in višine snežne odeje na postaji Vogel v sezoni 1991-92.

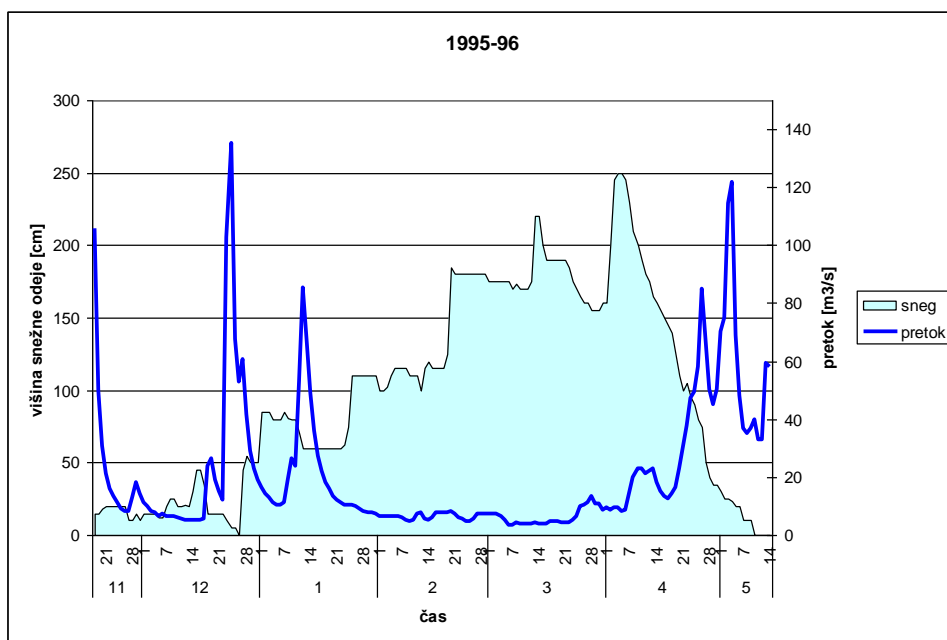


Slika 5: Primerjava pretokov na vodomerni postaji Bodešče in višine snežne odeje na postaji Vogel v sezoni 1993-94.

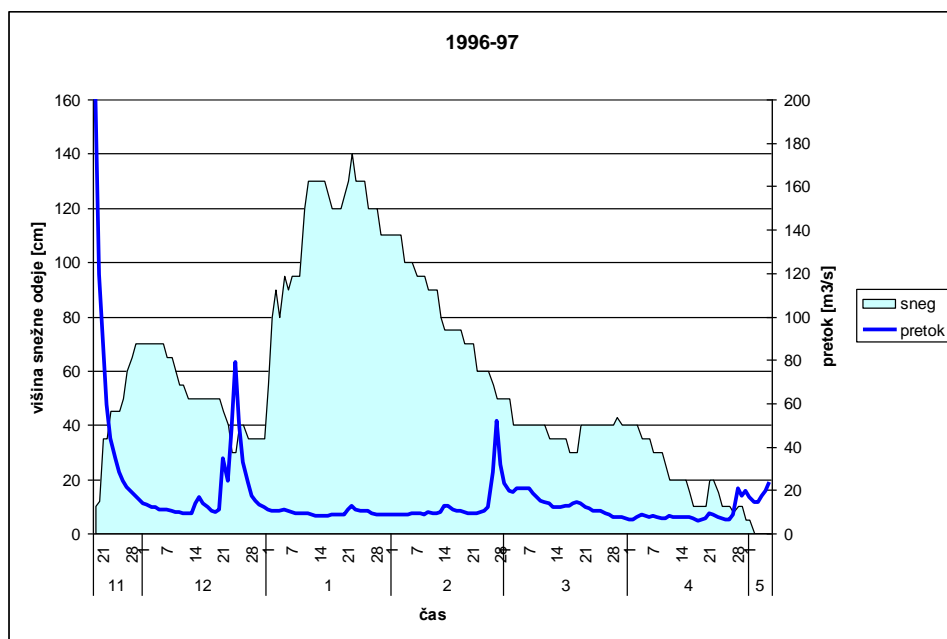


Slika 6: Primerjava pretokov na vodomerni postaji Bodešče in višine snežne odeje na postaji Vogel v sezoni 1994-95.

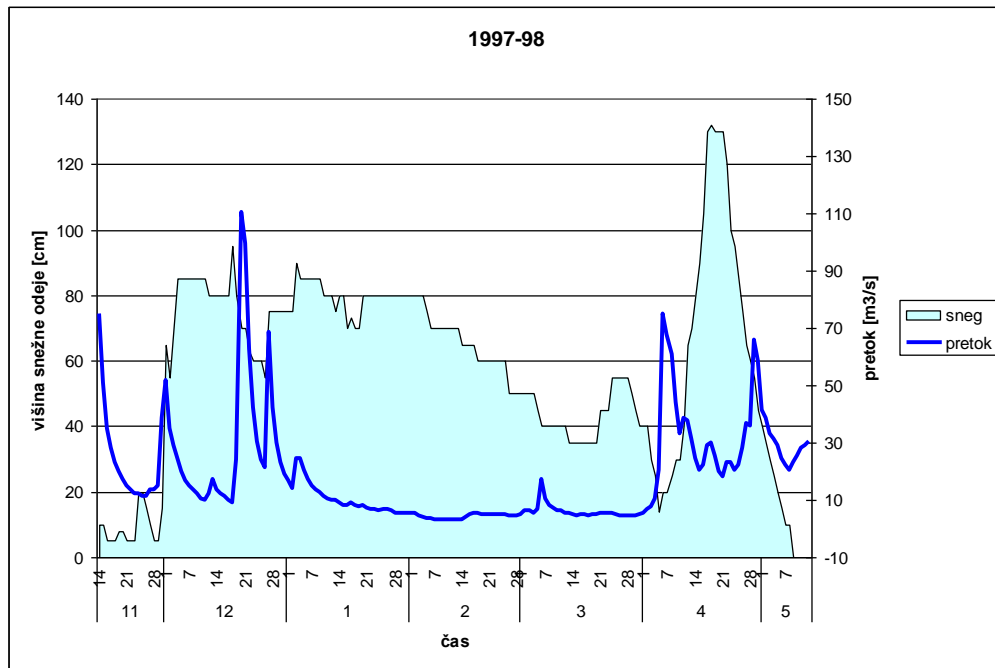




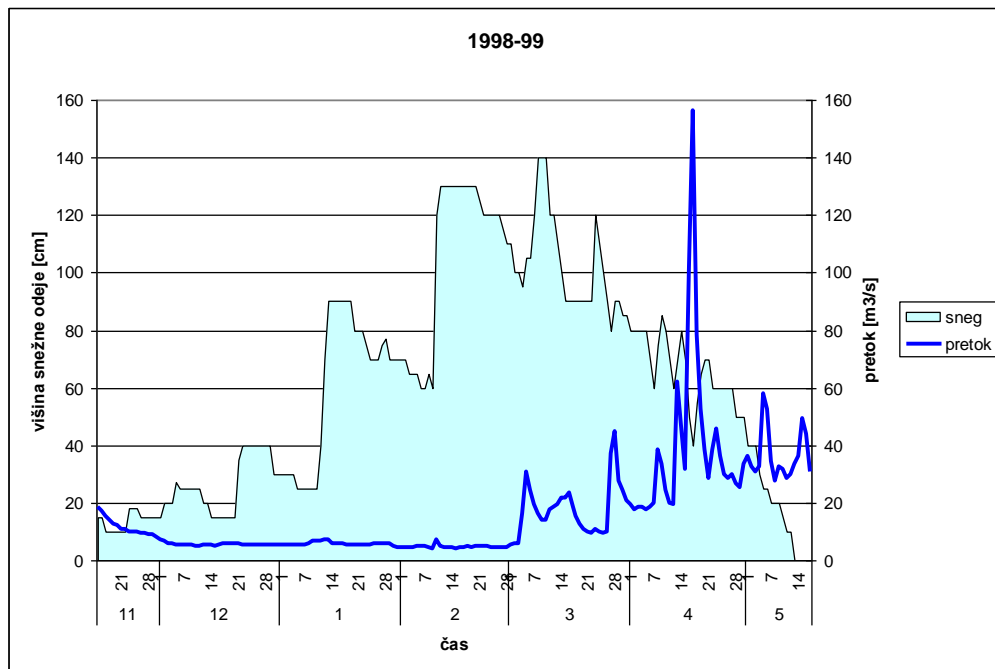
Slika 7: Primerjava pretokov na vodomerni postaji Bodešče in višine snežne odeje na postaji Vogel v sezoni 1995-96.



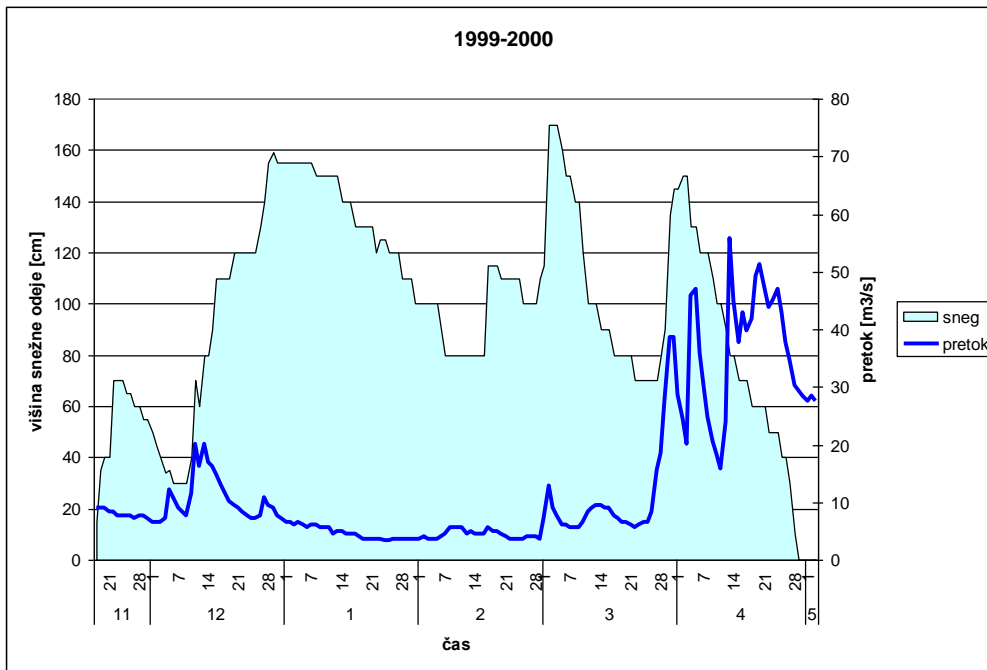
Slika 8: Primerjava pretokov na vodomerni postaji Bodešče in višine snežne odeje na postaji Vogel v sezoni 1996-97.



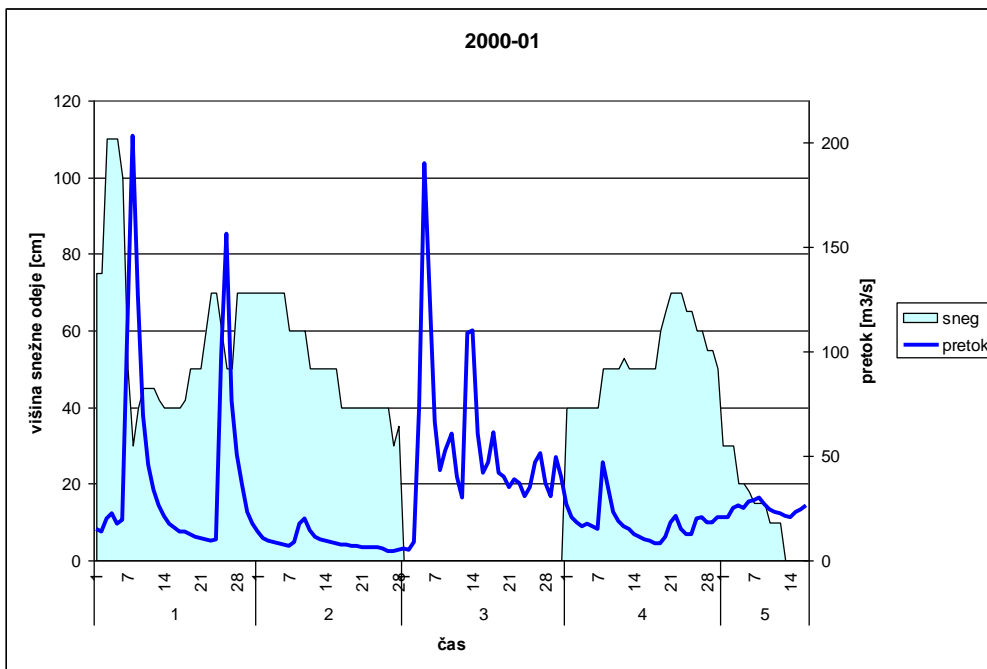
Slika 9: Primerjava pretokov na vodomerni postaji Bodešče in višine snežne odeje na postaji Vogel v sezoni 1997-98.



Slika 10: Primerjava pretokov na vodomerni postaji Bodešče in višine snežne odeje na postaji Vogel v sezoni 1998-99.



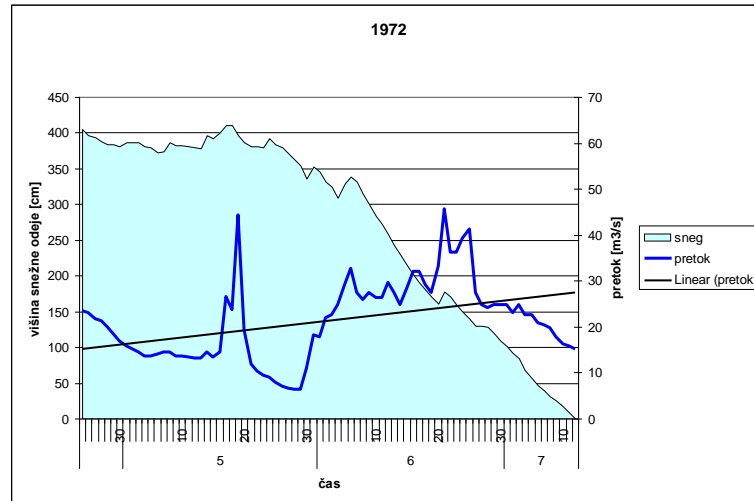
Slika 11: Primerjava pretokov na vodomerni postaji Bodešče in višine snežne odeje na postaji Vogel v sezoni 1999-2000.



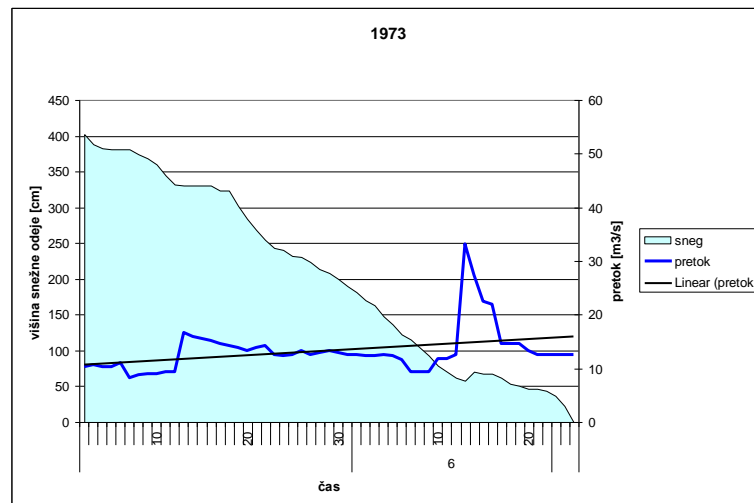
Slika 12: Primerjava pretokov na vodomerni postaji Bodešče in višine snežne odeje na postaji Vogel v sezoni 2000-2001.

## PRILOGA C1

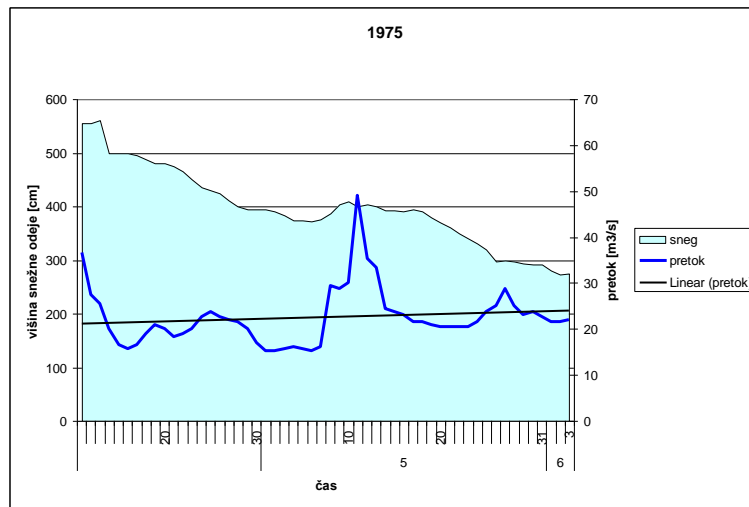
Grafična primerjava pretokov na vodomerni postaji Jesenice na Gorenjskem in višine snežne odeje na postaji Kredarica v obdobju tajanja snežne odeje.



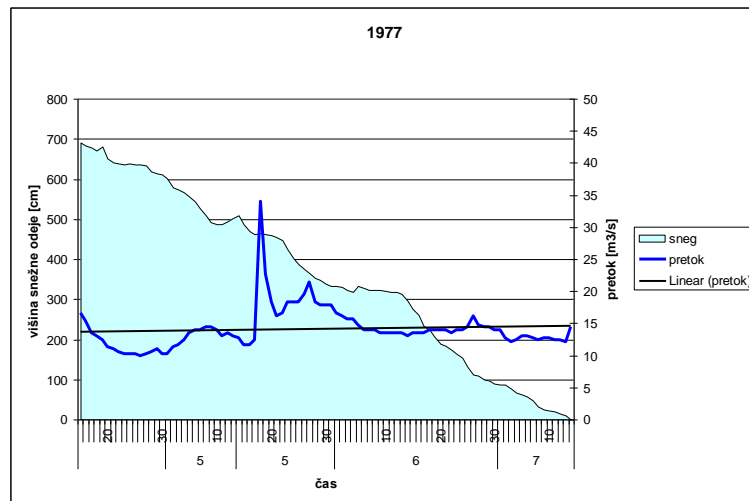
Slika 1: Primerjava pretokov na vodomerni postaji Jesenice na Gorenjskem in višine snežne odeje na postaji Kredarica v obdobju tajanja snežne odeje spomladi 1972.



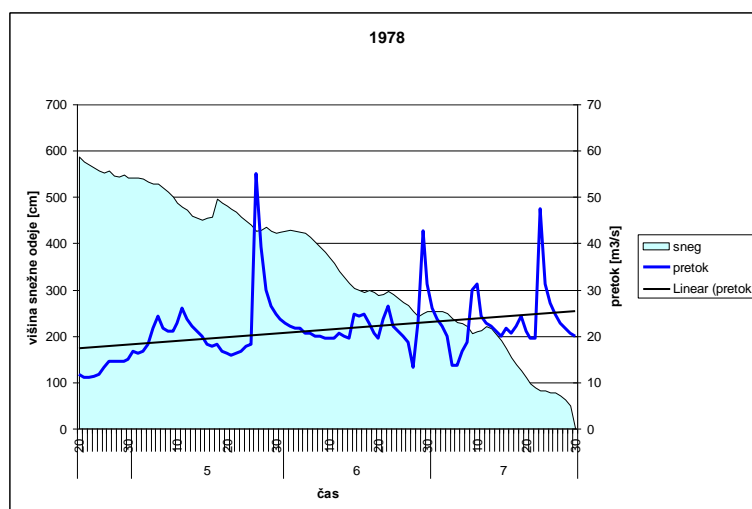
Slika 2: Primerjava pretokov na vodomerni postaji Jesenice na Gorenjskem in višine snežne odeje na postaji Kredarica v obdobju tajanja snežne odeje spomladi 1973.



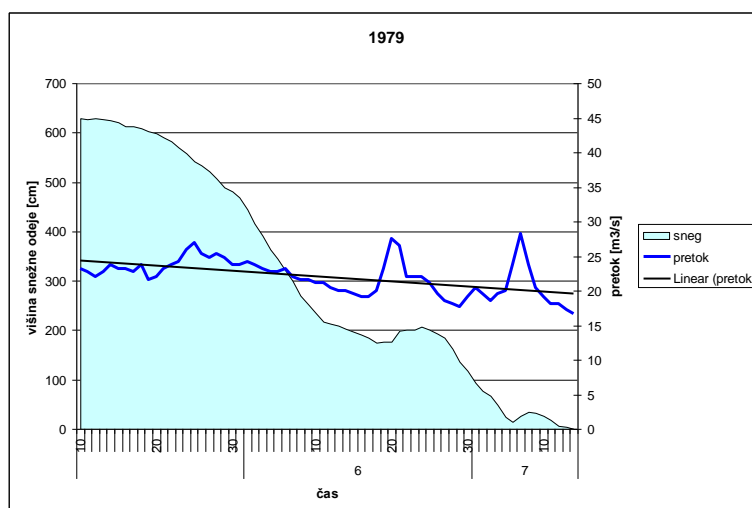
Slika 3: Primerjava pretokov na vodomerni postaji Jesenice na Gorenjskem in višine snežne odeje na postaji Kredarica v obdobju tajanja snežne odeje spomladi 1976.



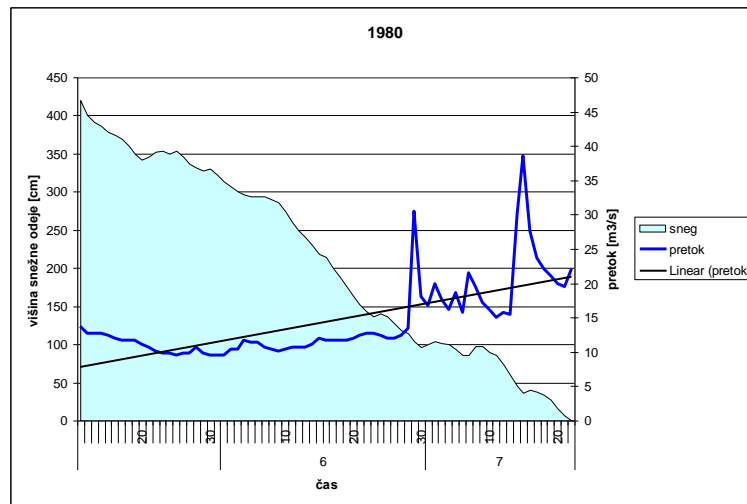
Slika 4: Primerjava pretokov na vodomerni postaji Jesenice na Gorenjskem in višine snežne odeje na postaji Kredarica v obdobju tajanja snežne odeje spomladi 1977.



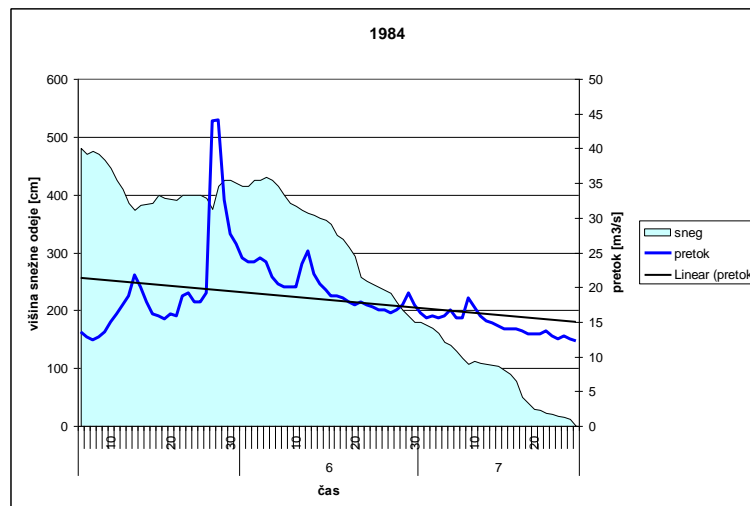
Slika 5: Primerjava pretokov na vodomerni postaji Jesenice na Gorenjskem in višine snežne odeje na postaji Kredarica v obdobju tajanja snežne odeje spomladi 1978.



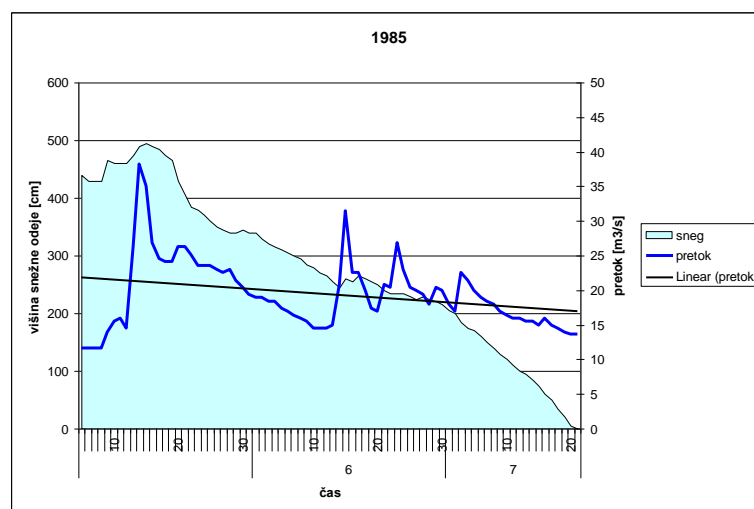
Slika 6: Primerjava pretokov na vodomerni postaji Jesenice na Gorenjskem in višine snežne odeje na postaji Kredarica v obdobju tajanja snežne odeje spomladi 1979.



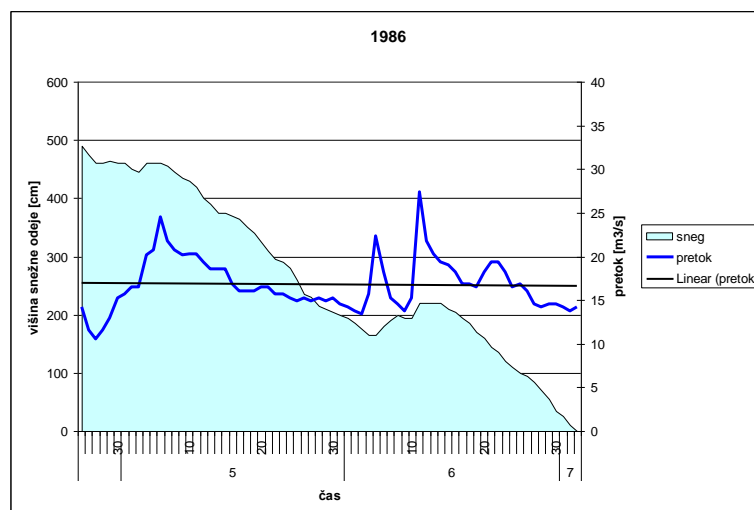
Slika 7: Primerjava pretokov na vodomerni postaji Jesenice na Gorenjskem in višine snežne odeje na postaji Kredarica v obdobju tavanja snežne odeje spomladi 1980.



Slika 8: Primerjava pretokov na vodomerni postaji Jesenice na Gorenjskem in višine snežne odeje na postaji Kredarica v obdobju tavanja snežne odeje spomladi 1984.

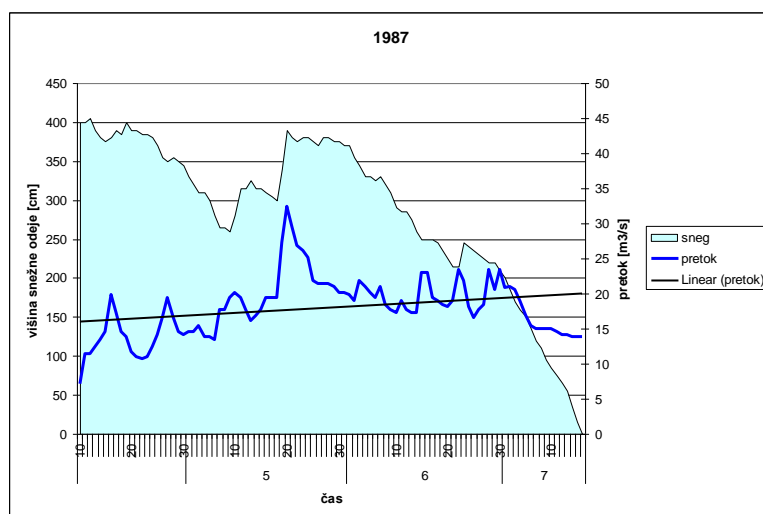


Slika 9: Primerjava pretokov na vodomerni postaji Jesenice na Gorenjskem in višine snežne odeje na postaji Kredarica v obdobju tajanja snežne odeje spomladi 1985.

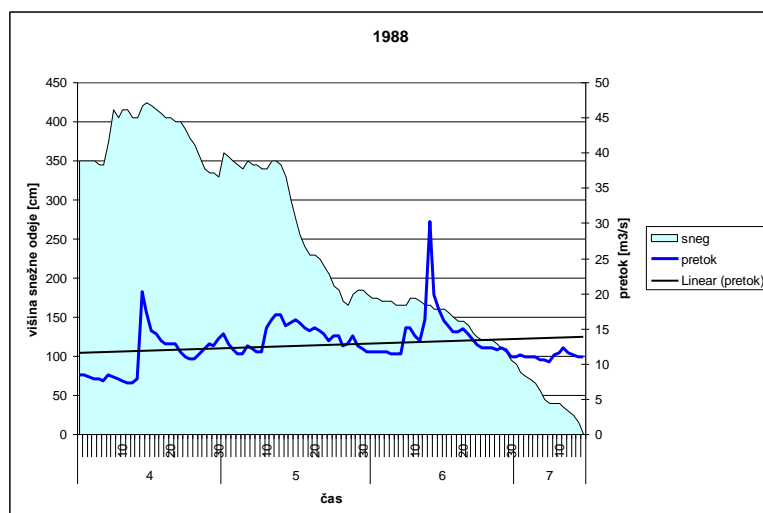


Slika 10: Primerjava pretokov na vodomerni postaji Jesenice na Gorenjskem in višine snežne odeje na postaji Kredarica v obdobju tajanja snežne odeje spomladi 1986.

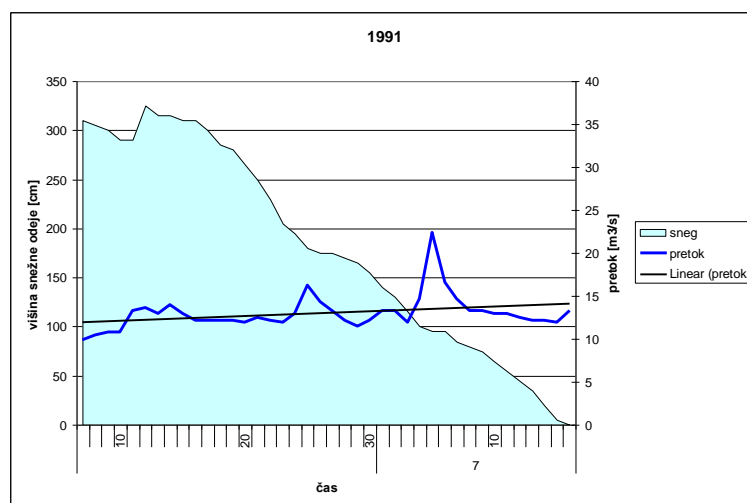




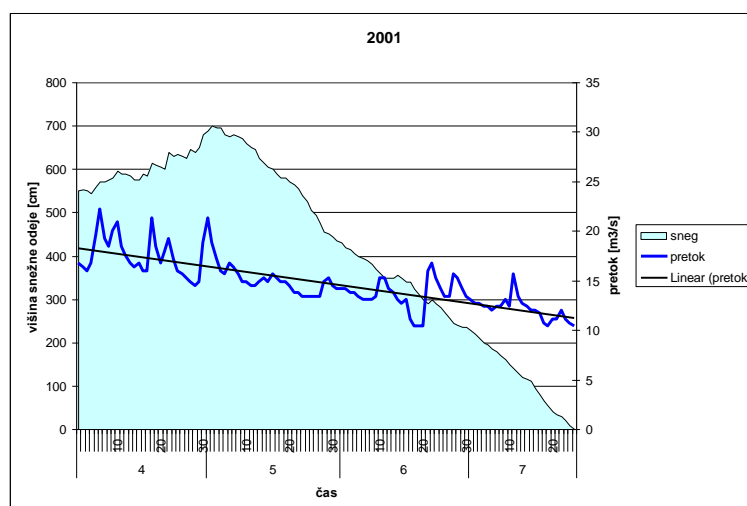
Slika 11: Primerjava pretokov na vodomerni postaji Jesenice na Gorenjskem in višine snežne odeje na postaji Kredarica v obdobju tajanja snežne odeje spomladi 1987.



Slika 12: Primerjava pretokov na vodomerni postaji Jesenice na Gorenjskem in višine snežne odeje na postaji Kredarica v obdobju tajanja snežne odeje spomladi 1988.



Slika 13: Primerjava pretokov na vodomerni postaji Jesenice na Gorenjskem in višine snežne odeje na postaji Kredarica v obdobju tajanja snežne odeje spomladi 1991.

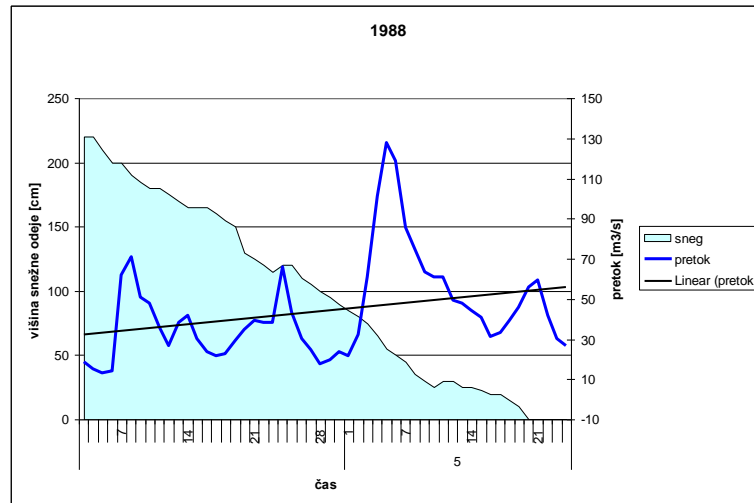


Slika 14: Primerjava pretokov na vodomerni postaji Jesenice na Gorenjskem in višine snežne odeje na postaji Kredarica v obdobju tajanja snežne odeje spomladi 2001.

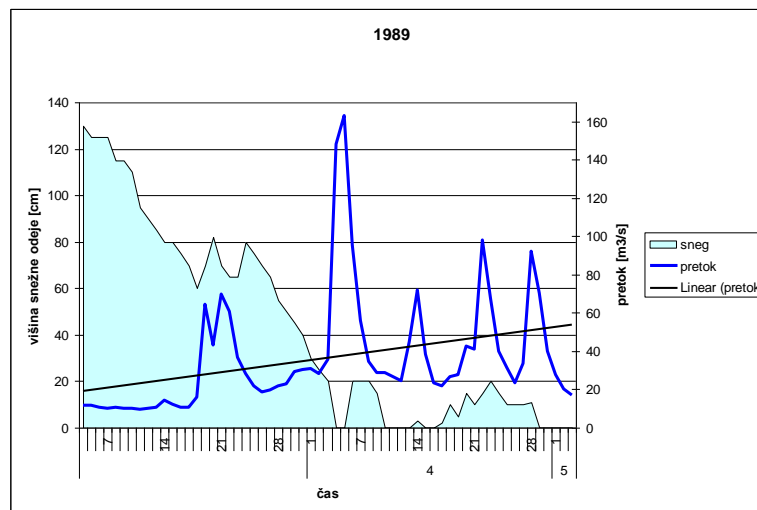


## PRILOGA C2

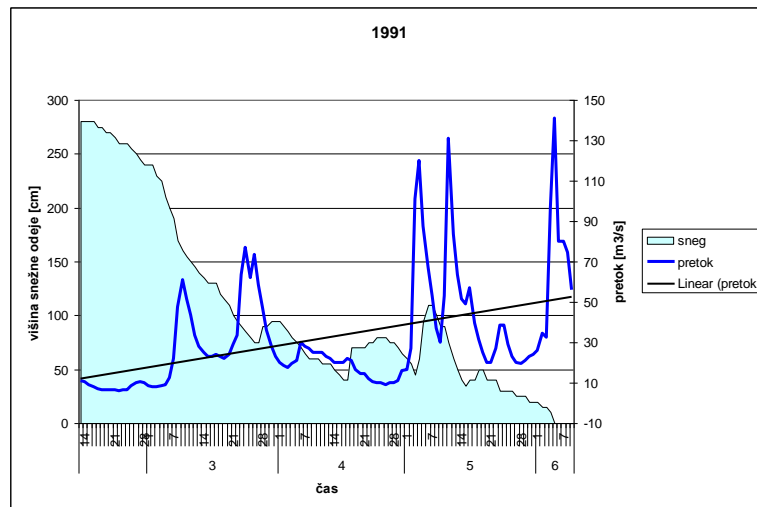
Grafična primerjava pretokov na vodomerni postaji Bodešče in višine snežne odeje na postaji Vogel v obdobju tavanja snežne odeje.



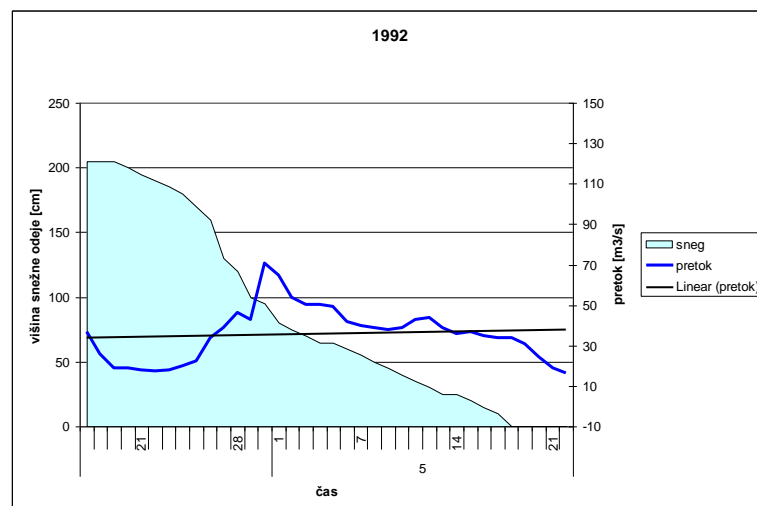
Slika 1: Primerjava pretokov na vodomerni postaji Bodešče in višine snežne odeje na postaji Vogel v obdobju tavanja snežne odeje spomladi 1988.



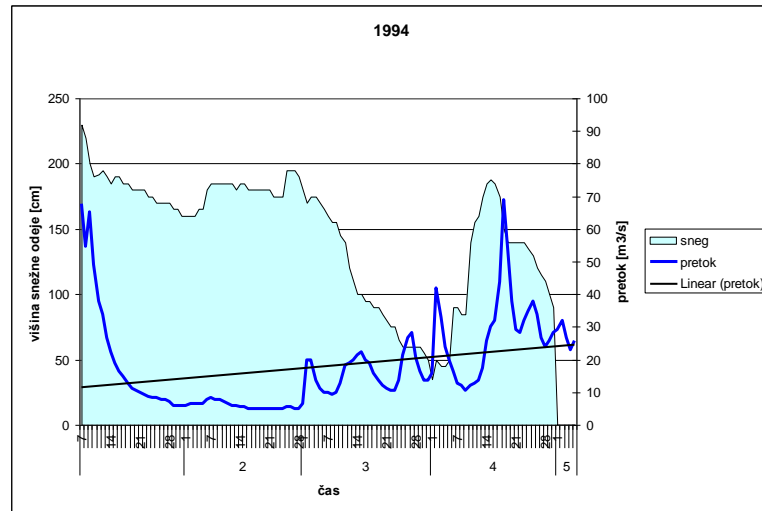
Slika 2: Primerjava pretokov na vodomerni postaji Bodešče in višine snežne odeje na postaji Vogel v obdobju tavanja snežne odeje spomladi 1989.



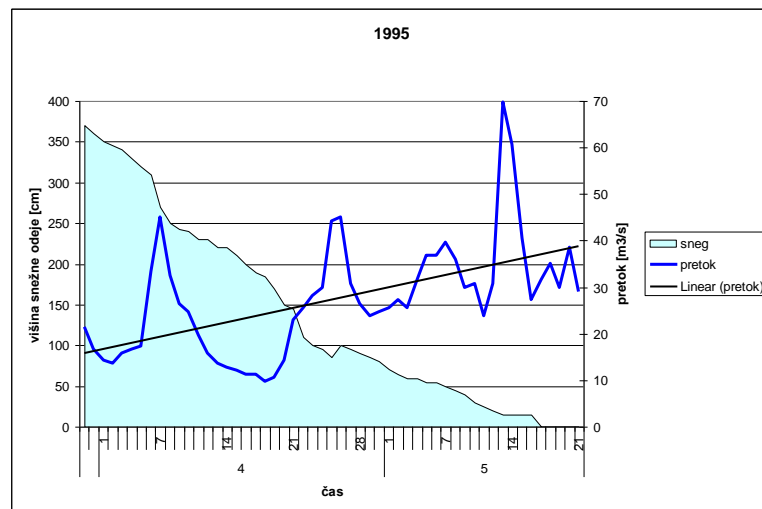
Slika 3: Primerjava pretokov na vodomerni postaji Bodešče in višine snežne odeje na postaji Vogel v obdobju tavanja snežne odeje spomladi 1991.



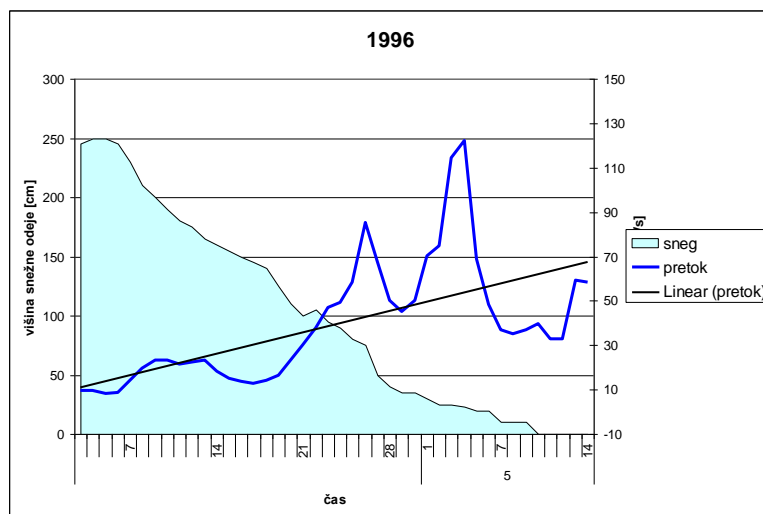
Slika 4: Primerjava pretokov na vodomerni postaji Bodešče in višine snežne odeje na postaji Vogel v obdobju tavanja snežne odeje spomladi 1992.



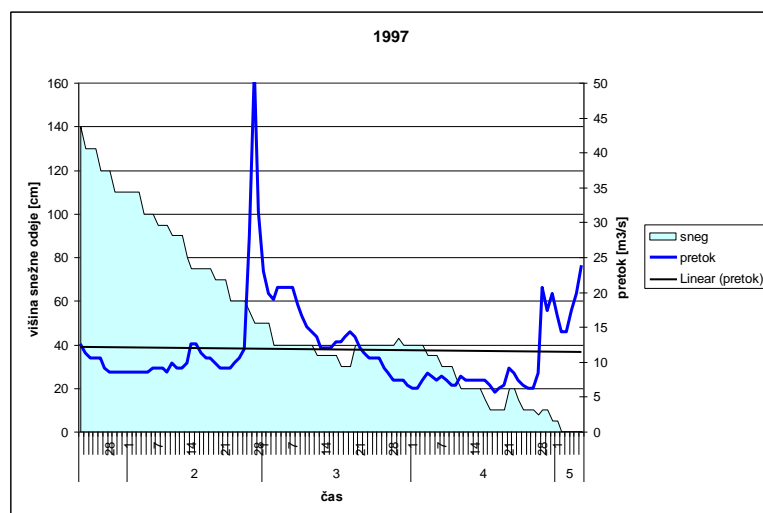
Slika 5: Primerjava pretokov na vodomerni postaji Bodešče in višine snežne odeje na postaji Vogel v obdobju tajanja snežne odeje spomladi 1994.



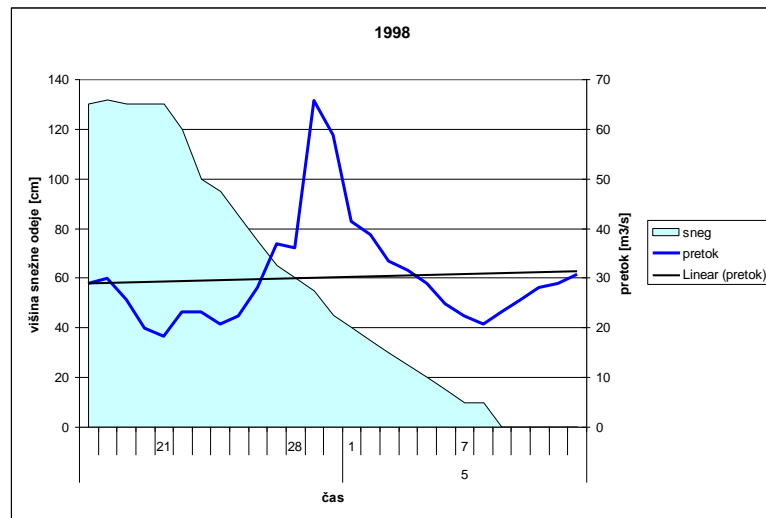
Slika 6: Primerjava pretokov na vodomerni postaji Bodešče in višine snežne odeje na postaji Vogel v obdobju tajanja snežne odeje spomladi 1995.



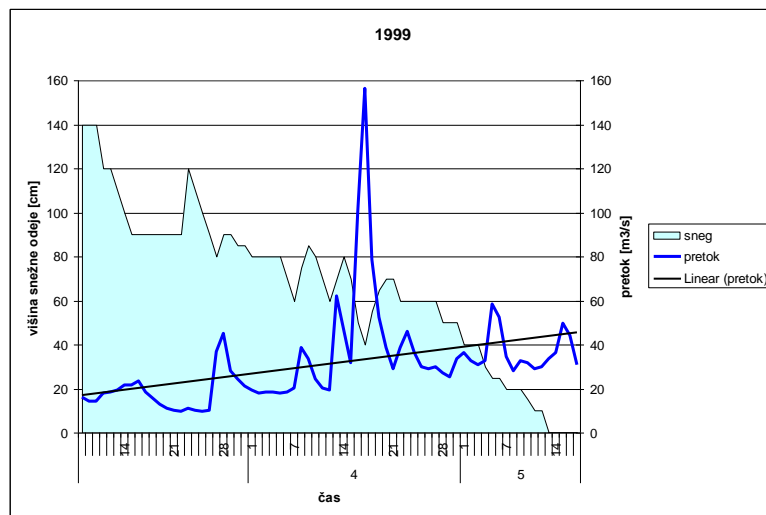
Slika 7: Primerjava pretokov na vodomerni postaji Bodešče in višine snežne odeje na postaji Vogel v obdobju tavanja snežne odeje spomladi 1996.



Slika 8: Primerjava pretokov na vodomerni postaji Bodešče in višine snežne odeje na postaji Vogel v obdobju tavanja snežne odeje spomladi 1997.

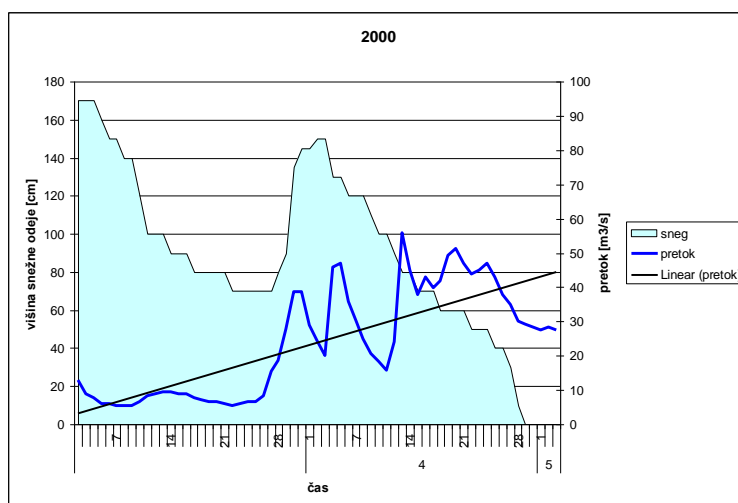


Slika 9: Primerjava pretokov na vodomerni postaji Bodešče in višine snežne odeje na postaji Vogel v obdobju tajanja snežne odeje spomladi 1998.

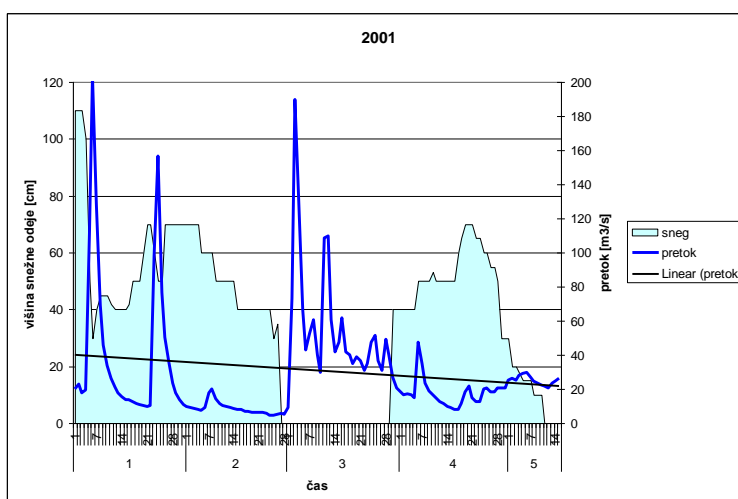


Slika 10: Primerjava pretokov na vodomerni postaji Bodešče in višine snežne odeje na postaji Vogel v obdobju tajanja snežne odeje spomladi 1999.





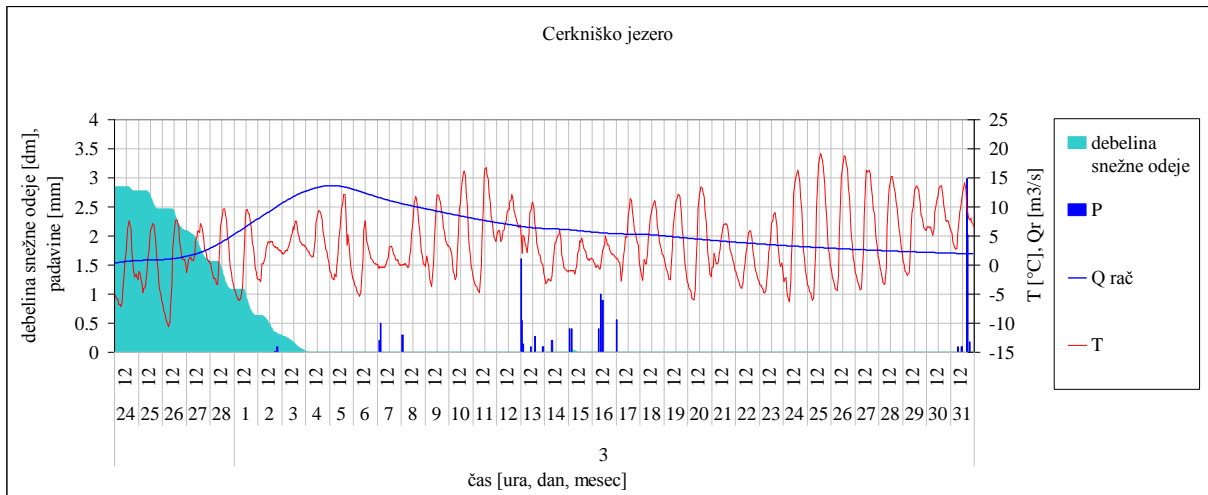
Slika 11: Primerjava pretokov na vodomerni postaji Bodešče in višine snežne odeje na postaji Vogel v obdobju tajanja snežne odeje spomladi 2000.



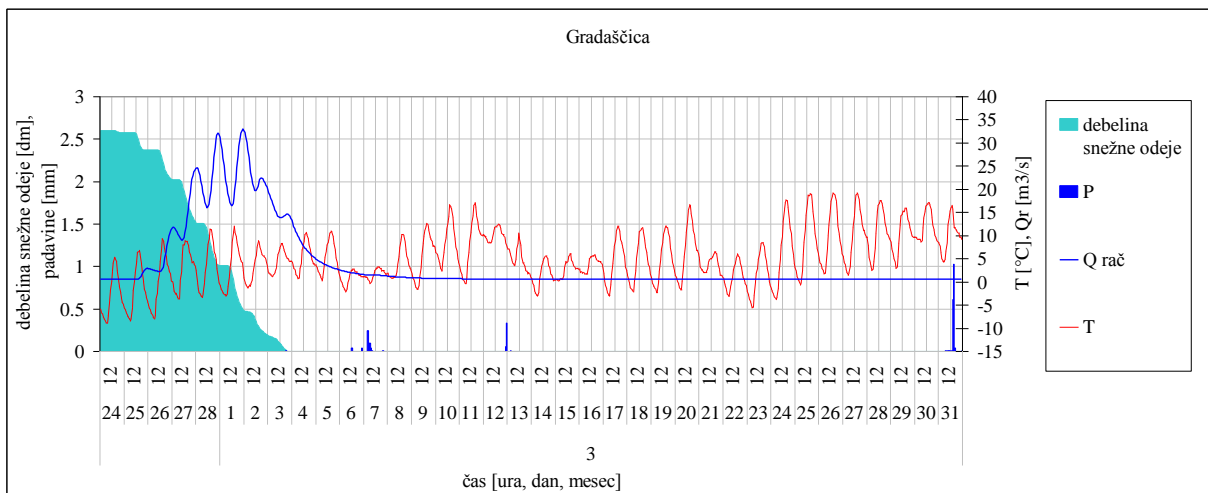
Slika 12: Primerjava pretokov na vodomerni postaji Bodešče in višine snežne odeje na postaji Vogel v obdobju tajanja snežne odeje spomladi 2001.

## PRILOGA D

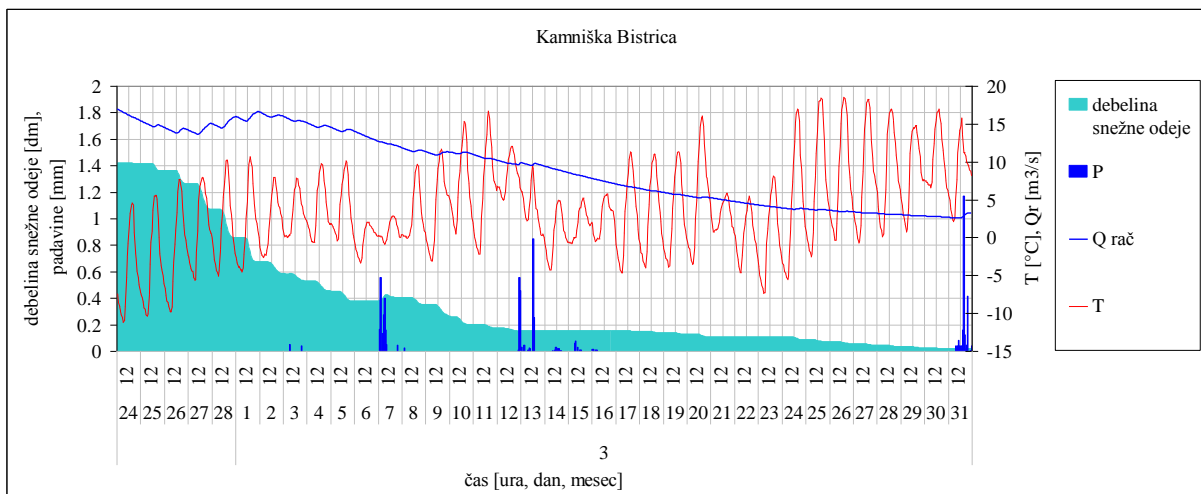
Rezultati modela: prisotnost snežne odeje na posameznih podpovodjih od 24. 2. do 31. 3. 2003.



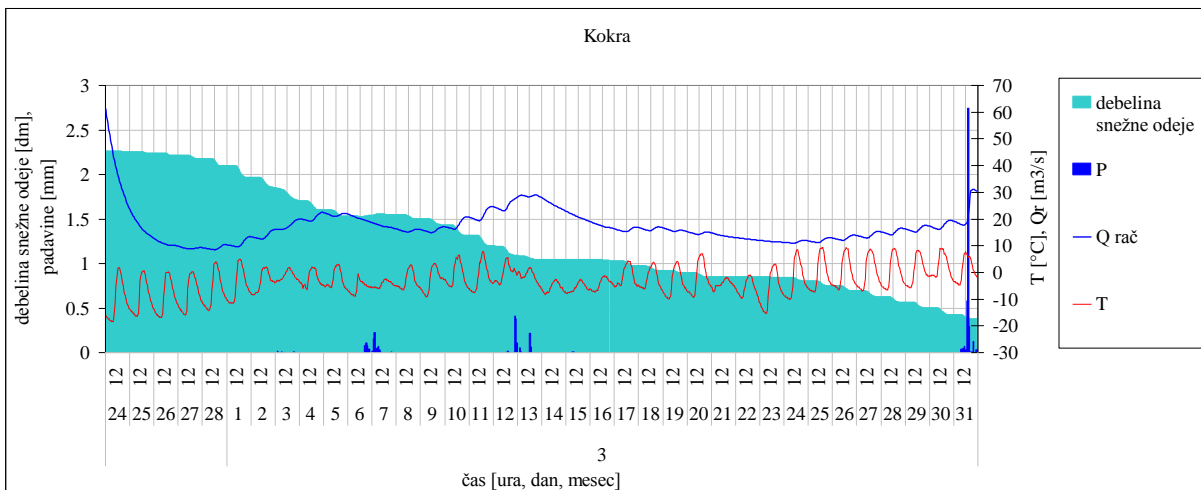
Slika 1: Prisotnost snežne odeje na podpovodju Cerknjško jezero.



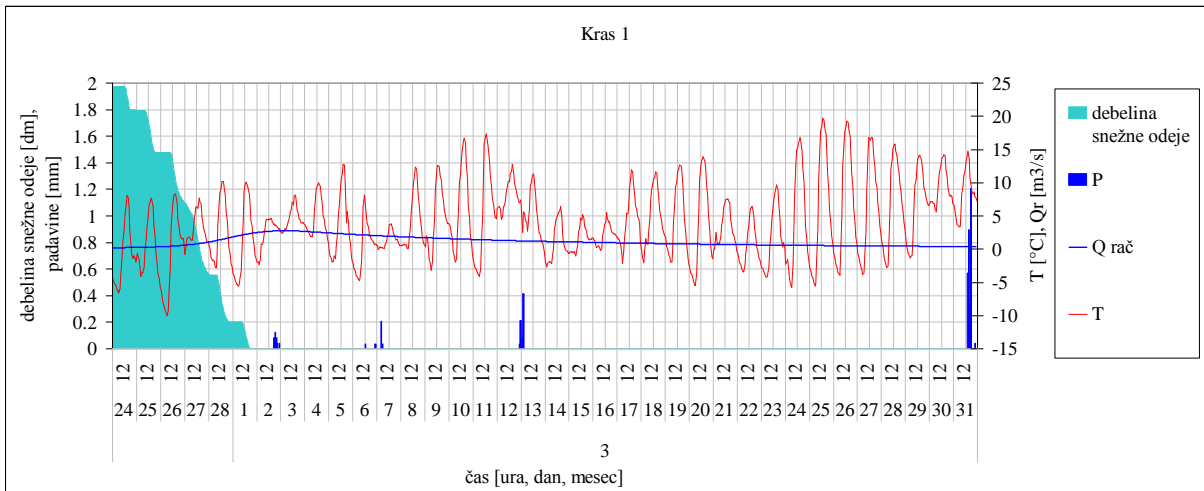
Slika 2: Prisotnost snežne odeje na podpovodju Gradaščica.



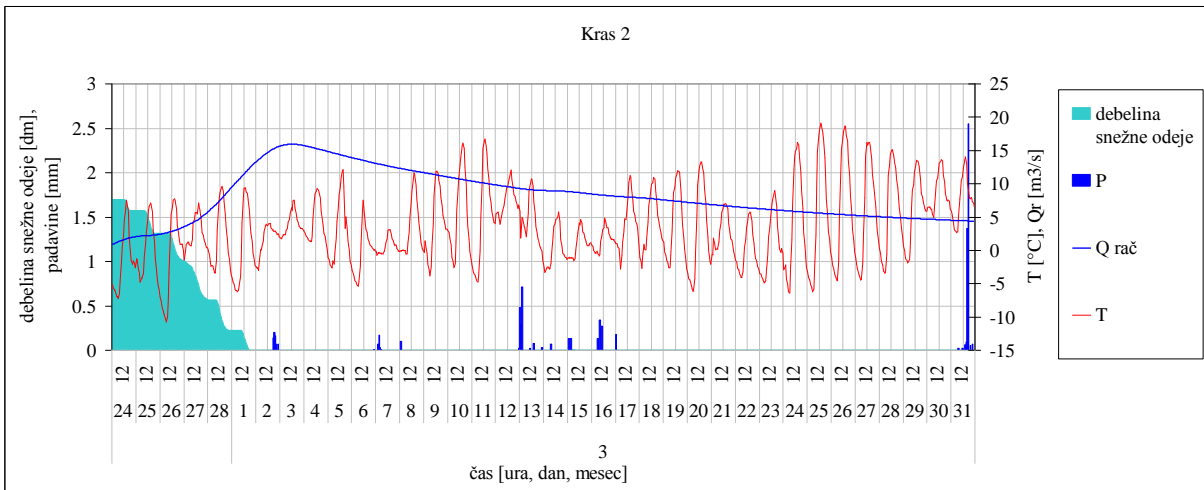
Slika 3: Prisotnost snežne odeje na podpovodju Kamniška Bistrica.



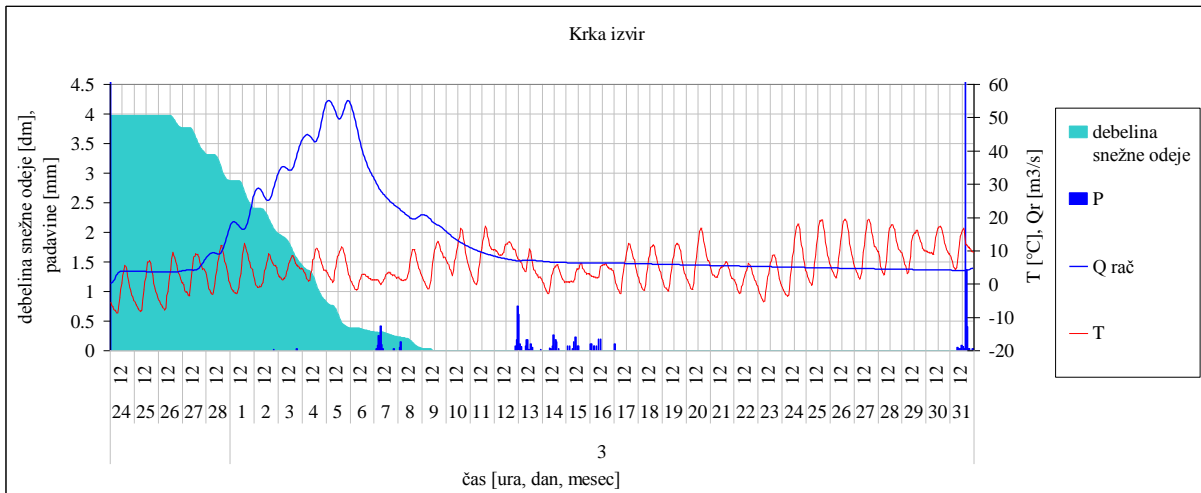
Slika 4: Prisotnost snežne odeje na podpovodju Kokra.



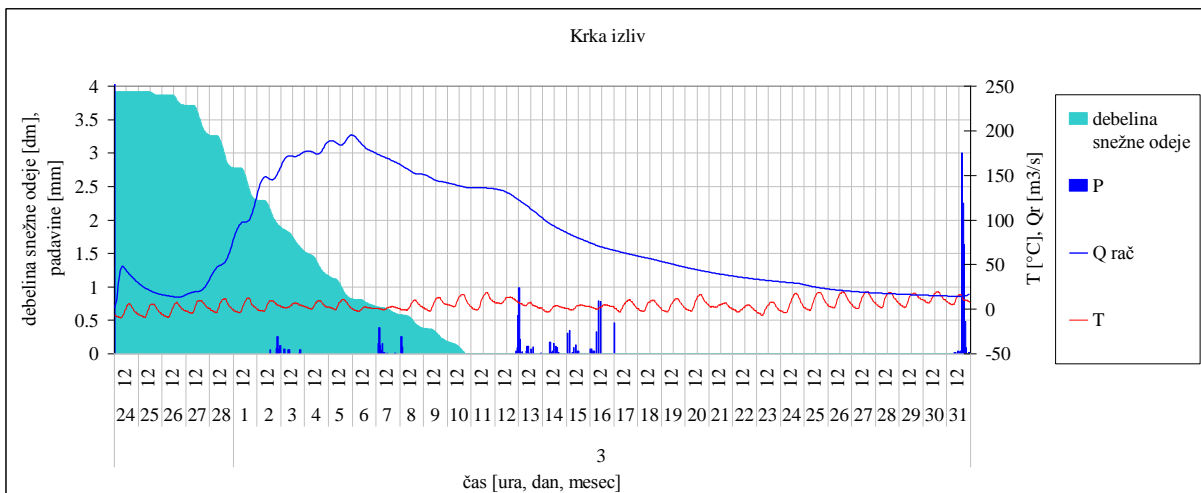
Slika 5: Prisotnost snežne odeje na podpodvodu Kras 1.



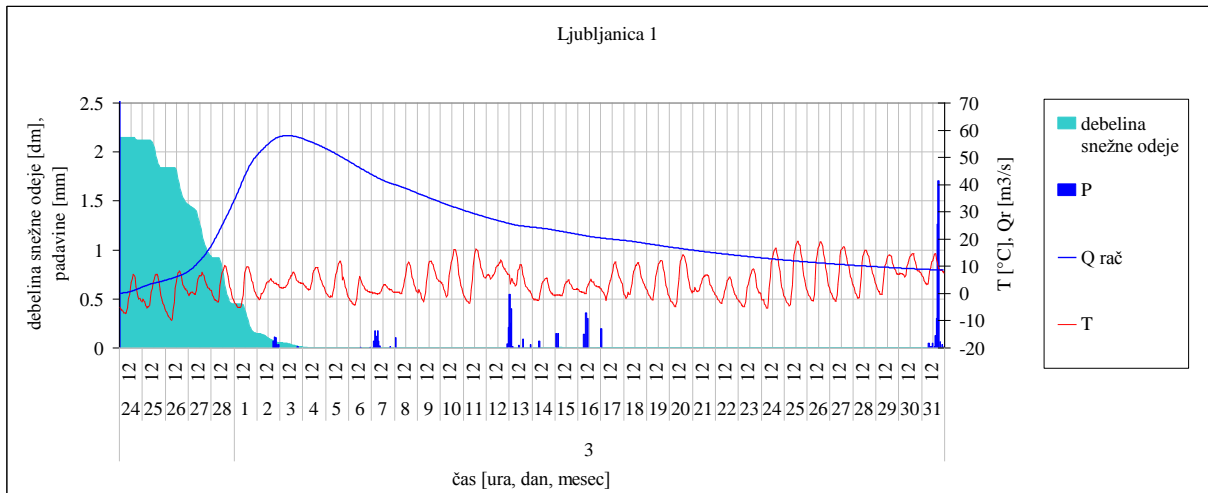
Slika 6: Prisotnost snežne odeje na podpodvodu Kras 2.



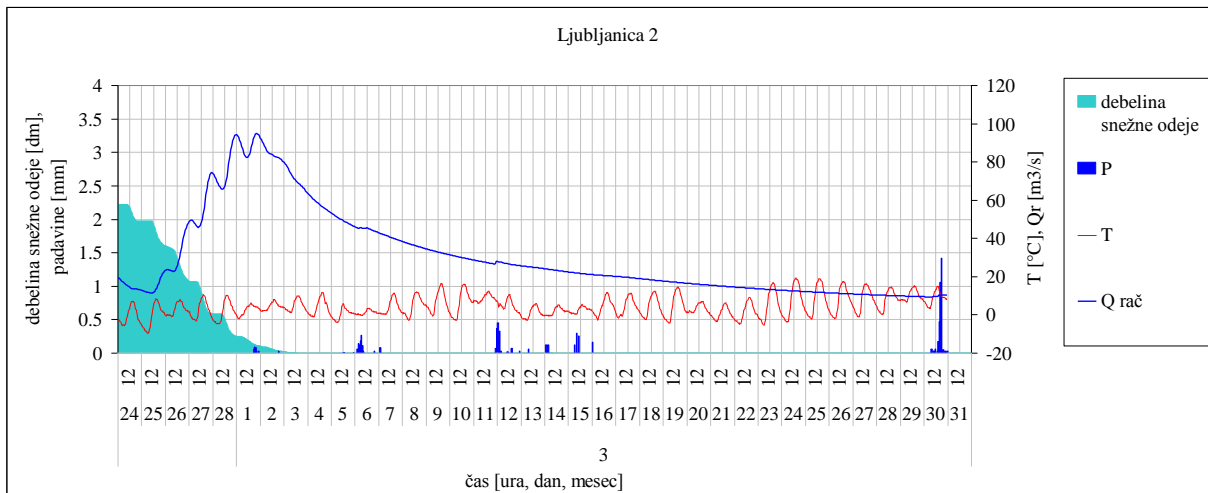
Slika 7: Prisotnost snežne odeje na podpovodju Krka izvir.



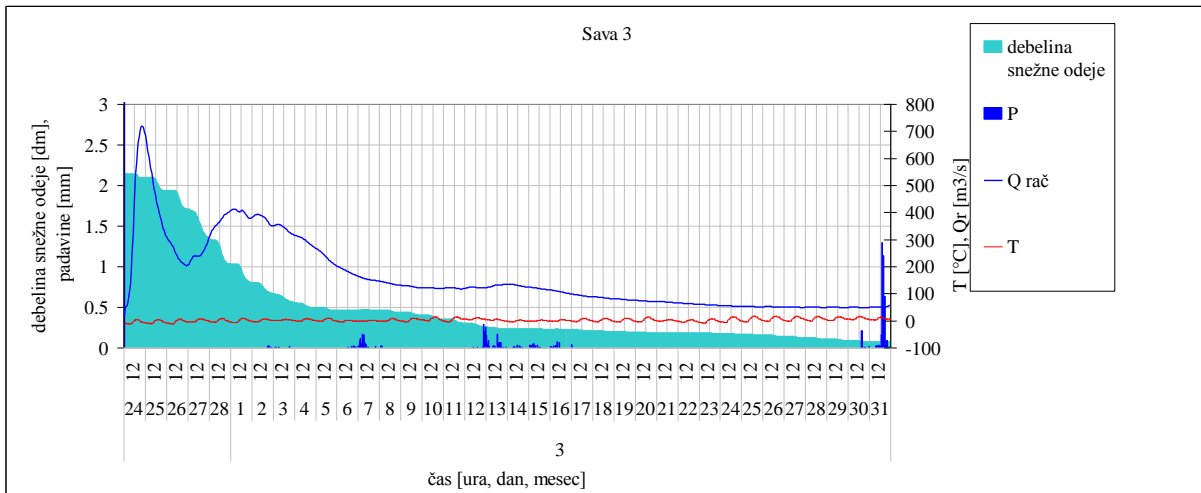
Slika 8: Prisotnost snežne odeje na podpovodju Krka izliv.



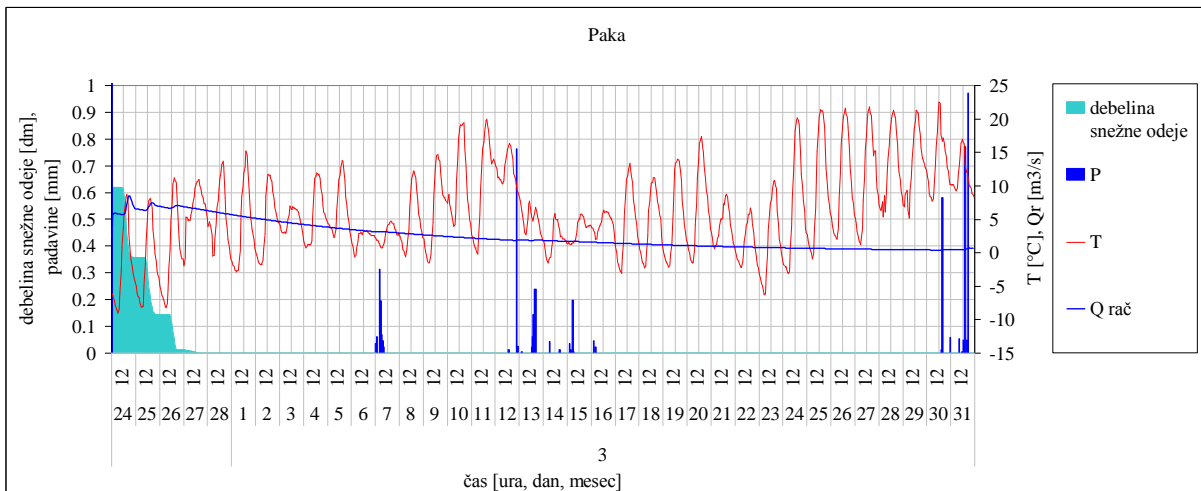
Slika 9: Prisotnost snežne odeje na podpovodju Ljubljana 1.



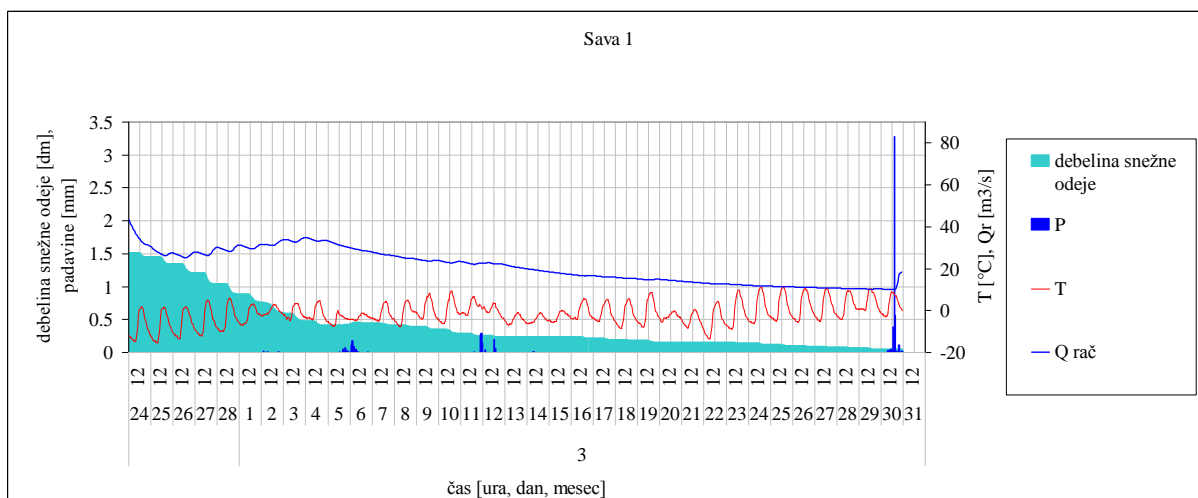
Slika 10: Prisotnost snežne odeje na podpovodju Ljubljana 2.



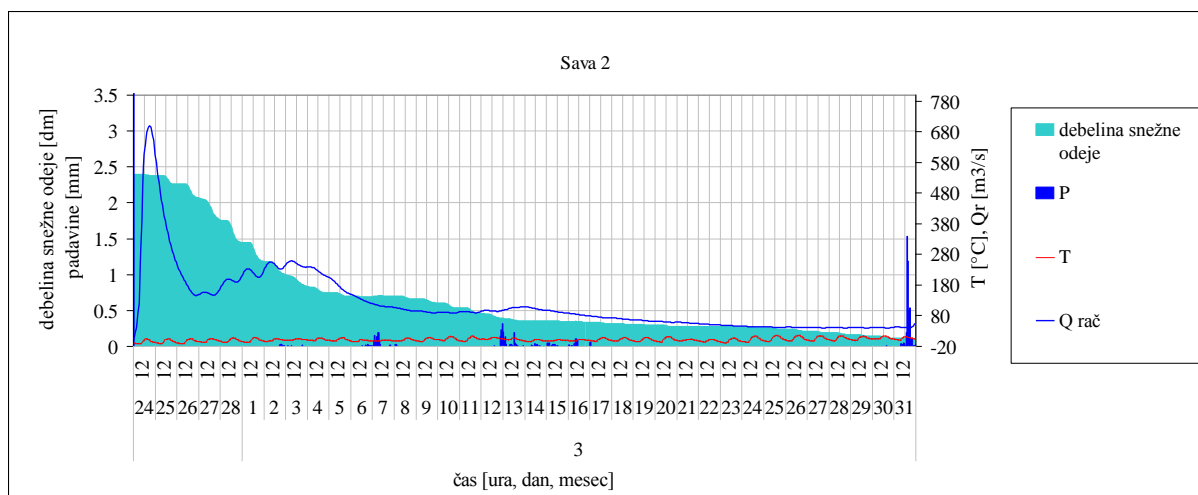
Slika 11: Prisotnost snežne odeje na podpovodju Sava 3.



Slika 12: Prisotnost snežne odeje na podpovodju Paka.

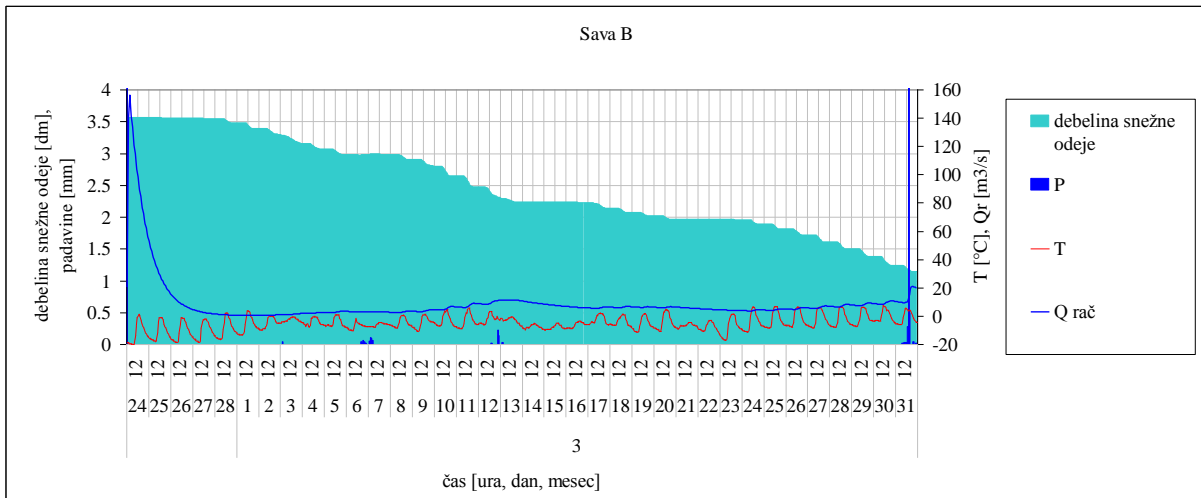


Slika 13: Prisotnost snežne odeje na podpododju Sava 1.

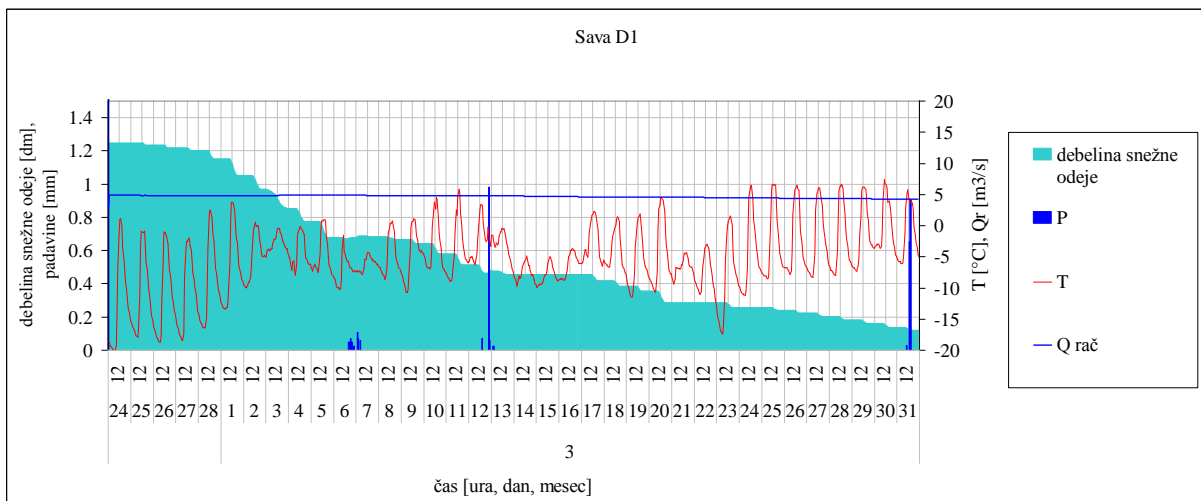


Slika 14: Prisotnost snežne odeje na podpododju Sava 2.

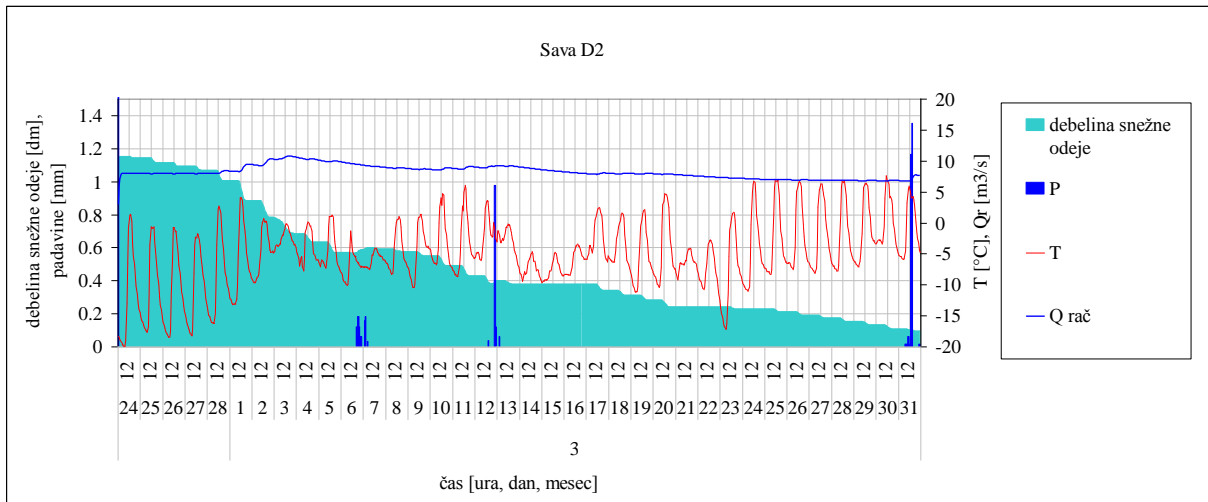




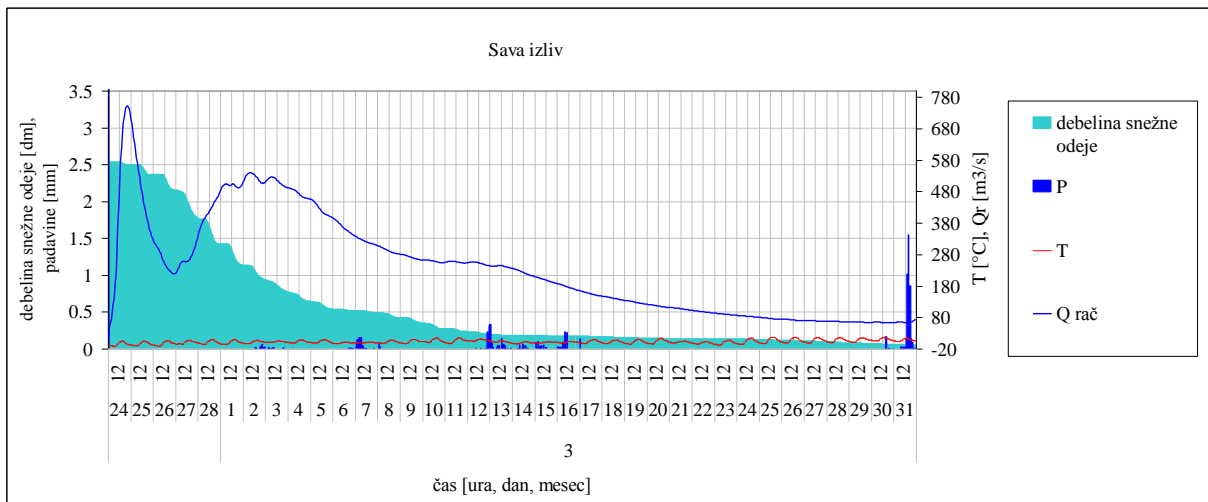
Slika 15: Prisotnost snežne odeje na podpovodju Sava B.



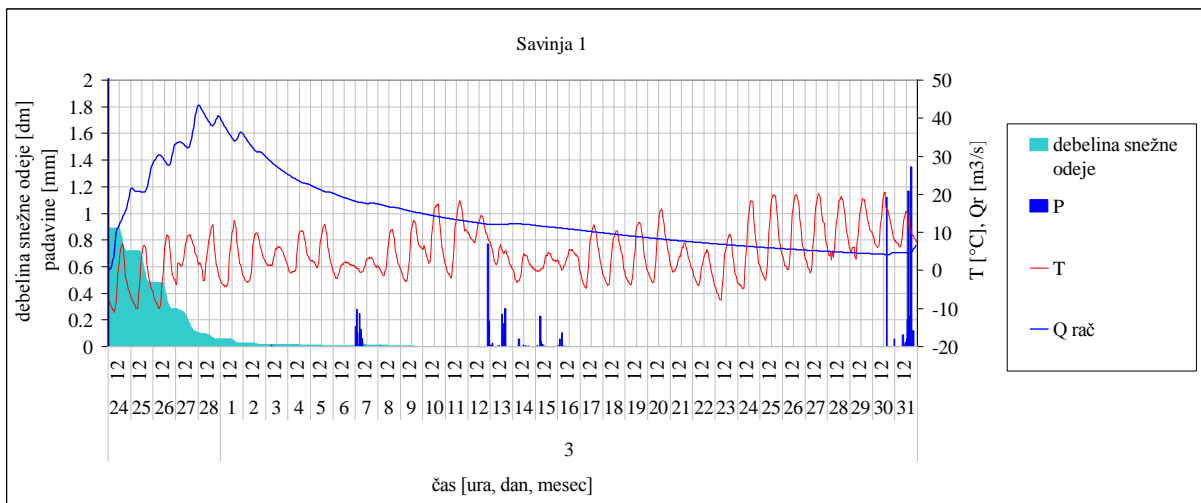
Slika 16: Prisotnost snežne odeje na podpovodju Sava D1.



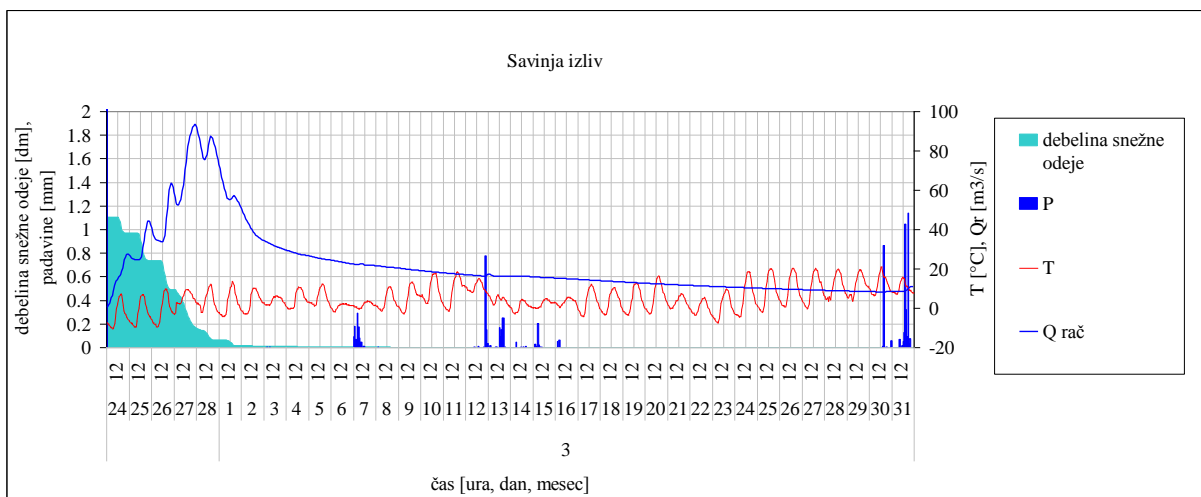
Slika 17: Prisotnost snežne odeje na podpovodju Sava D2.



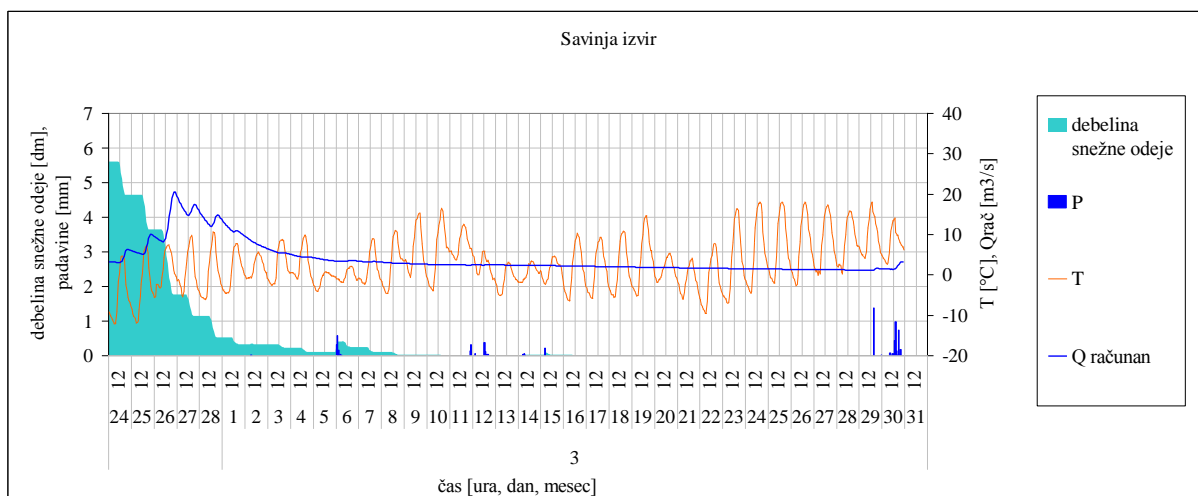
Slika 18: Prisotnost snežne odeje na podpovodju Sava izliv.



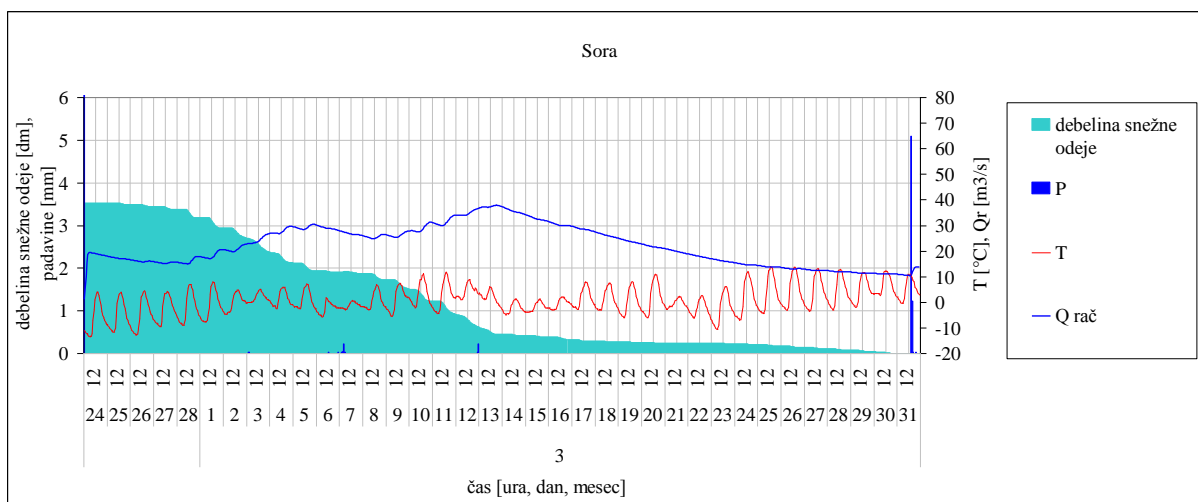
Slika 19: Prisotnost snežne odeje na podpovodju Savinja 1.



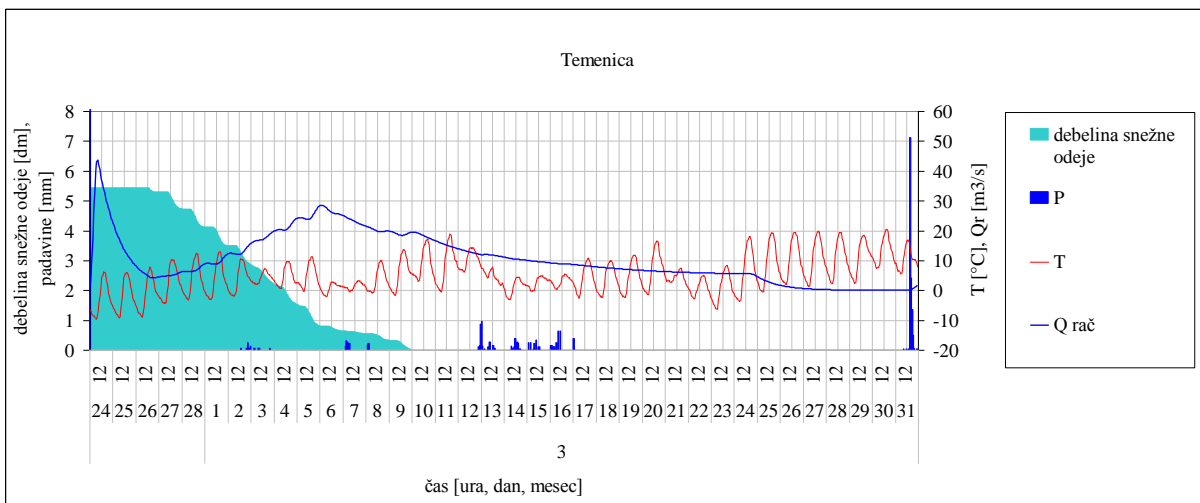
Slika 20: Prisotnost snežne odeje na podpovodju Savinja izliv.



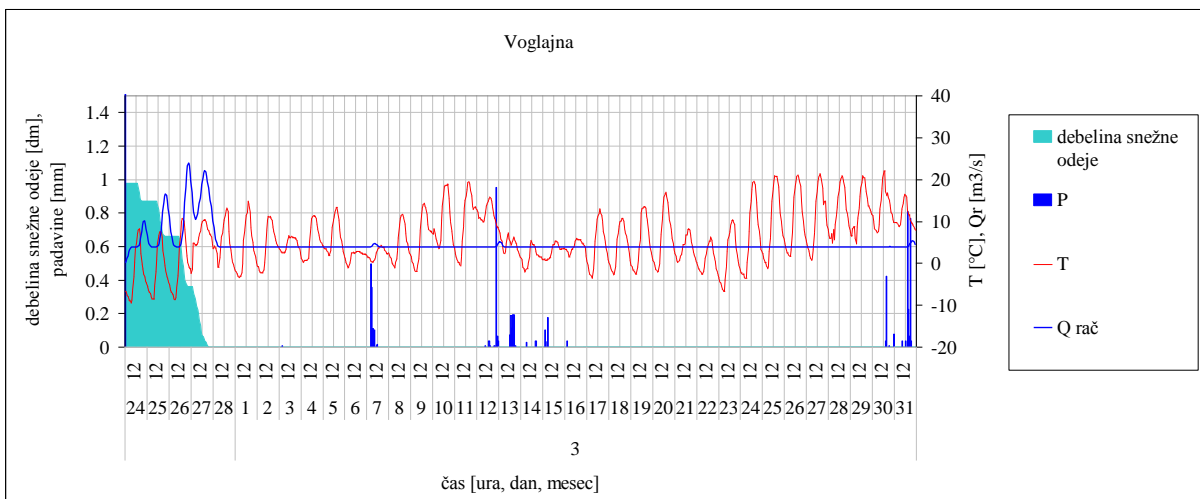
Slika 21: Prisotnost snežne odeje na podpovodju Savinja izvir.



Slika 22: Prisotnost snežne odeje na podpovodju Sora.



Slika 23: Prisotnost snežne odeje na podpododju Temenica.



Slika 24: Prisotnost snežne odeje na podpododju Voglajna.