

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
za gradbeništvo
in geodezijo



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

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

V zbirki je izvirna različica doktorske disertacije.

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

University
of Ljubljana
Faculty of
*Civil and Geodetic
Engineering*



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

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

This is an original PDF file of doctoral thesis.

When citing, please refer as follows:

Torkar, A. 2016. Analiza iztoka podzemne vode na izvirih v fluvioglacialnih medzrnskih vodonosnikih. = Analysis of groundwater outflow through springs in fluvioglacial intergranular aquifers. Doctoral dissertation. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (Mentor Brenčič, M.)

<http://drugg.fgg.uni-lj.si/6157/>

Datum arhiviranja / Archiving Date: 16-12-2016

Univerza
v Ljubljani

*Naravoslovnotehniška
fakulteta*



DOKTORSKI ŠTUDIJSKI
PROGRAM III. STOPNJE
GRAJENO OKOLJE

Kandidatka:

ANJA TORKAR

**ANALIZA IZTOKA PODZEMNE VODE NA IZVIRIH V
FLUVIOGLACIALNIH MEDZRNSKIH
VODONOSNIKIH**

Doktorska disertacija številka: 45/GO

**ANALYSIS OF GROUNDWATER OUTFLOW
THROUGH SPRINGS IN FLUVIOGLACIAL
INTERGRANULAR AQUIFERS**

Doctoral thesis No.: 45/GO

Komisija za doktorski študij je na 29. seji, dne 13. junija 2012, po pooblastilu s 30. seje Senata Univerze v Ljubljani, z dne 20. januarja 2009, dala soglasje k temi doktorske disertacije.

Za mentorja je bil imenovan izr. prof. dr. Mihael Brenčič, UL NTF.

Ljubljana, 8. december 2016

Univerza
v Ljubljani

*Naravoslovnotehniška
fakulteta*



Komisijo za oceno ustreznosti teme doktorske disertacije v sestavi:

- izr. prof. dr. Mihael Brenčič, UL NTF,
- doc. dr. Barbara Čenčur Curk, UL NTF,
- doc. dr. Timotej Verbovšek, UL NTF,
- doc. dr. Metka Petrič, Univerza na Primorskem, Fakulteta za humanistične študije,

je imenoval Senat Naravoslovnotehniške fakultete na 28. redni seji, 22. marca 2012.

Poročevalce za oceno doktorske disertacije v sestavi:

- doc. dr. Barbara Čenčur Curk, UL NTF,
- izr. prof. dr. Timotej Verbovšek, UL NTF,
- izr. prof. dr. Metka Petrič, Univerza v Novi Gorici, Fakulteta za znanosti o okolju

je imenoval Senat Naravoslovnotehniške fakultete na 32. redni seji, 20. oktobra 2016.

Komisijo za zagovor doktorske disertacije v sestavi:

- prof. dr. Petra Eva Forte Tavčar, dekanja, predsednica,
- izr. prof. dr. Mihael Brenčič, UL NTF, mentor,
- doc. dr. Barbara Čenčur Curk, UL NTF,
- izr. prof. dr. Timotej Verbovšek, UL NTF,
- izr. prof. dr. Metka Petrič, Univerza v Novi Gorici, Fakulteta za znanosti o okolju,

je imenoval Senat Naravoslovnotehniške fakultete na 33. redni seji, 24. novembra 2016.

IZJAVE

Spodaj podpisana študentka **ANJA TORKAR**, vpisna številka **26700067**, avtorica pisnega zaključnega dela študija z naslovom »**Analiza iztoka podzemne vode na izvirih v fluvio-glacialnih medzrnskih vodonosnikih**«.

IZJAVLJAM

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

a) da je pisno zaključno delo študija rezultat mojega samostojnega dela;

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

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

3. da sem pridobila vsa potrebna dovoljenja za uporabo podatkov in avtorskih del v pisnem zaključnem delu študija in jih v pisnem zaključnem delu študija jasno označila;

4. da sem pri pripravi pisnega zaključnega dela študija ravnala v skladu z etičnimi načeli in, kjer je to potrebno, za raziskavo pridobila soglasje etične komisije;

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

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

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

V Ljubljani

Datum: 28.11.2016

Podpis študentke: _____

Ta stran je namenoma prazna.

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK: 55:502/504:(043)

Avtor: Anja Torkar, uni. dipl. inž. geol.

Mentor: izr. prof. dr. Mihael Brenčič

Naslov: Analiza iztoka podzemne vode na izvirih v fluvioglacialnih medzrnskih vodonosnikih

Tip dokumenta: Doktorska disertacija

Obseg in oprema: 135 str., 43 sl., 37 pregl., 49 graf., 3 pril.

Ključne besede: medzrnski vodonosnik, kraški vodonosnik, podzemna voda, stabilni izotopi, geokemija, zadrževalni čas, srednja napajalna višina, izotopska razdelitev hidrograma, snežnica, reka Radovna

Izveček:

Izviri predstavljajo pomembno točko ali območje na površju, kjer se podzemna voda izliva iz vodonosnika in tvori vidni tok. Dinamika izvira nam poda veliko informacij o vodonosniku ter o samem napajalnem zaledju, zato je poznavanje in razumevanje dinamike izvira velikega hidrogeološkega pomena. V doktorski disertaciji je bila za študijski poligon izbrana dolina reke Radovne, ki se nahaja v severozahodni Sloveniji. Reka Radovna je dolga 19,4 km in skoraj v celoti teče po območju Triglavskega narodnega parka. Reka predstavlja izredno zanimiv in edinstven raziskovalni poligon, saj na ožjem ter širšem napajalnem območju zaradi različne geološke sestave prihaja do interakcije kraškega in medzrnskega vodonosnika in na podlagi tega je bil zasnovan konceptualni hidrogeološki model. Določeni sta bili globina medzrnskega vodonosnika ter oblika predkvartarne podlage. Ugotovljeno je bilo, da nivo podzemne vode zelo niha. Voda, ki priteče iz kraškega in medzrnskega vodonosnika, ima različno geokemijsko sestavo, kar se dolvodno odraža v reki. Poleg tega so bili analizirani stabilni izotopi v podzemni vodi, v reki, v padavinah ter v snežnici. Določeni sta bili srednja napajalna višina ter velikost napajalnega območja reke Radovne. Izračunani so bili tudi srednji zadrževalni časi. Z izotopsko separacijo hidrograma so bili izračunani deleži snežnice s pomočjo dvokomponentnega modela. Deleži snežnice v odtoku predstavljajo vsaj eno tretjino in se dolvodno znižujejo, kar pomeni, da se voda drenira iz nižjega dela vodonosnika, ki vsebuje manj snežnice. Velik vpliv na delež snežnice v reki imajo tudi dotoki vode iz boka doline.

Ta stran je namenoma prazna.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 55:502/504:(043)

Author: Anja Torkar, B.Sc.

Supervisor: assoc. prof. Mihael Brenčič, Ph.D.

Title: Analysis of groundwater outflow through springs in fluvioglacial intergranular aquifers

Document type: Doctoral dissertation

Notes: 135 p., 43 fig., 37 tab., 49 graph., 3 ann.

Key words: porous aquifer, karst aquifer, groundwater, stabile isotopes, geochemistry, residence time, mean recharge altitude, isotope hydrograph separation, snowmelt, Radovna River

Abstract:

Springs represent an important point or area on the surface, where groundwater flows from the aquifer and creates a visible surface flow. The dynamics of the spring gives us a lot of information about the aquifer and its recharge area, therefore the knowledge and understanding of spring dynamics is of great hydrogeological importance. In this doctoral thesis the Radovna River Valley, located in the north-western Slovenia is selected as a study polygon. The Radovna River is 19.4 km long and almost entirely flows in the area of the Triglav National Park. The Radovna River represents a very interesting and unique research polygon. The reason for this is a different geological structure, in the vicinity and wider recharge area that creates an interaction between karst and porous aquifer. A conceptual hydrogeological model was designed based on this. The depth of the porous aquifer and the shape of pre-Quaternary base were determined. It was found that the groundwater level fluctuates greatly. The water that discharges out of the karst and porous aquifer has different geochemical composition, which is reflected in the river downstream. In addition, stable isotopes in groundwater, in the river, in the precipitation and in the snowmelt were analysed. Mean recharge altitude and the size of the recharge area of the Radovna River were determined. The mean residence times were also calculated. With the isotopic hydrograph separation snowmelt percentages were determined using the two-component model. The percentages of the snowmelt in the discharges represent at least one-third of the total and are decreasing downstream, which means that the water is drained from the lower part of the aquifer, which contains less snowmelt. A great impact on the percentage of snowmelt in the river itself is influenced by the tributaries from both sides of the valley.

Ta stran je namenoma prazna.

ZAHVALA

Zahvaljujem se Javni agenciji za raziskovanje Republike Slovenije za financiranje mojega doktorskega študija preko programa Mladi raziskovalci (pogodba št. 1000-10-310073) ter Oddelku za geologijo na Naravoslovnotehnični fakulteti, ki mi je omogočil mesto mlade raziskovalke.

Zahvala gre tudi nacionalnim programom, v okviru katerih so bile izvedene raziskave: Geokemijski in strukturni procesi na Naravoslovnotehniški fakulteti (P1-0195), Podzemne vode in geokemija na Geološkem zavodu Slovenije (P1-0020) in Kroženje snovi v okolju, snovna bilanca in modeliranje okoljskih procesov ter ocena tveganja na Institutu "Jožef Stefan" (P1-0143). Del rezultatov je bil pridobljen tudi v okviru ARSO projekta "Alp-Water-Scarce - Water Management Strategies against Water Scarcity in the Alps" in IAEA projekta "Use of environmental isotopes in investigations of influence of snow melt on stream runoff in the area of Julian Alps, NW Slovenia", ki je del IAEA CRP projekta "Use of Environmental Isotopes in Assessing Water Resources in Snow, Glacier, and Permafrost Dominated Areas under Changing Climatic Conditions".

Zahvaljujem se mentorju izr. prof. dr. Mihaelu Brenčiču za vodenje in usmerjanje ter za vse nasvete in odgovore tekom doktorskega študija. Hvala ti, da si mi dal možnost, da sem v obdobju mlade raziskovalke lahko izpopolnjevala svoje znanje tudi s sodelovanjem in delom na različnih hidrogeoloških projektih.

Zahvalila bi se vsem članom komisije, doc. dr. Barbari Čenčur Curk, izr. prof. dr. Metki Petrič ter izr. prof. dr. Timoteju Verbovšku za natančen pregled doktorske disertacije ter za vse konstruktivne pripombe in popravke, ki so pripomogle k izboljšanju dela.

Zahvaljujem se dr. Poloni Vreča z Instituta "Jožef Stefan" za sodelovanje in za pomoč tekom celotnega obdobja doktorskega študija, za temeljit pregled doktorske disertacije ter za vse diskusije o stabilnih izotopih.

Zahvaljujem se Tinetu Štularju, naravovarstvenemu nadzorniku Triglavskega narodnega parka za nesebično in prostovoljno pomoč pri vzorčenju vode. Brez vaše pomoči bi bilo število vzorcev občutno manjše.

Zahvaljujem se vsem sodelavcem na Oddelku za geologijo, predvsem pa tehničnemu sodelavcu Marijanu Grmu. Hvala ti za nepogrešljivo pomoč tako v laboratoriju, kot na terenu in tudi pri pakiranju vzorcev ter da si pri vsem tem vedno poskrbel za dobro voljo.

Se nadaljuje...

Ta stran je namenoma prazna.

Prav tako gre velika zahvala Jožetu Heriču, ki je pomagal pri postavitvi merskih inštrumentov in pri vkupu vzorčevalnikov ter Zmagu Boletu z Geološkega zavoda Slovenije za pomoč pri merjenju pretokov.

Zahvaljujem se dr. Marjani Zajc za pomoč pri georadarskih meritvah in interpretaciji ter dr. Juretu Atanackovu za pomoč pri meritvah in interpretaciji refleksijske seizmike. Vajina prispevka sta dodala doktorski disertaciji dodatno širino.

Hvala tudi vsem študentom, ki ste mi pomagali na terenu, Juretu Hictalerju in Roku Rudolfu, pri postavitvi vzorčevalnikov ter Roku Brajkoviču in Primožu Oprčkalu pri meritvah pretokov.

Zahvala gre še Elizabeti Adamlje, Majdi Štrakl in Barbari Bohar Bobnar za hitro in učinkovito izpeljavo študijskih postopkov ter doc. dr. Cvetki Teji Koler Povh za hiter tehnični pregled doktorske disertacije.

Hvala Saški in Marku McGrath za pregled angleškega dela besedila.

Iskrena hvala vsem prijateljem, sploh mojim geologinjam, ker ste si vzele čas za kavo ali pogovor, ko sem to potrebovala, tudi če je bilo to storjeno samo po telefonu.

Ne nazadnje gre velika zahvala moji družini, mami Mojci in očiju Mitju, ki sta me vedno podpirala in mi stala ob strani. Hvala vama za vse dni, ko sta čuvala Timoteja, da sem lahko v miru pisala doktorat, ker sem vedela, da je v najboljših rokah. Nazadnje pa hvala tebi, Andrej. Hvala za vso podporo, ljubezen in razumevanje, tudi ko sem bila po cele dneve odsotna, zamišljena in občasno tudi malo tečna. ☺ Hvala, ker si v tem času tako lepo skrbel za najinega Timoteja, da največkrat niti ni opazil, da me ni.

Ta stran je namenoma prazna.

STRAN ZA POPRAVKE-ERRATA

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

Ta stran je namenoma prazna.

KAZALO VSEBINE

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK	VII
BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT	IX
ZAHVALA.....	XI
STRAN ZA POPRAVKE-ERRATA	XV
KAZALO VSEBINE.....	XVII
KAZALO PREGLEDNIC.....	XX
KAZALO GRAFIKONOV.....	XXII
KAZALO SLIK.....	XXIV
LIST OF TABLES	XXVI
LIST OF CHARTS	XXVIII
LIST OF FIGURES	XXX
SEZNAM PRILOG.....	XXXII
SEZNAM UPORABLJENIH OKRAJŠAV	XXXIII
1 UVOD.....	1
2 OPIS RAZISKOVALNEGA OBMOČJA.....	5
2.1 Geografski položaj	5
2.2 Pregled geoloških razmer	6
2.3 Morfologija območja izvira.....	7
2.4 Hidrogeologija.....	9
2.5 Klima.....	10
2.5.1 Padavinska postaja Zgornja Radovna.....	11
2.5.2 Vremenske razmere v raziskovalnem obdobju	13
3 TEORETIČNA IZHODIŠČA	15
3.1 Konceptualni hidrogeološki model	15
3.2 Geofizikalne metode	16
3.2.1 Georadar	16
3.2.2 Refleksijska seizmika	17
3.2.2.1 Plitva, visokoločljiva refleksijska seizmika.....	17
3.3 Meritve pretokov	17
3.3.1 Pretočna krivulja.....	18

3.3.2	Recesijska krivulja	19
3.4	Geokemična sestava vode.....	20
3.5	Stabilni izotopi in izotopska frakcionacija	20
3.5.1	Izotopi kisika in vodika	21
3.5.1.1	Snežnica.....	23
3.5.2	Izotopska sestava raztopljenega anorganskega ogljika (DIC).....	24
3.6	Izotopska separacija hidrograma	25
3.6.1	Negotovost mešalnega modela	26
4	PREGLED DOSEDANJIH RAZISKAV.....	28
4.1	Geokemija površinskih in podzemnih voda	28
4.2	Izotopske raziskave vodika, kisika in ogljika v vodi.....	28
4.3	Izotopska separacija hidrograma	28
4.4	Raziskave v dolini reke Radovne	29
5	METODE	31
5.1	Terensko delo	31
5.1.1	Padavine	31
5.1.2	Opis vzorčnih in merskih lokacij.....	31
5.1.2.1	Lokacije podrobnega vzorčenja zgornjega dela reke Radovne	35
5.1.3	Vzorčenje vode.....	36
5.1.3.1	Vzorčenje med letoma 2005 in 2007	36
5.1.3.2	Vzorčenje med letoma 2011 in 2013	37
5.1.4	Registrator nivoja vode	39
5.1.5	Meritve pretokov in fizikalnih parametrov.....	40
5.2	Pasivni kapilarni vzorčevalniki (PKV).....	40
5.3	Analitske meritve.....	43
5.3.1	Kemijske analize glavnih anionov in kationov.....	43
5.3.2	Izotopske analize $\delta^{18}\text{O}$ in $\delta^2\text{H}$	43
5.3.3	Izotopske analize $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$	44
5.4	Izračuni	44
5.4.1	Indeks nasičenja, pCO_2 in ravnotežje nabojev	44
5.4.2	Določitev srednjih zadrževalnih časov	45
5.5	Geofizikalne metode.....	45
5.5.1	Georadar	46
5.5.2	Refleksijska seizmika	47
6	REZULTATI IN DISKUSIJA.....	49
6.1	Konceptualni hidrogeološki model izvira reke Radovne.....	49

6.1.1 Interpretacija refleksijskih podatkov	50
6.2 Analiza gladin podzemne vode	54
6.2.1 Interpretacija GPR profilov	54
6.2.2 Nihanje gladin podzemne vode v vodnjaku.....	57
6.3 Analiza pretokov	59
6.3.1 Pretok na merski postaji Podhom	59
6.3.2 Pretok na lokacijah Gogalov rovt in Klemenak.....	60
6.3.2.1 Gogalov rovt.....	60
6.3.2.2 Klemenak.....	62
6.3.2.3 Analiza pretoka v zgornjem delu reke Radovne	64
6.4 Fizikalni parametri vod	65
6.4.1 Elektroprevodnost, temperatura in pH.....	65
6.4.2 Podrobno vzorčenje elektroprevodnosti in temperature v zgornjem delu reke Radovne	69
6.5 Glavni kationi in anioni.....	70
6.5.1 Prostorska in časovna porazdelitev glavnih ionov.....	73
6.6 Izotopska sestava vode	75
6.6.1 Padavine	75
6.6.2 Snežnica.....	76
6.6.3 Rezultati izotopske sestave $\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$ in $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ za celotno dolino	77
6.6.3.1 Analiza izotopskih vrednosti $\delta^2\text{H}$ in $\delta^{18}\text{O}$	82
6.6.4 Rezultati izotopske sestave $\delta^2\text{H}$ in $\delta^{18}\text{O}$ za zgornji del reke Radovne.....	83
6.6.5 Analiza izotopske sestave $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$	90
6.7 Izračun srednje napajalne višine	92
6.8 Izračun napajalnega območja reke Radovne	95
6.9 Izračun srednjih zadrževalnih časov	96
6.10 Izotopska separacija hidrograma	99
6.10.1 Določitev in izračun komponent v odtoku.....	99
6.10.1 Trokomponentni mešalni model	101
6.10.2 Dvokomponentni mešalni model.....	102
6.10.2.1 Časovna spremenljivost deleža snežnice	105
6.10.2.2 Negotovost modela.....	113
6.11 Reinterpretacija izlivnih izvirov.....	114
7 ZAKLJUČKI	115
8 SUMMARY	118
LITERATURA	121
PRILOGE	135

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Koordinate in nadmorske višine obravnavanih meteoroloških postaj.....	11
Preglednica 2: Letne padavine na lokaciji Zgornja Radovna s pripadajočimi odstotki glede na referenčno obdobje 1961–1990	12
Preglednica 3: Vzorčne lokacije s pripadajočimi Gauss-Krügerjevimi koordinatami in nadmorsko višino.....	32
Preglednica 4: Vzorčne lokacije s pripadajočimi Gauss-Krügerjevimi koordinatami in nadmorsko višino.....	35
Preglednica 5: Lokacija, tip lokacije in število vzorcev za kemijske in izotopske analize	37
Preglednica 6: Lokacije in dnevi vzorčenja, ko so se izvajale meritve in-situ parametrov (T in EC) ter vzorčenje vode za določitev izotopske sestave kisika in vodika ($\delta^{18}\text{O}$ in $\delta^2\text{H}$)	38
Preglednica 7: Lokacije PKV s pripadajočimi Gauss-Krügerjevimi koordinatami in nadmorsko višino	42
Preglednica 8: Natančnost analitskih meritev za stabilna izotopa $\delta^{18}\text{O}$ in $\delta^2\text{H}$ po obdobjih in po različnih laboratorijih.....	44
Preglednica 9: Parametri snemanja seizmičnega profila HRS Radovna.....	51
Preglednica 10: Izbrani seizmični streli s pripadajočo interpretirano globino reflektorjev, ki so razporejeni v devet horizontov z Gauss-Krügerjevimi koordinatami skupnih sredinskih točk (CMP).....	53
Preglednica 11: Geofizikalni parametri za profil R1	55
Preglednica 12: Geofizikalni parametri za profil R2	55
Preglednica 13: Geofizikalni parametri za profil R3	55
Preglednica 14: Izmerjeni (Q_{izm}) in izračunani pretoki (Q_{izr}) na lokaciji Gogalov rovt s pripadajočo višino vode (h) v strugi in izračunano napako (X_Q)	61
Preglednica 15: Izmerjeni (Q_{izm}) in izračunani pretoki (Q_{izr}) na lokaciji Klemenak s pripadajočo višino vode (h) v strugi in izračunano napako (X_Q).....	63
Preglednica 16: Minimalne, maksimalne in povprečne vrednosti za in-situ terenske parametre in za koncentracije glavnih ionov na devetih lokacijah za obdobje meritev 2005–2007 (Slika 17)	66
Preglednica 17: Minimalne, maksimalne in povprečne vrednosti za in-situ terenske parametre.....	69
Preglednica 18: Fizikalni parametri in kemijska sestava vode v vodnjaku in na izvirih 1.10.2011.....	73
Preglednica 19: Fizikalni parametri in kemijska sestava voda dne 14.5.2012.....	73
Preglednica 20: Povprečne utežene vrednosti za kisik na postajah Kredarica, Rateče in Zgornja Radovna	75
Preglednica 21: Minimalne, maksimalne in mediana vrednosti za $\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$ in $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$	79
Preglednica 22: Pregledna tabela za izotopske vrednosti $\delta^2\text{H}$ in $\delta^{18}\text{O}$ z minimalnimi, maksimalnimi in s povprečnimi vrednostmi ter z amplitudo in številom vzorcev za posamezno lokacijo	83
Preglednica 23: Osnovni podatki o lokacijah Strmole in Mevkuž.....	92
Preglednica 24: Povprečne napajalne višine in povprečni zadrževalni časi za vzorčene lokacije v obdobju 2005–2007 (Torkar et al., 2016) ter v obdobju 2012–2013	94
Preglednica 25: Podatki o povprečnih letnih padavinah in temperaturah za referenčno obdobje 1981–2010 ter izračun evapotranspiracije po Turcovi enačbi.....	96
Preglednica 26: Primerjava povprečnih zadrževalnih časov za vzorčene lokacije glede na različne vhodne podatke o izotopski sestavi padavin na postaji Ljubljana (Vreča et al., 2008, Vreča et al., 2014b, Torkar et al., 2016) in Zgornja Radovni (Vreča et al., 2013a, Vreča, 2016)	98

Preglednica 27: Povprečni zadrževalni časi za vzorčene lokacije izračunani z upoštevanjem podatkov o izotopski sestavi padavin na padavinski postaji Zgornja Radovna (Vreča et al., 2013a, Vreča, 2016).....	99
Preglednica 28: Izotopska sestava kisika za staro vodo	100
Preglednica 29: Izotopska sestava kisika za snežnico (Vreča, 2016)	101
Preglednica 30: Vhodne vrednosti dvokomponentnega modela za staro in novo vodo.....	102
Preglednica 31: Izračuni in razponi deleža snežnice na lokaciji vodnjak.....	104
Preglednica 32: Izračuni in razponi deleža snežnice na lokaciji Gogalov rovt.....	104
Preglednica 33: Izračuni in razponi deleža snežnice na lokaciji Klemenak	104
Preglednica 34: Izračuni in razponi deleža snežnice na lokaciji Sr. Radovna	104
Preglednica 35: Izračuni in razponi deleža snežnice na lokaciji izvir	105
Preglednica 36: Delež snežnice v odtoku na vseh lokacijah po 5. izračunu	109
Preglednica 37: Izračunane negotovosti modela za primer separacije hidrograma na staro in novo vodo z izotopsko sestavo $\delta^{18}\text{O}$	114

KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 1: Padavine in temperatura za obdobje od aprila 2010 do marca 2013 za postaje Kredarica, Rateče in Zgornja Radovna.....	14
Grafikon 2: Maksimalna količina snega na meteorološki postaji Kredarica in Zgornja Radovna med leti 2000 in 2015	14
Grafikon 3: Negotovost deležev f_p in f_e kot funkcija f_p in f_e za separacijo hidrograma na staro in novo vodo z $\delta^{18}\text{O}$ (Genereux, 1998).....	27
Grafikon 4: Glavna recesijska krivulja za nivo podzemne vode na lokaciji vodnjak	58
Grafikon 5: Nihanje gladine podzemne vode v odvisnosti od časa; črtkano so označeni izračunani nivoji s pomočjo recesijske krivulje, z rdečo črto je označena globina vodnjaka.....	58
Grafikon 6: Pretok na merski postaji Podhom (ARSO, 2016b) z označenimi datumi vzorčenja (Torkar et al., 2016).....	59
Grafikon 7: Pretočna krivulja za lokacijo Gogalov rovt	61
Grafikon 8: Pretok v odvisnosti od časa na lokaciji Gogalov rovt.....	62
Grafikon 9: Grafikon kvartilov pretoka na lokacijah Gogalov rovt in Klemenak	62
Grafikon 10: Pretočna krivulja za lokacijo Klemenak.....	63
Grafikon 11: Pretok v odvisnosti od časa na lokaciji Klemenak	64
Grafikon 12: Primerjava pretoka in padavin na postaji Zgornja Radovna v odvisnosti od časa na lokacijah Gogalov rovt in Klemenak.....	65
Grafikon 13: Elektroprevodnost v odvisnosti od časa za vseh pet lokacij.....	67
Grafikon 14: Kontinuirana elektroprevodnost na lokaciji Gogalov rovt v primerjavi s pretokom	68
Grafikon 15: Temperatura vode v odvisnosti od časa za vseh pet lokacij	68
Grafikon 16: Spreminjanje elektroprevodnosti in temperature dolvodno od izvira do lokacije Klemenak	70
Grafikon 17: Škatlasti diagrami glavnih ionov v reki, izvirih in v vrtini, gledano dolvodno od izvira (Torkar et al., 2016)	71
Grafikon 18: Diagrami za Ca^{2+} , Mg^{2+} , EC in pH za izvir Radovne (R-9), izvir Zmrzlek (ZM-1) ter za rečno lokacijo (R-3) z diagramom pretokov na lokaciji Podhom (Torkar et al., 2016).....	74
Grafikon 19: Izotopska sestava $\delta^{18}\text{O}$ za snežnico v odvisnosti od nadmorske višine	76
Grafikon 20: Časovni niz izotopske sestave $\delta^{18}\text{O}$ za vzorce izvira (R-9, ZM-1, Z-1, L-1 in CR-1), reke (R-8, R-5 in R-3) in vrtine (V-2) v primerjavi s padavinami (ARSO, 2016a, Torkar et al., 2016).....	78
Grafikon 21: Grafikon kvartilov za vrednosti $\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$ in $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ za reko, izvire in podzemno vodo dolvodno od izvira (Torkar et al., 2016)	80
Grafikon 22: Časovni niz izotopske sestave $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ vzorcev izvira (R-9, ZM-1, Z-1, L-1 in CR-1), reke (R-8, R-5 in R-3) in vrtine (V-2) v primerjavi s padavinami (ARSO, 2016a, Torkar et al., 2016).....	81
Grafikon 23: Diagram $\delta^{18}\text{O}$ in $\delta^2\text{H}$ za rečne vzorce, vzorce izvirov in vrtine (GMWL; Craig, 1961, MMWL; Gat in Carmi, 1970).....	82
Grafikon 24: Diagram $\delta^{18}\text{O}$ in $\delta^2\text{H}$ za vzorce podzemne vode, izvira ter reke (GMWL; Craig, 1961, MMWL; Gat in Carmi, 1970).....	84
Grafikon 25: Izotopska sestava kisika in vodika na lokaciji vodnjak.....	85
Grafikon 26: Dnevna količina padavin v Zgornji Radovni in kota podzemne vode na lokaciji vodnjak	85

Grafikon 27: Izotopska sestava kisika in vodika na lokaciji izvir	86
Grafikon 28: Dnevna količina padavin v Zgornji Radovni in izotopska sestava kisika na lokaciji izvir	86
Grafikon 29: Izotopska sestava kisika in vodika na lokaciji Gogalov rovt	87
Grafikon 30: Dnevna količina padavin v Zgornji Radovni in pretok na lokaciji Gogalov rovt.....	87
Grafikon 31: Izotopska sestava kisika in vodika na lokaciji Sr. Radovna.....	88
Grafikon 32: Dnevna količina padavin v Zgornji Radovni in izotopska sestava kisika na lokaciji Sr. Radovna..	88
Grafikon 33: Izotopska sestava kisika in vodika na lokaciji Klemenak	89
Grafikon 34: Dnevna količina padavin v Zgornji Radovni in pretok na lokaciji Klemenak	89
Grafikon 35: Diagram $\delta^{18}\text{O}$ v odvisnosti od povprečne vrednosti $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ s standardnim odklonom za vodo v reki, izvirsko vodo in podzemno vodo.....	90
Grafikon 36: Izotopska vrednost $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ v odvisnosti od razdalje	91
Grafikon 37: Izotopska sestava $\delta^{18}\text{O}$ v odvisnosti od nadmorske višine	92
Grafikon 38: Srednja napajalna višina za lokacije vzorčenj vzdolž toka	93
Grafikon 39: Korelacija padavin med posameznimi merilnimi mesti (Preglednica 25).....	96
Grafikon 40: Korelacija ETR med posameznimi merilnimi mesti (Preglednica 25).....	96
Grafikon 41: Izotopska sestava $\delta^{18}\text{O}$ za snežnico v odvisnosti od nadmorske višine za postaji Kredarica in Zgornja Radovna za obdobje 04/2011–03/2012	100
Grafikon 42: Izotopska sestava $\delta^{18}\text{O}$ za snežnico v odvisnosti od nadmorske višine za postaje Kredarica, Zgornja Radovna in Rateče za obdobje 04/2011–03/2012.....	100
Grafikon 43: Izotopska sestava $\delta^{18}\text{O}$ za snežnico v odvisnosti od nadmorske višine za postaje Kredarica, Zgornja Radovna in Rateče za obdobje 01/2011–02/2012.....	101
Grafikon 44: Škatlasti diagram razpona deleža snežnice na lokacijah vodnjak, izvir, Gogalov rovt, Sr. Radovna in Klemenak.....	103
Grafikon 45: Časovna spremenljivost deleža snežnice v odtoku na vseh vzorčenih lokacijah	105
Grafikon 46: Delež snežnice v primerjavi s koto podzemne vode v vodnjaku.....	106
Grafikon 47: Delež snežnice v primerjavi s pretokom na lokaciji Gogalov rovt.....	107
Grafikon 48: Delež snežnice v primerjavi s pretokom na lokaciji Klemenak	109
Grafikon 49: Primerjava deleža snežnice v odtoku na lokacijah Gogalov rovt in Klemenak	113

KAZALO SLIK

Slika 1: Geografski položaj reke Radovne z napajalnim območjem, izsek iz Državne pregledne karte Slovenije v merilu 1:250.000 (Javne informacije Slovenije, Geodetska uprava Republike Slovenije, DPK250, 2008) ...5	5
Slika 2: Geološka karta območja reke Radovne (izsek kart OGK: list Beljak in Ponteba 1:100.000, Beograd, Zvezni geološki zavod, 1987 in list Celovec 1:100.000, Beograd, Zvezni geološki zavod, 1977)6	6
Slika 3: Profili 1, 2 in 3 za izračun naklona vršaja v zaledju izvira Radovna (Javne informacije Slovenije, Geodetska uprava Republike Slovenije, LIDAR, 2015) 7	7
Slika 4: Nakloni za a) profil 1 (2,7 %) dolina Krma, b) profil 2 (3,1 %) zaledje izvira, c) profil 3 (1,4 %) dolvodno od izvira8	8
Slika 5: Območje nihanja izvira Radovne z najnižjo točko izvira (Javne informacije Slovenije, Geodetska uprava Republike Slovenije, TTN 10, 1999)9	9
Slika 6: Lokacije meteoroloških postaj (Javne informacije Slovenije, Geodetska uprava Republike Slovenije, DPK250, 2008) 11	11
Slika 7: Lokacija padavinske postaje Zgornja Radovna 12	12
Slika 8: Padavinska postaja 12	12
Slika 9: Osnovni razvoj hidrogeološkega konceptualnega modela 15	15
Slika 10: Komponente georadarskega sistema (prirejeno po Singh, 2006) 16	16
Slika 11: Inštrument Flo-Tracer za meritve pretokov s kemijsko integracijsko metodo s trenutnim vnosom soli 18	18
Slika 12: Meritve pretokov s hidrometričnim krilom na lokaciji Klemenak 18	18
Slika 13: Recesijska krivulja (prirejeno po Tallaksen, 1995) 19	19
Slika 14: Spreminjanje izotopske sestave padavin in zračne vlage proti notranjosti kontinenta (prirejeno po Hoefs, 1997)21	21
Slika 15: Pregledni diagram hidroloških procesov, ki vplivajo na izotopsko sestavo kisika in vodika v vodi (prirejeno po SAHRA, 2016)23	23
Slika 16: Koncentracije raztopljenih karbonatnih snovi v odvisnosti od pH (Zeebe in Wolf-Gladrow, 2001)24	24
Slika 17: Lokacije vzorčnih mest za geokemične analize med letoma 2005 in 2007, na podčrtanih lokacijah se je vzorčilo samo za izotope32	32
Slika 18: Lokacije za vzorčenje in merjenje na širšem območju izvira med letoma 2011 in 201333	33
Slika 19: Objekt, v katerem je vodnjak z vgrajenim inštrumentom34	34
Slika 20: Lokacija Gogalov rovt34	34
Slika 21: Lokacija Sr. Radovna34	34
Slika 22: Lokacija Klemenak34	34
Slika 23: Lokacije za detajlno vzorčenje zgornje dela reke Radovne 29.5.201236	36
Slika 24: Merilnik nivoja, temperature in elektroprevodnosti40	40
Slika 25: PKV s poliestrskimi vrvmi.41	41
Slika 26: Pranje vrvi v laboratoriju41	41
Slika 27: Pripravljene vrvi v plastični cevi41	41
Slika 28: Pasivni kapilarni vzorčevalniki; a) priprava vzorčevalnika v laboratoriju, b) vkop treh vzorčevalnikov na lokaciji Gogala, c) notranjost vzorčevalnika; med platenkami je izolacijski material, da voda ne bi zmrznila, d) videz vzorčevalnika po vkopu; pod vrvico je bil z zaponko U-oblike nameščen polivinil42	42

Slika 29: Zakoličeni georadarski profil in georadarska oprema	47
Slika 30: Oddajna in sprejemna antena	47
Slika 31: Postavitev 40-Hz geofonov	47
Slika 32: 6-kg macola kot seizmični vir	47
Slika 33: Konceptualni hidrogeološki model kraškega in aluvialnega vodonosnika v dolini reke Radovne.....	49
Slika 34: Blok diagram toka podzemne vode	50
Slika 35: Položaj profila HRS, georadarskih profilov R1, R2 in R3 in lokacija vodnjaka	51
Slika 36: Posnetka s slabo in z dobro vidnimi refleksi. Levo: posnetek na strelni točki Tx1041, pri katerem so refleksi zabrisani in skoraj nevidni. Desno: posnetek na strelni točki Tx1085, kjer so refleksi bistveno bolj vidni.	52
Slika 37: Šest od devetih refleksov, ki so bili uporabljeni v alternativnem procesu obdelave (strelne točke 1029, 1050, 1069, 1079, 1099 in 1151).	52
Slika 38: Prečni shematski presek S–J doline reke Radovne.....	54
Slika 39: Interpretacija georadarskega vzdolžnega profila R1	56
Slika 40: Interpretacija georadarskih prečnih profilov R2 in R3	56
Slika 41: Piperjev diagram za vzorce med leti 2005 in 2007	72
Slika 42: Lokacije vzorčenja za osnovne fizikalno-kemijske parametre dne 1.10.2011	72
Slika 43: Konceptualni model stratifikacije podzemne vode	112

LIST OF TABLES

Table 1: Coordinates and altitudes of the meteorological stations.....	11
Table 2: Yearly precipitation at the location Zgornja Radovna with corresponding percentages based on the reference period 1961–1990.....	12
Table 3: Sampling locations with Gauss-Krüger coordinates and altitude	32
Table 4: Sampling locations with Gauss-Krüger coordinates and altitude	35
Table 5: Location, location type and number of samples for chemical and isotope analysis	37
Table 6: Locations and sampling campaigns, when measurements for in-situ parameters were carried out (T and EC) and water sampling for isotopic composition of oxygen and hydrogen ($\delta^{18}\text{O}$ in $\delta^2\text{H}$)	38
Table 7: The PCS locations with Gauss-Krüger coordinates and altitude	42
Table 8: The analytical precision for stable isotopes $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ by periods and by different laboratories	44
Table 9: HRS Radovna seismic profile data acquisition parameters	51
Table 10: Selected seismic shot gathers with depths of interpreted reflectors arranged in nine horizons with Gauss-Krüger coordinates of CMPs.....	53
Table 11: Geophysical parameters for profile R1	55
Table 12: Geophysical parameters for profile R2	55
Table 13: Geophysical parameters for profile R3	55
Table 14: Measured (Q_{izm}) and calculated discharge (Q_{izr}) with depended stage (h) and calculated error (X_Q) on location Gogalov rovt.....	61
Table 15: Measured (Q_{izm}) and calculated discharge (Q_{izr}) with depended stage (h) and calculated error (X_Q) on location Klemenak	63
Table 16: Minimum, maximum and average values for in-situ field parameters and for major ion concentrations for nine locations for the period 2005–2007 (Figure 17)	66
Table 17: Minimum, maximum and average values for in-situ field parameters	69
Table 18: Physical parameters and chemical composition of the well and spring waters on 1.10.2011.....	73
Table 19: Physical parameters and chemical composition of water on 14.5.2012.....	73
Table 20: The average weighted values for oxygen on the Kredarica, Rateče and Zgornja Radovna stations.....	75
Table 21: Minimum, maximum and median values of $\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$	79
Table 22: Summary table of isotopic values for $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ with minimum, maximum and average values as well as the amplitude and the number of samples for each location	83
Table 23: Basic information about the location Strmole and Mevkuž.....	92
Table 24: Average recharge altitudes and mean residence times for the sampling locations between 2005–2007 (Torkar et al., 2016) and between 2012-2013	94
Table 25: Average yearly precipitation and temperature data for standard 30-year average (1981–2010) and evapotranspiration calculations with the Turc equation.....	96
Table 26: Comparison of mean residence times for the sampling locations according to different isotopic composition of precipitation at Ljubljana station (Vreča et al., 2008, Vreča et al., 2014b, Torkar et al., 2016) and Zgornja Radovna station (Vreča et al., 2013a, Vreča, 2016)	98
Table 27: Mean residence times for the sampling locations calculated with data of the isotopic composition of precipitation for station Zgornja Radovna (Vreča et al., 2013a, Vreča, 2016).....	99

Table 28: Isotope value of oxygen for old water	100
Table 29: Isotope value of oxygen for snowmelt (Vreča, 2016)	101
Table 30: Input values for the two-component model for the old water and the new water.....	102
Table 31: Calculations and ranges of the snowmelt percentage at the well location.....	104
Table 32: Calculations and ranges of the snowmelt percentage at Gogalov rovt location	104
Table 33: Calculations and ranges of the snowmelt percentage at Klemenak location	104
Table 34: Calculations and ranges of the snowmelt percentage at Sr. Radovna location.....	104
Table 35: Calculations and ranges of the snowmelt percentage at the spring location.....	105
Table 36: Snowmelt percentage in discharge at all sampling locations by fifth calculation	109
Table 37: Calculated uncertainties for hydrograph separation of event and pre-event water with isotopic composition of $\delta^{18}\text{O}$	114

LIST OF CHARTS

Chart 1: Precipitation and temperature for the period from April 2010 to March 2013 for stations Kredarica, Rateče and Zgornja Radovna	14
Chart 2: The maximal thickness of snowcover at the meteorological station Kredarica and Zgornja Radovna between years 2000 and 2015	14
Chart 3: Uncertainty in f_p and f_e as a function of f_p and f_e for hydrograph separation of event and pre-event water with $\delta^{18}\text{O}$ (Genereux, 1998).....	27
Chart 4: Master recession curve for groundwater level at the well location	58
Chart 5: Fluctuations of groundwater level versus time; the dash line represents calculated levels through regression curve and the red line represents the depth of the well	58
Chart 6: Discharge at the Podhom gauging station (ARSO, 2016b) with marked dates of sampling (Torkar et al., 2016)	59
Chart 7: Rating curve for Gogalov rovt location	61
Chart 8: Discharge as a function of time at location Gogalov rovt.....	62
Chart 9: Box-and-whisker plot of discharges for the locations Gogalov rovt and Klemenak.....	62
Chart 10: Rating curve for Klemenak location	63
Chart 11: Discharge as a function of time at location Klemenak.....	64
Chart 12: Discharge and precipitation at station Zgornja Radovna versus time at the location Gogalov rovt and Klemenak	65
Chart 13: Electrical conductivity versus time for all five locations	67
Chart 14: Continuous electrical conductivity at the location Gogalov rovt compared with the discharge	68
Chart 15: Water temperature versus time for all five locations	68
Chart 16: Electrical conductivity and temperature values downstream from the spring to the Klemenak location	70
Chart 17: Box plots of major ions in stream, spring and borehole water at downstream sampling locations (Torkar et al., 2016)	71
Chart 18: Plot of Ca^{2+} , Mg^{2+} , EC and pH for the terminal spring (R-9), for the Zmrzlek spring (ZM-1) and for the stream location (R-3) with plot of discharges at Podhom gauging station (Torkar et al., 2016).....	74
Chart 19: Isotope values of $\delta^{18}\text{O}$ for snowmelt vs. altitude	76
Chart 20: Time series of isotope composition of $\delta^{18}\text{O}$ for spring (R-9, ZM-1, Z-1, L-1 and CR-1), stream (R-8, R-5 and R-3) and borehole (V-2) samples compared to precipitation (ARSO, 2016a, Torkar et al., 2016) .	78
Chart 21: Box plots of $\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ values of stream, spring and borehole water from the spring downstream (Torkar et al., 2016).....	80
Chart 22: Time series of isotope composition of $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ for spring (R-9, ZM-1, Z-1, L-1 and CR-1), stream (R-8, R-5 and R-3) and borehole (V-2) samples compared to precipitation (ARSO, 2016a, Torkar et al., 2016) .	81
Chart 23: Plot of $\delta^{18}\text{O}$ vs. $\delta^2\text{H}$ for stream water, spring water and water from borehole (GMWL; Craig, 1961, MMWL; Gat in Carmi, 1970)	82
Chart 24: Plot of $\delta^{18}\text{O}$ vs. $\delta^2\text{H}$ for groundwater, spring water and stream water (GMWL; Craig, 1961, MMWL; Gat in Carmi, 1970)	84
Chart 25: Isotopic composition of oxygen and hydrogen at the well location.....	85

Chart 26: Daily precipitation at Zgornja Radovna and groundwater level at the well location.....	85
Chart 27: Isotopic composition of oxygen and hydrogen at the spring location	86
Chart 28: Daily precipitation at Zgornja Radovna and isotopic composition of oxygen at the spring location	86
Chart 29: Isotopic composition of oxygen and hydrogen at the Gogalov rovt location	87
Chart 30: Daily precipitation at Zgornja Radovna and stream discharge at the Gogalov rovt location.....	87
Chart 31: Isotopic composition of oxygen and hydrogen at the Sr. Radovna location.....	88
Chart 32: Daily precipitation at Zgornja Radovna and isotopic composition of oxygen at the Sr. Radovna location	88
Chart 33: Isotopic composition of oxygen and hydrogen at the Klemenak location	89
Chart 34: Daily precipitation at Zgornja Radovna and stream discharge at the Klemenak location	89
Chart 35: Plot of $\delta^{18}\text{O}$ vs. $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ average values with standard deviation for stream water, spring water and borehole water samples.....	90
Chart 36: Isotopic value of $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ versus the distance.....	91
Chart 37: Isotopic value of $\delta^{18}\text{O}$ depending on the altitude.....	92
Chart 38: Average recharge altitude of sampling locations downstream	93
Chart 39: Correlation of precipitation between individual measuring sites (Table 25).....	96
Chart 40: Correlation of ETR between individual measuring sites (Table 25).....	96
Chart 41: Isotope values of $\delta^{18}\text{O}$ for snowmelt vs. altitude for Kredarica and Zgornja Radovna stations in the 04/2011–03/2012 period.....	100
Chart 42: Isotope values of $\delta^{18}\text{O}$ for snowmelt vs. altitude for Kredarica, Zgornja Radovna and Rateče stations in the 04/2011–03/2012 period	100
Chart 43: Isotope values of $\delta^{18}\text{O}$ for snowmelt vs. altitude for Kredarica, Zgornja Radovna and Rateče stations in the 01/2011–12/2012 period	101
Chart 44: Box plot of snowmelt percentage range at the well, spring, Gogalov rovt, Sr. Radovna and Klemenak locations.....	103
Chart 45: Temporal variability of snowmelt percentage in discharge at all sampling locations.....	105
Chart 46: Snowmelt percentage in comparison with groundwater level in the well.....	106
Chart 47: Snowmelt percentage in comparison with discharge at the location Gogalov rovt	107
Chart 48: Snowmelt percentage in comparison with discharge at the location Klemenak	109
Chart 49: Comparison of snowmelt percentage and discharge at the locations Gogalov rovt and Klemenak.....	113

LIST OF FIGURES

Figure 1: Geographical settings of the Radovna River with the recharge area, section from National general map of the Republic of Slovenia in scale 1:250,000 (Public information of Slovenia, The Surveying and Mapping Authority of the Republic of Slovenia, DPK250, 2008).....	5
Figure 2: Geological map of the Radovna River area (OGK map sections: sheet Beljak in Ponteba 1:100.000, Beograd, Zvezni geološki zavod and sheet Celovec 1:100.000, Beograd, Zvezni geološki zavod, 1977).....	6
Figure 3: Profiles 1, 2 and 3 for the fan slope calculations in the hinterland of the Radovna spring (Public information of Slovenia, The surveying and mapping authority of the Republic of Slovenia, LIDAR, 2015)	7
Figure 4: The slopes for a) profile 1 (2,7 %) the Krma Valley, b) profile 2 (3,1 %) hinterland of the spring, c) profile 3 (1,4 %) downstream from the spring	8
Figure 5: The area of the Radovna spring occurrence with the lowest point of discharge (Public information of Slovenia, The surveying and mapping authority of the Republic of Slovenia, TTN 10, 1999)	9
Figure 6: Locations of the meteorological stations (Public information of Slovenia, The surveying and mapping authority of the Republic of Slovenia, DPK250, 2008)	11
Figure 7: Location of the precipitation station Zgornja Radovna	12
Figure 8: The precipitation station.....	12
Figure 9: Basic development of the hydrogeological conceptual model	15
Figure 10: Components of the georadar system (modified after Singh, 2006)	16
Figure 11: Flo-Tracer instrument for measuring discharge using tracer dilution method with sudden injection ..	18
Figure 12: Discharge measurements with the propeller current-meter at the location Klemenak	18
Figure 13: The recession curve (modified after Tallaksen, 1995)	19
Figure 14: Changing the isotopic composition of precipitation and vapour inland (modified after Hoefs, 1997).	21
Figure 15: Summary diagram of how hydrologic processes affect oxygen and hydrogen isotopic composition of water (modified after SAHRA, 2016).....	23
Figure 16: Concentrations of dissolved carbonate species in relation to pH (Zeebe in Wolf-Gladrow, 2001).....	24
Figure 17: Sampling locations for geochemical analysis between 2005 and 2007, underlined sampling locations were analysed only for isotopes.....	32
Figure 18: Measurement and sampling locations in the wider spring area between 2011 and 2013	33
Figure 19: The facility where the well is located with a build-in instrument	34
Figure 20: Location Gogalov rovt.....	34
Figure 21: Location Sr. Radovna.....	34
Figure 22: Location Klemenak	34
Figure 23: Locations for detailed sampling of the upper part of the Radovna River on 29.5.2012	36
Figure 24: Level, temperature and electrical conductivity data logger	40
Figure 25: PKV with polyester wicks.....	41
Figure 26: Washing the rope in the laboratory	41
Figure 27: Prepared wicks in a plastic tube	41
Figure 28: Passive capillary samplers (PCS); a) preparing the PCS in the laboratory, b) three PCS buried at the Gogala location, c) the interior of the PCS before it was dug in; there is isolative material between the	

bottles was to prevent the water from freezing, d) the appearance of finished PCS; plastic barrier was placed beneath the rolled coil secured with U-shaped pins	42
Figure 29: Marked GPR profile line and GPR equipment.....	47
Figure 30: Transmitting and receiving antenna	47
Figure 31: Setup of 40-Hz geophones	47
Figure 32: 6-kg sledge-hammer as a seismic source	47
Figure 33: Conceptual hydrogeological model of the karstic and alluvial aquifer in the Radovna River valley...	49
Figure 34: Block diagram of groundwater flow	50
Figure 35: Position map of the HRS profile, GPR profiles R1, R2 in R3 and the well location	51
Figure 36: Two seismic shot gathers displaying the variability in data quality. Left: shot gather at shot point Tx 1041 with almost indiscernible reflectors. Right: shot gather at shot point Tx 1085 with significantly better visibility of reflectors.....	52
Figure 37: Six of nine seismic shot gathers used in the alternative processing (shot points 1029, 1050, 1069, 1079, 1099 and 1151).	52
Figure 38: Schematic N-S cross-section of the Radovna River valley	54
Figure 39: Interpretation of the longitudinal GPR profile R1.....	56
Figure 40: Interpretation of the transversal GPR profiles R2 and R3.....	56
Figure 41: The Piper plot for samples between 2005 and 2007	72
Figure 42: Sampling locations for basic physico-chemical parameters on 1.10.2011	72
Figure 43: The conceptual model of the groundwater stratification.....	112

SEZNAM PRILOG**PRILOGA A: PODATKI O KEMIJSKI SESTAVI.....A1–A8**

Tabela A.1: Mersko mesto R-9, izvir Radovna

Tabela A.2: Mersko mesto R-8

Tabela A.3: Mersko mesto V-2, arteška vrtina

Tabela A.4: Mersko mesto ZM-1, izvir Zmrzlek

Tabela A.5: Mersko mesto Z-1, izvir Zmrzlek

Tabela A.6: Mersko mesto L-1, izvir Lipnik

Tabela A.7: Mersko mesto R-5

Tabela A.8: Mersko mesto CR-1, izvir Rečica

Tabela A.9: Mersko mesto R-3

PRILOGA B: PODATKI O IZOTOPSKI SESTAVI $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ IN $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$B1–B10

Tabela B.1: Mersko mesto R-9, izvir Radovna

Tabela B.2: Mersko mesto R-8

Tabela B.3: Mersko mesto V-2, arteška vrtina

Tabela B.4: Mersko mesto ZM-1, izvir Zmrzlek

Tabela B.5: Mersko mesto Z-1, izvir Zatrep

Tabela B.6: Mersko mesto L-1, izvir Lipnik

Tabela B.7: Mersko mesto R-5

Tabela B.8: Mersko mesto CR-1, izvir Rečica

Tabela B.9: Mersko mesto R-3

Tabela B.10: Mersko mesto ST-1, izvir Strmole

Tabela B.11: Mersko mesto M-1, izvir Mevkuž

PRILOGA C: PODATKI O IZOTOPSKI SESTAVI $\delta^{18}\text{O}$ IN $\delta^2\text{H}$C1–C5

Tabela C.1: Mersko mesto vodnjak

Tabela C.2: Mersko mesto izvir

Tabela C.3: Mersko mesto Gogalov rovt

Tabela C.4: Mersko mesto Sr. Radovna

Tabela C.5: Mersko mesto Klemenak

SEZNAM UPORABLJENIH OKRAJŠAV

ARSO	Agencija Republike Slovenije za okolje
CMP	Skupna sredinska točka (Common Reflection Point)
EC	Elektroprevodnost
ETR	Evapotranspiracija
GeoZS	Geološki zavod Slovenije
GMWL	Globalna padavinska premica (Global Meteoric Water Line)
GNIP	Globalna mreža za opazovanje izotopov v padavinah (Global Network of Isotopes in Precipitation)
IAEA	Mednarodna agencija za atomsko energijo (International Atomic Energy Agency)
IJS	Institut "Jožef Stefan"
MMWL	Mediterranska padavinska premica (Mediterranean Meteoric Water Line)
NTF	Naravoslovnotehniška fakulteta
PFM	Piston-flow model
PKV	Pasivni kapilarni vzorčevalniki
Q	Pretok vode
T	Temperatura
TOC	Skupni raztopljeni organski ogljik (total organic carbon)

Ta stran je namenoma prazna.

1 UVOD

V Sloveniji podzemne vode predstavljajo prevladujoči vir pitne vode. Delež podzemne vode, ki oskrbuje prebivalstvo s pitno vodo, znaša kar 97,7 % (Cvitanič et al., 2010). Podzemno vodo lahko črpamo iz vodnjakov ali pa jo zajemamo na izvirih. Izviri tako predstavljajo pomembna območja zajema pitne vode, hkrati pa predstavljajo pomemben naravni pojav.

Izvire, ki predstavljajo mesto na površju, kjer se podzemna voda izliva iz vodonosnika in ustvarja vidni tok, lahko raziskujemo na več načinov in z različnimi metodami. Največkrat določimo samo tip izvira in ga klasificiramo glede na različne lastnosti, kot so količina pretoka na izviru, hidrodinamične lastnosti, glede na geološko in geomorfološko strukturo, kemijsko sestavo, kakovost ter temperaturo vode ipd. Praviloma enotne klasifikacije izvirov ni mogoče podati, zato uporabljamo za opis posameznega izvira več klasifikacij, ki se med seboj dopolnjujejo. Nato lahko izviru določimo napajalno zaledje ter kemijske in kvantitativne lastnosti vode. Vsaka dodatna informacija o izviru nam poda dodatna znanja o njegovi dinamiki. Za določitev celostne podobe dinamike in delovanja izvira je zaželeno čim večje število podatkov o različnih procesih v napajalnem zaledju in čim večje število dodatnih metod raziskovanja. V svetovni literaturi so na voljo številne raziskave izvirov. S preučevanjem tipov izvirov in različnimi klasifikacijami so se ukvarjali mnogi znanstveniki (Alfaro in Wallace, 1994, Pitts in Alfaro, 2001, Springer in Stevens, 2008, Kresić, 2010). V prej omenjenih raziskavah so se osredotočali predvsem na klasificiranje izvirov, ne pa toliko na same procese in dinamiko na stiku med vodonosnikom in izdajanjem podzemne vode. Dinamika izvira nam pove veliko o samem vodonosniku, iz katerega izvira, ter o napajalnem zaledju. Poleg naštetega je zelo pomembna tudi interakcija med podzemno in površinsko vodo, ki je glavnega pomena za učinkovito upravljanje količine ter kakovosti vodnih virov in je predmet številnih raziskav (Winter, 1999, Sophocleous, 2002, Soulsby et al., 2007, Ivkovic, 2009, Fleckenstein et al., 2010, Banks et al., 2011, McCallum et al., 2012). Izviri, ki izvirajo v gorah oziroma se tja razprostira njihovo napajalno območje, so posebej občutljivi na spremembe podnebnih razmer ter na antropogene dejavnike.

Navkljub obsežnim terenskim raziskavam še vedno slabo razumemo stik podzemne vode in iztoka vode skozi izvire naprej v površinske vode, posebej v kompleksnih hidrogeoloških sistemih. Razumevanje tega odnosa ima velik pomen za učinkovito upravljanje kemijskega in količinskega stanja vodnih virov tako s stališča človeka kot tudi vodnih ekosistemov (Sophocleous, 2002, Brenčič in Poltnig, 2008, Fleckenstein et al., 2010).

Rdeča nit doktorske disertacije je tako usmerjena v karakterizacijo dinamike napajanja podzemne vode s padavinami in taljenim snegom oziroma snežnico ter posledično odziva tega na izviru. Dosedanje študije podzemne vode so se usmerjale predvsem v regionalno sliko posameznih izvirov ali sistemov

izviru, v tem primeru pa bodo analize na izbranem eksperimentalnem poligonu usmerjene v podrobno analizo procesov, ki se dogajajo med medzrnskim vodonosnikom, nezasičeno cono in izviro.

V doktorski disertaciji je bil za študijski poligon izbran vodonosni sistem izvira Radovne, ki se nahaja v severozahodnem delu Slovenije, v bližini zaselka Zgornja Radovna. Vodonosnik na območju reke Radovne je pomemben vodni vir za severozahodno Slovenijo, saj s pitno vodo oskrbuje 29.000 prebivalcev. Poleg tega je reka Radovna zaradi naravnih, geoloških danosti zelo zanimiva za raziskovanje. Ker izvir Radovne izvira iz odprtega vodonosnika, v katerem gladina podzemne vode prosto niha, se lega izvira spreminja po dolini. S tem zanimivim pojavom seljenja izvira po dolini imamo delno vpogled pod površje, v spreminjanje višine gladine podzemne vode v vodonosniku in s tem dinamiko napajanja vodonosnika. V dolini reke Radovne so poleg glavnega izvira prisotni tudi kraški izviri, ki dolvodno vplivajo na porazdelitev vode v strugi (Torkar in Brenčič, 2015). Na izbranem poligonu so se v preteklosti že izvajale geološke (Buser, 1980, Jurkovšek, 1987), inženirskogeološke (Jamšek, 1969) in hidrogeološke raziskave (Marinko et al., 1978, Marinko in Mencej, 1978, Mencej in Drobne, 1978, Rogelj in Drobne, 1984). V napajalnem zaledju reke Radovne so v preteklosti izvrtali vrtine za ugotovitev debeline fluvioglacialnih nanosov, ki so dobro prepustni in vodonosni (Žlebnik, 1966). Za širše območje je bila izdelana tudi hidrogeološka karta vodozbirnega območja reke Radovne ter širšega področja planot Pokljuka in Mežakla (Ferjančič in Drobne, 1984). V 70. letih prejšnjega stoletja so potekale tudi obširne raziskave za zajem izvirov za dodatne potrebe pitne vode (Mencej in Drobne, 1974). Prav tako so bile na območju med Zgornjo Radovno in Gabrjem izdelane hidrogeološke in geomehanske raziskave (Drobne et al., 1975, Torkar et al., 2016). Leta 2010 so se na Institutu "Jožef Stefan" v okviru IAEA projekta na območju Savice začele raziskave za boljše razumevanje vpliva trajanja snežne oddeje v odtoku reke, ki ima napajalno zaledje v visokogorju (Vreča et al., 2012). Dokazano je, da segrevanja ozračja in spreminjanje atmosferskih zračnih mas vpliva na krajše trajanje snežne oddeje in posledično na količino vode, ki je shranjena v snegu. Leta 2011 so se te raziskave začele tudi na območju Radovne (Vreča et al., 2012).

V doktorski disertaciji so bile pri raziskavah interakcije med izviro in podzemno vodo uporabljene klasične, že uveljavljene izotopske tehnike (stabilni izotopi kisika, vodika in ogljika v vodi), neposredne in-situ meritve hidrogeoloških lastnosti kot tudi dopolnilne geofizikalne metode.

Prva faza raziskav je obsegala pregled in obdelavo do sedaj že obstoječih podatkov. Po celotni dolini reke Radovne so v okviru raziskovalnega programa na GeoZS s sodelovanjem IJS nekaj let (obdobje 2005-2007) opravljali podrobne monitoringe kemijskega stanja vod (glavni kationi in anioni ter stabilni izotopi). Podatki še niso bili obdelani in objavljeni, zato je bilo to narejeno v okviru doktorske disertacije (Torkar et al., 2016).

V drugi fazi raziskav so bile opravljene nove hidrogeološke raziskave. Ker so raziskave usmerjene v opredelitev napajanja izvirov in dinamiko podzemne vode v zaledju izvira, se je v zaledje izvirov v vodnjak vgradil inštrument za zvezne meritve nivojev podzemne vode. Prav tako smo v zgornjem delu toka v strugo reke Radovne na dveh točkah vgradili inštrument, s katerim smo dobili podatke o pretoku. Za dodatne informacije o vodonosniku in razumevanju razprostiranja gladine podzemne vode smo na območju izvira Radovne uporabili dve geofizikalni metodi, in sicer georadar in refleksijsko seizmiko. Na raziskovalnem območju se je vzorčila tudi voda za določitev izotopske sestave kisika in vodika, ki nam je podala informacijo o zadrževalnih časih in procesih mešanja podzemne vode in posledično informacijo o dinamiki podzemne vode in njenem napajanju. Za daljše obdobje taki podatki odražajo spremembe v napajanju in odtoku vode na izviru (Maloszewski et al., 2002, Barbieri et al., 2005, Trček in Zojer, 2010). Prav tako so bili na terenu postavljeni vzorčevalniki za sneg (Vreča et al., 2012, 2013c), ki so nam podali informacijo o izotopski sestavi snežnice. Z obstoječim znanjem in z dodanimi novimi raziskavami je bil postavljen konceptualni hidrogeološki model testnega območja ter komponentni model odtoka vode na izviru.

Glavni cilj doktorske disertacije je bil določiti dinamiko podzemne vode in iztoka iz izvirov ter opredeliti njegove komponente. Hipoteza je: na količino vode na izviru Radovne ter na položaj pojavljanja izvira vpliva količina snežnice v odtoku ter dotoki vode iz bokov doline.

Drugi cilji doktorske disertacije so:

- določiti tip in lastnosti izvirov reke Radovne ter določiti velikosti in naravo napajalnega zaledja,
- analizirati pretoke na območju izvira in oceniti, kakšna je hidrološka bilanca izvirov Radovne,
- z georadarjem prikazati položaj gladine podzemne vode v prostoru ter določiti smer napajanja,
- z refleksijsko seizmiko določiti globino do predkvartarne podlage,
- določiti dinamiko reke Radovne s pomočjo časovnega in prostorskega monitoringa kemijske sestave vode in stabilnih izotopov kisika, vodika in ogljika v vodi,
- izračunati povprečne zadrževalne čase vode in povprečno napajalno višino reke Radovne,
- z modelom opredeliti delež snežnice v odtoku skozi izvire.

Doktorska disertacija je razdeljena na sedem vsebinskih poglavij. V prvem poglavju je opisana hipoteza ter ostali cilji doktorske diertacije.

V drugem poglavju so opisani geografski položaj ter geologija in morfologija študijskega poligona. Podrobno so opisane tudi hidrogeološke in meteorološke lastnosti obravnavanega območja.

V tretjem poglavju so opisana teoretična izhodišča o meritvah pretokov, o stabilnih izotopih, njihovi frakcionaciji ter izotopski razdelitvi hidrograma. V tem poglavju sta opisani tudi geofizikalni metodi, ki sta bili uporabljeni v raziskavah.

Četrto poglavje se osredotoča na pregled dosedanjih raziskav na študijskem poligonu ter na dosedanje znanje o geokemiji podzemnih in površinskih voda, o izotopskih raziskavah kisika, vodika in ogljika v vodi ter na znanje o izotopski separaciji hidrograma.

Peto poglavje o metodah razlaga in opisuje vsa vzorčna mesta v dolini reke Radovne, monitoring na terenu, potek terenskega dela in pogostnost vzorčenja. V poglavju so opisane tudi analitske metode ter uporabljeni izračuni. Na kratko je opisana tudi oprema, s katero so bili posneti geofizikalni profili.

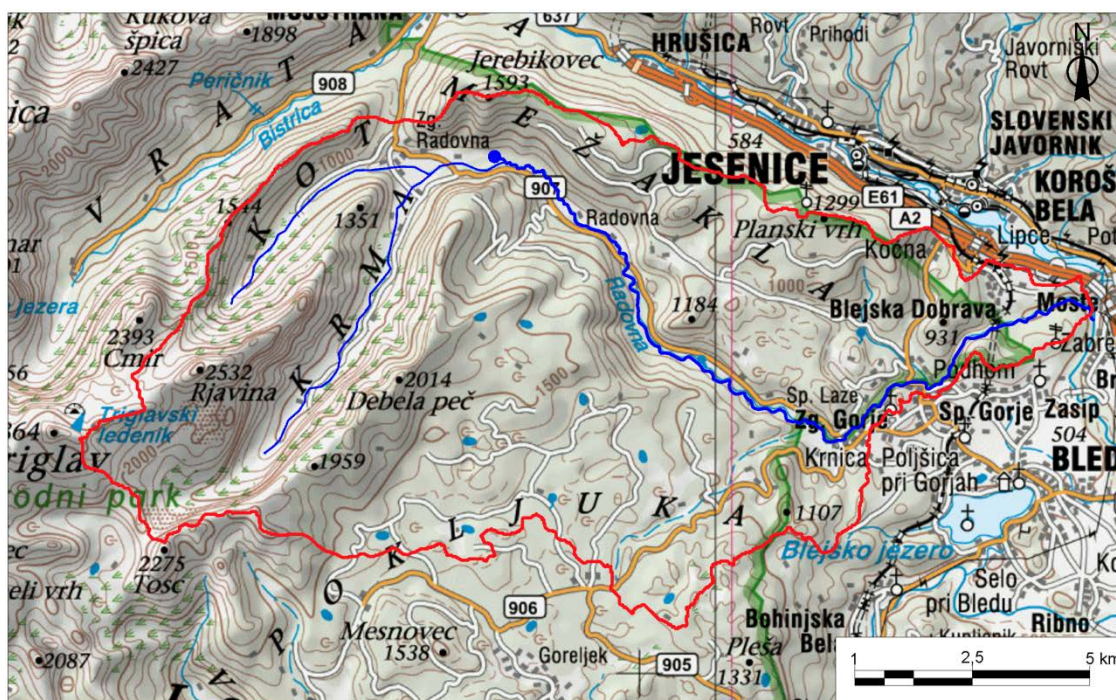
V šestem poglavju so strnjeni vsi rezultati. Najprej je predstavljen konceptualni hidrogeološki model izvira reke Radovne, za katerega smo določili debelino fluvioglacialnih sedimentov do predkvartarne podlage ter morfološko obliko doline. Sledi analiza dinamike podzemne vode ter določitev te v prostoru z geofizikalno metodo. Nato je opisana dinamika pretokov v reki. Sledijo analize fizikalnih parametrov vod ter kemijske značilnosti reke in kraških izvirov. Opisani sta časovna in prostorska spremenljivost izotopskih vrednosti kisika, vodika in ogljika v vodi, snežnici in padavinah. Izračunani so povprečni zadrževalni časi ter povprečne napajalne višine. V zadnjem delu rezultatov so določene komponente v odtoku ter izračunani so deleži za dvokomponentni in trokomponentni mešalni model za izotopsko razdelitev hidrograma zgornjega dela reke Radovne.

V zadnjem poglavju so povzete ugotovitve doktorske disertacije ter podane so smernice za nadaljnje delo.

2 OPIS RAZISKOVALNEGA OBMOČJA

2.1 Geografski položaj

Eksperimentalni poligon izvira reke Radovne se nahaja v severozahodnem delu Slovenije znotraj Triglavskega narodnega parka. Širše območje izvira reke Radovne je zelo redko poseljeno zaradi hladne in senčne lege. Radovna teče v istoimenski dolini med planotama Mežakla na severovzhodu ter Pokljuka na jugozahodu. Obe planoti sta pokriti z gozdom. Nadmorska višina Pokljuke je med 852 in 1630 metri, s povprečno višino 1230 metrov, nadmorska višina Mežakle pa je med 776 in 1593 metri, s povprečno višino 1110 metrov. Od izvira reka Radovna teče proti jugovzhodu, nato se njena smer pri naselju Krnica obrne na severovzhod (Slika 1). Reka teče mimo naselij Grabče, Spodnje Gorje in Podhom, skozi ozko sotesko Vintgar, ki jo obdajata vzpetini Hom (834 m) in Boršt (931 m), in se na koncu zaključi s 13-metrskim slapom Šum. Reka Radovna se po 19,4 km dolgi poti pri naselju Moste pri Žirovnici izliva v reko Savo Dolinko. Dolina je v zgornjem delu široka med 300 in 350 metri, v osrednjem okoli 200 metrov ter v spodnjem delu, na območju soteske, kjer je široka le nekaj metrov. Raziskovanje območja izvira je bilo omejeno na zgornji del toka, približno 1 km gorvodno od izvirov in 3 km dolvodno od izvirov.



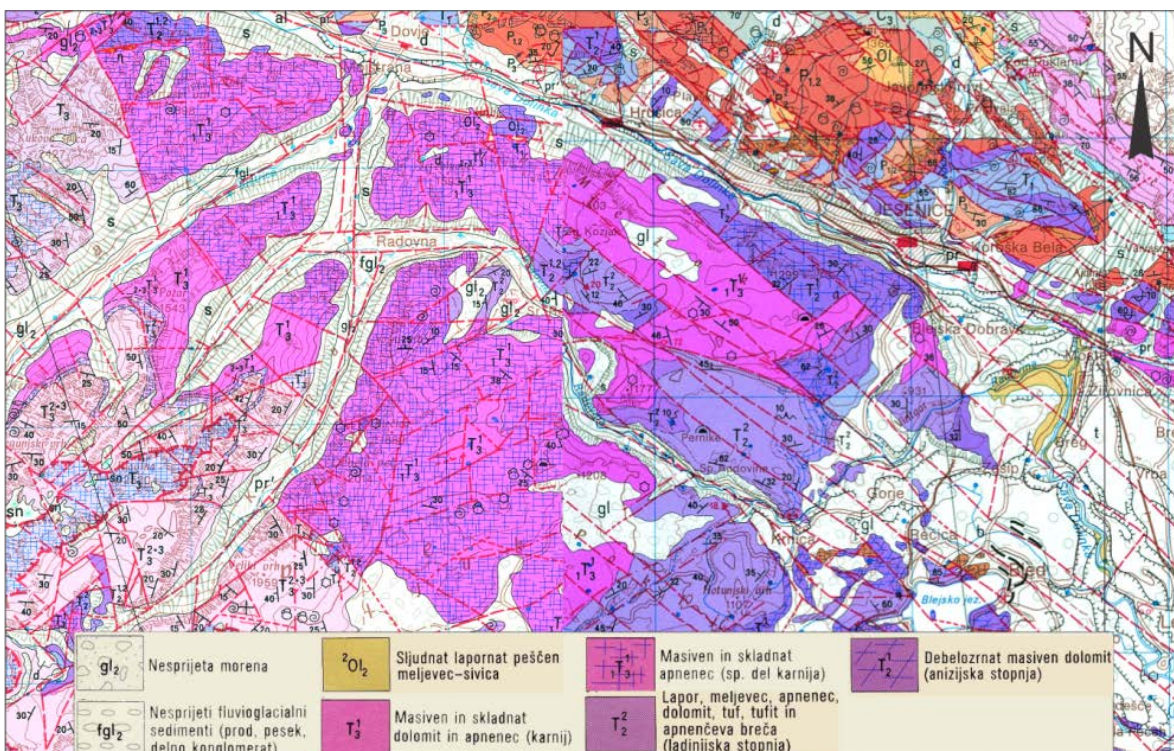
Slika 1: Geografski položaj reke Radovne z napajalnim območjem, izsek iz Državne pregledne karte Slovenije v merilu 1:250.000 (Javne informacije Slovenije, Geodetska uprava Republike Slovenije, DPK250, 2008)

Figure 1: Geographical settings of the Radovna River with the recharge area, section from National general map of the Republic of Slovenia in scale 1:250,000 (Public information of Slovenia, The Surveying and Mapping Authority of the Republic of Slovenia, DPK250, 2008)

2.2 Pregled geoloških razmer

V naslednjem odstavku so na kratko opisane geološke razmere na raziskovalnem poligonu (Slika 2). Povzete so po tolmaču listov Beljak in Ponteoba (Jurkovšek, 1987) ter po tolmaču lista Celovec (Buser, 1980). Podrobnejši opis geoloških razmer je podan v diplomski nalogi (Torkar, 2010).

Območje doline reke Radovne gradijo sedimenti in kamnine triasne, terciarne in kvartarne starosti. Na območju planot Pokljuka in Mežakla prevladujejo cordevolski masivni debelozrnati beli in svetlo sivi apneni dolomiti, čisti dolomiti in apneneci, ter ladinijski mikritni ploščasti in skladoviti apneneci z roženci. Na severozahodnem delu Mežakle ter na predelu pritoka Rečica se pojavljajo apneneci z roženci, lapornati apneneci, laporji, skrilavci in tuf ladinijske starosti. Prav tako se na območju izvira pritoka Rečice nahaja anizijski debelozrnati dolomit. Terciarna oligocenska sivica se pojavlja v spodnjem delu reke, kjer se izliva v Savo Dolinko.



Slika 2: Geološka karta območja reke Radovne (izsek kart OGK: list Beljak in Ponteoba 1:100.000, Beograd, Zvezni geološki zavod, 1987 in list Celovec 1:100.000, Beograd, Zvezni geološki zavod, 1977)

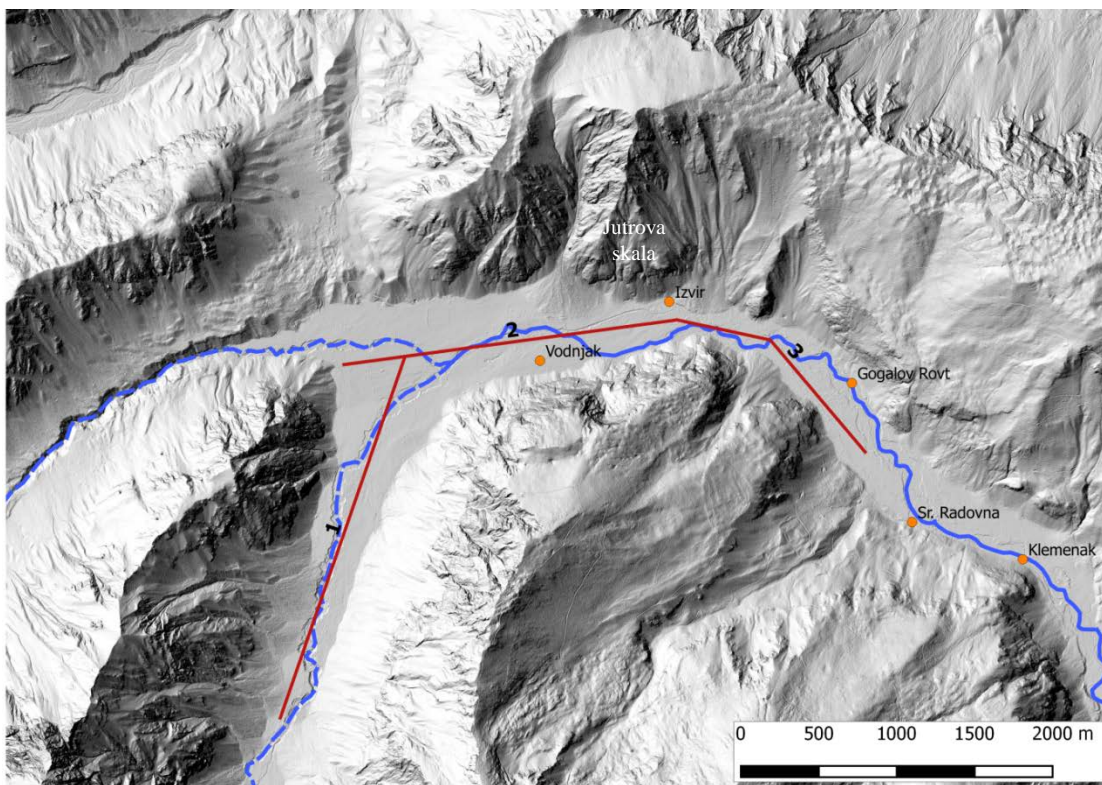
Figure 2: Geological map of the Radovna River area (OGK map sections: sheet Beljak in Ponteoba 1:100.000, Beograd, Zvezni geološki zavod and sheet Celovec 1:100.000, Beograd, Zvezni geološki zavod, 1977)

Jezerska kreda kvartarne starosti se nahaja ob potoku Rečica in na levem bregu Radovne približno 800 m jugovzhodno od zaselka Srednja Radovna, kjer so jo tudi odkopavali za uporabo v kemični in papirni industriji. Kreda lahko zasledimo po celotni dolini v različno obsežnih in debelih

lečastih vložkih ter pomešano med ostali sediment. Na položnejših delih pobočja zasledimo deluvij, na strmih pobočjih Pokljuke pa je odložen pobočni grušč. Prehod pobočnih gruščev v deluvij ni povsem jasno viden. Na širšem območju Radovne so med akumulacijskimi oblikami glacialne erozije najpogostejše morene, ki jih glede na lego pojavljanja delimo na: dolinske morene, pobočne morene in morene na planoti Pokljuka. V dolini reke Radovne se nahajajo nesprijeti fluvioglacialni sedimenti, ki jih sestavljajo prod, pesek in delno konglomerat z vmesnimi lečami kvartarne krede. Debelina teh nanosov je ocenjena na 100 do 140 metrov (Drobne et al., 1975, Torkar in Brenčič, 2015). Najmlajše tvorbe so aluvialne naplavine, ki se nahajajo vzdolž obeh bregov v srednjem delu reke Radovne.

2.3 Morfologija območja izvira

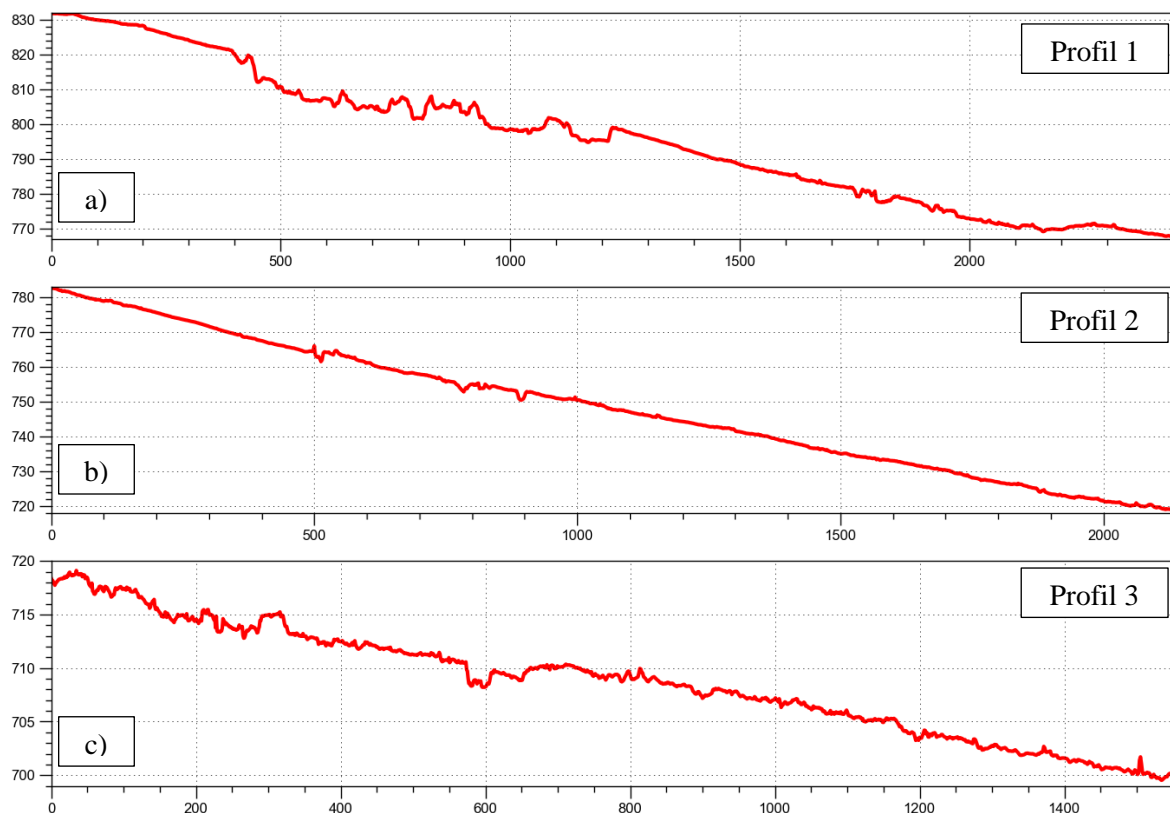
Na ožjem območju izvira je na morfologijo terena najbolj vplivalo ledeniško delovanje. Poleg tipične U-oblike doline z zelo strmimi pobočji in relativno ravnim dnom doline so na terenu vidni tudi številni grbinasti travniki. Poleg ledeniškega delovanja je prisotno tudi rečno delovanje. Reka se je s svojim tokom vrezovala v glacialne nanose in kamnine, posledično so po dolini, predvsem v srednjem in spodnjem toku, prisotne rečne terase.



Slika 3: Profili 1, 2 in 3 za izračun naklona vršaja v zaledju izvira Radovna (Javne informacije Slovenije, Geodetska uprava Republike Slovenije, LIDAR, 2015)

Figure 3: Profiles 1, 2 and 3 for the fan slope calculations in the hinterland of the Radovna spring (Public information of Slovenia, The surveying and mapping authority of the Republic of Slovenia, LIDAR, 2015)

Reka Radovna izvira v Zgornji Radovni na območju Jutrove skale (Slika 3). Na tem območju se nahaja velik strm aluvialni vršaj, ki prihaja iz smeri doline Krme in se na območju izvira stika z relativno ravnimi fluvio-glacialnimi nanosi. Stika vršaja s fluvio-glacialnimi sedimenti na terenu in z lidarskih posnetkov ni bilo mogoče določiti. Kljub temu lahko določimo naklon terena (Slika 4) v dolini Krme, ki je 2,7 % in je na sliki označen kot profil 1. Naklon terena v zaledju izvira Radovne, označen kot profil 2, znaša 3,1 % in je večji kot v dolini Krmi. Teren se nato dolvodno od najvišje točke, kjer izvira reka Radovna, začne izravnjavati in naklon (profil 3) se zniža na 1,4 %, iz česar sklepamo, da se aluvialni vršaj konča nekje na širšem območju izvira oziroma lahko rečemo, da Radovna izvira najvišje ravno tam, kjer se zaključi vršaj. Profil 1 (Slika 4a) je v zgornjem in srednjem delu izrazito neenakomeren, zato ker poteka čez suho strugo hudourniške reke Krmarice. Prav tako je v celoti neenakomeren profil 3, ker je postavljen v zgornjem toku, kjer reka Radovne ne teče v enotni strugi (Slika 4c).

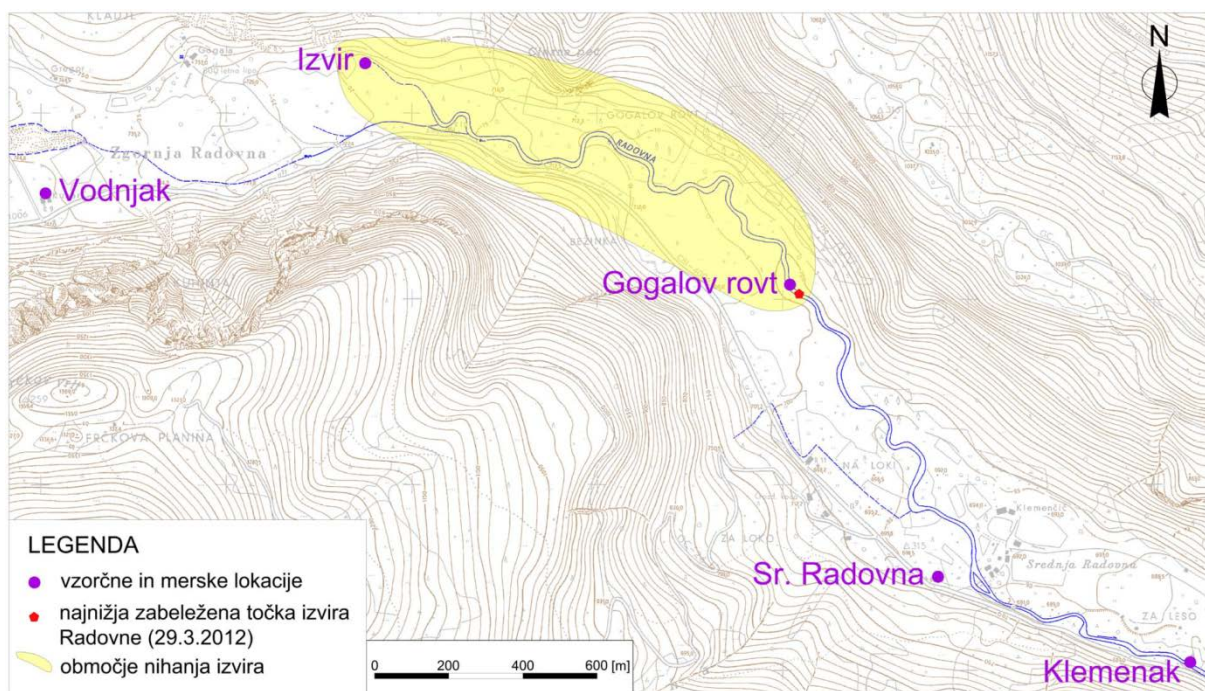


Slika 4: Nakloni za a) profil 1 (2,7 %) dolina Krma, b) profil 2 (3,1 %) zaledje izvira, c) profil 3 (1,4 %) dolvodno od izvira

Figure 4: The slopes for a) profile 1 (2,7 %) the Krma Valley, b) profile 2 (3,1 %) hinterland of the spring, c) profile 3 (1,4 %) downstream from the spring

2.4 Hidrogeologija

Hidrogeološke razmere v dolini reke Radovne so posledica stika dveh litologij in posledično tudi dveh vodonosnikov (Slika 2). Na območju doline Radovne, Kota in Krme se nahajajo fluvio-glacialni sedimenti, ki predstavljajo medzrnski vodonosnik. Napajalno območje reke Radovne pa zajema tudi Mežaklo, Pokljuko in del Julijskih Alp, ki jih sestavljajo apnenci in dolomiti ter predstavljajo kraško-rzopklinski vodonosnik (Torkar in Brenčič, 2015).



Slika 5: Območje nihanja izvira Radovne z najnižjo točko izvira (Javne informacije Slovenije, Geodetska uprava Republike Slovenije, TTN 10, 1999)

Figure 5: The area of the Radovna spring occurrence with the lowest point of discharge (Public information of Slovenia, The surveying and mapping authority of the Republic of Slovenia, TTN 10, 1999)

Padavine med dolinama Kot in Krma poniknejo v debelih zasipih fluvio-glacialnih nanosov. Hudournika Kotarica in Krmarica ter posamezni izviri v istoimenskih dolinah so prisotni samo ob daljših obilnih padavinah, ko se vodonosnik v celoti napolni. Krmarica teče redkeje kot Kotarica. Večina vode, ki pade na območju triglavskega pogorja, ponikne in se med dolinama Kot in Krma podzemno pretaka po obeh dolinah vse do Jutrove skale v Zgornji Radovni, kjer se nahaja glavni izvir reke Radovne. Reka Radovna izvira v obliki številnih razpršenih izvirov, ki nimajo stalne lokacije. Vršaj v zaledju izvirov in fluvio-glacialni sedimenti predstavljajo odprt vodonosnik, v katerem podzemna voda prosto niha v odvisnosti od napajanja s padavinami in snežnico. Posledično se lokacija izvirov spreminja po dolini gorvodno in dolvodno za do dva kilometra. V celotnem raziskovalnem obdobju smo izvir Radovne najnižje opazili 29.3.2012, in sicer 30 metrov dolvodno od merske

lokacije Gogalov rovt (Slika 5). Napajalno območje reke Radovne je ocenjeno na 166 km² (Frantar et al., 2012). Koeficient prepustnosti je za kvartarne sedimente ocenjen med 10⁻³ in 10⁻⁴ m/s (Žlebnič, 1966).

Preostalo napajalno območje zajema velik sistem med seboj povezanih kraško-rzopklinskih vodonosnikov, kjer je površinski odtok zelo majhen in se praktično vse učinkovite padavine infiltrirajo, kar je tipično za reke, ki se v večini napajajo s podzemno vodo (Sear et al., 1999). Terenska opazovanja podzemne vode v fluvio-glacialnih sedimentih v vodnjaku so zabeležila nihanja vsaj 20 m. Podobna nihanja lahko pričakujemo tudi v kraško-rzopklinskih vodonosnikih. Zakrasele kamnine so dobro prepustne s koeficientom prepustnosti med 10⁻⁵ in 10⁻⁷ m/s (Drobne et al., 1975), ladinjski apnenec 6,76·10⁻⁶ in anizijski dolomit 4,17·10⁻⁶ (Verbovšek, 2008)

Poleg glavnega izvira je po dolini prisotnih kar nekaj izvirov in v osrednjem delu celo par kratkih, manj kot 100 m dolgih pritokov (Torkar, 2010). Večina izvirov je klasificiranih kot kraških. Pojavljajo se kot gravitacijski izvir, kot izviri na kontaktu, na robu teras. Poleg teh so v nesprijetih sedimentih prisotni tudi razpršeni izviri. Količina pretoka kraških izvirov zelo niha glede na količino padavin in snežnice. Nekateri izviri so prisotni samo ob visokih vodah in daljših nalivih.

2.5 Klima

Meteorološki podatki za obravnavano območje so dostopni za meteorološke postaje Kredarica in Rateče ter za padavinsko postajo Zgornja Radovna (ARSO, 2016a). Lokacija meteoroloških postaj ter njihovi osnovni podatki so prikazani na sliki in preglednici (Slika 6, Preglednica 1). Za alpsko podnebje je značilno, da največ padavin pade jeseni ter malo manj pozno pomladi in v začetku poletja.

Meteorološka postaja Kredarica neprekinjeno deluje od avgusta 1954. Podnebje na tem območju je najhladnejše podnebje v Sloveniji, s kratkimi in hladnimi poletji ter z dolgimi, ostrimi in zasneženimi zimami. Padavine na tem območju so obilne in lahko skozi celo leto padejo v obliki snega. Povprečne letne padavine za referenčno obdobje 1981–2010 znašajo 2072 mm, povprečna letna temperatura za referenčno obdobje 1981–2010 znaša -1,0 °C (Nadbath, 2014). Na meteorološki postaji Rateče za referenčno obdobje 1981–2010 pade povprečno 1459 mm padavin, povprečna letna temperatura za referenčno obdobje 1981–2010 je 6,6 °C (ARSO, 2016a).



Slika 6: Lokacije meteoroloških postaj (Javne informacije Slovenije, Geodetska uprava Republike Slovenije, DPK250, 2008)

Figure 6: Locations of the meteorological stations (Public information of Slovenia, The surveying and mapping authority of the Republic of Slovenia, DPK250, 2008)

Preglednica 1: Koordinate in nadmorske višine obravnavanih meteoroloških postaj

Table 1: Coordinates and altitudes of the meteorological stations

Postaja	Opis	Geografska širina	Geografska dolžina	Nadmorska višina
Kredarica	glavna meteorološka postaja	46° 23' N	13° 51' E	2514 m
Rateče	glavna meteorološka postaja	46° 30' N	13° 43' E	864 m
Zgornja Radovna	padavinska postaja	46° 26' N	13° 57' E	750 m

2.5.1 Padavinska postaja Zgornja Radovna

V Zgornji Radovni se nahaja padavinska postaja na nadmorski višini 750 m (Slika 7, Slika 8). Na tej lokaciji se opravljajo dnevne meritve višin padavin, snežne odeje in novozapadlega snega od leta 1970. Predhodno od leta 1954, so se meritve opravljale približno 800 m jugozahodno od današnje lokacije (Nadbath, 2012).



Slika 7: Lokacija padavinske postaje Zgornja Radovna
Figure 7: Location of the precipitation station
Zgornja Radovna



Slika 8: Padavinska postaja
Figure 8: The precipitation station

Za referenčno obdobje 1961–1990 je letno povprečje padavin 1850 mm, 1805 mm je letno povprečje za obdobje 1971–2000 in 1777 mm za obdobje 1981–2010. Letne padavine so glede na referenčno obdobje preračunane v odstotke. V letih 2011 in 2015 je bila izmerjena najnižja letna višina padavin od začetka merjenja, kar je 66 % in 64 % padavin za referenčno obdobje 1961–1990 (Preglednica 2). Na območju doline Radovne največ padavin pade jeseni, s povprečjem 584 mm, in najmanj v zimskem letnem času, ko povprečno pade 346 mm padavin (Nadbath, 2012). Povprečna temperatura zraka za zgornji del doline Radovne je bila izračuna s pomočjo meteoroloških postaj Kredarica in Rateče in je za januar $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ in za julij $23,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, s povprečno letno temperaturo $6,0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Preglednica 2: Letne padavine na lokaciji Zgornja Radovna s pripadajočimi odstotki glede na referenčno obdobje 1961–1990

Table 2: Yearly precipitation at the location Zgornja Radovna with corresponding percentages based on the reference period 1961–1990

Leto	P [mm]	%
2010	2277	119
2011	1264	66
2012	1815	95
2013	1829	96
2014	2394	126
2015	1226	64

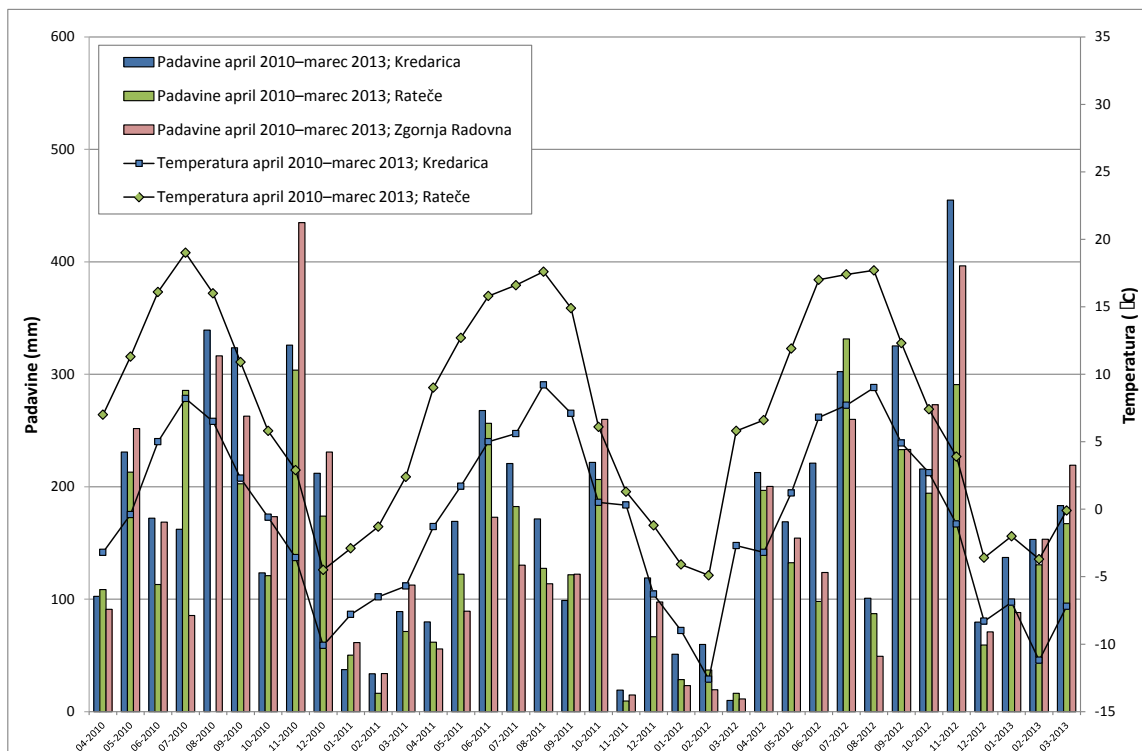
2.5.2 Vremenske razmere v raziskovalnem obdobju

V raziskovalnem obdobju 2011–2013, upoštevajoč povprečne zadrževalne čase (2,4 leta), ki so izračunani v poglavju 6.9, so bile analizirane vremenske razmere od leta 2010 naprej (Grafikon 1). Analiza padavin je bila opravljena na podlagi podatkov s postaj Kredarica, Rateče in Zgornja Radovna ter analiza temperature na podlagi podatkov z meteoroloških postaj Kredarica in Rateče.

Leta 2010 so padavine presegle dolgoletno povprečje s 119 %. Padavine so presegle dolgoletno povprečje v mesecih februar, maj, avgust, september, november in december. V mesecu septembru, med 16.9. in 19.9., je padla velika količina padavin, posledično so bile poplave v kotlinah in v kraškem svetu. Na Kredarici je padlo 196 % več padavin kot v dolgoletnem povprečju, v Ratečah 129 % in v Lescah 230 %. Temperature so bile v prvih mesecih nižje od dolgoletnega povprečja, v aprilu so se dvignile in bile, izjema je bil maj, do septembra nad dolgoletnim povprečjem. Od septembra do konca leta, razen v novembru, so bile temperature nižje od dolgoletnega povprečja.

Leta 2011 je bilo v zgodovini merjenja količine padavin v Zgornji Radovni prvič samo 66 % padavin glede na dolgoletno povprečje. V prvih štirih mesecih je bilo v visokogorju manj kot polovica padavin glede na dolgoletno povprečje. V mesecu juniju in juliju so bile padavine malo nad dolgoletnim povprečjem, do oktobra pod povprečjem. V novembru je bilo ekstremno malo padavin, na Kredarici samo 9 % in v Ratečah 5 % glede na dolgoletno povprečje. Temperature so bile v visokogorju v celem letu, izjema sta bila julij in oktober, nad dolgoletnim povprečjem, aprila je bila na Kredarici povprečna temperatura višja za kar 3,2 °C.

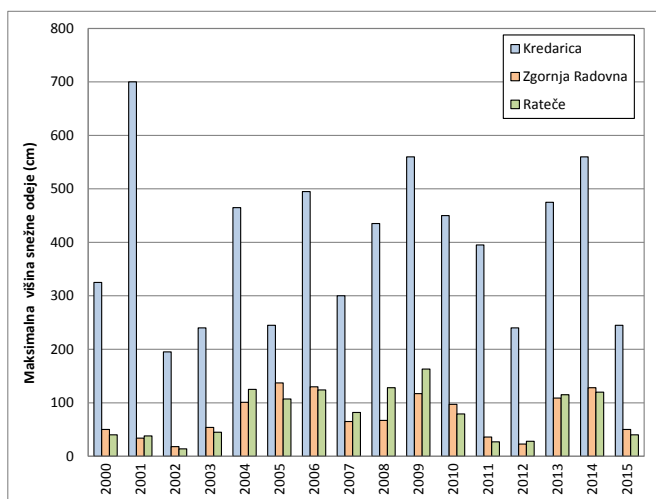
V letu 2012 je bilo v Zgornji Radovni 95 % padavin glede na dolgoletno povprečje. V prvih treh mesecih so bile padavine pod dolgoletnim povprečjem, aprila so bile padavine na Kredarici 140 % in v Ratečah 146 %. Maja in junija so bile padavine take kot dolgoletno povprečje, julija so bile padavine obilne, na Kredarici 147 % in v Ratečah 222 %. Avgusta so zabeležili samo polovico padavin glede na dolgoletno povprečje. Od septembra do novembra so bile padavine nad dolgoletnim povprečjem. Novembra je bilo po celi Sloveniji obilno deževje, na Štajerskem in Koroškem so bile poplave. Na Kredarici je padlo 229 % in v Ratečah 169 % padavin glede na dolgoletno povprečje. Decembra so bile padavine pod dolgoletnim povprečjem. Temperature so bile prva dva meseca pod dolgoletnim povprečjem, februarja na Kredarici za kar 3,9 °C. Marca pa so bile temperature ekstremno višje, nad povprečjem za kar 4,4 °C. Do konca novembra so na Kredarici beležili temperature, ki so nad dolgoletnim povprečjem med 1,1 in 3,6 °C. Decembra so bile temperature pod dolgoletnim povprečjem. Leta 2013 je v Zgornji Radovni padlo 96 % padavin. V prvih treh mesecih in maja so bile padavine nad dolgoletnim povprečjem. Aprila, junija in julija je padlo v povprečju 50 % padavin glede na dolgoletno povprečje. Januarja so bile temperature višje od dolgoletnega povprečja, prav tako aprila, junija in julija. Aprila in julija so bile temperature na Kredarici višje za kar 2,9 °C in 2,4 °C. Februarja, marca in maja so bile temperature nižje, februarja za kar 2,6 °C.



Grafikon 1: Padavine in temperatura za obdobje od aprila 2010 do marca 2013 za postaje Kredarica, Rateče in Zgornja Radovna

Chart 1: Precipitation and temperature for the period from April 2010 to March 2013 for stations Kredarica, Rateče and Zgornja Radovna

Grafikon 2 prikazuje maksimalno količino snega po letih za zadnjih 15 let na postaji Kredarica, Rateče in Zgornja Radovna. Iz diagram je razvidno, da se količina zapadlega snega med leti zelo razlikuje.



Grafikon 2: Maksimalna količina snega na meteorološki postaji Kredarica in Zgornja Radovna med leti 2000 in 2015

Chart 2: The maximal thickness of snowcover at the meteorological station Kredarica and Zgornja Radovna between years 2000 and 2015

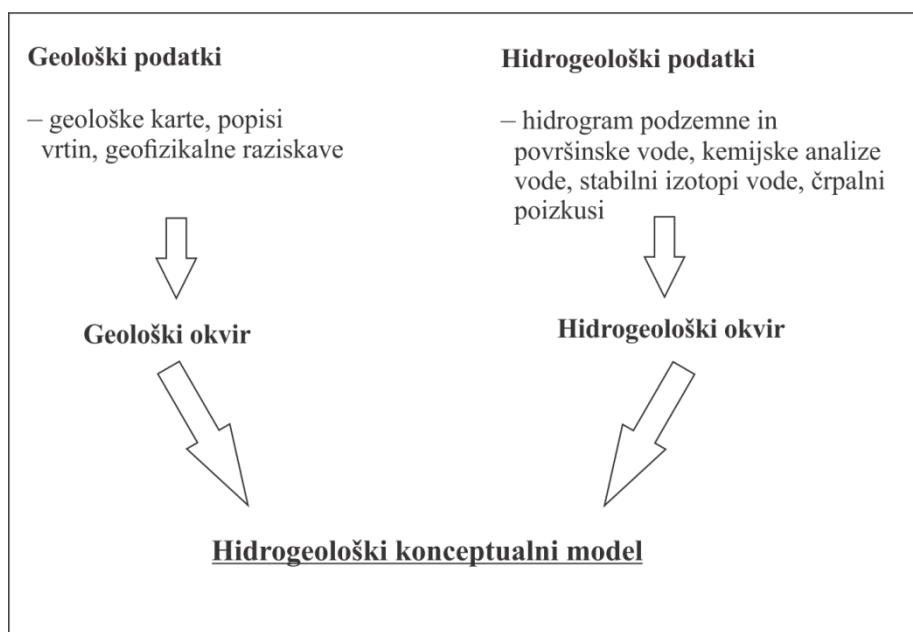
3 TEORETIČNA IZHODIŠČA

3.1 Konceptualni hidrogeološki model

Konceptualni model je poenostavljen slikovni prikaz toka podzemne vode, ki vsebuje vse razpoložljive geološke in hidrogeološke podatke (Anderson in Woessner, 1992). Postavitev konceptualnega modela je nujno potrebna za razumevanje procesov, ki se dogajajo na določenem območju, in za delovanje celotnega sistema ter je osnova za postavitev nadaljnjega numeričnega modela (Wagener et al., 2007).

Za postavitev konceptualnega modela je nujna združitev različnih tehnik raziskav z veljavnimi metodami. Slika 9 predstavlja osnovni razvoj hidrogeološkega konceptualnega modela. Za postavitev hidrogeološkega konceptualnega modela si zastavimo glavna vprašanja (Kresić in Mikszewski, 2012):

- Od kod se napaja podzemna voda?
- Skozi katere tipe poroznih medijev teče podzemna voda?
- Koliko je podzemne vode in kako hitro teče?
- Kam teče podzemna voda?
- Kako se je podzemna voda obnašala v preteklosti in kako se bo spremenila v prihodnosti glede na naravne in antropogene vplive?



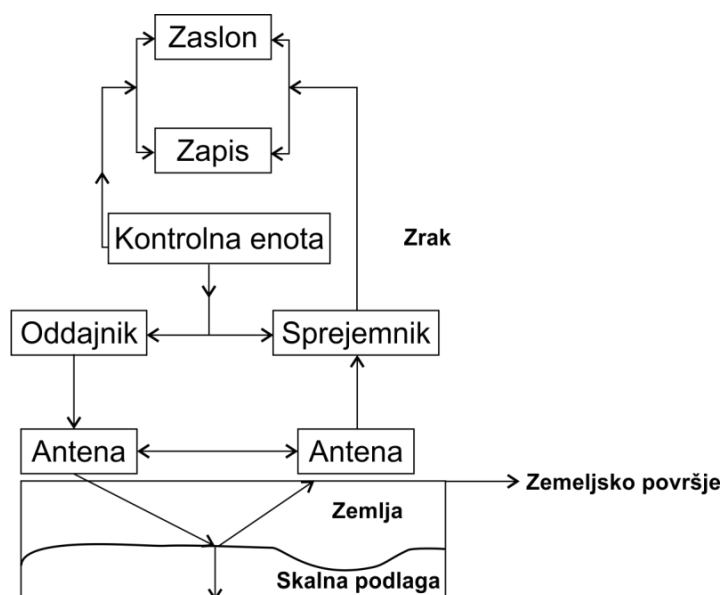
Slika 9: Osnovni razvoj hidrogeološkega konceptualnega modela

Figure 9: Basic development of the hydrogeological conceptual model

3.2 Geofizikalne metode

3.2.1 Georadar

Georadar je geofizikalna metoda, ki uporablja kratke impulze elektromagnetnega valovanja in se uporablja za plitke geološke, inženirske, okoljske in arheološke raziskave (Blindow, 2009). Aplikacija georadarja in principi delovanja so bili opisani v raznih publikacijah (npr. Annan, 2002, Milsom, 2003, Neal, 2004, Blindow et al., 2007, Jol, 2009). Georadar daje najboljše rezultate v kompaktnih kamninah ali v suhih nevezanih sedimentih, vendar se lahko uporablja tudi v vlažnih ali nasičenih snoveh (Gosar, 2011). Georadar je sestavljen iz generatorja signala, oddajne in sprejemne antene ter sprejemnika, ki signal digitalizira, shrani in prikaže na zaslonu (Slika 10). Elektromagnetno valovanje se odbija na različnih geoloških mejah in objektih, ki imajo različne električne lastnosti. Dielektrična konstanta (ϵ) in električna prevodnost (σ) sta parametra, ki poleg lastnosti georadarja določata globinski doseg in ali pride na meji do odbitja signala. Na vsaki meji med plastmi pride do izgube dela energije zaradi odboja in transmisije v globljo plast. Osnovni razlog za izgubo energije je dušenje, ki je kompleksna funkcija dielektričnih in električnih lastnosti snovi. Prav tako pride do izgube energije tudi zaradi absorpcije, pri kateri se elektromagnetno valovanje spremeni v toploto (Gosar, 2011). Čas, ki ga signal porabi, da pride od oddajnika do anomalije ali diskontinuitete in nazaj do sprejemnika, se imenuje TWT ali dvojni potovalni čas, ki je posnet in se kasneje pretvori v globino (Blindow et al., 2007, Jol, 2009).



Slika 10: Komponente georadarskega sistema (prirejeno po Singh, 2006)

Figure 10: Components of the georadar system (modified after Singh, 2006)

Georadarske raziskave se v hidrogeologiji lahko uporabljajo za določanje gladine podzemne vode, za določanje mej aluvialnih vodonosnikov, za določanje plitkih podpovršinskih procesov, ki vplivajo na

tok podzemne vode, za ohranjanje in kontrolo gladine podzemne vode pri odprtih kopih itd. (Beres in Haeni, 1991, Singh, 2006, Roy in Hayashi, 2009, McClymont et al., 2011, Mahmoudzadeh et al., 2012, Rejiba et al., 2012, Afshar et al., 2015). Globinski doseg raziskav je spremenljiv (1–30 metrov) in je odvisen od frekvenca antene, od električnih lastnosti podpovršinskih sedimentov in kamnin ter od vsebnosti vode (Singh, 2006). Višja kot je frekvenca antene, manjši je doseg raziskav, vendar je ločljivost visoka. Če je frekvenca antene manjša, potem je doseg raziskav večji, vendar je ločljivost slabša.

3.2.2 Refleksijska seizmika

Refleksijska seizmika je geofizikalna metoda, s katero določamo podpovršinske geološke strukture. Deluje na principu odboja umetno generiranih seizmičnih valov od podpovršinskih mej, na katerih prihaja do sprememb v gostoti in/ali hitrosti seizmičnih valov. Refleksijska seizmika v principu deluje podobno kot sonar. Na površini s seizmičnim virom ustvarimo seizmični val, ki se kvazisferično širi v globino. Ko pride do meje, kjer se spremeni hitrost seizmičnih valov oziroma gostota snovi – sprememba v litologiji, sprememba v zrnivosti sedimenta, sprememba v nasičenosti z vodo itd. –, pride do delnega odboja. Del energije se na meji lomi in potuje naprej, del pa se odbije, kar na površini zaznamo s senzorji (geofoni). Geofoni ustvarijo časovni zapis odbitega valovanja, z analizami hitrosti uporabljenih seizmičnih valov pa lahko čase prihodov odbojev od posameznih podpovršinskih mej pretvorimo v globino. Končni rezultat refleksijske seizmike je refleksijski seizmični profil.

3.2.2.1 Plitva, visokoločljiva refleksijska seizmika

Plitvejše seizmične refleksijske raziskave spadajo v domeno visokoločljive (HRS–High resolution seismic) in ultravisokoločljive refleksijske seizmike (UHRS– Ultra high resolution seismic). Pri teh so globinski dosegi od nekaj metrov do približno 300 m, vertikalna ločljivost pa je običajno boljša od 15 m (v idealnih primerih celo le nekaj metrov) (Rabbel, 2009). HRS in UHRS se tipično uporabljata v naftni industriji ter tektonskih in hidrogeoloških strukturnih raziskavah, kjer raziskave ciljajo na recentne deformacije mladih sedimentov (npr. Kaiser et al., 2009).

3.3 Meritve pretokov

Meritve pretokov so lahko zvezne ali občasne in jih merimo na različne načine. Nadalje sta opisani samo dve metodi, ki sta bili uporabljeni. Prva metoda je meritev pretokov s kemijsko integracijsko metodo s trenutnim vnosom sledila (Slika 11). Metoda se uporablja za vodotoke, ki imajo velike hitrosti ter neravno dno. V strugo se injicira sledilo, v našem primeru sol, nato pa se v dolvodni smeri s

pomočjo inštrumenta meri koncentracijo tega. Inštrument nam z numerično integracijo izračuna pretok (Boiten, 2008).

Druga metoda, ki je bila uporabljena, je meritev pretoka s hidrometričnim krilom, ki predstavlja osnovno in najpogostejšo metodo, ki zahteva ravno dno in potrebno globino struge. Metoda temelji na merjenju hitrosti na več točkah po celotni širini struge (Slika 12). Hitrost vode se lahko meri na posamezni lokaciji na eni, dveh, treh ali več točkah v odvisnosti od globine vode. Glede na število obratov krila se po pripadajoči enačbi za vsako posamezno krilo izračuna hitrost vode. Skupni pretok na izbranem profilu je seštevek zmnožka vseh hitrosti in površine.



Slika 11: Inštrument Flo-Tracer za meritve pretokov s kemijsko integracijsko metodo s trenutnim vnosom soli

Figure 11: Flo-Tracer instrument for measuring discharge using tracer dilution method with sudden injection



Slika 12: Meritve pretokov s hidrometričnim krilom na lokaciji Klemenak

Figure 12: Discharge measurements with the propeller current-meter at the location Klemenak

3.3.1 Pretočna krivulja

Ko imamo kontinuirane podatke o višinah vode v strugi, lahko iz relacije teh in občasnih meritev pretoka konstruiramo pretočno krivuljo. Priporočeno je, da se pretoke meri večkrat na leto ob različnih vodostajih. Razmerje med višino vode in pretokom je definirano na diagramu s funkcijo, kjer izmerjenemu pretoku na abscisi pripada višina vode na ordinati po enačbi (Boiten, 2008):

$$Q = f(h_w) \quad (1)$$

kjer Q predstavlja pretok v m^3/s in h_w predstavlja višino vode v strugi v metrih. Za določitev pretočne krivulje se najpogosteje uporablja potenčno funkcijo s to enačbo (Boiten, 2008):

$$Q = a(h_w)^b \quad (2)$$

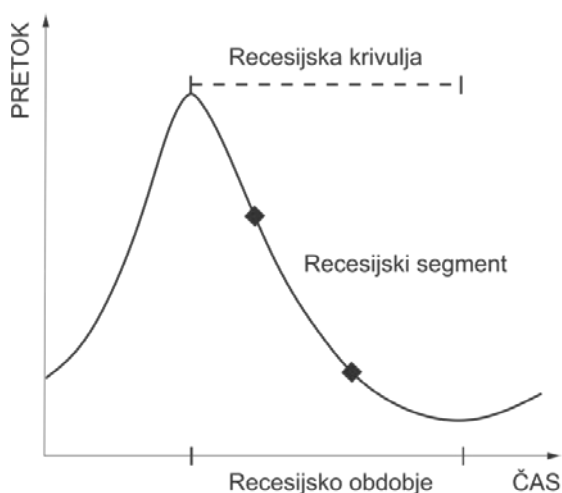
kjer sta a in b parametra za izračun na posamezni lokaciji.

3.3.2 Recesijska krivulja

Recesijska analiza je zelo dobro poznano orodje v hidrogeoloških analizah (Slika 13). V številnih študijah za recesijsko analizo se še danes uporablja enostavna eksponentna enačba (3) (Tallaksen, 1995):

$$Q_t = Q_0^{-at} \quad (3)$$

kjer je Q_t pretok ob času t , Q_0 je pretok ob začetku recesije in a je koeficient recesije, ki predstavlja naklon recesije. Z recesijsko analizo lahko pridobimo koristne informacije glede lastnosti zalog in karakteristik vodonosnika. Analiza se je izkazala za uporabno na številnih področjih, kot so načrtovanje in upravljanje vodnih virov ter oskrba s pitno vodo, napovedovanje nizkih vod za upravljanje z namakalnimi sistemi, upravljanje s hidroelektrarnami in z odpadnimi vodami (Tallaksen, 1995). Za vsak sistem, tako reko kot vodonosnik, lahko za vsak posamezen dogodek posnamemo recesijsko krivuljo, ki pa je odvisna od številnih parametrov, kot so variabilnost v zalogi vode, izguba vode zaradi evaporacije ... Zaradi visoke variabilnosti posameznih segmentov recesije se te individualne recesijske krivulje lahko združi v eno glavno recesijsko krivuljo (MRC – master recession curve), ki nam poda povprečne lastnosti višin, pretoka oziroma katere koli druge spremenljivke (Posavec et al., 2006). Program, ki smo ga pozneje uporabili za analizo podatkov, je podrobno opisan v literaturi (Posavec et al., 2006, Posavec et al., 2010). Program je zasnovan tako, da nam ponuja pet različnih linearnih oziroma nelinearnih modelov recesije (linearni, logaritemski, polinomski, eksponentni in potenčni) z namenom, da dobimo najustreznejšo glavno recesijsko krivuljo, ki jo izberemo na podlagi linearnega koeficienta determinacije R^2 . Ta metoda je avtomatiziran proces in sodi med objektivne pristope izračuna MCR.

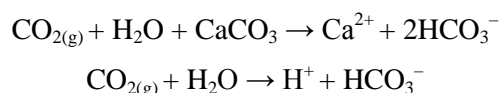


Slika 13: Recesijska krivulja (prirejeno po Tallaksen, 1995)

Figure 13: The recession curve (modified after Tallaksen, 1995)

3.4 Geokemična sestava vode

Geokemična sestava vode je pomembna za določitev kemijskih lastnosti vode ter za določitev geokemičnih procesov. Širok spekter različnih elementov lahko postane raztopljen v površinski in podzemni vodi zaradi interakcije z atmosfero ter zaradi stika z zemljo, s sedimenti in s kamnino. Podzemne vode, ki so dalj časa v stiku s sedimenti in kamnino, imajo ponavadi višje koncentracije snovi, kot jih ima površinska voda. Prav tako imajo podzemne vode, ki se nahajajo globlje pod površino in so bile v stiku s kamnino dalj časa, višje koncentracije snovi kot plitvejšje podzemne vode mlajše starosti. Najpogostejši geokemični procesi v vodi so: redukcijsko-oksidacijska reakcija, ionska izmenjava ter karbonatna reakcija, ki ima velik vpliv na razvoj podzemne vode. Ogljikov dioksid, ki izhaja iz oksidacije organskih snovi, se raztopi v vodi, preide iz plina v tekoče stanje in z vodo tvori ogljikovo kislino H_2CO_3 (White, 2013). Reakcija med ogljikovim dioksidom in CaCO_3 je:



Karbonatna reakcija je osnova za razumevanje raztapljanja in obarjanja CaCO_3 . Tako sledi, da se zaradi povečanja CO_2 raztopi več CaCO_3 in obratno. Vsi ti geokemični procesi in antropogeni vplivi imajo vpliv na kakovost pitne vode.

Geokemična analiza vode obsega terenske in laboratorijske meritve. Najpomembnejši terenski meritvi sta temperatura in pH. Temperatura ima pomemben termodinamski nadzor pri geokemičnih reakcijah in topnosti mineralov. pH je negativni logaritem vodikovega iona, ki je vključen v večino geokemičnih reakcij. pH se lahko izmeri tudi v laboratoriju, vendar je bilo ugotovljeno, da se pogosto spremeni zaradi spremembe temperature in zaradi izgube CO_2 (Clark, 2015). Geokemična analiza vode ponavadi vključuje glavne katione (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+) in anione (HCO_3^- , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-}) ter sledne prvine. Glavni ioni so izraženi v mg/l, sledne prvine pa v $\mu\text{g/l}$.

3.5 Stabilni izotopi in izotopska frakcionacija

V naravi obstaja veliko elementov, ki imajo stabilne in nestabilne izotope. Stabilni izotopi, najpogosteje elementi, kot so vodik, ogljik, dušik, kisik in žveplo, predstavljajo uporabno naravno sledilo za raziskovanje in sledenje kroženja vode in se danes vse pogosteje uporabljajo pri hidrogeoloških raziskavah. Stabilni izotopi se uporabljajo kot sledilo za kroženje vode, ogljika, hranil in raztopljenih snovi (Clark in Fritz, 1997).

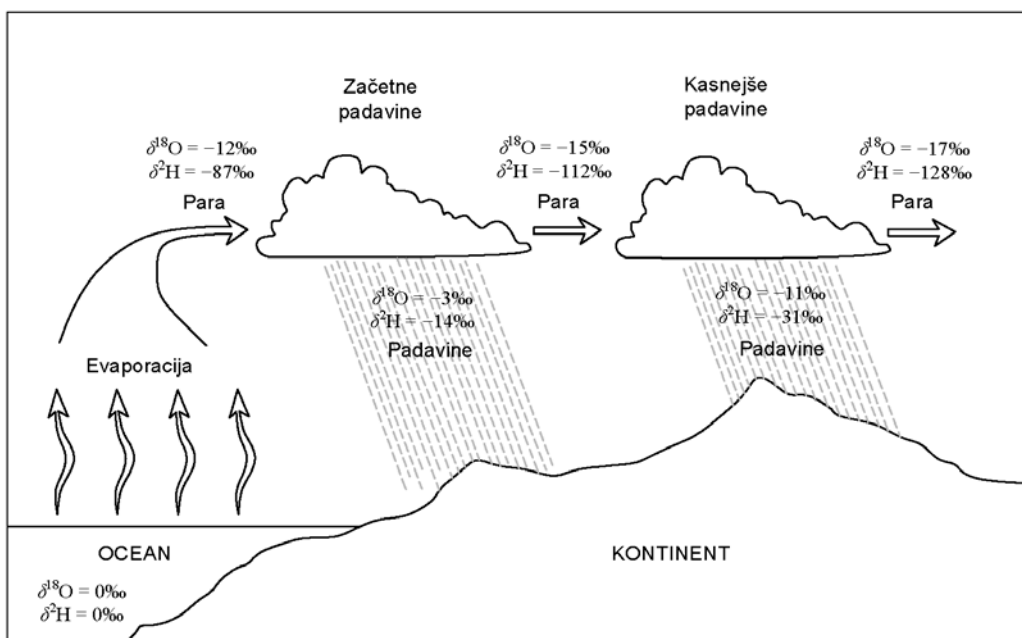
Izotopi istega elementa imajo enako število protonov in elektronov ter drugačno število nevtronov (Mook, 2006). Izotopsko sestavo elementov podajamo kot razmerje med težjim in lažjim stabilnim izotopom v obliki vrednosti δ (delta), izražene v tisočinkah (‰), relativno glede na mednarodni standard V-SMOW (Vienna – Standard Mean Ocean Water). Vrednosti izrazimo z enačbo (4):

$$\delta^{YZ} = \left(\frac{R_x}{R_s} - 1 \right) \times 1000 \text{ (‰)} \quad (4)$$

kjer YZ predstavlja npr. ^{18}O , R razmerje med težkim (manj pogostim) in lažjim (bolj pogostim) izotopom (npr. $^2\text{H}/^1\text{H}$, $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$), simbola R_x in R_s pa predstavljata razmerja v vzorcu (x) in standardu (s) (Kendall in McDonnell, 1998). Negativna vrednost δ pomeni, da je v vzorcu manj težjega izotopa kot v standardu.

3.5.1 Izotopi kisika in vodika

Kisik in vodik imata tako stabilne kot nestabilne (radioaktivne) izotope. Vodik ima tri izotope, stabilna ^1H -protij in ^2H -devterij ter radioaktivni ^3H -tricij. Kisik ima sedem izotopov, od katerih so štiri radioaktivni (^{14}O , ^{15}O , ^{19}O in ^{20}O), ostali trije, ^{16}O , ^{17}O in ^{18}O , stabilni (Gat, 2010). Glede na različne kombinacije izotopske sestave kisika in vodika v naravi obstaja devet različnih molekul vode. Od teh le tri, H_2^{16}O , H_2^{18}O in $^1\text{H}^2\text{H}^{16}\text{O}$, nastopajo v takih koncentracijah, da jih lahko merimo (Araguás-Araguás et al., 2000). Razlike v izotopski sestavi vode so posledica izotopske frakcionacije, ki se zgodi med evaporacijo in kondenzacijo (zamrzovanjem) vode (Slika 14). Do frakcionacije prihaja, ko težje molekule vode, H_2^{18}O in $^1\text{H}^2\text{H}^{16}\text{O}$, ostajajo ali prehajajo v tekočo ali trdno fazo, lažje pa prehajajo v plinsko fazo (Araguás-Araguás et al., 2000).



Slika 14: Spreminjanje izotopske sestave padavin in zračne vlage proti notranjosti kontinenta (prirejeno po Hoefs, 1997)

Figure 14: Changing the isotopic composition of precipitation and vapour inland (modified after Hoefs, 1997)

Izotopska frakcionacija se pojavlja pri vsaki termodinamski reakciji. Rezultat omenjenih reakcij je nesorazmerna koncentracija izotopa enega nad drugim, ki se izraža s frakcionacijskim faktorjem α . Ta predstavlja izotopsko razmerje reaktanta in produkta (Clark in Fritz, 1997):

$$\alpha = \frac{R_{reaktant}}{R_{produkt}} \quad (5)$$

$$\text{npr. } \alpha^{18O}_{voda-zračna\ para} = \frac{(^{18}O/^{16}O)_{voda}}{(^{18}O/^{16}O)_{zračna\ para}} \quad (6)$$

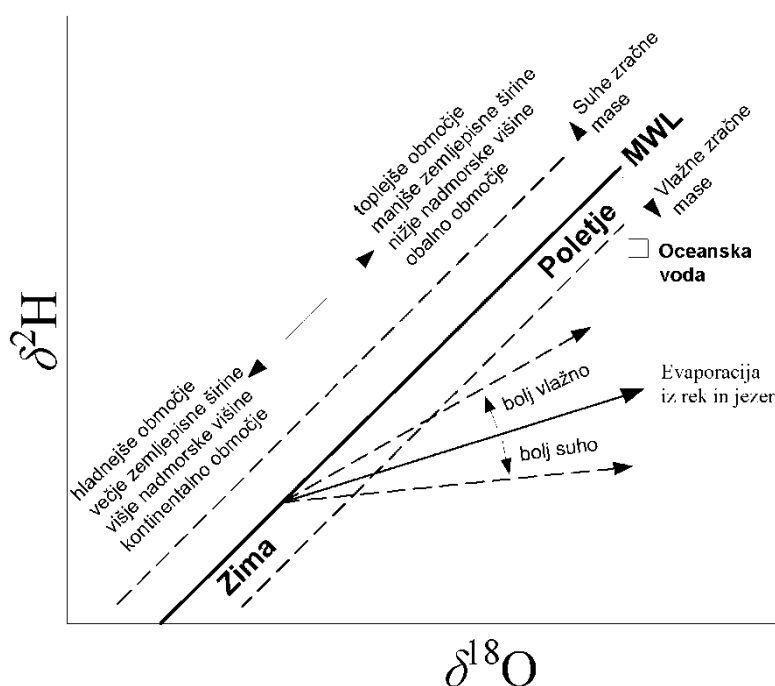
Rezultat frakcionacijskih procesov v vodi in v raztopinah je edinstvena izotopska sestava (razmerje težkega proti lahkemu izotopu) in je značilna za njihov izvor oziroma za procese, ki so povzročili njihov nastanek (Kendall in Caldwell, 1998). Izotopski efekti so v glavnem zelo majhni, $\alpha \approx 1$, zato se uporablja odklon od te vrednosti in ne frakcionacijski faktor.

Frakcionacija med vodo in zračno paro je glavnega pomena za hidrološki krog in ima pomembno vlogo pri delitvi izotopov ^{18}O in 2H po različnih rezervoarjih (ocean, para, dež, odtok, podzemna voda, sneg in led) (Clark in Fritz, 1997). Kljub kompleksnosti hidrološkega kroga se izotopska sestava ^{18}O in 2H obnaša dokaj predvidljivo. Izotopska sestava ^{18}O in 2H je v površinskih vodah povezana na globalni ravni z enačbo, ki jo opredelimo kot globalno meteorno premico (Craig, 1961).

$$\delta ^2H = 8 \times \delta^{18}O + 10 (\text{‰}) \quad (7)$$

Globalna meteorna premica (Global Meteoric Water Line – GMWL) predstavlja povprečje mnogih lokalnih in regionalnih meteoritnih premic. Do odstopanj od globalne meteorne premice prihaja zaradi različnih klimatskih in geografskih parametrov. Lokalne meteorne premice se razlikujejo od globalne tako po naklonu kot tudi po odseku. Ključne ugotovitve Craiga (1961) so, da so za hladna območja značilne vode z nižjo izotopsko sestavo ter za topla območja vode z manj negativnimi deli vrednostimi (Slika 15). Te razlike so bile kmalu spoznane kot orodje za karakterizacijo napajanja podzemne vode in so pomembne za raziskave podzemne vode. Pri interpretaciji izvora zračnih mas si pomagamo z devterijevim presežkom d , ki je definiran z naklonom 8 ter se ga izračuna po enačbi (Dansgaard, 1964):

$$d = \delta ^2H - 8 \times \delta^{18}O \quad (8)$$



Slika 15: Pregledni diagram hidroloških procesov, ki vplivajo na izotopsko sestavo kisika in vodika v vodi (prirejeno po SAHRA, 2016).

Figure 15: Summary diagram of how hydrologic processes affect oxygen and hydrogen isotopic composition of water (modified after SAHRA, 2016).

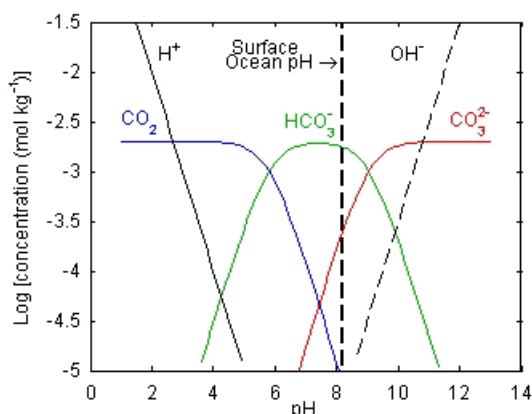
3.5.1.1 Snežnica

Snežna odeja in kasneje snežnica predstavljata v vodnem krogu izjemno pomembno vlogo, saj snežna odeja zadrži večje količine vode, ki v spomladanskem času napaja vodonosnike in površinske vodotoke. Izotopsko sestavo snežne odeje v veliki meri kontrolirajo variacije v posameznih padavinskih dogodkih. Modeliranje količine snežnice v podzemni vodi ali v odtoku v reki je zahtevno zaradi izotopske frakcionacij med nastajanjem snega, akumulacije, ablacije in faznih sprememb med taljenjem snega (Cooper, 1998). Pred taljenjem snega so prisotne variacije v izotopski sestavi zaradi procesov taljenja in ponovnega zamrzovanja snega, zaradi sprememb v kristalni strukturi snega, zaradi izmenjave z vlago v atmosferi in v tleh. V raziskavah snega v Julijskih Alpah in Karavankah je bilo ugotovljeno, da je spremenljivost izotopske sestave kisika v snežnih odkopih z globino velika in znaša tudi več kot 10 ‰ (Vreča et al., 2013a). Prav tako je bilo v raziskavah snežnice ugotovljeno, da je na majhnem prostoru variabilnost velika (Vreča et al., 2012, Ortar et al., 2013, Vreča et al., 2013c, Vreča et al., 2014a). Tako terenske (Hooper in Shoemaker, 1986) kot laboratorijske (Herrmann et al., 1981) raziskave so pokazale bistvene razlike med izotopsko sestavo snežnice in povprečno izotopsko sestavo snežne odeje (Penna et al., 2014). Izotopska sestava kisika v snežnici in v snežni odeji je po raziskavah med celotnim obdobjem taljenja višja. Sprememba izotopske sestave kisika v snežnici je bila zabeležena za 3,5 ‰ (Taylor et al., 2001, 2002). Glede na izotopsko sestavo kisika je vrednost za

snežnico nižja kot za podzemno vodo oziroma staro vodo. Med taljenjem snega je snežna odeja podvržena izotopski metamorfozi, v kateri se izotopska sestava snežne odeje spremeni. Te spremembe so zaradi evaporacije in sublimacije na površini ali znotraj snežne odeje (Earman et al., 2006).

3.5.2 Izotopska sestava raztopljenega anorganskega ogljika (DIC)

V naravi se ogljik pojavlja v obliki dveh stabilnih izotopov, ^{12}C in ^{13}C , ter radioaktivnega izotopa ^{14}C (Mook, 2001). V karbonatnih vodonosnikih je ogljik v podzemni vodi rezultat kompleksnih odnosov med CO_2 v tleh in interakcijo kamnina – voda, kjer ogljik vstopa v raztopino iz karbonatnih kamnin (Clark in Fritz, 1997). Ko se meteorne vode infiltrirajo, se uravnotežijo s CO_2 v tleh, kjer je količina plina veliko višja kot v atmosferi. Posledično prihaja do raztapljanja CO_2 v tleh in ustvari se ogljikova kislina, ki znižuje pH in poveča agresivnost podzemne vode in s tem večje preperevanje. Med prehajanjem CO_2 v vodo nastajajo štiri zvrsti raztopljenega anorganskega ogljika (DIC): $\text{CO}_{2(\text{aq})}$, raztopljen v vodi, pri nizkih pH prevladuje ogljikova kislina H_2CO_3 , hidrogenkarbonatni ion HCO_3^- prevladuje pri pH med 6,4 in 10,3, CO_3^{2-} prevladuje samo pri zelo alkalnih pogojih (Slika 16).



Slika 16: Koncentracije raztopljenih karbonatnih snovi v odvisnosti od pH (Zeebe in Wolf-Gladrow, 2001)

Figure 16: Concentrations of dissolved carbonate species in relation to pH (Zeebe in Wolf-Gladrow, 2001)

Prisotnost raztopljenega anorganskega ogljika v morski vodi, v podzemni ter površinski vodi omogoča raziskave izmenjevalnih procesov med paro in vodo, prav tako je odlično sledilo za podzemne vode, saj se izotopska sestava DIC v teh sistemih spreminja glede na doprinose različnih virov in porabnikov (Mook, 2006). Izotopska sestava raztopljenega anorganskega ogljika se prav tako uporablja za razumevanje biogeokemijskih reakcij, ki kontrolirajo alkalnost vode v določenem povodju, in za sledenje izvora bikarbonatnega aniona, ki predstavlja dominantni anion v plitvi podzemni vodi (Bullen in Kendall, 1998). Na splošno je DIC v podzemni vodi mešanica ogljika, ki se sprosti med razgradnjo organskega materiala v napajalnem zaledju, in so vrednosti $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ okrog -28‰ (Deines, 1980), med raztapljanjem kalcita in drugih karbonatnih mineralov z vrednostjo $\delta^{13}\text{C}_{\text{CaCO}_3}$ med -14‰ in $+1\text{‰}$

(Clark in Fritz, 1997) in med difuzijo atmosferskega CO₂ z vrednostjo $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ okoli -8‰ (Mook, 2001, Porowska, 2015).

3.6 Izotopska separacija hidrograma

Podatki o izotopski sestavi kisika in vodika v podzemni vodi so enotni v času in prostoru in se spremenijo samo z mešanjem z vodami, ki imajo drugačno izotopsko sestavo. Prav zaradi tega se hidrogram razdeli na komponente pred in po dogodku (Buttle, 1998). Začetki ločevanja hidrogramov segajo v leto 1958 (Linsley in Kohler), ko so bile metode ločevanja grafične, kjer se je hidrogram ločilo na hitro (padavine) in počasno (podzemna voda) komponento. Uporaba izotopov kot orodja za ločevanje hidrogramov je pomenila velik napredek v hidrologiji. Prva objava izotopske separacije hidrograma sega v leto 1969 (Hubert et al., 1969). V zgodnjih študijah so za ločevanje hidrograma uporabljali tricij, danes se v raziskavah vse bolj pogosto uporabljajo podatki o izotopski sestavi kisika in vodika. Od takrat je bilo objavljenih kar nekaj člankov, ki definirajo pretok kot komponento vode pred dogodkom (stara voda) in vodo samega dogodka (nova voda) v različnih klimatskih in geoloških pogojih ter pri različnih rabah prostora. Pinder in Jones (1969) sta bila ena prvih, ki sta ločila komponente pretoka z masno bilanco. Da sta v odtoku ločila padavinsko komponento in komponento podzemne vode, sta uporabila vsoto različnih raztopljenih snovi.

Izotopsko ločevanje hidrograma je možno, če imata stara in nova voda izrazito različni izotopski vrednosti. Delež nove vode se izračuna po spodnjih enačbah.

$$Q_t = Q_p + Q_e \quad (9)$$

$$C_t Q_t = C_p Q_p + C_e Q_e \quad (10)$$

$$F_e = \frac{C_t - C_p}{C_e - C_p} \quad (11)$$

$$F_p = \frac{C_t - C_e}{C_p - C_e} \quad (12)$$

Q_t je pretok v reki, Q_p prispevek stare vode, Q_e prispevek nove vode, C_t , C_p in C_e so izotopske vrednosti delta (δ) v reki, v stari vodi in v novi vodi ter F_e in F_p sta deleža nove vode in stare vode v reki.

Za veljavo enačbe (9) in (10) je potrebnih pet predpostavk (Buttle, 1994, Klaus in McDonnell, 2013):

1. izotopski sestavi nove in stare vode sta bistveno različni;
2. izotopska sestava nove vode je konstantna v prostoru in času;
3. izotopska sestava stare vode je konstantna v prostoru in času;
4. prispevek talne vode v vadozni coni v primerjavi z odtokom mora biti zanemarljiv ali pa mora biti izotopska sestava talne vode podobna izotopski sestavi podzemne vode in

5. skladiščenje površinske vode je glede na celotni hidrogram zanemarljivo.

Dewalle et al. (1988) je uporabil trokomponentni model za izotopsko separacijo hidrograma (padavine, talna voda in podzemna voda) za oceno razmerja med posameznimi komponentami. Princip izračuna je isti, edino za trokomponentni model potrebujemo dve sledili. Kot sledilo se lahko poleg stabilnih izotopov uporabijo tudi geokemijski parametri (elektroprevodnost, Cl^- , Si, SiO_2 , DOC in temperatura). Tako kot iz enačb (9) in (10) lahko ekvivalentno postavimo enačbe za trokomponentni model (Hinton et al., 1994, Zongxing et al., 2016).

$$Q_t = Q_g + Q_{pr} + Q_{sm} \quad (13)$$

$$C_t^1 Q_t = C_g^1 Q_g + C_{pr}^1 Q_{pr} + C_{sm}^1 Q_{sm} \quad (14)$$

$$C_t^2 Q_t = C_g^2 Q_g + C_{pr}^2 Q_{pr} + C_{sm}^2 Q_{sm} \quad (15)$$

$$F_{sm} = \frac{\left(\frac{C_{pr}^1 - C_s^1}{C_{pr}^1 - C_g^1} \right) - \left(\frac{C_{pr}^2 - C_s^2}{C_{pr}^2 - C_g^2} \right)}{\left(\frac{C_{sm}^2 - C_{pr}^2}{C_{pr}^2 - C_g^2} \right) - \left(\frac{C_{sm}^1 - C_{pr}^1}{C_{pr}^1 - C_g^1} \right)} \quad (16)$$

$$F_g = \frac{\left(\frac{C_{pr}^1 - C_s^1}{C_{pr}^1 - C_{sm}^1} \right) - \left(\frac{C_{pr}^2 - C_s^2}{C_{pr}^2 - C_{sm}^2} \right)}{\left(\frac{C_g^2 - C_{pr}^2}{C_{pr}^2 - C_{sm}^2} \right) - \left(\frac{C_g^1 - C_{pr}^1}{C_{pr}^1 - C_{sm}^1} \right)} \quad (17)$$

$$F_{pr} = 1 - F_{sm} - F_g \quad (18)$$

Q_t je pretok v reki, Q_g prispevek stare vode, Q_{pr} prispevek padavin, Q_{sm} prispevek snežnice, C_t , C_g , C_{pr} in C_{sm} (‰) so izotopske vrednosti delta (δ) v reki, v stari vodi, padavinah in snežnici ter F_{sm} , F_g in F_{pr} deleži posameznih komponent. Delta vrednosti C^1 in C^2 predstavljata uporabljeni sledili $\delta^{18}\text{O}$ in $\delta^2\text{H}$.

3.6.1 Negotovost mešalnega modela

Negotovost izračunanega deleža stare in nove vode je bila določena z uporabo Gaussove normalne porazdelitve (Genereux, 1998). V dvokomponentnem modelu je predpostavljeno, da je izračunana negotovost odvisna od analitske napake meritev in od razlike izotopske sestave stare in nove vode. Pri opredelitvi analitske napake imamo nekaj izbire, in sicer morajo biti za komponente v modelu (stara voda, nova voda in reka) vzete iste količine kot npr. za vse komponente povprečne napake, za vse komponente standardna deviacija ipd. (Meyer, 1975). Če sprejmemo, da je negotovost vsake

spremenljivke neodvisna od negotovosti drugih spremenljivk, je relativna napaka w_{fp} dobljena z združitvijo enačb (11), (12) in (19):

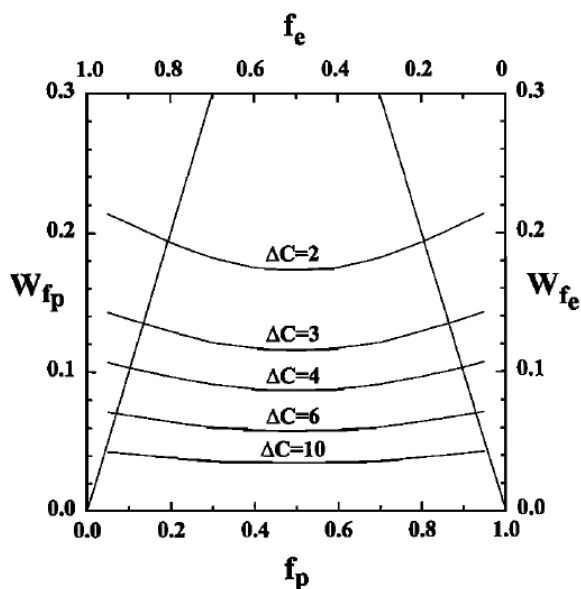
$$w_f = \sqrt{\left(\frac{\partial y}{\partial x_1} w_{x1}\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial x_2} w_{x2}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial y}{\partial x_n} w_{xn}\right)^2} \quad (19)$$

$$w_{fp} = \sqrt{\left(\frac{C_e - Ct}{(C_e - Cp)^2} w_{cp}\right)^2 + \left(\frac{Ct - Cp}{(C_e - Cp)^2} w_{ce}\right)^2 + \left(\frac{-1}{(C_e - Cp)^2} w_{ct}\right)^2} \quad (20)$$

kjer w predstavlja negotovost posamezne spremenljivke, ki je določena s podpisano črko. Izračun relativne napake je podan kot odstotek (Genereux, 1998).

Iz enačbe (20) je razvidno, da je dobro, če je razlika med staro in novo vodo čim večja, ker je zaradi tega napaka w_{fp} manjša (Grafikon 3). Enačbo (20) za negotovost, ko ločujemo staro in novo vodo z izotopsko sestavo $\delta^{18}\text{O}$, na novo napišemo (21), tako da je poudarjena pomembnost deleža stare vode (f_p) in nove vode (f_e) ter razlika med njuno izotopsko sestavo ($C_e - C_p$).

$$W_{fp} = \sqrt{\left(\frac{f_p}{(C_e - Cp)^2} W_{cp}\right)^2 + \left(\frac{f_e}{(C_e - Cp)^2} W_{ce}\right)^2 + \left(\frac{-1}{(C_e - Cp)^2} W_{ct}\right)^2} \quad (21)$$



Grafikon 3: Negotovost deležev f_p in f_e kot funkcija f_p in f_e za separacijo hidrograma na staro in novo vodo z $\delta^{18}\text{O}$ (Genereux, 1998)

Chart 3: Uncertainty in f_p and f_e as a function of f_p and f_e for hydrograph separation of event and pre-event water with $\delta^{18}\text{O}$ (Genereux, 1998)

4 PREGLED DOSEDANJIH RAZISKAV

4.1 Geokemija površinskih in podzemnih voda

Po svetu se izvajajo številne geokemične raziskave površinskih in podzemnih voda za razumevanje mehanizmov, ki kontrolirajo kemično sestavo vode (Gibbs, 1970), kot so kemično preperevanje (Pu et al., 2013), evaporacija (Cappa et al., 2003, Zhang et al., 2011), padavine (Li in Zhang, 2009, Mohammed et al., 2014), snežnica (Cable et al., 2011), antropogeni procesi (Xu et al., 2011) in drugi. Geokemične študije naravnih voda imajo velik pomen pri določitvi hidroloških in hidrogeoloških karakteristik raziskovanega porečja s pripadajočim napajalnim območjem (Petelet et al., 1998, Aquilina et al., 2005, Wu et al., 2009, Kanduč et al., 2012, Yang et al., 2012, Kattan, 2015). Še posebej so geokemične raziskave uporabne na krasu, kjer so prisotni posebni geokemijski procesi, ki so povezani s sestavo kamnin, ki sestavljajo vodonosnik, in z značilnim kraškim površjem, ki je posledica interakcije vode in kamnine (Han in Liu, 2001, Han in Liu, 2004, Moral et al., 2008). Kraški vodonosniki so zelo heterogeni, kar vpliva na režim pretoka izvirov in posledično na zadrževalne čase podzemne vode (Petrič, 2002). Zato je časovna in prostorska porazdelitev glavnih kationov in anionov v vodi zelo pomembna za razumevanje številnih kemičnih in fizikalnih procesov, ki so pod vplivom geoloških in podnebnih razmer ter antropogenih dejavnosti (Gibbs, 1970, Meybeck, 1987).

4.2 Izotopske raziskave vodika, kisika in ogljika v vodi

Mehanizme in procese, omenjene v prejšnjem poglavju, lahko raziskujemo tudi s pomočjo časovne in prostorske porazdelitve izotopske sestave vodika, kisika in ogljika v vodi (Kendall in Doctor, 2003, O'Driscoll et al., 2005, Brencic in Vreca, 2006, Brencic in Vreca, 2007, Ryu et al., 2007, Brenčič in Poltnig, 2008, Kanduč et al., 2008, Ogrinc et al., 2008, Wang et al., 2012, Cerar in Urbanc, 2013, Jeelani et al., 2013, Kanduč et al., 2013, Szocs et al., 2013, Brenčič in Vreča, 2014, Mezga et al., 2014, Rman, 2016). Izotopi predstavljajo uporabno naravno sledilo, ki nam pomaga opisati in slediti vode skozi hidrološki krog (Mook, 2001, Ogrinc et al., 2008, Gat, 2010, Schulte et al., 2011). Izotopska sestava kisika in vodika je uporabna za določanje zadrževalnih časov (Stewart in McDonnell, 1991, Vitvar in Balderer, 1997, Vitvar et al., 2002, Rodgers et al., 2005), za določanje napajanja in dotokov vode v sistem (Blasch in Bryson, 2007, Yeh et al., 2011, Yeh et al., 2014) in za določitev mešanja različnih vod znotraj enega sistema (Clark in Fritz, 1997, Glynn in Plummer, 2005).

4.3 Izotopska separacija hidrograma

Izotopska separacija hidrograma uporablja izotope za določanje komponent odtoka (Ladouche et al., 2001, Trček, 2001, Bao et al., 2009, Kong in Pang, 2011, Jeelani et al., 2012, Kong in Pang, 2012, Klaus in McDonnell, 2013, Zhou et al., 2015, Jeelani et al., 2016). Za izotopsko separacijo hidrograma je zelo pomembna določitev števila vhodnih komponent (Phillips in Gregg, 2003, Huth et al., 2004) in

njihove izotopske sestave, npr. snežnice (Frisbee et al., 2010, Penna et al., 2014, Penna et al., 2016) in padavin (Vreča et al., 2008, 2014b, 2015). Veliko avtorjev opozarja na pomembnost izotopske frakcionacije snega in snežnice in posledično variabilnost (Taylor et al., 2001, Taylor et al., 2002, Li et al., 2014, Schmieder et al., 2016).

4.4 Raziskave v dolini reke Radovne

V dolini reke Radovne je bilo v preteklosti narejenih kar nekaj hidrogeoloških raziskav, vendar gre večinoma za posamezne študije, ki nikoli niso bile objavljene in so dostopne v arhivu Geološkega zavoda Slovenije. Podroben opis teh raziskav je podan v diplomskem delu (Torkar, 2010) in članku (Torkar in Brenčič, 2015), v doktorski disertaciji pa so predstavljene samo tiste raziskave, ki so pomembne pri obravnavani tematiki.

Leta 1965 so v dolini Krme izvrtali tri vrtine za načrtovano gradnjo turističnega centra. Najgloblja vrtina je globoka 60 m in se nahaja v aluvialnih sedimentih (Žlebnik, 1966). Leta 1975 so bile v Zgornji Radovni na območju Gabrja narejene hidrogeološke in geomehanske raziskave za načrtovan, ampak nikoli izveden akumulacijski jez. Izvrtane so bile tri vrtine, po ena na vsaki strani doline ter ena na sredini doline, globina te je 103 metrov in še vedno ni dosegla predkvartarne podlage (Drobne et al., 1975). Leta 1983 so v Sr. Radovni izvrtali 16 plitkih vrtin z namenom, da določijo razširjanje in debelino jezerske krede ter debelino prodnatega nasipa (Iskra in Kuhar, 1983).

Med letoma 2004 in 2006 so bili za preučevanje procesov v Savskem bazenu odvzeti posamezni vzorci po celotni reki Savi (Ogrinc et al., 2006, 2008). Reka Radovna predstavlja desni pritok reke Save. Novejše študije so bolj usmerjene v hidrogeološke raziskave. Med letoma 2005 in 2007 je bilo vzorčeno po celotni dolini reke Radovne za glavne ione ter za stabilne izotope kisika, vodika in ogljika (Torkar et al., 2016). Med letoma 2009 in 2010 je bilo izvedeno hidrogeokemijsko vzorčenje treh kraških izvirov (Lipnik, Zmrzlek in Rečica) kot del hidrogeokemijske analize alpskih izvirov v severni Sloveniji (Kanduč et al., 2012). Leta 2010 so se pričele prve sistematične raziskave vpliva talečega snega na odtok z uporabo stabilnih projektov v okviru IAEA projekta. Kot raziskovalni poligon je bilo v Sloveniji najprej izbrano območje Savice, v letu 2011 pa so se raziskave razširile tudi na območje reke Radovne (Vreča et al., 2012, 2013c). V letu 2010 je bila v severozahodni Sloveniji v sodelovanju z ARSO vzpostavljena tudi nova mreža za opazovanja izotopske sestave padavin na petih lokacijah, med drugim tudi na padavinski postaji Zgornja Radovna (Vreča et al., 2013a). V okviru tega projekta so se tudi testirali pasivni kapilarni vzorčevalniki (Vreča et al., 2012, 2013c, 2014a), ki so podrobneje vpisani v poglavju 5.2.

Do začetka 20. stoletja so na območju Sr. Radovne delovale fužine. Vpliv fužinarstva na tla so raziskovali Ferjan Stanič et al. (2013). Serianz (2013) se je ukvarjal s hidrogeološko raziskavo izvira Zmrzlek ter s hidrogeološko analizo vodne bilance reke Radovne (2015). Hidrogeološke informacije ter prostorsko in časovno spreminjanje pretokov v reki Radovni kot tudi elektroprevodnost (EC) sta raziskovala Torkar in Brenčič (2015). Pretoki, ki so se merili v štirih kampanjah, dolvodno postopoma naraščajo s povprečnim prirastkom pritoka od 88 l/s km^{-1} do 287 l/s km^{-1} . Ker dolvodno ni večjih pritokov, ki bi v taki meri vplivali na količino pretoka, je očitno, da se reka Radovna v večini napaja s podzemno vodo. Analiza elektroprevodnosti je prav tako pokazala, da se elektroprevodnost sicer bolj monotono spreminja, ampak prav tako narašča dolvodno.

5 METODE

5.1 Terensko delo

Terensko delo je zajemalo pregled celotnega zgornjega toka reke Radovne in določitev vzorčnih in merskih mest. Na izbranih lokacijah so se nato namestili inštrumenti za merjenje nivoja podzemne vode in vode v reki ter elektroprevodnosti. Po zastavljenem načrtu se je na petih lokacijah vzorčila voda v obdobju od februarja 2012 do konca julija 2013.

5.1.1 Padavine

Od aprila 2010 se na padavinski postaji Zgornja Radovna v sodelovanju z IJS in ARSO zbirajo mesečne celokupne padavine za analizo stabilnih izotopov kisika in vodika. Poleg prej omenjene lokacije se mesečne padavine za izotopsko sestavo kisika in vodika zbirajo tudi na postajah Kredarica in Rateče (Vreča et al., 2013a). Za izračune v doktoski disertaciji so bili uporabljeni podatki za obdobje 04/2010–03/2013.

5.1.2 Opis vzorčnih in merskih lokacij

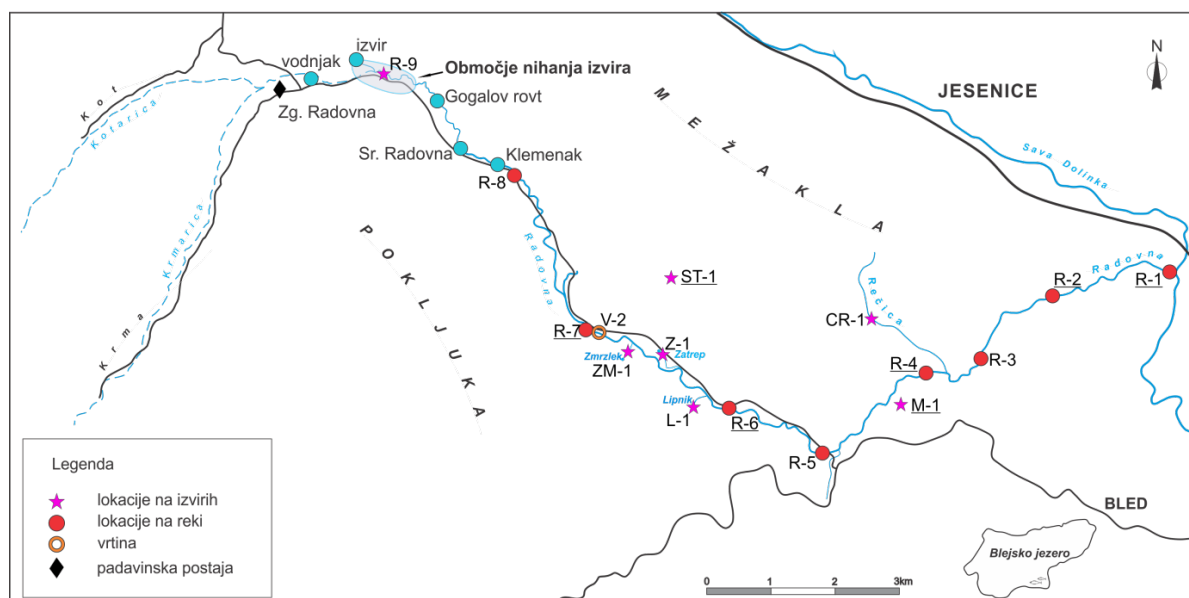
Vsa vzorčna mesta s pripadajočimi koordinatami in nadmorsko višino so naštetja v preglednici in prikazana na sliki (Preglednica 3, Slika 17 in Slika 18).

Lokacije za vzorčenje v obdobju med letoma 2005 in 2007 (Slika 17) so bile izbrane na podlagi hidrogeološkega kartiranja doline reke Radovne. Prvo vzorčenje vode za analize izotopske sestave ogljika v razopljenem anorganskem ogljiku ($\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$) je bilo leto 2005 vzorčenje opravljeno na osmih rečnih lokacijah, kasneje so bila vzorčenja opravljena samo na treh reprezentativnih lokacijah na reki. Poleg reke in glavnega izvira Radovna se je vzorčilo v obdobju 2005-2007 še na šestih izvirih in na eni arteški vrtini. Najbolj gorvodna lokacija je bila izbrana neposredno pod izvirov Radovna (R-9). Reka Radovna v zgornjem delu teče razpršeno v več strugah in se dolvodno pri lokaciji R-8 združi v en kanal. Naslednja dolvodna lokacija na reki je bila R-5, postavljena za tremi kraškimi izviri (ZM-1, Z-1, L-1). Zadnja lokacija na reki (R-3) se je nahajala v spodnjem delu toka pred Vintgarjem. Na tej lokaciji je tudi vodomerna postaja Podhom, ki je v lasti Agencije Republike Slovenije za okolje, kjer dnevno od leta 1933 naprej merijo pretoke. Preostalih pet lokacij na reki je bilo postavljenih: R-7 gorvodno od arteške vrtine (V-2), R-6 pri hidroelektrarni Gorje, R-4, preden se v reko izliva Rečica (CR-1), in zadnji dve lokaciji (R-2 in R-1), postavljeni v skoraj izsušeni rečni strugi zaradi odvzema vode za hidroelektrarno Vintgar.

Preglednica 3: Vzorčne lokacije s pripadajočimi Gauss-Krügerjevimi koordinatami in nadmorsko višino

Table 3: Sampling locations with Gauss-Krüger coordinates and altitude

Lokacija	Tip lokacije	GKY (m)	GKX (m)	Nadmorska višina (m)	Obdobje vzorčenja
vodnjak	vodnjak	419513	143278	746	02/2012–07/2013
Gogalov rovt	reka	421514	143134	702	02/2012–07/2013
Sr. Radovna	izvir	421900	142241	692	02/2012–07/2013
Klemenak	reka	422610	142002	685	02/2012–07/2013
R-9	izvir Radovna	420661	143455	714	2005-2007
R-8	reka	422755	141868	683	2005-2007
R-7	reka	423815	139483	662	2005-2007
V-2	vertina	424021	139425	659	2005-2007
ZM-1	izvir Zmrzlek	424502	139162	662	2005-2007
Z-1	izvir Zatrep	424987	139111	666	2005-2007
L-1	izvir Lipnik	425488	138265	667	2005-2007
R-6	reka	426056	138261	630	2005-2007
R-5	reka	427574	137561	614	2005-2007
R-4	reka	429123	138811	580	2005-2007
CR-1	izvir Rečica	428284	139685	627	2005-2007
R-3	reka	429977	139030	568	2005-2007
R-2	reka	431152	140057	506	2005-2007
R-1	reka	432985	140219	461	2005-2007
ST-1	izvir Strmole	425066	140607	955	2005-2007
M-1	izvir Mevkuž	428723	138237	629	2005-2007



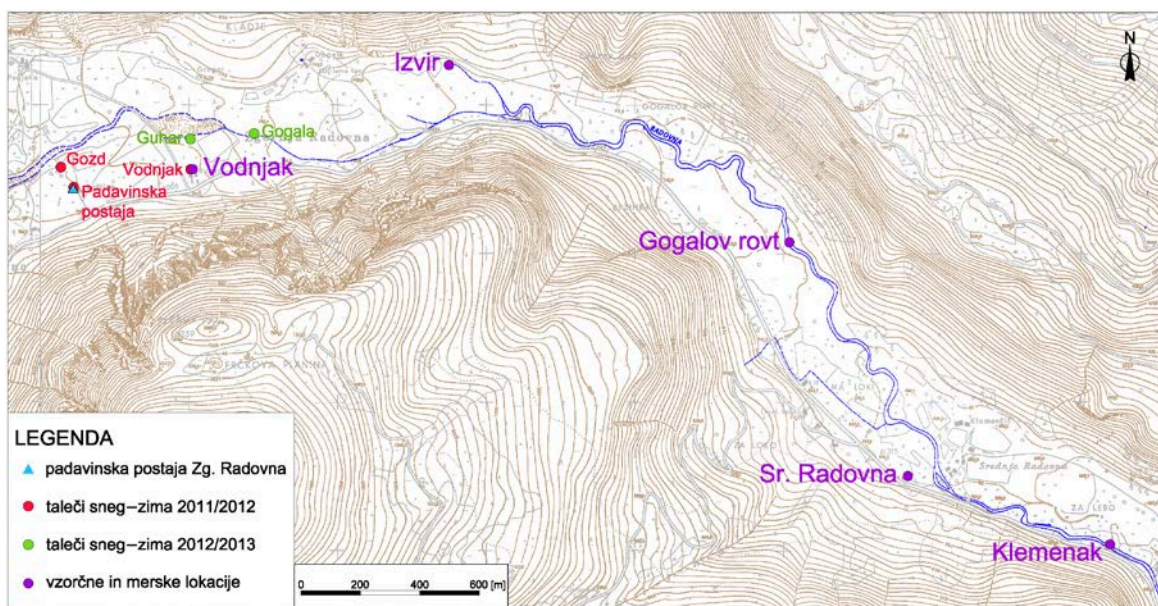
Slika 17: Lokacije vzorčnih mest za geokemične analize med letoma 2005 in 2007, na podčrtanih lokacijah se je vzorčilo samo za izotope.

Figure 17: Sampling locations for geochemical analysis between 2005 and 2007, underlined sampling locations were analysed only for isotopes.

Poleg reke so bili vzorčeni še izviri. Kraški izviri Zmrzlek (ZM-1), Zatrep (Z-1) in Lipnik (L-1) ležijo v srednjem delu reke med lokacijama R-8 in R-5. Izvir Zmrzlek se nahaja na desnem bregu reke

Radovne južno od Mlinarjevega rovta. Njegov pretok zelo niha, posledično se lokacija izvira spreminja glede na hidrološke pogoje in v obdobju nizkih vod celo presahne. Izvir Zatrep (Z-1) se nahaja na levem delu brega in se napaja z območja Pernikov na Mežakli. Izvir Lipnik (L-1) se nahaja na desnem bregu, izvira iz grušča na širšem območju pod stenami apnenca, zaledje na planoti Pokljuka pa sestavlja močno zakrasel apnenec. Izvir Rečica predstavlja izvir na levem bregu in se napaja z vzhodnega dela Mežakle. Izvir Rečica predstavlja več kraških izvirov, vzorčen je bil najnižji, ki je tudi najstalnejši. Za določitev izotopskega višinskega efekta sta bila vzorčena še dva izvira (ST-1 in M-1) na različnih nadmorskih višinah. Izvir Strmole (ST-1) je kraški in se nahaja na planoti Mežakla na nadmorski višini 955 m, izvir Mevkuž (M-1) pa v naselju Mevkuž na nadmorski višini 629 m. Ena od vzorčnih lokacij je bila tudi arteška vrtina (V-2), locirana med lokacijama R-7 in ZM-1. Vrtina se nahaja v osrednjem delu doline in je globoka 103 m.

V obdobju podrobnega raziskovanja izvira Radovne (2011–2013) so bile v zaledju izvira in v zgornjem toku reke Radovne poleg izvira izbrane še štiri merske in vzorčne lokacije (Slika 18). V zaledju izvirov pri domačiji Guhar leži ročno kopan vodnjak, ki je zaščiten z majhno hišico (Slika 18, Slika 19). Vodnjak je globok 28 m in ima premer 70 cm. Vodnjak pozimi, ko so nizke vode, presahne in je suh vse do začetka taljenja snega. Lokacija Gogalov rovt se nahaja dolvodno od izvira, kjer je tok vode združen v eno strugo (Slika 20). Na tej lokaciji je voda v strugi vedno prisotna, edino na začetku opazovanja, marca 2012, ko so bile zelo sušne razmere, je bila struga suha. Naslednja dolvodna lokacija je Sr. Radovna (Slika 21), kjer je skozi celo leto prisotna voda in prihaja z območja Pokljuke in se dolvodno po 130 metrih izliva v reko Radovno. Pretok je majhen, ocenjen na nekaj l/s. Najbolj dolvodna lokacija je Klemenak, kjer je voda v strugi prisotna skozi celo leto (Slika 22).



Slika 18: Lokacije za vzorčenje in merjenje na širšem območju izvira med letoma 2011 in 2013

Figure 18: Measurement and sampling locations in the wider spring area between 2011 and 2013



Slika 19: Objekt, v katerem je vodnjak z vgrajenim inštrumentom

Figure 19: The facility where the well is located with a build-in instrument



Slika 20: Lokacija Gogalov rovt

Figure 20: Location Gogalov rovt



Slika 21: Lokacija Sr. Radovna

Figure 21: Location Sr. Radovna



Slika 22: Lokacija Klemenak

Figure 22: Location Klemenak

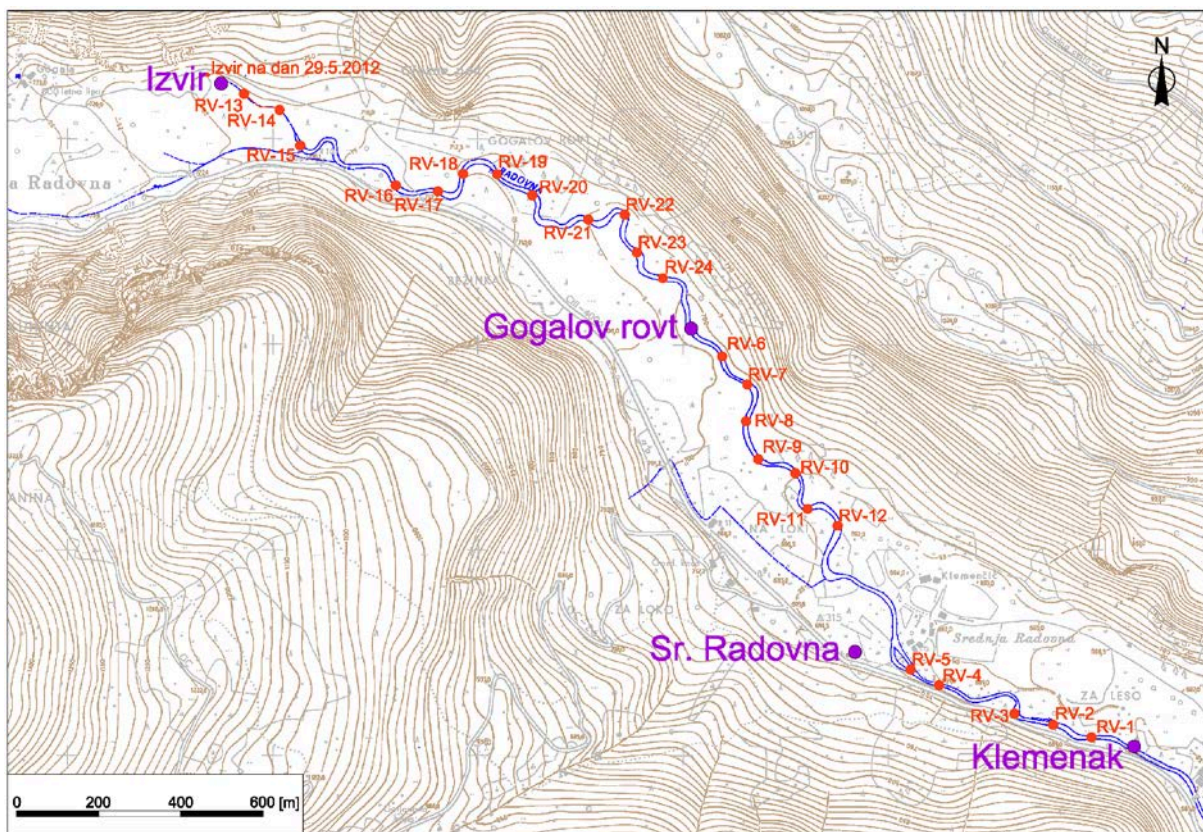
5.1.2.1 Lokacije podrobnega vzorčenja zgornjega dela reke Radovne

Od izvira dolvodno do lokacije Klemenak se je enkratno vzorčila voda na 28 lokacijah (Preglednica 4, Slika 23). Lokacije so med seboj oddaljene med 100 in 200 metri, odvisno od dostopnosti in razvejanosti struge.

Preglednica 4: Vzorčne lokacije s pripadajočimi Gauss-Krügerjevimi koordinatami in nadmorsko višino

Table 4: Sampling locations with Gauss-Krüger coordinates and altitude

Lokacija	Razdalja od izvira (m)	GKY (m)	GKX (m)	Nadmorska višina (m)
izvir	0	420342	143656	722
RV-13	100	420430	143609	719
RV-14	200	420517	143570	717
RV-15	300	420567	143483	715
RV-16	540	420800	143387	713
RV-17	750	420903	143372	710
RV-18	850	420964	143414	709
RV-19	950	421047	143413	708
RV-20	1050	421133	143363	707
RV-21	1240	421269	143303	704
RV-22	1340	421358	143315	703
RV-23	1440	421387	143223	703
RV-24	1550	421451	143161	701
Gogalov rovt	1700	421514	143134	702
RV-6	1800	421595	142971	698
RV-7	1900	421656	142902	697
RV-8	2000	421653	142813	696
RV-9	2100	421683	142720	696
RV-10	2200	421773	142687	695
RV-11	2300	421803	142600	694
RV-12	2400	421876	142559	693
Sr. Radovna	2775	421900	142241	692
RV-5	2865	422054	142209	689
RV-4	2945	422123	142171	689
RV-3	3175	422307	142102	687
RV-2	3275	422401	142075	687
RV-1	3375	422495	142044	683
Klemenak	3475	422610	142002	685



Slika 23: Lokacije za detaljno vzorčenje zgornje dela reke Radovne 29.5.2012

Figure 23: Locations for detailed sampling of the upper part of the Radovna River on 29.5.2012

5.1.3 Vzorčenje vode

5.1.3.1 Vzorčenje med letoma 2005 in 2007

V obdobju med majem 2005 in marcem 2007 se je voda vzorčila enkrat na mesec za osnovne katione (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+) in anione (HCO_3^- , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-}) na devetih lokacijah po celotni dolini (Preglednica 3,

Preglednica 5, Slika 17) v 100-ml HDPE-prahovke, ki so bile predhodno sprane z vzorčeno vodo. Vsi vzorci so bili filtrirani skozi 0,45- μm membranske filtre in nakisani s čisto HNO_3 kislino do pH-vrednosti 2.

V obdobju med majem 2005 in decembrom 2007 se je enkrat na mesec na 11 lokacijah vzorčila voda za izotopsko sestavo kisika, vodika in ogljika. Voda za izotopsko sestavo kisika in vodika se je vzorčila v 50-ml HDPE-prahovke z notranjim tesnilom. Voda za izotopsko sestavo raztopljenega anorganskega ogljika se je vzorčila v 12-ml steklene vial (exetainerje) s predhodnim filtriranjem skozi Minisart® 0.2- μm celulozne acetatno membranske filtre. Voda na arteški vrtini se je vzorčila samo, ko je vrtina prelivala.

Preglednica 5: Lokacija, tip lokacije in število vzorcev za kemijske in izotopske analize

Table 5: Location, location type and number of samples for chemical and isotope analysis

Lokacija	Tip lokacije	Št. vzorcev za kemijske analize 05/2005–03/2007	Št. vzorcev za izotopske analize $\delta^{18}\text{O}$ in $\delta^2\text{H}$ 05/2005–12/2007	Št. vzorcev za izotopske analize $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 05/2005–12/2007
R-9	izvir Radovna	23	30	32
R-8	reka	23	31	32
R-7	reka	-	-	1
V-2	vertina	12	7	18
ZM-1	izvir Zmrzlek	23	31	32
Z-1	izvir Zatrep	18	25	26
L-1	izvir Lipnik	23	31	32
R-6	reka	-	-	1
R-5	reka	23	31	32
R-4	reka	-	-	1
CR-1	izvir Rečica	23	30	31
R-3	reka	23	30	32
R-2	reka	-	-	1
R-1	reka	-	-	1
ST-1	izvir Strmole	-	30	32
M-1	izvir Mevkuž	-	31	32
	Skupaj	191	307	336

5.1.3.2 Vzorčenje med letoma 2011 in 2013

Za določitev osnovnih kationov (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+) in anionov (HCO_3^- , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-}) se je voda vzorčila v dveh kampanjah (1.11.2011 in 14.5.2012) v enolitrske HDPE-posode z notranjim tesnilom, ki so bile predhodno trikrat sprane z vzorčeno vodo. Vzorci so bili na analizo poslani naslednji dan.

Na lokacijah vodnjak, izvir, Gogalov rovt, Sr. Radovna in Klemenak (Slika 18) je potekalo vzorčenje od 15. februarja 2012 do 30. julija 2013 za določitev izotopske sestave kisika in vodika v vodi (Preglednica 6). Vzorčilo se je v 50-ml plastične PE-prahovke z notranjim tesnilom. Prahovka se je pred vzorčenjem trikrat sprala z vzorčeno vodo. V obdobju nizkih vod se je vzorčilo dvakrat na mesec, v obdobju taljenja snega se je pogostnost vzorčenja povečala na vsaka dva dni oziroma se je vzorčenje prilagajalo stanju na terenu. Vzorci so bili do analiz hranjeni v hladilniku.

10.9.2012		x	x			x	x	x	x	x	x
17.9.2012			x				x		x		x
25.9.2012			x				x		x		x
1.10.2012		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
12.10.2012		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
19.10.2012		x	x			x	x	x	x	x	x
28.10.2012			x				x		x		x
23.11.2012		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4.12.2012		x	x			x	x	x	x	x	x
19.12.2012		x	x			x	x	x	x	x	x
10.1.2013		x		x	x	x	x	x	x	x	x
23.1.2013		x	x			x	x	x	x	x	x
11.2.2013		*				x	x	x	x	x	x
2.3.2013		*				x	x	x	x	x	x
15.3.2013		*				x	x	x	x	x	x
11.4.2013		*									x
18.4.2013			x								x
25.4.2013		x	x			x	x	x	x	x	x
29.4.2013			x								x
4.5.2013			x								x
7.5.2013			x								x
10.5.2013			x								x
13.5.2013			x								x
17.5.2013			x								x
28.5.2013		x	x			x	x	x	x	x	x
24.5.2013			x								x
31.5.2013			x								x
3.6.2013			x								x
7.6.2013		x	x			x	x	x	x	x	x
14.6.2013		x	x			x	x	x	x	x	x
18.6.2013			x								x
22.6.2013			x								x
25.6.2013			x								x
28.6.2013			x								x
2.7.2013			x								x
5.7.2013			x								x
9.7.2013			x								x
12.7.2013		x	x			x	x	x	x	x	x
18.7.2013		x	x			x	x	x	x	x	x
30.7.2013		x	x			x	x	x	x	x	x
Skupaj		49	68	20	20	49	70	49	71	49	89

* Vodnjak je presahnil, zato vzorca ni bilo mogoče vzeti.

5.1.4 Registrator nivoja vode

Na terenu so bili postavljeni trije registratorji nivoja vode z avtomatskim izenačevanjem atmosferskega tlaka (podjetje Eltratec, Slika 24). Dva inštrumenta, postavljena na lokaciji vodnjak in Klemenak, sta merila višino vode in temperaturo, tretji inštrument, postavljen na lokaciji Gogalov rovt, je poleg prej omenjenih parametrov meril še elektroprevodnost. Inštrumenti so beležili podatke na eno uro. Merilna ločljivost inštrumentov je naslednja, za merilec nivoja je 1 cm, za merilec temperature je 0,1 °C ter za merilec elektroprevodnosti je 1 µS/cm.



Slika 24: Merilnik nivoja, temperature in elektroprevodnosti

Figure 24: Level, temperature and electrical conductivity data logger

5.1.5 Meritve pretokov in fizikalnih parametrov

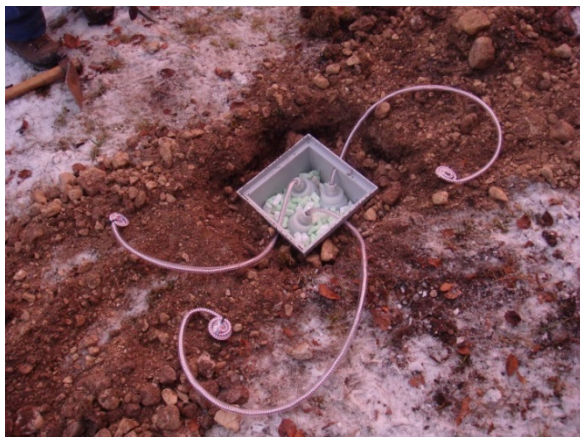
V obdobju 2005–2007 sta se temperatura ($^{\circ}\text{C}$) in elektroprevodnost ($\mu\text{S}/\text{cm}$) na terenu merili z inštrumentom WTW Multiline P3 ter pH z WTW pH meter model 325.

V obdobju 2011–2013 sta se elektroprevodnost ($\mu\text{S}/\text{cm}$) in temperatura ($^{\circ}\text{C}$) na terenu na lokacijah vodnjak, izvir, Gogalov rovt, Sr. Radovna in Klemanak merili z inštrumentom WTW Cond 3110. Pretoke na lokacijah Gogalov rovt in Klemenak smo merili s kemijsko integracijsko metodo s trenutnim vnosom soli, kjer smo uporabili inštrument Flo-Tracer, in s hidrometričnim krilom model A.OTT KEMPTEN (Type C2 »10.150«).

5.2 Pasivni kapilarni vzorčevalniki (PKV)

Zaradi razlike v izotopski sestavi snežne odeje in snežnice se je za potrebe izotopske separacije hidrograma uporabila izotopska sestava snežnice. Za zbiranje snežnice so bili uporabljeni pasivni kapilarni vzorčevalniki (PKV, Slika 28), ki so bili prvotno zasnovani za vzorčenje vode v tleh (Holder et al., 1991). Kasneje so bili prirejani za vzorčenje snežnice za izotopske analize (Frisbee et al., 2010). Nadaljna modifikacija PKV, pri kateri smo sodelovali, je bila narejena v okviru IAEA projekta (Vreča et al., 2012, 2013c, 2014a) ter bila preiskušena med zimo 2011/2012 in 2012/2013 v 10 različnih državah (Frisbee et al., 2010, Penna et al., 2014).

V zimi 2011/2012 so se postavili trije vzorčevalniki na treh lokacijah: padavinska postaja, gozd in vodnjak (Slika 18). V vsakem PKV so bile tri enolitrske posode. V PKV na padavinski postaji so bile uporabljene vrvi iz steklenih vlaken, ki so jih pripravili na IAEA (Vreča et al., 2012), na ostalih dveh lokacijah pa smo pripravili vrvi iz poliestra (Slika 25). Z raziskavo je bilo ugotovljeno, da je sukcijski vlek prisoten samo v vrveh iz steklenih vlaken (Vreča et al., 2012). Kasneje leta 2014 so bile vrvi iz steklenih vlaken, ki so različno pletene, z jedrom in brez jedra, še dodatno testirane (Hictaler, 2014).



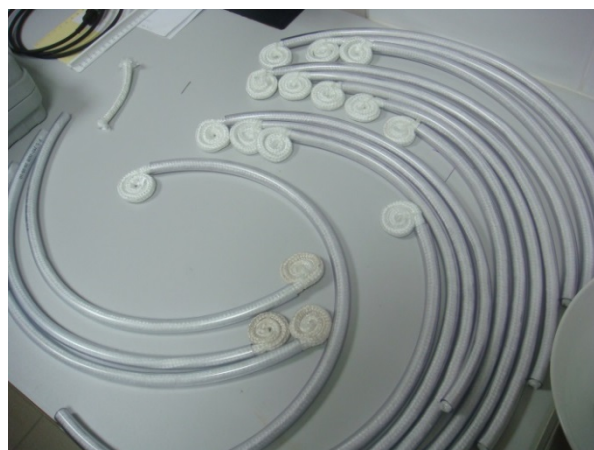
Slika 25: PKV s poliestrskimi vrvmi.

Figure 25: PKV with polyester wicks



Slika 26: Pranje vrvi v laboratoriju

Figure 26: Washing the rope in the laboratory



Slika 27: Pripravljene vrvi v plastični cevi

Figure 27: Prepared wicks in a plastic tube

Na podlagi izkušenj iz zime 2011/2012, ko smo ugotovili veliko variabilnost na majhni površini (Vreča et al., 2012, 2013c, 2014a), se je v okviru projekta IAEA določilo, da se v zimi 2012/2013 opravijo obsežnejše raziskave v 10 različnih državah (Frisbee et al., 2010, Penna et al., 2014), ki bodo bolj opredelile variabilnost med posameznimi PKV na različnih nivojih ter da se uporabi slovenski dizajn vzorčevalnika in način vzorčenja po shemi analize vairance (Vreča et al., 2013c). V zimi 2012/2013 so bili zato postavljeni po trije vzorčevalniki na dveh lokacijah v Zgornji Radovni; Guhar in Gogala, ki sta med seboj oddaljeni 250 m, ter en vzorčevalnik na Pokljuki (Preglednica 7). V vsakem vzorčevalniku je bilo pet enolitrskih posod (Slika 28) in v vseh je bila uporabljena enaka vrv iz steklenih vlaken. PKV so bili pripravljene v laboratoriju na NTF po naslednjem postopku (Vreča et al., 2013b, 2013c):

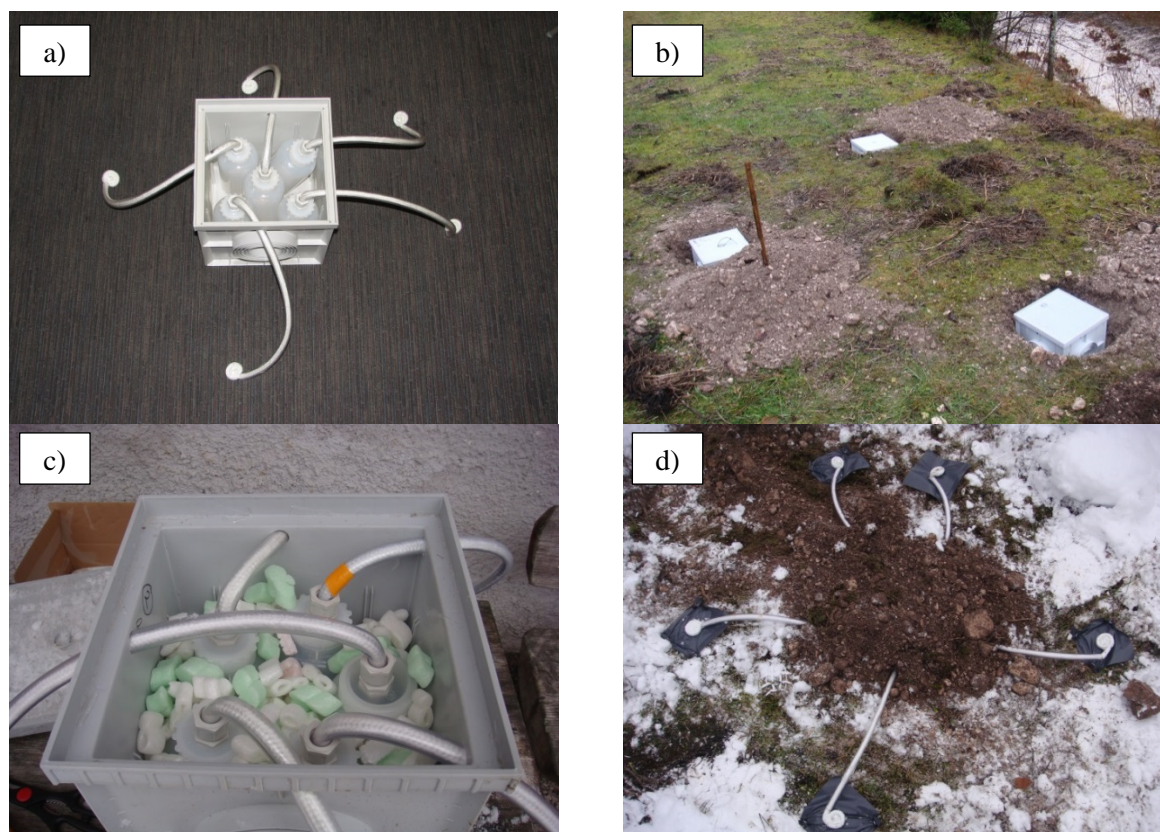
1. Vrv iz steklenih vlaken je bila oprana z deionizirano vodo dokler elektroprevodnost ni bila pod $100 \mu\text{S}/\text{cm}$ (Slika 26).
2. Vrv je bila posušena in odrezana v dolžini 80 cm.

3. Skozi plastično cev dolžine 60 cm se je potegnila vrv. Preostanek vrvi se je zvil in zavezal (Slika 27).
4. Tako pripravljena vrv se je potegnila skozi pokrov 1 L prahovk, da se prepreči možnost izhlapevanja in kontaminacije.
5. Izpostavljene vrvi so bile položene na tla na polivinil in so bile zaščitene z zaponko U-oblike (Slika 28d).

Preglednica 7: Lokacije PKV s pripadajočimi Gauss-Krügerjevimi koordinatami in nadmorsko višino

Table 7: The PCS locations with Gauss-Krüger coordinates and altitude

Lokacija	GKY (m)	GKX (m)	Nadmorska višina (m)
Gogala	419720	143405	735
Guhar	419505	143387	742
Pokljuka	418848	136132	1330



Slika 28: Pasivni kapilarni vzorčevalniki; a) priprava vzorčevalnika v laboratoriju, b) vkop treh vzorčevalnikov na lokaciji Gogala, c) notranjost vzorčevalnika; med plastenkami je izolacijski material, da voda ne bi zmrznila, d) videz vzorčevalnika po vkopu; pod vrvice je bil z zaponko U-oblike nameščen polivinil

Figure 28: Passive capillary samplers (PCS); a) preparing the PCS in the laboratory, b) three PCS buried at the Gogala location, c) the interior of the PCS before it was dug in; there is isolative material between the bottles was to prevent the water from freezing, d) the appearance of finished PCS; plastic barrier was placed beneath the rolled coil secured with U-shaped pins

5.3 Analitske meritve

5.3.1 Kemijske analize glavnih anionov in kationov

Vzorci, pobrani med letoma 2005 in 2007, so bili analizirani za 75 glavnih in slednih prvin v akreditiranem laboratoriju Actlabs (imena analiz so ICP-MS CODE 6, CODE 6B in CODE 6C in so definirane na internetni strani <http://www.actlabs.com>). V doktorski disertaciji so se analizirali samo osnovni kationi in anioni z naslednjimi natančnostmi Ca^{2+} 0,1 mg/l, Mg^{2+} 1 $\mu\text{g/l}$, K^+ 30 $\mu\text{g/l}$, Na^+ 5 $\mu\text{g/l}$, HCO_3^- 2 mg/l, Cl^- 0,03 mg/l, NO_3^- 0,01 mg/l, SO_4^{2-} 0,02 mg/l.

Vzorci za kemijske analize med letoma 2011 in 2012 so bili analizirani po standardnih ISO-metodah v Zavodu za zdravstveno varstvo Maribor, pH ISO 10523: 2008, EC EN 27888: 1993, NO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} ISO 10304-1:2007, Na^+ , Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} EN ISO 14911: 1998 in HCO_3^- EN ISO 9963-1: 1995.

5.3.2 Izotopske analize $\delta^{18}\text{O}$ in $\delta^2\text{H}$

Analize izotopske sestave kisika in vodika v času vzorčenja med letoma 2005 in 2007 so bile opravljene na raziskovalnem inštitutu Joanneum (Institute of Water Resources Management, Graz, Austria). Izotopska sestava kisika ($\delta^{18}\text{O}$) je bila določena z uravnoteženjem sistema voda – CO_2 z dvojnim uvajalnim sistemom Finnigan DELTA^{plus} (Thermo Electron Corporation) masnim spektrometrom. Izotopska sestava vodika ($\delta^2\text{H}$) je bila izmerjena v H_2 pridobljenim z redukcijo vode preko vročega kroma pri 1050 °C na masnem spektrometru Finnigan DELTA^{plus} XP (Thermo Electron Corporation, Bremen, Germany) z zveznim tokom in visokotemperaturnim grelcem HEKAtech. Analitska natančnost za $\delta^{18}\text{O}$ in $\delta^2\text{H}$ je $\pm 0,05$ ‰ in ± 1 ‰.

Analize izotopske sestave za $\delta^{18}\text{O}$ in $\delta^2\text{H}$ med letoma 2012 in 2013 so bile narejene v štirih različnih laboratorijih (Preglednica 8). Primerljivost med laboratoriji je zadovoljiva, saj so se v vsak nov laboratorij poleg duplikatov poslali tudi vzorci iz prejšnjega laboratorija.

Vzorci od februarja 2012 do aprila 2012 so bili analizirani v Hydroisotop GmbH laboratoriju v Nemčiji. Za analizo je bila uporabljena laserska spektrometrija CRDS (Cavity Ringdown spectrometry) s točnostjo $\pm 0,1$ ‰ za $\delta^{18}\text{O}$ in $\pm 1,0$ ‰ za $\delta^2\text{H}$.

Vzorci od konca aprila 2012 do konca maja 2012 so bili analizirani na Max Planck Institutes za biogeokemijo z visokotemperaturno pirolizno tehniko (TE/CA), ki določi izotopsko sestavo $\delta^{18}\text{O}$ in $\delta^2\text{H}$ iz iste viala z isto analitsko nastavitvijo. Skozi segret septum se v stekleni karbonski reaktor pri temperaturi več kot 1300 °C skozi plinotesno brizgalko injicira od 0,5 do 1 μL vzorca. Po treh analizah vsakega vzorca se izračuna povprečna vrednost s točnostjo podatkov za $\delta^{18}\text{O}$ je $\pm 0,1$ ‰ in za $\delta^2\text{H}$ < 1 ‰ (Gehre et al., 2004).

Od junija 2012 do sredine februarja 2013 so bili vzorci analizirani v laboratoriju za izotopsko hidrologijo na Mednarodni agenciji za atomsko energijo (IAEA) na Dunaju. Izotopi so bili analizirani na laserskem spektrometru OA-ICOS (Los Gatos Research, Mountain View CA, United States of America). Natančnost meritev za $\delta^{18}\text{O}$ je $\pm 0,08 \text{ ‰}$ in za $\delta^2\text{H}$ $\pm 0,5 \text{ ‰}$.

Od sredine februarja 2013 do konca julija 2013 so bili analizirani v Pakistanskem inštitutu jedrske znanosti in tehnologije (PINSTECH). Vzorci so bili analizirani na LWIA laserskem inštrumentu (Liquid Water Isotope Analyzer, Los Gatos Research). Natančnost meritev za $\delta^{18}\text{O}$ je $\pm 0,2 \text{ ‰}$ in za $\delta^2\text{H}$ $\pm 0,5 \text{ ‰}$.

Preglednica 8: Natančnost analitskih meritev za stabilna izotopa $\delta^{18}\text{O}$ in $\delta^2\text{H}$ po obdobjih in po različnih laboratorijih

Table 8: The analytical precision for stable isotopes $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ by periods and by different laboratories

Obdobje	Laboratorij	Točnost meritev	
		$\delta^2\text{H}$ (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)
15.2.2012–12.4.2012	Hydroisotop	$\pm 1,0$	$\pm 0,1$
28.4.2012–31.5.2012	Max Planck Institutes	< 1	$\pm 0,1$
1.6.2012–11.2.2013	IAEA	$\pm 0,5$	$\pm 0,08$
2.3.2013–30.7.2013	PINSTECH	$\pm 0,5$	$\pm 0,2$

Izotopska sestava kisika $\delta^{18}\text{O}$ za vzorce snežnice je bila določena na Institutu "Jožef Stefan" na masnem spektrometru s kontinuiranim pretokom IsoPrime (GV Instruments) s preparativnim nastavkom MultiFlow-Bio oziroma na masnem spektrometru z dvojnimi uvajalnimi sistemi Varian MAT 250 po predhodnem uravnoteženju sistema voda – CO_2 . Pri analizah so bili za normalizacijo podatkov uporabljeni laboratorijski referenčni materiali umerjeni na mednarodno VSMOW-SLAP skalo. Natančnost meritev je $\pm 0,1 \text{ ‰}$.

5.3.3 Izotopske analize $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$

Izotopska sestava $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ je bila določena na Institutu "Jožef Stefan" iz CO_2 , dobljenega po reakciji vzorca s 6-ml vzorca s čisto fosforno kislino (H_3PO_4) na pretočnem masnem spektrometru Europa 20-20 ANCA-TG. Natančnost meritev za $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ je $\pm 0,2 \text{ ‰}$.

5.4 Izračuni

5.4.1 Indeks nasičenja, pCO_2 in ravnotežje nabojev

Indeks nasičenja (SI) za kalcit, parcialni tlak CO_2 (pCO_2) in ravnotežje nabojev so bili določeni s programom PHREEQC (verzija 2.18). Ravnotežje kationov in anionov je v mejah $\pm 10 \text{ ‰}$, kar je še

sprejemljivo za vode z zmerno količino raztopljenih trdnih snovi. Indeks SI določa količino kalcita, ki se bo lahko raztopila ali oborila v vodi v danih pogojih. Raztopina se smatra v ravnotežju glede na kalcit, če je indeks nasičenja znotraj $\pm 0,1$ (Langmuir, 1971, Moral et al., 2008). Za interpretacijo kemijskih rezultatov je bilo izračunano razmerje $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} / \text{HCO}_3^-$ in razmerje $\text{Ca}^{2+} / \text{Mg}^{2+}$.

5.4.2 Določitev srednjih zadrževalnih časov

Za določitev srednjih zadrževalnih časov je bil za kasnejšo primerjavo vzeti isti model kot pri izračunih za Savo (Ogrinc et al., 2008). Uporabljena je bila periodična regresijska analiza s prilegajočo se sinusno krivuljo. Za padavine so bili kot vhodna funkcija vzeti izotopski podatki o mesečnih padavinah iz GNIP-postaje Ljubljana za obdobje med letoma 01/2002 in 12/2007 (Vreča et al., 2008, 2014b). Časovni nizi vrednosti $\delta^{18}\text{O}$ za padavine in za vzorčene lokacije so bili modelirani s periodično regresijsko analizo tako, da se prilegajo sezonski sinusni krivulji po enačbi (22) (Rodgers et al., 2005).

$$\delta^{18}\text{O} = \delta^{18}\text{O}_{\text{ave}} + A_{z1\text{or}z2} * [\cos(c * t - \theta)] \quad (22)$$

$\delta^{18}\text{O}$ je modelirana vrednost, $\delta^{18}\text{O}_{\text{ave}}$ je povprečna letna merjena vrednost, $A_{z1\text{or}z2}$ sta izračunani $\delta^{18}\text{O}$ letni amplitudi padavin ali vzorčene vode, c je radialna pogostost letnih nihanj ($0.017214 \text{ rad d}^{-1}$), t je čas v dnevih po začetku vzorčenja in θ je fazni premik oziroma čas letnega maksimuma vrednosti $\delta^{18}\text{O}$ v radianih. Nato so bili po enačbi (23) z eksponentnim modelom ocenjeni povprečni zadrževalni časi, ko voda zapusti sistem.

$$T = c^{-1}[(A_{z2}/A_{z1})^{-2} - 1]^{0,5} \quad (23)$$

A_{z1} je amplituda vrednosti $\delta^{18}\text{O}$ za padavine, A_{z2} je amplituda za vzorčene vode in c je radialna pogostnost letnih nihanj, kot je definirana v enačbi (22) (Rodgers et al., 2005).

5.5 Geofizikalne metode

Za dodatne informacije o medzrnskem vodonosniku in za postavitev hidrogeološkega modela sta bili uporabljeni dve geofizikalni metodi. Za snemanje zaledja izvira Radovne z georadarjem smo se odločili zato, da dobimo informacijo o prostorski legi gladine podzemne vode in o njenem razprširanju ter da poskušamo določiti prevladujočo smer napajanja podzemne vode. Z uporabo refleksijske seizmike sta bili določeni debelina vodonosnika oziroma globina do podlage ter geometrija vodonosnika.

5.5.1 Georadar

Za namen te študije smo oktobra 2012 z uporabo georadarja Mala ProEX posneli zaledje izvira Radovna (Slika 29). Uporabili smo georadar, ki ima nezaščiten 50-MHz RTA (rough terrain antenna) anteno. Fleksibilnost antene, ki je v obliki tube, nam omogoča izvedbo georadarskih meritev tudi na zelo razgibanih terenih (npr. Zajc et al., 2014, 2015). Celoten kabel je dolg 9,25 m, na katerem sta oddajna in sprejemna antena (Slika 30), ki sta med seboj oddaljeni štiri metre (Malá, 2009). Oblika take antene nam omogoča, da se lahko premikamo skozi gozdni teren čez korenine in mimo vej kot tudi pod žicami in pod električnimi ograjami. Georadarski podatki so bili obdelani s programom Reflex Win 6.0.5 (proizvajalec Sandmeier Software) z naslednjimi postopki (Zajc, 2015):

1. Odstranitev zamika signala (»DC shift«), s katerim se odstrani zamaknjena sledi in podatke prestavi na nivo osrednje ničle. Uporabljen je bil interval 400–700 ns.
2. Popravek ničelnega časa (»correct max phase« in »move start time«). Sledi se poravnajo na skupni ničelni čas pri prvem negativnem vrhu signala s postopkoma korekcije maksimalne faze in prestavitvijo ničelnega časa, tako da se signali začnejo s tlemi.
3. Odstranitev ozadja (»background removal«). Odstranijo se šumi ozadja, kjer je bila izbrana opcija odstranitve vzdolž celotne linije.
4. Ročno ojačenje signala (»Manual gain (y)«). Z globino se signal duši, zato se s funkcijo ojačijo amplitude. Pri profilu R1 je bila amplituda ojačena do največ 530 ns dvojnega časa, pri profilu R2 do največ 570 ns in pri profilu R3 do največ 550 ns.
5. Pasovno prepustno filtriranje (»band-pass frequency«). Odstranijo se šumi, povzročeni od človeka ali naprave. Širina frekvenčnega območja je bila določena s štirimi oglišči: low-cut 25 MHz, lower plateau 50 MHz, upper plateau 75 MHz in high-cut 150 MHz.
6. Topografska korekcija (»correct 3D topography«). S topografsko korekcijo se točke profila postavijo nazaj v pravi prostorski položaj. Pri tej korekciji so bile uporabljene koordinate zakoličenih točk.



Slika 29: Zakoličeni georadarski profil in georadarska oprema

Figure 29: Marked GPR profile line and GPR equipment



Slika 30: Oddajna in sprejemna antena

Figure 30: Transmitting and receiving antenna

5.5.2 Refleksijska seizmika

Za snemanje profila HRS Radovna smo uporabili 40-Hz geofone v 2-metrskih intervalih in z 48 aktivnimi kanali in 'on end' geometrijo (Slika 31), kar pomeni, da je strelna točka vedno na koncu aktivnega dela geofonov. Kot seizmični vir smo uporabili 6-kilogramsko macolo (Slika 32), s katero smo na vsaki strelni točki izvedli med 4 in 10 udarcev, ki se med seboj seštejejo.



Slika 31: Postavitev 40-Hz geofonov

Figure 31: Setup of 40-Hz geophones



Slika 32: 6-kg macola kot seizmični vir

Figure 32: 6-kg sledge-hammer as a seismic source

Podatke smo najprej obdelali po standardnem postopku, ki vključuje urejanje posnetkov, vnos geometrije, filtriranje podatkov, amplitudne korekcije, statične korekcije, hitrostne analize in

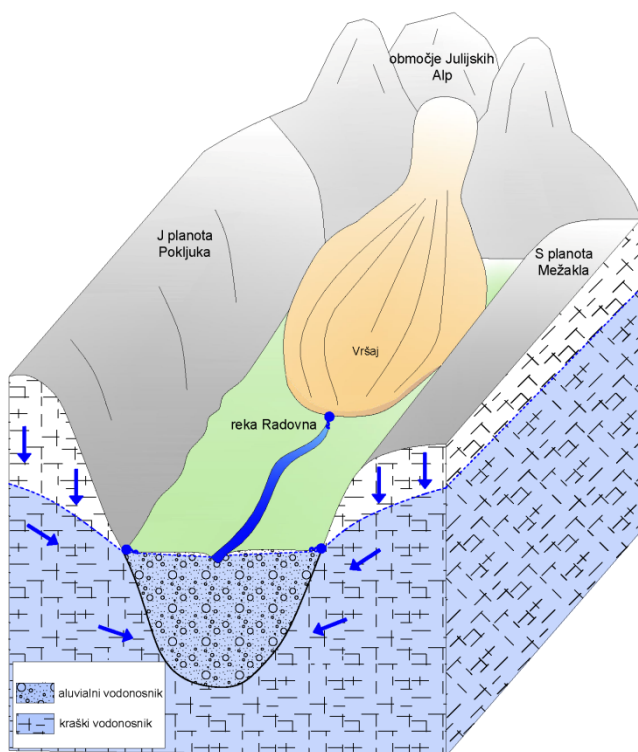
seštevanje (Atanackov, 2013, Atanackov in Gosar, 2013). Pri urejanju sledi so bile odstranjene le mrtve sledi (*dead traces*), ki so vsebovale samo motnje in niso zapisovale pravega signala. Sledilo je odstranjevanje zgornjega dela posnetka z direktnim in lomljenim valom (*early mute*). Koherentne motnje so bile odstranjene s hitrostnimi in f-k filtri. Sledila je hitrostna analiza, pri čemer se je kot bolj efektiven izkazal algoritem CVS (*Constant Velocity Stack*), medtem ko je za dobre rezultate hitrostnih spektrov (*Velocity Semblance Analysis*) kakovost podatkov bila prenizka. Tudi CVS je dal smiselne rezultate le na severnem delu profila med CMP 1120 in 1180. Seštevanje (*NMO Stack*) je bilo narejeno s konstantno stacking hitrostjo 2000 m/s in 50 % stretch mute.

Zaradi generalno slabših podatkov smo se lotili alternativne obdelave podatkov, da bi dobili vsaj nekaj koristnih podatkov o reflektorjih in o njihovih približnih globinah. Iz celotnega nabora podatkov so bile izbrane samo najkakovostnejše strelne točke. Merila za izbor takih točk so bila: odsotnost naključnega hrupa, nizke koherentne motnje in visoka ločljivost seizmičnih reflektorjev. Skupno je bilo izbranih devet strelnih točk in na vseh so bili določeni vsi izraziti reflektorji. Določeni so bili približni ničelni časi reflektorjev, ki so bili nato uporabljeni za osnovno pretvorbo v globino.

6 REZULTATI IN DISKUSIJA

6.1 Konceptualni hidrogeološki model izvira reke Radovne

Konceptualni hidrogeološki model je opis različnih naravnih in antropogenih dejavnikov, ki vplivajo in prispevajo k toku podzemne vode (Kresić in Mikszewski, 2012). V zgornjem delu doline reke Radovne se podzemna voda napaja s padavinami, ki padejo na vzhodni del Julijskih Alp ter na območje med dolinama Kot in Krma ter na planoto Mežaklo in Pokljuko (Slika 33). Poleg padavin se vodonosnik napaja preko taljenja snežne odeje. Ključno za napajanje vodonosnika je, da se snežna odeja tali počasi.



Slika 33: Konceptualni hidrogeološki model kraškega in aluvialnega vodonosnika v dolini reke Radovne

Figure 33: Conceptual hydrogeological model of the karstic and alluvial aquifer in the Radovna River valley

Na območju Radovne je stik dveh vodonosnikov, ki imata pomembno vlogo pri napajanju reke Radovne in njenih kraških pritokov (Torkar et al., 2016). V dolini, ki je zapolnjena s fluvioglacialnimi sedimenti kot so prod, pesek in delno konglomerat z vmesnimi lečami gline, je medzrnski vodonosnik, na preostalem napajalnem območju pa je kraško-razpoklinski vodonosnik, ki tudi neposredno napaja medzrnski vodonosnik (Slika 34). Kraško-razpoklinski vodonosnik sestavljajo cordevolski in ladinjski apnenci ter anizijski dolomiti. Padavine in snežnica se tako infiltrirajo skozi razpokane kraške kamnine ter skozi fluvioglacialne sedimente. Izvir reke Radovne izvira iz medzrnskega vodonosnika, ki ima v zaledju kraško-razpoklinski vodonosnik. Dolvodno se pretoki reke Radovne

povečujejo tako zaradi podzemnih pritokov vode z boka kot tudi dolvodno, v srednjem delu doline zaradi površinskih kraških pritokov (Torkar et al., 2016).

S konceptualnim modelom izvira reke Radovne predpostavljamo, da sta kemična in izotopska sestava vod iz obeh vodonosnikov različni in da imajo vode z boka oziroma iz kraško-razpoklinskega vodonosnika pomemben vpliv na sestavo vode v reki. Z modelom prav tako predpostavljamo, da ima snežnica velik vpliv na odtok vode skozi izvire in da se delež te dolvodno spreminja. Dolvodno naj bi se delež snežnice spreminjal zaradi dveh vplivov: (1) zaradi stratifikacije vode, ki vsebuje različen delež snežnice, in (2) zaradi dotokov vode z bokov, ki imajo drugačno sestavo in vsebnost snežnice.



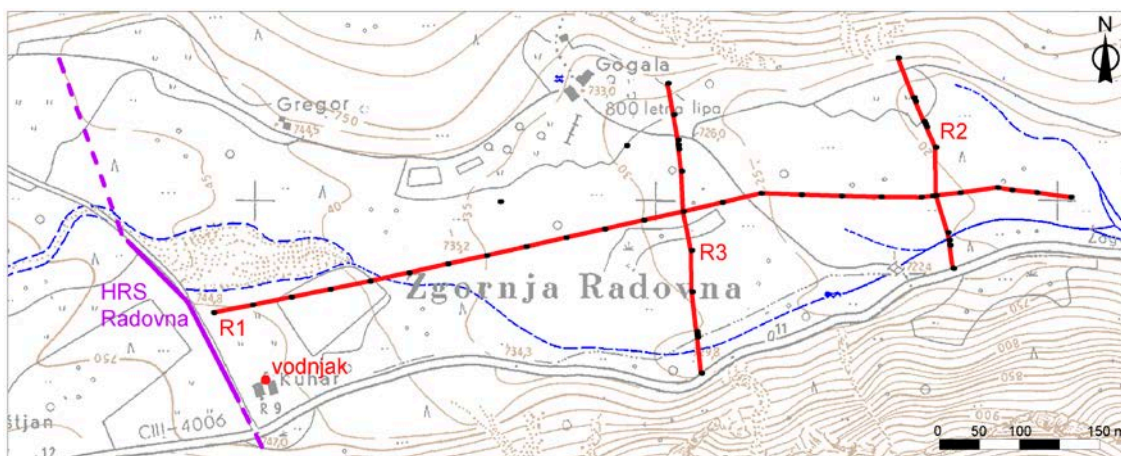
Slika 34: Blok diagram toka podzemne vode

Figure 34: Block diagram of groundwater flow

6.1.1 Interpretacija refleksijskih podatkov

Refleksijsko snemanje profila HRS Radovna se je izvedlo konec julija 2013. Profil HRS Radovna je bil posnet vzdolž roba makadamske ceste prečno na dolino Radovne (Slika 35). Celotna dolžina profila je 416 m s skupno 185 posnetki. Osnovni podatki o profilu HRS Radovna so podani v preglednici (Preglednica 9). Profil ni bil posnet po celotni širini doline zaradi pašnika, ki se nahaja na severnem delu in je obdan z električno ograjo, ter zaradi živali, ki onemogočajo refleksijsko snemanje. Poleg tega snemanje na tem odseku prečnega profila ni bilo mogoče tudi zaradi zelo mehke travnate površine, ki je neprimerna za pridobivanje podatkov pri uporabi macole zaradi slabljenja signala. Ta pojav je bil pri podobnih pogojih opisan že drugje (Atanackov in Gosar, 2013).

Kakovost podatkov je zelo spremenljiva in v povprečju razmeroma slaba (Slika 36). K slabši kakovosti so prispevali objektivni dejavniki, kot je prisotnost obilne vegetacije vzdolž večjega dela profila (podrast ob cesti, večja drevesa, predvsem listavci tik ob cesti), ki je tudi v šibkejšem vetru povzročala močne motnje. Zaradi praktično stalne prisotnosti vetra izvedba snemanja podatkov v mirnem vremenu ni bila mogoča. Dodaten dejavnik, ki je negativno vplival na kakovost podatkov, je velika debelina z vodo nezasičene oziroma suhe plasti: v vodnjaku je bila v času snemanja gladina vode na globini 22,7 m. Pri visokoločljivi refleksijski seizmiki je 20 m debela nezasičena plast v srednje in debelozrnatih klastičnih sedimentih lahko velika težava, saj nezasičeni sedimenti delujejo kot dušilec (še posebej visokofrekvenčnega) signala.



Slika 35: Položaj profila HRS, georadarskih profilov R1, R2 in R3 in lokacija vodnjaka

Figure 35: Position map of the HRS profile, GPR profiles R1, R2 in R3 and the well location

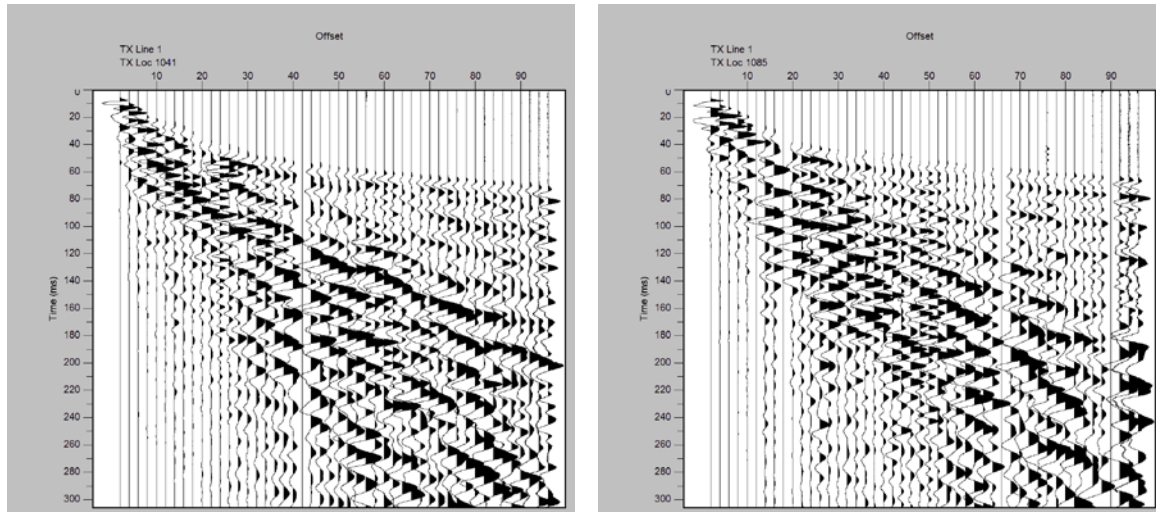
Preglednica 9: Parametri snemanja seizmičnega profila HRS Radovna

Table 9: HRS Radovna seismic profile data acquisition parameters

Parametri snemanja profila HRS Radovna	
Dolžina profila	416 m
Število posnetkov	185
Število aktivnih kanalov	48
Geofoni	40 Hz
Razdalja med geofoni	2 m
Dolžina dispozitiva	94 m
Geometrija dispozitiva	'on end'
Razdalja strel – 1. aktivni geofon	2 m
Seizmični vir(i)	6-kg macola
Dolžina posnetka	812 ms
Frekvenca vzorčenja	1000 Hz

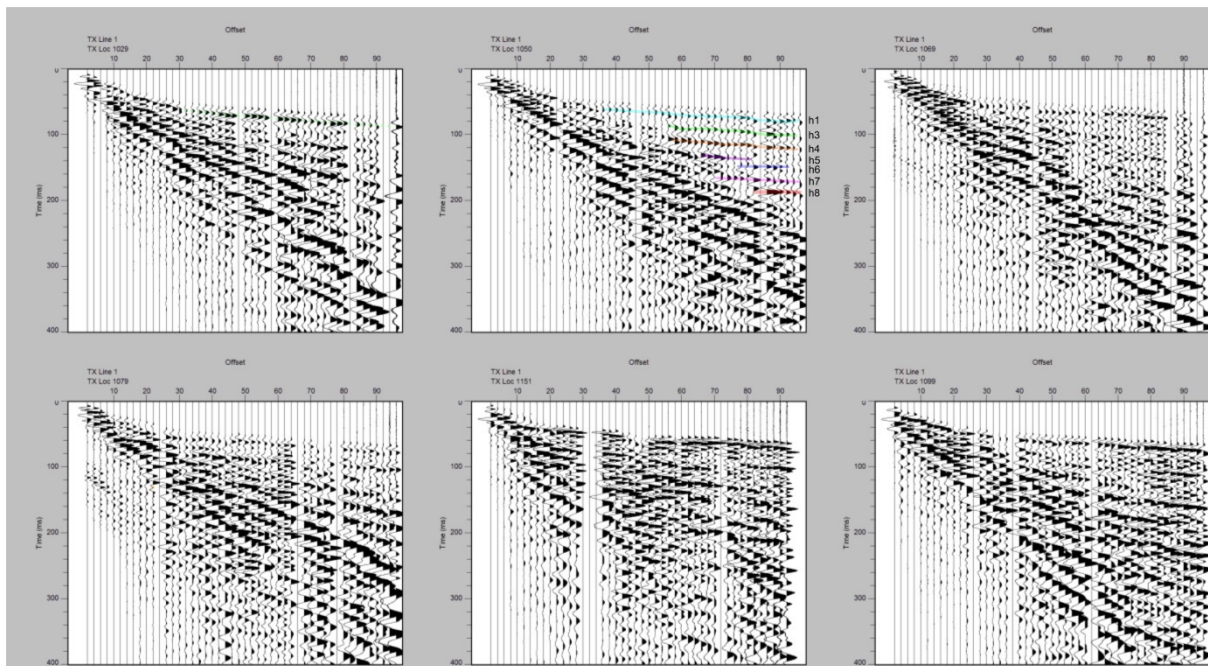
Nadaljnja analiza reflektorjev je obsegala devet posameznih strelnih točk (Slika 37). Vsi reflektorji so bili pretvorjeni v globino, od h1 do h8, z uporabo povprečne hitrosti v_p (2000 m/s), ki predstavlja povprečno seizmično hitrost za glacialne sedimente (Preglednica 10) (Kearey et al., 2002). Glede na prejšnje raziskave smo sklepali, da so reflektorji v sedimentu v dolini generalno gledano horizontalni ali malenkost nagnjeni, zato so bili reflektorji na podobni globini interpretirani kot isti reflektor. Iz vsake od devetih izbranih strelnih točk je bil najgloblji reflektor upoštevan kot globina do predkvartarne podlage in na osnovi teh podatkov je bila konstruirana oblika podlage. Med posameznimi strelnimi točkami je bila oblika horizontov linearno interpolirana med dvema točkama. Zaradi pomanjkanja podatkov iz vrtin je skoraj nemogoče opredeliti litološke meje ali sedimentne prehode, ki so podali reflektorje. Možno je, da so reflektorji povzročeni zaradi velike spremembe v zrnivosti v glacialnih sedimentih (različne morene) ali zaradi spremembe med različnimi tipi sedimentov, kot so glacialni, aluvialni in glaciofluvialni sedimenti. Iz interpoliranih podatkov se je

izrisal shematični prečni presek doline reke Radovne (Slika 38). Ker profila ni bilo mogoče posneti čez celotno širino doline, je ekstrapolirani del označen s črtkano črto.



Slika 36: Posnetka s slabo in z dobro vidnimi refleksi. Levo: posnetek na strelni točki Tx1041, pri katerem so refleksi zabrisani in skoraj nevidni. Desno: posnetek na strelni točki Tx1085, kjer so refleksi bistveno bolj vidni.

Figure 36: Two seismic shot gathers displaying the variability in data quality. Left: shot gather at shot point Tx 1041 with almost indiscernible reflectors. Right: shot gather at shot point Tx 1085 with significantly better visibility of reflectors.



Slika 37: Šest od devetih refleksov, ki so bili uporabljeni v alternativnem procesu obdelave (strelne točke 1029, 1050, 1069, 1079, 1099 in 1151).

Figure 37: Six of nine seismic shot gathers used in the alternative processing (shot points 1029, 1050, 1069, 1079, 1099 and 1151).

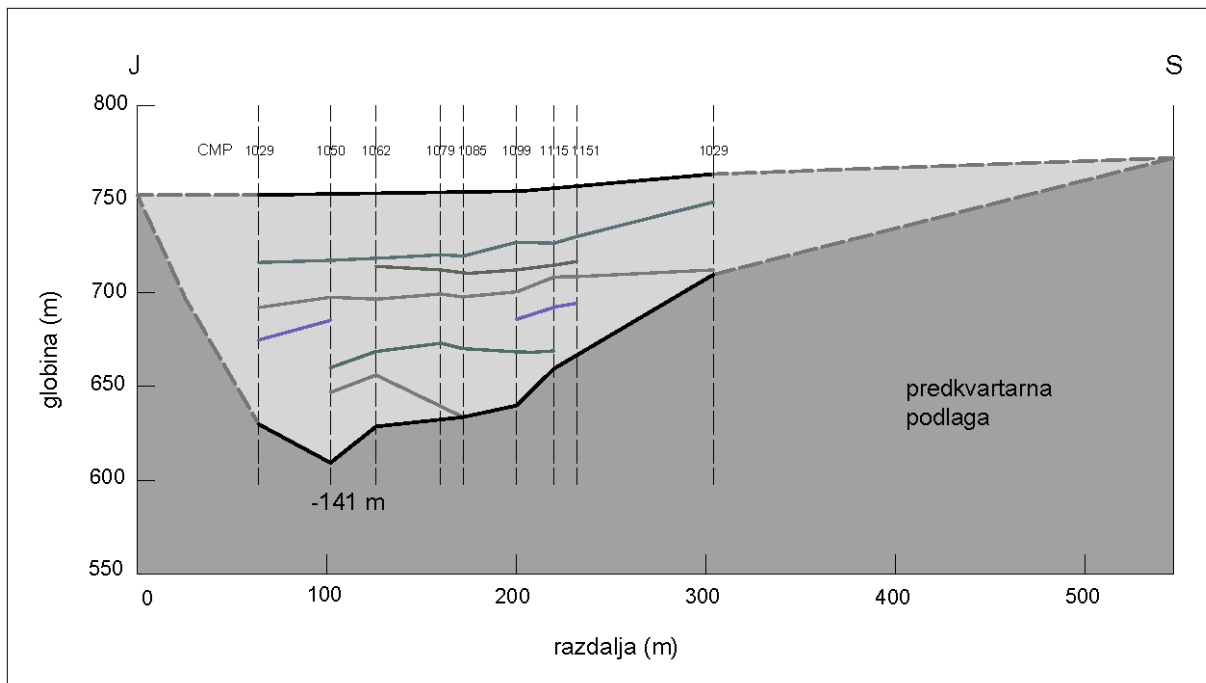
Preglednica 10: Izbrani seizmični strelji s pripadajočo interpretirano globino reflektorjev, ki so razporejeni v devet horizontov z Gauss-Krügerjevimi koordinatami skupnih sredinskih točk (CMP).

Table 10: Selected seismic shot gathers with depths of interpreted reflectors arranged in nine horizons with Gauss-Krüger coordinates of CMPs.

Koordinate		CMP	h1 (m)	h2 (m)	h3 (m)	h4 (m)	h5 (m)	h6 (m)	h7 (m)	h8 (m)	Podlaga (m)
GKX (m)	GKY (m)										
143355	419486	1029	-37		-63	-81			-125		-125
143367	419315	1050	-37		-57	-70	-95	-109	-125	-141	-141
143373	419341	1062		-40	-59		-87	-100	-122		-122
143393	419430	1079	-34	-43	-55		-83				
143402	419413	1085	-35	-44	-56		-86	-117			-117
143421	419413	1099	-28		-55	-71	-89	-111			-111
143436	419413	1109	-30		-49	-66	-89				
143444	419413	1115		-42		-65	-95				-95
143487	419289	1151	-16		-53						-53

Zaradi velike spremenljivosti kakovosti podatkov lahko le s težavo sledimo posameznim seizmičnim horizontom. Izrazitejši seizmični horizont je viden v CMP-intervalu 1120 in 1180, na dvojnih časih med 140 in 70 ms. Glede na izrazitost horizonta je interpretiran kot najverjetnejše dno doline, torej meja med kvartarnimi sedimenti in predkvartarno karbonatno podlago. Horizont na preostalem delu profila ni viden. Prav tako se da slutiti druge plitve seizmične horizonte med 60 in 100 ms, vendar jih zaradi velike variabilnosti podatkov ne smatramo kot zanesljive in reprezentativne, in jih zato ne interpretiramo.

Glede na prejšnje raziskave v dolini reke Radovne (Drobne et al., 1975) lahko interpretiramo, da so sedimenti stratificirani in da je to najverjetneje zaradi razlike med slabo in dobro sortiranimi peščeno-prodnimi plastmi in plastmi s samicami. Z analizo je bilo določenih vsaj sedem različnih plasti (Slika 38). Najgloblja točka do predkvartarne podlage je 141 m in je bila dobljena samo z eno strelno točko. Pokriti del doline je na južnem pobočju Pokljuke strmejši kot na severnem pobočju Mežakle, kar ustreza obliki pobočij nad površino sedimentov. Kljub pomanjkanju podatkov je dobljena največja globina realna glede na prejšnje raziskave v dolini Radovne, kjer je bila dobljena globina vsaj 100 m (Drobne et al., 1975). Podobne raziskave refleksijske seizmike so bile narejene na območju izvira reke Save, kjer je bila določena globina do predkvartarne podlage 200 m in je povezana z območjem savskega preloma (Atanackov et al., 2015).



Slika 38: Prečni shematski presek S–J doline reke Radovne

Figure 38: Schematic N-S cross-section of the Radovna River valley

6.2 Analiza gladin podzemne vode

6.2.1 Interpretacija GPR profilov

Georadarske meritve so bile izvedene 19.10.2012. Na terenu, kjer smo posneli tri profile (Slika 35), je bilo predhodno geodetsko izmerjenih 48 geodetskih točk. Na vzdolžnem profilu R1 je bilo izmerjenih 26 geodetskih točk, devet na prečnem profilu R2 ter 13 na drugem prečnem profilu R3 (Slika 35).

Osnovni podatki o georadarskih profilih so podani v spodnjih preglednicah (Preglednica 11, Preglednica 12, Preglednica 13). Vzdolžni profil R1 je bil posnet po dolini, ki je zapolnjena s fluvio-glacialnimi sedimenti. Profila R2 in R3, sta bila posneta prečno na dolino in na skrajnih koncih segata tudi že na območje pobočnih gruščev in deluvija.

Teren je bil za potrebe topografske korekcije zakoličen na 50 m. Na posameznih odsekih, kjer se je topografija hitro spremenila, je bil teren zakoličen bolj na gosto, npr. zaradi stopenj na terenu, zaradi makadamske ceste in zaradi suhe struge. Na vseh količkah so bile predhodno izmerjene koordinate GPS, x in y koordinati sta pomagali pri umerjanju dolžine profila, z koordinata pa pri določevanju nadmorske višine terena. Lokacije količkov so bile na georadarskih profilih zabeležene z uporabo markerjev. Topografska korekcija je ključna za nadaljnji pravilen izris gladine podzemne vode. Georadarske meritve profilov so bile izvedene z vrstico za merjenje razdalje in enakomerno proženje. Vrstico je bilo treba na več mestih prevezati. Korak merjenja je bil nastavljen na 0,2 m. Merjenje s

časovnim proženjem ne bi bilo primerno, ker gibanje ni bilo enakomerno, ampak je bilo moteno zaradi neravnega terena in zatikanja antene v veje in korenine. Antena je zaradi terena imela občasno slabši stik s tlemi.

Preglednica 11: Geofizikalni parametri za profil R1

Table 11: Geophysical parameters for profile R1

Ime profila	R1	Dolžina profila [m]	1070 m
Tip profila	vzdolžni	Št. sledi	5357
Smer merjenja	Z→V	Korak merjenja	0,2 m

Preglednica 12: Geofizikalni parametri za profil R2

Table 12: Geophysical parameters for profile R2

Ime profila	R2	Dolžina profila [m]	217 m
Tip profila	prečni	Št. sledi	1088
Smer merjenja	J→S	Korak merjenja	0,2 m

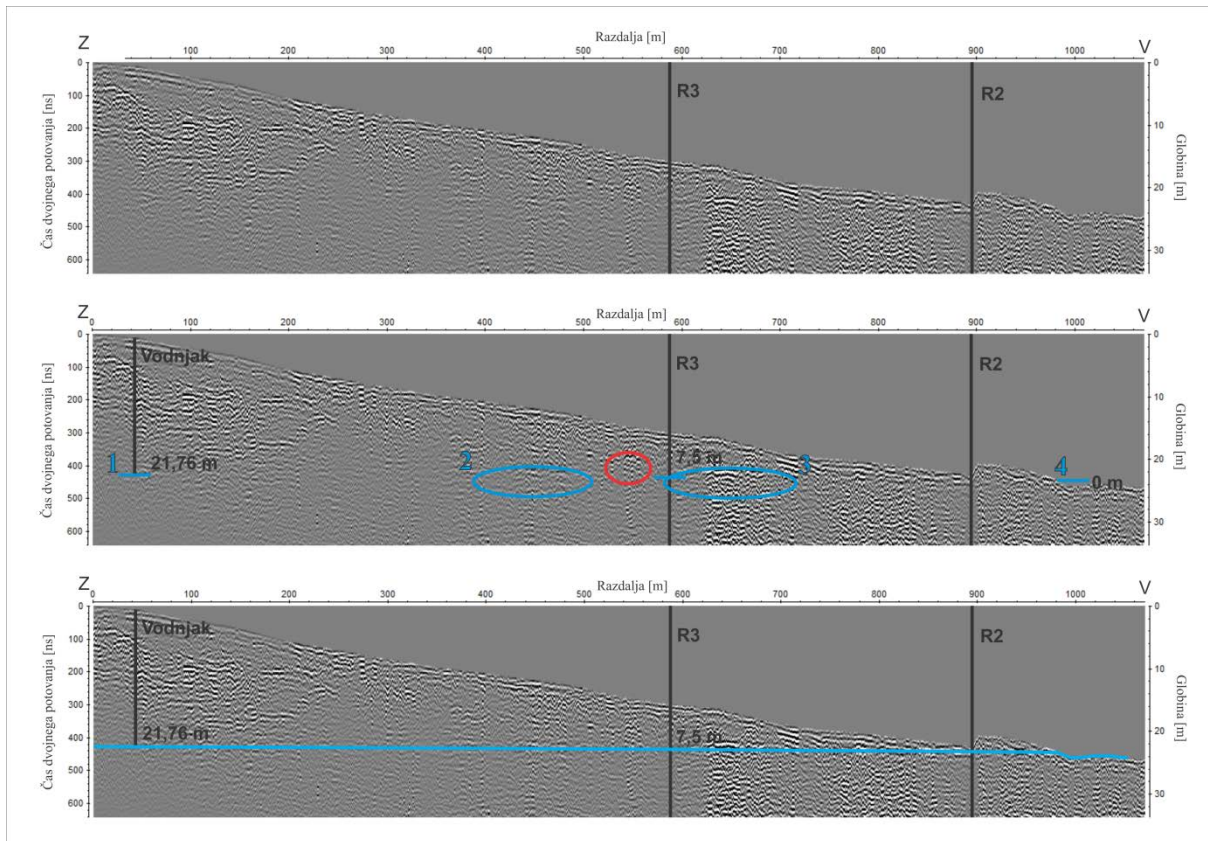
Preglednica 13: Geofizikalni parametri za profil R3

Table 13: Geophysical parameters for profile R3

Ime profila	R3	Dolžina profila [m]	354,5 m
Tip profila	prečni	Št. sledi	1774
Smer merjenja	J→S	Korak merjenja	0,2 m

Ker profili ne vsebujejo izrazitih difrakcijskih hiperbol, ki so potrebne za analizo hitrosti potovanja signalov, se je hitrost valovanja izračunala na podlagi znane globine podzemne vode v vodnjaku, ki je bila na dan merjenja 21,76 m. Iz tega izhaja, da je hitrost potovanja signalov 0,105 m/ns in pripadajoča dielektričnost materiala $\epsilon = 8$. Ti parametri so odraz prisotnosti vode v heterogenih fluvioglacialnih nanosih na raziskovalnem območju.

Na vzdolžnem profilu R1 je bila gladina podzemne vode določena glede na označene detajle (Slika 39). Območji 2 in 3 označujeta dobro izražen linearni reflektor, ki pa je vmes prekinjen. Glede na geologijo območja je lahko za večje dušenje signala, ki je označen z rdečo elipso, kriv večji blok kamnine oziroma samice, ki se pojavljajo po celotni dolini reke Radovne, v dolini Krme (Žlebnik, 1966) in v Srednji Radovni (Drobne, 1975). Pri izrisu gladine podzemne vode je bil poleg podatka do gladine podzemne vode v vodnjaku (točka 1) upoštevan tudi izvir (točka 4), kjer podzemna voda pride na površje. S temi točkami in območji ter s hitrostjo potovanja signalov in dielektrična konstanta materiala, je bila določena prava globina do podzemne vode na mestu, kjer profil R1 seka profil R3. Za izračun gradienta sta bili upoštevani dve točki na vzdolžnem profilu, lokacija vodnjak in sečišče profila R1 in R3. Razlika v višini gladine podzemne vode, 2,86 m, in razdalja 550 m nam podata gradient podzemne vode 0,0058.

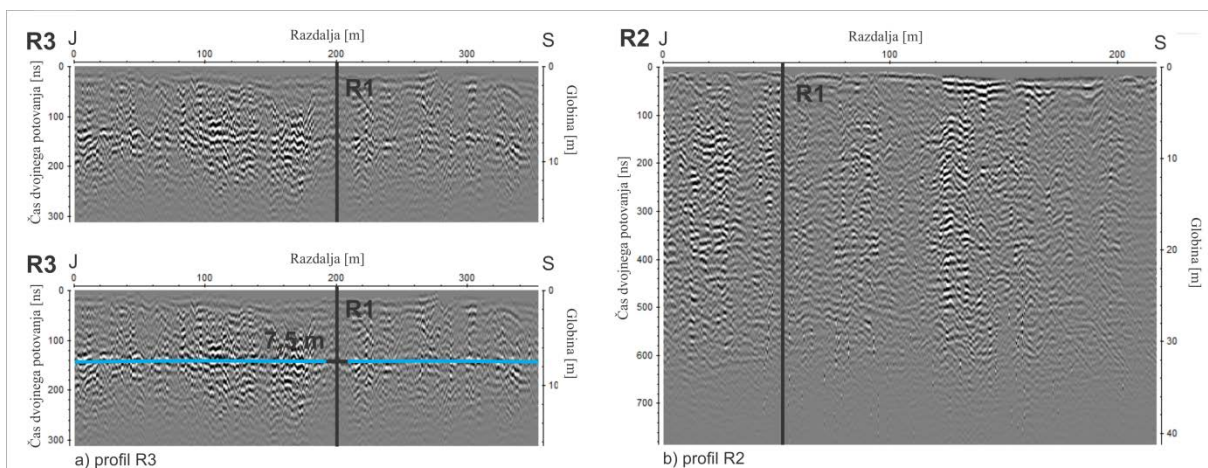


Slika 39: Interpretacija georadarskega vzdolžnega profila R1

Figure 39: Interpretation of the longitudinal GPR profile R1

Legenda:

- gladina podzemne vode
- območje dobro izraženega linearnega reflektorja
- veliko dušenje signala



Slika 40: Interpretacija georadarskih prečnih profilov R2 in R3

Figure 40: Interpretation of the transversal GPR profiles R2 and R3

Na profilu R3 se kaže zvezni reflektor, ki predstavlja gladino podzemne vode in ustreza globini 7,5 m na vzdolžnem profilu R1 (Slika 40). Reflektor ni raven, ampak skače, kar je posledica skakanja antene med merjenjem zaradi korenin, vej in podrtih dreves. Kljub temu se lahko določi generalno gladino podzemne vode, ki ustreza globini 7,5 m na profilu R1. Po dobljenih podatkih in po konstruirani

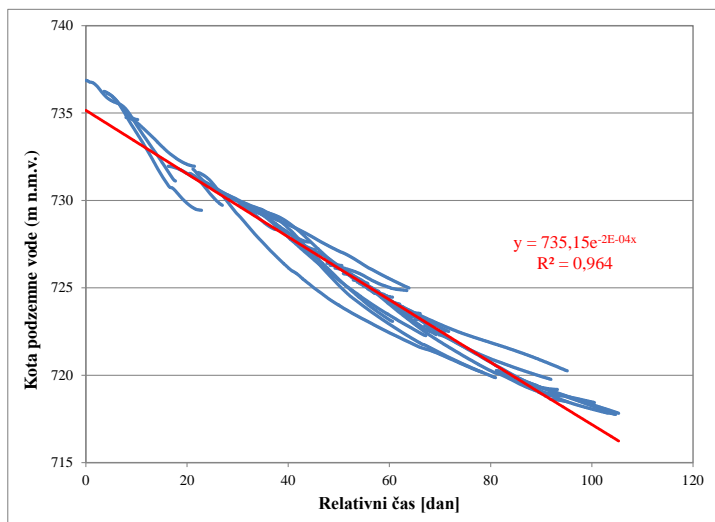
gladini podzemne vode bi lahko trdili, da se podzemna voda malenkost bolj napaja z južne strani, s strani Pokljuke (razlika 1 m). Prečni profil R2 je bil posnet na lokaciji, kjer je podzemna voda tik pod površjem. Ker je vertikalna ločljivost uporabljene antene omejena, se na tem profilu ne vidi nobenega linearnega reflektorja, kar na isti lokaciji velja tudi za vzdolžni profil R1.

Nizkofrekvenčna georadarska metoda se je izkazala za uporabno pri določevanju gladine podzemne vode in njenega položaja v prostoru. Z georadarjem smo pridobili pomemben podatek o gradientu in podatke o razprostiranju gladine podzemne vode v prostoru. Uporaba RTA antene se je izkazala za veliko prednost pri izvajanju meritev na neravnem zaraščenem in težko prehodnem terenu. Posledično je imela antena slabši stik s tlemi, vendar so rezultati kljub temu zadovoljivi.

6.2.2 Nihanje gladin podzemne vode v vodnjaku

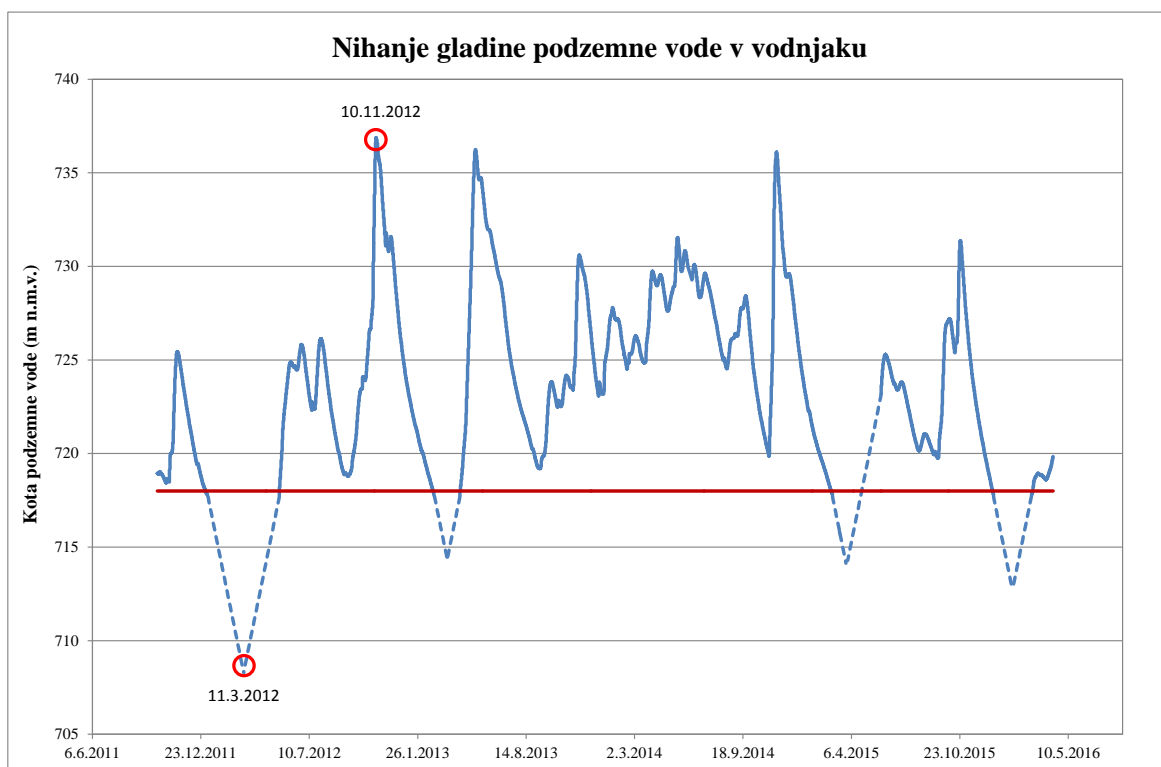
Višino gladine podzemne vode v vodnjaku merimo od 4.10.2011. V obdelavo so vključeni podatki za 4,5 leta oziroma do 12.4.2016. Podatki o globini podzemne vode so se posneli vsako uro in v celotnem nizu je 37.934 podatkov. Globina vodnjaka je 28 metrov (nadmorska višina 718 m) in ko je gladina podzemne vode nižje kot dno vodnjaka ta presahne. Ker pozimi vodnjak za 4 do 5 mesecev presahne, so bili manjkajoči podatki dopolnjeni z recesijsko krivuljo. Na podlagi MRS-modela za določitev recesijske krivulje so bili podatki obdelani z eksponentno regresijo (Posavec et al., 2006, Posavec et al., 2010), ki je prikazana na diagramu (Grafikon 4).

Grafikon 5 prikazuje časovno nihanje gladine podzemne vode v vodnjaku. V celotnem raziskovalnem obdobju (10/2011–04/2015) smo uspeli zabeležiti tako sušna kot tudi poplava obdobja. Od sredine leta 2011 in do sredine 2012 je bilo sušno obdobje (ARSO, 2012). V istem letu so bile v mesecu novembru obilne padavine, padlo je kar 22 % letnih padavin, ki so povzročile tudi poplave. V strugi reke Radovne so bile znatne spremembe, tudi gozd je bil delno zastu s prodrom. Nihanje gladine podzemne vode v vodnjaku je zelo dinamično. Z inštrumentom smo zabeležili razpon nihanja do 19,11 m. S konstruiranjem krivulje (črtkana linija) smo zabeležili razpon nihanja do 28,6 m (Grafikon 5), kar je mnogo več kot je bil predhodno ugotovljeno. Podzemna voda je bila tako najnižje, s pomočjo rekonstruiranja, zabeležena dne 11.3.2012 na nadmorski višini 708,3 m ter najvišje dne 10.11.2012 na nadmorski višini 736,9 m. Vodnjak je presahnil vsako leto, z izjemo leta 2014, ko je na območju padlo kar 2394,2 mm padavin, kar predstavlja 126 % padavin glede na referenčno obdobje 1961–1990.



Grafikon 4: Glavna recesijska krivulja za nivo podzemne vode na lokaciji vodnjak

Chart 4: Master recession curve for groundwater level at the well location



Grafikon 5: Nihanje gladine podzemne vode v odvisnosti od časa; črtkano so označeni izračunani nivoji s pomočjo recesijske krivulje, z rdečo črto je označena globina vodnjaka

Chart 5: Fluctuations of groundwater level versus time; the dash line represents calculated levels through regression curve and the red line represents the depth of the well

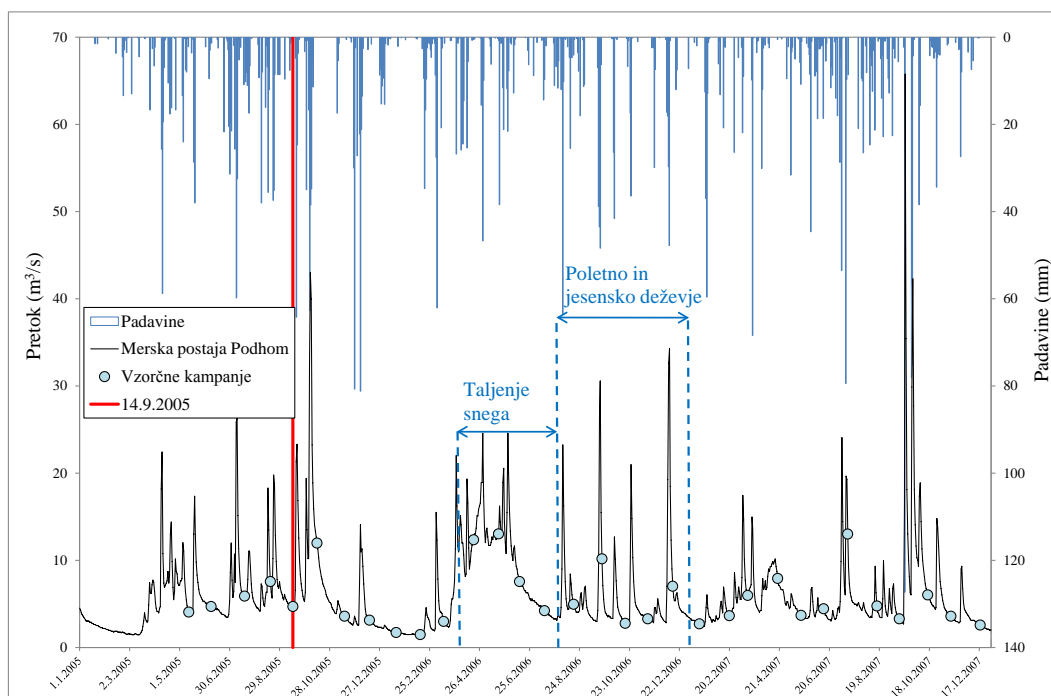
Glede na opazovane nivoje podzemne vode lahko hidrogram razdelimo na tri obdobja: na obdobje taljenja snega, na obdobje jesenskega deževja in na obdobje recesije (Grafikon 5). Ne glede na količino vode v vodonosniku se ta obdobja vsako leto pričnejo približno ob istem času. Tako

sklepamo, da se za območje Radovne obdobje recesije začne konec oktobra oziroma v prvi polovici novembra in traja do sredine marca, ko začne naraščati gladina podzemne vode. Sledi obdobje vpliva taljenja snega, ki traja do konca septembra, ko se nivoji ponovno dvignejo zaradi obilnega deževja, in to obdobje traja do novembra, ko začnejo gladine ponovno upadati. Gladina podzemne vode v zgornjem delu doline reke Radovne zelo niha in se hitro spreminja, kar nakazuje na vodonosnik, ki je dobro prepusten, hkrati pa je tak vodonosnik izredno občutljiv in ranljiv na ekstremne podnebne pojave, kot sta suša oziroma pomanjkanje snega in poplave ali preveč vode v kratkem času, kar lahko povzroči veliko škode. Nihanje gladine podzemne vode se sočasno odraža tudi na samem izviru Radovne, saj se ta seli po dolini gor in dol glede na količino vode v vodonosniku.

6.3 Analiza pretokov

6.3.1 Pretok na merski postaji Podhom

Postajo Podhom upravlja ARSO in predstavlja samodejno hidrološko postajo. V času raziskave, ki so izvajale med letoma 2005 in 2007, so bili pretoki med 1,40 in 65,8 m³/s (Grafikon 6) (ARSO, 2016b), s povprečnim pretokom 6,25 m³/s (Torkar et al., 2016). Predhodne analize pretoka reke Radovne so pokazale, da pretok vzdolž reke postopoma narašča in je močno odvisen od hidroloških pogojev (Torkar in Brenčič, 2015).



Grafikon 6: Pretok na merski postaji Podhom (ARSO, 2016b) z označenimi datumi vzorčenja (Torkar et al., 2016)

Chart 6: Discharge at the Podhom gauging station (ARSO, 2016b) with marked dates of sampling (Torkar et al., 2016)

6.3.2 Pretok na lokacijah Gogalov rovt in Klemenak

Višino vode v strugi smo za namen izračuna pretokov merili na dveh lokacijah, Gogalov rovt in Klemenak (Slika 18). Inštrument je višino vode meril na eno uro od 15.2.2012 dalje. Za potrebe izračuna pretočne krivulje smo ob različnih vodostajih merili pretoke s kemijsko integracijsko metodo s trenutnim vnosom soli in s hidrometričnim krilom (Poglavje 3.3). Meritve pretokov so se izkazale kot zahtevne. Prvotno smo imeli namen meriti pretoke samo s soljo, vendar so bile razlike med ponovitvenimi meritvami prevelike, zato smo v naslednjih meritvenih kampanjah uporabili še metodo s krilom in ju primerjali. Odstopanje med posameznimi meritvami je bilo prisotno na obeh lokacijah, vendar so bila odstopanja med posameznimi meritvami na lokaciji Klemenak manjša kot na gorvodni lokaciji Gogalov rovt. Večina meritev s soljo je bila na lokaciji Gogalov rovt višjih kot meritev s krilom. V zgornjem delu reka ne teče po enotni strugi in posledično se struga reke Radovne na tem območju skozi čas spreminja, kar dodatno pripomore k razlikam med meritvami. Zaradi spreminjanja struge reke in dobroprepustnega gruščja, ki sestavlja rečno dno lahko prišlo do izgube sledila. Prav tako je na merjenem odseku viden dotok vode iz bokov struge. Zaradi zgoraj navedenih razlogov je preračunani pretok izmerjen s soljo višji od izračunanega pretoka s hidrometričnim krilom. V nadaljnjih izračunih so bile uporabljene vse meritve s krilom in samo tiste meritve s soljo, ki so imele dobro ponovljivost. Potrebno je tudi poudariti problematiko določevanja preseka struga, saj se ta zaradi hudourniškega značaja skozi čas spreminja.

6.3.2.1 Gogalov rovt

Za izračun pretočne krivulje na lokaciji Gogalov rovt je bilo uporabljenih 10 podatkov o izmerjenem pretoku (Grafikon 7, Preglednica 14). Izračunana je bila tudi napaka X_Q (Preglednica 14) med izmerjenim pretokom Q_{izm} in izračunanim pretokom Q_{izr} po enačbi (24):

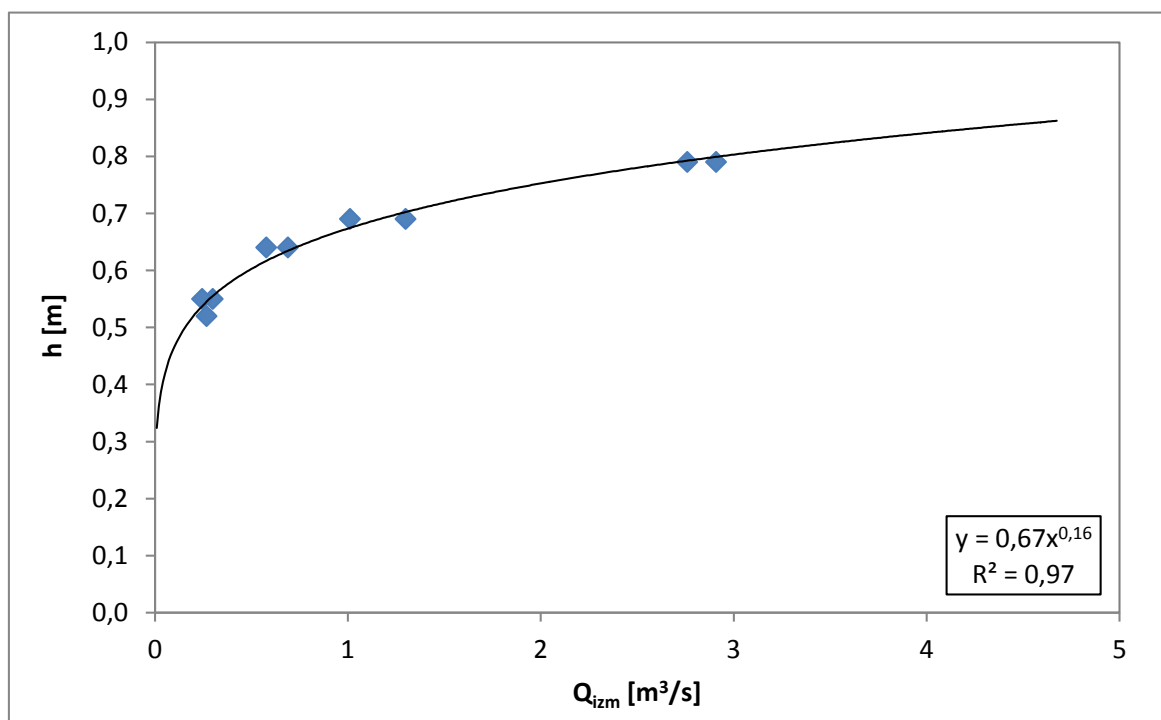
$$X_Q = 100 \frac{Q_{izr} - Q_{izm}}{Q_{izm}} \quad (24)$$

Na podlagi enačbe pretočne višine so se za pripadajoče višine vode izračunali pretoki (število pretokov $n = 34.468$, Grafikon 7). Na lokaciji Gogalov rovt je bila v začetku raziskav struga zaradi izjemno nizkih padavin v letih 2011 in 2012 suha, zato je bil razpon pretoka med 0 in $3,74 \text{ m}^3/\text{s}$, s povprečno vrednostjo pretoka $0,16 \text{ m}^3/\text{s}$ (Grafikon 8). Razpon podatkov o pretokih je prikazan tudi na grafikonu kvartilov, ki je sestavljen iz minimalne in maksimalne vrednosti, mediane ter prvega in tretjega kvartila (Grafikon 9).

Preglednica 14: Izmerjeni (Q_{izm}) in izračunani pretoki (Q_{izr}) na lokaciji Gogalov rovt s pripadajočo višino vode (h) v strugi in izračunano napako (X_Q)

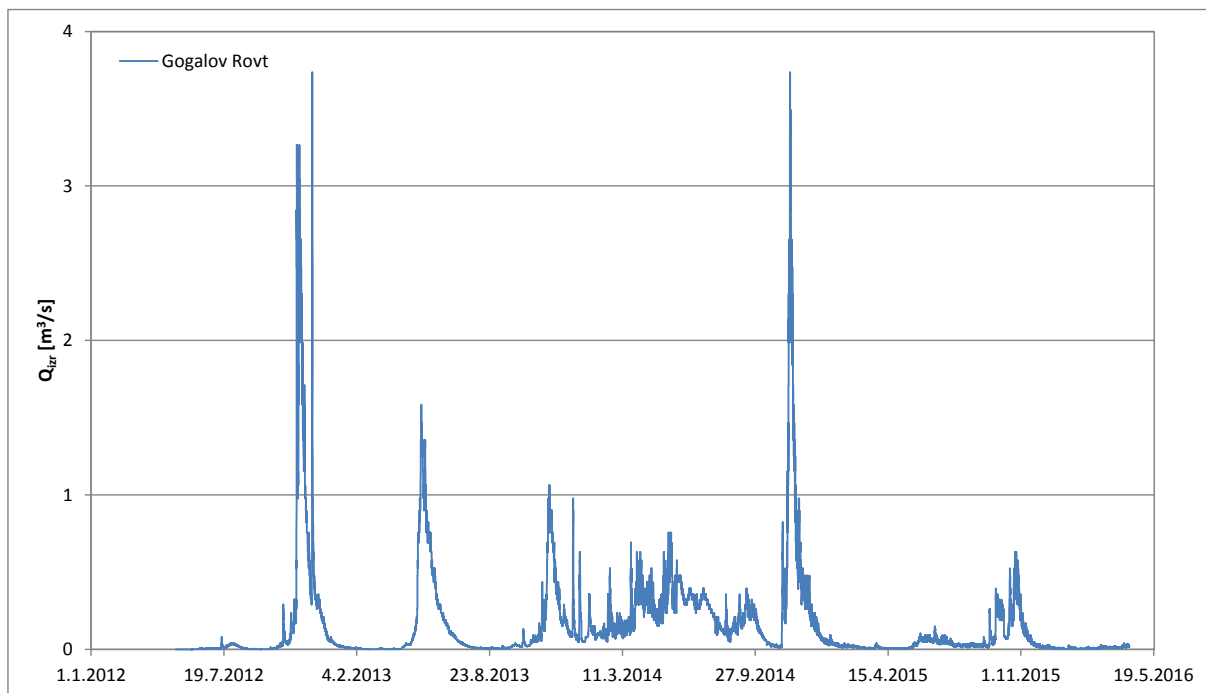
Table 14: Measured (Q_{izm}) and calculated discharge (Q_{izr}) with depended stage (h) and calculated error (X_Q) on location Gogalov rovt

Datum	Metoda	Q_{izm} (m^3/s)	h (m)	Q_{izr} (m^3/s)	X_Q (%)
29. 8. 2012	sol	0,30	0,55	0,39	29
10. 9. 2012	krilo	0,25	0,55	0,39	57
10. 9. 2012	sol	0,27	0,52	0,30	11
19. 12. 2012	krilo	2,91	0,79	2,06	-29
19. 12. 2012	sol	2,76	0,79	2,06	-25
23. 1. 2013	krilo	0,58	0,64	0,78	35
23. 1. 2013	sol	0,69	0,64	0,78	13
25. 4. 2013	krilo	1,01	0,69	1,10	9
25. 4. 2013	sol	1,30	0,69	1,10	-15
28. 5. 2013	krilo	4,39	0,93	4,39	0



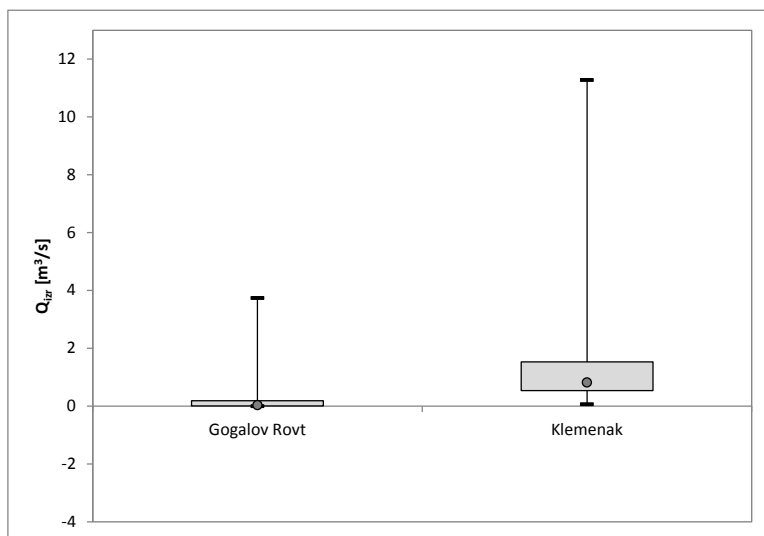
Grafikon 7: Pretočna krivulja za lokacijo Gogalov rovt

Chart 7: Rating curve for Gogalov rovt location



Grafikon 8: Pretok v odvisnosti od časa na lokaciji Gogalov rovt

Chart 8: Discharge as a function of time at location Gogalov rovt



Grafikon 9: Grafikon kvartilov pretoka na lokacijah Gogalov rovt in Klemenak

Chart 9: Box-and-whisker plot of discharges for the locations Gogalov rovt and Klemenak

6.3.2.2 Klemenak

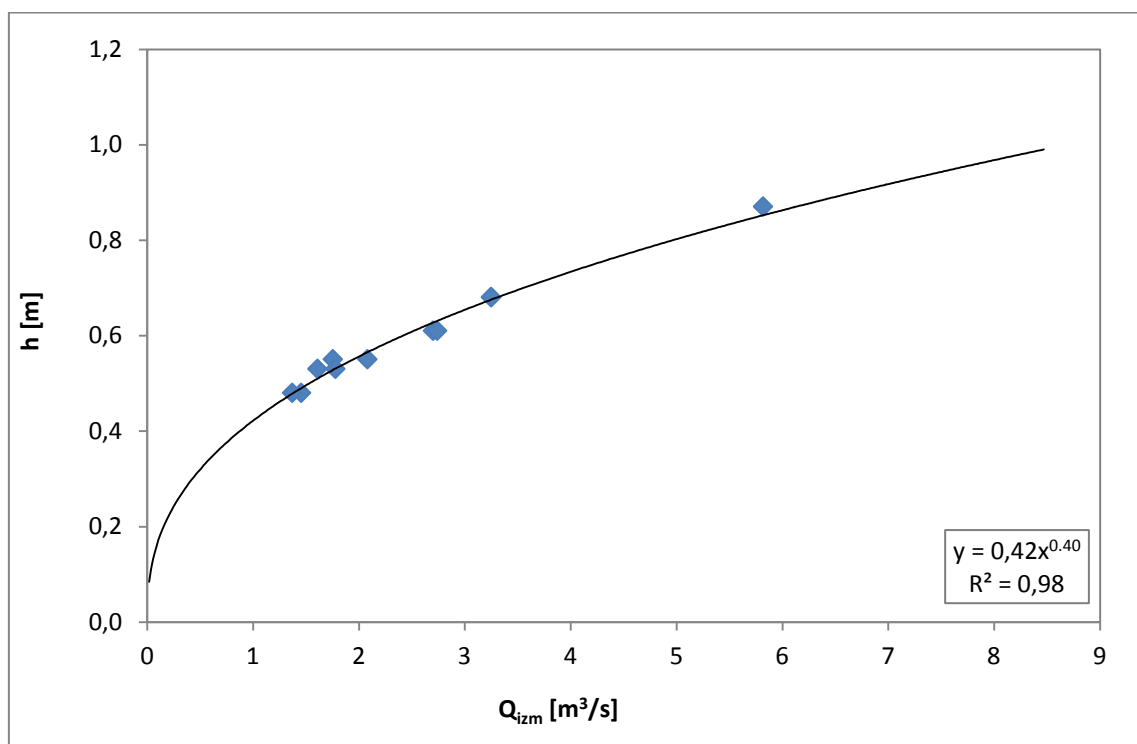
Za izračun pretočne krivulje na lokaciji Klemenak je bilo uporabljenih 11 podatkov o izmerjenem pretoku (Preglednica 15, Grafikon 10). Na podlagi enačbe pretočne krivulje so se za pripadajoče višine vode izračunali pretoki ($n = 34.936$). Na lokaciji Klemenak je med raziskavami prišlo do dveh izpadov podatkov od 2.10.2013 do 17.10.2013 zaradi nedelujočih baterij in med 16.1.2015 in 7.3.2015 zaradi

nepojasnjenega vzroka. Na lokaciji Klemenak je bil izračunan razpon pretoka med 0,06 in 11,28 m³/s, s povprečno vrednostjo pretoka 1,14 m³/s (Grafikon 9).

Preglednica 15: Izmerjeni (Q_{izm}) in izračunani pretoki (Q_{izr}) na lokaciji Klemenak s pripadajočo višino vode (h) v strugi in izračunano napako (X_Q)

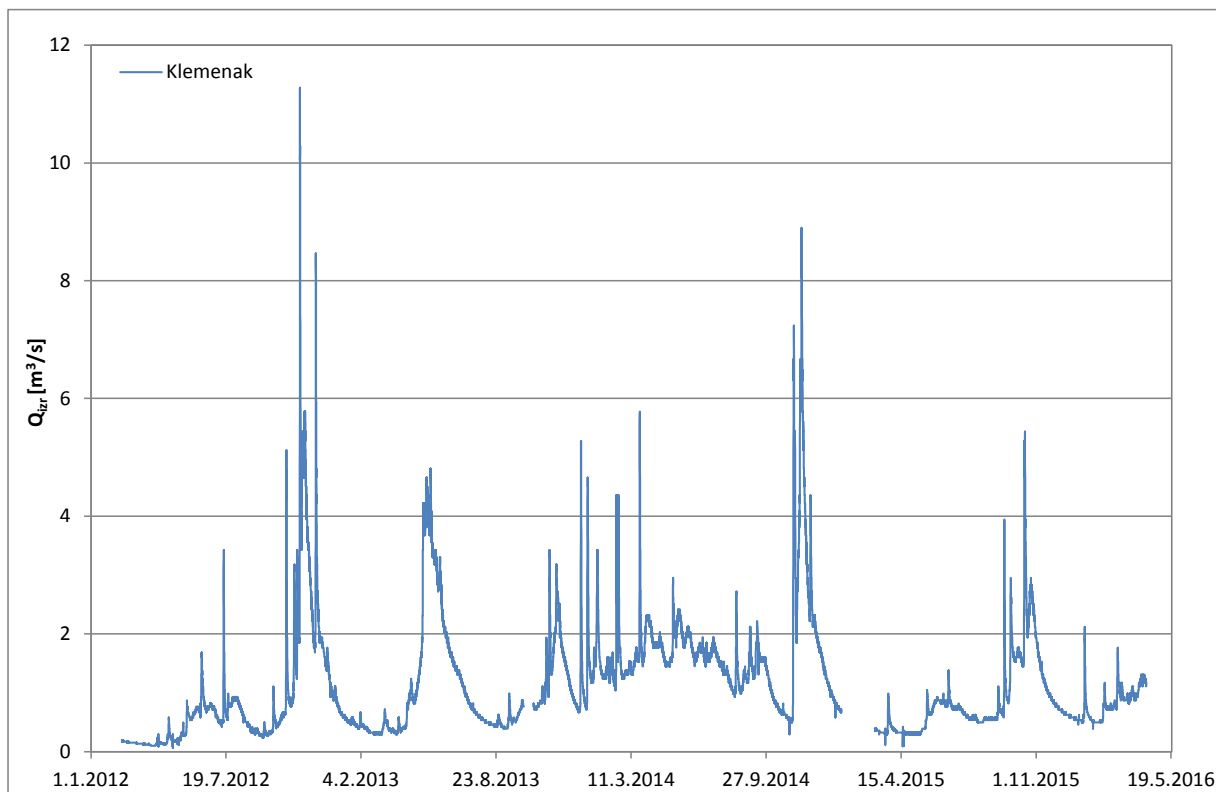
Table 15: Measured (Q_{izm}) and calculated discharge (Q_{izr}) with depended stage (h) and calculated error (X_Q) on location Klemenak

Datum	Metoda	Q_{izm} (m ³ /s)	h (m)	Q_{izr} (m ³ /s)	X_Q (%)
10. 9. 2012	krilo	1,45	0,48	1,38	-5
10. 9. 2012	sol	1,37	0,48	1,38	1
19. 12. 2012	krilo	3,25	0,68	3,30	2
19. 12. 2012	sol	3,25	0,68	3,30	2
23. 1. 2013	krilo	1,75	0,55	1,94	11
23. 1. 2013	sol	2,08	0,55	1,94	-7
15. 3. 2013	krilo	1,61	0,53	1,77	10
15. 3. 2013	sol	1,78	0,53	1,77	-1
25. 4. 2013	krilo	2,70	0,61	2,51	-7
25. 4. 2013	sol	2,74	0,61	2,51	-8
28. 5. 2013	krilo	5,82	0,87	6,12	5



Grafikon 10: Pretočna krivulja za lokacijo Klemenak

Chart 10: Rating curve for Klemenak location



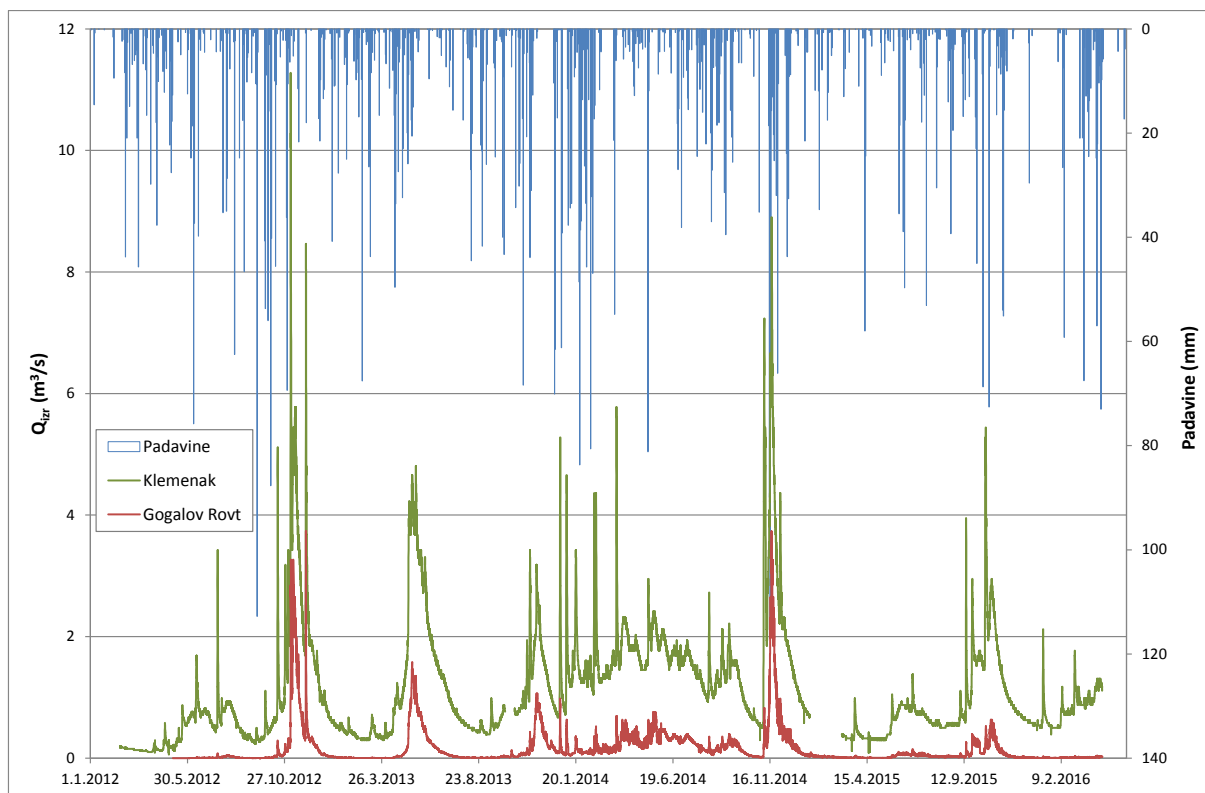
Grafikon 11: Pretok v odvisnosti od časa na lokaciji Klemenak

Chart 11: Discharge as a function of time at location Klemenak

6.3.2.3 Analiza pretoka v zgornjem delu reke Radovne

Krivulji pretoka za obe lokaciji v odvisnosti od časa enako nihata (Grafikon 12), vendar je količina na gorvodni lokaciji Gogalov rovt, ki je oddaljena približno 1,5 km od izvira in 1,6 km od dolvodne lokacije Klemenak, veliko manjša. Povečanje količine vode dolvodno nakazuje na to, da se reka Radovna prevladujoče napaja s podzemno vodo ter da je prisoten pritok podzemne vode z obeh bokov, s planot Mežakla in Pokljuka. Najvišji pretoki so bili na obeh lokacijah zabeleženi novembra 2012 in 2014 in so posledica večjih količin padavin (Grafikon 12). Na hidrogramu lokacije Klemenak so obdobja taljenja snega zaradi večjih pretokov vidnejša kot na hidrogramu Gogalov rovt.

Oba hidrograma imata mešani, alpski snežno-dežni (Kobold et al., 2012), odtočni režim z minimalnimi pretoki v zimskem in poletnem obdobju ter z maksimalnimi pretoki pomladi, v času taljenja snega, ter jeseni, v času obilnega deževja. Nihanje pretoka v strugi je odraz polnjenja in praznjenja vodonosnika ter neposrednega vpliva padavin. Ob močnejših nalivih voda v strugi močno naraste, vendar tudi hitro odteče. Obdobja taljenja snega so si v času opazovanja na hidrogramu zelo različna, na kar vpliva več dejavnikov, kot so debelina snežne odeje, temperatura v času taljenja, količina padavin itd.



Grafikon 12: Primerjava pretoka in padavin na postaji Zgornja Radovna v odvisnosti od časa na lokacijah Gogalov rovt in Klemenak

Chart 12: Discharge and precipitation at station Zgornja Radovna versus time at the location Gogalov rovt and Klemenak

6.4 Fizikalni parametri vod

6.4.1 Elektroprevodnost, temperatura in pH

Fizikalno-kemijski parametri vode v reki, na izvirih in v vrtini za obdobje med 2005 in 2007 (Slika 17) so podani v preglednici (Preglednica 16). Elektroprevodnost (EC) vode v reki se je gibala med 222 in 325 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (povprečje 244 $\mu\text{S}/\text{cm}$). EC vrednosti za vzorce na izvirih so bile med 188 (R-9) in 339 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (CR-1) (povprečje 262 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Rezultati kažejo, da so bile nižje vrednosti na severozahodu pri izviri in višje dolvodno na jugovzhodu. Spremembe EC v reki so bile manjše, vendar so vrednosti v dolvodni smeri naraščale. EC za vzorce iz vrtine so bili med 229 in 241 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (povprečje 235 $\mu\text{S}/\text{cm}$).

Temperatura vode vzorcev v reki in na izvirih je bila med 3,0 °C in 10,7 °C (povprečje 6,6 °C). Temperatura v vrtini je bila relativno stabilna in je variirala med 5,9 in 6,4 °C, s povprečjem 6,1 °C.

Vrednosti pH za vzorce na izvirih so bile med 7,1 in 8,4 (povprečje 7,9) in so bile malenkost nižje kot za vzorce v reki, kjer so se vrednosti gibale med 7,8 in 8,6 (povprečje 8,2). Najvišji pH je imela

najbolj dolvodna lokacija na reki (R-3). Vzorci iz vrtine so imeli podobne pH-vrednosti kot vzorci na izvirih, ampak je bil razpon podatkov manjši (Preglednica 16).

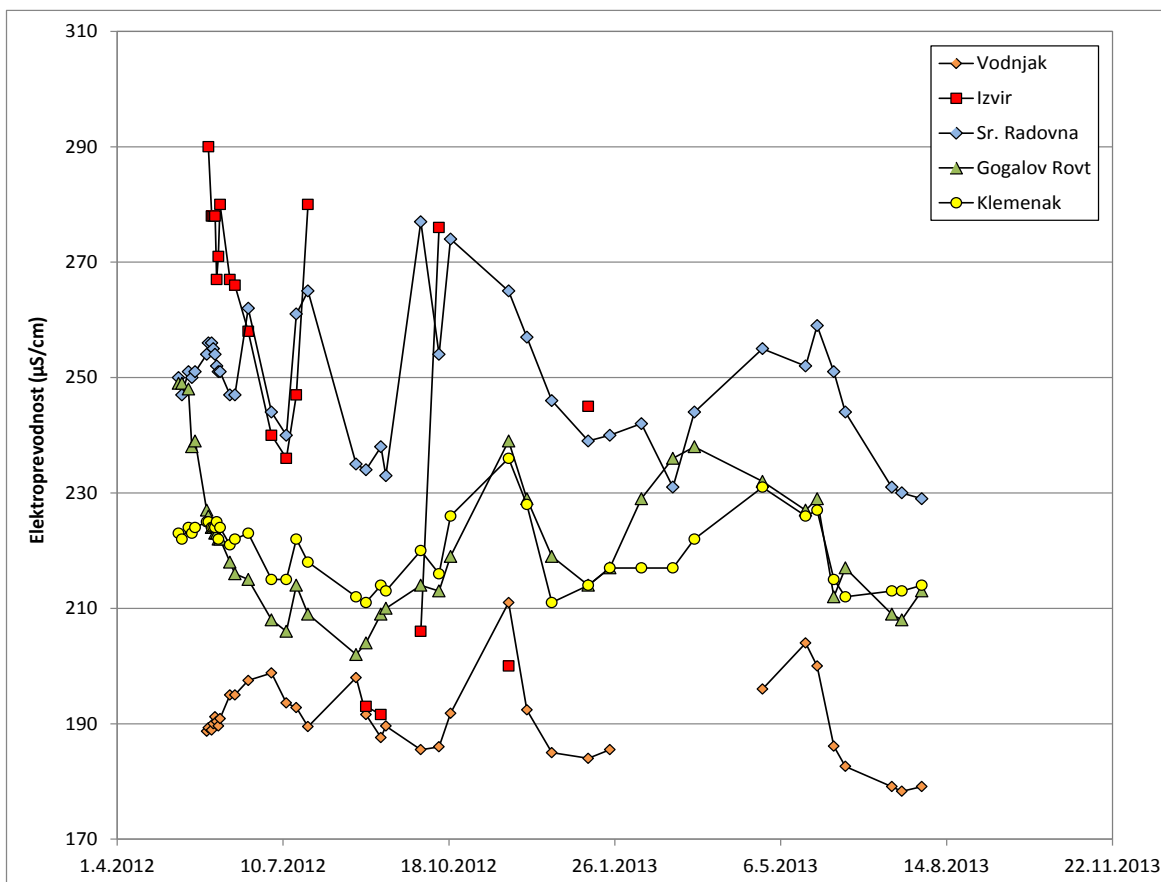
Preglednica 16: Minimalne, maksimalne in povprečne vrednosti za in-situ terenske parametre in za koncentracije glavnih ionov na devetih lokacijah za obdobje meritev 2005–2007 (Slika 17)

Table 16: Minimum, maximum and average values for in-situ field parameters and for major ion concentrations for nine locations for the period 2005–2007 (Figure 17)

Lokacija	Vrednost	EC ($\mu\text{S/cm}$)	T °C	pH	Na ⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	Ca ²⁺ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)
R-9 izvir	min	188	4,3	7,75	0,13	0,04	2,92	17,40	0,37	100	1,53	0,42
	povprečje	219	5,9	8,05	0,38	0,13	7,80	35,64	0,95	115	2,45	0,50
	max	244	7,1	8,35	0,78	0,19	12,80	43,30	3,59	128	7,81	0,82
R-8 reka	min	213	4,8	7,79	0,14	0,05	3,46	19,30	0,54	112	2,04	0,40
	povprečje	227	6,6	8,09	0,37	0,14	8,23	36,49	0,98	119	2,76	0,50
	max	244	8,0	8,38	0,61	0,32	12,20	44,00	3,65	140	8,15	0,86
V-2 podz. voda	min	229	5,9	7,54	0,11	0,03	1,98	16,60	0,48	113	1,88	0,52
	povprečje	235	6,1	7,92	0,33	0,11	6,06	40,27	0,92	122	2,67	0,61
	max	241	6,4	8,18	0,40	0,13	7,15	45,20	3,25	127	7,96	1,07
ZM-1 izvir	min	220	3,3	7,05	0,18	0,04	1,96	20,40	0,62	113	1,66	0,35
	povprečje	258	5,8	7,89	0,51	0,10	6,16	47,02	1,23	134	2,66	0,51
	max	303	10,2	8,26	0,92	0,16	11,50	56,80	3,85	168	7,76	0,84
Z-1 izvir	min	220	5,8	7,65	0,21	0,05	2,13	23,50	0,66	113	1,75	0,33
	povprečje	249	6,1	7,95	0,63	0,14	5,32	45,18	1,57	134	2,86	0,48
	max	269	6,6	8,15	1,24	0,20	7,17	51,70	3,91	211	7,78	0,84
L-1 izvir	min	266	6,1	7,54	0,44	0,12	1,94	28,30	1,89	129	2,44	0,36
	povprečje	281	6,7	7,83	1,55	0,24	4,32	52,88	3,31	143	3,81	0,48
	max	301	7,2	7,99	3,84	0,36	7,21	65,60	7,47	163	9,47	0,87
R-5 reka	min	222	3,7	7,84	0,24	0,07	3,55	27,00	0,92	123	2,18	0,41
	povprečje	248	7,5	8,22	0,68	0,15	7,17	43,28	1,53	130	3,07	0,50
	max	264	10,7	8,54	1,31	0,19	11,30	52,50	4,09	138	8,38	0,85
CR-1 izvir	min	265	7,3	7,05	0,13	0,04	3,81	19,20	0,72	140	3,27	0,53
	povprečje	303	7,5	7,73	0,45	0,15	11,41	48,71	1,20	158	4,81	0,67
	max	339	7,7	8,04	0,57	0,19	20,00	60,20	4,13	179	12,00	1,21
R-3 reka	min	237	3,0	8,02	0,33	0,11	4,28	30,60	1,09	125	2,22	0,39
	povprečje	256	6,7	8,33	0,78	0,18	7,43	44,12	1,74	140	3,23	0,51
	max	325	9,8	8,62	1,51	0,47	12,40	52,80	4,41	202	8,98	0,92
Skupaj	min	188	3,0	7,05	0,11	0,03	1,94	16,60	0,37	100	1,53	0,33
	povprečje	254	6,6	8,01	0,64	0,16	7,23	43,76	1,50	133	3,17	0,53
	max	339	10,7	8,62	3,84	0,47	20,00	65,60	7,50	211	12,00	1,21

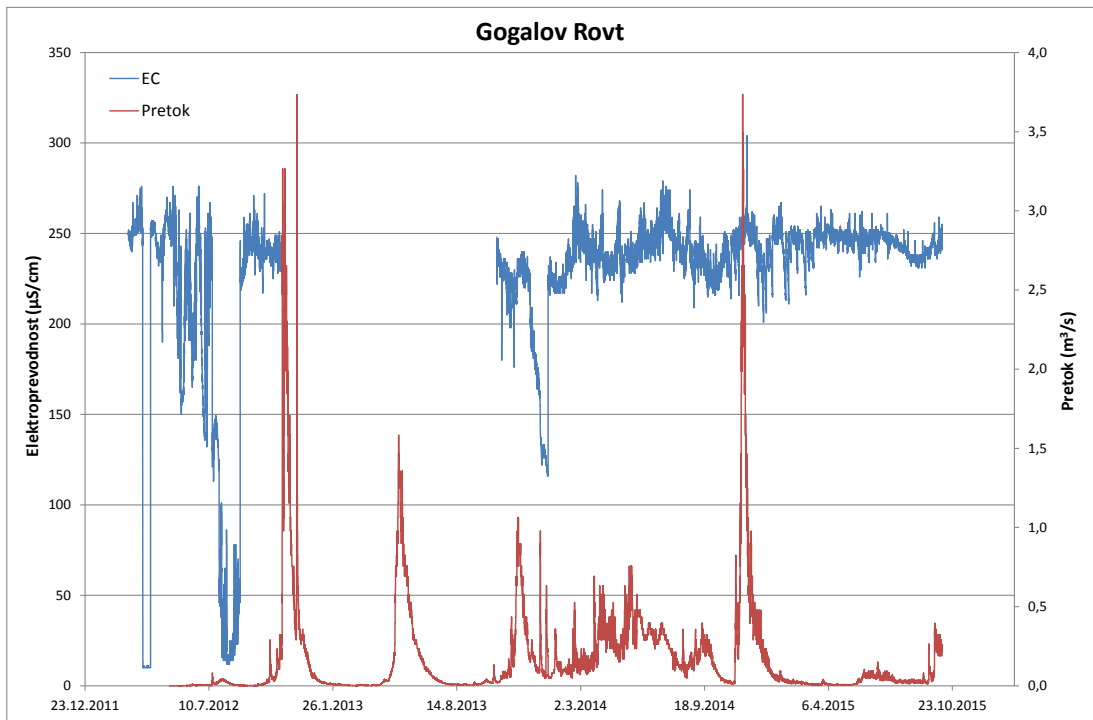
Elektroprevodnosti in temperature vode vseh petih lokacij, vzorčenih med letoma 2012 in 2013 (Slika 18), so podane v preglednici (Preglednica 17) in prikazane na diagramu (Grafikon 13, Grafikon 15). Elektroprevodnost v vodnjaku se je gibala med 178 in 211 $\mu\text{S/cm}$ (povprečje 191 $\mu\text{S/cm}$). Na izvihu je bila elektroprevodnost med 192 in 290 $\mu\text{S/cm}$ (povprečje 252 $\mu\text{S/cm}$). V reki na lokacijah Gogalov

rovt in Klemenak je bila elektroprevodnost med 202 in 249 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Na pritoku Sr. Radovna je bila elektroprevodnost med 227 in 277 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Najnižje elektroprevodnosti so bile zabeležene v vodnjaku ter najvišje na izviru. Dolvodno od izvira do Gogalovega rovta in Klemenaka je elektroprevodnost padla. Iz boka doline v Sr. Radovni je dotok vode v reko, ki ima podobno EC kot izvir in je bila povprečno višja od reke za 25 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Splošno je elektroprevodnost na vseh lokacijah nižja pozno pomladi in poleti, v obdobju taljenja snega, in višja v preostalem delu leta. Na lokaciji Gogalov rovt se je kontinuirano merila elektroprevodnost. Z delovanje inštrumenta je bilo nekaj težav, zato niz ni popoln. Izpad podatkov je bil med 8.11.2012 in 17.11.2013. Z diagrama (Grafikon 14) je razvidno, da je še pred taljenjem snega elektroprevodnost, med obdobjem 26.3. in 6.4.2012, za nekaj časa padla skoraj na nič, zato ker je struga takrat presahnila. Naslednji padec elektroprevodnosti je pomladi 2012, ko je ta ekstremno upadla, kar je najverjetneje zaradi taljenja snega, kar pomeni, da iz vodonosnika izteka voda, ki vsebuje velik delež snežnice, ki ima nizko elektroprevodnost. Elektroprevodnost je prav tako upadla v času taljenja snega 2014, vendar vrednosti niso bile tako drastično nizke kot v letu 2012. Temperatura je bila na vseh lokacijah stabilna, med 4,9 in 9,0 $^{\circ}\text{C}$ (Preglednica 17, Grafikon 15). Temperatura vode niha med 2,1 in 3,6 $^{\circ}\text{C}$, v skladu z nihanjem temperature zraka (Grafikon 15).

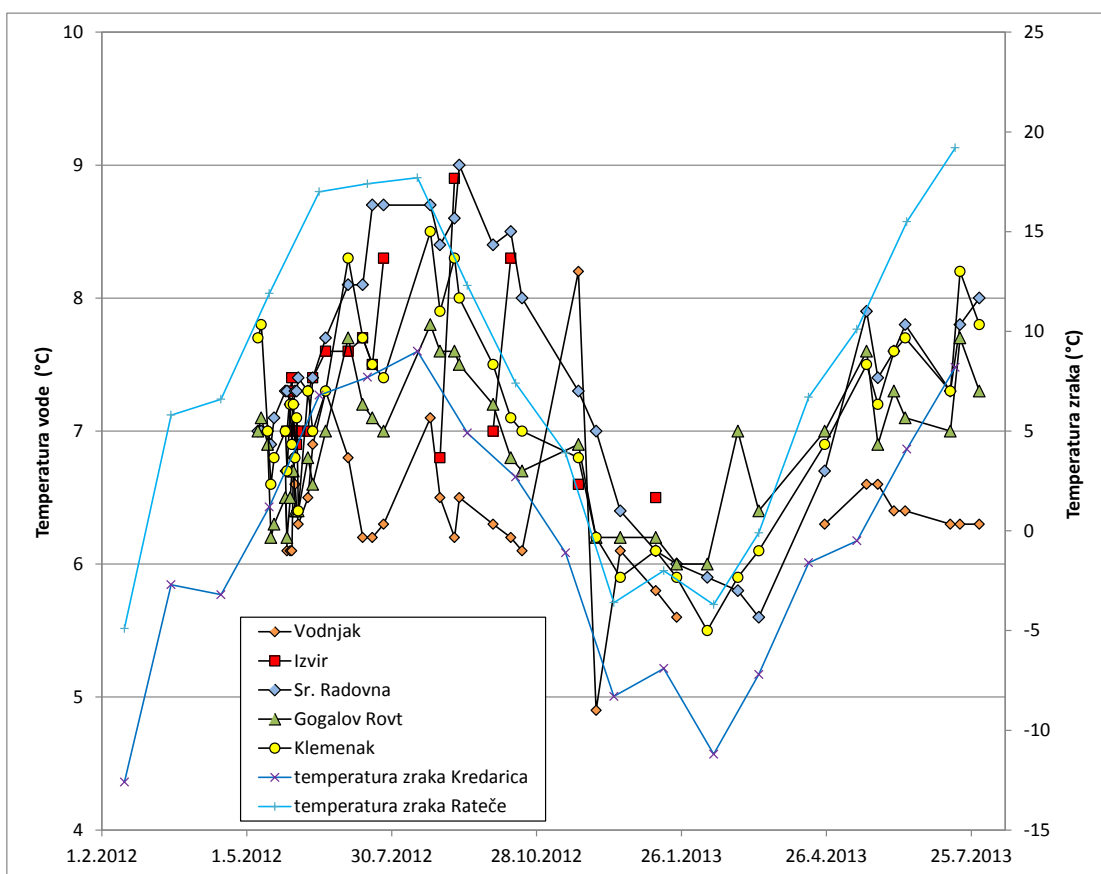


Grafikon 13: Elektroprevodnost v odvisnosti od časa za vseh pet lokacij

Chart 13: Electrical conductivity versus time for all five locations



Grafikon 14: Kontinuirana elektroprevodnost na lokaciji Gogalov rovt v primerjavi s pretokom
Chart 14: Continuous electrical conductivity at the location Gogalov rovt compared with the discharge



Grafikon 15: Temperatura vode v odvisnosti od časa za vseh pet lokacij
Chart 15: Water temperature versus time for all five locations

Preglednica 17: Minimalne, maksimalne in povprečne vrednosti za in-situ terenske parametre

Table 17: Minimum, maximum and average values for in-situ field parameters

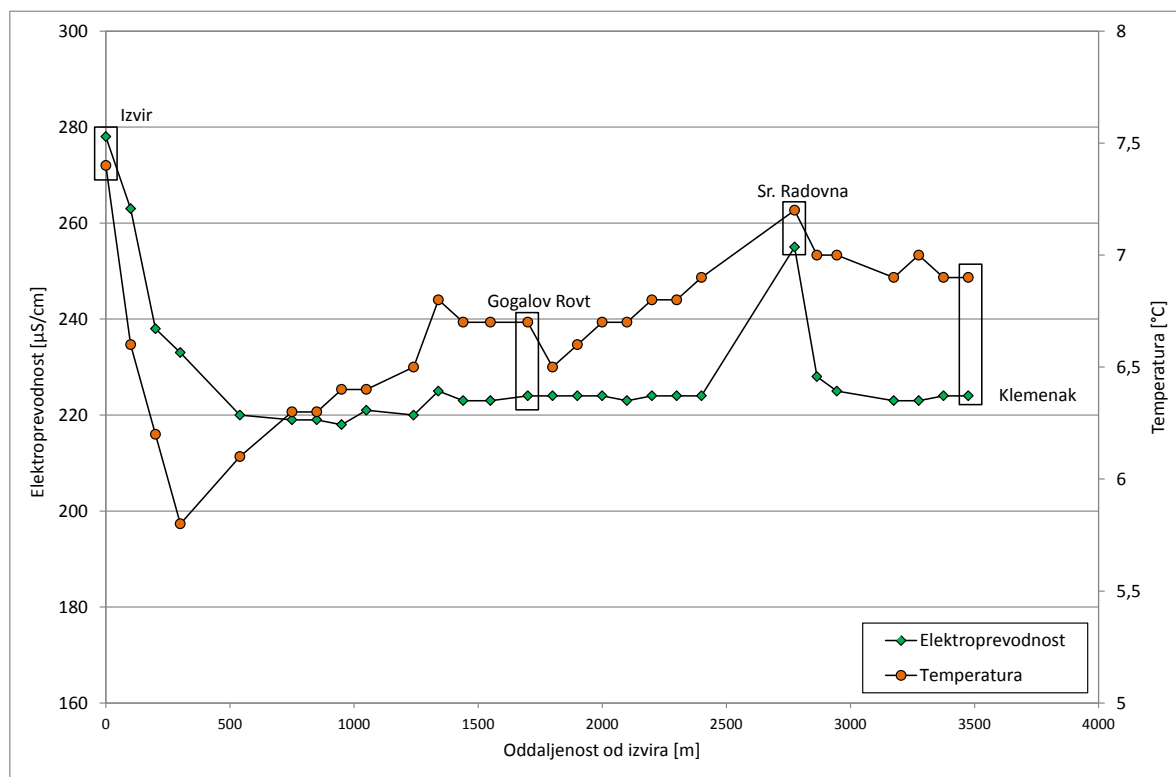
Lokacija	Vrednost	EC ($\mu\text{S/cm}$)	T ($^{\circ}\text{C}$)	Št. meritev
vodnjak podzemna voda	min	178	4,9	35
	povprečje	191	6,0	
	max	211	8,2	
izvir	min	192	6,5	20
	povprečje	252	7,0	
	max	290	8,9	
Gogalov rovt reka	min	202	5,7	50
	povprečje	224	6,8	
	max	249	7,8	
Sr. Radovna reka	min	227	5,6	50
	povprečje	247	7,3	
	max	277	9,0	
Klemenak reka	min	208	4,9	50
	povprečje	219	7,0	
	max	236	8,5	
Skupaj	min	178	4,9	205
	povprečje	225	6,9	
	max	290	9,0	

6.4.2 Podrobno vzorčenje elektroprevodnosti in temperature v zgornjem delu reke Radovne

Zgornji del reke Radovne, od izvira in do Klemenaka, je bil enkrat (29.5.2012) podrobno vzorčen na 28 lokacijah z namenom, da se razjasni, kakšna je prostorska porazdelitev elektroprevodnosti in temperature vode. Rezultati so pokazali, da je bila najvišja elektroprevodnost na izviru (278 $\mu\text{S/cm}$), nato je 950 m EC padala, sledila je dokaj konstantna EC (223 $\mu\text{S/cm}$) do Sr. Radovne, kjer je sunkovito narastla (255 $\mu\text{S/cm}$), in potem ponovno padla na prejšnjo vrednost (224 $\mu\text{S/cm}$, Grafikon 16). Razpon EC v zgornjih štirih kilometrih je bil 60 $\mu\text{S/cm}$. Temperatura je bila v celotnem zgornjem delu stabilna, saj so bile vrednosti med 7,4 in 5,8 $^{\circ}\text{C}$. Najvišja temperatura je bila na izviru, potem je v naslednjih 300 m padala, nato do lokacije Gogalov rovt naraščala, na naslednji lokaciji je padla in nato je ponovno naraščala do lokacije Sr. Radovna, kjer je ponovno upadala do lokacije Klemenak (Grafikon 16).

Tako elektroprevodnost kot tudi temperatura sta imeli podoben razvoj vzdolž toka. Najvišje vrednosti smo zabeležili na izviru in na lokaciji Sr. Radovna. Višje temperature na obeh lokacijah so posledica zelo nizkih pretokov. Višja elektroprevodnost na izviru bi lahko bila posledica izcejanja vode iz zgornjega dela vodonosnika in sočasno vpliva CO_2 v tleh, ki poveča raztapljanje. Dolvodno pa je nato elektroprevodnost upadla zaradi dotokov vode z bokov. Višja elektroprevodnost v Sr. Radovni je zato,

ker vode prihajajo z območja Pokljuke, kjer te vsebujejo več raztopljenih snovi, kar je obravnavano in potrjeno v naslednjih poglavjih.

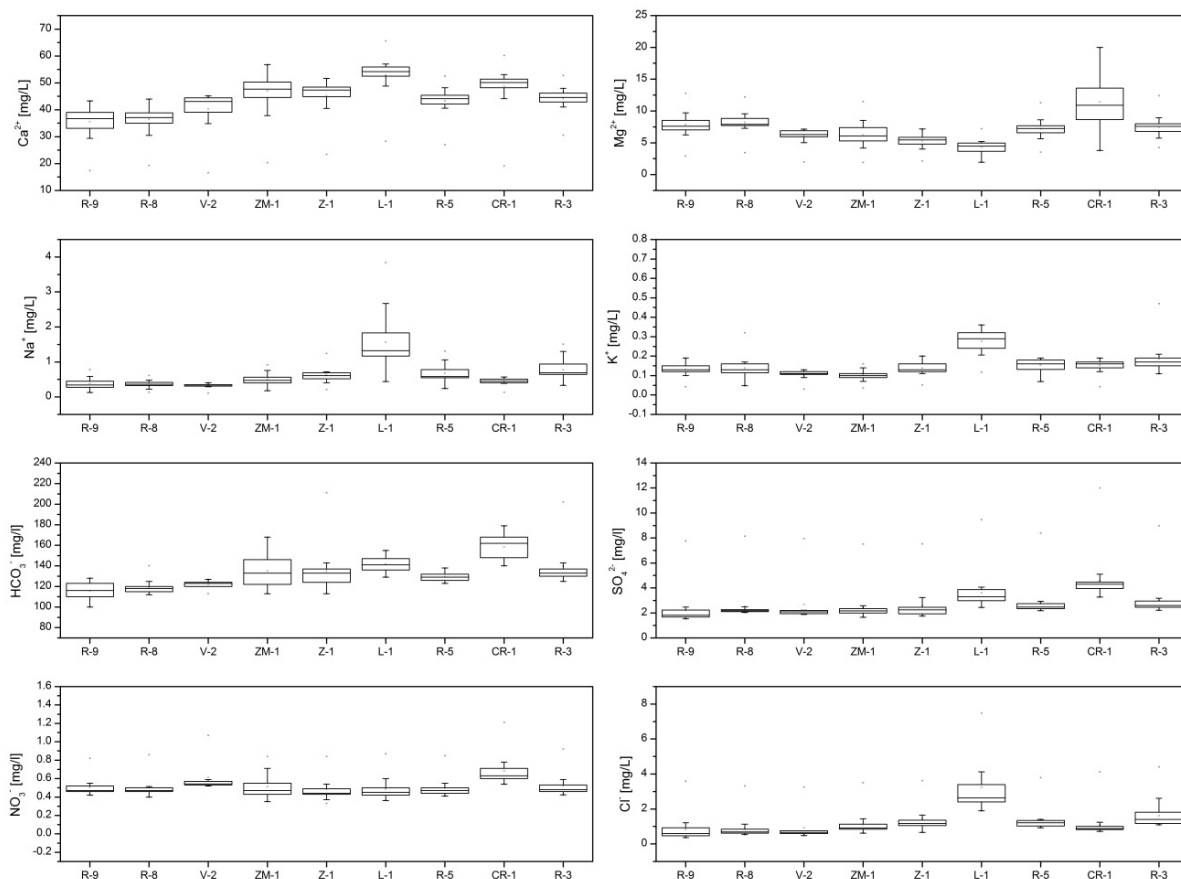


Grafikon 16: Spreminjanje elektroprevodnosti in temperature dolvodno od izvira do lokacije Klemenak

Chart 16: Electrical conductivity and temperature values downstream from the spring to the Klemenak location

6.5 Glavni kationi in anioni

Razponi rezultatov za vzorčenje v obdobju od 2005 do 2007 (Slika 17) za vse lokacije so prikazani spodaj (Grafikon 17, Preglednica 16, priloga A). Ca^{2+} in Mg^{2+} sta bila v vseh vzorcih najbolj zastopana kationa (Torkar et al., 2016). V rečnih vzorcih se je koncentracija Ca^{2+} gibala med 19,3 in 52,8 mg/L ter koncentracija Mg^{2+} od 3,46 do 12,4 mg/L. Na vzorcih izvirov sta se koncentraciji Ca^{2+} in Mg^{2+} gibali med 17,4 in 65,6 mg/L ter med 1,94 in 20 mg/L. Najvišjo koncentracijo Ca^{2+} sta imela izvira Lipnik (L-1) in Rečica (CR-1). Izvir Rečica je imel tudi najvišje koncentracije Mg^{2+} (20 mg/L), medtem ko smo pri izviru Lipnik zabeležili najnižje koncentracije Mg^{2+} (1,94 mg/L). Za vzorce iz vrtine V-2 so bile koncentracije Ca^{2+} med 16,6 in 45,2 mg/L ter koncentracije Mg^{2+} med 1,98 in 7,15 mg/L. Ca^{2+} kot dominantni kation je povprečno prispeval h kationski sestavi 78 %. K^{+} se je v vseh vzorcih pojavljal v najnižjih koncentracijah (Preglednica 16). Koncentracije Na^{+} so bile prav tako zelo nizke v vseh vzorcih z najvišjimi zabeleženimi vrednostmi na izviru Lipnik (L-1) in na zadnjih dveh lokacijah na reki (R-5 in R-3).



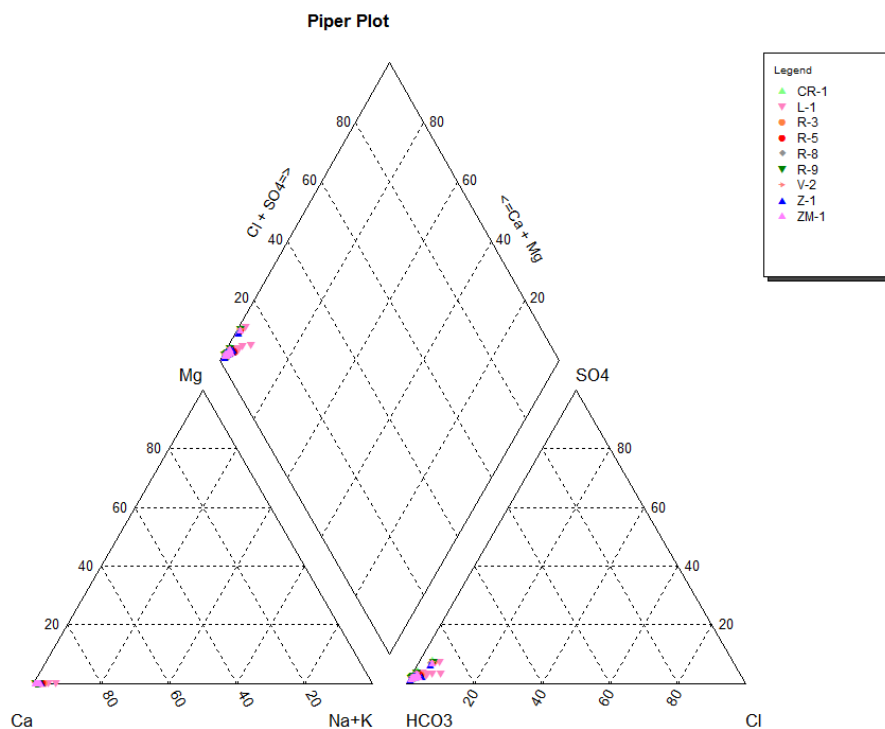
Grafikon 17: Škatlasti diagrami glavnih ionov v reki, izvirih in v vrtini, gledano dolvodno od izvira (Torkar et al., 2016)

Chart 17: Box plots of major ions in stream, spring and borehole water at downstream sampling locations (Torkar et al., 2016)

HCO₃⁻ je bil najpogostejši anion med vsemi vzorci (Torkar et al., 2016). Razponi vrednosti med izviri in reko so bili primerljivi in so se gibali med 100 in 211 mg/L na izvirih in med 112 in 202 mg/L v reki. Najmanjši razpon koncentracij je bil v vzorcih iz vrtine. HCO₃⁻ kot dominantni anion je povprečno prispeval k anionski sestavi 94 %. Drugi najpogostejši anion je bil SO₄²⁻ z najvišjimi koncentracijami 12 mg/L na izviri Rečica. Koncentracije Cl⁻ in NO₃⁻ so bile v vseh vzorcih najnižje.

Za vse vzorce je bilo izračunano razmerje med (Ca²⁺ + Mg²⁺) in HCO₃⁻ v meq/L (Hem, 1985), ki je malo pod 1 : 1 z manjšim presežkom (Ca²⁺ + Mg²⁺) nad HCO₃⁻. Vsi vzorci vode so imeli isti Ca²⁺-HCO₃⁻ facies z nizko vsebnostjo K⁺, Na⁺, Cl⁻, NO₃⁻ in SO₄²⁻ ionov (Slika 41). Kljub istemu vodnemu faciesu je razmerje Ca²⁺/Mg²⁺ med posameznimi lokacijami različno. Razmerje Ca²⁺/Mg²⁺ je za dolomitne izvire blizu ena, za izvire iz apnenca pa je bilo razmerje med 6 in 8 (White, 2010). Razmerje Ca²⁺/Mg²⁺ za izvir Radovne (R-9) in za prvo dolvodno rečno lokacijo (R-8) je med 3 in 6, s povprečno vrednostjo 4,6. Kraški izviri (L-1, Z-1 in ZM-1) so imeli višje Ca²⁺/Mg²⁺ razmerje,

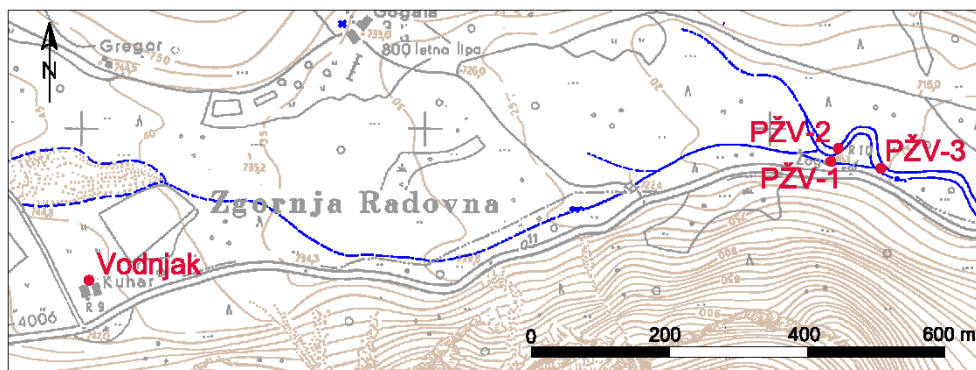
povprečno med 8 in 13. Dolvodni rečni lokaciji (R-5 in R-3) sta imeli posledično višje razmerje zaradi vpliva dotoka vode iz kraških izvirov Lipnik, Zatrej in Zmrzlek.



Slika 41: Piperjev diagram za vzorce med leti 2005 in 2007

Figure 41: The Piper plot for samples between 2005 and 2007

Kot potrditev ter primerjavo kemijskih analiz za glavne ione v času vzorčenja med 2005 in 2007 smo naknadno dvakrat vzorčili vodo tudi v zgornjem delu reke. Pred začetkom vzorčenja za stabilne izotope in še pred vgradnjo inštrumentov so bili na terenu dne 1.10.2011 vzorčeni voda iz vodnjaka in izviri Radovne na treh točkah (Slika 42, Preglednica 18) za določitev kemijskega stanja izvirov in razlike med njimi. Kasneje, 14.5.2012, so bile enkratno vzorčene še vse rečne merske točke, kjer so vgrajeni inštrumenti (Slika 18, Preglednica 19). Kemijske analize so potrdile predhodne rezultate iz obdobja 2005–2007.



Slika 42: Lokacije vzorčenja za osnovne fizikalno-kemijske parametre dne 1.10.2011

Figure 42: Sampling locations for basic physico-chemical parameters on 1.10.2011

Preglednica 18: Fizikalni parametri in kemijska sestava vode v vodnjaku in na izvirih 1.10.2011

Table 18: Physical parameters and chemical composition of the well and spring waters on 1.10.2011

Vzorčno mesto	T	pH	EC	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻
	°C		μS/cm	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
Vodnjak	6,0	7,7	182	2,7	1,8	0,5	29	4	< 1	0,2	120
PŽV-1	6,1	7,7	186	2,7	1,8	0,5	29	4,3	< 1	< 0,2	110
PŽV-2	6,4	7,8	187	2,7	1,9	0,5	29	4,4	< 1	< 0,2	120
PŽV-3	7,1	7,8	189	2,7	1,8	0,5	30	4,5	< 1	0,2	130

Preglednica 19: Fizikalni parametri in kemijska sestava voda dne 14.5.2012

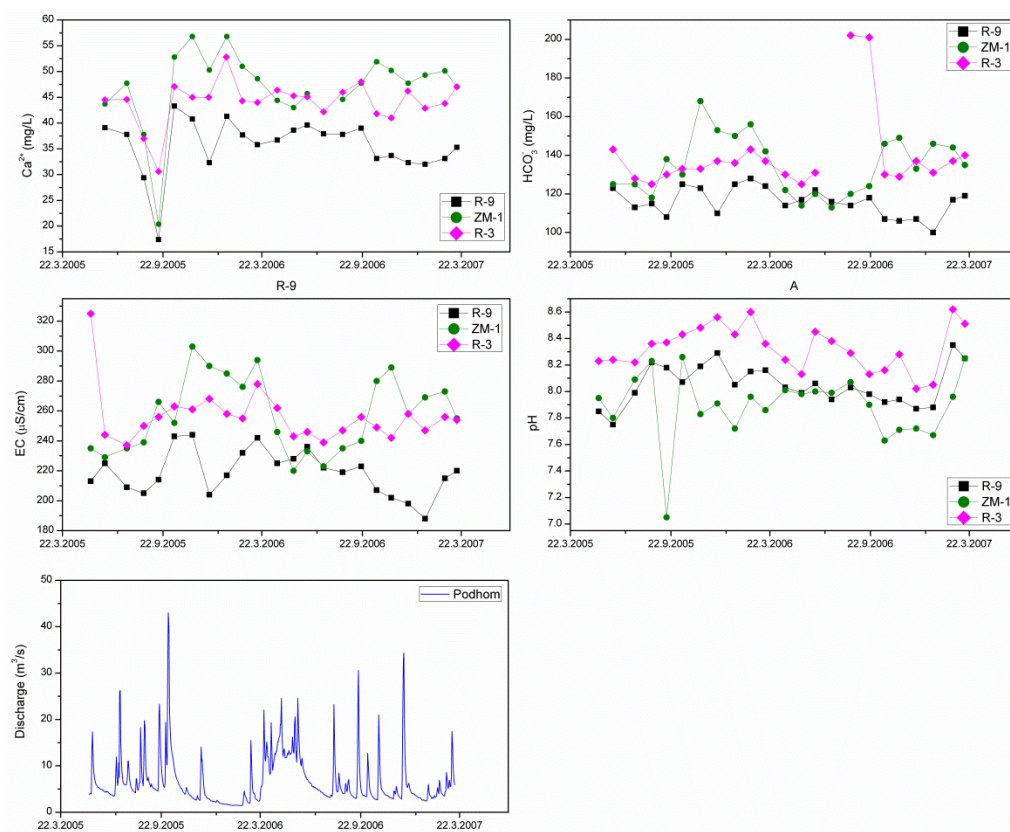
Table 19: Physical parameters and chemical composition of water on 14.5.2012

Vzorčno mesto	T	pH	EC	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻
	°C		μS/cm	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
Klemenak	7,0	7,5	210	3,1	2,6	0,9	35	6,2	< 1	0,2	170
Sr. Radovna	7,0	7,3	230	3,5	2,8	0,9	43	5,3	< 1	< 0,2	160
Gogalov rovt	6,9	7,3	230	3,5	2,9	1,2	37	6,9	< 1	< 0,2	150

6.5.1 Prostorska in časovna porazdelitev glavnih ionov

Koncentracija Ca²⁺ za vse vzorce v reki se je konsistentno poveševala v dolvodni smeri. Koncentracija Ca²⁺ v vzorcih za vrtino je bila skladna s koncentracijami v reki. Višje koncentracije Ca²⁺ dolvodno v reki so posledica prispevka vode iz kraških izvirov, ki imajo višjo vsebnost Ca²⁺. Kraški izviri imajo nižje povprečne napajalne višine in drenirajo pogozdeni planoti Mežaklo in Pokljuko, kjer je zaradi interakcije kamnina – zemljina povečano preperevanje in posledično ima voda na izvirih višjo koncentracijo Ca²⁺ (Clark in Fritz, 1997). Koncentracije za drugi najpogostejši kation Mg²⁺ niso bile prostorsko porazdeljene enako kot za Ca²⁺. Najvišje koncentracije za Mg²⁺ so bile v vzorcih na izviru Rečica (CR-1) zaradi prisotnosti dolomita v napajalnem zaledju. Koncentracije Mg²⁺ za rečne vzorce so malo naraščale v dolvodni smeri, medtem ko so bile koncentracije za kraške izvire nižje kot koncentracije za rečne vzorce. Razmerje Ca²⁺/Mg²⁺ je jasen indikator, da se večina vode napaja z območja, kjer prevladuje apnenec. Izvir Rečica je edini izvir, kjer je povprečno razmerje Ca²⁺/Mg²⁺ 4,6 (Torkar et al., 2016), kar nakazuje, da se vode drenirajo skozi bolj dolomitne kamnine.

Pregled podatkov nam pokaže presenetljivo nizke vrednosti kationov na dan 14.9.2005 (Grafikon 18). Pretok na dan vzorčenja ni bil visok (Grafikon 6), ampak je primerjava s padavinami pokazala, da je v dveh mescih prej padlo 475 mm padavin, kar predstavlja 29 % padavin, ki so padle v letu 2005 (1652 mm). Posledično je bila koncentracija ionov v vodi razredčena. Kljub temu spremembe v koncentraciji anionov ni bilo zaznati.



Grafikon 18: Diagrami za Ca^{2+} , Mg^{2+} , EC in pH za izvir Radovne (R-9), izvir Zmrzlek (ZM-1) ter za rečno lokacijo (R-3) z diagramom pretokov na lokaciji Podhom (Torkar et al., 2016)

Chart 18: Plot of Ca^{2+} , Mg^{2+} , EC and pH for the terminal spring (R-9), for the Zmrzlek spring (ZM-1) and for the stream location (R-3) with plot of discharges at Podhom gauging station (Torkar et al., 2016)

Prostorska porazdelitev HCO_3^- je bila konsistentna s koncentracijo Ca^{2+} . Koncentracije Cl^- , NO_3^- in SO_4^{2-} so variirale za vse vzorce, vendar brez kakršnega koli prostorskega trenda. Časovne spremembe v koncentraciji Cl^- , NO_3^- in SO_4^{2-} so bile zmerne in so bile skoraj v celoti povezane s količino vode in pretoki. Ko so vode nizke, so koncentracije ionov višje, in obratno. V prvih dveh vzorčnih kampanjah so bile koncentracije Cl^- , NO_3^- in SO_4^{2-} višje v primerjavi z ostalimi rezultati, ampak so bile še vedno nizke in niso bile posledica onesnaženja. Dolvodno je bilo v rečnih vzorcih opaziti povečano koncentracijo ionov, ki je posledica dotokov kraških izvirov v reko. Te spremembe so bile opazne v srednjem delu toka reke Radovne in so se nadaljevale v spodnji del toka.

Geokemična sestava vode se je spreminjala tudi sezonsko in je bila povezana z različnimi pretoki. Na splošno so se sezonski vzorci kazali kot maksimalna vrednost ionov v času nizkih pretokov in kot minimalna koncentracija ionov v času visokih pretokov. Dodatna nihanja v kemijski sestavi vode so bila posledica dveh obdobj, obdobja taljenja snega in obdobja padavin (Grafikon 6). Elektroprevodnost padavin na tem območju je zelo nizka ($8,2 \mu\text{S}/\text{cm}$), kar dokazuje nizko

koncentracijo ionov (Muri, 2013). Iz tega sklepamo, da je prispevek k masni bilanci glavnih elementov v reki zanemarljiv.

Stik dveh vodonosnikov in različni napajalni zaledji glavnega izvira ter kraških izvirov se odražajo v kemijski in izotopski sestavi vode po celotni dolini reke Radovne. Vsi vzorci kažejo isti kalcijev hidrogenškarbonatni tip vode z nizkimi koncentracijami nitrata, sulfida in klorida, ampak z različnimi vrednostmi ionov na posamezni lokaciji. Tip vode dokazuje, da je karbonatno preperevanje prevladujoč proces (Meybeck, 1996). Rezultati glavnih ionov v reki, izviri in podzemni vodi prav tako prikazujejo, da se vode drenirjo skozi enotno litologijo (mono litologijo), ki je neonesnažena. Vse vzorce vode lahko klasificiramo kot trde s koncentracijo kalcijevega karbonata med 119 in 173 mg/L. Rezultati glavnih ionov so pokazali razlike med vzorci rečne in izvirske vode. Koncentracije glavnih ionov so se od izvira Radovne dolvodno višale, kar se je odražalo tudi v rahlem povišanju elektroprevodnosti dolvodno od 219 do 255 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Elektroprevodnost za vse vzorce je kazala nizko mineralizacijo. Vrednosti pH prav tako dokazujejo alkalne vode, ki odražajo, da je raztapljanje karbonatnih kamnin v zaledju eden najpomembnejših procesov, ki vplivajo na sestavo vode.

6.6 Izotopska sestava vode

6.6.1 Padavine

Spreminjanje izotopske sestave padavin poteka v Zgornji Radovni od aprila 2010 (Vreča et al., 2012, 2013a, 2013c, 2014a). Za nadaljnje izračune so bile uporabljene povprečne letne utežene vrednosti izotopse sestave kisika za obdobje od aprila 2010 do marca 2012 (Preglednica 20), ki so bili izračunani iz mesečnih podatkov o izotopski sestavi padavin (Vreča, 2016) in količine padavin (ARSO, 2016a).

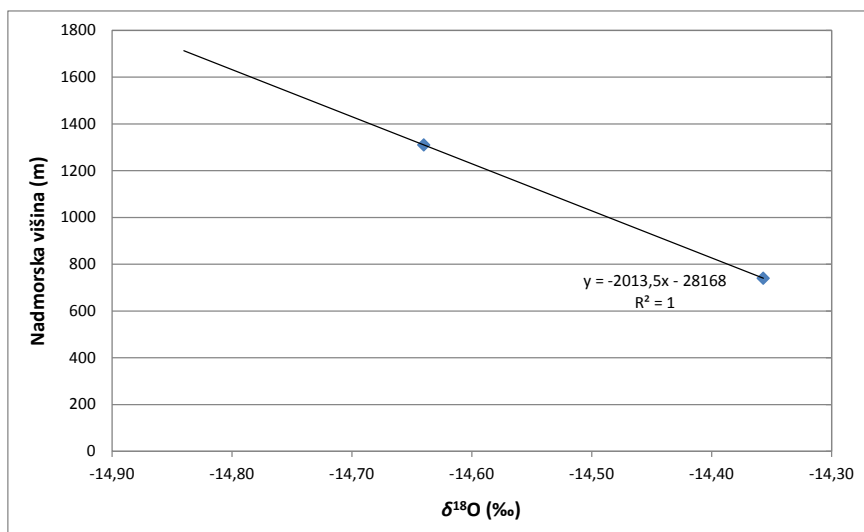
Preglednica 20: Povprečne utežene vrednosti za kisik na postajah Kredarica, Rateče in Zgornja Radovna

Table 20: The average weighted values for oxygen on the Kredarica, Rateče and Zgornja Radovna stations

Postaja	Obdobje	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)
Kredarica	04/2010–03/2011	–11,02
	04/2011–03/2012	–10,16
	01/2011–12/2011	–9,69
	01/2012–12/2012	–10,46
Rateče	04/2010–03/2011	–10,74
	04/2011–03/2012	–9,24
	01/2011–12/2011	–9,03
	01/2012–12/2012	–9,00
Zgornja Radovna	04/2010–03/2011	–9,71
	04/2011–03/2012	–8,94
	01/2011–12/2011	–8,88
	01/2012–12/2012	–8,67

6.6.2 Snežnica

Zima 2011/2012 je bila zelo suha, saj je od začetka decembra do konca februarja padlo samo 139,9 mm padavin. Naslednjo zimo (2012/2013) so se padavine skoraj podvojile, saj je v istem časovnem obdobju padlo 312,6 mm padavin (ARSO, 2016a). Posledično je bilo zaradi zelo sušne zime zbrane snežnice v zimi 2011/2012 zelo malo (Vreča et al., 2013c) in v nadaljnjih izračunih ti podatki niso bili upoštevani. Za izračun povprečne vrednosti $\delta^{18}\text{O}$ snežnice so bili na območju izvira Radovna uporabljeni podatki za zimo 2012/2013 (Vreča et al., 2013c). Zaradi toplejšega obdobja konec leta 2012 se je sneg stopil in iz PKV so se pobrali vzorci. Dokončno so se PKV izpraznili 23. Aprila (Vreča et al., 2013c). Iz zbranih posameznih podatkov o izotopski sestavi in količini zbrane snežnice smo izračunali povprečno uteženo vrednost izotopske sestave $\delta^{18}\text{O}$ snežnice za vsako posodo znotraj enega PKV, nato pa povprečno vrednost vseh posod v Zgornji Radovni. Na enak način se je izračunala tudi povprečna utežena vrednost $\delta^{18}\text{O}$ snežnice na lokaciji Pokljuka. Na lokaciji Zgornja Radovna znaša povprečna utežena vrednost snežnice $-14,36\text{‰}$, na lokaciji Pokljuka pa $-14,64\text{‰}$ (Vreča, 2016). Na osnovi teh podatkov smo določili višinski efekt $\delta^{18}\text{O}$ snežnice in znaša $0,05\text{‰}$ na 100 m (Grafikon 19).



Grafikon 19: Izotopska sestava $\delta^{18}\text{O}$ za snežnico v odvisnosti od nadmorske višine

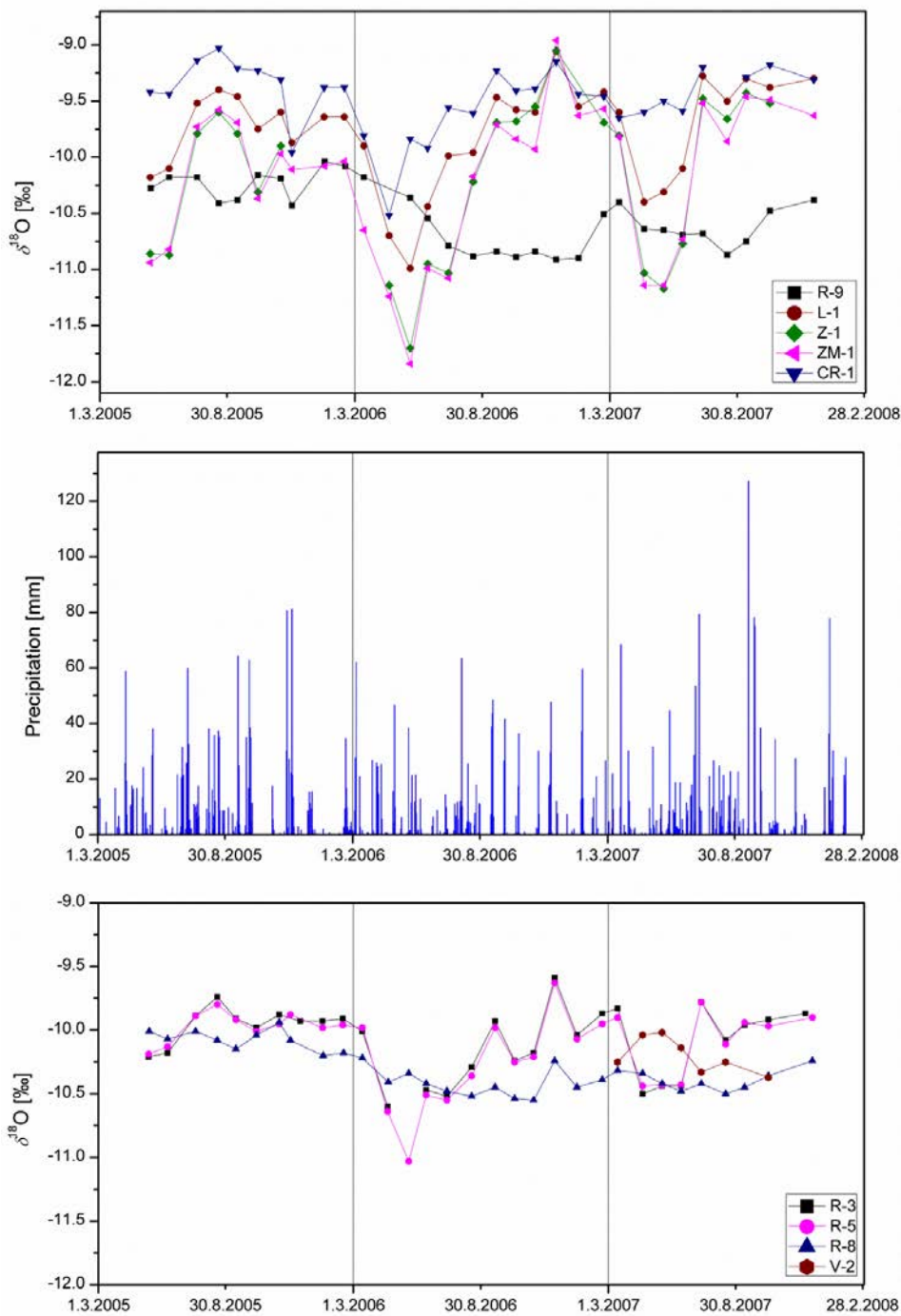
Chart 19: Isotope values of $\delta^{18}\text{O}$ for snowmelt vs. altitude

6.6.3 Rezultati izotopske sestave $\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$ in $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ za celotno dolino

Minimalne, maksimalne in mediana vrednosti za izotopsko sestavo $\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$ in $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ za vse vzorce v dolini reke Radovne v časovnem obdobju med letoma 2005 in 2007 (Torkar et al., 2016) so predstavljene v preglednici (Preglednica 21, priloga B). Vrednosti $\delta^{18}\text{O}$ in $\delta^2\text{H}$ so sezonsko nihale na vseh lokacijah (Grafikon 20). Vrednosti za kisik v reki so nihale med $-11,03$ in $-9,59$ ‰, na izvirih med $-11,84$ to $-8,96$ ‰ ter na vrtini med $-10,37$ in $-10,02$ ‰. Amplitude za $\delta^{18}\text{O}$ so bile v zgornjem delu doline relativno majhne, med $0,6$ in $0,8$ ‰, v srednjem delu doline so bile med $1,0$ in $1,4$ ‰ in v kraških izvirih med $1,9$ in $2,8$ ‰ (L-1, ZM-1 in Z-1). To nakazuje, da so bili zadrževalni časi na izviru reke Radovne višji kot na kraških izvirih (Grafikon 21). Edina izjema med kraškimi izviri je bil izvir Rečica, ki je imel nižjo amplitudo, $1,5$ ‰, kar odraža višje zadrževalne čase zaradi dolomitnih kamnin v napajalnem zaledju.

Za izotopsko karakterizacijo vode v reki, na izvirih in v vrtini so bile izotopske vrednosti prikazane na $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^2\text{H}$ diagramu (Grafikon 23) skupaj z mediteransko padavinsko premico (MMWL) (Gat in Carmi, 1970) ter z globalno meteorno premico (GMWL) (Craig, 1961). Lokalna meteorna premica za ljubljansko GNIP-padavinsko postajo je zelo blizu globalne padavinske premice (Vreča et al., 2006, 2008, 2014b).

Sezonsko spremenljivost vrednosti $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ je bilo zaznati na vseh vzorčnih lokacijah z najvišjimi vrednostmi $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ poleti in najnižjimi vrednostmi jeseni in pozimi (Grafikon 22). V prvi vzorčni kampanji se je reka vzorčila na devetih mestih. Vrednosti $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ so se od gorvodne lokacije (R-9) dolvodno (R-1) zmanjšale z $-6,7$ ‰ na $-8,5$ ‰. Povprečne vrednosti $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ za vse vzorce v reki so se tudi zmanjšale dolvodno za $-1,6$ ‰. Povprečne vrednosti $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ za kraške izvire (ZM-1, Z-1, L-1 in CR-1) so bile osiromašene glede na reko za $-2,4$ ‰.



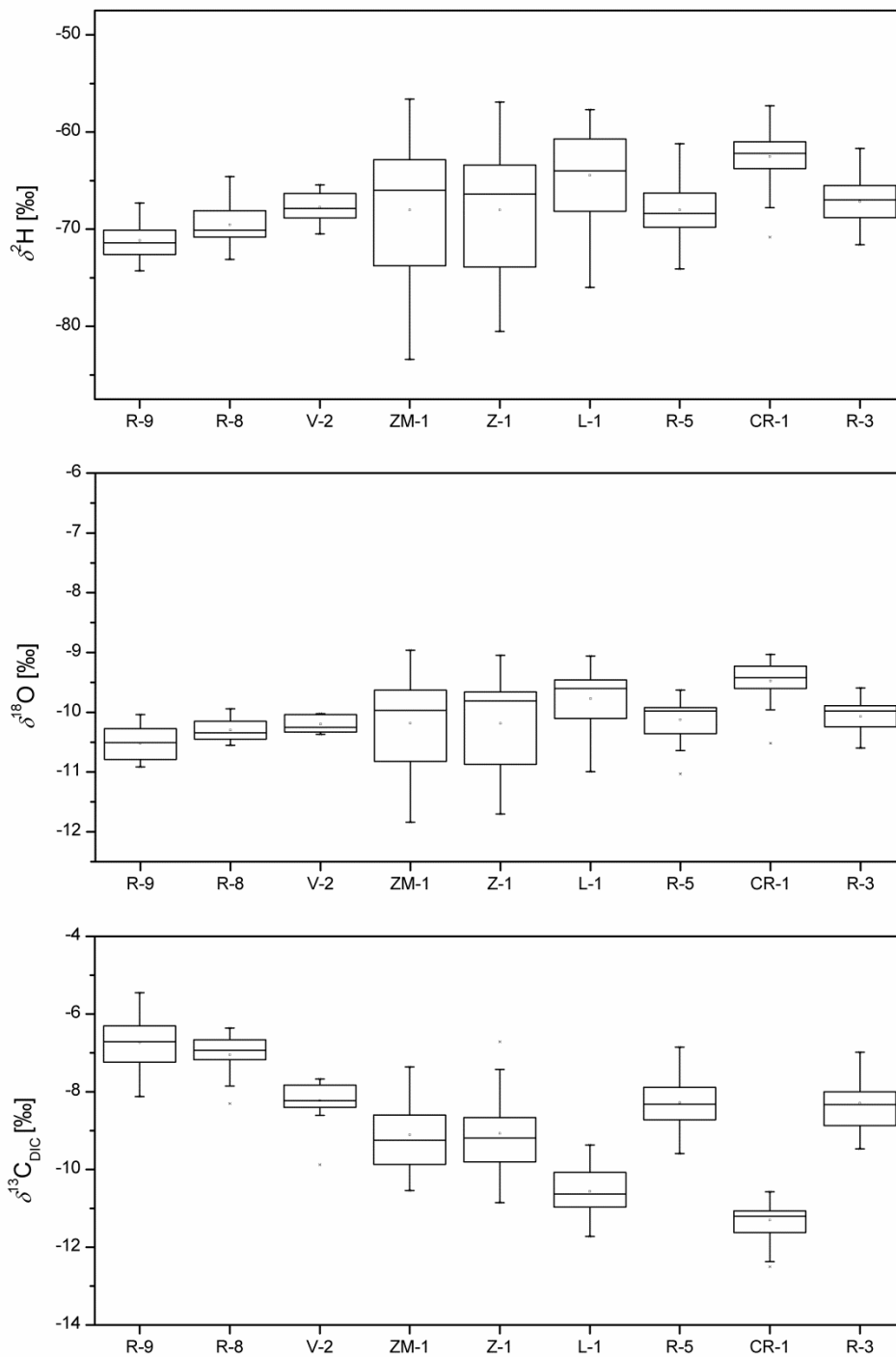
Grafikon 20: Časovni niz izotopske sestave $\delta^{18}\text{O}$ za vzorce izvira (R-9, ZM-1, Z-1, L-1 in CR-1), reke (R-8, R-5 in R-3) in vrtnice (V-2) v primerjavi s padavinami (ARSO, 2016a, Torkar et al., 2016)

Chart 20: Time series of isotope composition of $\delta^{18}\text{O}$ for spring (R-9, ZM-1, Z-1, L-1 and CR-1), stream (R-8, R-5 and R-3) and borehole (V-2) samples compared to precipitation (ARSO, 2016a, Torkar et al., 2016)

Preglednica 21: Minimalne, maksimalne in mediana vrednosti za $\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$ in $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$

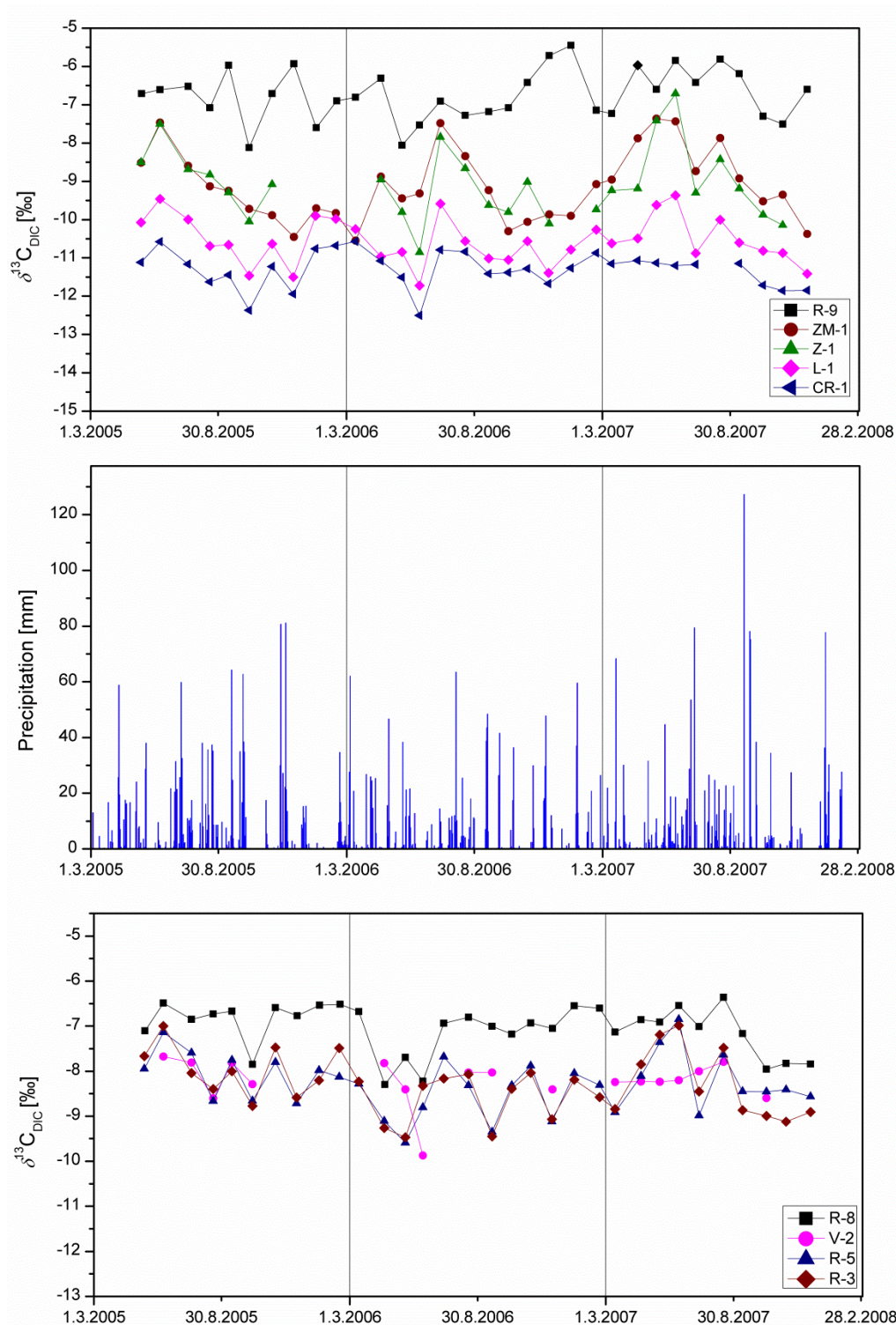
Table 21: Minimum, maximum and median values of $\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$

Lokacija	Vrednost	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)	$\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ (‰)
R-9	min	-10,91	-74,30	-8,46
	mediana	-10,50	-71,20	-6,76
	max	-10,04	-67,30	-5,45
R-8	min	-10,55	-73,10	-8,30
	mediana	-10,34	-70,09	-6,97
	max	-9,94	-64,58	-6,36
V-2	min	-10,37	-70,49	-9,87
	mediana	-10,25	-67,86	-8,23
	max	-10,02	-65,43	-7,67
ZM-1	min	-11,84	-83,40	-10,62
	mediana	-9,97	-66,00	-9,28
	max	-8,96	-56,60	-7,36
Z-1	min	-11,70	-80,50	-10,85
	mediana	-9,81	-66,40	-9,24
	max	-9,05	-56,90	-6,71
L-1	min	-10,99	-76,00	-11,72
	mediana	-9,60	-64,00	-10,67
	max	-9,06	-57,70	-9,37
R-5	min	-11,03	-74,10	-9,65
	mediana	-9,98	-68,40	-8,36
	max	-9,63	-61,20	-6,85
CR-1	min	-10,52	-70,80	-12,50
	mediana	-9,42	-62,13	-11,20
	max	-9,03	-57,30	-10,57
R-3	min	-10,60	-71,60	-9,60
	mediana	-9,97	-66,93	-8,39
	max	-9,59	-61,70	-6,98
ST-1	min	-9,74	-70,80	-13,30
	mediana	-9,23	-60,20	-12,37
	max	-8,69	-56,40	-10,77
M-1	min	-9,52	-63,70	-13,99
	mediana	-8,88	-59,60	-12,70
	max	-8,48	-55,80	-10,84
Skupaj	min	-11,84	-83,40	-14,00
	mediana	-9,92	-66,30	-9,10
	max	-8,48	-55,80	-5,50



Grafikon 21: Grafikon kvartilov za vrednosti $\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$ in $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ za reko, izvire in podzemno vodo dolvodno od izvira (Torkar et al., 2016)

Chart 21: Box plots of $\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ values of stream, spring and borehole water from the spring downstream (Torkar et al., 2016)

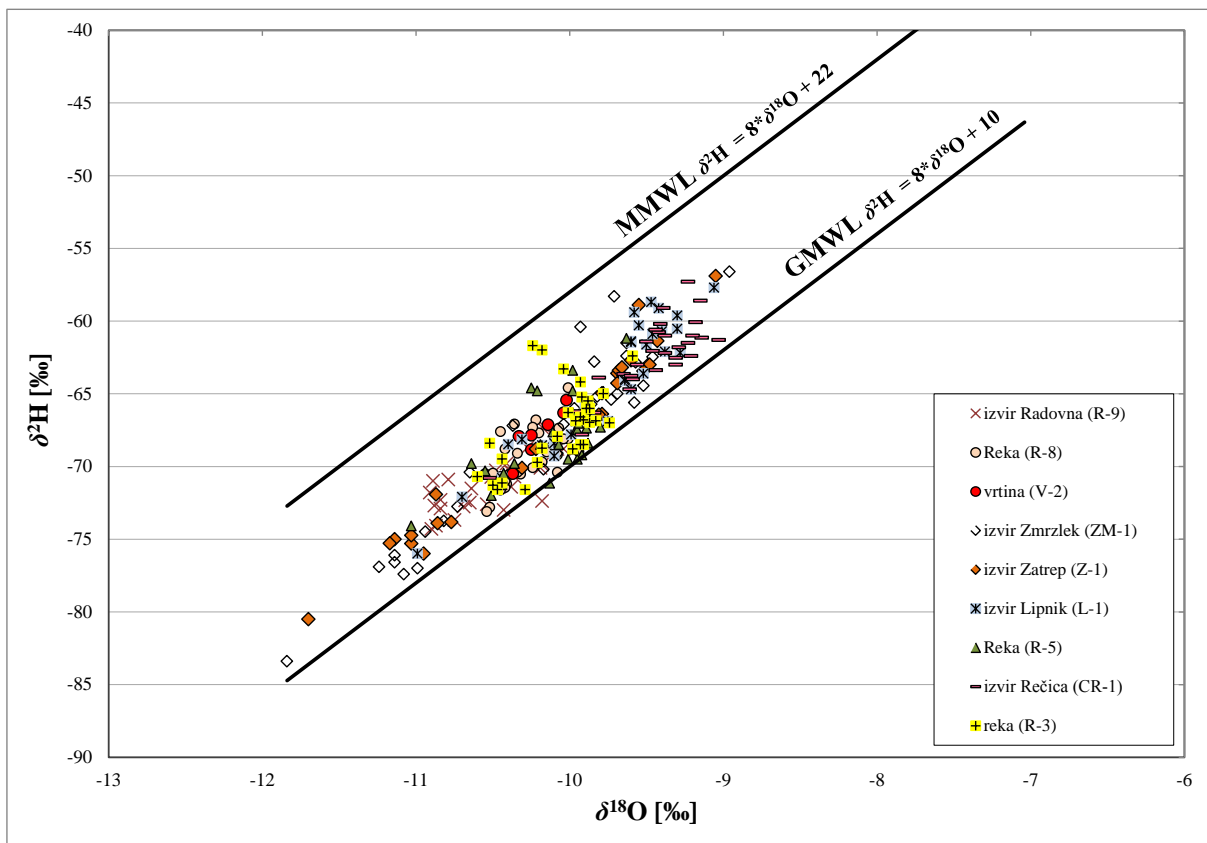


Grafikon 22: Časovni niz izotopske sestave $\delta^{13}C_{DIC}$ vzorcev izvira (R-9, ZM-1, Z-1, L-1 in CR-1), reke (R-8, R-5 in R-3) in vrtine (V-2) v primerjavi s padavinami (ARSO, 2016a, Torkar et al., 2016)

Chart 22: Time series of isotope composition of $\delta^{13}C_{DIC}$ for spring (R-9, ZM-1, Z-1, L-1 and CR-1), stream (R-8, R-5 and R-3) and borehole (V-2) samples compared to precipitation (ARSO, 2016a, Torkar et al., 2016)

6.6.3.1 Analiza izotopskih vrednosti $\delta^2\text{H}$ in $\delta^{18}\text{O}$

Analiza izotopskih vrednosti na diagramu $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^2\text{H}$ z linijama MMWL in GMWL prikazuje, da skoraj vsi podatki padejo na območje med tema linijama (Grafikon 23). Podobno je bilo opaženo tudi na reki Savi (Ogrinc et al., 2008). Izotopska sestava reke Radovne se tako kot v reki Savi hitro spreminja zaradi padavin, ki so zaradi geografske lege v Julijskih Alpah pod vplivom zračnih mas različnega izvora, ki posledično povzročajo opazne prostorske in sezonske spremembe meteoroloških parametrov (Kastelec, 1999). Podobno kot v ostalih predelih Slovenije (Vreča et al., 2006, 2007) prevladujejo padavine z Atlantika in iz Mediterana, zato se mešanje morskih in celinskih zračnih mas odraža tudi v vzorčni vodi v Radovni.



Grafikon 23: Diagram $\delta^{18}\text{O}$ in $\delta^2\text{H}$ za rečne vzorce, vzorce izvirov in vrtine (GMWL; Craig, 1961, MMWL; Gat in Carmi, 1970)

Chart 23: Plot of $\delta^{18}\text{O}$ vs. $\delta^2\text{H}$ for stream water, spring water and water from borehole (GMWL; Craig, 1961, MMWL; Gat in Carmi, 1970)

6.6.4 Rezultati izotopske sestave $\delta^2\text{H}$ in $\delta^{18}\text{O}$ za zgornji del reke Radovne

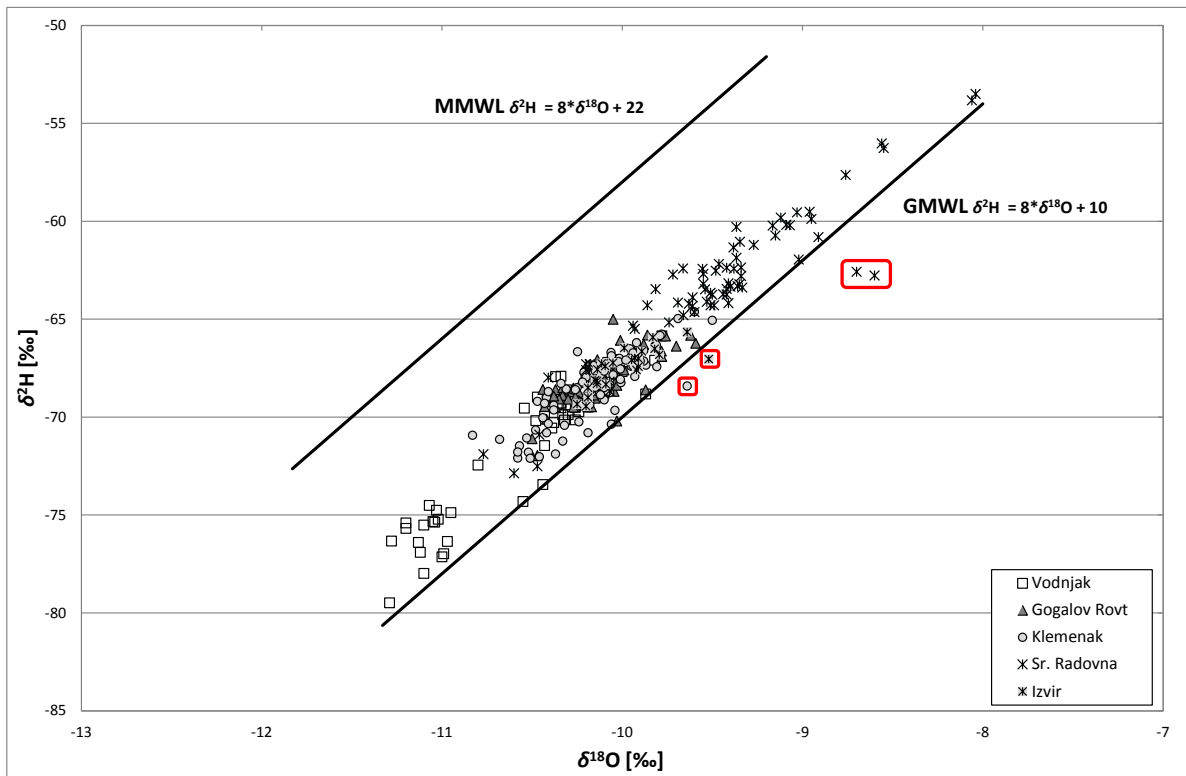
Med letoma 2012 in 2013 je bilo skupno zbranih 318 vzorcev za izotopsko analizo kisika in vodika (priloga C). Na izviru Radovne je bilo zbranih 20 vzorcev, na vodnjaku 68, na Gogalovem rovtu in v Sr. Radovni 70 ter 71 in na lokaciji Klemenak 89 vzorcev (Preglednica 22). Največji razpon vrednosti izotopske sestave opazimo na lokaciji Sr. Radovna, sledijo vodnjak, Klemenak, nato Gogalov rovt in izvir (Preglednica 22, Grafikon 24).

Preglednica 22: Pregledna tabela za izotopske vrednosti $\delta^2\text{H}$ in $\delta^{18}\text{O}$ z minimalnimi, maksimalnimi in s povprečnimi vrednostmi ter z amplitudo in številom vzorcev za posamezno lokacijo

Table 22: Summary table of isotopic values for $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ with minimum, maximum and average values as well as the amplitude and the number of samples for each location

	vodnjak		izvir		Gogalov rovt		Sr. Radovna		Klemenak	
	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)
minimalna v.	-11,29	-79,5	-10,25	-69,5	-10,50	-72,0	-10,77	-72,9	-10,83	-72,1
maksimalna v.	-9,78	-65,9	-9,52	-65,7	-9,59	-65,0	-8,04	-53,5	-9,50	-64,6
povprečna v.	-10,46	-70,8	-9,99	-67,6	-10,13	-68,2	-9,48	-63,3	-10,15	-68,4
razpon	1,51	13,6	0,73	3,8	0,91	7,0	2,73	19,4	1,33	7,5
št. vzorcev	68		20		70		71		89	
skupno št. vzorcev	318									

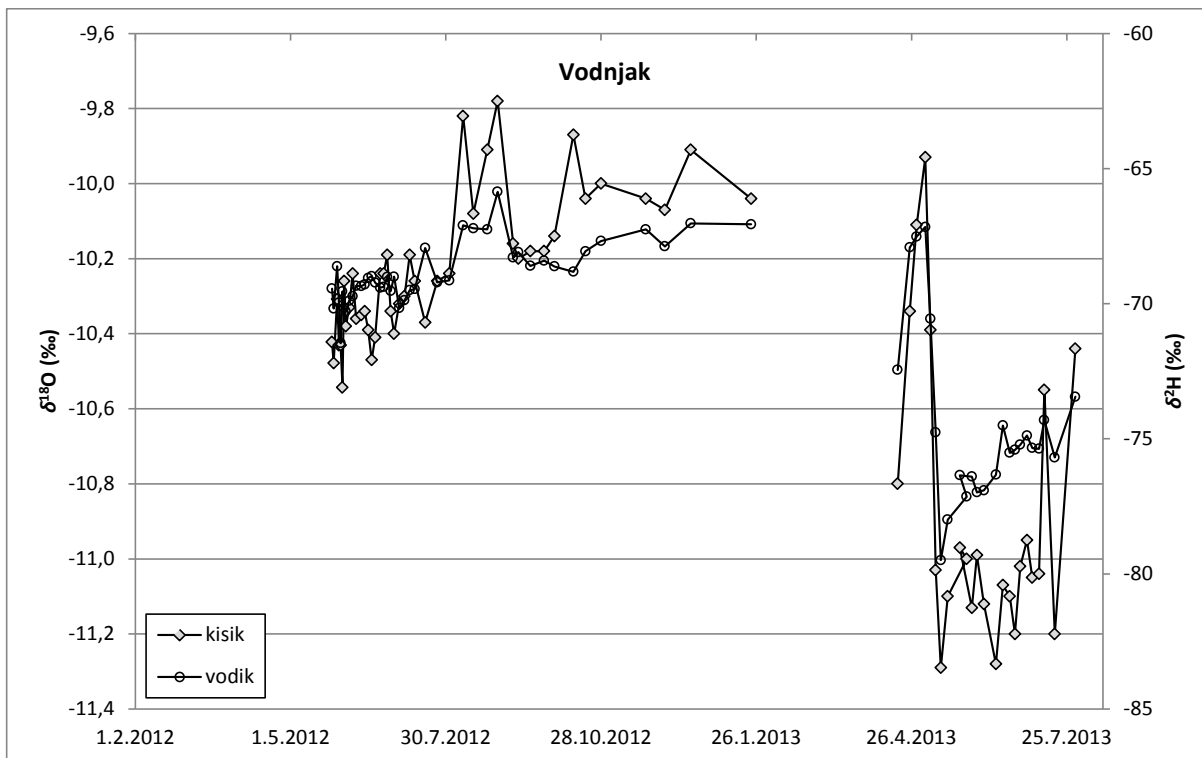
Za izotopsko karakterizacijo rečnih vzorcev in vzorcev podzemne vode so bili izotopski podatki izrisani na diagramu $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^2\text{H}$ skupaj z linijama MMWL (MMWL; Gat in Carmi, 1970) in GMWL (GMWL; Craig, 1961). Podobno kot za vzorce iz obdobja med letoma 2005 in 2007 skoraj vsi vzorci padejo med liniji MMWL in GMWL. Štirje vzorci, označeni z rdečimi kvadrati (Grafikon 24), padejo pod linijo GMWL in nakazujejo, da so bili podvrženi evaporaciji, sploh oba vzorca, vzeta v Sr. Radovni. Vsi štirje vzorci so bili vzeti poleti: izvir (8.6.2012), Sr. Radovna (9.8. in 15.8.2012) ter Klemenak (30.7.2013).



Grafikon 24: Diagram $\delta^{18}\text{O}$ in $\delta^2\text{H}$ za vzorce podzemne vode, izvira ter reke (GMWL; Craig, 1961, MMWL; Gat in Carmi, 1970)

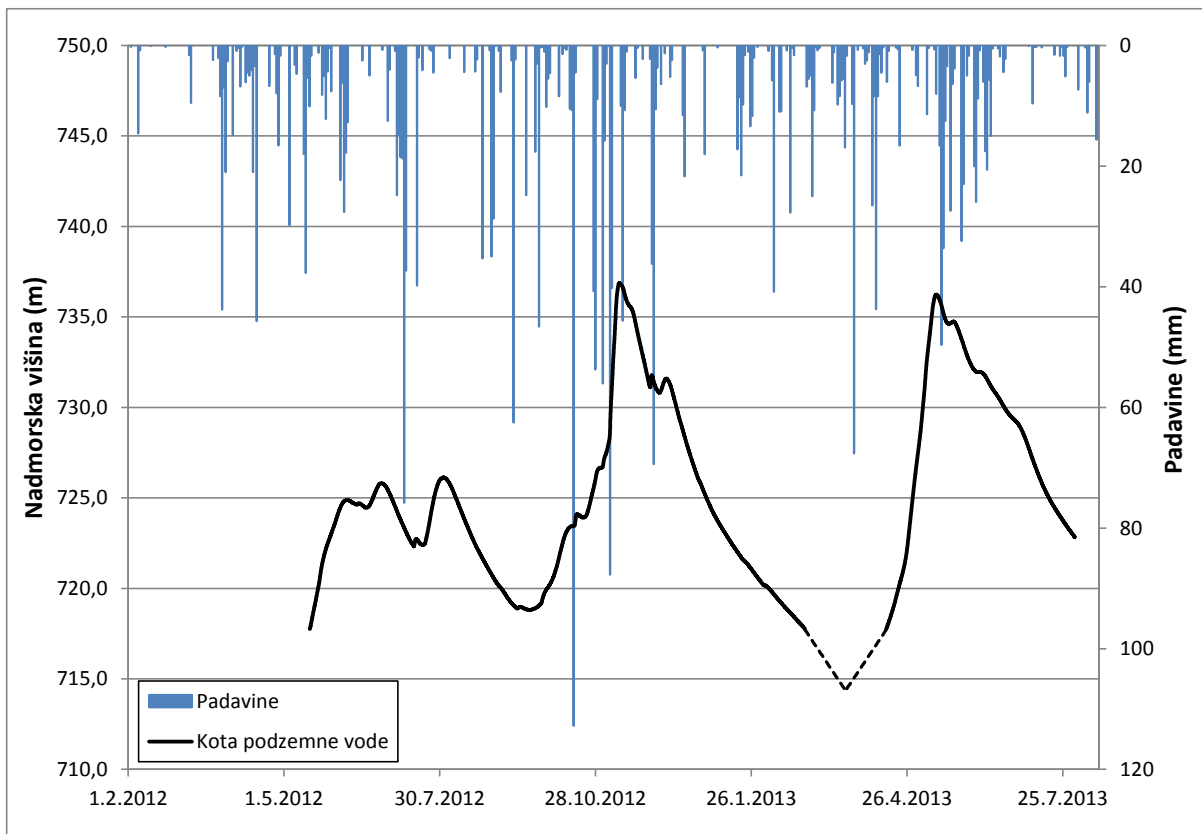
Chart 24: Plot of $\delta^{18}\text{O}$ vs. $\delta^2\text{H}$ for groundwater, spring water and stream water (GMWL; Craig, 1961, MMWL; Gat in Carmi, 1970)

Na spodnjih diagramih so prikazani časovni nizi za izotopsko sestavo $\delta^{18}\text{O}$ in $\delta^2\text{H}$ v primerjavi s padavinami, pretoki v reki oziroma višino podzemne vode na lokacijah vodnjak (Grafikon 25, Grafikon 26), izvir (Grafikon 27, Grafikon 28), Gogalov rovt (Grafikon 29, Grafikon 30), Sr. Radovna (Grafikon 31, Grafikon 32) in Klemenak (Grafikon 33, Grafikon 34). Na vseh lokacijah je bila izotopska sestava $\delta^{18}\text{O}$ in $\delta^2\text{H}$ bolj negativna v obdobju taljenja snega in bolj pozitivna v obdobju, ko so bile padavine prisotne v obliki snega. Prav tako je bila na vseh lokacijah izotopska sestava vode bolj negativna v drugi polovici vzorčenja, v letu 2013, najverjetneje zaradi prisotnosti večje količine snežnice. S spodnjih diagramov je razvidno, da tudi v obdobju taljenja snega izotopske vrednosti $\delta^{18}\text{O}$ in $\delta^2\text{H}$ niso bile samo v upadanju, ampak so vrednosti n, kar je posledica kompleksnega sistema, na katerega poleg padavin z manj negativno izotopsko sestavo vplivajo tudi dotoki z bokov, ki imajo prav tako višjo izotopsko sestavo. Najmanj negativne vrednosti so povezane z nizkim vodostajem in s padavinskimi dogodki.



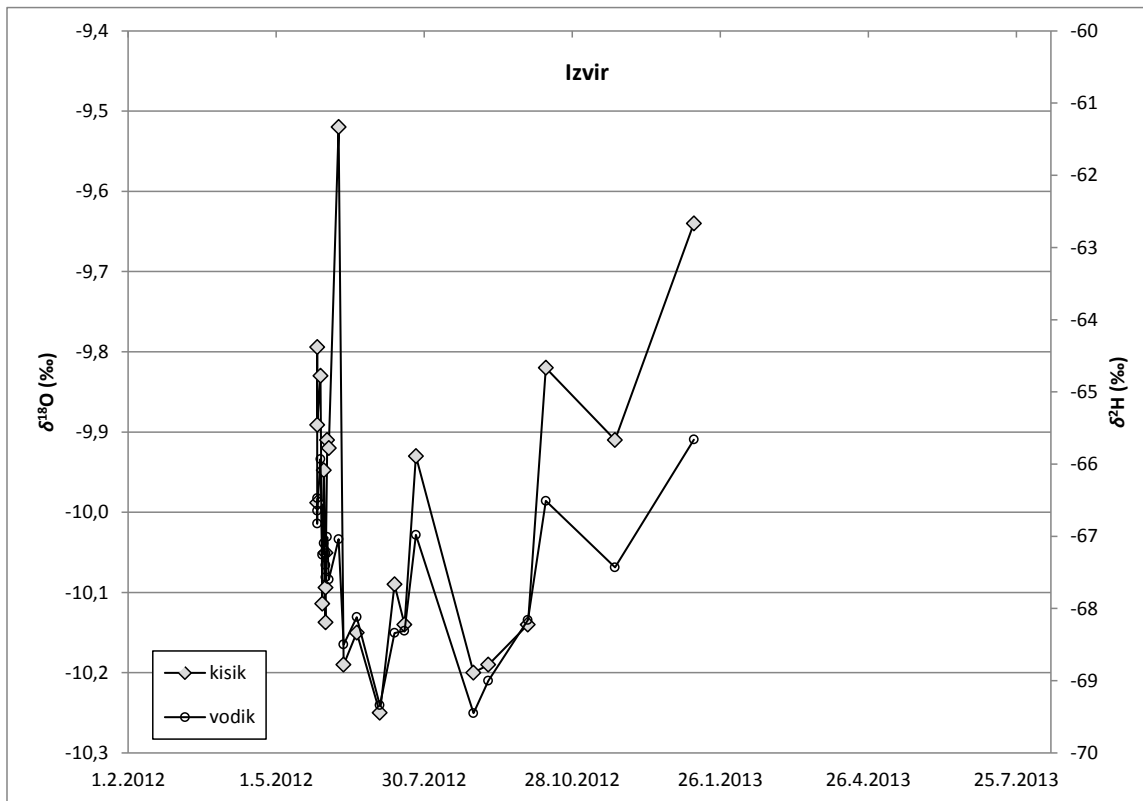
Grafikon 25: Izotopska sestava kisika in vodika na lokaciji vodnjak

Chart 25: Isotopic composition of oxygen and hydrogen at the well location



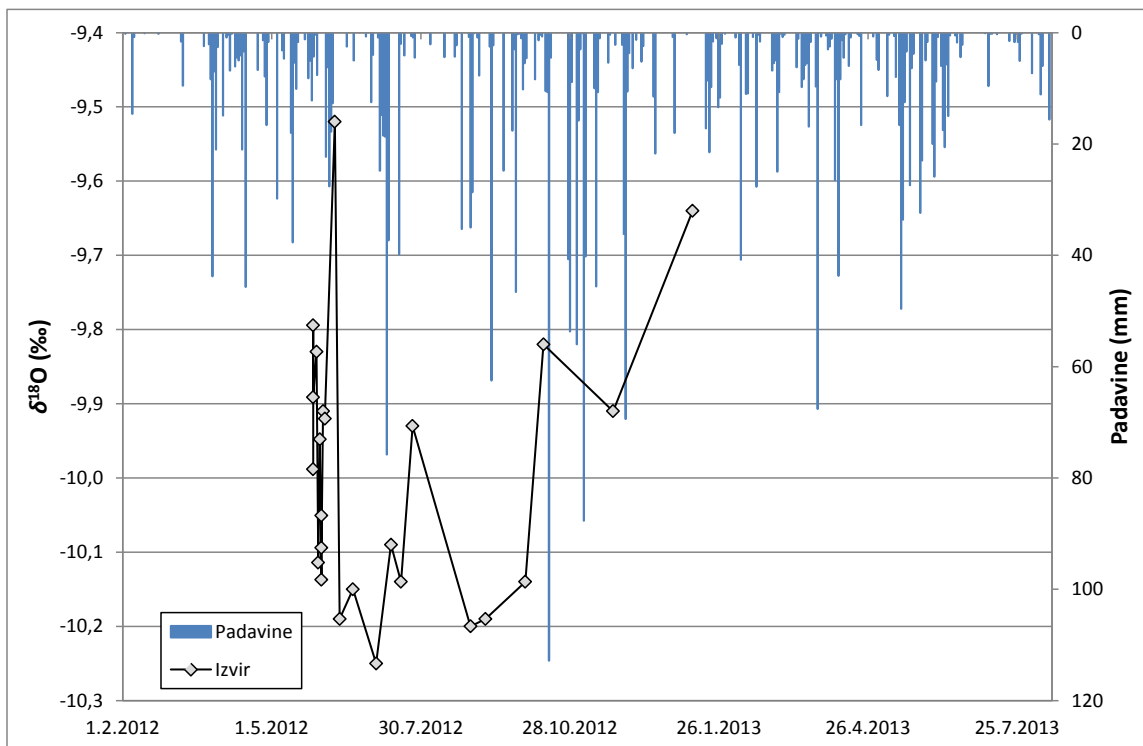
Grafikon 26: Dnevna količina padavin v Zgornji Radovni in kota podzemne vode na lokaciji vodnjak

Chart 26: Daily precipitation at Zgornja Radovna and groundwater level at the well location



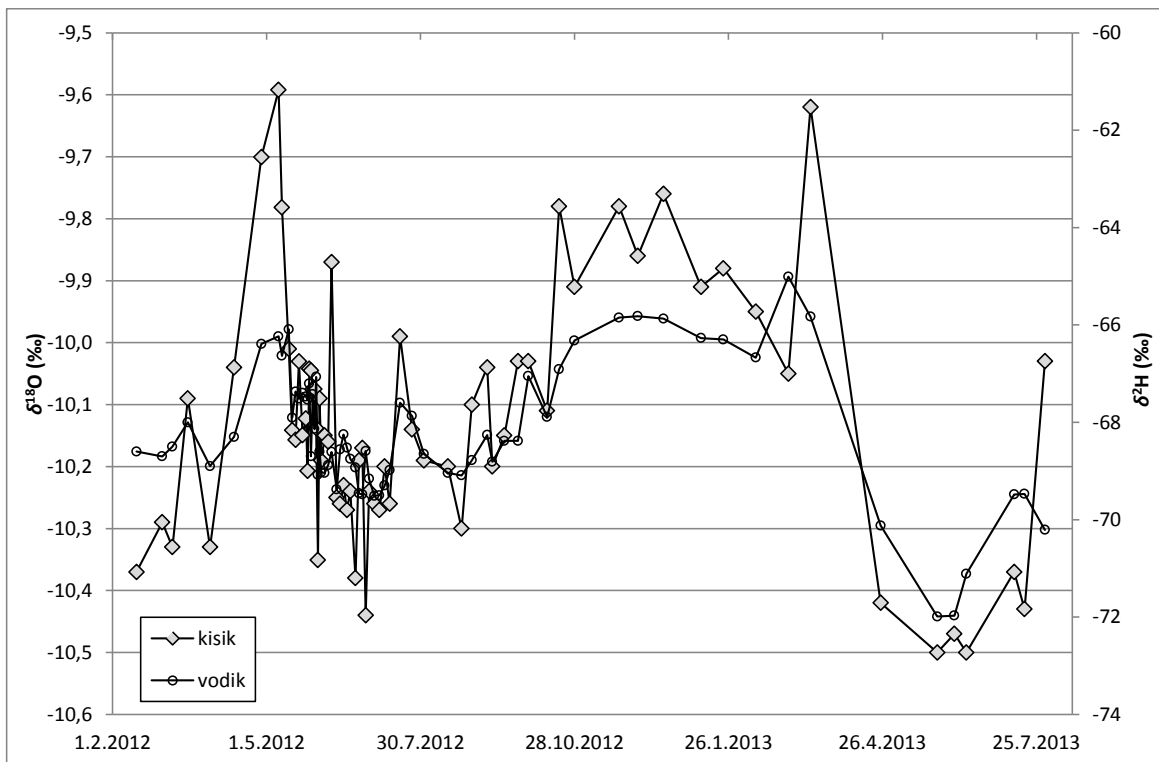
Grafikon 27: Izotopska sestava kisika in vodika na lokaciji izvira

Chart 27: Isotopic composition of oxygen and hydrogen at the spring location



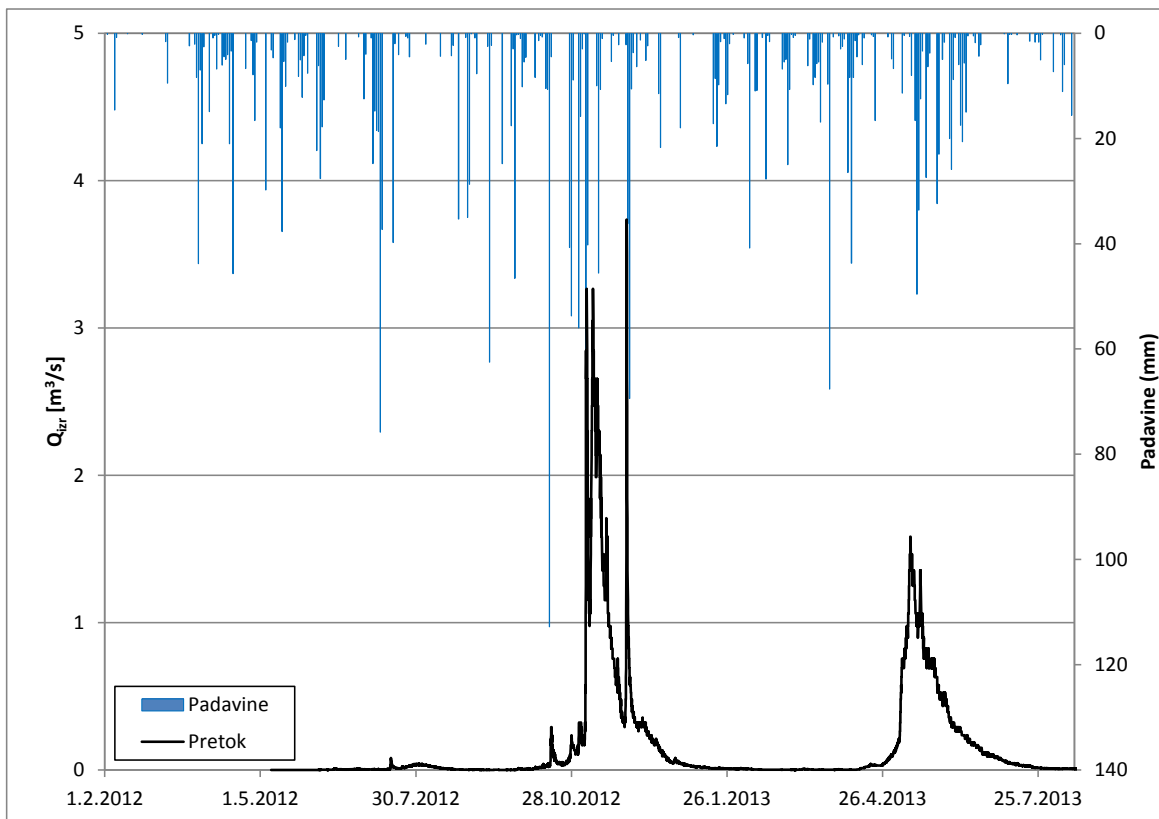
Grafikon 28: Dnevna količina padavin v Zgornji Radovni in izotopska sestava kisika na lokaciji izvira

Chart 28: Daily precipitation at Zgornja Radovna and isotopic composition of oxygen at the spring location



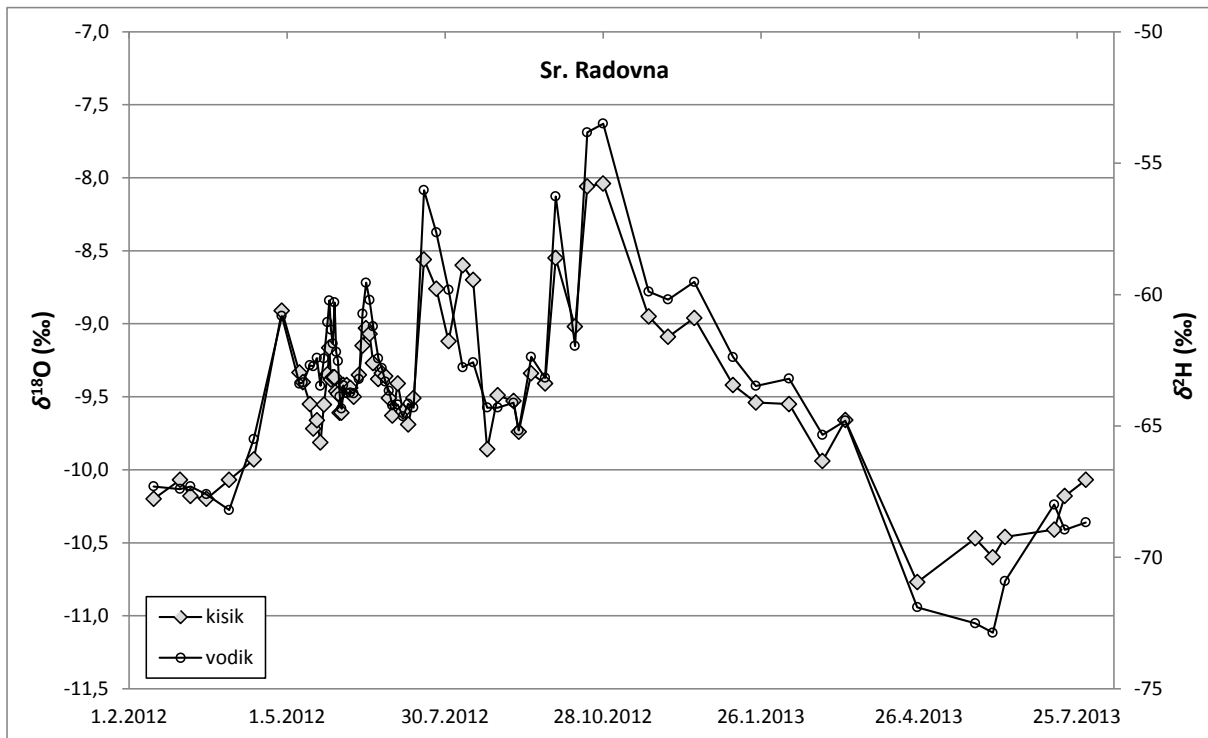
Grafikon 29: Izotopska sestava kisika in vodika na lokaciji Gogalov rovt

Chart 29: Isotopic composition of oxygen and hydrogen at the Gogalov rovt location



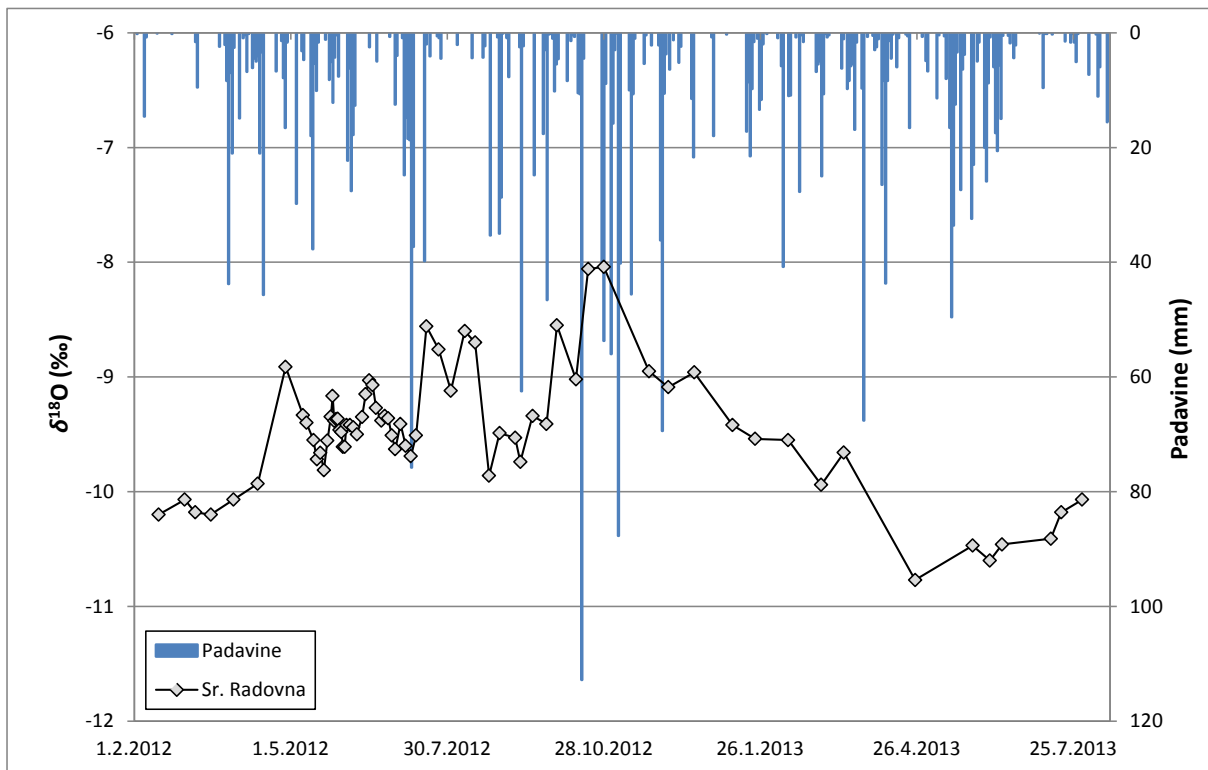
Grafikon 30: Dnevna količina padavin v Zgornji Radovni in pretok na lokaciji Gogalov rovt

Chart 30: Daily precipitation at Zgornja Radovna and stream discharge at the Gogalov rovt location



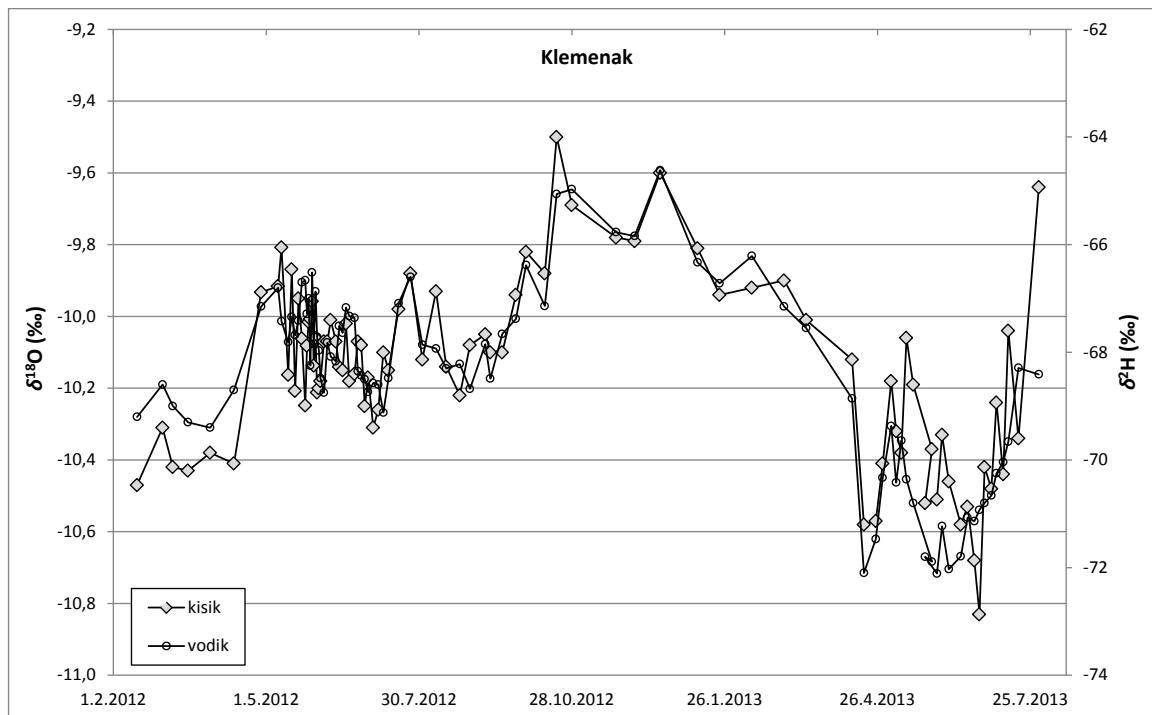
Grafikon 31: Izotopska sestava kisika in vodika na lokaciji Sr. Radovna

Chart 31: Isotopic composition of oxygen and hydrogen at the Sr. Radovna location



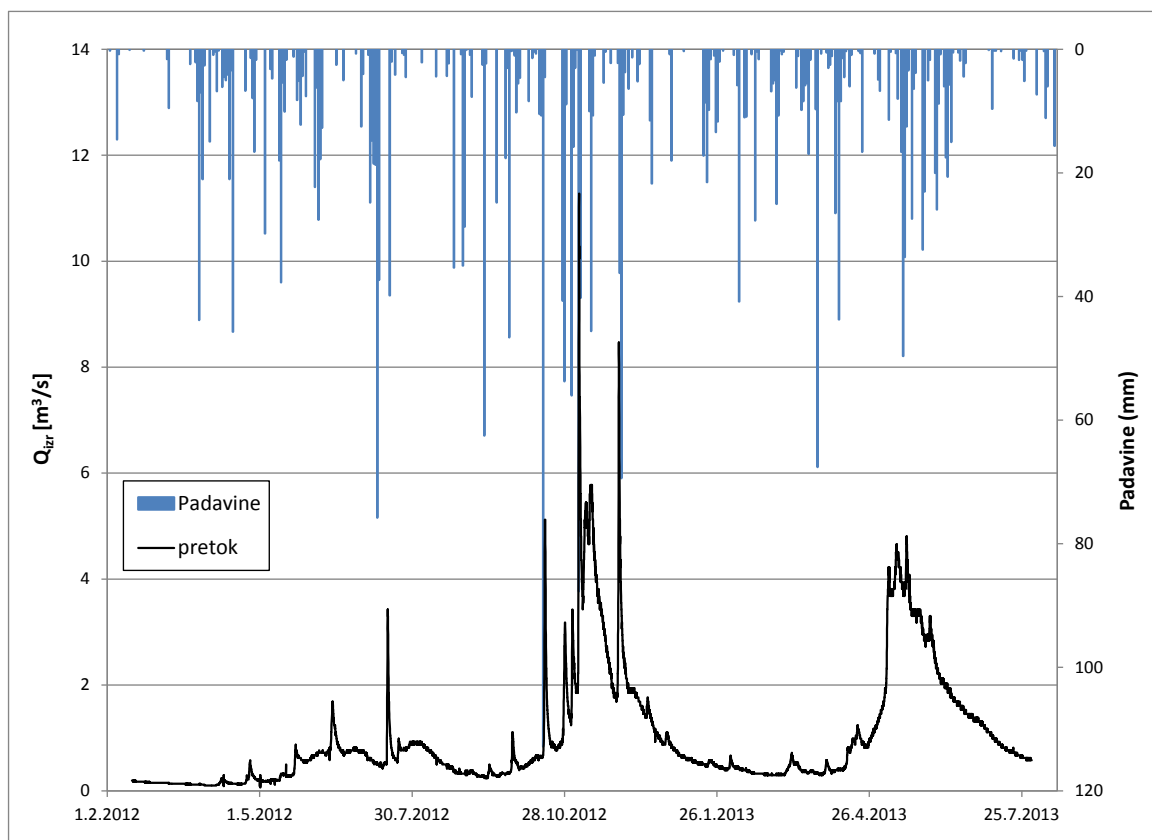
Grafikon 32: Dnevna količina padavin v Zgornji Radovni in izotopska sestava kisika na lokaciji Sr. Radovna

Chart 32: Daily precipitation at Zgornja Radovna and isotopic composition of oxygen at the Sr. Radovna location



Grafikon 33: Izotopska sestava kisika in vodika na lokaciji Klemenak

Chart 33: Isotopic composition of oxygen and hydrogen at the Klemenak location

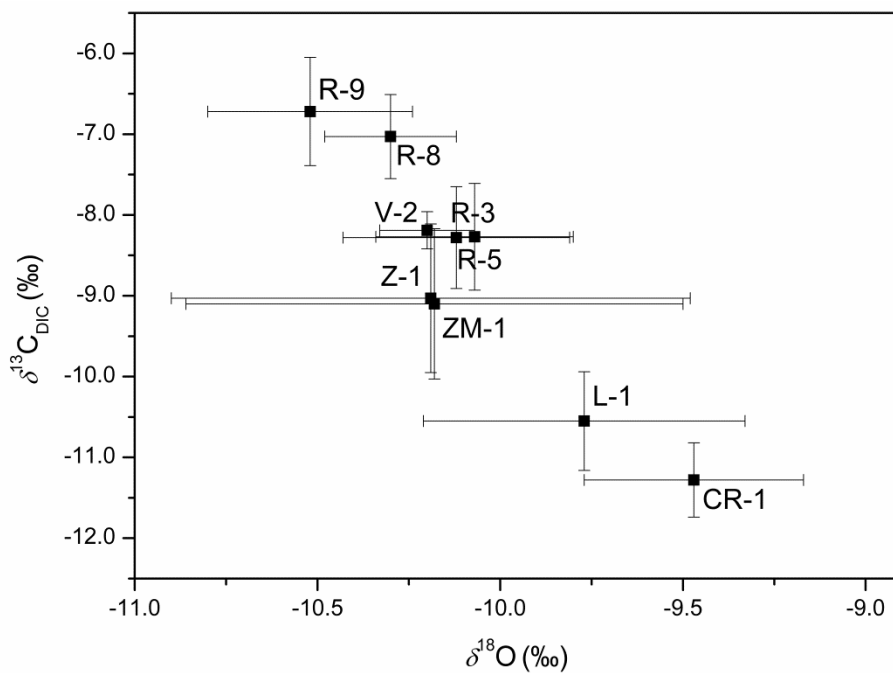


Grafikon 34: Dnevna količina padavin v Zgornji Radovni in pretok na lokaciji Klemenak

Chart 34: Daily precipitation at Zgornja Radovna and stream discharge at the Klemenak location

6.6.5 Analiza izotopske sestave $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$

Mehanizmi, ki kontrolirajo vrednosti $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ v dolini reke Radovne, so raztapljanje karbonatov, razpadanje organskega materiala in vzpostavljane ravnotežja z atmosferskim CO_2 . Vsi vzorci na kraških izviri imajo nižje vrednosti $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ kot rečni vzorci. Bolj negativne vrednosti $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ so interpretirane kot posledica izpostavljenosti atmosferskemu CO_2 , kar se odraža tudi v povišanih vrednostih pH dolvodno. V našem primeru so se povprečne pH-vrednosti dolvodno povišale z 8,03 na 8,36 (Preglednica 16). Najvišje vrednosti $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ so bile zabeležene na izviri reke Radovne (R-9) in odražajo vpliv raztapljanja karbonatov v napajalnem območju, ki je nad gozdno mejo (Torkar et al., 2016). Predhodne raziskave različnih vodnih virov na območju Karavank (Brenčič, 1998) in v centralnem delu Julijskih Alp (Vreča in Muri, 2006, 2010) kažejo, da imajo vode, ki prihajajo iz triasnih karbonatov, ki so nad gozdno mejo, vrednosti $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ med -6 in 0 ‰. Nasprotno imajo izviri, ki se napajajo pod gozdno mejo, nižje vrednosti $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$, ki so konsistentne s produkcijo DIC, ki je posledica preperevanja karbonatov s CO_2 , ki izvira iz oksidacije organskih snovi v tleh (Vreča in Muri, 2006). Na grafikonu je prikazan odnos med vrednostmi $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ in $\delta^{18}\text{O}$ (Grafikon 35).



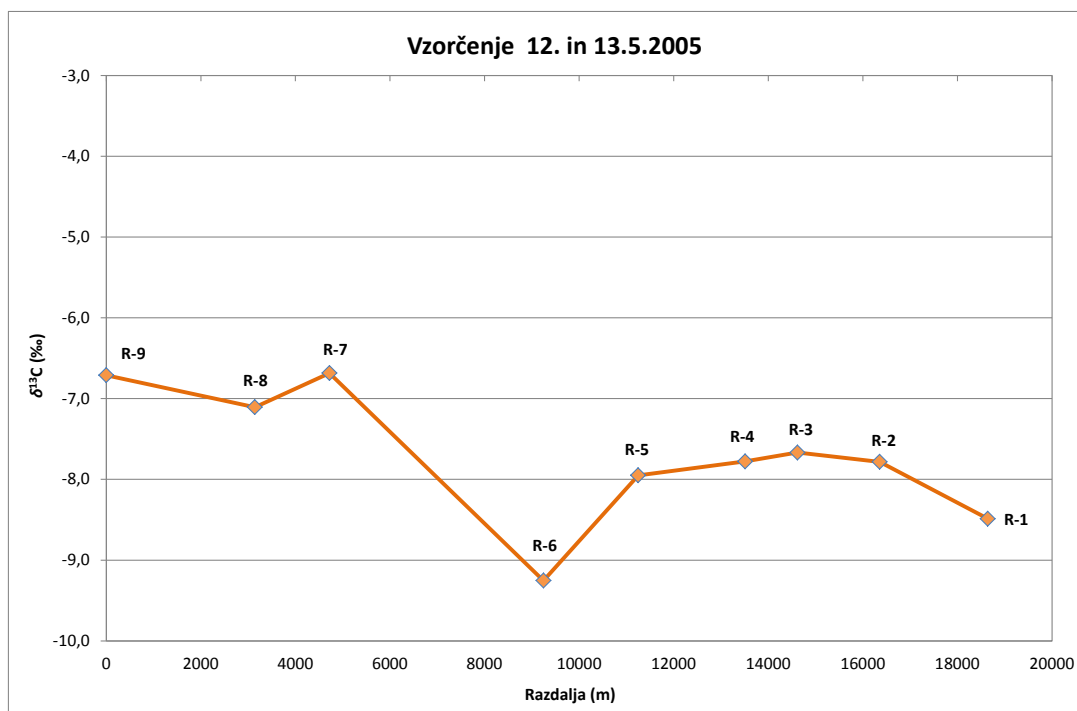
Grafikon 35: Diagram $\delta^{18}\text{O}$ v odvisnosti od povprečne vrednosti $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ s standardnim odklonom za vodo v reki, izvirsko vodo in podzemno vodo

Chart 35: Plot of $\delta^{18}\text{O}$ vs. $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ average values with standard deviation for stream water, spring water and borehole water samples

Vrednosti $\delta^{18}\text{O}$ so interpretirane kot indikator napajalne višine, bolj kot so vrednosti negativne, višja je napajalna višina. Najvišja napajalna višina je za izvir reke Radovne (R-9), najnižja pa za izvir Rečica (CR-1) (Grafikon 35). Kljub temu izvir Radovne in lokacija R-8 nista imela vrednosti $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ nad

-6 ‰, kar bi bilo pričakovati, saj je bilo v Karavankah določeno, da so vrednosti $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ nad gozdno mejo bolj pozitivne. Obe vzorčni mesti sta imeli povprečno napajalno višino nad gozdno mejo (okoli 1800 m v Julijskih Alpah), ampak skupno napajalno zaledje zajema tudi območje pod gozdno mejo, zato so posledično vrednosti $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ bile malenkost nižje (Torkar et al., 2016). Iz diagrama je razvidno (Grafikon 35), da so na lokacijah z višjo napajalno višino, prisotne vedno bolj pozitivne vrednosti $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$, kar pomeni negativno korelacijo med $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ in $\delta^{18}\text{O}$.

Na začetku vzorčenja so bili v maju 2005 vzeti vzorci za $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ na devetih lokacijah po celotni reki (Slika 17). Na vzorčnih točkah R-9, R-8 in R-7 so bile vrednosti $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ relativno visoke in prikazujejo, da je voda, ki se infiltrira na območju, prisotna tam kjer ni razvitega vegetacijskega pokrova in je voda v ravnotežju z atmosferskim CO_2 . Ta interpretacija je konsistentna z interpretacijo vrednosti $\delta^2\text{H}$ in $\delta^{18}\text{O}$. V dolvodni smeri je bilo opaziti močan padec vrednosti $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$. Lokacija R-6 se nahaja na območju, kjer je praktično celotna voda v reki Radovni odvzeta zaradi hidroelektrarne Gorje. Podoben padec lahko opazimo tudi na vzorčni točki R-1 (Grafikon 36), kjer je voda ponovno skoraj v celoti odvzeta iz struge zaradi hidroelektrarne Vintgar. Ko se voda ponovno vrne v strugo (lokacija R-5), se vrednosti $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ dvignejo in izotopska sestava odraža mešanico vode z višjega napajalnega območja z vodami z nižjega območja. Bolj negativne vrednosti dolvodno od lokacije R-6 lahko pripišemo trem kraškim izviro (Z-1, ZM-1 in L-1), ki so locirani med lokacijama R-7 in R-6 in imajo bolj negativne vrednosti $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$.



Grafikon 36: Izotopska vrednost $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ v odvisnosti od razdalje

Chart 36: Isotopic value of $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ versus the distance

6.7 Izračun srednje napajalne višine

Srednja napajalna višina je bila izračunana z izvirioma Strmole (ST-1) in Mevkuž (M-1, Preglednica 21, Preglednica 23) (Torkar et al., 2016). Ta dva izvira sta bila izbrana, ker imata majhni napajalni zaledji in ker se nahajata na različnih nadmorskih višinah. Za določitev povprečne napajalne višine je bilo predpostavljeno, da je izotopska sestava vode na izviri zaradi majhnega napajalnega zaledja enaka izotopski sestavi padavin na isti nadmorski višini. Povprečna napajalna višina je bila določena s stabilnim izotopom kisika in vodika, ampak izračuni s $\delta^2\text{H}$ niso bili ustrezni, ker so podali višje izračune nadmorske višine kot so v naravi, zato so bile višine določene le s stabilnim izotopom $\delta^{18}\text{O}$.

Preglednica 23: Osnovni podatki o lokacijah Strmole in Mevkuž

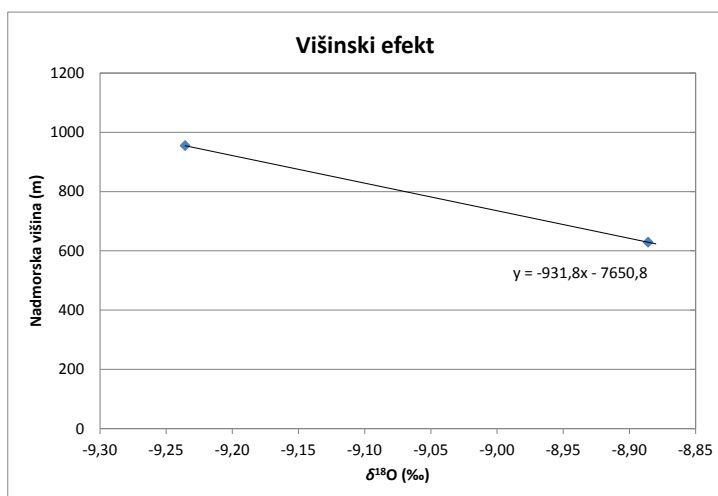
Table 23: Basic information about the location Strmole and Mevkuž

Lokacija	Nadmorska višina (m)	Povprečna izotopska sestava $\delta^{18}\text{O}$ (‰)
Strmole (ST-1)	955	-8,89
Mevkuž (M-1)	629	-9,24

Glede na razliko povprečnih vrednosti za $\delta^{18}\text{O}$ med ST-1 in M-1 je povprečni višinski efekt za dolino reke Radovne $-0,11$ ‰ na 100 m višine (Torkar et al., 2016). Z uporabo enostavnega linearnega modela lahko definiramo povprečne napajalne višine za izvire in reko z enačbo (25):

$$h_{\text{ave}} = (\delta^{18}\text{O}_{\text{ave}} * a) + b \quad (25)$$

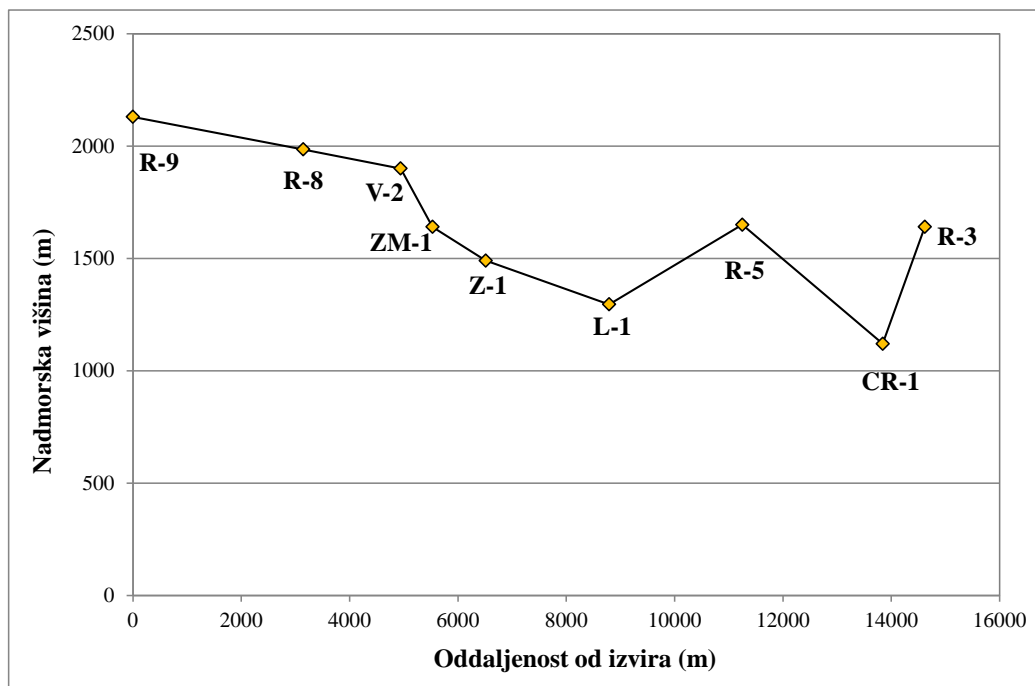
kjer je h_{ave} izračunana povprečna nadmorska višina za izbrano lokacijo, $\delta^{18}\text{O}_{\text{ave}}$ je povprečna vrednost $\delta^{18}\text{O}$ za izbrano lokacijo, a ($-931,8$) in b ($-7650,8$) sta naklon ali smerni koeficient ter presečišče, ki sta določena iz mediana vrednosti $\delta^{18}\text{O}$ ter iz nadmorske višine za lokaciji ST-1 in M-1 (Grafikon 37).



Grafikon 37: Izotopska sestava $\delta^{18}\text{O}$ v odvisnosti od nadmorske višine

Chart 37: Isotopic value of $\delta^{18}\text{O}$ depending on the altitude

Povprečne izračunane nadmorske višine so podane v spodnji preglednici (Preglednica 24). Najvišja izračunana povprečna nadmorska višina je za izvir Radovne (R-9, 2130 m) in je konsistentna z nadmorskimi višinami v napajalnem zaledju. Sledijo ji lokacije R-8, R-5 in R-3 (Grafikon 38). Dolvodno so izračunane povprečne napajalne višine vedno nižje, kar kaže, da je voda dolvodno vedno bolj obogatena z vodami, ki se napajajo na nižjih območjih napajalnega zaledja. Povprečne napajalne višine izvirov so konsistentne z njihovo pozicijo. Najnižjo povprečno napajalno višino, 1120 m, ima izvir Rečica (CR-1), ki drenira vzhodni, nižji del Mežakle. Relativno nizka napajalna višina je bila izračunana za izvir Lipnik (L-1, Grafikon 38). Za izvir Zmrzlek (ZM-1) je povprečna napajalna višina višja kot za izvir Lipnik, ker drenira severni del planote Pokljuka, kjer so nadmorske višine višje. Tudi za izvir Zatrep (Z-1) in izvir Zmrzlek (ZM-1), so bile izračunane višje povprečne napajalne višine, kot je bilo pričakovati, kljub temu da so nadmorske višine fizično mogoče. Alternativna razlaga za višje izračune je lahko tudi v razmerju med snežnico in padavinami. Prispevek snežnice v odtoku je lahko mnogo večji in lahko posledično vpliva na izotopsko sestavo ter nato na višje izračune povprečne nadmorske višine. Kljub temu je ta razlaga manj verjetna, ker bi sicer podobno veljalo tudi za druge lokacije. Napajalne višine za lokacije na reki so dolvodno vedno nižje, kar je rezultat kraških pritokov, ki imajo nižje napajalne višine. Lokacijo na reki R-3, kjer so zajete vse vode iz napajalnega območja, lahko privzamemo kot reprezentativno lokacijo za določitev srednje napajalne višine za celotno reko Radovno, ki je 1640 m (Torkar et al., 2016). Dolvodno na reki, sta sicer še dve lokaciji R-1 in R-2, vendar se je tam vzorčilo samo enkrat, zato za nadaljne izračune nista bili upoštevani.



Grafikon 38: Srednja napajalna višina za lokacije vzorčenj vzdolž toka

Chart 38: Average recharge altitude of sampling locations downstream

V prejšnjih raziskavah so bili v dolini reke Radovne v treh vzorčenjih preiskovani samo izvir Zmrzlek, Lipnik in Rečica (Kanduč et al., 2012). Če primerjamo povprečne napajalne višine, ki so jih določili v predhodnih raziskavah, se dobljene višine za Zmrzlek (1679 m) in za Rečico (1103 m) dobro ujemajo z našimi rezultati. Naši izračuni za izvir Lipnik so nižji za 205 m. Razlike lahko pripišemo uporabi različnih metod in manjšemu številu vzorcev. Kanduč et al. (2012) so povprečne napajalne višine izračunali z enostavnim modelom, kjer so uporabili odvisnost zemljepisne širine in nadmorske višine glede na prostorsko porazdelitev vrednosti $\delta^{18}\text{O}$ v padavinah po Sloveniji. V naših raziskavah je bilo izotopsko vzorčenje narejeno v daljšem časovnem obdobju in, še pomembneje, vse komponente v izračunih so z območja doline reke Radovne, zato lahko trdimo, da so izračunane povprečne napajalne višine točnejše od Kanduč et al. (2012).

Preglednica 24: Povprečne napajalne višine in povprečni zadrževalni časi za vzorčene lokacije v obdobju 2005–2007 (Torkar et al., 2016) ter v obdobju 2012–2013

Table 24: Average recharge altitudes and mean residence times for the sampling locations between 2005–2007 (Torkar et al., 2016) and between 2012–2013

Lokacija	Povprečna napajalna višina (m)	Lokacija	Povprečna napajalna višina (m)
R-9	2130	vodnjak	2095
R-8	1985	izvir	1660
V-2	1900	Gogalov rovt	1790
ZM-1	1640	Sr. Radovna	1185
Z-1	1490	Klemenak	1805
L-1	1295		
R-5	1650		
CR-1	1120		
R-3	1640		

Izračun povprečnih napajalnih višin za lokacije v zgornjem delu reke Radovne je primerljiv z ostalimi vrednostimi, določenimi za izvire in reko v obdobju 2005–2007. Najvišjo povprečno napajalno višino ima lokacija vodnjak, najnižjo pa Sr. Radovna. Povprečne napajalne višine od vodnjaka dolvodno do Klemenaka padajo, vendar vmes med izviro do Klemenaka naraščajo, kar v prejšnjih izračunih ni bilo mogoče videti, ker na tem območju ni bilo nobene lokacije vzorčenja. To nakazuje, da je dinamika v zgornjem delu toka kompleksna. Naraščanje povprečne napajalne višine od izvira dolvodno do Klemenaka je posledica mešanja vod iz medzrnskega vodonosnika, ki ima napajalno zaledje v Julijskih Alpah, ter vod z boka, ki drenirajo nižje ležeči planoti Pokljuko in Mežaklo. Ti izračuni dokazujejo, da je dotok vode z bokov na tem območju zelo pomemben.

6.8 Izračun napajalnega območja reke Radovne

Napajalno območje reke Radovne se razprostira na območju Pokljuke, Mežakle in Julijskih Alp, katerih mej ne poznamo natančno, saj območje v večini sestavljajo karbonatne kamnine. Površina napajalnega območja je bila izračunana z bilančno enačbo:

$$P = Q + ETR + \Delta S \quad (26)$$

$$V_P = V_Q + V_{ETR} \quad (27)$$

$$A = \frac{Q \cdot t}{(P - ETR)} \quad (28)$$

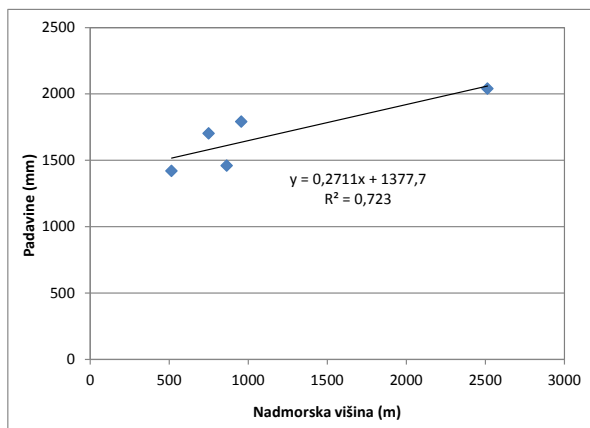
kjer P predstavlja padavine, Q odtok, ETR evapotranspiracijo, A površino napajalnega zaledja, t čas in ΔS spremembo vodnih zalog v tleh, ki v samem izračunu niso bile upoštevane, saj se predpostavlja, da so zaradi povprečenja zanemarljive (Frantar, 2005). Za izračun površine napajalnega zaledja smo izhajali iz povprečne napajalne višine, ki je bila določena na osnovi izotopske sestave kisika v prejšnjem poglavju. Za povprečno napajalno višino območja Radovne smo tako vzeli nadmorsko višino 1640 m na lokaciji R-3 (Preglednica 24). Pripadajoča letna količina padavin na prej omenjeni nadmorski višini je bila izračunana s pomočjo korelacije podatkov o letnih padavinah okoliških postaj Kredarica, Lesce, Planina pod Golico, Rateče in Zgornja Radovna (Grafikon 39). Za omenjene postaje je bila izračunana realna letna evapotranspiracija (ETR) na podlagi povprečnih letnih padavin in temperature po Turcovi enačbi (1961):

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \frac{P^2}{L^2}}} \quad (29)$$

$$L = 300 + 25T + 0,05T^2 \quad (30)$$

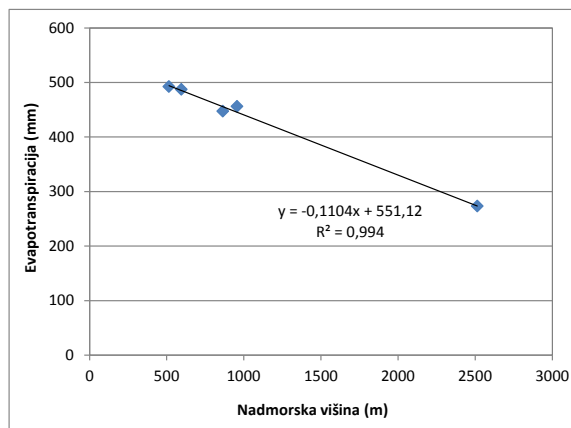
kjer so P povprečne letne padavine v mm, L toplotni indeks in T povprečna letna temperatura v °C glede na postaje Kredarica, Lesce, Planina pod Golico, Rateče in Bohinjska Češnjica.

Na isti način kot pri padavinah je bila določena tudi ETR s pomočjo korelacije ETR za pripadajočo nadmorsko višino (Grafikon 40). Povprečni letni pretok je bil vzet za merilno postajo Podhom, prav tako za obdobje 1981–2010, in znaša 7,54 m³/s. Iz enačbe 28 sledi, da je površina napajalnega območja Radovne 163,7 km². Izračun površine napajalnega zaledja reke Radovne je manjši kot predhodni izračuni, 166,8 km² (Bat et al., 2008) in 168,3 km² (Serianz, 2015), vendar primerljiv.



Grafikon 39: Korelacija padavin med posameznimi merilnimi mesti (Preglednica 25)

Chart 39: Correlation of precipitation between individual measuring sites (Table 25)



Grafikon 40: Korelacija ETR med posameznimi merilnimi mesti (Preglednica 25)

Chart 40: Correlation of ETR between individual measuring sites (Table 25)

Preglednica 25: Podatki o povprečnih letnih padavinah in temperaturah za referenčno obdobje 1981–2010 ter izračun evapotranspiracije po Turcovi enačbi

Table 25: Average yearly precipitation and temperature data for standard 30-year average (1981–2010) and evapotranspiration calculations with the Turc equation

Postaja	Nadmorska višina (m)	Povprečne letne padavine za obdobje 1981–2010 (mm)	Povprečna letna temperatura za obdobje 1981–2010 (°C)	Toplotni indeks L	ETR (mm)
Kredarica	2514	2038	-1,0	275,05	272,82
Lesce	515	1418	8,7	521,28	492,21
Planina pod Golico	956	1790	6,7	469,74	455,83
Rateče	864	1459	6,6	467,18	447,01
Zgornja Radovna	750	1701	/	/	
Boh. Češnjica	595	/	8,1	505,78	486,79
povprečna napajalna višina (R-3) napajalnega območja Radovne	1640	1822	3,2	379,47	372,28

6.9 Izračun srednjih zadrževalnih časov

Za določitev srednjih zadrževalnih časov vode je bil uporabljen Piston-flow model (PFM) (enačba 23) s časovnimi vrstami izotopske sestave kisika ($\delta^{18}\text{O}$) in je konsistenten s hidrogeološkim modelom (Preglednica 21, Preglednica 24, Preglednica 26). PFM predvideva, da sledilo potuje od točke napajanja to točke iztoka (vodnjak ali izvir) brez hidrodinamske disperzije ali mešanja. Za izračun srednjih zadrževalnih časov so bili najprej uporabljeni podatki za GNIP-postajo Ljubljana (obdobje

2002–2008) (Vreča et al., 2008, 2014b) in nato še za padavinsko postajo Zgornja Radovna (obdobje 04/2010–03/2013) (Vreča et al., 2013a, Vreča, 2016).

Za določitev srednjih zadrževalnih časov so bile, za izbrano periodo padavin (2002–2008) na GNIP-postaji Ljubljana (Vreča et al., 2008, 2014b), izotopske vrednosti za $\delta^{18}\text{O}$ med opazovanimi in modeliranimi ($r^2 = 0,49$) primerljive z rezultati podobnih študij (Rodgers et al., 2005, Ogrinc et al., 2008). Za lokacije na izvirih in na reki je bilo prileganje opazovanih in modeliranih izotopskih podatkov med 0,73 in 0,44; razen na zadnjih treh lokacijah (R-5, CR-1 in R-3), kjer je bila korelacija najslabša ($r^2 = 0,28$). Srednji zadrževalni časi za lokacije na reki so med 2,1 in 2,4 leta. Izvir Radovne ima krajši zadrževalni čas (1,7 leta) kot naslednja dolvodna lokacija R-8. Najkrajše zadrževalne čase imajo kraški izviri ZM-1 in Z-1 (0,8 in 0,7 leta) zaradi zelo prepustnega in zakraselega napajalnega območja. Srednji zadrževalni časi so na vseh lokacijah pod tremi leti in nakazujejo na sistem z nizkim uskladiščenjem vode (Torkar et al., 2016).

Najnižji ocenjeni srednji zadrževalni časi so za izvire, ki drenirajo zakrasele apnenčeve vodonosnike na Pokljuki in Mežakli. Izvira Zmrzlek (ZM-1) in Zatrep (Z-1), ki občasno presahneti, imata najnižji srednji zadrževalni čas (0,7 leta). Malenkost višji srednji zadrževalni čas (1,2 leta) ima izvir Lipnik (L-1), ki se nahaja blizu izvira Zmrzlek, ampak je njegova lokacija na nižji nadmorski višini in ima pretok skozi celo leto. Ti podatki nakazujejo, da izvir Lipnik drenira nižji del vodonosnika Radovne kot izvir Zmrzlek. Med kraškimi izviri ima najvišji ocenjeni zadrževalni čas, 2,1 leta, izvir Rečica. Napajalno zaledje tega izvira sestavlja anizijski in ladinijski dolomit, ki ima nižjo prepustnost kot apnenec in posledično višjo zmogljivost skladiščenja vode, kar se odraža v višjih zadrževalnih časih. Med vsemi vzorčnimi mesti ima voda na vrtini najvišji srednji zadrževalni čas (3,1 leta). Srednji zadrževalni časi na lokacijah na reki dolvodno kažejo malenkost višje zadrževalne čase (Preglednica 26). Na izviru Radovne (R-9) je zadrževalni čas nekoliko daljši (1,7 leta) v primerjavi z zadrževalnimi časi kraških izvirov, kar je skladno s tem, da voda na izviru Radovne izteka iz zgornjega dela debelega medzrnskega vodonosnika. Srednji zadrževalni čas, 2,1 leta, na dolvodni lokaciji R-8 je pričakovano višji, saj podzemna voda izteka iz globljega dela medzrnskega vodonosnika z daljšimi zadrževalnimi časi. Ta dotok podzemne vode v reko lahko prepoznamo kot vzrok za dolvodno naraščanje pretokov v reki (Torkar in Brenčič, 2015). Na lokaciji R-5 je bil določen enak srednji zadrževalni čas kot na lokaciji R-8. Srednji zadrževalni čas, 2,4 leta, na lokaciji R-3 lahko privzamemo kot zadrževalni čas celotne reke Radovne in njenega napajalnega območja, ker so na tej lokaciji v reki zbrane vse vode z območja Radovne. Izračunani zadrževalni časi so v skladu s predhodnimi raziskavami reke Save, kjer je izračunani zadrževalni čas za izvir Save, Zelenci, 1,76 leta ter 1,85 leta za lokacijo na reki, ki je 6 km dolvodno od sotočja reke Radovne in Save (Ogrinc et al., 2008). Ocenjene zadrževalne čase na vzorčnih lokacijah je treba razumeti kot grobe ocene, ker so bili kot vhodni podatki za vrednosti $\delta^{18}\text{O}$

v padavinah upoštevani podatki za GNIP-postajo Ljubljana (Vreča et al., 2008, 2014b), ki se nahaja v centralnem delu Slovenije.

Preglednica 26: Primerjava povprečnih zadrževalnih časov za vzorčene lokacije glede na različne vhodne podatke o izotopski sestavi padavin na postaji Ljubljana (Vreča et al., 2008, Vreča et al., 2014b, Torkar et al., 2016) in Zgornja Radovna (Vreča et al., 2013a, Vreča, 2016)

Table 26: Comparison of mean residence times for the sampling locations according to different isotopic composition of precipitation at Ljubljana station (Vreča et al., 2008, Vreča et al., 2014b, Torkar et al., 2016) and Zgornja Radovna station (Vreča et al., 2013a, Vreča, 2016)

Lokacija	Padavine Ljubljana (2002–2008) $A_{z1} = 3,31$	Padavine Zgornja Radovna (04/2010–03/2013) $A_{z1} = 3,18$	Amplituda A_{z2} ($\delta^{18}O$)
	Povprečni zadrževalni čas (leto)	Povprečni zadrževalni čas (leto)	
R-9	1,7	1,7	0,30
R-8	2,1	2,0	0,25
V-2	3,1	3,0	0,17
ZM-1	0,8	0,7	0,68
Z-1	0,7	0,7	0,73
L-1	1,2	1,2	0,43
R-5	2,1	2,0	0,25
CR-1	2,1	2,0	0,25
R-3	2,4	2,3	0,22

Izračuni srednjih zadrževalnih časov na območju reke Radovne so bili nadgrajeni z amplitudami izotopske sestave padavin določenimi za padavinske postaje v severozahodni Sloveniji (Vreča et al., 2013a, Vreča, 2015). Za izračune je bil upoštevan razpon izotopske sestave kisika za padavinsko postajo Zgornja Radovna (Vreča et al., 2013a). Primerjava enih in drugih izračunov za povprečne zadrževalne čase je podana v preglednici (Preglednica 26). Razlike opazimo na šestih lokacijah od devetih, vendar je razlika med obema izračunoma majhna in znaša 0,1 leta oz. 1,2 meseca. Izračuni so bili narejeni tudi za vzorčene lokacije med letoma 2012 in 2013 (Preglednica 27). Lokacije so v preglednici navedene v dolvodnem zaporedju, k njim sta za primerjavo dodani še dve lokaciji iz prve kampanje vzorčenja (R-9 in R-8). Najnižji zadrževalni čas ima lokacija Sr. Radovna (0,7 leta), kar je pričakovano, saj voda drenira zakraselo Pokljuko. To lokacijo lahko neposredno primerjamo z lokacijama Zmrzlek in Zatrej, ki prav tako drenirata Pokljuko ter Mežaklo in imata enake zadrževalne čase. Naslednji najnižji zadrževalni čas ima vodnjak (0,9 leta), iz česar sklepamo, da je voda v vodnjaku iz zgornjega dela medzrnskega vodonosnika s krajšimi zadrževalnimi časi. Voda v vrhnjem delu medzrnskega vodonosnika potuje hitreje in ima krajše zadrževalne čase. Dolvodno povprečni zadrževalni časi od lokacije R-9 do Gogalovega rovta in Klemenaka naraščajo (1,8 let → 3,2 let → 4,2 let), kar potrjuje hipotezo, da se bolj dolvodne lokacije napajajo s podzemno vodo iz globljega dela vodonosnika, ki ima daljše zadrževalne čase. Naslednja dolvodna lokacija R-8 ima občutno nižje

zadrževalne čase (2,1 leta), kar je posledica vpliva dotokov vode iz bokov doline, ki imajo krajše zadrževalne čase.

Preglednica 27: Povprečni zadrževalni časi za vzorčene lokacije izračunani z upoštevanjem podatkov o izotopski sestavi padavin na padavinski postaji Zgornja Radovna (Vreča et al., 2013a, Vreča, 2016)

Table 27: Mean residence times for the sampling locations calculated with data of the isotopic composition of precipitation for station Zgornja Radovna (Vreča et al., 2013a, Vreča, 2016)

Lokacija	Povprečni zadrževalni čas (leto)	Amplituda $A_{z,2}$ ($\delta^{18}\text{O}$)
vodnjak	0,9	0,54
R-9	1,7	0,30
Gogalov rovt	3,2	0,16
Sr. Radovna	0,7	0,71
Klemenak	4,2	0,12
R-8	2,1	0,25

6.10 Izotopska separacija hidrograma

Za določitev razmerij med posameznimi komponentami, ki prispevajo k skupnemu odtoku na izviru, je bila uporabljena metoda izotopske razdelitve hidrograma. Najprej je bil za izračun deleža snežnice uporabljen dvokomponentni mešalni model po enačbi (12), ki predpostavlja, da se v sistemu mešata stara voda oziroma voda, ki je v vodonosniku, ter nova voda ali snežnica. Nato je bil uporabljen tudi trokomponentni model po enačbi (17), ki poleg prej omenjenih komponent upošteva še komponento padavin.

6.10.1 Določitev in izračun komponent v odtoku

Za vse lokacije (vodnjak, izvir, Gogalov rovt, Sr. Radovna ter Klemenak) se je za leti 2012 in 2013 določila izotopska sestava stare vode pred taljenjem snega. Po časovnem pregledu podatkov je bilo ugotovljeno, da je izotopska sestava kisika in vodika na vsaki lokaciji za vsako leto pred začetkom obdobja taljenja snega drugačna, zato so bile vrednosti za izotopsko sestavo stare vode oziroma vode v vodonosniku izračunane na podlagi izotopske sestave kisika v padavinah (Vreča et al., 2013a, 2014a). Glede na izračune povprečne starosti v vodonosnik infiltrirane vode (2,4 leta) se je, na podlagi podatkov o izotopski sestavi padavin na meteoroloških postajah Kredarica in Rateče ter padavinski postaji Zgornja Radovna (Preglednica 20) (Vreča et al., 2013a, Vreča, 2016), naredila interpolacija izotopske sestave padavin (Grafikon 41, Grafikon 42, Grafikon 43) za različna obdobja ter za različno število postaj, na povprečno napajalno višino (1640 m) za dolino reke Radovne. Za vse izbrane izračune, je bila izotopska sestava stare vode določena na podlagi povprečno tehtane vrednosti za izbrano obdobje (Preglednica 28). Ti izračuni so nadalje predstavljali razpon izotopske sestave stare vode. Za samo ponovljivost so bili v modelu upoštevni še podatki za izotopsko sestavo kisika za staro

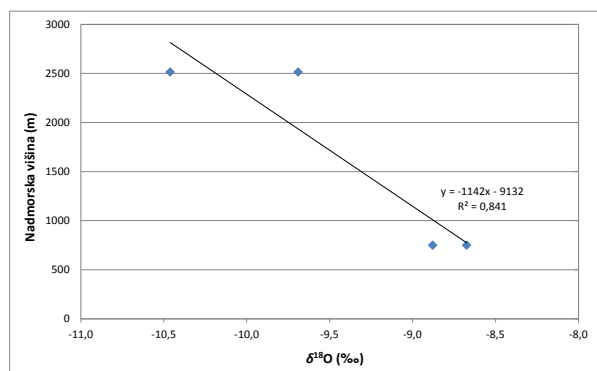
vodo s standardnim odklonom (Preglednica 28). Izračun izotopske sestave stare vode oziroma vode v vodonosniku je zahteven tako zaradi kratkih zadrževalnih časov, kot tudi ekstremnih vremenskih razmer pred začetkom vzorčenja in zaradi izvora padavin, ki so na tem območju kompleksne.

Preglednica 28: Izotopska sestava kisika za staro vodo

Table 28: Isotope value of oxygen for old water

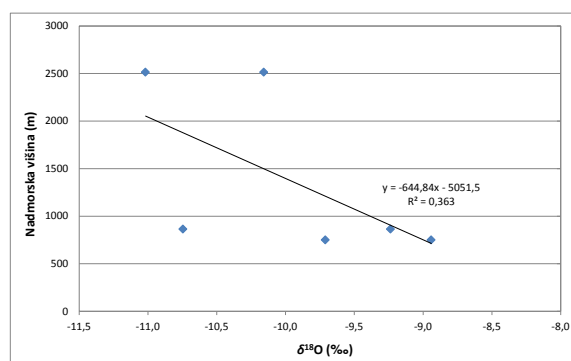
Upoštevane postaje za izračun	Nadmorska višina (m)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	Standardna deviacija
Kredarica in Zgornja Radovna (obdobje 04/2011–03/2012)	1640	-9,96	0,75
Kredarica, Zgornja Radovna in Rateče (obdobje 04/2011–03/2012)	1640	-10,12	/
Kredarica, Zgornja Radovna in Rateče (obdobje 2011–2012)	1640	-9,47	/

Podatek za novo vodo oziroma za snežnico je bil pridobljen na podoben način kot podatek za staro vodo. Za izračun so bili uporabljeni podatki o snežnici iz vzorčevalnikov za zimo 2012/2013, ki so bili postavljeni v Zgornji Radovni ter na Pokljuki (Grafikon 19). Za nadaljnje izračune se je uporabila povprečna tehtana izotopska vrednost za $\delta^{18}\text{O}$ za posamezno lokacijo ter se je nato vrednost interpolirala na povprečno napajalno višino reke Radovne (1640 m, Preglednica 29).



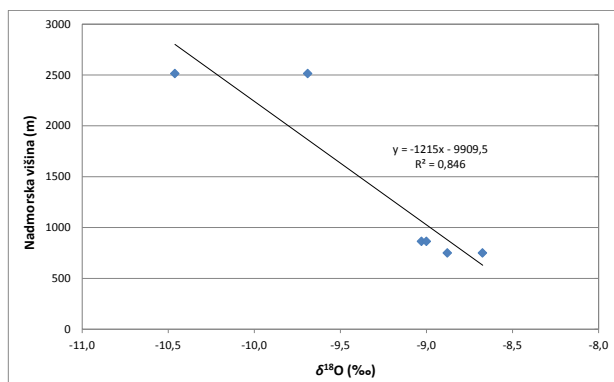
Grafikon 41: Izotopska sestava $\delta^{18}\text{O}$ za snežnico v odvisnosti od nadmorske višine za postaji Kredarica in Zgornja Radovna za obdobje 04/2011–03/2012

Chart 41: Isotope values of $\delta^{18}\text{O}$ for snowmelt vs. altitude for Kredarica and Zgornja Radovna stations in the 04/2011–03/2012 period



Grafikon 42: Izotopska sestava $\delta^{18}\text{O}$ za snežnico v odvisnosti od nadmorske višine za postaje Kredarica, Zgornja Radovna in Rateče za obdobje 04/2011–03/2012

Chart 42: Isotope values of $\delta^{18}\text{O}$ for snowmelt vs. altitude for Kredarica, Zgornja Radovna and Rateče stations in the 04/2011–03/2012 period



Grafikon 43: Izotopska sestava $\delta^{18}\text{O}$ za snežnico v odvisnosti od nadmorske višine za postaje Kredarica, Zgornja Radovna in Rateče za obdobje 01/2011–02/2012

Chart 43: Isotope values of $\delta^{18}\text{O}$ for snowmelt vs. altitude for Kredarica, Zgornja Radovna and Rateče stations in the 01/2011–12/2012 period

Preglednica 29: Izotopska sestava kisika za snežnico (Vreča, 2016)

Table 29: Isotope value of oxygen for snowmelt (Vreča, 2016)

Lokacija	Nadmorska višina (m)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)
Zgornja Radovna	739	-14,36
Pokljuka	1330	-14,64
Povprečna napajalna višina (R-3)	1640	-14,80

Pri trokomponentnem modelu so bile poleg prej omenjene stare vode ter snežnice upoštevane tudi padavine. Za izračune je bil uporabljen podatek o povprečni tehtani izotopski vrednosti padavin za leto 2012.

6.10.1 Trokomponentni mešalni model

S trokomponentnim mešalnim modelom so bile izračunane posamezne komponente odtoka v odstotkih s štirimi izračuni na vseh vzorčnih lokacijah, razen na lokaciji vodnjak. Ker za trokomponentni mešalni model potrebujemo dve sledili, sta bili poleg izotopske sestave kisika uporabljeni še izotopska sestava vodika ter elektroprevodnost. Trije različni izračuni so bili izračunani z uporabo izotopske sestave kisika in vodika, en izračun je bil narejen z uporabo izotopske sestave kisika in elektroprevodnosti. Prvi trije izračuni, kjer sta bila kot sledilo uporabljena izotopa kisika in vodika, niso podali smiselnih rezultatov. Izračuni za obe komponenti, snežnico in padavine, so podali ali negativne deleže, kar pomeni, da ta komponenta ni prisotna v odtoku, ali pa so bili deleži večji kot 100 %. Edini izračun, ki je podal dokaj smiselne rezultate, ampak le za snežnico in staro vodo, je bil tisti, kjer se je kot sledilo uporabila poleg kisika še elektroprevodnost. Vsi deleži za padavine, razen šestih vzorčnih dni, so bili negativni. Iz tega sledi, da trokomponentni mešalni model za podatke ni ustrezen in zaradi tega se rezultate nadalje ne obravnava.

6.10.2 Dvokomponentni mešalni model

Posamezne komponente odtoka v odstotkih so se na vseh vzorčnih lokacijah v Radovni izračunale na podlagi dvokomponentnega mešalnega modela s sedmimi različnimi izračuni. Preglednica 30 opisuje posamezne vhodne vrednosti za staro in novo vodo.

Preglednica 30: Vhodne vrednosti dvokomponentnega modela za staro in novo vodo

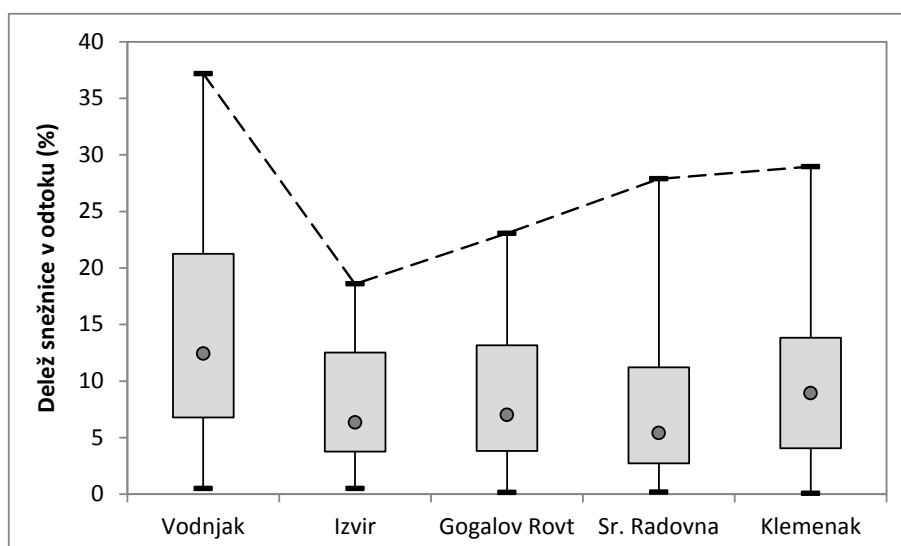
Table 30: Input values for the two-component model for the old water and the new water

Dvokomponentni model	Vrednost stare vode je izračunana glede na:	Vrednost nove vode je izračunana glede na:
1. izračun	interpolirane izotopske vrednosti za padavine ($\delta^{18}\text{O}$) glede na postaji Kredarica in Zgornja Radovna za obdobje 04/2010–03/2012	interpolirane izotopske vrednosti za snežnico ($\delta^{18}\text{O}$) glede na lokaciji Pokljuka in Zgornja Radovna za zimo 2012/2013
2. izračun	interpolirane izotopske vrednosti za padavine ($\delta^{18}\text{O}$) glede na postaji Kredarica in Zgornja Radovna za obdobje 04/2010–03/2012 s prišteto standardno deviacijo	interpolirane izotopske vrednosti za snežnico ($\delta^{18}\text{O}$) glede na lokaciji Pokljuka in Zgornja Radovna za zimo 2012/2013
3. izračun	interpolirane izotopske vrednosti za padavine ($\delta^{18}\text{O}$) glede na postaji Kredarica in Zgornja Radovna za obdobje 04/2010–03/2012 z odšteto standardno deviacijo	interpolirane izotopske vrednosti za snežnico ($\delta^{18}\text{O}$) glede na lokaciji Pokljuka in Zgornja Radovna za zimo 2012/2013
4. izračun	interpolirane izotopske vrednosti za padavine ($\delta^{18}\text{O}$) glede na postaje Kredarica, Rateče in Zgornja Radovna za obdobje 04/2010–03/2012	interpolirane izotopske vrednosti za snežnico ($\delta^{18}\text{O}$) glede na lokaciji Pokljuka in Zgornja Radovna za zimo 2012/2013
5. izračun	interpolirane izotopske vrednosti za padavine ($\delta^{18}\text{O}$) glede na postaje Kredarica, Rateče in Zgornja Radovna za obdobje med letoma 01/2011 in 12/2012	interpolirane izotopske vrednosti za snežnico ($\delta^{18}\text{O}$) glede na lokaciji Pokljuka in Zgornja Radovna za zimo 2012/2013
6. izračun	interpolirane izotopske vrednosti za padavine ($\delta^{18}\text{O}$) na postajah Kredarica in Zgornja Radovna za obdobje 04/2010–03/2012	izotopske vrednosti za snežnico ($\delta^{18}\text{O}$) na lokaciji Zgornja Radovna za zimo 2012/2013
7. izračun	interpolirane izotopske vrednosti za padavine ($\delta^{18}\text{O}$) na postajah Kredarica in Zgornja Radovna za obdobje 04/2010–03/2012	izotopske vrednosti za snežnico ($\delta^{18}\text{O}$) na lokaciji Pokljuka za zimo 2012/2013

Za vsako od petih lokacij so bili narejeni izračuni za sedem različnih in najbolj verjetnih kombinacij vhodnih podatkov. Določeni izračuni (npr. 3. izračun) predstavljajo mejne vrednosti vhodnih parametrov, ker so deleži snežnice skoraj v celotnem časovnem nizu negativni, kar pomeni, da snežnica po takem izračunu ni prisotna v odtoku. Tak izračun je najmanj verjeten. Ostali izračuni

podajajo, če ne v celotnem časovnem nizu, pa vsaj v času taljenja snežnice, pozitivne deleže. Generalni pregled, čez vseh sedem izračunov in čez vseh pet lokacij, nam poda, da je največ snežnice v odtoku prisotne na lokaciji vodnjak (Preglednica 31), sledijo lokacije Gogalov rovt (Preglednica 32), Klemenak (Preglednica 33) ter Sr. Radovna (Preglednica 34) in na koncu lokacija izvir (Preglednica 35). Dodatno so ti razponi izrisani na škatlastem diagramu, kjer pa so upoštevani samo odstotki snežnice, ki so večji od nič (Grafikon 44). Ker natančnih vhodnih podatkov nimamo oziroma jih v naravi zelo težko izmerimo, posebno njihovo variabilnost, smo naredili analizo občutljivosti podatkov. Za analizo so bile za obe komponenti odtoka vzete mejne in srednje vrednosti. Največji vpliv na razpon odstotka snežnice v odtoku je v izračunih imel razpon vhodnih podatkov za staro vodo. Razpon maksimalnih vrednosti snežnice v odtoku je bil za obe mejni vrednosti za staro vodo (izračuna 2 in 3) na vseh lokacijah povprečno 26,8 % (Grafikon 44). To pomeni, da je npr. v odtoku maksimalen možen izračunani delež snežnice v vodnjaku med 37 % in 14 % (Preglednica 31). Če primerjamo še ostale izračune, brez prej omenjenih mejnih vrednosti (izračuna 2 in 3) za staro vodo, so odstopanja med vsemi izračunanimi maksimalnimi odstotki snežnice na vseh lokacijah med 10,2 % in 15,4 %. Te razlike v izračunih kažejo, da izračunani odstotki snežnice ne variirajo in so stabilni.

Izračuni za dvokomponentni mešalni model so pokazali, da je bil na vseh lokacijah manjši delež snežnice v letu 2012 kot v letu 2013. Ta rezultat je pričakovan glede na zelo različne podnebne značilnosti obeh let, saj je bilo leto 2011 in prva polovica 2012 zelo sušno (Grafikon 1), kasneje od aprila 2012 pa so bile padavine obilnejše.



Grafikon 44: Škatlasti diagram razpona deleža snežnice na lokacijah vodnjak, izvir, Gogalov rovt, Sr. Radovna in Klemenak

Chart 44: Box plot of snowmelt percentage range at the well, spring, Gogalov rovt, Sr. Radovna and Klemenak locations

Preglednica 31: Izračuni in razponi deleža snežnice na lokaciji vodnjak

Table 31: Calculations and ranges of the snowmelt percentage at the well location

Vodnjak	1. izračun	2. izračun	3. izračun	4. izračun	5. izračun	6. izračun	7. izračun
stara voda (‰)	-9,96	-9,20	-10,71	-10,12	-9,47	-9,96	-9,96
nova voda (‰)	-14,80	-14,80	-14,80	-14,80	-14,80	-14,64	-14,36
Delež snežnice v odtoku (%), n = 68							
Min.	-3,8	10,2	-22,8	-7,2	5,8	-3,9	-4,1
Povprečje	10,2	22,3	-6,3	7,3	18,5	10,6	11,2
Max.	27,4	37,2	14,1	25,0	34,1	28,4	30,2

Preglednica 32: Izračuni in razponi deleža snežnice na lokaciji Gogalov rovt

Table 32: Calculations and ranges of the snowmelt percentage at Gogalov rovt location

Gogalov rovt	1. izračun	2. izračun	3. izračun	4. izračun	5. izračun	6. izračun	7. izračun
stara voda (‰)	-9,96	-9,20	-10,71	-10,12	-9,47	-9,96	-9,96
nova voda (‰)	-14,80	-14,80	-14,80	-14,80	-14,80	-14,64	-14,36
Delež snežnice v odtoku (%), n = 70							
Min.	-7,6	6,8	-27,4	-11,2	2,3	-7,9	-8,4
Povprečje	3,4	16,4	-14,3	0,2	12,3	3,5	3,8
Max.	11,1	23,1	-5,2	8,2	19,3	11,5	12,2

Preglednica 33: Izračuni in razponi deleža snežnice na lokaciji Klemenak

Table 33: Calculations and ranges of the snowmelt percentage at Klemenak location

Klemenak	1. izračun	2. izračun	3. izračun	4. izračun	5. izračun	6. izračun	7. izračun
stara voda (‰)	-9,96	-9,20	-10,71	-10,12	-9,47	-9,96	-9,96
nova voda (‰)	-14,80	-14,80	-14,80	-14,80	-14,80	-14,64	-14,36
Delež snežnice v odtoku (%), n = 89							
Min.	-9,5	5,2	-29,7	-13,1	0,5	-9,9	-10,5
Povprečje	3,8	16,7	-13,8	0,7	12,7	4,0	4,3
Max.	17,9	29,0	2,8	15,2	25,5	18,6	19,8

Preglednica 34: Izračuni in razponi deleža snežnice na lokaciji Sr. Radovna

Table 34: Calculations and ranges of the snowmelt percentage at Sr. Radovna location

Sr. Radovna	1. izračun	2. izračun	3. izračun	4. izračun	5. izračun	6. izračun	7. izračun
stara voda (‰)	-9,96	-9,20	-10,71	-10,12	-9,47	-9,96	-9,96
nova voda (‰)	-14,80	-14,80	-14,80	-14,80	-14,80	-14,64	-14,36
Delež snežnice v odtoku (%), n = 71							
Min.	-39,7	-20,9	-65,4	-44,3	-26,9	-41,1	-43,7
Povprečje	-9,9	4,9	-30,1	-13,5	0,2	-10,2	-10,9
Max.	16,7	27,9	1,4	13,9	24,3	17,3	18,4

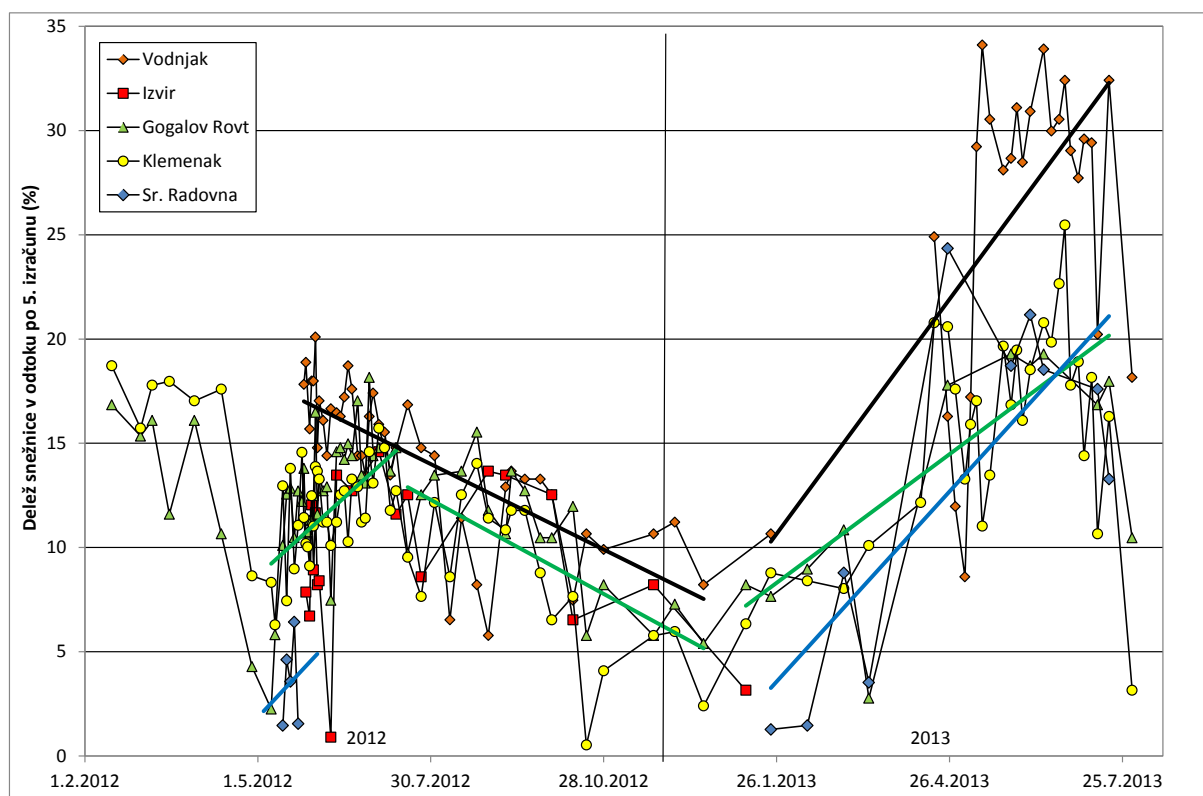
Preglednica 35: Izračuni in razponi deleža snežnice na lokaciji izvir

Table 35: Calculations and ranges of the snowmelt percentage at the spring location

Izvir	1. izračun	2. izračun	3. izračun	4. izračun	5. izračun	6. izračun	7. izračun
stara voda (‰)	-9,96	-9,20	-10,71	-10,12	-9,47	-9,96	-9,96
nova voda (‰)	-14,80	-14,80	-14,80	-14,80	-14,80	-14,64	-14,36
Delež snežnice v odtoku (%), n = 20							
Min.	-9,1	5,5	-29,2	-12,7	0,9	-9,4	-10,1
Povprečje	0,7	14,0	-17,6	-2,6	9,8	0,7	0,7
Max.	5,9	18,6	-11,3	2,9	14,6	6,2	6,6

6.10.2.1 Časovna spremenljivost deleža snežnice

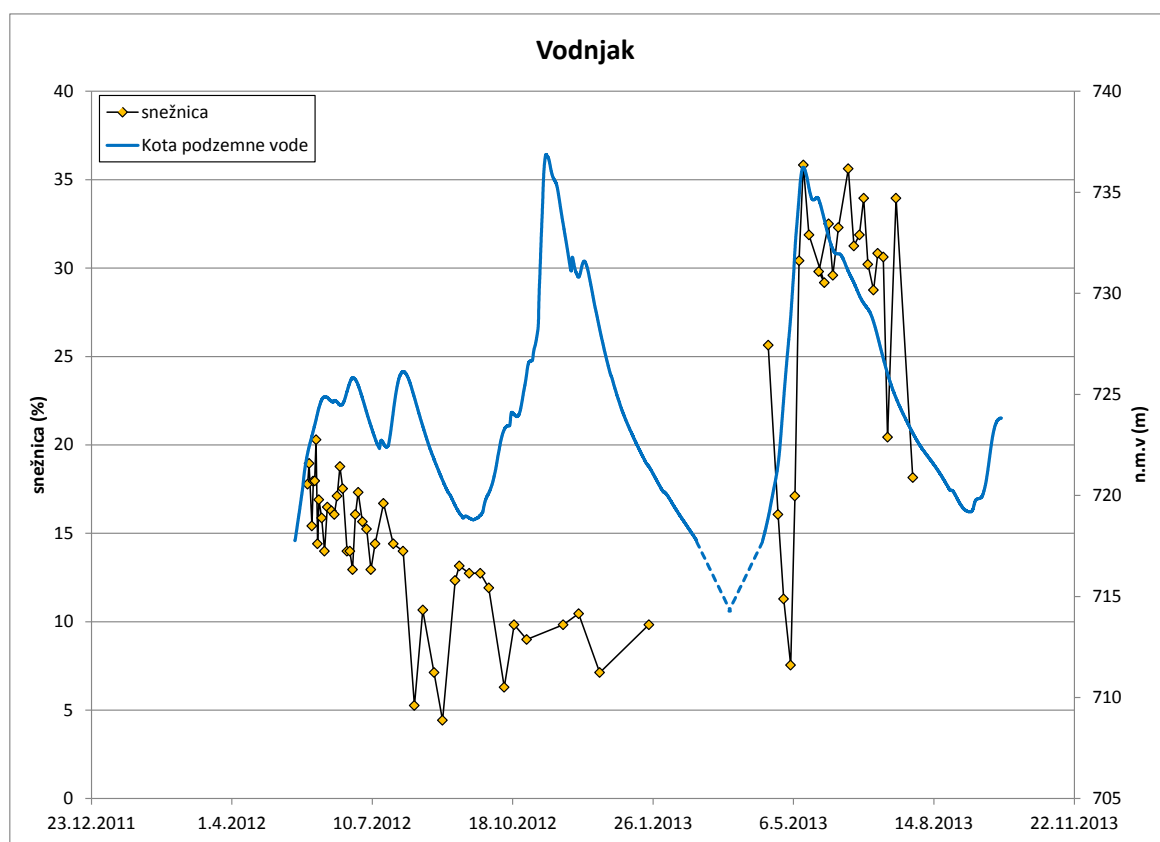
V tem poglavju je natančneje opisana po 5. izračunu primerjava spreminjanja delež snežnice v odtoku med lokacijami skozi celo obdobje vzorčenja (Preglednica 30, Preglednica 36 in Grafikon 45). Pri petem izračunu so uporabljene interpolirane vrednosti izotopske sestave kisika za povprečno napajalno nadmorsko višino reke Radovne (1640 m) za staro vodo za obdobje 01/2011–12/2012 glede na postaje Kredarica, Rateče in Zgornja Radovna ter za novo vodo za zimo 2012/2013 glede na lokaciji Zgornja Radovna in Pokljuka. Glede na vhodne podatke ta izračun predstavlja najbolj reprezentativen rezultat izračuna deleža snežnice v odtoku na izbranih lokacijah.



Grafikon 45: Časovna spremenljivost deleža snežnice v odtoku na vseh vzorčenih lokacijah

Chart 45: Temporal variability of snowmelt percentage in discharge at all sampling locations

Po pregledu vseh izračunov za vse lokacije lahko po deležu snežnice in po obliki krivulje pretoka sklepamo, da je vpliv taljenja snega v vodi za leto 2012 viden vse do sredine septembra, v letu 2013 pa vse do konca julija, ko se je vzorčenje zaključilo. Pri izračunih je bil na vseh lokacijah, razen v Sr. Radovni, skozi celotno obdobje vzorčenja prisoten določen delež snežnice, vendar je bil manjši kot 10 % in dokaj konstanten. To je zato, ker smo za staro vodo oziroma za vodo v vodonosniku vzeli podatek o izotopski sestavi padavin, kar je samo najboljši približek. Dejansko je voda v vodonosniku v Radovni zmes dveh komponent, padavin in snežnice, le da se delež snežnice skozi leto spreminja in je v jesenskem in zimskem času minimalen oziroma pod 10 %.



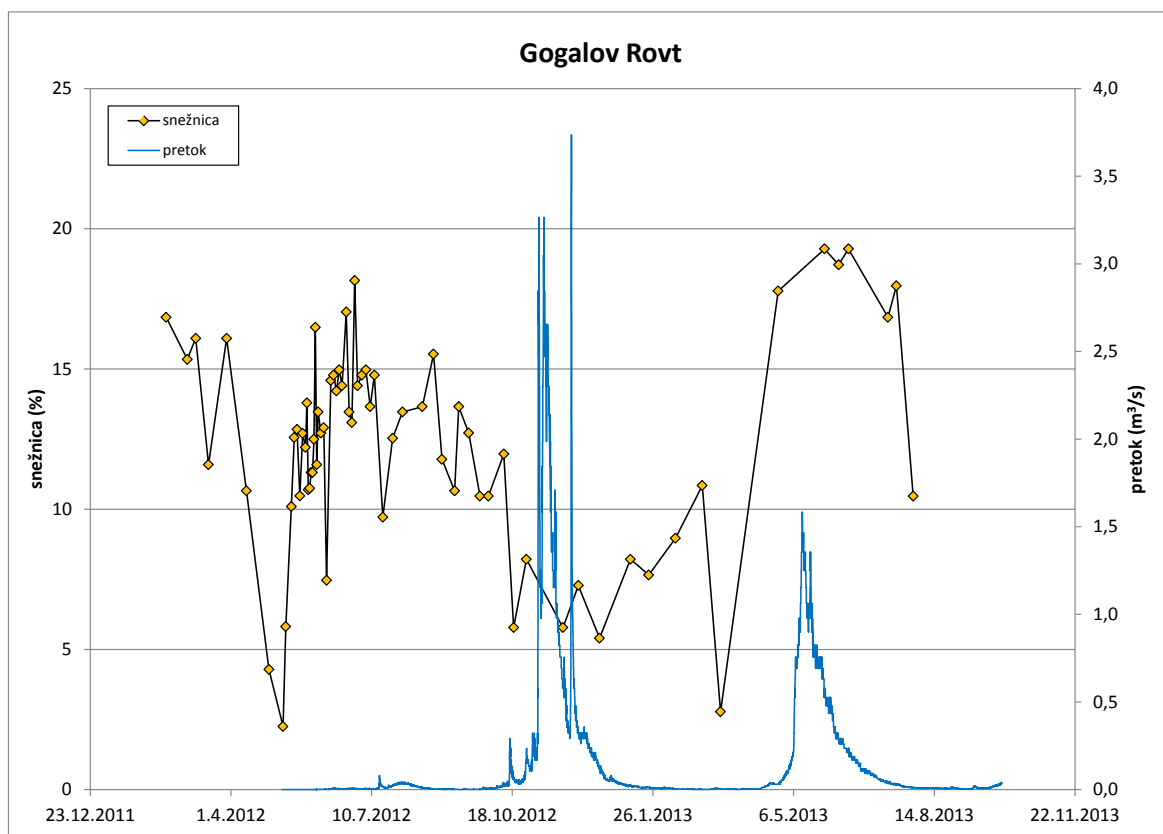
Grafikon 46: Delež snežnice v primerjavi s koto podzemne vode v vodnjaku

Chart 46: Snowmelt percentage in comparison with groundwater level in the well

V letu 2012 se je zaradi vpliva suše v vodnjaku voda pojavila šele v sredini maja, zato je bil prvi vzorec vzet 25.5.2012, ko se je vpliv taljenja snega na ostalih lokacijah že zaznal. Na lokaciji vodnjak je bil maksimalen delež snežnice za leto 2012 dosežen konec maja (31.5.2012) z 20,1 %. Po koncu maja 2012 je delež malenkost upadel in nato ponovno v sredini junija narasel na 18,7 % (17. 6. 2012). Od takrat naprej je delež snežnice samo še upadal do začetka oktobra (1.10.2012), ko se je ustabil med 7,5 % in 11 %. V letu 2013 je bilo zaradi obilnejših padavin ter posledično več snega v visokogorju vodo v vodnjaku zaznati že v sredini aprila, dober mesec prej kot leta 2012. Prav tako je bil v letu 2013 delež snežnice za skoraj polovico večji kot leto prej. Maksimalen delež snežnice je bil zabeležen

dvakrat, 34,1 %, sredi maja (13.5.2013), in 32,4 % sredina julija (18.7.2013). Leta 2012 je bil povprečni delež snežnice v vodnjaku v obdobju taljenja snega 15,0 %, v letu 2013 pa 26,4 %. Primerjava deleža snežnice in kote podzemne vode v vodnjaku podaja Grafikon 46. Naraščanje deleža snežnice v vodi v primerjavi z naraščanjem višine podzemne vode v času taljenja snega je sočasno.

Na izviru smo vodo vzorčili samo v letu 2012 (Preglednica 36). V tem letu je bilo največ snežnice v odtoku v začetku julija, 14,6 % (3.7.2012), in se je njen vpliv poznal vse do začetka oktobra (Grafikon 45). Deleži snežnice so bili nižji od deležev v vodnjaku in primerljivi z deleži na lokaciji Gogalov rovt in Klemenak, vendar je dinamika malenkost drugačna kot na prej omenjenih lokacijah. Drugačna dinamika deleža snežnice je lahko zaradi vpliva dotokov vod z boka, zaradi padavin, ki imajo večji vpliv, ker je v strugi prisotne manj vode, ter zaradi vpliva izhlapevanja.



Grafikon 47: Delež snežnice v primerjavi s pretokom na lokaciji Gogalov rovt

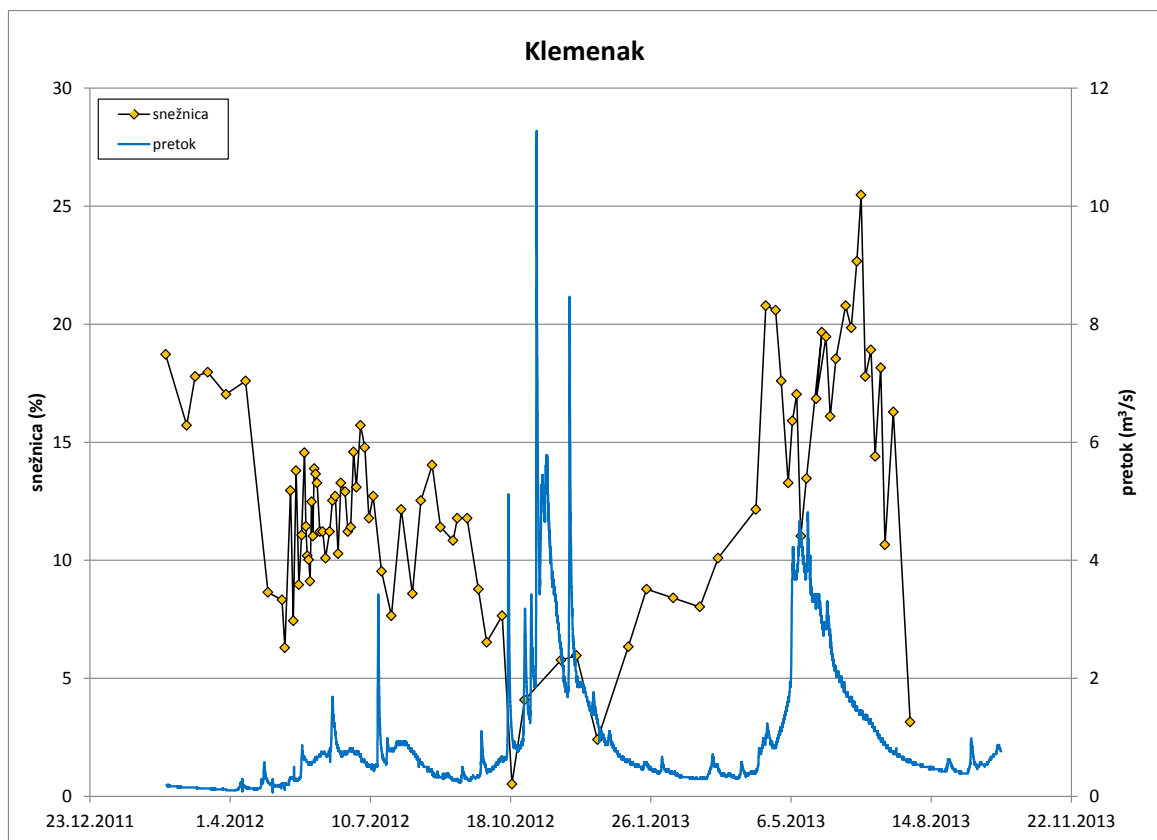
Chart 47: Snowmelt percentage in comparison with discharge at the location Gogalov rovt

Na lokaciji Gogalov rovt je bil maksimalen delež snežnice leta 2012 konec junija (28.6.2012) z 18,2 %. Vpliv taljenja snega je bilo opaziti od sredine maja in vse do sredine septembra. Tudi na tej lokaciji je bilo v letu 2013 zaznati večji delež snežnice v odtoku, vendar je razlika manjša kot na lokaciji vodnjak. Povprečni delež snežnice v obdobju taljenja v letu 2012 je bil 13,2 % in v letu 2013 17,2 %. V vmesnem, deževnem obdobju je bil povprečni delež snežnice v odtoku 7,1 %. Maksimalne

vrednosti, 19,3 %, so bile v letu 2013 zabeležene med koncem maja (28.5.2013) in sredino junija (14.6.2012). Vpliv snežnice je bil viden vse do konca vzorčenja (30.7.2013), vendar je delež snežnice na zadnjem vzorčenju drastično padel. Delež snežnice v odtoku je naraščal s količino vode v strugi (Grafikon 47). Presenetljivo je 5. izračun, in pa tudi vsi ostali, pokazal, da je bil delež snežnice v obdobju od februarja do konca marca 2012 na lokaciji Gogalov rovt dokaj visok. To je lahko zaradi stare vode, ki ima bolj negativno izotopsko sestavo, zaradi preteklih meteoroloških stanj ali zaradi zelo nizke gladine podzemne vode in posledično iztekanja vode iz vodonosnika, ki je bogata s snežnico.

Na lokaciji Sr. Radovna so razmere nekoliko drugačne, saj je pretok sicer skozi celo leto prisoten, vendar je količina pretoka zelo majhna in je voda posledično zelo podvržena padavinam ter izhlapevanju, kar je opaziti tudi na diagramu $\delta^{18}\text{O}$ in $\delta^2\text{H}$ (Grafikon 24). Poleg tega napajalno območje tega pritoka sega na območje Pokljuke, ki ima nižje nadmorske višine in posledično manj negativno izotopsko sestavo kisika. Po 5. izračunu so tako deleži snežnice dokaj nizki ali celo negativni (Preglednica 36), kar pomeni, da v odtoku ni prisotne snežnice. Iz tega sklepamo, da izračun vrednosti za staro vodo za to lokacijo ni najustreznejši. Kljub temu lahko v tem izračunu opazimo, da je bila na začetku in na koncu vzorčenja v odtoku prisotna snežnica, v letu 2013 celo do 24,3 %. Maksimalni deleži snežnice so bili v letu 2012 prisotni na začetku vzorčenja na vseh lokacijah, kar je nenavadno, vendar so te vrednosti lahko odraz predhodnih meteoroloških stanj, tako kot je bilo opaženo tudi na lokaciji Gogalov rovt. V obdobju taljenja snega je snežnica po 5. izračunu negativna, kar je lahko odraz sušnih razmer v letih 2011 in 2012 ali odraz nepravilnih vhodnih podatkov. Ker je povprečno napajano območje toliko nižje, je količina zapadlega in kasneje taljenega snega manjša, zato je lahko to vzrok, da na odtoku snežnice ni bilo zaznati. Vpliv snežnice se je zaznal šele konec aprila (25.4.2013) in je bil viden vse do konca vzorčenja.

Na lokaciji Klemenak so bili tako kot v Sr. Radovni in v Gogalovem rovtu na začetku vzorčenja v obdobju med februarjem in sredino aprila prisotni visoki deleži snežnice. Deleži so se v začetku povzpeli celo do 18,7 %. Ker v tem obdobju v odtoku še ni bila prisotna snežnica, kar lahko vidimo tudi iz primerjave s pretokom (Grafikon 48), lahko tak delež pripišemo drugačni sestavi stare vode, kar je posledica preteklih meteoroloških stanj. V obdobju taljenja snega je bil na lokaciji Klemenak maksimalni delež snežnice v letu 2012 v začetku julija (3.7.2012) s 15,7 % ter konec avgusta s 14,0 % (23.8.2012). Vpliv taljenja snežnice se je poznal do sredine septembra (17.9.2012), z deležem 11,8 %. V deževnem obdobju so bili deleži snežnice pod 10 %, s povprečno vrednostjo 5,6 %. Povprečna vrednost deleža snežnice v obdobju taljenja za leto 2012 je bila 11,5 % in za leto 2013 17,0 %. V letu 2013 je bilo začetek taljenja snega zaznati v prvi polovici aprila (11.4.2012) z 12,2 %. Snežnica je maksimalen delež dosegla konec junija (25.6.2013) s 25,5 %. Snežnico je bilo v odtoku zaznati vse do konca vzorčenja, ko je vrednost drastično padla. Delež snežnice v odtoku je naraščal sočasno z naraščanjem pretoka v strugi (Grafikon 48).



Grafikon 48: Delež snežnice v primerjavi s pretokom na lokaciji Klemenak

Chart 48: Snowmelt percentage in comparison with discharge at the location Klemenak

Preglednica 36: Delež snežnice v odtoku na vseh lokacijah po 5. izračunu

Table 36: Snowmelt percentage in discharge at all sampling locations by fifth calculation

Datum	Vodnjak	Izvir	Gogalov rovt	Sr. Radovna	Klemenak
15.2.2012			16,8	13,7	18,7
1.3.2012			15,3	11,2	15,7
7.3.2012			16,1	13,3	17,8
16.3.2012			11,6	13,7	18,0
29.3.2012			16,1	11,2	17,0
12.4.2012			10,7	8,6	17,6
28.4.2012			4,3	-10,5	8,6
8.5.2012			2,3	-2,6	8,3
10.5.2012			5,8	-1,4	6,3
14.5.2012			10,1	1,5	13,0
16.5.2012			12,6	4,6	7,4
18.5.2012			12,8	3,6	13,8
20.5.2012			10,5	6,4	9,0
22.5.2012			12,7	1,5	11,1
24.5.2012			12,2	-2,3	14,6
25.5.2012	17,8		13,8	-5,7	11,4
26.5.2012	18,9	7,9	10,7	-1,7	10,2
27.5.2012			10,7	-2,0	10,0
28.5.2012	15,7	6,7	11,3	-2,0	9,1
29.5.2012	18,0	12,0	11,3	-0,2	12,5
30.5.2012	18,0	8,9	12,5	0,2	11,0
31.5.2012	20,1	11,7	16,5	2,6	13,9
1.6.2012	14,8	8,2	11,6	2,6	13,7

2.6.2012	17,0	8,4	13,5	-1,0	13,3
4.6.2012	16,1		12,7	-1,0	11,2
6.6.2012	14,4		12,9	-0,6	11,2
8.6.2012	16,7	0,9	7,5	0,5	10,1
11.6.2012	16,5	13,5	14,6	-2,3	11,2
13.6.2012	16,3		14,8	-6,0	12,5
15.6.2012	17,2		14,2	-8,3	12,7
17.6.2012	18,7		15,0	-7,5	10,3
19.6.2012	17,6	12,7	14,4	-3,8	13,3
22.6.2012	14,4		17,0	-1,7	12,9
24.6.2012	14,4		13,5	-2,5	11,2
26.6.2012	13,5		13,1	-2,1	11,4
28.6.2012	16,3		18,2	0,7	14,6
30.6.2012	17,4		14,4	3,0	13,1
3.7.2012	15,9	14,6	14,8	-1,2	15,7
6.7.2012	15,5		15,0	2,4	14,8
9.7.2012	13,5		13,7	4,1	11,8
12.7.2012	14,8	11,6	14,8	0,7	12,7
18.7.2012	16,8	12,5	9,7	-17,1	9,5
25.7.2012	14,8	8,6	12,5	-13,4	7,7
1.8.2012	14,4		13,5	-6,6	12,2
9.8.2012	6,5			-16,4	8,6
15.8.2012	11,4		13,7	-14,5	12,5
23.8.2012	8,2		15,5	7,3	14,0
29.8.2012	5,8	13,7	11,8	0,3	11,4
7.9.2012	12,9	13,5	10,7	1,1	10,8
10.9.2012	13,7		13,7	5,0	11,8
17.9.2012	13,3		12,7	-2,5	11,8
25.9.2012	13,3		10,5	-1,2	8,8
1.10.2012	12,5	12,5	10,5	-17,3	6,5
12.10.2012	7,5	6,5	12,0	-8,5	7,7
19.10.2012	10,7		5,8	-26,5	0,5
28.10.2012	9,9		8,2	-26,9	4,1
23.11.2012	10,7	8,2	5,8	-9,8	5,8
4.12.2012	11,2		7,3	-7,2	6,0
19.12.2012	8,2		5,4	-9,6	2,4
10.1.2013	10,7	3,2	8,2	-1,0	6,3
23.1.2013			7,7	1,3	8,8
11.2.2013			9,0	1,5	8,4
2.3.2013			10,8	8,8	8,0
15.3.2013			2,8	3,5	10,1
11.4.2013					12,2
18.4.2013	24,9				20,8
25.4.2013	16,3		17,8	24,3	20,6
29.4.2013	12,0				17,6
4.5.2013	8,6				13,3
7.5.2013	17,2				15,9
10.5.2013	29,2				17,0
13.5.2013	34,1				11,0
17.5.2013	30,5				13,5
24.5.2013	28,1				19,7
28.5.2013	28,7		19,3	18,7	16,8
31.5.2013	31,1				19,5
3.6.2013	28,5				16,1
7.6.2013	30,9		18,7	21,2	18,5
14.6.2013	33,9		19,3	18,5	20,8
18.6.2013	30,0				19,8
22.6.2013	30,5				22,7

25.6.2013	32,4				25,5
28.6.2013	29,0				17,8
2.7.2013	27,7				18,9
5.7.2013	29,6				14,4
9.7.2013	29,4				18,2
12.7.2013	20,2		16,8	17,6	10,7
18.7.2013	32,4		18,0	13,3	16,3
30.7.2013	18,2		10,5	11,2	3,2

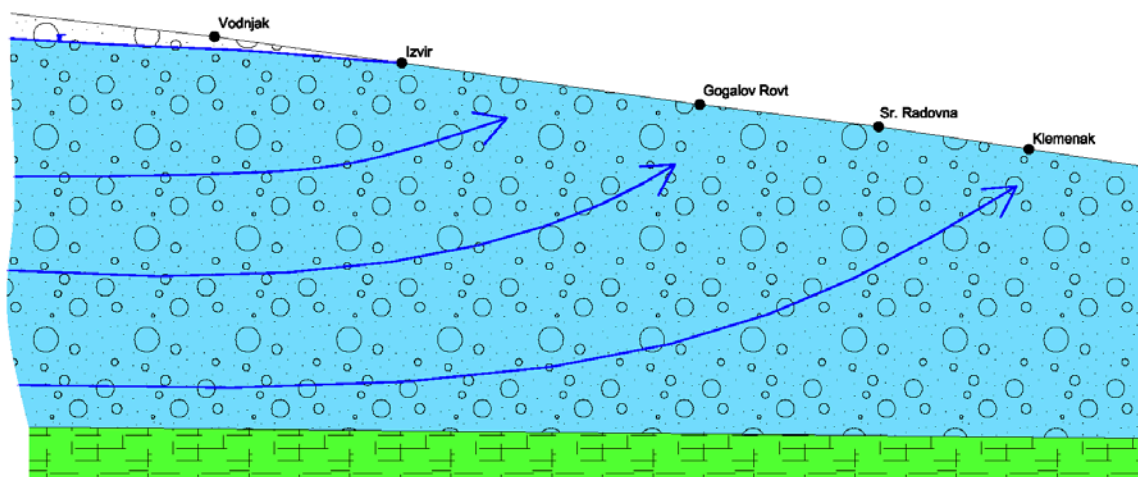
Določitev komponent, kot sta stara voda in nova voda, je dokaj kompleksna. Predvsem sta potrebna velik poudarek in premislek za določitev vhodnih komponent, ki vplivajo na končni rezultat. Znano je, da vrednosti $\delta^{18}\text{O}$ za snežnico variirajo zaradi več razlogov: zapadli sneg največkrat pade v obliki več različnih dogodkov, procesi, kot so taljenje, evaporacija, veter, ki se dogajajo v času, ko sneg že zapade, lahko vplivajo na spremembo izotopske sestave $\delta^{18}\text{O}$ v preostali snežni odeji (He et al., 2006). Izotopska sestava stare vode bi se morala določiti v času, ko je v strugi prisoten samo bazni tok. Sicer so raziskave pokazale, da je plitka podzemna voda lahko slabše premešana (McCallum et al., 2010), kar lahko nato vodi v izračun prevelikega deleža stare vode. V primeru Radovne določevanje enotne izotopske sestave stare vode v času baznega toka ni bila izvedljivo, ker so si bile vrednosti v času nizkih vod v letih 2012 in 2013 med seboj zelo različne.

Grafikon 45 je bil razdeljen na posamezna obdobja naraščanja in upadanja deleža snežnice, za katere so bile izračunane trendne linije, ločeno za vodnjak (črna premica), Sr. Radovno (modra premica) ter skupaj za lokacije izvir, Gogalov rovt in Klemenak (zelena premica). Trendne linije prikažejo, kako hitro je delež snežnice naraščal ali upadal. Za prvi del vzorčenja, od februarja do maja, niso bile izrisane trendne linije, ker ta obdobje ne predstavlja obdobje naraščanja in upadanja snežnice. V maju 2012 začnejo deleži snežnice naraščati, na lokaciji Sr. Radovna 2,9 %/mesec vzorčenja ter na ostalih lokacijah povprečno 2,5 %/mesec. V vodnjaku je bil prvič vzorec vzet konec maja 2012 (25.5.2012) in generalno gledano od takrat naprej deleži snežnice upadajo za povprečno 1,4 %/mesec. Prav tako so od sredine julija (18.7.2012) deleži snežnice upadli na vseh ostalih lokacijah za povprečno 1,5 %/mesec. Leta 2013 je delež snežnice generalno gledano naraščal vse do zadnjega dne vzorčenja, ko je na vseh lokacija ta zelo upadel. Snežnica je najhitreje naraščala v vodnjaku 3,8 %/mesec, potem v Sr. Radovni 3,0 %/mesec in na ostalih lokacijah 2,1 %/mesec.

Izračunani deleži snežnice so potrdili predviden konceptualni model stratifikacije podzemne vode (Slika 43), kjer podzemna voda z višje ležečega napajalnega območja teče proti nižje ležečemu izviru. Konceptualni model domneva, da je v vodnjaku, ki je gorvodna lokacija, prisotno več snežnice, ker se napaja iz zgornjega dela vodonosnika, kjer je prisoten večji delež snežnice kot na dolvodni lokaciji Klemenak, ki se napaja iz globljega dela vodonosnika, ki vsebuje manjši delež snežnice. Zaradi taljenega snega se gladina podzemne vode dvigne in posledično se poveča tok podzemne vode zaradi

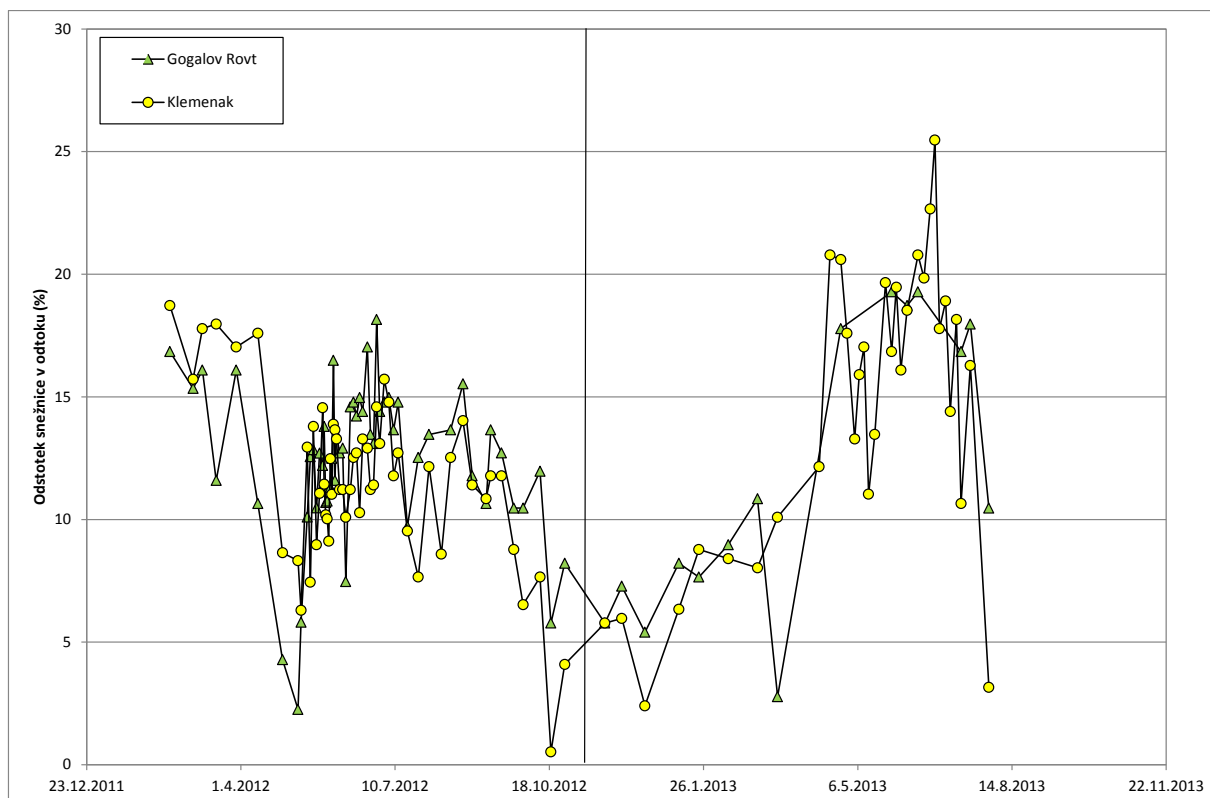
dveh dejstev: (1) povečanja gradienta toka zaradi povečanega naklona gladine podzemne vode in (2) povečanja transmisivnosti zaradi dodatnih omočenih delov sedimenta (Rodhe, 1998).

Razlika v maksimalnem deležu snežnice med gorvodno lokacijo vodnjak in dolvodno Klemenak je bila 10 %. Pričakovano je bilo, da bo dolvodno od lokacije do lokacije delež snežnice samo še upadal, kar je generalno gledano res, vendar je prihajalo do manjših odstopanj med lokacijama Gogalov rovt in Klemenak. Deleži snežnice so bili občasno višji na lokaciji Gogalov rovt, občasno pa na lokaciji Klemenak (Grafikon 49). V času nizkih vod, ko je bil v strugi prisoten samo bazni tok, je bil izračunani delež snežnice od 1 do 5 % višji na lokaciji Gogalov rovt, kar potrjuje model, da višje ležeče lokacije drenirajo vodo z višjih delov vodonosnika, ki vsebuje več snežnice. V času visokih vod pa so bili deleži snežnice na začetku vzorčenja in do konca maja 2012 višji na lokaciji Klemenak. To je posledica dotokov vode z boka, kar dokazuje lokacija Sr. Radovna. Ta lokacija je imela v odtoku prisotno snežnico samo do 22.5.2012, ravno po tem datumu pa so bili na lokaciji Gogalov rovt prisotni višji deleži kot na lokaciji Klemenak. Do konca septembra 2012, ko smo zaznali vpliv taljenja snega in je bil delež snežnice v odtoku nad 10 %, je bil ta višji na lokaciji Gogalov rovt. Višji deleži snežnice na lokaciji Gogalov rovt so ostali vse do začetka taljenja snega v letu 2013. V času taljenja snega leta 2013 so bili deleži snežnice na Klemenaku višji, kar je posledica doprinosa vode z bokov, ki so vsebovali visok delež snežnice.



Slika 43: Konceptualni model stratifikacije podzemne vode

Figure 43: The conceptual model of the groundwater stratification



Grafikon 49: Primerjava deleža snežnice v odtoku na lokacijah Gogalov rovt in Klemenak

Chart 49: Comparison of snowmelt percentage and discharge at the locations Gogalov rovt and Klemenak

6.10.2.2 Negotovost modela

Negotovost dvokomponentnega mešalnega modela je bila izračunana na podlagi enačbe (21) za primer 5. izračuna. Za analitsko napako je bila za vse tri komponente (stara voda, nova voda in voda v reki) izbrana standardna deviacija izotopskih vrednosti za posamezno komponento. Negotovosti (Preglednica 37) izračunanega deleža stare in nove vode so čim manjše, tem večja je razlika med izotopsko sestavo stare in nove vode. V našem primeru je ta razlika ($C_e - C_p$) 5,3 %. Po izračunu je največja negotovost za dvokomponentni mešalni model na lokaciji Sr. Radovna (0,11 %), sledi ji lokacija vodnjak (0,09 %) ter nato še preostale tri lokacije Klemenak, izvir in Gogalov rovt s približno enako negotovostjo (0,06 % ter 0,05 %). Izračunane negotovosti so dobre in se ujemajo s petimi krivuljami (Grafikon 3), ki so dobljene z enačbo (21) in temeljijo na 95-odstotnem intervalu zaupanja, kar je glede na dosedanje raziskave sprejemljivo (Genereux, 1998).

Preglednica 37: Izračunane negotovosti modela za primer separacije hidrograma na staro in novo vodo z izotopsko sestavo $\delta^{18}\text{O}$

Table 37: Calculated uncertainties for hydrograph separation of event and pre-event water with isotopic composition of $\delta^{18}\text{O}$

Lokacija	Negotovost modela (%)
vodnjak	0,09
izvir	0,05
Gogalov rovt	0,05
Sr. Radovna	0,11
Klemenak	0,06

6.11 Reinterpretacija izlivnih izvirov

Izvir reke Radovne predstavlja izlivni pronicajoči izvir, ki izvira iz sedimentov. Taki izviri izvirajo iz odprtih vodonosnikov, v katerih gladina podzemne vode prosto niha. Poleg tega je reka Radovna še reka, ki se prevladujoče napaja s podzemno vodo, zato tudi pretok v reki niha tako časovno kot tudi prostorsko. Vodonosnik se napaja s padavinami in snežnico, zato nivo gladine podzemne vode v letu niha. Ker se reka napaja s podzemno vodo in ne obratno, se pretok dolvodno tudi povečuje. Iz raziskav, ki so bile opravljene v okviru doktorske disertacije, lahko povzamemo, da izviri, ki se nahajajo v odprtih vodonosnikih, ki so dobroprepustni in v katerih gladina podzemne vode zelo niha zaradi pomladnega taljenja snega in obilnih jesenskih padavin in kjer podzemna voda predstavlja prevladujoči vir napajanja, nimajo stalne lokacije izviranja. Če so izpolnjeni naštetih pogoji, potem izvir nima stalne lokacije in seljenje takega izlivnega izvira predstavlja nihanje in direktno stanje gladine podzemne vode v medzrnskem vodonosniku, ki ga lahko opazujemo v naravi.

7 ZAKLJUČKI

Za analizo iztoka podzemne vode na izviri v fluvioglacialnih medzrnskih vodonosnikih je bil na območju izvira reke Radovne zasnovan večletni program merjenja gladine podzemne vode, pretoka vode v reki ter vzorčenja vode. Poleg tega so bili v doktorski disertaciji obdelani kemijski in izotopski podatki za obdobje dveh let za celotno dolino reke Radovne. H glavnemu vprašanju, ki se ukvarja z analizo iztoka podzemne vode na izviri ter z razdelitvijo vode na posamezne komponente, smo pristopili celostno. Poskušali smo zajeti, upoštevati ter določiti čim več različnih komponent, ki vplivajo na porazdelitev podzemne in površinske vode v fluvioglacialnih nanosih v dolini, ki tvorijo medzrnski vodonosnik, ter na porazdelitev vode v karbonatnih kamninah v zaledju, ki tvorijo kraško-raspoklinske vodonosnike.

Postavljen je bil konceptualni hidrogeološki model reke Radovne, ki opisuje stik dveh vodonosnikov, ki imata pomembno vlogo pri napajanju reke Radovne in njenih kraških pritokov. V dolini, ki je zapolnjena s fluvioglacialnimi sedimenti, je medzrnski vodonosnik, v zaledju pa je kraški vodonosnik. Znanje o geometriji in raztezanju vodonosnika je tako pomembno za preučevanje hidrogeologije in vodne bilance določenega območja. Najnatančneje lahko globino vodonosnika določimo z obstoječimi vrtinami ali z novimi vrtinami. Ker v našem primeru to ni bilo mogoče zaradi finančnih omejitev ter zaradi same lokacije, ki se nahaja v Triglavskem narodnem parku, te tradicionalne metode niso prišle v poštev. Za dodatna znanja o morfologiji doline in razsežnosti vodonosnika je bila uporabljena neinvazivna geofizikalna metoda refleksijske seizmike. S to metodo je bil posnet prečni profil, ki nam je kljub slabši kakovosti podatkov in nujno potrebni alternativni obdelavi podatkov podal zelo pomembne podatke o geometriji vodonosnika in o debelini sedimentov v dolini. Dobili smo vpogled v morfologijo predkvartarne podlage z največjo globino 141 m pod površjem, ki je na južnem pobočju strmejša kot na severnem pobočju, kar tudi ustreza obliki obeh pobočij nad površino sedimenta.

Nihanje gladine podzemne vode v vodnjaku je zelo dinamično, kar se sočasno odraža tudi v spreminjanju lokacije izvira po dolini gor in dol. V vodnjaku je bilo zabeleženo nihanje za 28,6 m, istočasno se je izvir po dolini premikal za 2 km. Glede na to ugotovitev je vodonosnik zelo dobro prepusten. Za določanje gladine podzemne vode v zaledju izvira Radovne je bil uporabljen nizkofrekvenčni georadar, ki se je izkazal za uporabno metodo. Kljub neugodnim razmeram za meritve z georadarjem, kot so neravna tla, ki so povzročila slab stik antene in sprejemnika s tlemi, so rezultati zadovoljivi. Kljub temu da ni bilo mogoče zelo natančno določiti oblike gladine podzemne vode, so podatki podali vpogled v vodonosnik, kjer smo lahko s pomočjo vzdolžnega profila in vodnjaka izračunali gradient podzemne vode, ki znaša 0,0058. Z georadarjem je bilo tudi določeno večje napajanje s poključke strani.

Za izboljšanje znanja o hidrogeoloških procesih na prej omenjenem stiku dveh različnih vodonosnikov ter posledično tudi za izboljšanje znanja o napajalnem zaledju reke Radovne ter za boljše gospodarjenje z vodami so bili obdelani kemijski in izotopski podatki za vzorce v reki, na izvirih ter v vrtini. Vsi odvzeti vzorci imajo enak $\text{Ca}^{2+}\text{-HCO}_3^-$ vodni facies, kjer kot kationa prevladujeta Ca^{2+} in Mg^{2+} ter kot anion HCO_3^- . Analiza glavnih ionov in pH odraža, da je voda alkalna, kjer v zaledju prevladuje karbonatno preperevanje. Razmerje $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ v treh izvirih (Z-1, ZM-1 in L-1) nakazuje, da se voda napaja iz območja, kjer prevladujejo apnenci. Kemijska sestava vode se spreminja z letnimi časi, kar kaže na pozitivno korelacijo med maksimalnimi koncentracijami in nizkimi pretoki ter med minimalnimi koncentracijami in visokimi pretoki. Prostorska spremenljivost kemijske sestave vode dolvodno je posledica različne litologije in različne gozdnatosti terena, kar posledično vpliva na različne vsebnosti ogljikove kisline. Koncentracija glavnih ionov se v dolvodni smeri spreminja zaradi vpliva dotokov iz treh kraških izvirov (Z-1, ZM-1 in L-1), ki imajo višje koncentracije ionov.

Tako kemijski kot tudi izotopski podatki potrjujejo, da je Radovna reka s prevladujočim napajanjem iz podzemne vode. Glede na izotopske podatke kisika je povprečna napajalna višina območja reke Radovne ocenjena na 1640 m. Sezonska nihanja izotopskih podatkov kisika in vodika so odvisna od snežnice in padavin. Povprečni napajalni čas za celotno območje reke Radovne je ocenjen na 2,4 leta in za kraške izvire med 0,7 in 1,2 leta. Na izotopske vrednosti $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ vplivajo naslednji procesi: raztapljanje karbonatov, razgradnja organskih snovi ter izmenjava z atmosferskim CO_2 . Na izotopske vrednosti $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ dolvodno v reki imajo vpliv kraški izviri, ki imajo bolj negativne vrednosti. Rezultati vrednosti $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ se sezonsko spreminjajo z nižjimi vrednostmi pozimi ter višjimi vrednostmi poleti. Vse kemijske in izotopske raziskave kažejo, da sta koncentracija ionov in izotopska sestava dolvodno v veliki meri odvisni od volumna odtoka na kraških izvirih.

Izotopska razdelitev hidrograma je bila narejena z dvokomponentnim mešalnim modelom, kjer sta bili za vhodna parametra vzeti stara voda, ki se nahaja v vodonosniku, ter nova voda, ki vstopa v sistem, snežnica. Delež snežnice v odtoku se spreminja časovno in prostorsko. Razlika v deležu snežnice je prisotna med letoma 2012 in 2013, kar pripisujemo podnebnim razmeram. Obdobje med 2011 in 2012 je bilo izredno sušno. Trendi kažejo, da je v letu 2012 delež snežnice naraščal med 2,5 in 2,9 %/mesec ter upadal med 1,4 in 1,5 %/mesec, v letu 2013 pa je bil prirastek deleža snežnice med 2,1 in 3,8 %/mesec. Največji deleži snežnice so bili izračunani na lokaciji vodnjak, najmanjši pa na lokaciji izvir in Sr. Radovna. Delež snežnice v odtoku predstavlja pomembno komponento v pretoku reke Radovne, saj po izračunih predstavlja vsaj eno tretjino vode v odtoku.

Rezultati na ožjem območju izvira Radovne so pokazali, da je iztok vode na izviru zelo dinamičen in da je odvisen od podnebnih značilnosti, saj sta obravnavani leti 2012 in 2013 med seboj zelo različni. Prav tako so rezultati pokazali, da so dolgoletne meritve zelo pomembne, saj se s tem vhodni podatki

homogenizirajo in tako dobimo vpogled, kakšne so razlike in razponi podatkov med povprečnimi in ekstremnimi leti. Sistem napajanja reke Radovne se je izkazal za zelo kompleksnega, saj je napajanje v celoti odvisno od količine zapadlega snega in jesenskega deževja.

Z raziskavami smo izboljšali poznavanje procesov na prehodu iz podzemne vode v izvir, ki leži na fluvioglacialnih sedimentih, in od tod v površinski vodotok. Raziskave so prispevale tudi k boljšemu poznavanju dinamike aluvialnih izvirov ter k izboljššanemu znanju o izlivnih izvirih, za katere je v njihovem zaledju značilno, da gladina podzemne vode prosto niha. Ker je izvir Radovne alpski izvir, na nihanje v pretoku v veliki meri vpliva taljenje snega v pomladanskem času, ki je zelo pomembno za polnjenje vodonosnika.

Z rezultati, pridobljenimi v doktorski disertaciji, lahko potrdimo hipotezo, da na količino vode na izviru Radovne ter na sam položaj pojavljanja izvira vplivajo količina snežnice v odtoku ter dotoki vode iz bokov doline. Rezultati predstavljajo pomembne nove informacije o hidrogeoloških procesih v dolini reke Radovne in o vodnem okolju, kar je zelo pomembno za prihodnje upravljanje z vodami, saj ti vodonosniki predstavljajo pomembne in hkrati zelo občutljive vodne vire.

Za nadaljnje delo bi bilo treba natančneje določiti obliko in debelino predkvartarne podlage z enako geofizikalno metodo, ampak ob drugačnih hidroloških pogojih, ali pa z novo metodo, npr. z geoelektričnimi raziskavami. Prav tako bi bilo za natančnejšo določitev napajalnega zaledja reke Radovne pomembno narediti sledilne poskuse na območju planote Pokljuka. Nadaljnje delo bi bilo treba usmeriti v pridobitev natančnejše izotopske sestave snežnice in stare vode v vodonosniku. Predvsem bi bilo treba ugotoviti, kakšna je spremenljivost izotopske sestave snežnice glede na različne nadmorske višine in lege. Kljub 1,5-letnemu vzorčnemu nizu se je izkazalo, da so izotopske vrednosti podzemne vode in reke zelo dinamične in različne, zato bi bilo smiselno za natančnejše rezultate vzorčenje podaljšati na vsaj pet let ali tudi več.

8 SUMMARY

To analyse groundwater discharge of springs from fluvioglacial porous aquifers in the area of the Radovna, a long term program was formed that included groundwater level measurements, discharge measurements and water sampling. In addition to the long term monitoring program the doctoral thesis contains analysed chemical and isotope data for the period of two years comprising information for the entire Radovna Valley. The main question, which deals with the analysis of groundwater discharge at the springs and with the distribution of water to the individual components, was approached comprehensively. We tried to include, consider and define as many different components as possible that affect the distribution of groundwater and surface water inside fluvioglacial sediments in the valley. These represent the porous aquifer and the distribution of water in the carbonate rocks from the recharge area, which forms karst-fractured aquifers.

The conceptual hydrogeological model for the Radovna River was build, which describes the contact between two aquifers, and plays an important role in the recharge of the Radovna River and its karst tributaries. Fluvioglacial sediments in the valley form a porous aquifer but the recharge area consist of a karst aquifer. The knowledge of the geometry of the aquifer and definition of the key geometric elements are of great importance for understanding the hydrogeology and water balance in a particular area. The most accurate way to define the depth of the aquifer is with existing or new planned boreholes. Due to the cost involved with this kind of approach and the sensitive location of Triglav National Park this was not an option in our case. Additional information about the aquifer morphology and the expansion of the aquifer with a non-invasive geophysical seismic reflection was used. The seismic reflection profile provided, despite generally poor data quality and necessity to apply alternative interpretation method, highly valuable information on the geometry of the aquifer and the depth of the sediments in the valley. The seismic reflection data gave an insight about the morphology of the pre-Quaternary bedrock with the deepest point of 141meters below surface. The bedrock dips steeper on the south side when compared to the north side and this also corresponds to the shape of both the slopes above the surface of the sediment.

Groundwater fluctuations in the well are very dynamic, this is reflected in the location of the spring origin as it moves up and down the valley. In the well groundwater fluctuation as much as 28.6 m were observed, consequently the spring's location moved up and down the valley for 2 km. Based on this data the aquifer is very permeable. The low-frequency GPR method has shown to be useful to determine groundwater level in the catchment of the spring. Given the unfavourable conditions for GPR measurements like poor ground contact, the results are satisfactory. Although it was impossible to determine the shape of the groundwater table in detail the data provided a good insight into the aquifer. With the cross sectional longitudinal profile and groundwater levels in the well we were able

to calculate the groundwater gradient that equals to 0.0058. The GPR method also determined a greater recharge from the southern Pokljuka plateau.

Chemical and isotope analysis of the river, spring and borehole water from the Radovna River Valley was carried out to study and improve current knowledge regarding the hydrogeological processes in the high karst terrain in the recharge area and in the alluvial sediments in the valley and also to improve the knowledge of Radovna watershed for water resource management. All water samples indicate the same Ca^{2+} - HCO_3^- water facies with the most abundant ions being Ca^{2+} , Mg^{2+} and HCO_3^- . The pH and the major ion analysis indicates that the water is alkine and that carbonate weathering is the main process in the catchment. The $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ ratio in three karstic springs (Z-1, ZM-1 and L-1) indicates that recharge from limestone rocks prevails. Water chemistry changes seasonally, indicating a positive correlation between maximum concentrations and low discharges and between minimum concentrations and high discharges. Spatial variations of water chemistry along the valley are attributed to different lithology and to the different degree of forested terrain reflecting variable contributions of carbonic acid. The concentration of major ions downstream in the river is highly influenced by the inflows of three important karst springs (Z-1, ZM-1, L-1), which have higher ion concentrations.

Chemical and isotopic data confirm that the Radovna River is a groundwater dominated river. Based on isotope data, the average recharge area of the Radovna river was estimated to be 1640 m. The seasonal variation of the isotope composition of hydrogen and oxygen is driven by snowmelt and precipitation. The average residence time for the whole Radovna River catchment is estimated to be 2.4 years and for karst springs between 0.7 and 1.2 years. The following processes influence the $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ values: dissolution of carbonates, degradation of organic matter and exchange with the atmospheric CO_2 . The $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ stream values in the downstream direction are influenced by karst spring inflows with more negative values. The $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ results show seasonal variations, with lower values in the winter and higher in the summer. All investigations, major ions and isotope analysis, indicate that the chemical concentrations and isotope compositions at downstream locations are highly dependent on the discharge volume of the karstic springs.

The isotopic hydrogram separation was made using two component mixing model, where two input parameters were determined; old water which is located in the aquifer, and the new water entering the system, in the form of a snowmelt. The percentage of the snowmelt in the discharge varies, both temporally and spatially. The difference in the percentage of snowmelt between the years 2012 and 2013 is attributed to climate. The period between 2011 and 2012 was very dry. Trends show that in 2012 the percentage of snowmelt increased between 2.5 and 2.9 %/month and decreased between 1.4 and 1.5 %/month, while in 2013 the percentage of snowmelt increased between 2.1 and 3.8 %/month.

The largest percentages of snowmelt were calculated in the well and the smallest at the location Sr. Radovna. The percentage of snowmelt in the discharge is an important component in the Radovna River flow, based on the calculations it represent at least one third of the water in the discharge.

The results in the Radovna spring area showed that the water discharge at the spring is very dynamic and it is very dependent on meteorological data, as the investigated year 2012 and 2013 are very different. Also, the results showed that long-term measurements are very important, as this homogenise the input data and get insight into what are the data differences and ranges between average and extreme years. The recharge system of the Radovna River has proved to be very complex, because the recharge is entirely dependent on the amount of snow and autumn precipitation.

Investigations presented inside the doctoral thesis have improved the knowledge of processes in transition from groundwater into spring and from here to the surface flow. Investigations also contributed to better understanding of the dynamics of alluvial springs and improved knowledge of the seepage springs, where groundwater fluctuates in the catchment area. Because the Radovna spring is an Alpine spring, the fluctuation in the river discharge is largely influenced by snowmelt in the spring time, which is very important for the aquifer recharge.

With the results obtained in this doctoral thesis, we can confirm the hypothesis that the amount of snowmelt in the spring discharge and in the tributaries from the sides of the valley has an impact on the amount of the water in the Radovna spring itself and the position of the spring in the valley. The results represent significant new information about hydrological processes in the Radovna River valley and the aquatic environment. This information is of paramount importance for the future water management, as these aquifers represent important and very sensitive water resources.

Future works should include work in order to more accurately determine the shape and thickness of pre-Quaternary bedrock. To achieve this either the same method should be used under different hydrological conditions or a new method should be used like for example the geoelectrical survey. In order to determine a more accurate recharge area of the Radovna River tracer tests in the area of the Pokljuka plateau could be performed. Future work should be focused in obtaining more precise isotopic composition of snowmelt and old water inside the aquifer. Above all, it would be necessary to determine what is the variability of the isotopic composition of snowmelt from different altitudes and geographical positions. Despite the 1.5 year long sampling campaign, it appeared that the isotopic composition of the groundwater and the stream water is very dynamic and different. In order to determine optimal results it would be recommended to extend sampling campaign to at least five years or more.

LITERATURA

- AFSHAR, A., ABEDI, M., NOROUZI, G.-H. & RIAHI, M.-A. 2015. Geophysical investigation of underground water content zones using electrical resistivity tomography and ground penetrating radar: A case study in Hesarak-Karaj, Iran. *Engineering Geology*, 196, 183-193, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.07.022>.
- ALFARO, C. & WALLACE, M. 1994. Origin and classification of springs and historical review with current applications. *Environmental Geology*, 24, 112-124, [10.1007/bf00767884](https://doi.org/10.1007/bf00767884).
- ANDERSON, M. P. & WOESSNER, W. W. 1992. *Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport*, Academic Press.
- ANNAN, A. P. 2002. GPR—History, Trends, and Future Developments. *Subsurface Sensing Technologies and Applications*, 3, 253-270, [10.1023/a:1020657129590](https://doi.org/10.1023/a:1020657129590).
- AQUILINA, L., LADOUCHE, B. & DÖRFLIGER, N. 2005. Recharge processes in karstic systems investigated through the correlation of chemical and isotopic composition of rain and spring-waters. *Applied Geochemistry*, 20, 2189-2206, [10.1016/j.apgeochem.2005.07.011](https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2005.07.011).
- ARAGUÁS-ARAGUÁS, L., FROEHLICH, K. & ROZANSKI, K. 2000. Deuterium and oxygen-18 isotope composition of precipitation and atmospheric moisture. *Hydrological Processes*, 14, 1341-1355, [10.1002/1099-1085\(20000615\)14:8<1341::aid-hyp983>3.0.co;2-z](https://doi.org/10.1002/1099-1085(20000615)14:8<1341::aid-hyp983>3.0.co;2-z).
- ARSO, 2012. *Razvoj suše v Sloveniji v letu 2012*. Ljubljana: Agencija Republike Slovenije za okolje.
- ARSO, 2016a. *Archive of Meteorological Data* [Online]. Ministry of the Environment and Spatial Planning, Slovenian Environment Agency [<http://www.arso.gov.si/vreme/>]. [Accessed 10.2.2016].
- ARSO, 2016b. *Hydrological data - Archive hydrological data* [Online]. Ministry of the Environment and Spatial Planning, Slovenian Environment Agency [<http://vode.arso.gov.si/hidarhiv/>]. Available: <http://www.arso.gov.si/vode/podatki/> [Accessed 10.2.2016, <http://www.arso.gov.si/vode/podatki/>].
- ATANACKOV, J. 2013. *Uporaba in optimizacija visokoločljive refleksijske seizmične metode v raziskavah neotektonike*. Doktorska disertacija, Univerza v Ljubljani.
- ATANACKOV, J., CAR, M., JAMŠEK RUPNIK, P., JEŽ, J., CELARC, B., NOVAK, M., MILANIČ, B., ŠRAM, D. & BAVEC, Š. 2015. Poročilo o geofizikalnih raziskavah in geološka sinteza raziskav območja Zelencev in Ledin. Geološki zavod Slovenije.
- ATANACKOV, J. & GOSAR, A. 2013. Field comparison of seismic sources for high resolution shallow seismic reflection profiling on the Ljubljana moor. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, Vol. 10, [10.1016/AGG.2013.0002](https://doi.org/10.1016/AGG.2013.0002).
- BANKS, E. W., SIMMONS, C. T., LOVE, A. J. & SHAND, P. 2011. Assessing spatial and temporal connectivity between surface water and groundwater in a regional catchment: Implications for regional scale water quantity and quality. *Journal of Hydrology*, 404, 30-49, [10.1016/j.jhydrol.2011.04.017](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.04.017).
- BAO, W., WANG, T., HU, H. & QU, S., Discussion of Present Isotopic Hydrograph Separation (IHS) Method. *Environmental Science and Information Application Technology*, 2009. ESIAT 2009. International Conference on, 4-5 July 2009. 124-127.
- BARBIERI, M., BOSCHETTI, T., PETITTA, M. & TALLINI, M. 2005. Stable isotope (2H , 18O and $87\text{Sr}/86\text{Sr}$) and hydrochemistry monitoring for groundwater hydrodynamics analysis in a karst aquifer

(Gran Sasso, Central Italy). *Applied Geochemistry*, 20, 2063-2081, <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeochem.2005.07.008>.

BAT, M., DOLINAR, M., FRANTAR, P., HRVATIN, M., KOBOLD, M., KURNIK, B., NADBATH, M., OŽURA, V., UHAN, J. & ULAGA, F. 2008. Vodna bilanca Slovenije 1971-2000 = Water balance of Slovenia 1971-2000, Ljubljana, Ministrstvo za okolje in prostor, Agencija Republike Slovenije za okolje.

BERES, M. & HAENI, F. P. 1991. Application of Ground-Penetrating-Radar Methods in Hydrogeologic Studies. *Ground Water*, 29, 375-386, [10.1111/j.1745-6584.1991.tb00528.x](https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1991.tb00528.x).

BLASCH, K. W. & BRYSON, J. R. 2007. Distinguishing Sources of Ground Water Recharge by Using $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$. *Ground Water*, 45, 294-308, [10.1111/j.1745-6584.2006.00289.x](https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2006.00289.x).

BLINDOW, N. 2009. Ground penetrating radar. In: KIRSCH, R. (ed.) *Groundwater Geophysics*. Springer Berlin Heidelberg.

BLINDOW, N., EISENBURGER, D., ILLICH, B., PETZOLD, H. & RICHTER, T. 2007. *Ground Penetrating Radar. Environmental Geology: Handbook of Field Methods and Case Studies*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

BOITEN, W. 2008. *Hydrometry 3rd Edition: A comprehensive introduction to the measurement of flow in open channels*, Leiden, CRC Press Balkema.

BRENCIC, M. & VRECA, P. 2006. Identification of sources and production processes of bottled waters by stable hydrogen and oxygen isotope ratios. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 20, 3205-3212, [10.1002/rcm.2726](https://doi.org/10.1002/rcm.2726).

BRENCIC, M. & VRECA, P. 2007. Isotopic composition of dissolved inorganic carbon in bottled waters on the Slovene market. *Food Chemistry*, 101, 1516-1525, <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.04.003>.

BRENČIČ, M. 1998. Some results of stable isotope investigations in the Slovenian part of Stol area (W Karavanke). *RMZ – Materials and geoenvironment*, 45, 17-19.

BRENČIČ, M. & POLTNIG, W. 2008. Podzemne vode Karavank, Skrito bogastvo = Grundwasser der Karawanken, Versteckter Schatz, Geološki zavod Ljubljana, Joanneum Research Forschungsgesellschaft m.b.H.

BRENČIČ, M. & VREČA, P. 2014. Applicability study of deuterium excess in bottled water life cycle analyses. *Geologija*, 57, 231-244, [10.5474/geologija.2014.020](https://doi.org/10.5474/geologija.2014.020).

BULLEN, T. D. & KENDALL, C. 1998. Chapter 18 - Tracing of Weathering Reactions and Water Flowpaths: A Multi-isotope Approach. In: MCDONNELL, C. K. J. (ed.) *Isotope Tracers in Catchment Hydrology*. Amsterdam: Elsevier.

BUSER, S. 1980. Osnovna geološka karta SFRJ. 1: 100.000, Tolmač lista Celovec (Klagenfurt) L 33-53, Beograd, Zvezni geološki zavod.

BUTTLE, J. M. 1994. Isotope hydrograph separations and rapid delivery of pre-event water from drainage basins. *Progress in Physical Geography*, 18, 16-41, [10.1177/030913339401800102](https://doi.org/10.1177/030913339401800102).

BUTTLE, J. M. 1998. Chapter 1 - Fundamentals of Small Catchment Hydrology. In: MCDONNELL, C. K. J. (ed.) *Isotope Tracers in Catchment Hydrology*. Amsterdam: Elsevier.

CABLE, J., OGLE, K. & WILLIAMS, D. 2011. Contribution of glacier meltwater to streamflow in the Wind River Range, Wyoming, inferred via a Bayesian mixing model applied to isotopic measurements. *Hydrological Processes*, 25, 2228-2236, doi:10.1002/hyp.7982.

CAPPA, C. D., HENDRICKS, M. B., DEPAOLO, D. J. & COHEN, R. C. 2003. Isotopic fractionation of water during evaporation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108, 4525, doi:10.1029/2003jd003597.

CERAR, S. & URBANC, J. 2013. Carbonate Chemistry and Isotope Characteristics of Groundwater of Ljubljansko Polje and Ljubljansko Barje Aquifers in Slovenia. *The Scientific World Journal*, 2013, 11, 10.1155/2013/948394.

CLARK, I. 2015. *Groundwater Geochemistry and Isotopes*, CRC Press.

CLARK, I. & FRITZ, P. 1997. *Environmental Isotopes in Hydrogeology*, Boca Raton /New York, Lewis Publisher.

COOPER, L. W. 1998. Chapter 4 - Isotopic Fractionation in Snow Cover A2 - KENDALL, CAROL. In: MCDONNELL, J. J. (ed.) *Isotope Tracers in Catchment Hydrology*. Amsterdam: Elsevier.

CRAIG, H. 1961. Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, 133, 1702-1703.

CVITANIČ, I., DOBNIKAR TEHOVNIK, M., GACIN, M., GRBOVIĆ, J., JESENOVEC, B., KOZAK-LEGIŠA, Š., KRANJC, M., KUCHAR, U., MIHORKO, P., POJE, M., REMEC-REKAR, Š., ROTAR, B., SEVER, M., SODJA, E., ANDJELOV, M., MIKULIČ, Z., PAVLIČ, U., SAVIČ, V., SOUVENT, P., TRIŠIČ, N. & UHAN, J. 2010. Vode v Sloveniji: ocena stanja voda za obdobje 2006-2008 po določenih okvirnih direktivah o vodah. Ljubljana: Ministrstvo za okolje in prostor, Agencija RS za okolje.

DANSGAARD, W. 1964. Stable isotopes in precipitation. *Tellus*, 16, 436-468, 10.1111/j.2153-3490.1964.tb00181.x.

DEINES, P. 1980. Chapter 9 - The Isotopic Composition of Reduced Organic Carbon. In: FONTES, P. F. C. (ed.) *The Terrestrial Environment*, A. Amsterdam: Elsevier.

DEWALLE, D. R., SWISTOCK, B. R. & SHARPE, W. E. 1988. Three-component tracer model for stormflow on a small Appalachian forested catchment. *Journal of Hydrology*, 104, 301-310, [http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694\(88\)90171-0](http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694(88)90171-0).

DROBNE, F., MARIN, K. & ROGELJ, J. 1975. Geološke in geotehnične raziskave k idejni študiji "Akumulacija Radovna". Geološki zavod Ljubljana.

EARMAN, S., CAMPBELL, A. R., PHILLIPS, F. M. & NEWMAN, B. D. 2006. Isotopic exchange between snow and atmospheric water vapor: Estimation of the snowmelt component of groundwater recharge in the southwestern United States. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 111, 10.1029/2005jd006470.

FERJAN STANIČ, T., BRENČIČ, M. & ZUPANČIČ, N. 2013. Heavy metal concentrations in soil in the vicinity of former ironworks in Spodnja Radovna, Slovenia. *Geologija*, 56/2, 229-241, doi:10.5474/geologija.2013.015.

FERJANČIČ, L. & DROBNE, F. 1984. Poročilo o vodozbirnem področju Radovne, ter možnosti onesnaževanja in zaščite s posebnim poudarkom na poselitev poključke planote. Ljubljana: [Poročilo v arhivu Geološkega zavoda Slovenije], Geološki zavod Ljubljana.

FLECKENSTEIN, J. H., KRAUSE, S., HANNAH, D. M. & BOANO, F. 2010. Groundwater-surface water interactions: New methods and models to improve understanding of processes and dynamics. *Advances in Water Resources*, 33, 1291-1295, <http://dx.doi.org/10.1016/j.advwatres.2010.09.011>.

FRANTAR, P. 2005. Pretočni režimi slovenskih rek in njihova spremenljivost. Ujma. Ljubljana.

FRANTAR, P., KOBOLD, M., PAVLIČ, U., PETAN, S., POGAČNIK, N., POLAJNAR, J., ROBIČ, M., STROJAN, I., SUŠNIK, M., TRČEK, R., TRIŠIČ, N. & ULAGA, F. 2012. The 2009 hydrological yearbook of Slovenia, Ljubljana, Ministry of Agriculture and Environment, Slovenian Environment Agency.

FRISBEE, M. D., PHILLIPS, F. M., CAMPBELL, A. R., HENDRICKX, J. M. H. & ENGLE, E. M. 2010. Modified passive capillary samplers for collecting samples of snowmelt infiltration for stable isotope analysis in remote, seasonally inaccessible watersheds 2: field evaluation. *Hydrological Processes*, 24, 834-849, [10.1002/hyp.7524](https://doi.org/10.1002/hyp.7524).

GAT, J. & CARMI, I. 1970. Evolution of the Isotopic Composition of Atmospheric Waters in the Mediterranean Sea Area. *Journal of Geophysical Research*, doi: 10.1029/JC075i015p03039, 3039-3048, doi: 10.1029/JC075i015p03039.

GAT, J. R. 2010. *Isotope Hydrology: A Study of the Water Cycle*, World Scientific Publishing Company Pte Limited.

GEHRE, M., GEILMANN, H., RICHTER, J., WERNER, R. A. & BRAND, W. A. 2004. Continuous flow 2H/1H and 18O/16O analysis of water samples with dual inlet precision. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 18, 2650-2660, [10.1002/rcm.1672](https://doi.org/10.1002/rcm.1672).

GENEREUX, D. 1998. Quantifying uncertainty in tracer-based hydrograph separations. *Water Resources Research*, 34, 915-919, [10.1029/98wr00010](https://doi.org/10.1029/98wr00010).

GIBBS, R. J. 1970. Mechanisms controlling world water chemistry. *Science*, 170, 1088-90, <http://www.biomedsearch.com/nih/Mechanisms-Controlling-World-Water-Chemistry/17777828.html>

GLYNN, P. & PLUMMER, L. N. 2005. Geochemistry and the understanding of ground-water systems. *Hydrogeology Journal*, 13, 263-287, doi:10.1007/s10040-004-0429-y.

GOSAR, A. 2011. Inženirska geofizika, Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta.

HAN, G. & LIU, C. 2001. Hydrogeochemistry of Wujiang River water in Guizhou Province, China. *Chinese Journal of Geochemistry*, 20, 240-248, [10.1007/bf03166145](https://doi.org/10.1007/bf03166145).

HAN, G. & LIU, C. 2004. Water geochemistry controlled by carbonate dissolution: a study of the river waters draining karst-dominated terrain, Guizhou Province, China. *Chemical Geology*, 204, 1-21, <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemgeo.2003.09.009>.

HE, Y., PANG, H., THEAKSTONE, W. H., ZHANG, D., LU, A., SONG, B., YUAN, L. & NING, B. 2006. Spatial and temporal variations of oxygen isotopes in snowpacks and glacial runoff in different types of glacial area in western China. *Annals of Glaciology*, 43, 269-274, [10.3189/172756406781811943](https://doi.org/10.3189/172756406781811943).

HEM, J. D. 1985. *Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water*, U.S. Geological survey, Water Supply Paper 2254.

HERRMANN, A., LEHRER, M. & STICHLER, W. 1981. Isotope Input into Runoff Systems from Melting Snow Covers. *Hydrology Research*, 12, 309-318.

HICTALER, J. 2014. Vzorčenje talečega snega s pasivnimi kapilarnimi vzorčevalniki. Diplomsko delo, Univerza v Ljubljani.

HINTON, M. J., SCHIFF, S. L. & ENGLISH, M. C. 1994. Examining the contributions of glacial till water to storm runoff using two- and three-component hydrograph separations. *Water Resources Research*, 30, 983-993, 10.1029/93wr03246.

HOEFS, J. 1997. *Stable Isotope Geochemistry*, 4th ed., Berlin, Springer-Verlag.

HOLDER, M., BROWN, K. W., THOMAS, J. C., ZABCIK, D. & MURRAY, H. E. 1991. Capillary-Wick Unsaturated Zone Soil Pore Water Sampler. *Soil Science Society of America Journal*, 55, 1195-1202, 10.2136/sssaj1991.03615995005500050001x.

HOOPER, R. P. & SHOEMAKER, C. A. 1986. A Comparison of Chemical and Isotopic Hydrograph Separation. *Water Resources Research*, 22, 1444-1454, 10.1029/WR022i010p01444.

HUBERT, P., MARIN, E., MEYBECK, M., OLIVE, P. & SIWERTZ, E. 1969. Aspects hydrologique, géochimique et sédimentologique de la crue exceptionnelle de la Dranse du Chablais du 22 Septembre 1968, *Archives des Sciences, Genève*, 22, 3.

HUTH, A. K., LEYDECKER, A., SICKMAN, J. O. & BALES, R. C. 2004. A two-component hydrograph separation for three high-elevation catchments in the Sierra Nevada, California. *Hydrological Processes*, 18, 1721-1733, 10.1002/hyp.1414.

ISKRA, M. & KUCHAR, S. 1983. Kreda Radovna, Elaborat o geoloških raziskavah jezerske krede v Srednji Radovni v letu 1983. [Poročilo v arhivu Geološkega zavoda Slovenije] Ljubljana: Geološki zavod Ljubljana.

IVKOVIC, K. M. 2009. A top-down approach to characterise aquifer-river interaction processes. *Journal of Hydrology*, 365, 145-155, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.11.021>.

JAMŠEK, Z. 1969. »Kreda Bled« - Srednja Radovna, Izračun rezerv kredne gline. Ljubljana: [Poročilo v arhivu Geološkega zavoda Slovenije], Geološki zavod Ljubljana.

JEELANI, G., FEDDEMA, J. J., VAN DER VEEN, C. J. & STEARNS, L. 2012. Role of snow and glacier melt in controlling river hydrology in Liddar watershed (western Himalaya) under current and future climate. *Water Resources Research*, 48, n/a-n/a, 10.1029/2011wr011590.

JEELANI, G., SARAVANA KUMAR, U. & KUMAR, B. 2013. Variation of $\delta^{18}\text{O}$ and δD in precipitation and stream waters across the Kashmir Himalaya (India) to distinguish and estimate the seasonal sources of stream flow. *Journal of Hydrology*, 481, 157-165, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.12.035>.

JEELANI, G., SHAH, R. A., JACOB, N. & DESHPANDE, R. D. 2016. Estimation of snow and glacier melt contribution to Liddar stream in a mountainous catchment, western Himalaya: an isotopic approach. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 10.1080/10256016.2016.1186671, 1-18, 10.1080/10256016.2016.1186671.

JOL, H. M. 2009. *Ground Penetrating Radar Theory and Applications: theory and applications* Amsterdam, Elsevier.

JURKOVŠEK, B. 1987. Osnovna geološka karta SFRJ 1:100.000, Tolmač listov Beljak in Ponteba: L 33-51 L 33-52, Beograd, Zvezni geološki zavod.

- KAISER, A. E., GREEN, A. G., CAMPBELL, F. M., HORSTMAYER, H., MANUKYAN, E., LANGRIDGE, R. M., MCCLYMONT, A. F., MANCKTELOW, N., FINNEMORE, M. & NOBES, D. C. 2009. Ultrahigh-resolution seismic reflection imaging of the Alpine Fault, New Zealand. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 114, n/a-n/a, 10.1029/2009jb006338.
- KANDUČ, T., KOČMAN, D. & OGRINC, N. 2008. Hydrogeochemical and Stable Isotope Characteristics of the River Idrijca (Slovenia), the Boundary Watershed Between the Adriatic and Black Seas. *Aquatic Geochemistry*, 14, 239-262, 10.1007/s10498-008-9035-2.
- KANDUČ, T., MORI, N., KOČMAN, D., STIBILJ, V. & GRASSA, F. 2012. Hydrogeochemistry of Alpine springs from North Slovenia: Insights from stable isotopes. *Chemical Geology*, 300–301, 40-54, doi:10.1016/j.chemgeo.2012.01.012.
- KANDUČ, T., ŠTURM, M. B. & MCINTOSH, J. 2013. Chemical Dynamics and Evaluation of Biogeochemical Processes in Alpine River Kamniška Bistrica, North Slovenia. *Aquatic Geochemistry*, 19, 323-346, 10.1007/s10498-013-9197-4.
- KASTELEC, D. 1999. Use of universal kriging for objective spatial interpolation of average yearly precipitation in Slovenia. *Res. Rep. Biotech. Fac. Univ. Ljublj. Agric*, 301-314 (in Slovenian, with English abstract)
- KATTAN, Z. 2015. Chemical and isotopic characteristics of the Euphrates River water, Syria: factors controlling its geochemistry. *Environmental Earth Sciences*, 73, 4763-4778, 10.1007/s12665-014-3762-z.
- KEAREY, P., BROOKS, M. & HILL, I. 2002. *An introduction to geophysical exploration*, Malden, MA : Blackwell Science, cop. 2002.
- KENDALL, C. & CALDWELL, E. A. 1998. Chapter 2 - Fundamentals of Isotope Geochemistry. In: MCDONNELL, C. K. J. (ed.) *Isotope Tracers in Catchment Hydrology*. Amsterdam: Elsevier.
- KENDALL, C. & DOCTOR, D. H. 2003. 5.11 - Stable Isotope Applications in Hydrologic Studies. In: EDITORS-IN-CHIEF: HEINRICH, D. H. & KARL, K. T. (eds.) *Treatise on Geochemistry*. Oxford: Pergamon.
- KENDALL, C. & MCDONNELL, J. J. 1998. *Isotope Tracers in Catchment Hydrology*, Elsevier.
- KLAUS, J. & MCDONNELL, J. J. 2013. Hydrograph separation using stable isotopes: Review and evaluation. *Journal of Hydrology*, 505, 47-64, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.09.006>.
- KOBOLD, M., DOLINAR, M. & FRANTAR, P. 2012. Spremembe vodnega režima zaradi podnebnih sprememb in drugih antropogenih vplivov. In: BRILLY, M. (ed.) *Zbornik prispevkov, I. kongres o vodah Slovenija 2012*. Ljubljana, Slovenija, 22. marec 2012: Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.
- KONG, Y. & PANG, Z. 2011. Isotope hydrograph separation in alpine catchments: a review. *Sciences in Cold and Arid Regions*, 3, 0086-0091, 10.3724/SP.J.1226.2011.00086.
- KONG, Y. & PANG, Z. 2012. Evaluating the sensitivity of glacier rivers to climate change based on hydrograph separation of discharge. *Journal of Hydrology*, 434–435, 121-129, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.02.029>.
- KRESIĆ, N. 2010. Chapter 2 - Types and classifications of springs. In: BY, E., KRESIĆ, N. & STEVANOVIĆ, Z. (eds.) *Groundwater Hydrology of Springs*. Boston: Butterworth-Heinemann.

KRESIĆ, N. & MIKSZEWSKI, A. 2012. Hydrogeological Conceptual Site Models: Data Analysis and Visualization, Taylor & Francis.

LADOUCHE, B., PROBST, A., VIVILLE, D., IDIR, S., BAQUÉ, D., LOUBET, M., PROBST, J. L. & BARIAC, T. 2001. Hydrograph separation using isotopic, chemical and hydrological approaches (Strengbach catchment, France). *Journal of Hydrology*, 242, 255-274, [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00391-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00391-7).

LANGMUIR, D. 1971. The geochemistry of some carbonate ground waters in central Pennsylvania. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 35, 1023-1045, [http://dx.doi.org/10.1016/0016-7037\(71\)90019-6](http://dx.doi.org/10.1016/0016-7037(71)90019-6).

LI, C.-B., QI, J.-G., YANG, L.-S., YANG, W.-J., ZHU, G.-F. & WANG, S.-B. 2014. The variability of the snow and ice melt in alpine rivers in northwestern China. *Journal of Mountain Science*, 11, 884-895, [10.1007/s11629-013-2737-y](http://dx.doi.org/10.1007/s11629-013-2737-y).

LI, S. Y. & ZHANG, Q. F. 2009. Geochemistry of the upper Han River basin, China 2: Seasonal variations in major ion compositions and contribution of precipitation chemistry to the dissolved load. *Journal of Hazardous Materials*, 170, 605-611, [doi:10.1016/j.jhazmat.2009.05.022](http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.05.022).

LINSLEY, R. K. & KOHLER, M. A. 1958. Hydrology for engineers, New York, McGraw-Hill.

MAHMOUDZADEH, M. R., FRANCÉS, A. P., LUBCZYNSKI, M. & LAMBOT, S. 2012. Using ground penetrating radar to investigate the water table depth in weathered granites — Sardon case study, Spain. *Journal of Applied Geophysics*, 79, 17-26, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jappgeo.2011.12.009>.

MALÁ 2009. ProEx—Professional explorer control unit. Operating manual v 2.0.

MALOSZEWSKI, P., STICHLER, W., ZUBER, A. & RANK, D. 2002. Identifying the flow systems in a karstic-fissured-porous aquifer, the Schneelalpe, Austria, by modelling of environmental ^{18}O and ^3H isotopes. *Journal of Hydrology*, 256, 48-59, [10.1016/S0022-1694\(01\)00526-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00526-1).

MARINKO, M., ANDRIČ, Z. & MENCEJ, Z. 1978. Poročilo o inženirsko geoloških razmerah vzdolž predlagane trase cevovoda v dolini Radovne. Ljubljana: [Poročilo v arhivu Geološkega zavoda Slovenije], Geološki zavod Ljubljana.

MARINKO, M. & MENCEJ, Z. 1978. Poročilo o hidrogeoloških raziskavah za zajem pitne vode v kvartarnem zasipu Radovne. Ljubljana: [Poročilo v arhivu Geološkega zavoda Slovenije], Geološki zavod Ljubljana.

MCCALLUM, J. L., COOK, P. G., BERHANE, D., RUMPF, C. & MCMAHON, G. A. 2012. Quantifying groundwater flows to streams using differential flow gaugings and water chemistry. *Journal of Hydrology*, 416-417, 118-132, [10.1016/j.jhydrol.2011.11.040](http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.11.040).

MCCALLUM, J. L., COOK, P. G., BRUNNER, P. & BERHANE, D. 2010. Solute dynamics during bank storage flows and implications for chemical base flow separation. *Water Resources Research*, 46, n/a-n/a, [10.1029/2009wr008539](http://dx.doi.org/10.1029/2009wr008539).

MCCLYMONT, A. F., ROY, J. W., HAYASHI, M., BENTLEY, L. R., MAURER, H. & LANGSTON, G. 2011. Investigating groundwater flow paths within proglacial moraine using multiple geophysical methods. *Journal of Hydrology*, 399, 57-69, [10.1016/j.jhydrol.2010.12.036](http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.12.036).

MENCEJ, Z. & DROBNE, F. 1974. Hidrogeološke raziskave na območju izvirov v dolini Radovne. Ljubljana: [Poročilo v arhivu Geološkega zavoda Slovenije], Geološki zavod Ljubljana.

- MENCEJ, Z. & DROBNE, F. 1978. Poročilo o rezultatih dodatnih hidrogeoloških raziskav na območju predvidene drenaže v Radovni. Ljubljana: [Poročilo v arhivu Geološkega zavoda Slovenije], Geološki zavod Ljubljana.
- MEYBECK, M. 1987. Global chemical weathering of surficial rocks estimated from river dissolved loads. *American J. Science*, 287, 401-428.
- MEYBECK, M. 1996. River water quality, global ranges time and space variabilities. *Vehr. Int. Verein. Limnol.*, 26, 81-96.
- MEYER, S. L. 1975. *Data Analysis for Scientists and Engineers*, Wiley.
- MEZGA, K., URBANC, J. & CERAR, S. 2014. The isotope altitude effect reflected in groundwater: a case study from Slovenia. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 50, 33-51, <http://dx.doi.org/10.1080/10256016.2013.826213>.
- MILSOM, J. 2003. *Field Geophysics*, West Sussex, John Wiley & Sons Ltd.
- MOHAMMED, N., CELLE-JEANTON, H., HUNEAU, F., LE COUSTUMER, P., LAVASTRE, V., BERTRAND, G., CHARRIER, G. & CLAUZET, M. L. 2014. Isotopic and geochemical identification of main groundwater supply sources to an alluvial aquifer, the Allier River valley (France). *Journal of Hydrology*, 508, 181-196, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.10.051>.
- MOOK, W. G. 2001. *Environmental Isotopes in the Hydrological Cycle: Principles and Applications*, Unesco, International Hydrological Programme.
- MOOK, W. G. 2006. *Introduction to Isotope Hydrology: Stable and Radioactive Isotopes of Hydrogen, Oxygen and Carbon*, Taylor & Francis.
- MORAL, F., CRUZ-SANJULIÁN, J. J. & OLÍAS, M. 2008. Geochemical evolution of groundwater in the carbonate aquifers of Sierra de Segura (Betic Cordillera, southern Spain). *Journal of Hydrology*, 360, 281-296, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.07.012>.
- MURI, G. 2013. Atmospheric deposition chemistry in a subalpine area of the Julian Alps, North-West Slovenia. *J. Limnol.*, 72, 291-300, [doi 10.4081/jlimnol.2013.e23](http://dx.doi.org/10.4081/jlimnol.2013.e23).
- NADBATH, M. 2012. Meteorološka postaja Zgornja Radovna. Naše okolje, Bilten Agencije RS za okolje, XIX, 1-5.
- NADBATH, M. 2014. Meteorološka postaja Kredarica. Naše okolje, Bilten Agencije RS za okolje, XXI, 48-57.
- NEAL, A. 2004. Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress. *Earth-Science Reviews*, 66, 261-330, <http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2004.01.004>.
- O'DRISCOLL, M. A., DEWALLE, D. R., MCGUIRE, K. J. & GBUREK, W. J. 2005. Seasonal ^{18}O variations and groundwater recharge for three landscape types in central Pennsylvania, USA. *Journal of Hydrology*, 303, 108-124, [10.1016/j.jhydrol.2004.08.020](http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.08.020).
- OGRINC, N., KANDUČ, T., STICHLER, W. & VREČA, P. 2008. Spatial and seasonal variations in $\delta^{18}\text{O}$ and δD values in the River Sava in Slovenia. *Journal of Hydrology*, 359, 303-312, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.07.010>.

OGRINC, N., KANDUČ, T. & VAUPOTIČ, J. 2006. Isotopic characteristics of the Sava River basin in Slovenia. In: POVINEC, P. & SANCHEZ-CABEZA, J. A. (eds.) *Radioactivity in the Environment*. Elsevier.

ORTAR, J., VOLK BAHUN, M., PAVŠEK, M., SINJUR, I., VERTAČNIK, G., BRENČIČ, M., POLAJNAR, D., SOKRATOV, S. A. & VREČA, P. 2013. Physical and isotopic characteristics of snowpack in NW Slovenia. SSW 2013. Grenoble, Chamonix, Momy-Blanc.

PENNA, D., AHMAD, M., BIRKS, S. J., BOUCHAOU, L., BRENČIČ, M., BUTT, S., HOLKO, L., JEELANI, G., MARTÍNEZ, D. E., MELIKADZE, G., SHANLEY, J. B., SOKRATOV, S. A., STADNYK, T., SUGIMOTO, A. & VREČA, P. 2014. A new method of snowmelt sampling for water stable isotopes. *Hydrological Processes*, 28, 5637-5644, [10.1002/hyp.10273](https://doi.org/10.1002/hyp.10273).

PENNA, D., VAN MEERVELD, H. J., ZUECCO, G., DALLA FONTANA, G. & BORGA, M. 2016. Hydrological response of an Alpine catchment to rainfall and snowmelt events. *Journal of Hydrology*, 537, 382-397, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.03.040>.

PETELET, E., LUCK, J.-M., BEN OTHMAN, D., NEGREL, P. & AQUILINA, L. 1998. Geochemistry and water dynamics of a medium-sized watershed: the Hérault, southern France: 1. Organisation of the different water reservoirs as constrained by Sr isotopes, major, and trace elements. *Chemical Geology*, 150, 63-83, [10.1016/s0009-2541\(98\)00053-9](https://doi.org/10.1016/s0009-2541(98)00053-9).

PETRIČ, M. 2002. Characteristics of Recharge-Discharge Relations in Karst Aquifer, Postojna-Ljubljana, Slovene academy of sciences and arts. Karst Research Institute.

PHILLIPS, D. L. & GREGG, J. W. 2003. Source partitioning using stable isotopes: coping with too many sources. *Oecologia*, 136, 261-269, [10.1007/s00442-003-1218-3](https://doi.org/10.1007/s00442-003-1218-3).

PINDER, G. F. & JONES, J. F. 1969. Determination of the ground-water component of peak discharge from the chemistry of total runoff. *Water Resources Research*, 5, 438-445, [10.1029/WR005i002p00438](https://doi.org/10.1029/WR005i002p00438).

PITTS, M. W. & ALFARO, C. 2001. Geologic/Hydrogeologic Setting and Classification of Springs. In: LAMOREAUX, P. E. & TANNER, J. T. (eds.) *Springs and Bottled Waters of the World: Ancient History, Source, Occurrence, Quality and Use*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

POROWSKA, D. 2015. Determination of the origin of dissolved inorganic carbon in groundwater around a reclaimed landfill in Otwock using stable carbon isotopes. *Waste Management*, 39, 216-225, <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2015.01.044>.

POSAVEC, K., BAČANI, A. & NAKIĆ, Z. 2006. A Visual Basic Spreadsheet Macro for Recession Curve Analysis. *Ground Water*, 44, 764-767, [10.1111/j.1745-6584.2006.00226.x](https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2006.00226.x).

POSAVEC, K., PARLOV, J. & NAKIĆ, Z. 2010. Fully Automated Objective-Based Method for Master Recession Curve Separation. *Ground Water*, 48, 598-603, [10.1111/j.1745-6584.2009.00669.x](https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2009.00669.x).

PU, T., HE, Y., ZHANG, T., WU, J., ZHU, G. & CHANG, L. 2013. Isotopic and geochemical evolution of ground and river waters in a karst dominated geological setting: A case study from Lijiang basin, South-Asia monsoon region. *Applied Geochemistry*, 33, 199-212, <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeochem.2013.02.013>.

RABELL, W. 2009. Seismic methods. In: KIRSCH, R. (ed.) *Groundwater Geophysics: A Tool for Hydrogeology*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

- REJIBA, F., BOBÉE, C., MAUGIS, P. & CAMERLYNCK, C. 2012. GPR imaging of a sand dune aquifer: A case study in the niayes ecoregion of Tanma, Senegal. *Journal of Applied Geophysics*, 81, 16-20, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jappgeo.2011.09.015>.
- RMAN, N. 2016. Hydrogeochemical and isotopic tracers for identification of seasonal and long-term over-exploitation of the Pleistocene thermal waters. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188, 242, [10.1007/s10661-016-5250-2](https://doi.org/10.1007/s10661-016-5250-2).
- RODGERS, P., SOULSBY, C., WALDRON, S. & TETZLAFF, D. 2005. Using stable isotope tracers to assess hydrological flow paths, residence times and landscape influences in a nested mesoscale catchment. *Hydrology and Earth System Sciences*, 9, 139-155, [doi:10.5194/hess-9-139-2005](https://doi.org/10.5194/hess-9-139-2005).
- RODHE, A. 1998. Chapter 12 - Snowmelt-Dominated Systems A2 - KENDALL, CAROL. In: MCDONNELL, J. J. (ed.) *Isotope Tracers in Catchment Hydrology*. Amsterdam: Elsevier.
- ROGELJ, J. & DROBNE, F. 1984. Zaščita vodnega vira Radovna: Predlog vodovarstvenih pasov in območij drenaže Radovna. Ljubljana: [Poročilo v arhivu Geološkega zavoda Slovenije], Geološki zavod Ljubljana.
- ROY, J. W. & HAYASHI, M. 2009. Multiple, distinct groundwater flow systems of a single moraine-talus feature in an alpine watershed. *Journal of Hydrology*, 373, 139-150, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.04.018>.
- RYU, J.-S., LEE, K.-S. & CHANG, H.-W. 2007. Hydrogeochemical and isotopic investigations of the Han River basin, South Korea. *Journal of Hydrology*, 345, 50-60, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.08.001>.
- SAHRA. 2016. Sustainability of semi-Arid Hydrology and Riparian Areas, Isotopes: Oxygen [Online]. Arizona, Ariz, USA. Available: <http://web.sahra.arizona.edu/programs/isotopes/oxygen.html#4> [Accessed 7.9. 2016].
- SCHMIEDER, J., HANZER, F., MARKE, T., GARVELMANN, J., WARSCHER, M., KUNSTMANN, H. & STRASSER, U. 2016. The importance of spatio-temporal snowmelt variability for isotopic hydrograph separation in a high-elevation catchment. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 2016, 1-27, [10.5194/hess-2016-128](https://doi.org/10.5194/hess-2016-128).
- SCHULTE, P., VAN GELDERN, R., FREITAG, H., KARIM, A., NÉGREL, P., PETELET-GIRAUD, E., PROBST, A., PROBST, J.-L., TELMER, K., VEIZER, J. & BARTH, J. A. C. 2011. Applications of stable water and carbon isotopes in watershed research: Weathering, carbon cycling, and water balances. *Earth-Science Reviews*, 109, 20-31, [10.1016/j.earscirev.2011.07.003](https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2011.07.003).
- SEAR, D. A., ARMITAGE, P. D. & DAWSON, F. H. 1999. Groundwater dominated rivers. *Hydrological Processes*, 13, 255-276, [doi:10.1002/\(sici\)1099-1085\(19990228\)13:3<255::aid-hyp737>3.0.co;2-y](https://doi.org/10.1002/(sici)1099-1085(19990228)13:3<255::aid-hyp737>3.0.co;2-y).
- SERIANZ, L. 2013. Hidrogeologija izvir Zmrzlek v dolini reke Radovne. Diplomsko delo, Univerza v Ljubljani, Naravoslovniška fakulteta.
- SERIANZ, L. 2015. Hidrogeološka analiza vodne bilance reke Radovne. Magistrsko delo, Univerza v Ljubljani, Naravoslovniška fakulteta.
- SINGH, K. K. K. 2006. Application of Ground Penetrating Radar for hydro-geological study. *Journal of Scientific & Industrial Research*, 65, 160-164.

SOPHOCLEOUS, M. 2002. Interactions between groundwater and surface water: the state of the science. *Hydrogeology Journal*, 10, 52-67, [10.1007/s10040-001-0170-8](https://doi.org/10.1007/s10040-001-0170-8).

SOULSBY, C., TETZLAFF, D., VAN DEN BEDEM, N., MALCOLM, I. A., BACON, P. J. & YOUNGSON, A. F. 2007. Inferring groundwater influences on surface water in montane catchments from hydrochemical surveys of springs and streamwaters. *Journal of Hydrology*, 333, 199-213, [10.1016/j.jhydrol.2006.08.016](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.08.016).

SPRINGER, A. E. & STEVENS, L. E. 2008. Spheres of discharge of springs. *Hydrogeology Journal*, 17, 83-93, [10.1007/s10040-008-0341-y](https://doi.org/10.1007/s10040-008-0341-y).

STEWART, M. K. & MCDONNELL, J. J. 1991. Modeling Base Flow Soil Water Residence Times From Deuterium Concentrations. *Water Resources Research*, 27, 2681-2693, [10.1029/91wr01569](https://doi.org/10.1029/91wr01569).

SZOCS, T., RMAN, N., SÜVEGES, M., PALCSU, L., TÓTH, G. & LAPANJE, A. 2013. The application of isotope and chemical analyses in managing transboundary groundwater resources. *Applied Geochemistry*, 32, 95-107, <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeochem.2012.10.006>.

TALLAKSEN, L. M. 1995. A review of baseflow recession analysis. *Journal of Hydrology*, 165, 349-370, [http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694\(94\)02540-R](http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694(94)02540-R).

TAYLOR, S., FENG, X. H., KIRCHNER, J. W., OSTERHUBER, R., KLAUE, B. & RENSHAW, C. E. 2001. Isotopic evolution of a seasonal snowpack and its melt. *Water Resources Research*, 37, 759-769, [10.1029/2000wr900341](https://doi.org/10.1029/2000wr900341).

TAYLOR, S., FENG, X. H., WILLIAMS, M. & MCNAMARA, J. 2002. How isotopic fractionation of snowmelt affects hydrograph separation. *Hydrological Processes*, 16, 3683-3690, [10.1002/hyp.1232](https://doi.org/10.1002/hyp.1232).

TORKAR, A. 2010. Hidrogeologija doline reke Radovne. Diplomsko delo, Univerza v Ljubljani, Naravoslovniška fakulteta.

TORKAR, A. & BRENČIČ, M. 2015. Spatio-temporal distribution of discharges in the Radovna River valley at low water conditions. *Geologija*, 58/1, 47-56, [doi:10.5474/geologija.2015.003](https://doi.org/10.5474/geologija.2015.003).

TORKAR, A., BRENČIČ, M. & VREČA, P. 2016. Chemical and isotopic characteristics of groundwater-dominated Radovna River (NW Slovenia). *Environmental Earth Sciences*, 75, 1-18, [10.1007/s12665-016-6104-5](https://doi.org/10.1007/s12665-016-6104-5).

TRČEK, B. 2001. Spremljanje prenosa snovi v nezasičeni coni kraškega vodonosnika z naravnimi sledili. Doktorska disertacija, Univerza v Ljubljani.

TRČEK, B. & ZOJER, H. 2010. Chapter 3 - Recharge of springs. *Groundwater Hydrology of Springs*. Boston: Butterworth-Heinemann.

TURC, L. 1961. Evaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle, formule climatique simplifiée et mise à jour. *Annal Agron*, 12, 13-49.

VERBOVŠEK, T. 2008. Koeficienti prepustnosti razpok in matriksa v slovenskih karbonatnih vodonosnikih. *Geologija*, 51, 245-255, [doi:10.5474/geologija.2008.025](https://doi.org/10.5474/geologija.2008.025).

VITVAR, T. & BALDERER, W. 1997. Estimation of mean water residence times and runoff generation by 180 measurements in a Pre-Alpine catchment (Rietholzbach, Eastern Switzerland). *Applied Geochemistry*, 12, 787-796, [doi:10.1016/s0883-2927\(97\)00045-0](https://doi.org/10.1016/s0883-2927(97)00045-0).

VITVAR, T., BURNS, D. A., LAWRENCE, G. B., MCDONNELL, J. J. & WOLOCK, D. M. 2002. Estimation of baseflow residence times in watersheds from the runoff hydrograph recession: method and application in the Neversink watershed, Catskill Mountains, New York. *Hydrological Processes*, 16, 1871-1877, doi:10.1002/hyp.5027.

VREČA, P. 2015. Isotopic composition of precipitation in North-West Slovenia for the period 2010-2013. *International Symposium on Isotope Hydrology: Revisiting Foundations and Exploring Frontiers*. Vienna, Austria.

VREČA, P. 2016. Izotopska sestava padavin in snežnice na območju Zgornje Radovne in Pokljuke. Osebna komunikacija. (28.9.2016).

VREČA, P., BRENČIČ, M. & LEIS, A. 2007. Comparison of monthly and daily isotopic composition of precipitation in the coastal area of Slovenia. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 43, 307-321, doi:10.1080/10256010701702739.

VREČA, P., BRENČIČ, M., SINJUR, I., VERTAČNIK, G., VOLK BAHUN, M., ORTAR, J., TORKAR, A., STIBILJ, V. & PAVŠEK, M. 2013a. Izotopska sestava padavin in snega na območju Julijskih Alp in Karavank. In: KUHAR, M. (ed.) 18. strokovno srečanje Slovenskega združenja za geodezijo in geofiziko. Ljubljana: Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.

VREČA, P., BRENČIČ, M. & TORKAR, A., Metodologija vzorčenja infiltracije telečega snega. In: ROŽIČ, B., ed. 21. posvetovanje slovenskih geologov, Ljubljana, 2013 = 21st Meeting of Slovenian Geologists, Ljubljana, 2013, 2013b Ljubljana. Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta, Oddelek za geologijo, 164-165.

VREČA, P., BRENČIČ, M., TORKAR, A., ŽIGON, S., BOLE, Z., HERIČ, J., STIBILJ, V., SVETEK, B., OGRINC, N. & KOCMAN, D. 2012. Progress report on Use of Environmental isotopes in investigations of influence of snow melt on stream runoff in the area of Julian Alps, NW Slovenia. part IAEA's Coordinated Research Project: Use of Environmental Isotopes in Assessing Water Resources in Snow, Glacier, and Permafrost Dominated Areas under Changing Climatic Conditions. Ljubljana: Institut "Jožef Stefan".

VREČA, P., BRENČIČ, M., TORKAR, A., ŽIGON, S., STIBILJ, V. & SVETEK, B. 2013c. Progress report on Use of Environmental isotopes in investigations of influence of snow melt on stream runoff in the area of Julian Alps, NW Slovenia. part IAEA's Coordinated Research Project: Use of Environmental Isotopes in Assessing Water Resources in Snow, Glacier, and Permafrost Dominated Areas under Changing Climatic Conditions. Ljubljana: Institut "Jožef Stefan".

VREČA, P., BRENČIČ, M., ŽIGON, S., STIBILJ, V. & SVETEK, B. 2014a. Final Report on Use of Environmental isotopes in investigations of influence of snow melt on stream runoff in the area of Julian Alps, NW Slovenia. part IAEA's Coordinated Research Project: Use of Environmental Isotopes in Assessing Water Resources in Snow, Glacier, and Permafrost Dominated Areas under Changing Climatic Conditions. Ljubljana: Institut "Jožef Stefan".

VREČA, P., BRONIĆ, I. K., HORVATINČIĆ, N. & BAREŠIĆ, J. 2006. Isotopic characteristics of precipitation in Slovenia and Croatia: Comparison of continental and maritime stations. *Journal of Hydrology*, 330, 457-469, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.04.005>.

VREČA, P., KRAJCAR BRONIĆ, I., LEIS, A. & BRENČIČ, M. 2008. Isotopic composition of precipitation in Ljubljana (Slovenia). *Geologija*, 51, 169-180, doi:10.5474/geologija.2008.018.

VREČA, P., KRAJCAR BRONIĆ, I., LEIS, A. & DEMŠAR, M. 2014b. Isotopic composition of precipitation at the station Ljubljana (Reaktor), Slovenia – period 2007–2010. *Geologija*, 57/2, 217-230, doi:10.5474/geologija.2014.019.

VREČA, P. & MURI, G. 2006. Changes in accumulation of organic matter and stable carbon and nitrogen isotopes in sediments of two Slovenian mountain lakes (Lake Ledvica and Lake Planina), induced by eutrophication changes. *Limnology and Oceanography*, 51, 781-790, doi:10.4319/lo.2006.51.1_part_2.0781.

VREČA, P. & MURI, G. 2010. Sediment organic matter in mountain lakes of north-western Slovenia and its stable isotopic signatures: records of natural and anthropogenic impacts. *Hydrobiologia*, 648, 35-49, doi:10.1007/s10750-010-0148-4.

WAGENER, T., SIVAPALAN, M., TROCH, P. & WOODS, R. 2007. Catchment Classification and Hydrologic Similarity. *Geography Compass*, 1, 901-931, 10.1111/j.1749-8198.2007.00039.x.

WANG, Y., CHEN, Y. & LI, W. 2012. Temporal and spatial variation of water stable isotopes (^{18}O and 2H) in the Kaidu River basin, Northwestern China. *Hydrological Processes*, 10.1002/hyp.9622, n/a-n/a, 10.1002/hyp.9622.

WHITE, W. B. 2010. Chapter 6 - Springwater geochemistry. In: BY, E., KRESIC, N. & STEVANOVIC, Z. (eds.) *Groundwater Hydrology of Springs*. Boston: Butterworth-Heinemann.

WHITE, W. M. 2013. *Geochemistry*, Wiley.

WINTER, C. T. 1999. Relation of streams, lakes, and wetlands to groundwater flow systems. *Hydrogeology Journal*, 7, 28-45, 10.1007/s100400050178.

WU, P., TANG, C., ZHU, L., LIU, C., CHA, X. & TAO, X. 2009. Hydrogeochemical characteristics of surface water and groundwater in the karst basin, southwest China. *Hydrological Processes*, 23, 2012-2022, 10.1002/hyp.7332.

XU, Z. F., JI, J. P. & SHI, C. 2011. Water geochemistry of the Chaohu Lake Basin rivers, China: Chemical weathering and anthropogenic inputs. *Applied Geochemistry*, 26, S379-S383, doi:10.1016/j.apgeochem.2011.03.066.

YANG, L., SONG, X., ZHANG, Y., HAN, D., ZHANG, B. & LONG, D. 2012. Characterizing interactions between surface water and groundwater in the Jialu River basin using major ion chemistry and stable isotopes. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16, 4265-4277, 10.5194/hess-16-4265-2012.

YEH, H.-F., LEE, C.-H. & HSU, K.-C. 2011. Oxygen and hydrogen isotopes for the characteristics of groundwater recharge: a case study from the Chih-Pen Creek basin, Taiwan. *Environmental Earth Sciences*, 62, 393-402, 10.1007/s12665-010-0534-2.

YEH, H.-F., LIN, H.-I., LEE, C.-H., HSU, K.-C. & WU, C.-S. 2014. Identifying Seasonal Groundwater Recharge Using Environmental Stable Isotopes. *Water*, 6, 2849, <http://www.mdpi.com/2073-4441/6/10/2849>

ZAJC, M. 2015. Optimizacija nizkofrekvenčnih georadarskih raziskav za karakterizacijo plitvih geoloških struktur. Doktorska disertacija, Univerza v Ljubljani.

ZAJC, M., CELARC, B. & GOSAR, A. 2015. Structural-geological and karst feature investigations of the limestone-flysch thrust-fault contact using low-frequency ground penetrating radar (Adria-Dinarides thrust zone, SW Slovenia). *Environmental Earth Sciences*, 73, 8237-8249, 10.1007/s12665-014-3987-x.

ZAJC, M., POGAČNIK, Ž. & GOSAR, A. 2014. Ground penetrating radar and structural geological mapping investigation of karst and tectonic features in flyschoid rocks as geological hazard for

exploitation. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 67, 78-87, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrmms.2014.01.011>.

ZEEBE, R. E. & WOLF-GLADROW, D. 2001. CO₂ in Seawater: Equilibrium, Kinetics, Isotopes, Elsevier Science.

ZHANG, L., SONG, X., XIA, J., YUAN, R., ZHANG, Y., LIU, X. & HAN, D. 2011. Major element chemistry of the Huai River basin, China. *Applied Geochemistry*, 26, 293-300, <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeochem.2010.12.002>.

ZHOU, J., WU, J., LIU, S., ZENG, G., QIN, J., WANG, X. & ZHAO, Q. 2015. Hydrograph Separation in the Headwaters of the Shule River Basin: Combining Water Chemistry and Stable Isotopes. *Advances in Meteorology*, 2015, 10,10.1155/2015/830306.

ZONGXING, L., QI, F., WANG, Q. J., SONG, Y., AIFANG, C. & JIANGUO, L. 2016. Contribution from frozen soil meltwater to runoff in an in-land river basin under water scarcity by isotopic tracing in northwestern China. *Global and Planetary Change*, 136, 41-51, <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloplacha.2015.12.002>.

ŽLEBNIK, L. 1966. Poročilo o hidrogeoloških raziskavah v dolini Krme. [Poročilo v arhivu Geološkega zavoda Slovenije], Geološki zavod Ljubljana.

PRILOGE

PRILOGA A: PODATKI O KEMIJSKI SESTAVI

Tabela A.1: Mersko mesto R-9, izvir Radovne

Datum	pH	T (°C)	EC (µS/cm)	Na ⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	Ca ²⁺ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)
13.5.2005	7,85	6,0	213	0,28	0,12	7,11	/	3,6	103	7,81	0,46
8.6.2005	7,75	6,1	225	0,32	0,11	7,56	39,1	3,6	123	7,76	0,82
18.7.2005	7,99	6,7	209	0,36	0,12	8,43	37,8	1,0	113	3,27	0,76
18.8.2005	8,22	7,1	205	0,34	0,11	8,52	29,4	1,2	115	1,82	0,47
14.9.2005	8,18	6,4	214	0,13	0,04	2,92	17,4	0,6	108	1,81	0,42
13.10.2005	8,07	6,5	243	0,73	0,19	8,77	43,3	1,2	125	1,97	0,53
15.11.2005	8,19	5,6	244	0,59	0,13	8,67	40,8	1,0	123	1,63	0,52
16.12.2005	8,29	5,2	204	0,40	0,16	7,69	32,3	0,5	110	1,62	0,43
17.1.2006	8,05	4,8	217	0,78	0,10	12,80	41,3	0,9	125	2,21	0,44
15.2.2006	8,15	4,5	232	0,43	0,12	8,20	37,7	0,8	128	2,30	0,48
14.3.2006	8,16	5,6	242	0,49	0,16	9,70	35,8	0,8	124	2,47	0,44
19.4.2006	8,03	4,3	225	0,34	0,18	8,49	36,7	0,6	114	1,69	0,53
19.5.2006	7,99	6,2	228	0,47	0,15	7,75	38,6	0,9	117	2,01	0,47
13.6.2006	8,06	6,4	236	0,45	0,15	7,57	39,6	0,9	122	1,85	0,55
13.7.2006	7,94	6,7	222	0,39	0,13	7,57	37,9	0,6	116	1,74	0,50
17.8.2006	8,03	6,7	219	0,27	0,13	7,24	37,8	0,5	114	1,70	0,47
20.9.2006	7,98	6,6	223	0,23	0,11	7,03	39,0	0,5	118	1,66	0,49
18.10.2006	7,92	6,1	207	0,28	0,14	6,78	33,1	0,5	107	1,74	0,45
14.11.2006	7,94	5,8	202	0,24	0,13	6,24	33,7	0,5	106	1,67	0,46
15.12.2006	7,87	5,3	198	0,23	0,12	6,86	32,3	0,4	107	1,53	0,47
15.1.2007	7,88	5,6	188	0,24	0,12	6,75	32,0	0,4	100	1,56	0,46
20.2.2007	8,35	6,0	215	0,30	0,12	7,62	33,1	0,6	117	2,23	0,46
14.3.2007	8,25	6,5	220	0,37	0,14	9,23	35,3	0,5	119	2,26	0,47

Tabela A.2: Mersko mesto R-8

Datum	pH	T (°C)	EC (µS/cm)	Na ⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	Ca ²⁺ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)
13.5.2005	7,96	7,7	236	0,38	0,12	8,67	/	3,7	120	8,13	0,48
8.6.2005	7,79	6,7	229	0,32	0,12	8,42	39,1	3,3	140	8,15	0,86
18.7.2005	8,07	7,9	217	0,38	0,12	9,11	38,9	0,9	118	3,49	0,74
18.8.2005	8,28	7,6	225	0,40	0,11	9,20	30,5	1,1	113	2,34	0,48
14.9.2005	8,25	7,3	227	0,14	0,05	3,46	19,3	0,6	115	2,19	0,45
13.10.2005	8,20	6,8	243	0,61	0,32	9,13	44,0	1,0	125	2,22	0,51
15.11.2005	8,25	6,5	244	0,42	0,12	8,61	38,8	0,8	118	2,12	0,48
16.12.2005	8,31	5,6	232	0,48	0,11	9,57	36,8	0,8	/	2,18	0,45
17.1.2006	8,05	4,8	217	0,41	0,10	12,20	39,7	0,6	114	2,19	0,42
15.2.2006	8,27	4,8	217	0,33	0,11	7,77	36,2	0,7	121	2,22	0,46
14.3.2006	8,14	5,5	231	0,40	0,17	8,85	34,9	0,7	117	2,26	0,45
20.4.2006	8,02	6,5	236	0,42	0,16	8,80	38,3	0,8	119	2,48	0,50
19.5.2006	8,05	7,4	229	0,39	0,13	7,67	38,8	0,8	119	2,25	0,46
13.6.2006	8,07	7,2	233	0,42	0,16	7,26	39,4	0,8	123	2,08	0,49
13.7.2006	7,96	8,0	227	0,43	0,17	7,91	38,1	0,7	117	2,04	0,47
17.8.2006	8,09	7,7	225	0,34	0,12	7,80	38,3	0,6	116	2,04	0,47
20.9.2006	7,95	7,4	233	0,33	0,13	7,72	39,3	0,7	120	2,12	0,61
18.10.2006	7,92	6,8	220	0,36	0,16	7,91	35,0	0,6	115	2,11	0,48
14.11.2006	8,02	6,3	216	0,30	0,14	7,38	34,9	0,5	112	2,06	0,47
15.12.2006	7,83	5,8	228	0,36	0,15	8,38	37,1	0,6	118	2,20	0,51
15.1.2007	7,84	5,7	213	0,35	0,14	8,07	34,3	0,6	114	2,09	0,47
20.2.2007	8,38	5,9	217	0,22	0,11	7,73	35,1	0,5	116	2,21	0,40
14.3.2007	8,34	6,6	221	0,32	0,14	7,69	35,9	1,0	120	2,29	0,46

Tabela A.3: Mersko mesto V-2, arteška vrtna

Datum	pH	T (°C)	EC (µS/cm)	Na ⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	Ca ²⁺ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)
12.5.2005	7,70	6,2	240	/	/	/	/	/	/	/	/
8.6.2005	7,70	6,1	241	0,31	0,11	6,89	44,4	3,3	125	7,96	1,07
18.7.2005	7,96	6,1	229	0,37	0,11	7,09	43,8	1,0	123	3,53	0,83
18.8.2005	8,14	6,0	231	0,39	0,11	7,15	34,9	1,1	113	2,20	0,55
14.9.2005	7,54	6,0	237	0,11	0,03	1,98	16,6	0,6	120	2,09	0,53
13.10.2005	8,06	6,0	235	0,40	0,11	7,12	45,2	0,6	123	1,99	0,54
19.4.2006	7,96	6,4	239	0,32	0,11	6,42	41,8	0,7	121	2,09	0,52
19.5.2006	7,92	6,1	241	0,34	0,13	6,14	44,8	0,7	127	2,20	0,55
13.6.2006	7,94	6,1	241	0,34	0,12	5,97	45,0	0,8	124	2,22	0,59
17.8.2006	8,08	6,1	237	0,35	0,12	6,29	43,1	0,7	123	2,05	0,57
20.9.2006	7,90	6,2	233	0,35	0,12	6,05	43,1	0,7	121	1,94	0,54
15.12.2006	7,67	5,9	231	0,29	0,11	5,01	39,1	0,6	120	1,88	0,53
14.3.2007	8,18	6,2	229	0,35	0,09	6,63	41,4	0,5	125	1,95	0,52

Tabela A.4: Mersko mesto ZM-1, izvir Zmrzlek

Datum	pH	T (°C)	EC (μ S/cm)	Na ⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	Ca ²⁺ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)
12.5.2005	7,95	6,5	235	0,61	0,11	5,46	/	3,9	120	7,76	0,44
8.6.2005	7,80	6,9	229	0,38	0,10	5,39	43,7	3,5	125	7,51	0,84
18.7.2005	8,09	7,5	235	0,63	0,11	6,22	47,7	1,2	125	3,35	0,71
18.8.2005	8,23	6,3	239	0,48	0,10	5,88	37,8	1,1	118	2,03	0,47
14.9.2005	7,05	7,4	266	0,18	0,04	1,96	20,4	1,0	138	2,30	0,42
13.10.2005	8,26	6,1	252	0,47	0,13	6,08	52,8	0,6	130	1,99	0,35
15.11.2005	7,83	5,6	303	0,47	0,10	7,64	56,8	0,8	168	2,11	0,42
16.12.2005	7,91	4,3	290	0,57	0,09	8,53	50,3	0,8	153	2,19	0,48
17.1.2006	7,72	3,3	285	0,50	0,07	11,50	56,8	0,8	150	2,26	0,54
14.2.2006	7,96	3,4	276	0,40	0,10	7,39	51,0	0,9	156	2,34	0,60
14.3.2006	7,86	3,4	294	0,67	0,15	7,46	48,6	1,3	142	2,58	0,63
19.4.2006	8,01	6,2	246	0,76	0,14	5,69	44,4	1,4	122	2,28	0,71
19.5.2006	7,98	6,0	220	0,37	0,11	4,17	43,0	0,7	114	1,66	0,46
13.6.2006	8,00	6,7	233	0,44	0,11	4,74	45,7	0,9	120	1,92	0,47
13.7.2006	7,99	10,2	223	/	/	/	/	1,0	113	1,81	0,37
17.8.2006	8,07	6,8	235	0,53	0,11	4,58	44,6	1,0	120	1,79	0,43
20.9.2006	7,90	6,1	240	0,37	0,10	4,34	47,7	0,7	124	1,82	0,44
18.10.2006	7,63	6,3	280	0,55	0,11	6,62	51,9	0,9	146	2,02	0,40
14.11.2006	7,71	5,9	289	0,39	0,07	6,57	50,2	0,8	149	2,05	0,47
15.12.2006	7,72	5,3	258	0,60	0,13	5,30	47,7	1,1	133	2,25	0,47
15.1.2007	7,67	4,5	269	0,46	0,08	7,66	49,3	0,9	146	2,17	0,52
20.2.2007	7,96	3,6	273	0,54	0,07	6,60	50,1	0,9	144	2,51	0,55
14.3.2007	8,25	6,2	255	0,92	0,16	5,72	47,0	2,0	135	2,46	0,51

Tabela A.5: Mersko mesto Z-1, izvir Zatrep

Datum	pH	T (°C)	EC (µS/cm)	Na ⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	Ca ²⁺ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)
12.5.2005	7,92	6,1	238	0,67	0,11	5,28	/	3,9	120	7,78	0,41
8.6.2005	7,65	6,0	226	0,40	0,16	5,44	43,1	3,6	143	7,52	0,84
18.7.2005	7,90	6,2	238	0,69	0,13	5,76	48,1	1,4	128	3,38	0,72
18.8.2005	8,05	5,9	241	0,54	0,11	5,75	38,4	1,2	118	1,96	0,44
14.9.2005	8,15	6,1	267	0,21	0,05	2,13	23,5	1,1	135	2,31	0,43
13.10.2005	8,07	5,9	256	0,52	0,13	6,20	51,7	0,7	135	1,99	0,33
15.11.2005	8,14	6,1	269	0,62	0,15	7,17	49,8	1,1	137	2,62	0,44
19.4.2006	7,92	6,0	263	1,24	0,13	4,65	49,1	2,7	127	2,40	0,63
19.5.2006	7,91	5,9	237	0,55	0,11	4,03	46,1	1,2	124	1,77	0,43
13.6.2006	8,05	5,9	234	0,44	0,12	5,11	44,9	0,9	122	1,93	0,46
13.7.2006	7,94	6,4	220	0,50	0,16	5,21	40,5	1,0	113	1,83	0,43
17.8.2006	7,98	6,1	238	0,61	0,12	4,79	46,2	1,1	121	1,82	0,49
20.9.2006	7,92	5,9	251	0,56	0,13	4,53	49,7	1,0	211	1,75	0,37
18.10.2006	7,74	6,0	259	0,66	0,20	5,61	47,3	1,3	133	2,24	0,44
14.11.2006	8,00	6,1	253	0,65	0,18	5,86	45,9	1,2	132	2,33	0,40
15.12.2006	7,66	5,8	262	0,70	0,14	5,43	48,1	1,2	135	2,25	0,43
20.2.2007	8,06	6,6	267	0,72	0,16	6,88	47,3	1,7	143	3,23	0,42
14.3.2007	8,12	6,4	259	1,13	0,16	5,90	48,4	2,2	137	2,45	0,54

Tabela A.6: Mersko mesto L-1, izvir Lipnik

Datum	pH	T (°C)	EC (µS/cm)	Na ⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	Ca ²⁺ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)
12.5.2005	7,60	6,4	274	1,41	0,20	4,08	/	4,9	163	8,39	0,38
8.6.2005	7,56	6,6	271	1,11	0,25	5,18	53,0	6,0	145	9,47	0,87
18.7.2005	7,78	6,7	267	1,40	0,25	4,79	55,9	2,5	135	4,06	0,75
18.8.2005	7,90	6,4	266	1,26	0,21	4,89	43,1	2,1	133	2,70	0,49
14.9.2005	7,88	6,6	299	0,44	0,12	1,94	28,3	2,4	150	3,30	0,43
13.10.2005	7,81	6,1	301	1,17	0,26	4,69	65,6	1,9	155	2,98	0,36
15.11.2005	7,81	6,7	294	1,32	0,29	5,05	56,9	2,3	145	3,52	0,45
15.12.2005	7,92	7,1	287	1,83	0,31	4,04	52,8	3,4	140	3,71	0,48
16.1.2006	7,99	7,0	282	2,01	0,33	7,21	/	3,2	141	4,00	0,47
14.2.2006	7,94	6,9	276	1,28	0,32	5,00	52,5	2,7	148	4,04	0,55
14.3.2006	7,96	7,0	292	3,84	0,34	3,86	48,8	7,5	132	3,90	0,60
19.4.2006	7,89	6,5	270	2,01	0,24	3,01	50,5	3,8	129	2,98	0,48
19.5.2006	7,89	6,1	267	1,07	0,21	3,67	54,2	2,3	136	2,55	0,38
13.6.2006	7,97	6,3	273	1,05	0,22	3,85	54,5	2,6	138	2,81	0,42
13.7.2006	7,85	6,7	283	1,25	0,31	5,20	53,8	2,9	142	3,52	0,43
17.8.2006	7,77	6,5	272	/	/	/	/	2,4	136	2,68	0,50
20.9.2006	7,79	6,6	279	1,12	0,23	3,34	56,2	2,0	140	2,44	0,38
18.10.2006	7,73	6,6	291	1,27	0,31	4,69	56,3	2,6	148	3,16	0,44
14.11.2006	7,75	6,8	301	1,35	0,36	4,50	57,0	3,2	151	3,69	0,45
14.12.2006	7,54	6,6	284	1,33	0,27	3,43	55,7	2,5	145	3,00	0,40
15.1.2007	7,71	7,0	289	1,60	0,35	4,97	55,1	3,4	147	3,87	0,44
20.2.2007	7,97	7,2	279	2,67	0,32	3,98	52,7	5,4	140	3,75	0,51
14.3.2007	7,98	6,8	277	2,29	0,32	3,67	54,7	4,1	142	3,14	0,42

Tabela A.7: Mersko mesto R-5

Datum	pH	T (°C)	EC (µS/cm)	Na ⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	Ca ²⁺ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)
12.5.2005	8,33	8,5	253	0,75	0,15	6,70	/	4,1	133	8,17	0,43
8.6.2005	8,03	8,1	242	0,51	0,11	7,55	43,5	3,8	138	8,38	0,85
18.7.2005	8,25	10,1	222	0,58	0,12	7,91	44,3	1,3	125	3,70	0,73
18.8.2005	8,30	8,3	248	0,65	0,13	7,35	35,9	1,4	123	2,46	0,42
14.9.2005	8,28	9,9	253	0,24	0,07	3,55	27,0	1,0	130	2,45	0,41
13.10.2005	8,36	7,0	259	0,68	0,18	8,20	52,5	1,0	133	2,44	0,45
15.11.2005	8,42	6,1	255	0,55	0,12	7,87	44,3	1,0	130	2,47	0,46
15.12.2005	8,18	4,6	262	0,78	0,17	8,61	43,3	1,4	134	2,69	0,47
16.1.2006	8,33	3,7	249	0,73	0,16	11,30	48,2	1,1	131	2,74	0,46
14.2.2006	8,34	4,9	247	0,55	0,17	7,19	44,5	1,2	137	2,80	0,51
14.3.2006	8,24	5,4	264	1,20	0,19	7,45	41,9	2,2	130	2,93	0,52
19.4.2006	8,07	6,6	259	1,31	0,19	6,34	46,4	2,3	127	2,75	0,55
19.5.2006	8,06	6,7	241	0,58	0,13	5,64	45,0	1,3	125	2,18	0,43
13.6.2006	8,31	9,4	245	0,57	0,16	6,59	44,1	1,3	129	2,36	0,47
13.7.2006	8,29	10,7	235	0,53	0,14	7,25	41,4	1,0	124	2,28	0,44
17.8.2006	8,21	9,8	243	0,62	0,15	6,54	44,2	1,1	126	2,23	0,47
20.9.2006	8,06	7,7	255	0,62	0,15	5,85	46,6	1,1	131	2,19	0,49
18.10.2006	8,04	7,0	245	0,56	0,18	7,42	42,4	1,0	128	2,35	0,43
14.11.2006	8,14	6,7	239	0,50	0,16	7,48	40,6	0,9	126	2,35	0,44
14.12.2006	7,84	5,9	257	0,80	0,19	6,87	45,4	1,3	134	2,55	0,49
15.1.2007	8,05	6,4	239	0,58	0,16	7,69	42,1	1,1	128	2,61	0,50
20.2.2007	8,54	8,2	243	0,78	0,17	7,01	43,2	1,2	132	2,72	0,48
14.3.2007	8,43	8,1	252	1,06	0,19	6,65	45,4	2,0	127	2,72	0,49

Tabela A.8: Mersko mesto CR-1, izvir Rečica

Datum	pH	T (°C)	EC (µS/cm)	Na ⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	Ca ²⁺ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)
12.5.2005	7,54	7,5	304	0,49	0,14	11,70	/	3,8	158	9,48	0,53
8.6.2005	7,68	7,5	316	0,41	0,16	13,80	51,3	4,1	168	12,00	1,21
18.7.2005	7,70	7,6	278	0,51	0,16	11,00	51,4	1,2	148	5,10	1,01
18.8.2005	7,70	7,5	286	0,53	0,15	10,50	41,5	1,2	143	3,93	0,77
14.9.2005	7,05	7,5	326	0,13	0,04	3,81	19,2	0,9	168	4,32	0,60
13.10.2005	7,82	7,4	329	0,57	0,16	12,20	60,2	0,8	170	4,34	0,61
15.11.2005	7,87	7,5	339	0,49	0,15	16,60	53,1	1,0	176	4,37	0,54
15.12.2005	7,96	7,5	294	0,52	0,12	10,90	47,4	1,1	149	4,30	0,60
16.1.2006	7,76	7,5	310	0,51	0,13	20,00	52,8	1,0	164	4,70	0,54
14.2.2006	7,88	7,6	312	0,45	0,17	13,80	49,3	1,0	164	4,77	0,58
14.3.2006	7,45	7,4	285	0,51	0,18	9,43	44,1	1,0	143	4,53	0,71
19.4.2006	7,70	7,3	281	0,41	0,13	8,63	47,6	0,8	140	3,63	0,63
19.5.2006	7,76	7,4	315	0,41	0,16	12,40	51,6	0,9	168	4,13	0,56
13.6.2006	7,89	7,4	303	0,39	0,16	10,60	51,3	0,8	158	4,03	0,62
13.7.2006	7,80	7,7	335	0,47	0,19	16,30	50,1	/	179	/	/
17.8.2006	7,81	7,5	300	0,39	0,14	10,80	49,1	0,8	/	3,95	0,75
20.9.2006	7,75	7,4	280	0,40	0,13	6,50	51,4	0,8	143	3,27	0,78
18.10.2006	7,69	7,5	311	0,46	0,19	11,70	50,9	0,9	162	4,13	0,68
14.11.2006	7,75	7,5	314	0,50	0,19	13,30	50,6	0,9	165	4,31	0,64
14.12.2006	7,53	7,3	288	0,48	0,16	7,65	51,6	1,0	151	3,90	0,64
15.1.2007	7,70	7,7	314	0,45	0,17	13,60	49,5	1,0	169	4,47	0,59
20.2.2007	8,04	7,7	278	0,43	0,14	8,46	48,2	0,8	147	4,31	0,63
14.3.2007	8,04	7,6	265	0,40	0,16	8,65	49,4	0,7	151	3,89	0,62

Tabela A.9: Mersko mesto R-3

Datum	pH	T (°C)	EC (µS/cm)	Na ⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	Ca ²⁺ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)
12.5.2005	8,23	9,2	325	0,76	0,14	6,58	/	4,1	135	8,27	0,39
8.6.2005	8,24	7,3	244	0,58	0,13	8,00	44,5	4,4	143	8,98	0,92
18.7.2005	8,22	9,4	237	0,69	0,15	8,51	44,6	1,4	128	3,82	0,75
18.8.2005	8,36	8,8	250	0,68	0,13	7,19	37,0	1,5	125	2,55	0,46
14.9.2005	8,37	8,0	256	0,33	0,11	4,28	30,6	1,1	130	2,54	0,46
13.10.2005	8,43	6,7	263	0,74	0,18	7,60	47,1	1,1	133	2,45	0,47
15.11.2005	8,48	5,7	261	0,65	0,14	8,09	45,0	1,2	133	2,55	0,49
15.12.2005	8,56	4,8	268	0,99	0,47	8,92	45,0	2,0	137	2,80	0,42
16.1.2006	8,43	3,0	258	1,01	0,17	12,40	52,8	1,4	136	2,95	0,49
14.2.2006	8,60	3,2	255	0,71	0,21	7,61	44,3	1,4	143	2,98	0,53
14.3.2006	8,36	4,6	278	1,51	0,28	8,72	44,0	2,6	137	3,17	0,59
19.4.2006	8,24	6,8	262	1,30	0,18	6,46	46,4	2,3	130	2,84	0,56
19.5.2006	8,13	6,7	243	0,65	0,16	5,74	45,3	1,3	125	2,22	0,47
13.6.2006	8,45	9,4	246	0,65	0,17	6,91	45,1	1,4	131	2,38	0,45
13.7.2006	8,38	9,8	239	0,62	0,15	7,57	42,2	/	/	/	/
17.8.2006	8,29	8,6	247	0,69	0,15	6,81	46,0	1,2	202	2,31	0,48
20.9.2006	8,13	7,3	256	0,65	0,15	6,01	48,0	1,2	201	2,24	0,47
18.10.2006	8,16	6,5	249	0,60	0,21	7,15	41,8	1,1	130	2,47	0,48
14.11.2006	8,28	5,7	242	0,60	0,18	7,66	41,0	1,1	129	2,45	0,45
14.12.2006	8,02	5,5	258	0,84	0,19	6,98	46,2	1,4	137	2,70	0,51
15.1.2007	8,05	4,9	247	0,69	0,18	7,89	42,9	1,2	131	2,60	0,52
20.2.2007	8,62	5,4	256	0,94	0,21	7,60	43,8	1,8	137	3,02	0,53
14.3.2007	8,51	7,0	254	0,98	0,18	6,24	47,0	2,1	140	2,80	0,43

PRILOGA B: PODATKI O IZOTOPSKI SESTAVI $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ IN $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$

Tabela B.1: Mersko mesto R-9, izvir Radovna

Lokacija	Datum	$\delta^2\text{H}$ (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ (‰)
R-9	13.5.2005	-68,7	-10,28	-6,7
R-9	8.6.2005	-72,4	-10,18	-6,6
R-9	18.7.2005	-69,9	-10,18	-6,5
R-9	18.8.2005	-69,8	-10,41	-7,1
R-9	14.9.2005	-71,4	-10,38	-6,0
R-9	13.10.2005	-67,3	-10,16	-8,1
R-9	15.11.2005	-70,1	-10,19	-6,7
R-9	1.12.2005	-73,0	-10,43	-5,9
R-9	17.1.2006	-68,8	-10,04	-7,6
R-9	15.2.2006	-68,8	-10,08	-6,9
R-9	14.3.2006	-67,3	-10,18	-6,8
R-9	19.5.2006	-70,7	-10,36	-8,1
R-9	13.6.2006	-72,6	-10,54	-7,5
R-9	13.7.2006	-70,9	-10,79	-6,9
R-9	17.8.2006	-72,7	-10,88	-7,3
R-9	20.9.2006	-72,9	-10,84	-7,2
R-9	18.10.2006	-71,0	-10,89	-7,1
R-9	14.11.2006	-72,3	-10,84	-6,4
R-9	14.12.2006	-71,8	-10,91	-5,7
R-9	15.1.2007	-74,3	-10,90	-5,45
R-9	20.2.2007	-70,7	-10,51	-7,14
R-9	14.3.2007	-70,2	-10,40	-7,23
R-9	19.4.2007	-71,5	-10,64	-5,97
R-9	17.5.2007	-72,5	-10,65	-6,60
R-9	13.6.2007	-72,8	-10,69	-5,84
R-9	12.7.2007	-72,3	-10,68	-6,42
R-9	16.8.2007	-74,1	-10,87	-5,82
R-9	12.9.2007	-73,7	-10,75	-6,19
R-9	16.10.2007	-70,3	-10,48	-7,30
R-9	18.12.2007	-70,4	-10,38	-6,60

Tabela B.2: Mersko mesto R-8

Lokacija	Datum	$\delta^2\text{H}$ (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ (‰)
R-8	13.5.2005	-64,6	-10,01	-7,1
R-8	8.6.2005	-67,4	-10,07	-6,5
R-8	18.7.2005	-68,1	-10,01	-6,8
R-8	18.8.2005	-70,4	-10,08	-6,7
R-8	14.9.2005	-69,0	-10,15	-6,7
R-8	13.10.2005	-68,1	-10,04	-7,8
R-8	15.11.2005	-69,0	-9,94	-6,6
R-8	1.12.2005	-69,2	-10,08	-6,8
R-8	17.1.2006	-67,7	-10,20	-6,5
R-8	15.2.2006	-69,7	-10,18	-6,5
R-8	14.3.2006	-66,8	-10,22	-6,7
R-8	20.4.2006	-71,2	-10,41	-8,3
R-8	19.5.2006	-69,1	-10,34	-7,7
R-8	13.6.2006	-71,0	-10,42	-8,2
R-8	13.7.2006	-70,8	-10,48	-6,9
R-8	17.8.2006	-72,8	-10,52	-6,8
R-8	20.9.2006	-70,7	-10,45	-7,0
R-8	18.10.2006	-73,1	-10,54	-7,2
R-8	14.11.2006	-70,5	-10,55	-6,9
R-8	14.12.2006	-67,3	-10,24	-7,1
R-8	15.1.2007	-67,6	-10,45	-6,5
R-8	20.2.2007	-70,5	-10,39	-6,6
R-8	14.3.2007	-70,5	-10,32	-7,1
R-8	19.4.2007	-70,4	-10,34	-6,9
R-8	17.5.2007	-71,5	-10,42	-6,9
R-8	13.6.2007	-70,9	-10,48	-6,5
R-8	12.7.2007	-68,8	-10,42	-7,0
R-8	16.8.2007	-70,5	-10,50	-6,4
R-8	12.9.2007	-71,6	-10,45	-7,2
R-8	16.10.2007	-67,1	-10,36	-8,0
R-8	18.12.2007	-70,1	-10,24	-7,8

Tabela B.3: Mersko mesto V-2, arteška vrtina

Lokacija	Datum	$\delta^2\text{H}$ (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ (‰)
V-2	14.3.2007	-67,9	-10,25	-8,2
V-2	19.4.2007	-66,3	-10,04	-8,2
V-2	17.5.2007	-65,4	-10,02	-8,2
V-2	13.6.2007	-67,1	-10,14	-8,2
V-2	12.7.2007	-67,9	-10,33	-8,0
V-2	16.8.2007	-68,9	-10,25	-7,8
V-2	16.10.2007	-70,5	-10,37	-8,6

Tabela B.4: Mersko mesto ZM-1, izvir Zmrzlek

Lokacija	Datum	$\delta^2\text{H}$ (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ (‰)
ZM-1	12.5.2005	-74,5	-10,94	-8,5
ZM-1	8.6.2005	-73,8	-10,82	-7,5
ZM-1	18.7.2005	-65,4	-9,73	-8,6
ZM-1	18.8.2005	-65,6	-9,58	-9,1
ZM-1	14.9.2005	-65,0	-9,69	-9,2
ZM-1	13.10.2005	-67,2	-10,37	-9,7
ZM-1	15.11.2005	-66,0	-9,97	-9,9
ZM-1	1.12.2005	-68,5	-10,11	-10,5
ZM-1	17.1.2006	-69,1	-10,08	-9,7
ZM-1	14.2.2006	-67,1	-10,04	-9,8
ZM-1	14.3.2006	-70,4	-10,65	-10,5
ZM-1	19.4.2006	-76,9	-11,24	-8,9
ZM-1	19.5.2006	-83,4	-11,84	-9,4
ZM-1	13.6.2006	-77,0	-10,99	-9,3
ZM-1	13.7.2006	-77,4	-11,08	-7,5
ZM-1	17.8.2006	-70,2	-10,17	-8,3
ZM-1	20.9.2006	-58,3	-9,71	-9,2
ZM-1	18.10.2006	-62,8	-9,84	-10,3
ZM-1	14.11.2006	-60,4	-9,93	-10,1
ZM-1	14.12.2006	-56,6	-8,96	-9,9
ZM-1	15.1.2007	-61,5	-9,63	-9,9
ZM-1	20.2.2007	-62,8	-9,60	-9,1
ZM-1	14.3.2007	-65,2	-9,80	-9,0
ZM-1	19.4.2007	-76,6	-11,10	-7,9
ZM-1	17.5.2007	-76,1	-11,10	-7,4
ZM-1	13.6.2007	-72,8	-10,73	-7,4
ZM-1	12.7.2007	-64,5	-9,52	-8,7
ZM-1	16.8.2007	-65,7	-9,90	-7,9
ZM-1	12.9.2007	-62,5	-9,50	-8,9
ZM-1	16.10.2007	-63,0	-9,49	-9,5
ZM-1	18.12.2007	-62,4	-9,63	-10,4

Tabela B.5: Mersko mesto Z-1, izvir Zatrep

Lokacija	Datum	$\delta^2\text{H}$ (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ (‰)
Z-1	12.5.2005	-73,9	-10,86	-8,5
Z-1	8.6.2005	-71,9	-10,87	-7,5
Z-1	18.7.2005	-65,0	-9,79	-8,7
Z-1	18.8.2005	-62,7	-9,60	-8,8
Z-1	14.9.2005	-66,4	-9,79	-9,3
Z-1	13.10.2005	-70,1	-10,31	-10,1
Z-1	15.11.2005	-66,3	-9,90	-9,1
Z-1	19.4.2006	-75,0	-11,14	-9,0
Z-1	19.5.2006	-80,5	-11,70	-9,8
Z-1	13.6.2006	-76,0	-10,95	-10,9
Z-1	13.7.2006	-75,3	-11,03	-7,8
Z-1	17.8.2006	-68,8	-10,22	-8,7
Z-1	20.9.2006	-63,6	-9,69	-9,6
Z-1	18.10.2006	-63,4	-9,68	-9,8
Z-1	14.11.2006	-58,9	-9,55	-9,0
Z-1	14.12.2006	-56,9	-9,05	-10,1
Z-1	20.2.2007	-64,3	-9,70	-9,7
Z-1	14.3.2007	-66,4	-9,80	-9,2
Z-1	19.4.2007	-74,7	-11,0	-9,2
Z-1	17.5.2007	-75,3	-11,2	-7,4
Z-1	13.6.2007	-73,8	-10,77	-6,7
Z-1	12.7.2007	-63,0	-9,48	-9,3
Z-1	16.8.2007	-63,2	-9,70	-8,4
Z-1	12.9.2007	-61,4	-9,40	-9,2
Z-1	16.10.2007	-63,4	-9,52	-9,9

Tabela B.6: Mersko mesto L-1, izvir Lipnik

Lokacija	Datum	$\delta^2\text{H}$ (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ (‰)
L-1	12.5.2005	-68,6	-10,18	-10,1
L-1	8.6.2005	-68,4	-10,10	-9,5
L-1	18.7.2005	-63,6	-9,52	-10,0
L-1	18.8.2005	-60,7	-9,40	-10,7
L-1	14.9.2005	-60,9	-9,46	-10,7
L-1	13.10.2005	-66,9	-9,75	-11,5
L-1	15.11.2005	-64,7	-9,60	-10,6
L-1	1.12.2005	-66,5	-9,87	-11,5
L-1	16.1.2006	-64,1	-9,64	-9,9
L-1	14.2.2006	-64,0	-9,64	-10,0
L-1	14.3.2006	-65,8	-9,90	-10,2
L-1	19.4.2006	-72,1	-10,70	-11,0
L-1	19.5.2006	-76,0	-10,99	-10,8
L-1	13.6.2006	-70,8	-10,44	-11,7
L-1	13.7.2006	-67,8	-9,99	-9,6
L-1	17.8.2006	-66,9	-9,96	-10,6
L-1	20.9.2006	-58,7	-9,47	-11,0
L-1	18.10.2006	-59,4	-9,58	-11,1
L-1	14.11.2006	-61,4	-9,60	-10,6
L-1	14.12.2006	-57,7	-9,06	-11,4
L-1	15.1.2007	-60,3	-9,55	-10,8
L-1	20.2.2007	-59,1	-9,42	-10,3
L-1	14.3.2007	-61,5	-9,60	-10,6
L-1	19.4.2007	-68,5	-10,40	-10,5
L-1	17.5.2007	-68,1	-10,30	-9,6
L-1	13.6.2007	-69,3	-10,10	-9,4
L-1	12.7.2007	-62,2	-9,28	-10,9
L-1	16.8.2007	-61,6	-9,50	-10,0
L-1	12.9.2007	-59,6	-9,30	-10,6
L-1	16.10.2007	-62,1	-9,38	-10,8
L-1	18.12.2007	-60,5	-9,30	-11,4

Tabela B.7: Mersko mesto R-5

Lokacija	Datum	$\delta^2\text{H}$ (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ (‰)
R-5	12.5.2005	-68,5	-10,19	-7,9
R-5	8.6.2005	-71,2	-10,13	-7,1
R-5	18.7.2005	-67,4	-9,89	-7,6
R-5	18.8.2005	-67,3	-9,80	-8,7
R-5	14.9.2005	-69,2	-9,92	-7,8
R-5	13.10.2005	-69,5	-10,01	-8,7
R-5	15.11.2005	-69,5	-9,95	-7,8
R-5	1.12.2005	-68,4	-9,88	-8,7
R-5	16.1.2006	-66,3	-9,98	-8,0
R-5	14.2.2006	-67,5	-9,96	-8,1
R-5	14.3.2006	-64,8	-9,98	-8,3
R-5	19.4.2006	-69,8	-10,64	-9,1
R-5	19.5.2006	-74,1	-11,03	-9,6
R-5	13.6.2006	-72,0	-10,51	-8,8
R-5	13.7.2006	-70,3	-10,55	-7,7
R-5	17.8.2006	-69,8	-10,36	-8,3
R-5	20.9.2006	-63,4	-9,98	-9,4
R-5	18.10.2006	-64,6	-10,25	-8,3
R-5	14.11.2006	-64,8	-10,21	-7,9
R-5	14.12.2006	-61,2	-9,63	-9,1
R-5	15.1.2007	-68,5	-10,07	-8,1
R-5	20.2.2007	-67,5	-9,95	-8,3
R-5	14.3.2007	-66,0	-9,90	-8,9
R-5	19.4.2007	-71,3	-10,44	-8,1
R-5	17.5.2007	-71,0	-10,43	-7,4
R-5	13.6.2007	-70,5	-10,43	-6,8
R-5	12.7.2007	-64,8	-9,78	-9,0
R-5	16.8.2007	-67,6	-10,11	-7,6
R-5	12.9.2007	-67,0	-9,94	-8,5
R-5	16.10.2007	-68,8	-9,97	-8,5
R-5	18.12.2007	-66,3	-9,90	-8,6

Tabela B.8: Mersko mesto CR-1, izvir Rečica

Lokacija	Datum	$\delta^2\text{H}$ (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ (‰)
CR-1	12.5.2005	-60,8	-9,42	-11,1
CR-1	8.6.2005	-63,4	-9,44	-10,6
CR-1	18.7.2005	-61,2	-9,14	-11,2
CR-1	18.8.2005	-61,3	-9,03	-11,6
CR-1	14.9.2005	-62,4	-9,21	-11,4
CR-1	13.10.2005	-61,5	-9,23	-12,4
CR-1	15.11.2005	-63,0	-9,31	-11,2
CR-1	1.12.2005	-66,2	-9,96	-11,9
CR-1	16.1.2006	-62,2	-9,38	-10,8
CR-1	14.2.2006	-61,0	-9,38	-10,7
CR-1	14.3.2006	-63,9	-9,81	-10,6
CR-1	19.4.2006	-70,8	-10,52	-11,1
CR-1	19.5.2006	-66,3	-9,84	-11,5
CR-1	13.6.2006	-67,8	-9,92	-12,5
CR-1	13.7.2006	-63,0	-9,56	-10,8
CR-1	17.8.2006	-64,7	-9,61	-10,8
CR-1	20.9.2006	-57,3	-9,23	-11,4
CR-1	18.10.2006	-60,2	-9,41	-11,4
CR-1	14.11.2006	-59,1	-9,39	-11,3
CR-1	14.12.2006	-58,6	-9,15	-11,7
CR-1	15.1.2007	-60,6	-9,44	-11,3
CR-1	20.2.2007	-62,1	-9,46	-10,9
CR-1	14.3.2007	-63,6	-9,65	-11,2
CR-1	19.4.2007	-63,8	-9,60	-11,1
CR-1	17.5.2007	-61,4	-9,50	-11,1
CR-1	13.6.2007	-64,0	-9,59	-11,2
CR-1	12.7.2007	-61,0	-9,20	-11,2
CR-1	12.9.2007	-61,8	-9,29	-11,1
CR-1	16.10.2007	-60,1	-9,18	-11,7
CR-1	18.12.2007	-62,5	-9,31	-11,8

Tabela B.9: Mersko mesto R-3

Lokacija	Datum	$\delta^2\text{H}$ (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ (‰)
R-3	12.5.2005	-69,7	-10,21	-7,7
R-3	8.6.2005	-68,8	-10,18	-7,0
R-3	18.7.2005	-66,0	-9,89	-8,0
R-3	18.8.2005	-67,0	-9,74	-8,4
R-3	14.9.2005	-68,5	-9,91	-8,0
R-3	13.10.2005	-68,8	-9,98	-8,8
R-3	15.11.2005	-65,5	-9,88	-7,5
R-3	15.12.2005	-68,5	-9,93	-8,6
R-3	16.1.2006	-66,6	-9,93	-8,2
R-3	14.2.2006	-66,8	-9,91	-7,5
R-3	14.3.2006	-66,3	-10,01	-8,2
R-3	19.4.2006	-70,7	-10,60	-9,3
R-3	19.5.2006			-9,5
R-3	13.6.2006	-71,6	-10,47	-8,3
R-3	13.7.2006	-68,4	-10,52	-8,2
R-3	17.8.2006	-71,6	-10,29	-8,1
R-3	20.9.2006	-64,2	-9,93	-9,5
R-3	18.10.2006	-61,7	-10,24	-8,4
R-3	14.11.2006	-62,0	-10,18	-8,0
R-3	14.12.2006	-62,4	-9,59	-9,1
R-3	15.1.2007	-63,3	-10,04	-8,2
R-3	20.2.2007	-66,0	-9,87	-8,6
R-3	14.3.2007	-66,9	-9,83	-8,8
R-3	19.4.2007	-71,3	-10,5	-7,9
R-3	17.5.2007	-71,1	-10,44	-7,2
R-3	13.6.2007	-69,5	-10,44	-7,0
R-3	12.7.2007	-65,0	-9,78	-8,5
R-3	16.8.2007	-67,9	-10,08	-7,5
R-3	12.9.2007	-66,9	-9,96	-8,9
R-3	16.10.2007	-65,2	-9,92	-9,0
R-3	8.12.2007	-67,0	-9,87	-8,9

Tabela B.10: Mersko mesto ST-1, izvir Strmole

Lokacija	Datum	$\delta^2\text{H}$ (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ (‰)
ST-1	13.5.2005	-60,2	-9,14	-11,8
ST-1	8.6.2005	-59,4	-8,69	-10,8
ST-1	18.7.2005	-60,6	-9,00	-11,5
ST-1	10.8.2005	-58,9	-8,78	-12,4
ST-1	1.9.2005	-56,5	-8,80	-12,4
ST-1	13.10.2005	-59,8	-9,19	-13,1
ST-1	15.11.2005	-61,3	-9,09	-13,3
ST-1	15.12.2005	-61,6	-9,45	-13,3
ST-1	16.1.2006	-59,0	-9,32	-12,4
ST-1	14.2.2006	-60,4	-9,28	-12,9
ST-1	15.3.2006	-62,5	-9,51	-12,2
ST-1	19.4.2006	-70,8	-10,79	-12,3
ST-1	19.5.2006	-64,7	-9,48	-11,1
ST-1	13.6.2006	-64,7	-9,74	-11,8
ST-1	13.7.2006	-60,7	-8,94	-11,1
ST-1	17.8.2006	-65,2	-9,69	-11,2
ST-1	20.9.2006	-58,2	-9,26	-12,1
ST-1	18.10.2006	-56,4	-9,32	-12,6
ST-1	14.11.2006	-58,8	-9,16	-13,1
ST-1	14.12.2006	-58,2	-9,17	-13,0
ST-1	15.1.2007	-59,8	-9,25	-11,6
ST-1	20.2.2007	-60,5	-9,40	-12,6
ST-1	14.3.2007	-66,5	-9,50	-12,5
ST-1	19.4.2007		-9,40	-12,1
ST-1	17.5.2007	-59,1	-9,40	-12,0
ST-1	13.6.2007	-62,3	-9,47	-12,5
ST-1	12.7.2007	-60,3	-9,08	-12,2
ST-1	16.8.2007	-60,0	-9,20	-12,2
ST-1	12.9.2007	-60,4	-9,21	-12,5
ST-1	16.10.2007	-59,5	-9,12	-12,9
ST-1	18.12.2007	-57,5	-9,14	-13,2

Tabela B.11: Mersko mesto M-1, izvir Mevkuž

Lokacija	Datum	$\delta^2\text{H}$ (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ (‰)
M-1	13.5.2005	-58,9	-8,57	-12,9
M-1	8.6.2005	-58,7	-8,52	-12,3
M-1	18.7.2005	-57,7	-8,57	-12,7
M-1	10.8.2005	-55,8	-8,69	-13,4
M-1	1.9.2005	-60,4	-8,48	-13,1
M-1	13.10.2005	-58,7	-8,68	-13,2
M-1	15.11.2005	-57,5	-8,56	-12,7
M-1	15.12.2005	-56,2	-8,66	-13,0
M-1	16.1.2006	-57,0	-8,64	-12,4
M-1	14.2.2006	-57,8	-8,62	-12,7
M-1	14.3.2006	-58,0	-8,77	-12,2
M-1	20.4.2006	-60,5	-8,75	-14,0
M-1	19.5.2006	-61,1	-8,77	-12,5
M-1	13.6.2006	-62,2	-8,88	-13,9
M-1	13.7.2006	-58,9	-8,75	-11,4
M-1	17.8.2006	-59,6	-8,78	-12,1
M-1	20.9.2006	-63,7	-9,52	-12,8
M-1	18.10.2006	-59,0	-9,02	-13,1
M-1	14.11.2006	-58,7	-8,96	-12,7
M-1	14.12.2006	-61,2	-9,45	-13,0
M-1	15.1.2007	-57,7	-8,91	-13,2
M-1	20.2.2007	-62,6	-9,36	-12,4
M-1	14.3.2007	-61,2	-9,18	-12,8
M-1	19.4.2007	-59,8	-9,13	-13,2
M-1	17.5.2007	-57,7	-9,04	-12,6
M-1	13.6.2007	-60,0	-8,88	-12,9
M-1	12.7.2007	-60,4	-9,06	-12,7
M-1	16.8.2007	-60,1	-9,12	-12,5
M-1	12.9.2007	-59,6	-9,11	-10,8
M-1	16.10.2007	-61,9	-9,10	-11,8
M-1	18.12.2007	-61,3	-8,93	-13,5

PRILOGA C: PODATKI O IZOTOPSKI SESTAVI $\delta^{18}\text{O}$ IN $\delta^2\text{H}$

Tabela C.1: Mersko mesto vodnjak

Datum	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)
25.5.2012	-10,42	-69,4
26.5.2012	-10,48	-70,2
28.5.2012	-10,31	-68,6
29.5.2012	-10,43	-70,0
30.5.2012	-10,43	-71,5
31.5.2012	-10,54	-69,5
1.6.2012	-10,26	-70,2
2.6.2012	-10,38	-70,3
4.6.2012	-10,33	-69,9
6.6.2012	-10,24	-69,7
8.6.2012	-10,36	-69,3
11.6.2012	-10,35	-69,4
13.6.2012	-10,34	-69,3
15.6.2012	-10,39	-69,1
17.6.2012	-10,47	-69,0
19.6.2012	-10,41	-69,2
22.6.2012	-10,24	-69,4
24.6.2012	-10,24	-69,4
26.6.2012	-10,19	-69,0
28.6.2012	-10,34	-69,5
30.6.2012	-10,40	-69,0
3.7.2012	-10,32	-70,2
6.7.2012	-10,30	-69,9
9.7.2012	-10,19	-69,5
12.7.2012	-10,26	-69,5
18.7.2012	-10,37	-67,9
25.7.2012	-10,26	-69,2
1.8.2012	-10,24	-69,1
9.8.2012	-9,82	-67,1
15.8.2012	-10,08	-67,2
23.8.2012	-9,91	-67,3
29.8.2012	-9,78	-65,9
7.9.2012	-10,16	-68,3
10.9.2012	-10,20	-68,1
17.9.2012	-10,18	-68,6
25.9.2012	-10,18	-68,4
1.10.2012	-10,14	-68,6
12.10.2012	-9,87	-68,8
19.10.2012	-10,04	-68,1
28.10.2012	-10,00	-67,7
23.11.2012	-10,04	-67,3
4.12.2012	-10,07	-67,9
19.12.2012	-9,91	-67,0
23.1.2013	-10,04	-67,1
18.4.2013	-10,80	-72,5
25.4.2013	-10,34	-67,9
29.4.2013	-10,11	-67,5
4.5.2013	-9,93	-67,2
7.5.2013	-10,39	-70,6
10.5.2013	-11,03	-74,8
13.5.2013	-11,29	-79,5
17.5.2013	-11,10	-78,0
28.5.2013	-11,00	-77,1
24.5.2013	-10,97	-76,4
31.5.2013	-11,13	-76,4
3.6.2013	-10,99	-77,0
7.6.2013	-11,12	-76,9
14.6.2013	-11,28	-76,3
18.6.2013	-11,07	-74,5
22.6.2013	-11,10	-75,5
25.6.2013	-11,20	-75,4
28.6.2013	-11,02	-75,2
2.7.2013	-10,95	-74,9
5.7.2013	-11,05	-75,3
9.7.2013	-11,04	-75,4
12.7.2013	-10,55	-74,3
18.7.2013	-11,20	-75,7
30.7.2013	-10,44	-73,4

Tabela C.2: Mersko mesto izvir

Datum	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)
26.5.2012	-9,89	-66,6
28.5.2012	-9,83	-65,9
29.5.2012	-10,11	-67,3
30.5.2012	-9,95	-67,1
31.5.2012	-10,09	-67,4
1.6.2012	-9,91	-67,0
2.6.2012	-9,92	-67,6
8.6.2012	-9,52	-67,0
11.6.2012	-10,19	-68,5
19.6.2012	-10,15	-68,1
3.7.2012	-10,25	-69,3
12.7.2012	-10,09	-68,3
18.7.2012	-10,14	-68,3
25.7.2012	-9,93	-67,0
29.8.2012	-10,20	-69,5
7.9.2012	-10,19	-69,0
1.10.2012	-10,14	-68,2
12.10.2012	-9,82	-66,5
23.11.2012	-9,91	-67,4
10.1.2013	-9,64	-65,7

Tabela C.3: Mersko mesto Gogalov Rovt

Datum	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)
15.2.2012	-10,37	-68,6
1.3.2012	-10,29	-68,7
7.3.2012	-10,33	-68,5
16.3.2012	-10,09	-68,0
29.3.2012	-10,33	-68,9
12.4.2012	-10,04	-68,3
28.4.2012	-9,70	-66,4
8.5.2012	-9,59	-66,2
10.5.2012	-9,78	-66,6
14.5.2012	-10,01	-66,1
16.5.2012	-10,14	-67,9
18.5.2012	-10,16	-67,4
20.5.2012	-10,03	-67,5
22.5.2012	-10,15	-67,4
24.5.2012	-10,12	-67,5
25.5.2012	-10,21	-67,5
26.5.2012	-10,04	-67,2
27.5.2012	-10,04	-68,7
28.5.2012	-10,07	-67,4
29.5.2012	-10,07	-68,1
30.5.2012	-10,14	-67,1
31.5.2012	-10,35	-69,1
1.6.2012	-10,09	-68,6
2.6.2012	-10,19	-69,0
4.6.2012	-10,15	-69,0
6.6.2012	-10,16	-68,9
8.6.2012	-9,87	-68,6
11.6.2012	-10,25	-69,4
13.6.2012	-10,26	-68,6
15.6.2012	-10,23	-68,3
17.6.2012	-10,27	-68,5
19.6.2012	-10,24	-68,8
22.6.2012	-10,38	-68,9
24.6.2012	-10,19	-69,5
26.6.2012	-10,17	-69,5
28.6.2012	-10,44	-68,6
30.6.2012	-10,24	-69,2
3.7.2012	-10,26	-69,5
6.7.2012	-10,27	-69,5
9.7.2012	-10,20	-69,3
12.7.2012	-10,26	-69,0
18.7.2012	-9,99	-67,6
25.7.2012	-10,14	-67,9
1.8.2012	-10,19	-68,7
15.8.2012	-10,20	-69,0
23.8.2012	-10,30	-69,1
29.8.2012	-10,10	-68,8
7.9.2012	-10,04	-68,3
10.9.2012	-10,20	-68,8
17.9.2012	-10,15	-68,4
25.9.2012	-10,03	-68,4
1.10.2012	-10,03	-67,1
12.10.2012	-10,11	-67,9
19.10.2012	-9,78	-66,9
28.10.2012	-9,91	-66,3
23.11.2012	-9,78	-65,9
4.12.2012	-9,86	-65,8
19.12.2012	-9,76	-65,9
10.1.2013	-9,91	-66,3
23.1.2013	-9,88	-66,3
11.2.2013	-9,95	-66,7
2.3.2013	-10,05	-65,0
15.3.2013	-9,62	-65,8
25.4.2013	-10,42	-70,1
28.5.2013	-10,50	-72,0
7.6.2013	-10,47	-72,0
14.6.2013	-10,50	-71,1
12.7.2013	-10,37	-69,5
18.7.2013	-10,43	-69,5
30.7.2013	-10,03	-70,2

Tabela C.4: Mersko mesto Sr. Radovna

Datum	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)
15.2.2012	-10,20	-67,3
1.3.2012	-10,07	-67,4
7.3.2012	-10,18	-67,3
16.3.2012	-10,20	-67,6
29.3.2012	-10,07	-68,2
12.4.2012	-9,93	-65,5
28.4.2012	-8,91	-60,8
8.5.2012	-9,33	-63,4
10.5.2012	-9,40	-63,3
14.5.2012	-9,55	-62,7
16.5.2012	-9,72	-62,7
18.5.2012	-9,66	-62,4
20.5.2012	-9,81	-63,5
22.5.2012	-9,55	-62,4
24.5.2012	-9,35	-61,0
25.5.2012	-9,17	-60,2
26.5.2012	-9,38	-61,3
27.5.2012	-9,37	-61,9
28.5.2012	-9,37	-60,3
29.5.2012	-9,46	-62,2
30.5.2012	-9,48	-62,5
31.5.2012	-9,61	-63,9
1.6.2012	-9,61	-64,3
2.6.2012	-9,42	-63,5
4.6.2012	-9,42	-63,8
6.6.2012	-9,44	-63,7
8.6.2012	-9,50	-63,8
11.6.2012	-9,35	-63,2
13.6.2012	-9,15	-60,7
15.6.2012	-9,03	-59,6
17.6.2012	-9,07	-60,2
19.6.2012	-9,27	-61,2
22.6.2012	-9,38	-62,4
24.6.2012	-9,34	-62,8
26.6.2012	-9,36	-63,3
28.6.2012	-9,51	-63,7
30.6.2012	-9,63	-64,2
3.7.2012	-9,41	-64,2
6.7.2012	-9,60	-64,6
9.7.2012	-9,69	-64,2
12.7.2012	-9,51	-64,3
18.7.2012	-8,56	-56,0
25.7.2012	-8,76	-57,6

1.8.2012	-9,12	-59,8
9.8.2012	-8,60	-62,8
15.8.2012	-8,70	-62,6
23.8.2012	-9,86	-64,3
29.8.2012	-9,49	-64,3
7.9.2012	-9,53	-64,1
10.9.2012	-9,74	-65,2
17.9.2012	-9,34	-62,4
25.9.2012	-9,41	-63,2
1.10.2012	-8,55	-56,3
12.10.2012	-9,02	-62,0
19.10.2012	-8,06	-53,8
28.10.2012	-8,04	-53,5
23.11.2012	-8,95	-59,9
4.12.2012	-9,09	-60,2
19.12.2012	-8,96	-59,5
10.1.2013	-9,42	-62,4
23.1.2013	-9,54	-63,5
11.2.2013	-9,55	-63,2
2.3.2013	-9,94	-65,3
15.3.2013	-9,66	-64,8
25.4.2013	-10,77	-71,9
28.5.2013	-10,47	-72,5
7.6.2013	-10,60	-72,9
14.6.2013	-10,46	-70,9
12.7.2013	-10,41	-68,0
18.7.2013	-10,18	-69,0
30.7.2013	-10,07	-68,7

Tabela C.5: Mersko mesto Klemenak

Datum	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)
15.2.2012	-10,47	-69,2
1.3.2012	-10,31	-68,6
7.3.2012	-10,42	-69,0
16.3.2012	-10,43	-69,3
29.3.2012	-10,38	-69,4
12.4.2012	-10,41	-68,7
28.4.2012	-9,93	-67,2
8.5.2012	-9,92	-66,8
10.5.2012	-9,81	-67,4
14.5.2012	-10,16	-67,8
16.5.2012	-9,87	-67,3
18.5.2012	-10,21	-67,7
20.5.2012	-9,95	-67,4
22.5.2012	-10,06	-66,7
24.5.2012	-10,25	-66,7
25.5.2012	-10,08	-67,3
26.5.2012	-10,02	-67,0
27.5.2012	-10,01	-68,2
28.5.2012	-9,96	-66,5
29.5.2012	-10,14	-67,8
30.5.2012	-10,06	-66,9
31.5.2012	-10,21	-67,7
1.6.2012	-10,20	-68,0
2.6.2012	-10,18	-68,5
4.6.2012	-10,07	-68,8
6.6.2012	-10,07	-67,8
8.6.2012	-10,01	-68,1
11.6.2012	-10,07	-68,2
13.6.2012	-10,14	-67,5
15.6.2012	-10,15	-67,6
17.6.2012	-10,02	-67,2
19.6.2012	-10,18	-67,3
22.6.2012	-10,16	-67,4
24.6.2012	-10,07	-68,4
26.6.2012	-10,08	-68,4
28.6.2012	-10,25	-68,5
30.6.2012	-10,17	-68,7
3.7.2012	-10,31	-68,6
6.7.2012	-10,26	-68,6
9.7.2012	-10,10	-69,1
12.7.2012	-10,15	-68,5
18.7.2012	-9,98	-67,1
25.7.2012	-9,88	-66,6

1.8.2012	-10,12	-67,9
9.8.2012	-9,93	-67,9
15.8.2012	-10,14	-68,3
23.8.2012	-10,22	-68,2
29.8.2012	-10,08	-68,7
7.9.2012	-10,05	-67,9
10.9.2012	-10,10	-68,5
17.9.2012	-10,10	-67,7
25.9.2012	-9,94	-67,4
1.10.2012	-9,82	-66,4
12.10.2012	-9,88	-67,1
19.10.2012	-9,50	-65,1
28.10.2012	-9,69	-65,0
23.11.2012	-9,78	-65,8
4.12.2012	-9,79	-65,8
19.12.2012	-9,60	-64,6
10.1.2013	-9,81	-66,3
23.1.2013	-9,94	-66,7
11.2.2013	-9,92	-66,2
2.3.2013	-9,90	-67,2
15.3.2013	-10,01	-67,6
11.4.2013	-10,12	-68,9
18.4.2013	-10,58	-72,1
25.4.2013	-10,57	-71,5
29.4.2013	-10,41	-70,3
4.5.2013	-10,18	-69,4
7.5.2013	-10,32	-70,4
10.5.2013	-10,38	-69,6
13.5.2013	-10,06	-70,4
17.5.2013	-10,19	-70,8
28.5.2013	-10,37	-71,9
24.5.2013	-10,52	-71,8
31.5.2013	-10,51	-72,1
3.6.2013	-10,33	-71,2
7.6.2013	-10,46	-72,0
14.6.2013	-10,58	-71,8
18.6.2013	-10,53	-71,1
22.6.2013	-10,68	-71,1
25.6.2013	-10,83	-70,9
28.6.2013	-10,42	-70,8
2.7.2013	-10,48	-70,7
5.7.2013	-10,24	-70,3
9.7.2013	-10,44	-70,0
12.7.2013	-10,04	-69,7
18.7.2013	-10,34	-68,3
30.7.2013	-9,64	-68,4