

UNIVERZA V NOVI GORICI
FAKULTETA ZA PODIPLOMSKI ŠTUDIJ

**ZNAČILNOSTI PRETAKANJA SKOZI
VADOZNO CONO KRASA**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Janja Kogovšek

Mentorica: Doc. dr. Metka Petrič
Komentorica: Doc. dr. Sanja Kapelj

Nova Gorica, 2009

UNIVERSITY OF NOVA GORICA
GRADUATED SCHOOL

**CHARACTERISTICS OF WATER FLOW
THROUGH THE KARST VADOSE ZONE**

DISSERTATION

Janja Kogovšek

Mentor: Doc. dr. Metka Petrič
Co-mentor: Doc. dr. Sanja Kapelj

Nova Gorica, 2009

Izjavljam, da je doktorsko delo v celoti moje avtorsko delo.

ZAHVALA

Nalogo sem opravila na Inštitutu za raziskovanje krasa Znanstvenoraziskovalnega centra Slovenske akademije znanosti in umetnosti v Postojni v okviru temeljnega programa Raziskovanje krasa, ki ga finansira ARRS in ob podpori Mednarodnega hidrološkega programa UNESCO.

Naloga je bila opravljena pod mentorstvom dr. Metke Petrič in dr. Sanje Kapelj, za kar se jima lepo zahvaljujem. Posebno se zahvaljujem dr. Metki Petrič za skupna razglabljanja in koristne nasvete pri obdelavi podatkov in pri pregledu teksta.

Hvala prof. dr. Božidarju Biondiću, red. prof. dr. Jožetu Pezdihu in doc. dr. Franciju Gabrovšku, ki so tekst pregledali v nevezani obliki in podali koristne pripombe.

Uporaba metode električne tomografije je bila vezana na sodelovanje in pomoč dr. Francija Gabrovška, za kar se mu lepo zahvaljujem. Pri ugotavljanju zadrževalnega časa padavin z izotopskimi analizami kisika mi je pomagal dr. Janko Urbanc, podrobno geološko kartiranje na območju raziskovalnega poligona pa je izvedla dr. Stanka Šebela. Tudi njima se lepo zahvaljujem.

Zahvala gre tudi vsem mojim kolegom, tehničnim sodelavcem, ki so mi kakorkoli pomagali pri izvedbi mojih zamisli. Predvsem se zahvaljujem Mateji Zadel, ki je opravila številne kemijske analize v laboratoriju, Franju Droletu, ki mi je pomagal pri izvedbi mojih zamisli na raziskovalnem poligonu in Maji Kranjc za prevod v angleški jezik. Moja zahvala gre tudi predstojniku dr. Tadeju Slabetu, ki je moje delo spremljal z veliko mero potrpežljivosti.

Značilnosti pretakanja skozi vadozno cono krasa

Izveček: Na območju Postojnske jame s 100 m debelo vadozno cono so potekale dolgoročne sočasne multi parameterske raziskave: meritve padavin na površju ter zvezne meritve pretoka, temperature in specifične električne prevodnosti curkov v jami, kemijske analize na vsebnost karbonatov, kalcija, magnezija, kloridov, nitratov, sulfatov in o-fosfatov, izotopske analize kisika ter sledilni poskusi z umetnimi sledili. Uporabljena je bila tudi metoda upornostnega slikanja. Ob dobro namočeni prsti in ustrezno zapolnjeni vadozni coni prihaja po padavinah do hitrega pretakanja (do nekaj m/h) po celotni hierarhiji različno prepustnih prevodnikov skozi vadozno cono. V sušnih obdobjih, običajno od pomladi do jesenskega deževja, pa se občasne padavine predvsem shranjujejo v vadozni coni, kar pomeni 100-krat manjše hitrosti. Ob izlitjih večjih količin tekočin (nesreče), le manjši delež (nekaj procentov) hitro sledi prepustnejšim potem skozi prst in vadozno cono (80 m/h). Primerjava učinkovite infiltracije in količine iztekle vode v treh zaporednih hidroloških letih je pokazala na pomembno vlogo predhodno shranjene vode v večletnem merilu. Sočasno opazovani kraški izvir Korentan odraža kompleksnost značilnosti različnih tipov curkov, pri čemer ima dodaten vpliv tudi njihova različna oddaljenost od izvira ter občasna ponikalnica. Delež sveže infiltrirane vode v izviru je relativno majhen (do 13 %), podobno kot v najprepustnejšem curku I, kar pomeni, da tudi skozi dobro prepustne razpoke v vadozni coni, izteka predvsem shranjena voda. Prenos kontaminantov skozi vadozno cono je odvisen od hidrodinamike, kjer ima pomembno vlogo daljše shranjevanje v slabo prepustnih delih. Tudi manjše onesnaženje s površja se spira do vzpostavitve izhodnega stanja kar več desetletij. Najdlje se kontaminanti zadržijo v najslabše prepustnem delu vadozne cone, ki se prazni le občasno. Ugotovljeno je bilo tudi do 2-krat večje raztapljanje apnenca zaradi prisotnosti kontaminantov. Zato se pod neposrednimi izpusti odpadnih voda, pod odlagališči odpadkov in podobnim, postopoma oblikujejo vse bolj prepustni prevodniki, ki omogočajo hitrejši prenos kontaminantov do kraških izvirov. To so potrdili tudi sledilni poskusi z več odlagališč na krasu. Hiter odtok s površja je potrdilo tudi upornostno slikanje. Pridobljena nova spoznanja so osnova načrtnega dolgoročnega varovanja kakovosti kraških izvirov. Raziskave so podale tudi več metodoloških zaključkov.

Ključne besede: kras, vadozna cona, multiparameterske dolgoročne raziskave, hidrodinamika, prenos kontaminantov, povečano raztapljanje, Slovenija.

Characteristics of water flow through the karst vadose zone

Abstract: Long-lasting multi-parameter researches were carried out in the area of Postojnska jama with 100 m thick vadose zone: measurements and sampling of rainfall at the surface and continuous measurements of discharge, temperature and specific electric conductivity of the trickles in the cave, chemical analyses of carbonate, calcium, magnesium, chloride, nitrate, sulfate and o-phosphate levels, isotopic oxygen analyses and water tracing tests with artificial tracers. The method of resistivity imaging was used also. The study showed different drainage dynamics through the trickles with differently permeable backgrounds. When the soil is well saturated and the vadose zone properly filled up with water a fast drainage (from 0,7 to 4,3 m/h) occurs after the rainfall through the entire hierarchy of differently permeable conduits. In dry periods, usually from spring until autumn rain the eventual rainfall is mostly stored in the vadose zone causing about 100 times smaller velocities. During the spill of a larger amount of liquids (accidents) only a small share (some percents) rapidly drains the permeable paths through the soil and later into the vadose zone (80 m/h). The comparison of effective infiltration and quantity of drained water in three consecutive hydrological years showed the important role played by the previously stored water. The average residence time in the background of more permeable fissures is two months and a half and in poorly permeable fissure more than one year. At the same time observed karst spring Korentan reflects the complexity of different types of conduits with the additional impact of various distances from the spring and temporary secondary recharge by the sinking stream. The share of freshly infiltrated water in a spring is relatively low (up to 13%), similar as in the most permeable among the observed trickles; this means that also through well permeable fissures in the vadose zone the stored water is predominantly drained. The transport of contaminants through the vadose zone depends on hydrodynamics and longer storage in poorly permeable parts plays an important role. Even a less important pollution from the surface requires several decades for the reestablishment of the initial stage. At the farthest the contaminants may be stored in the poorly

permeable part of the vadose zone which is only temporarily emptied. Even two times stronger dissolution of limestone was established due to contaminants presence. This is why under the direct outflow of waste water, below the waste disposal sites and similar more and more pervious conduits develop allowing a faster drainage of contaminants up to karst springs. This was proved by water tracing test from several waste disposal sites on karst. The acquired new knowledge may be the foundation for planned long-term protection of karst springs water quality. The researches gave several methodological conclusions.

Key words: karst, vadose zone, multiparameter long-term researches, hydrodynamics, transport of contaminants, increased dissolution, Slovenia

KAZALO VSEBINE

1	UVOD	1
2	HIPOTEZE IN CILJI	6
3	OBMOČJE RAZISKAV	11
3.1	GEOLOGIJA OŽJEGA OBMOČJA	14
4	EKSPERIMENTALNI DEL RAZISKAV	17
4.1	UPORABLJENE METODE DE LA	17
4.1.1	Določitev debeline vadozne cone	17
4.1.2	Meritve padavin in zajem vzorcev padavin	17
4.1.3	Meritve pretokov curkov	18
4.1.4	Meritve temperature in specifične električne prevodnosti curkov	24
4.1.5	Zajemanje vzorcev vode curkov in kemijske analize	27
4.1.6	Izvedba sledilni poskusov	29
4.1.7	Metoda električne tomografije SuperSting Rq/IP	33
5	REZULTATI	35
5.1	ODZIV HIDROGRAMOV CURKOV NA PADAVINE	35
5.1.1	Hidrološko leto 2003-04	35
5.1.2	Hidrološko leto 2004-05	40
5.1.3	Hidrološko leto 2005-06	45
5.1.4	Dolgotrajno opazovanje v zaporednih hidroloških letih	49
5.1.5	Sušna obdobja med hidrološkimi leti	58
5.2	TEMPERATURA IN SPECIFIČNA ELEKTRIČNA PREVODNOST	60
5.2.1	Temperatura curkov I in J	60
5.2.2	Specifična prevodnost curkov I in J	62
5.2.3	Meritve SEP curkov I in J v zaporednih hidroloških letih	66
5.2.4	Potek SEP v vodnih valovih	70
5.3	IZOTOPSKE ZNAČILNOSTI (^{18}O) PADAVIN IN OPAZOVANIH CURKOV	74
5.3.1	Celoletno spremljanje izotopske sestave ^{18}O	75
5.3.2	Vodni val marca 2004 po taljenju snega	80
5.4	PRENOS SNOVI SKOZI VADOZNO CONO	86
5.4.1	Spremljanje prenosa kontaminantov v obdobju 1998-2006	86
5.4.2	Podrobno spremljanje kontaminantov v obdobju 2003-2005	89
5.4.3	Prenos kontaminantov v vodnih valovih	94

5.5	VPLIV POVEČANIH KONCENTRACIJ KONTAMINANTOV NA PROCES RAZTAPLJANJA APNENCA	104
5.6	SLEDILNI POSKUSI S FLUORESCENTNIMI SLEDILI SKOZI VADOZNO CONO	114
5.6.1	Sledilna poskusa z zalivanjem	115
5.6.2	Sledilni poskus v naravno namočenih razmerah	119
5.6.3	Kombinirani sledilni poskus s površja z injiciranjem 7.junija 2002	127
5.6.4	Primerjava opisanih sledenj	142
5.7	PRIMERJAVA PRETAKANJA SKOZI VADOZNO CONO NA RAZLIČNIH LOKACIJAH	148
5.7.1	Sledenje z odlagališča Mala gora pri Ribnici	148
5.7.2	Sledenje z odlagališča odpadkov Sežana	153
5.7.3	Sledenje z odlagališča odpadkov Mozelj pri Kočevju	161
5.7.4	Sklepi	166
5.8	VLOGA VADOZNE CONE V VODONOSNIKU – PRIMER IZVIRA KORENTAN	169
5.8.1	Primerjava učinkovne infiltracije in hidrogramov izvira in curkov	169
5.8.2	Potek specifične električne prevodnosti v času hidrološkega leta	173
5.8	POSKUS UGOTAVLJANJA ZGRADBE OZ. DINAMIKE NAPAJANJA IN PRAZNJENJA VADOZNE CONE Z ELEKTRIČNO TOMOGRAFIJO	178
5.9.1	Izhodišče	178
5.9.2	Meritve	179
5.9.3	Hidrološke razmere v času pred in med snemanjem upornostnega profila	179
5.9.4	Izvedba snemanja upornostnega profila	181
5.9.5	Ugotovitve	185
6	ZAKLJUČKI	187
7	SUMMARY	197
8	VIRI	207
8.1	LITERATURA	207
8.2	DRUGI VIRI	215

SEZNAM SLIK

- Slika 3.1.: Hidrogeološka karta širšega območja Postojne.
- Slika 3.2: Površje nad opazovanim območjem v Postojnski jami (foto S. Šebela).
- Slika 3.3: Površje nad območjem opazovanih curkov v Postojnski jami: vojaški objekt, sedimentacijski bazen (rdeča puščica) in ponikovalnica (zelena puščica).
- Slika 3.4a: Območje raziskav v Kristalnem rovu Postojnske jame in geološka skica Kristalnega rova: tloris jamskega rova, (Kogovšek in Šebela, 2004: 994).
- Slika 3.4b: Območje raziskav v Kristalnem rovu Postojnske jame: geološki pogoji in AB prečni profil Kristalnega rova, (Kogovšek in Šebela, 2004: 994).
- Slika 4.1.1: Meritve padavin in zajem vzorcev padavin za izotopske analize ^{18}O so potekale v ograjenem delu vojašnice Slovenske vojske v Postojni.
- Slika 4.1.2: Meritve fizikalnih parametrov ter zajem vzorcev na točki I. Gornji desni sliki – merilne sonde, spodnja desna slika – avtomatski zajemalnik vzorcev.
- Slika 4.1.3: Odvisnost pretoka curka I od nivoja (za $H > 10,2$ mm).
- Slika 4.1.4: Hidrogram curka I za hidrološko leto 2003-04 (pretoki so izračunani na osnovi meritev nivojev) ter vzporedno ročno merjene vrednosti.
- Slika 4.1.5: Meritve fizikalnih parametrov in vzorčenje curka J (levo). Detajl(desno) s posodico kamor doteka voda curka, ki nato protitočno teče v celico z WTW elektrodo za meritev temperature in SEP in odteka v posodo z iztokom, kjer je sonda, ki meri nivo za izračun pretokov. Ob visokih vodah odvaja presežno vodo, ki ne more odtekati skozi omenjeni sistem, cevka neposredno v posodo, kjer se meri nivo.
- Slika 4.1.6: Hidrogram curka J za hidrološko leto 2003-04 (pretoki so izračunani na osnovi meritev nivojev) ter vzporedno ročno merjene vrednosti.
- Slika 4.1.7: Meritve pretoka curka oz. kapljanja L. Voda kapljanja priteka v natego na evaporimetru. Ko se natega napolni, voda odteče v spodnjo posodo. Na papirnem regulatorju se zabeleži hitrost polnjenja natega in iztok vode.
- Slika 4.1.8: Vzporedne zvezne meritve SEP z merilnikom Gealog S ter ročne meritve z MultiLine P4 merilnikom v curku J.
- Slika 4.1.9: Občasno vzorčenje vode za kemijske analize v obdobju 1988 – 2002.

Slika 4.1.10: Površju nad Kristalnim rovom, ponikovalnica odpadnih voda, kjer smo injicirali sledila.

Slika 4.1.11: Za snemanje zgradbe zgornje vadozne cone smo uporabili sistem SuperSting Rq/IP, proizvajalca Advanced Geoscience Inc.

Slika 4.1.12: Sonde smo zabili v tla, kjer so ostale ves čas meritev.

Slika 5.1.1: Dnevne korigirane padavine (P_{kor}) in dnevna efektivna infiltracija (I_{ef}) na površju nad raziskovalnim poligonom v Postojnski jami za hidrološko leto 2003-04.

Slika 5.1.2: Hidrogram curka I, kumulativna krivulja iztekle vode in dnevna efektivna infiltracija za hidrološko leto 2003-04.

Slika 5.1.3: Hidrogram curka J, kumulativna krivulja in dnevna efektivna infiltracija za hidrološko leto 2003-04.

Slika 5.1.4: Hidrogram kapljanja L, kumulativna krivulja in dnevna efektivna infiltracija za hidrološko leto 2003-04.

Slika 5.1.5: Hidrološko leto 2003-04 – hidrogrami curkov I, J in L.

Slika 5.1.6: Hidrogrami curkov I, J in L v začetku hidrološkega leta 2003-04. Pretoki najmanjšega curka L so v ml/h.

Slika 5.1.7: Dnevne korigirane padavine (P_{kor}) in dnevna efektivna infiltracija (I_{ef}) nad raziskovalnim poligonom v Postojnski jami za hidrološko leto 2004-05.

Slika 5.1.8: Hidrogram curka I, kumulativna krivulja in dnevna efektivna infiltracija za hidrološko leto 2004-05.

Slika 5.1.9: Hidrogram curka J, kumulativna krivulja in dnevna efektivna infiltracija za hidrološko leto 2004-05.

Slika 5.1.10: Hidrogram curka L za hidrološko leto 2004-05.

Slika 5.1.11: Iztekanje vode skozi curke I, J in L v hidrološkem letu 2004-05.

Slika 5.1.12: Iztekanje vode skozi curke I, J in L v začetku hidrološkega leta 2004-05 po daljšem sušnem obdobju.

Slika 5.1.13: Dnevne korigirane padavine (P_{kor}) in dnevna efektivna infiltracija (I_{ef}) nad raziskovalnim poligonom v Postojnski jami za hidrološko leto 2005-06.

Slika 5.1.14: Hidrogram curka I za hidrološko leto 2005-06.

Slika 5.1.15: Hidrogram curka J za hidrološko leto 2005-06.

Slika 5.1.16: Hidrogram curka L za hidrološko leto 2005-06

Slika 5.1.17: Primerjava nihanj pretokov curkov I, J in L v hidrološkem letu 2005/06.

Slika 5.1.18: Primerjava pretokov curkov I, J in L v začetnem obdobju hidrološkega leta 2005/06.

Slika 5.1.19: Hidrološko leto 2003-04: dnevne padavine in dnevna efektivna infiltracija ter hidrogrami curkov I, J in L.

Slika 5.1.20: Hidrološko leto 2004-05: dnevne padavine in dnevna efektivna infiltracija ter hidrogrami curkov I, J in L.

Slika 5.1.21: Hidrološko leto 2005-06: dnevne padavine in dnevna efektivna infiltracija ter hidrogrami curkov I, J in L.

Slika 5.1.22: Efektivna infiltracija in hidrogrami curkov I, J in L v zaporednih hidroloških letih (slika desno).

Slika 5.2.1: Nihanje temperature curkov I in J in pretoka curka I v času hidrološkega leta 2003-04 (A) ter nihanje temperature zraka na površju – Postojna (B).

Slika 5.2.2: Potek temperature v curkih I in J in pretoka curka I v času hidrološkega leta 2004-05.

Slika 5.2.3: Potek SEP curkov I in J v času vodnih valov (podan je tudi pretok curka I) po prvih izdatnih padavinah, ki so sledile dolgemu poletnemu sušnemu obdobju v začetku hidrološkega leta 2003-04.

Slika 5.2.4: Nihanje SEP in pretoka curka J v hidrološkem letu 2003-04.

Slika 5.2.5: Curek J – potek SEP in pretoka v hidrološkem letu 2004-05

Slika 5.2.6.: Curek J: potek SEP v zaporednih hidroloških letih ob danih nihanjih pretoka.

Slika 5.2.7: Curek I: potek SEP in hidrogram za obdobje od marca 2005 do junija 2007.

Slika 5.2.8: Vzporedne meritve SEP curkov I in J.

Slika 5.2.9: Vodni val curkov I in J marca 2004 po taljenju snega na površju.

Slika 5.2.10: curek L - nihanje SEP v odvisnosti od pretoka.

Slika 5.3.1: Nihanje $\delta^{18}\text{O}$ v vzorcih mesečnih padavin v opazovanem obdobju.

Slika 5.3.2: Razmerje med izotopsko sestavo kisika in devterija v opazovanih vodah.

Slika 5.3.3A: Izotopska sestava kisika padavin in curkov I in J.

Slika 5.3.3B: Hidrogram curka I za opazovano obdobje ter čas in pretok, ko so bili zajeti vzorci.

Slika 5.3.3C: Hidrogram curka J za opazovano obdobje ter čas in pretok, ko so bili zajeti vzorci.

Slika 5.3.4: Eksponencialni model dinamike vode v curku I.

Slika 5.3.5: Eksponencialni model dinamike vode v curku J.

Slika 5.3.6 : A - Debelina snaga na površju, padavine (P_{kor}) in efektivna infiltracija (I_{ef}) ter B – hidrograma curkov I in J v opazovanem obdobju.

Slika 5.3.7 : A – Debelina snega in temperatura na površju ter hidrogram curkov I in J ter B – nihanje SEP in izotopske sestave kisika v curkih I in J.

Slika 5.4.1: Prenos nitratov, kloridov, sulfatov in o-fosfatov, ki so se odrazili tudi v SEP, skozi onesnažene curke I, J, L in G v Kristalnem rovu ter skozi nekontaminirani curek A v času 17 let.

Slika 5.4.2: Curek I: prenos kloridov, nitratov, sulfatov in o-fosfatov ter hidrogram curka v času hidrološkega leta 2003-04.

Slika 5.4.3: Curek J: prenos kloridov, nitratov, sulfatov in o-fosfatov ter hidrogram curka v hidrološkem letu 2003-04

Slika 5.4.4: Curek I: prenos kloridov, nitratov, sulfatov in o-fosfatov ob nihanjih pretoka v prvih vodnih valovih po daljšem sušnem obdobju.

Slika 5.4.5: Curek J: prenos kloridov, nitratov, sulfatov in o-fosfatov v odvisnosti od pretoka v prvih vodnih valovih po daljšem sušnem obdobju.

Slika 5.4.6: Curek I – nihanje pretoka in SEP ter prenos nitratov, o-fosfatov in eozina v času vodnega vala, ki ga je oblikoval staljeni sneg.

Slika 5.4.7: Curek J – Prenos nitratov in o-fosfatov v vodnem valu , ki se je začel oblikovati po taljenju snega, kasneje pa ga je podaljšal dež, ki je padel 23. do 25.3.2004.

Slika 5.5.1: Potek celokupne trdote v onesnaženih curkih I in J ter v čistem curku A v obdobju 1988-2006.

Slika 5.5.2: Curek I – potek karbonatov (K), kalcija (Ca) in celokupne trdote (Ca+Mg) po letu 1988.

Slika 5.5.3: Curek J – potek karbonatov (K), kalcija (Ca) in celokupne trdote (Ca+Mg) po letu 1988.

Slika 5.5.4: Odvisnost celokupne trdote (Ca+Mg) in kalcija (Ca) od SEP v curku I.

Slika 5.5.5: Odvisnost celokupne trdote (Ca+Mg) in kalcija (Ca) od SEP v curku J.

Slika 5.5.6: Curek I – raztapljanje karbonatne kamnine v vadozni coni je odvisno tudi od količine prisotnih kloridov, nitratov, sulfatov in o-fosfatov (vsota »anionov«), oz. še drugih prisotnih anionov, ki jih nismo določevali in ki jih podaja razlika celokupne in karbonatne trdote ((Ca+Mg)-K).

Slika 5.5.7: Curek J – raztapljanje karbonatne kamnine v vadozni coni je odvisno tudi od količine prisotnih kloridov, nitratov, sulfatov in o-fosfatov (vsota »anionov«), oz. še drugih prisotnih anionov, ki jih nismo določevali in ki jih podaja razlika celokupne in karbonatne trdote ((Ca+Mg)-K).

Slika 5.5.8: Karbonatna trdota curkov I, J in A v opazovanem obdobju.

Slika 5.5.9: Spremljanje prenosa nitratov(NO), o-fosfatov (PO), karbonatov (Karb), celokupne trdote (Ca+Mg) in SEP v vodnem valu Bilpe oktobra 2006, ko je potekal sledilni poskus.

Slika 5.6.1: Sledenje z zalivanjem z vodo: pojav vode in sledila v curku I, ki je bil pred injiciranjem suh.

Slika 5.6.2: Pojav injiciranega sledila v curkih I, G, H, J in L ter padavine v časovnem obdobju dveh let.

Slika 5.6.3: Pretok in prisotnost sledila v curkih G, H, J in L (G-c, H-c, J-c in L-c) ter padavine v prvih 4 mesecih po injiciranju.

Slika 5.6.4: Reakcija pretoka curkov I in J na padavine novembra 1996, ko je bil injiciran uranin.

Slika 5.6.5: Začetni prenos uranina skozi curek I - ob stalno povečanem pretoku je prihajalo do povečanega prenosa po padavinah.

Slika 5.6.6: Dinamika spiranja injiciranega uranina skozi curek I. Po padavinah ob povečanem pretoku je prihajalo do povečanega prenosa sledila. Spiranje sledila je trajalo 20 mesecev.

Slika 5.6.7: Padavine in začetni prenos sledila skozi curka I in J.

Slika 5.6.8: Začetni prenos injiciranega sledila skozi curek J in njegov pretok.

Slika 5.6.9: Dinamika prenosa uranina skozi curek J v odvisnosti od njegovega pretoka.

Slika 5.6.10: Padavine, nihanje pretokov in koncentracije uranina v curkih I, J, L in K v času jesenskega vodnega vala takoj po injiciranju.

Slika 5.6.11: Padavine, pretok ter prenos kloridov in eozina skozi curka I in J.

Slika 5.6.12: Koncentracija eozina v curkih I, J, L, Lp in G v času 15 mesecev po injiciranju (slika A) ter sočasno nihanje pretokov (slika B).

- Slika 5.6.13: Curek I – prenos eozina v hidrološkem letu 2003-04.
- Slika 5.6.14: Curek I – prenos eozina v prvem vodnem valu po poletnem sušnem obdobju je zaostajal za naraščanjem pretoka.
- Slika 5.6.15: Curek I – v velikih vodnih valovih je prihajalo ob nihanjih pretoka do nihanj koncentracije eozina. Ob povečanjih pretoka je koncentracija eozina upadla.
- Slika 5.6.16: Curek I - prenos eozina v hidrološkem letu 2004-05 ter sočasen potek pretoka curka.
- Slika 5.6.17: Curek I - prenos eozina v hidrološkem letu 2005-06 ter sočasen potek pretoka curka.
- Slika 5.6.18: Curek J - prenos eozina v hidrološkem letu 2004-05 in hidrogram curka.
- Slika 5.6.19: Curek J – začetni prenos eozina po sušnem poletnem obdobju je nekoliko zaostajal za naraščanjem pretoka curka.
- Slika 5.6.20: Curek J : prenos eozina v hidrološkem letu 2004-05 in hidrogram curka.
- Slika 5.6.21: Curek J : prenos eozina v hidrološkem letu 2005-06 in hidrogram curka.
- Slika 5.6.22: Curek L – pojavljanje eozina v curku L ob nihanju njegovega pretoka v času 6 let.
- Slika 5.6.23: Prenos eozina skozi curka G in G^* ter pretok curka G. Pretok curka G^* je nihal podobno kot pretok curka G, le da je dosegal nekoliko nižje vrednosti.
- Slika 5.6.24: Prenos eozina skozi curek H in njegov hidrogram.
- Slika 5.6.25: Curek Lp – prenos eozina skozi curek in njegov hidrogram.
- Slika 5.6.26: Prenos junija 2002 injiciranega sledila skozi curke I, J, L in Lp ob spiranju s padavinami v obdobju šestih let.
- Slika 5.7.1: Injiciranje sledila
- Slika 5.7.2: Ugotovljeno raztekanje voda z odlagališča Mala gora pri Ribnici in starejše ugotovljene povezave na širšem območju (Kogovšek in Petrič, 2006).
- Slika 5.7.3: Prehod injiciranega sledila skozi opazovane izvire (A), sočasno spremljanje pretakanja padavin skozi 100 m debelo vadozno cono Postojnske jame (B) ter padavine v Postojni in na območju sledilnega poskusa (padavinska postaja Zdenska vas) v obdobju treh mesecev po injiciranju.
- Slika 5.7.4: Poskus požiralnosti na zatravljenem površju ob injicirnem mestu.

- Slika 5.7.5: Injiciranje fluorescentnega sledila uranin po škrapljišču ob robu sežanskega odlagališča odpadkov.
- Slika 5.7.6: Hidrogeološka karta Krasa z rezultati starejših sledenj, označenimi lokacijami injiciranja in vzorčenja pri poskusu v letu 2005 ter rezultati tega sledenja
- Slika 5.7.7: Pretok Timave in pojavljanje injiciranega sledila v Timavi in Brojnici pri Nabrežini v obdobju 17 mesecev po injiciranju.
- Slika 5.7.8: Padavine na odlagališču odpadkov Sežana in nad Postojnsko jamo z učinkovito infiltracijo (I_{ef}), pretok Reke in Timave ter kalnost in koncentracija uranina v Timavi (A); ter sočasno oblikovanje vodnih valov curkov I in J v Postojnski jami (B).
- Slika 5.7.9: Dinamika iztekanja injiciranega uranina skozi Timavo ob meritvah padavin na odlagališču (do marca 2006): dnevne količine izteklega uranina (M/dan), iztekanje uranina s časom (M sum).
- Slika 5.7.10: Meritve kalnosti v času sledilnega poskusa z odlagališča odpadkov Sežana ($c_{uranina}$) ter padavine na območju odlagališča.
- Slika 5.7.11: Pretok Reke pri Cerkvenikovem mlinu, pretok in kalnost Timave v času sledenja.
- Slika 5.7.12: Injicirano sledilo (injiciranje je trajalo 15 minut) smo sprali s cisterno vode (5 m^3) v času nekaj ur, ker je bila požiralnost sorazmerno slaba.
- Slika 5.7.13: Hidrogeološka karta širšega območja odlagališča Mozelj z rezultati sledilnih poskusov
- Slika 5.7.14: Prenos injiciranega sledila na odlagališču odpadkov Kočevje do izvira Bilpa, njen pretok ter padavine v Zajčjem polju in sočasno pretakanje skozi vadozno cono Postojnske jame.
- Slika 5.7.15: Bilpa: količinski prenos sledila na uro (Mur/h), povrnjena količina sledila (%), pretok Bilpe in padavine v sledilnem poskusu z odlagališča Kočevje.
- Slika 5.8.1: Padavine, učinkovita infiltracija ter hidrogrami izvira Korentan (K) in curkov v vadozni coni Postojnske jame.
- Slika 5.8.2: Hidrogrami curkov I, J in L ter hidrogram Korentana s poudarkom na primerjavi oblik vodnih valov.
- Slika 5.8.3: Potek SEP Korentana in curka J ob danih nihanjih pretoka v hidrološkem letu 2003-04.

Slika 5.8.4: Potek SEP in pretokov Korentana ter curkov J in I v vodnem valu konec novembra 2003.

Slika 5.9.1: Padavine ter pretoki curkov I, J in L v času izvedenih snemanj upornostnega profila.

Slika 5.9.2: Simuliranje dežja po eni strani elektrod septembra 2006.

Slika 5.9.3a: Posnetek upornostnega profila PO0 4.9.2006 v času od 8.15 do 8.45 pred injiciranjem vode.

Slika 5.9.3b: Prvi posnetek upornostnega profila PO1 4.9.06 v času od 9.35 do 10.05 takoj po injiciranju vode.

Slika 5.9.3c: Posnetek upornostnega profila (PO14) 7 dni po injiciranju vode (11.9.2006).

Slika 5.9.3d: Posnetek upornostnega profila (PO17) 9 dni po injiciranju vode (13.9.2006).

Slika 5.9.4: Simuliranje dežja v poskusu oktobra 2006 je potekalo po obeh straneh črte elektrod.

Slika 5.9.5a: Posnetek upornostnega profila POK00 pred injiciranjem vode.

Slika 5.9.5b: Posnetek upornostnega profila POK1 takoj po injiciranju vode.

Slika 5.9.5c: Posnetek upornostnega profila 7 dni po injiciranju vode (POK 13).

Slika 6.1: Letna efektivna infiltracija in letne iztekle količine vode skozi curke I, J in L v zaporednih hidroloških letih glede na leto 2003-04 za vsak curek ločeno, izraženo v odstotkih.

SEZNAM TABEL

- Tabela 4.1: Minimalni in maksimalni pretoki (ml/min) opazovanih curkov in kapljanj ter pretoki v času injiciranja sledila junija 1993 in novembra 1996.
- Tabela 5.1.1: Iztekle letne količine vode skozi curke I, J in L ter iztekle količine vode v obdobju 23.9.03 do 15.3.04 in njihov letni delež.
- Tabela 5.1.2: Letni količini korigiranih padavin in učinkovite infiltracije ter delež učinkovite infiltracije.
- Tabela 5.1.3: Volumen iztekle vode skozi posamezne curke I, J in L ter skupna količina iztekle vode (V_{skupni}) v zaporednih hidroloških letih ter na osnovi tega izračunano potencialno skupno zaledje curkov (P).
- Tabela 5.1.4: Delež učinkovite infiltracije ter razmerja letnih volumnov iztekle vode curkov I in J ($V-I / V-J$) ter J in L ($V-J / V-L$) v treh zaporednih hidroloških letih.
- Tabela 5.1.5: Količina infiltriranih padavin, ki se je shranila v vadozni coni v navedenih poletnih obdobjih (I_{ef}), volumen shranjene vode ob upoštevanju površine zaledja curkov 255 m^2 ($V_{\text{shranjeno}}$), volumen iztekle vode (V_{iztekle}), preračunan iz merjenih pretokov curkov in količina infiltriranih nadaljnjih padavin ($I_{\text{ef-reakcija}}$), ki je sprožila povečano iztekanje iz vadozne cone (poglavje 5.1.5).
- Tabela 5.1.6: Napajanje globljih delov vodonosnika oz. izvira v sušnem poletnem obdobju iz slabo prepustnega dela vadozne cone, ko curek I ni aktiven.
- Tabela 5.3.1: Rezultati izotopskih meritev $\delta^{18}\text{O}$ vzorcev padavin ter vzorcev curkov I in J (v promilih). Ugotovljen evaporacijski efekt (moder izpis vrednosti).
- Tabela 5.5.1: Osnovne fizikalno-kemijske značilnosti Kolpe in Bilpe ob nižjih vodostajih.
- Tabela 5.6.1: Čas od injiciranja do pojava sledila v curkih, količina padavin, ki je padla v tem obdobju, količine iztekle vode pred pojavom sledila, dominantna hitrost pretakanja ter maksimalna koncentracija sledila v opazovanih curkih.
- Tabela 5.6.2: Čas od injiciranja do pojava sledila v curkih, količina padavin, ki je padla v tem obdobju, količine iztekle vode pred pojavom sledila, dominantna hitrost pretakanja ter maksimalna koncentracija sledila v opazovanih curkih.
- Tabela 5.6.3: Pretoki curkov v času injiciranja sledil junija 2002.

Tabela 5.6.4: Navidezne hitrosti pretakanja sledila - v_{dom} v m/h v posamezne curke v sledenjih junija 1993 in novembra 1996, računane glede na čas injiciranja.

Tabela 5.7.1: Ocenjene maksimalne navidezne hitrosti pretakanja skozi vadozno cono in maksimalne hitrosti podzemnih tokov na obravnavanih območjih ter njihov strmec.

Tabela 5.9.1: Zaporedna snemanja upornostnega profila v prvem poskusu septembra 2006.

Tabela 5.9.2: Zaporedna snemanja upornostnega profila v drugem poskusu oktobra 2006.

Tabela 5.9.3: Pretoki curkov v Postojnski jami v času začetka snemanj upornostnih profilov.

1 UVOD

Kraški vodonosniki se poleg sekundarnega napajanja s kraškimi ponikalnicami napajajo predvsem s padavinami, ki razpršeno vstopajo skozi vegetacijski pokrov in prst najprej v vadozno, nezasičeno cono. Svojo pot nadaljujejo prek stalno zalite cone in prihajajo na površje v kraških izvirih. Na količino padavin, ki se dejansko infiltrira v sistem kraškega vodonosnika, pomembno vplivajo procesi evapotranspiracije, zastajanje snežnih padavin na površju in uskladičenje vode v tleh.

Dosedanje raziskave so pokazale, da na poti pretakanja skozi kraški vodonosnik prihaja do pomembnega dogajanja v vadozni coni, predvsem v njenem zgornjem delu. Mangin (1973) je na osnovi rezultatov hidrogeoloških raziskav ta zgornji del kamninske osnove poimenoval epikras. Definiral ga je kot vodonosnik blizu površja, ki ga napajajo padavine, in ki del padavin hitro, del pa le počasi prepušča naprej v globljo vadozno cono, tako da prihaja do njihovega zadrževanja in oblikovanja nekakšnega visečega vodonosnika.

Williams (1983) je na osnovi geomorfoloških raziskav definiral subkotano cono kot preperelo cono zgornjega dela kamine z veliko sekundarno poroznostjo in prepustnostjo, ki se eksponentialno manjša z globino, tako da prihaja do akumulacije padavin. Razlike v poroznosti in prepustnosti v vertikalni smeri med subkotano cono in spodaj ležečo kamninsko maso so odločilne za hidrološko delovanje te cone. Debelino subkotane cone je ocenjeval na do 10 m.

Raziskave pretakanja skozi 150 m debelo vadozno cono nad Planinsko jamo, ki sem jih skupaj s sodelavci opravila v obdobju 1976 – 1981, so pokazale na značilne reakcije na padavine v namočenih obdobjih ter na izostanke reakcij v sušnih obdobjih. Tedaj so se padavine le shranjevale ali pa je prihajalo le do minimalnega iztiskanja stare, predhodno uskladiščene vode, kar sem zaznala z meritvami specifične električne prevodnosti. Do največjih sprememb je prihajalo v času vodnih valov po padavinah. Večletne zvezne meritve pretoka in tedenske meritve sestave izbranih curkov v jami so omogočile tudi izračune letnih količin vode ter količin raztopljenih karbonatov, ki jih je prenikajoča voda odnesla iz vadozne cone

(Kogovšek in Habič, 1981; Kogovšek, 1982). Na postojnskem krasu smo v letu 1988 ugotavljali kisle padavine s srednjo letno vrednostjo pH 4,56 (Kogovšek in Kranjc, 1988), ki so se nevtralizirale že v vadozni coni, kar pomeni ustrezno povečano raztapljanje. Po prevodnikih z veliko prepustnostjo pa v vodnih valovih prihaja tudi do prenosa trdnih delcev (Kogovšek, 1982) in koloidov (Shevenell in McCarthy, 2002). Dodatno znanje so podale raziskave pretakanja skozi vadozno cono drugih slovenskih jam (Kogovšek 1983, 1984, 1990, 1994b) ter sledilni poskusi skozi vadozno cono (Kogovšek in Habič, 1981, Kogovšek, 1994a).

Biologi (Sket in sodel., 2003; Pipan, 2005) so v okviru raziskav favne v vadozni coni ugotavljali značilno favno, ki je nakazovala obstoj zasičenih con in se bistveno razlikuje od favne v jamskih bazenčkih. Vzporedno so številne kemijske raziskave pokazale razlike v sestavi med preniklo vodo v vadozni coni in vodo vodnih tokov.

V Švicarski Juri so na testnem območju Milandre z različnimi metodami ugotavljali, da okoli polovica učinkovito infiltriranih padavin hitro odteče po mreži prevodnikov, polovica pa se jih infiltrira skozi slabo prepustni del vodonosnika (Jeannin in Grasso, 1995). Do teh rezultatov so prišli na osnovi treh metod. Z neposrednimi meritvami nivojev v vrtinah v slabo prepustnih delih vodonosnika so ugotovili, da nivo vode oz. zapolnjenost v tem delu vodonosnika dobro sovpadajo s krivuljo baznega toka, kar pomeni, da ob praznjenju vodonosnika prispeva vodo predvsem slabo prepustni del vodonosnika. S primerjavo krivulje baznega toka s krivuljo skupnega toka so ugotavljali, da več kot 21 % vode priteka iz slabo prepustnih delov vodonosnika, verjetno pa je ta delež okoli 50 %, medtem ko po kraških kanalih hitro odteče 50 % vode. Z metodo hidrološke bilance oz. z razčlenitvijo posameznih prispevkov v vodnih valovih so ugotovili, da se na območju Milandre 50 – 70 % učinkovitih padavin infiltrira v slabo prepustne dele vodonosnika, 30 – 50 % pa hitro odteče po kraških prevodnikih. Te ugotovitve so sovpadale s shemo delovanja epikrasa, ki sta ga podala Smart in Friedrich (1986). Pri tem je pomembna količina padavin, ki dejansko vstopi v kraški vodonosnik. Raziskava odnosa med polnjenjem in praznjenjem kraškega vodonosnika je pokazala pomemben vpliv vegetacije ter procesov v ozračju in v tleh na količino te vode, od katere je del hitro odteče po prepustni mreži razpok, del pa se je dalj časa zadržal oz. uskladiščil v conah slabše prepustnosti (Petrič, 2002).

Zgornja vadozna cona torej hitro infiltrira padavine, a jih le del hitro prevaja po prepustnejših razpokah v spodnjo vadozno cono, del vode pa se počasi infiltrira v slabo prepustni del vodonosnika. Torej se kaže dvojnost, ko gre na eni strani za počasno napajanje v slabo prepustne dele in hitro, koncentrirano napajanje po prepustnejši mreži kanalov. Mešanje sveže padavinske vode s staro vodo predhodnih padavinskih dogodkov se tako lahko na eni strani odrazi hitro, na drugi strani pa v močnem dušenju vstopnih signalov in z večjimi časovnimi zamiki v curkih in kapljanjih, dosegljivih v podzemnih jamah. Nova spoznanja o pretakanju padavin skozi vadozno cono so doprinesla sledenja okoljskih sledil kot tudi sledenja z umetnimi sledili.

Že v letih 1981 – 1983 (Pezdič in sodel., 1984) je bila s pionirskimi izotopskimi raziskavami padavin in curkov prenikle vode v Planinski jami ugotovljena pomembna homogenizacija padavin v vadozni coni. Le po izdatnih in intenzivnih padavinah je imel curek 1 kratek čas podobno sestavo kot padavine. V obdobju od novembra 1982 do novembra 1983 z majhno vsoto padavin (1150 mm) glede na predhodno leto in velikimi nihanji izotopske sestave padavin $\delta^{18}\text{O}$ od - 14,5 do - 4,23 ‰ je bila povprečna vrednost curka 1 $\delta^{18}\text{O} = - 8,67$ ‰ in je nihala le v intervalu 0,6 ‰. Zaključili so, da je skozi curek iztekala pretežno v predhodnem letu infiltrirana voda. Kasneje so bili na območju Trnovško-Banjške planote v kapljanjih v vadozni coni ugotovljeni povprečni zadrževalni časi padavin od 3 mesecev do več let in celo več kot 10 let (Trček in sodel., 2002; Trček, 2003).

Z izotopskimi analizami so na testnem območju Milandre ugotavljali (Perrin in sodel., 2003a), da se večina vode, ki se infiltrira v času padavinskih dogodkov, shrani v vodonosniku, čeprav pretok izvira izrazito reagira. »Izotopski odgovor« na izviru je močno dušen, če ga primerjamo s padavinami, kar pomeni, da izteka predvsem stara voda oz. shranjena voda predhodnih padavinskih dogodkov. Podobno so ugotavljali tudi za druge kraške sisteme (Bakalowicz in sodel., 1974, Stichler in sodel., 1997, Maloszewski in sodel., 2002). Na območju Milandre je po izdatnih padavinah znašal delež sveže infiltrirane vode v vodnih valovih v vadoznem toku do 30 %, medtem ko je bil za razpršeni tok neznačilen (Perrin in sodel., 2003a).

Pomembno vlogo pri dogajanju v vadozni coni imajo tudi nekonsolidirani sedimenti in prst, ki prekrivajo epikras oz. vadozno cono (Tooth in Fairchild, 2003). Ta plast pomeni pomembno zadrževanje padavin in uravnavanje hitrosti pretakanja kot tudi porabo padavin, hkrati pa je vir CO₂ in drugih snovi, ki aktivno sodelujejo v procesih raztapljanja karbonatnih kamnin. Na zakrsevanje in razvoj prevodnikov, ki odvajajo padavinsko vodo skozi vadozno in freatično cono vse do kraških izvirov, pomembno vpliva ogljikov dioksid. Največ ogljikovega dioksida prispeva prst v mokrih obdobjih, ko dovolj visoka vlaga v prsti omogoča mikrobiološko aktivnost (White, 1988). Vendar pa je Atkinson (1977) ugotavljal, da je bil parcialni tlak CO₂ v kraški vodi višji kot v prsti. Predvideval je, da ta del CO₂ nastaja z oksidacijo organske snovi v vodonosniku, predvsem v vadozni coni, kjer je na razpolago prosti kisik. Tudi dvoletno spremljanje pretakanja onesnažene komunalne vode skozi 40 m debel strop Pivke jame je pokazalo na dobro prezračenost vadozne cone, ki je omogočila učinkovite oksidacijske procese. To so pokazale meritve kemijske in biokemijske potrebe po kisiku ter analize amonijaka in nitratov odpadne vode, ki je iz greznice odtekala neposredno v vadozno cono in iztoka vode iz vadozne cone (Kogovšek, 1987).

Na kraškem površju, ponekod pa tudi v kraških jamah (Miko in sodel., 2002) ugotavljamo prisotnost onesnaženja različnega porekla, ki lahko pomembno vpliva na kakovost vode v vodonosniku. Plast prsti in sedimentov ter vadozna cona imajo pomembno vlogo pri prenosu kontaminantov s površja (Čenčur in sodel., 2001). Zaradi možnosti njihovega daljšega zadrževanja v tej coni se lahko odrazijo v kraških izviroh z večjimi zakasnitvami, hkrati pa je to tudi možnost za potek različnih fizikalnih in kemijskih procesov, od disperzije, razredčitve, sedimentacije, filtracije do adsorpcije, ionske izmenjave, oksidacije in redukcije v okviru bakteriološke aktivnosti ter drugih procesov, ki lahko rezultirajo tudi v samoočiščevalnih procesih (Kogovšek, 1987). Pomembni so tudi migracijski procesi, vendar je vse to dogajanje še slabo raziskano. Na poti padavin do kraških izvirov je prav vadozna, oz. epikraška cona s prstjo in sedimenti tista, kjer se padavine in morebitni kontaminanti s površja lahko zadržijo dalj časa.

Zato je smiselno raziskovati dinamiko pretakanja padavin in prenos snovi, ki je vezan na pretakanje vode s površja skozi vadozno cono ob najrazličnejših razmerah v

okviru spoznavanja načina napajanja kraških vodonosnikov. To znanje je tudi nujna osnova za načrtno varovanje kakovosti vode kraških izvirov in za načrtovanje ustrezne rabe prostora.

Na postojnskem krasu so raziskave pokazale na velike razlike v tem, kako se padavine odrazijo v curkih in kapljanjih 40 do 150 m pod površjem. Pokazale so se velike razlike v reagiranju pretokov na padavine in v sestavi prenikle vode po padavinah med različnimi curki, ki so bili opazovani sočasno (Kogovšek, 2007a). Zabeležila sem razlike v hidrogramih in kemogramih med različnimi curki v času hidrološkega leta, kar je odraz različne dinamike izpodrivanja stare vode ter mešanja z novo. Nakazujejo se tudi velike razlike v načinu pretakanja padavin glede na predhodno vsebnost vode v prsti in v zgornji vadozni coni oz. glede na različno zasičenost teh con z vodo pred padavinskim dogodkom, kar sta nazorno pokazala sledilna poskusa, ko smo sledilo injicirali ob različni predhodni zapoljenosti vadozne cone z vodo.

Spremljanje prenosa topnih kontaminantov v okviru občasnih opazovanj je pokazalo razlike v prenosu skozi curke z različno prepustnim zaledjem kot tudi razlike v prenosu različnih kontaminantov. Perrin in sodel. (2003b) so ugotavljali neposreden odraz onesnaževanja zaradi različne izrabe tal na površju v iztekajoči vodi iz vadozne cone.

2 HIPOTEZE IN CILJI

Dosedanje znanje o pretakanju skozi vadozno cono je bilo pridobljeno pretežno z opazovanji in meritvami izvirov ali pa z opazovanji v vadozni coni le kratek čas z manjšim številom merjenih parametrov. Kar tri leta trajajoče zvezne meritve pretoka curkov z vzporednimi kemijskimi analizami, ki sem jih opravila v Planinski jami, pa so zajele le izdatnejše iztoke iz vadozne cone, zato dobljeni rezultati niso bili reprezentativni za celotno vadozno cono. So pa te raziskave pokazale, da lahko prihaja tudi do zelo hitrih sprememb in da predvsem intenzivno dogajanje v času vodnih valov po padavinah lahko spoznamo le z dovolj podrobnimi meritvami pretoka in drugih fizikalnih parametrov. Na dinamiko pretakanja vode je vezano raztapljanje karbonatov (večanje prevodnikov) in prenos kontaminantov skozi vadozno cono. Verjetno je bila prav zahtevnost postavitve ustreznih merilnih sistemov na različno izdatnih curkih in zamudnost izvajanja zveznih meritev v preteklosti vzrok, da ni prišlo do daljših zveznih opazovanj. Predvsem raziskave raztapljanja kamnine in prenosa kontaminantov, ki so vezane na zajemanje in takojšnje kemijske analize zajetih vzorcev, so bile zelo skromne. Upoštevati je potrebno, da so prenikle vode v vadozni coni večinoma prenasičene s kalcijevim karbonatom in prihaja do njegovega izločanja, zato je potrebno vzorce analizirati takoj po zajemu.

Na osnovi večletnih lastnih opazovanj in pregleda strokovne literature sem ocenila, da bi bile za boljše razumevanje dogajanja v vadozni coni potrebne podrobnejše zvezne raziskave, ki bi obsegale različne tipe curkov daljši čas, saj le tak način pokaže dinamiko dogajanja, ki jo z občasnimi, čeprav pogostimi opazovanji lahko zgrešimo, iz česar lahko sledijo nepopolni ali celo napačni sklepi. Zelo pomembna je sočasna uporaba več vzporednih metod (meritve pretokov, temperature, specifične električne prevodnosti, kemijskih parametrov, kot so karbonatna trdota, vsebnost kalcija, magnezija, nitratov, fosfatov, kloridov, sulfatov, izotopske analize kisika in prenos sledila v sočasnih sledilnih poskusih), kjer se dobljeni rezultati različnih metod medsebojno potrjujejo ali izključujejo, kar da preverjene rezultate. Poseben poudarek je na sočasnosti opazovanj ob enakih razmerah v prsti in vadozni coni po padavinskih dogodkih.

Tako zasnovane raziskave podajo dogajanje v času hidrološkega leta, kot tudi podrobno dogajanje v vodnih valovih. Opazovanja je bilo potrebno organizirati sočasno na več točkah, curkih in kapljanjih v vadozni coni, ki se bistveno razlikujejo po prepustnosti svojega zaledja.

Zato sem zasnovala raziskave na terenu, ki obsegajo meritve padavin na površju nad jamo ter pretokov in izbranih fizikalnih parametrov (temperatura, specifična električna prevodnost) v kratkih časovnih intervalih (15 oz. 30 minut) na izbranih točkah v jami. Te rezultate sem dopolnjevala z novimi spoznanji sledilnih poskusov in s spoznanji prenosa kontaminantov z analizami izbranih kemijskih parametrov prek hidrološkega leta in v času vodnih valov.

V poteku teh raziskav je bil poudarek na sočasnih raziskavah z naštetimi metodami, tako da je možno rezultate posameznih metod med seboj primerjati oz. se rezultati dopolnjujejo in potrjujejo. Na osnovi medsebojne primerjave metod sem opredelila tiste najbolj uporabne in primerne metode za izbrane nadaljnje raziskave.

Ob poznavanju količine in razporeditve padavin ter drugih pogojev na površju so meritve pretoka pokazale na dinamično iztekanje vode skozi vadozno cono. Vzporedne informacije so podale poleg sledenj z umetnimi sledili še izotopske analize ^{18}O mesečnih vzorcev padavin in baznega toka prenikle vode, ki so pokazale na povprečne zadrževalne čase vode v vadozni coni.

Opazovanje prenikle vode v vadozni coni sem osredotočila na tri značilne, različno izdatne curke v Postojnski jami, 100 m pod površjem, ki sledijo tektonskim razpoklinskim in porušnim conam ter lezikam (Kogovšek in Šebela, 2004). Skozi curke prenikla voda izteka zvezno in so izdatnejši (s pretokom do sto oz. nekaj tisoč ml/min) kot kapljanja, ki dosežajo pretok le do nekaj ml/min, in kjer voda izteka v obliki kapljic z manjšo ali večjo frekvenco. Opazovani curki, oz. dva curka in kapljanje, se med seboj razlikujejo tako po izdatnosti in dinamiki iztekanja po vsakokratnih padavinah, kot po nihanjih kemijskih parametrov v času, kar so nakazale predhodne občasne raziskave na širšem območju.

Zgradbo in zasičenost zgornje vadozne cone z vodo sem skušala preverjati z električno tomografijo, s sistemom SuperSting Rq/IP, proizvajalca Advanced Geoscience Inc.

Poseben poudarek je bil na spremljanju dogajanja v padavinskih dogodkih, predvsem po daljšem sušnem obdobju in v namočenem obdobju po predhodnih padavinah. Vzorčenje v krajših časovnih intervalih ob sočasnem »in situ« spremljanju fizikalnih parametrov in kasnejše kemijske analize vzorcev v laboratoriju na izbrane parametre, ki jih ne moremo meriti neposredno na terenu, so podrobneje osvetlile razmere v času najintenzivnejšega dogajanja po padavinah.

Ker so opazovani curki zaradi onesnaženja na površju, kjer je bil do pomladi 1991 manjši vojaški objekt, kontaminirani s kloridi, nitrati, sulfati in fosfati, sem preučila tudi način prenosa teh komponent skozi vadozno cono. Dolgoletno dosedanje občasno spremljanje prisotnih kontaminantov, je podalo postopno spiranje kontaminantov s padavinami. Ker pa prihaja do pomembnega spiranje prav v vodnih valovih po padavinah, sem se osredotočila na podrobno spremljanje prenosa posameznih kontaminantov v vodnih valovih, kar je podalo učinkovitost takega spiranja skozi posamezne curke.

Vzporedno sem preučila tudi vpliv povečanih vsebnosti nitratov, sulfatov, o-fosfatov ter kloridov v prenikajoči vodi na proces raztapljanja apnenca na opazovanih točkah.

CILJI

- z različnimi metodami spoznati razlike v dinamiki iztekanja stare vode in vode zadnjega padavinskega dogodka skozi izbrane curke v jami, ki se bistveno razlikujejo po prepustnosti svojega zaledja,
- ugotoviti dinamiko uskladiščenja vode v vadozni coni v zaporednih hidroloških letih,
- določiti povprečne zadrževalne čase za opazovane merilne točke,
- spoznati dinamiko spiranja onesnaženja s kraškega površja s padavinami, ki se v prenikli vodi odrazi v nitratih, sulfatih, kloridih in o-fosfatih v času hidrološkega leta in v vodnih valovih,

- ugotoviti učinke povečanih vsebnosti nitratov, kloridov, sulfatov in o-fosfatov v prenikajoči vodi na proces raztapljanja - izločanja apnenca,
- skušati ugotoviti zgradbo zgornje vadozne cone in njeno zapolnjenost z vodo ob različnih hidroloških razmerah po izdatnejših padavinah in kasnejšem praznjenju,
- z izpolnitvijo naštetih ciljev podati nova praktična spoznanja in smernice za boljše varovanje kraških vodnih virov pred onesnaženjem.

Naloga je bila zasnovana na lastnih dolgotrajnih meritvah in analizah, tako da so meritve padavin na površju in pretokov, temperature in specifične električne prevodnosti več reprezentativnih curkov v vadozni coni v času zaporednih hidroloških let podale dinamiko pretakanja in shranjevanja vode v vadozni coni, česar v literaturi še nisem zasledila. Pri tem pa je bil poudarek tudi na dogajanju v vodnih valovih v času celega hidrološkega leta, ko se kažejo razlike med vodnimi valovi po daljših sušnih obdobjih v primerjavi s preostalimi.

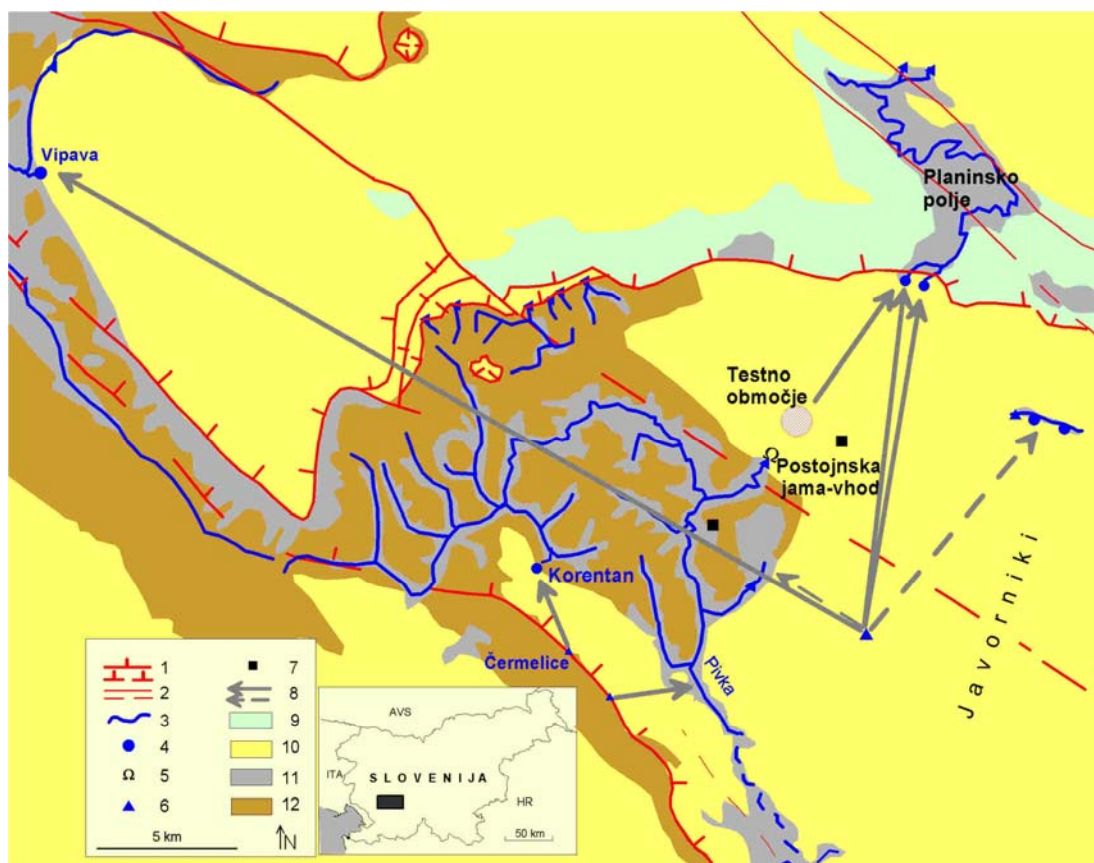
V sklopu raziskav je bila izvirna sočasna uporaba številnih metod daljši čas (multiparameterski pristop), ne le sledenj naravnih sledil, meritev fizikalnih in kemijskih parametrov, temveč tudi sledilnih poskusov z umetnimi sledili z različnim načinom injiciranja in ob različnih načinih spiranja. Te metode pa sem skušala dopolniti še z meritvami izotopske sestave stabilnega izotopa kisika ter z ugotavljanjem zgradbe zgornje vadozne cone z metodo električne tomografije. Poudarek je na sočasnih opazovanjih, saj razmere na površju kot v vadozni coni in v celotnem vodonosniku niso ponovljive.

Izvirna je tudi študija povečanega raztapljanja karbonatnih kamnin v vadozni coni zaradi točkovnih odtokov onesnaženih voda in izcednih voda najrazličnejših odlagališč s kraškega površja, kar pomeni večanje prepustnosti prevodnikov v vadozni coni pod njimi in posledično vse hitrejši prenos kontaminantov do sklenjenih vodnih tokov in naprej do kraških izvirov. Ta značilnost narekuje učinkovito čiščenje odpadnih voda in preučitev smeri njihovega odtoka v smislu varovanja kakovosti zajetih kraških izvirov.

Razmere v opazovanem delu vadozne cone sem primerjala tudi z razmerami v širšem merilu na nivoju celotnega vodonosnika. Vlogo vadozne cone in njen vpliv na delovanje kraških izvirov sem ocenila na osnovi primerjave z izvirov Korentan pri Postojni, kjer so potekale sočasne meritve celo hidrološko leto. Vlogo vadozne cone na širjenje kontaminantov pod odlagališči odpadkov Ribnice, Kočevja in Sežane pa sem določila glede na primerjavo z rezultati sledenj s teh odlagališč, ki so bila opravljena ravno tako v času podrobnih opazovanj vadozne cone v Postojnski jami.

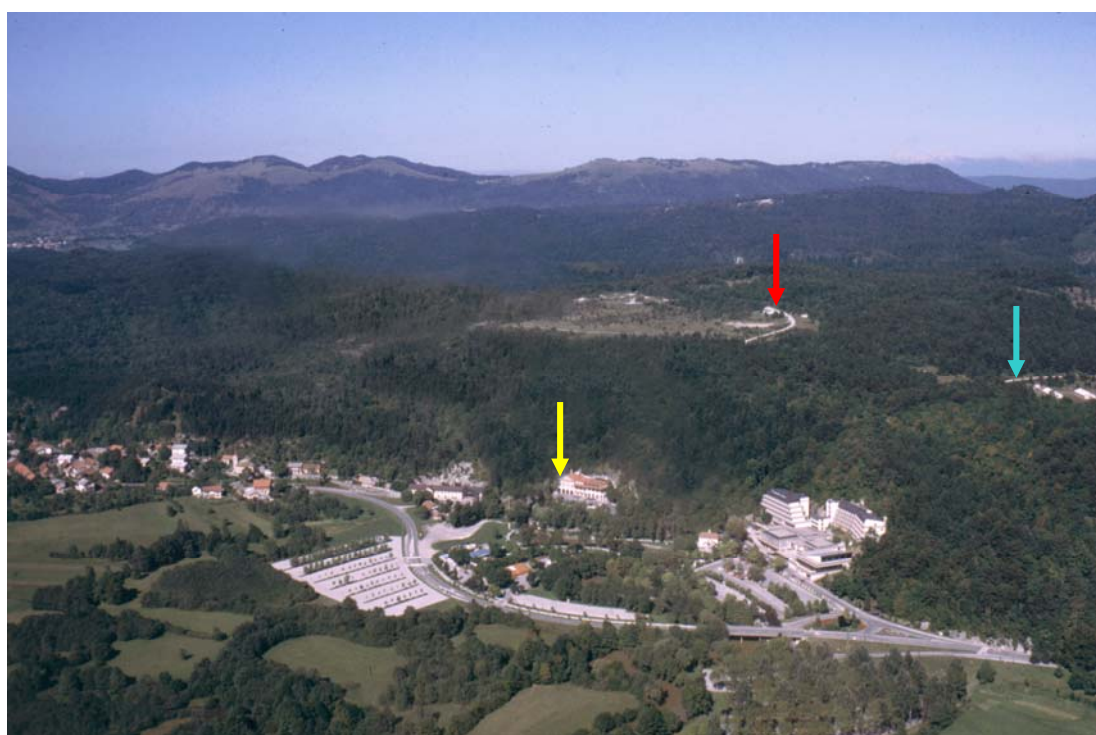
3 OBMOČJE RAZISKAV

Postojnski jamski sistem, ki obsega 20,57 km prehodnih suhih in vodnih rovov, se razteza med Pivško kotlino in Planinskim poljem. Na postojnski ponorni strani se začne s Postojnsko jamo, ki je s podzemnim tokom Pivke povezana s Planinsko jamo. Del vode v Pivko prispevajo tudi padavine, ki se po infiltraciji v jamski strop stekajo vanjo. Del infiltriranih padavin se pojavlja v različno izdatnih curkih in kapljanjih tudi v Postojnski jami in daje tako možnost raziskovanja pretakanja padavin skozi vadozno cono. V bližini je izvir Korentan. Pripada isti strukturni enoti kot Postojnski jamski sistem, ki jo gradi apnenec. Območje med njima pokriva pas fliša, relativno majhne debeline (slika 3.1).



Slika 3.1.: Hidrogeološka karta širšega območja Postojne. (legenda: 1. vidna in pokrita naravnica, 2. vidni in pokriti prelom, 3. površinski tok, 5. vhod v Postojnsko jamo, 6. ponor oz. injicirno mesto, 7. meteorološka postaja, 8. glavna in stranska podzemna vodna povezava, potrjena s sledilnim poskusom, 9. razpoklinški vodonosnik, 10. kraški vodonosnik, 11. medzrnski vodonosnik, 12. zelo slabo prepustne kamnine).

Ciljno območje raziskav je bila 100 m debela vadozna cona nad Kristalnim rovom in delom Glavnega rova v Postojnski jami. Slika 3.2 podaja površje širšega območja. Jamarji so nas v začetku osemdesetih let opozorili na vidno onesnaženje na stalaktitih v Kristalnem rovu. Zajeti vzorci na širšem območju v jami so pokazali onesnaženo preniklo vodo na več točkah. V letu 1988 sem začela s prvimi sistematičnimi, občasnimi vzorčenji in meritvami ter analizami več različno izdatnih curkov, ki sem jih poimenovala I, J, L, G, H ter bližnjega čistega, nekontaminiranega curka A (slika 3.4a).

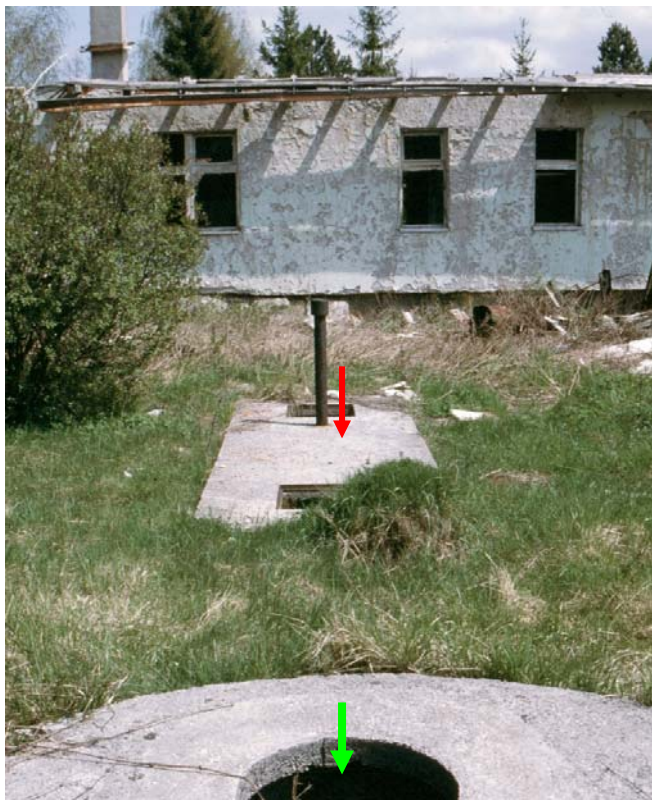


***Slika 3.2:** Površje nad opazovanim območjem v Postojnski jami (foto S. Šebela). Rumena puščica – ponor Pivke in vhod v Postojnsko jamo, rdeča puščica – položaj vojaškega objekta nad Kristalnim rovom, modra puščica – položaj dežemera ter vzorčevalnika padavin.*

V okviru sledilnih poskusov skozi vadozno cono je potekalo začetno vzorčenje na številnih curkih in kapljanjih na širšem območju v jami. Ko pa so sprotne analize pokazale na ožje območje raztekanja, sem se kasneje omejila na vzorčenje in podrobno opazovanje le tistih curkov, kjer se je pojavilo sledilo. Poleg že omenjenih curkov I, J, L, G, H in curka A izven vplivnega območja, sem opazovala še curke Lp, K, G*, N (sliki 3.4a in 3.4b).

Leta 2002 sem opazovanja nadaljevala s podrobnejšimi meritvami pretokov, fizikalnih in kemijskih parametrov izbranih curkov v jami ter padavin na površju. Na osnovi teh meritev sem nadaljnje podrobnejše raziskave nadaljevala na treh reprezentativnih kontaminiranih curkih, I, J in L z bistveno različno izdatnostjo in različno dinamiko iztekanja vode.

Vzrok kontaminirane vode je bil manjši vojaški objekt na površju nad Postojnsko jamo, kjer je bilo v sklopu raketne baze jugoslovanske vojske po naši oceni nastanjenih okoli 20 vojakov (slika 3.3). Po razpadu SFRJ in odhodu vojske spomladi 1991 smo ugotovili, da je bil glavni vir onesnaženja odpadna voda iz vojaškega objekta, ki je po sedimentaciji v sedimentacijskem bazenu ponikala v izkopani, približno 4 m globoki ponikovalnici. Od pomladi 1991 ni bilo več svežega onesnaževanja, ker je vojska zapustila območje in je šlo le še za spiranje zaostalega onesnaženja v ponikovalnici in v jamskem stropu s padavinami.



Slika 3.3: Površje nad območjem opazovanih curkov v Postojnski jami: vojaški objekt, sedimentacijski bazen (rdeča puščica) in ponikovalnica (zelena puščica).


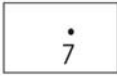










3.1 Geologija ožjega območja

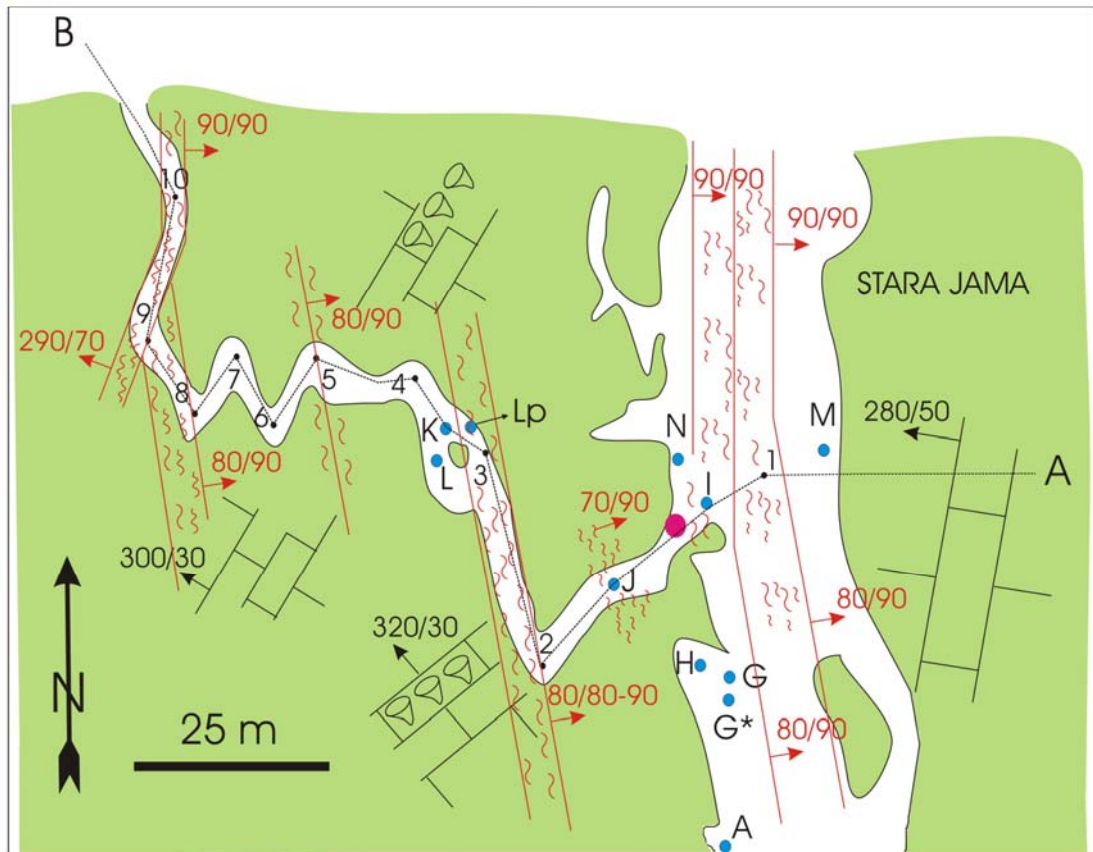
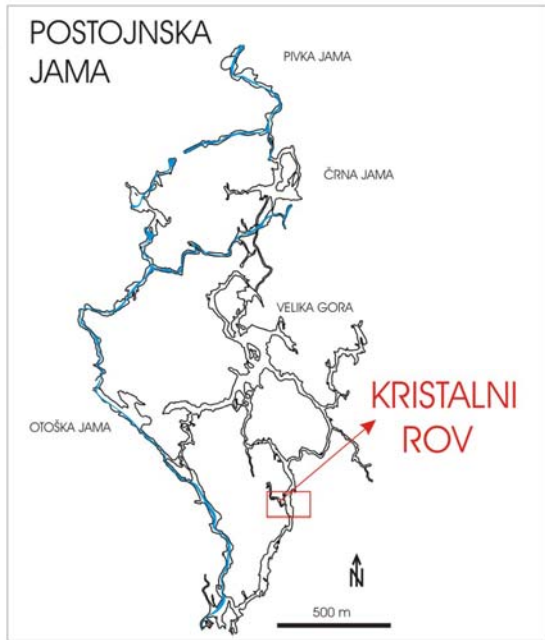
Po Gospodariču (1976) Kristalni rov gradi debelo-plastoviti senonijski apnenec K_2^3 . Da bi pridobili čim bolj izčrpno znanje o zgradbi jamskega stropa na območju raziskav, kjer je bilo že narejeno geološko kartiranje v merilu 1:4500 (Šebela, 1998), je bilo dodatno opravljeno še podrobno strukturno geološko kartiranje (Kogovšek in Šebela, 2004). To podrobno kartiranje v merilu 1:1000 (Sliki 3.4a in 3.4b) je pokazalo, da v vzhodnem delu rova plasti upadajo pod kotom 30° proti SZ. V Stari jami plasti upadajo pod kotom 50° proti SZ. V Kristalnem rovu je povprečna debelina plasti 0,5 - 1 m. Na nekaterih mestih so opazni ostanki rudistov.

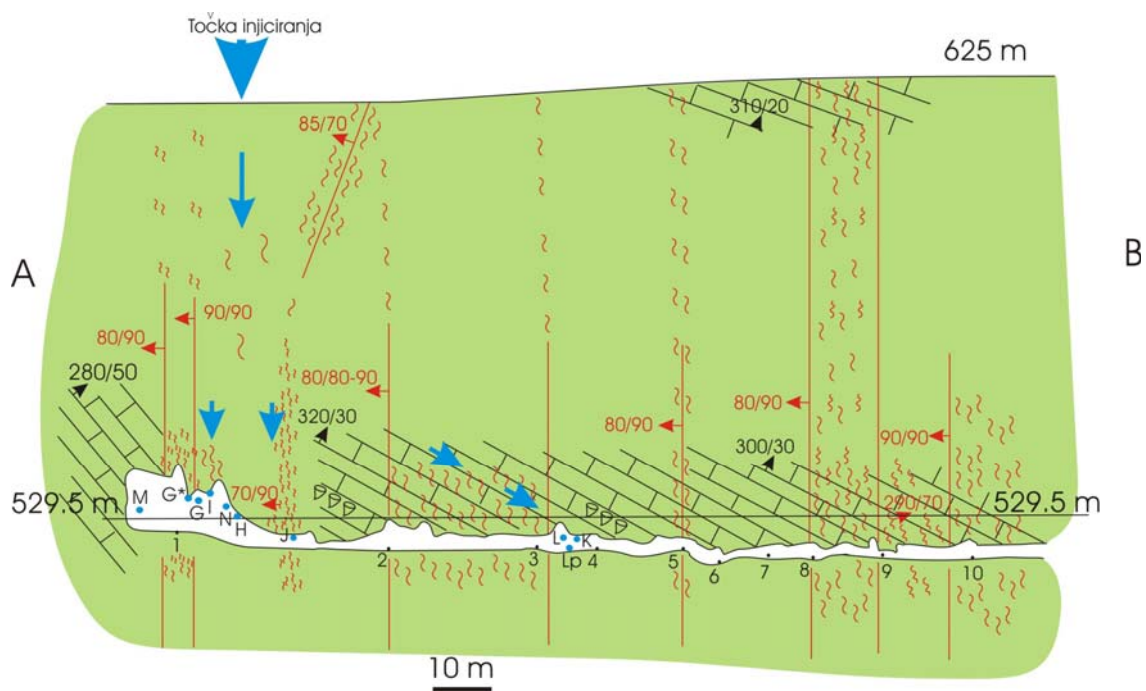
V Kristalnem rovu prevladujejo porušene in razpoklinske cone pretežno dinarske smeri (SZ – JV), ki so večinoma subvertikalne. V Stari jami so na stropu vidne prelomne ploskve 80-90/90 s porušeno do razpoklinsko cono. Prelomna cona je široka približno 15 m. Na površju prevladujejo porušene cone, a so zaradi človekovih posegov vidne le na nekaj mestih. Ker je debelina jamskega stropa okoli 100 m, je možno, da tektonsko pretrte cone prehajajo ena v drugo, verjetna pa je tudi direktna povezava .

Slika 3.4a (stran 15): Območje raziskav v Kristalnem rovu Postojnske jame in geološka skica Kristalnega rova: 1 – tloris jamskega rova, 2 – geodetske točke v jami, 3 – opazovani curki in kapljanja, 4 – ponikovalnica oz. točka injiciranja sledi na površju, 5 – smer prenikajoče vode, 6 – prečni profil, 7 – zgornjekredni apnenec z ostanki rudistov, 8 – smer in upad plasti, 9 – smer in upad prelomov, 10 – razpoklinska cona, 11 – porušena cona, 12 – verjetne smeri pretakanja vode (Kogovšek in Šebela, 2004: 993).

Legenda:

- 1.  1.
- 2.  2.
- 3.  3.
- 4.  4.
- 5.  5.
- 6.  6.
- 7.  7.
- 8.  8.
- 9.  9.
- 10.  10.
- 11.  11.
- 12.  12.





Slika 3.4b: Območje raziskav v Kristalnem rovu Postojnske jame: geološki pogoji in AB prečni profil Kristalnega rova - oznake enake kot pri sliki 3.3, (Kogovšek in Šebela, 2004: 994).

4. EKSPERIMENTALNI DEL RAZISKAV

4.1 UPORABLJENE METODE DE LA

4.1.1 Določitev debeline vadozne cone

Debeline jamskega stropa oz. debelina vadozne cone na območju opazovanih curkov je bila določena na osnovi stabiliziranega poligona v jami in prenosa poligonskih točk na površje. Za izmero elementov poligona je bil uporabljen elektronski razdaljemer NIKON DTM-A10 LG. Tako dobljena debelina vadozne cone na območju poligona znaša 100 m z natančnostjo 0,5 m (Drole, 1992).

4.1.2 Meritve padavin in zajem vzorcev padavin

Za podatke o dnevni količini padavin sem v letu 2002 in delno v letu 2003 uporabila meritve Agencije Republike Slovenije za okolje za padavinsko postajo Postojna Zalag. Kasneje, od junija 2003 pa smo začeli z lastnimi meritvami padavin na površju nad poligonom raziskav v Postojnski jami na robu ograjenega dela vojašnice v Postojni. Meritve so potekale z dežemerom z dataloggerjem HOBO Event Logger RG2-M, firme ONSET, ki zabeleži vsakih 0,2 mm padavin. Tako sem dobila podrobno razporeditev padavin v času (količino in intenzivnost). Primerjava meritev na obeh točkah je pokazala za 2 % višje vrednosti na merilnem mestu pri vojašnici ob manjših razlikah v porazdelitvi padavin. Vzoredno je potekal tudi zajem mesečnih vzorcev za izotopske analize z zbiralnikom, ki je sestavljen iz cevi s premerom 7 cm in posode za zbiranje vzorca. Ta je bila nameščena pod zemljo in izolirana, tako da se vzorci poleti niso segrevali, niti zmrzovali pozimi. Ob odvzemu vzorca smo vsakokrat izmerili volumen mesečnega vzorca in količino primerjali z meritvami dežemera (slika 4.1.1).

Z registracijo padavin na območju nad opazovanim poligonom v jami smo dobili reprezentativne padavine, iz katerih smo lahko preračunali količino korigiranih padavin in količino efektivno infiltriranih padavin (I_{ef}), ki se kasneje pojavljajo v curkih v jami. Tako smo pridobili podatke za zaporedna hidrološka leta. Izračun

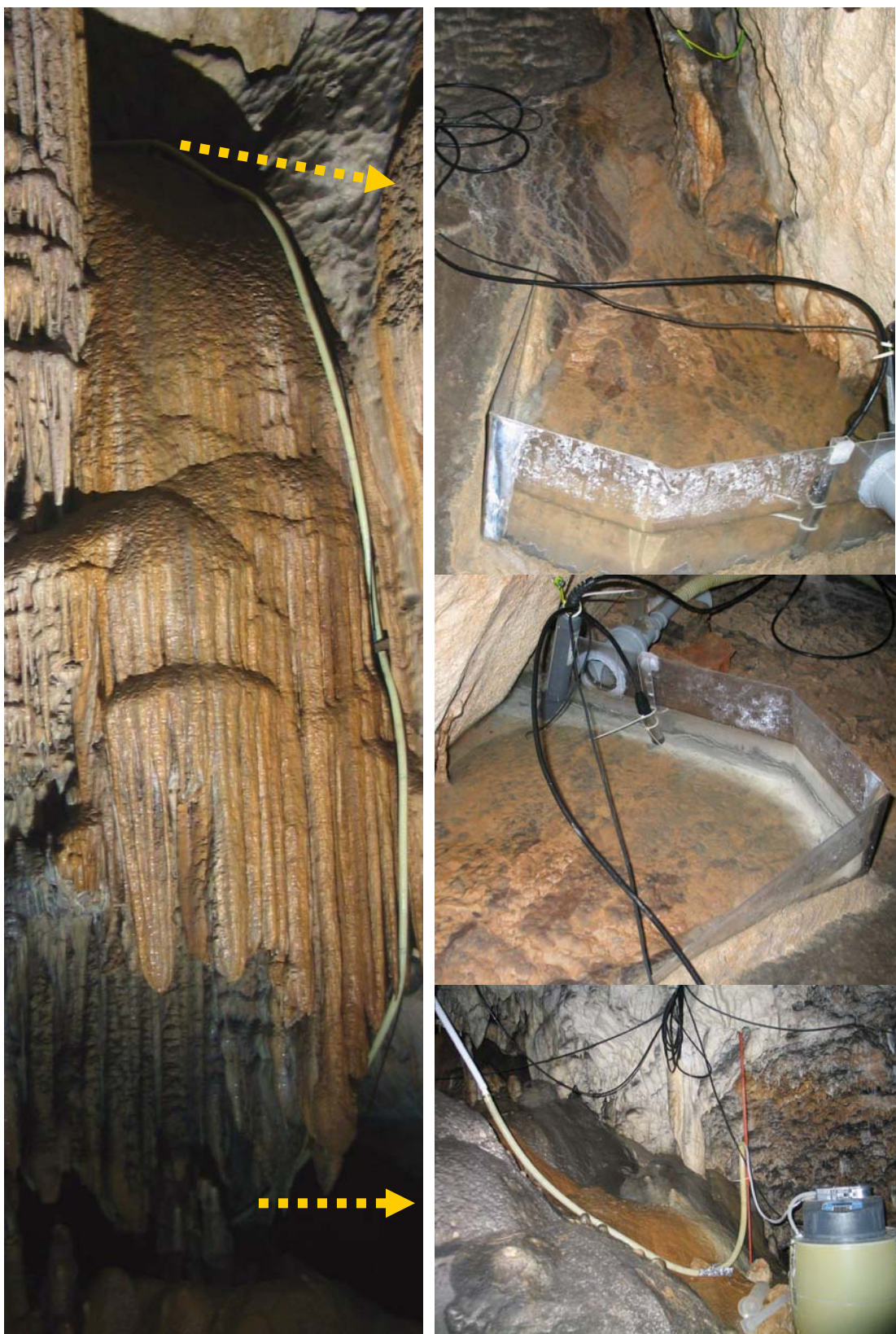
količine učinkovito infiltriranih padavin je bil narejen po metodologiji, ki jo je opisala M. Petrič (2001, 2002).



Slika 4.1.1: Meritve padavin in zajem vzorcev padavin za izotopske analize ^{18}O so potekale v ograjenem delu vojašnice Slovenske vojske v Postojni.

4.1.3 Meritve pretokov curkov

Občasne meritve pretoka curkov in kapljanj smo v letu 2002 in do poletja 2003 opravljali ročno z ustreznim merilnim valjem in štoparico ob zajemanju vzorcev v okviru sledilnega poskusa. Pretok smo vsakokrat izmerili večkrat, da smo dobili reprezentativno vrednost. Frekvenco meritev sem uravnavala glede na hidrološke razmere, najpogostejše meritve so bile 2-krat dnevno. Na točki I smo pretok merili ob dnu sigove kope, kjer smo zajeli le sorazmerni del celotnega pretoka, saj dela vode, ki je polzel po sigovi kopi ter tistega, ki se je precejal skozi kopo, nismo mogli zajeti. Šele s kasnejšimi zveznimi meritvami pretoka vrh sigove kope sem ugotovila, da je maksimalni pretok curka I opazno večji in da curek ni stalen, saj po njegovi presušitvi prispevajo minimalne količine vode drobna kapljanja na kopo. Manjši curek J je stalen in pri meritvah pretoka nismo imeli težav.



Slika 4.1.2: Meritve fizikalnih parametrov ter zajem vzorcev na točki I. Gornji desni sliki – merilne sonde, spodnja desna slika – avtomatski zajemalnik vzorcev.

Občasne meritve pretokov so se izkazale kot nezadostne za izračun količine povrnjenih sledil kot tudi za podrobno spremljanje dogajanja, saj po padavinah lahko prihaja do hitrih sprememb, ki jih lahko zabeležijo le meritve v dovolj kratkem časovnem intervalu. Poleti 2003 sem zato na treh izbranih točkah I, J in L začela z zveznimi meritvami pretokov, na točki J poskusno že poleti 2002.

Curek I

Na točki I smo po podrobnem ogledu curka po izdatnejših padavinah ugotovili, da priteka voda na vrhu približno 6 m visoke sigove kope. Glede na predhodne občasne meritve sem sklepala, da pretok lahko dosega do nekaj l/min. Na dotoku vode vrh kope smo naredili manjšo zaježitev z vgrajenim prelivom. Ob njem smo pritrdili sondo za merjenje nivoja (H) in kasnejši izračun pretokov. V neposredni bližini smo pritrdili še kombinirano sondo za meritve temperature, specifične električne prevodnosti - SEP in pH (slika 4.1.2).

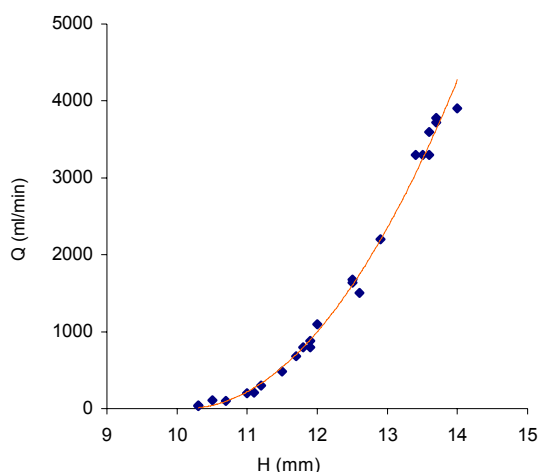
Za merjenje nivoja smo v začetnem obdobju (od oktobra 2003 do decembra 2004) uporabili Thermos data TL2 firme ENEA, ki je zabeležil meritev vsakih 20 minut oz. vsako uro, kasneje pa Gealog S, firme Logotronic. Vso vodo s preliva smo speljali po cevi do dna sigove kope, kjer smo imeli postavljen avtomatski zajemalnik vzorcev in kjer smo ob vsakem obisku merili pretok z merilnim valjem in štoparico za izdelavo umeritvene krivulje. Ob zamenjavi merilnika nivojev sem izdelala novo umeritveno krivuljo, sicer pa sem stalno vzporedno ročno merila pretok za primerjavo, vrednosti pa sem uporabila tudi v primeru izostanka meritev z Gealogom S ob težavah z merilniki. Na osnovi ročnih meritev pretoka in zveznih meritev nivoja s sondo sem za hidrološko leto 2003/04 dobila funkcijsko odvisnost pretoka od nivoja (slika 4.1.3):

$$Q = 300,02 H^2 - 6119,9 H + 31219 \quad z \quad R^2 = 0,99 \quad za \quad H > 10,2 \text{ mm.}$$

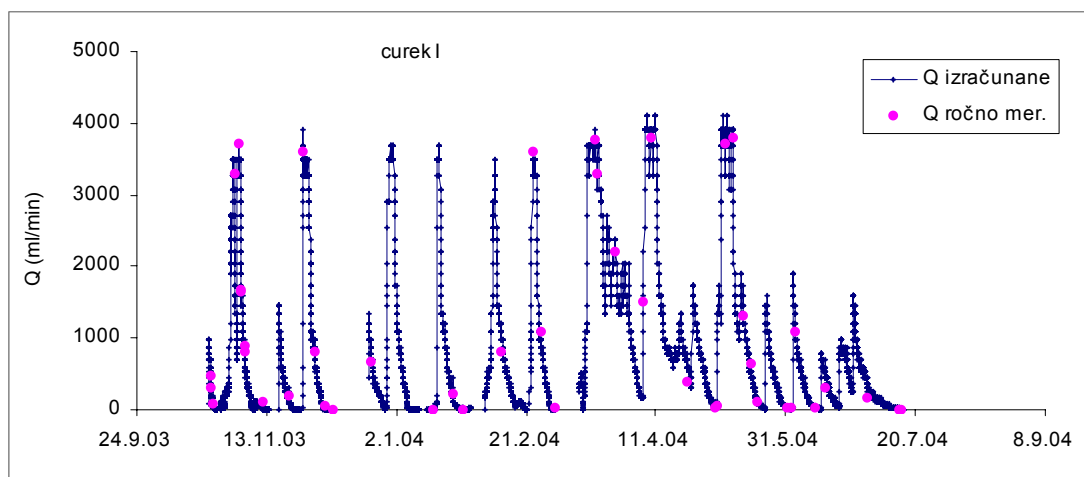
Za najnižje izmerjene vrednosti ($9,9 \text{ mm} < H < 10,2 \text{ mm}$) sem uporabila linearno enačbo:

$$Q = 33,3 H - 330.$$

Izmerjene vrednosti nivojev curka v opazovanem obdobju sem nato preračunala v pretoke. Iz tako dobljenega hidrograma (slika 4.1.4) je lepo razvidno ujemanje na osnovi meritev nivoja izračunanih pretokov in ročno izmerjenih vrednosti. Iz hidrogramov je razvidno tudi, da manjkajo vrhovi velikih vodnih valov, iz česar sem sklepala, da je pretok curka maksimiran in da del vode, ko curek I doseže vrednost okoli 4000 ml/min, odteka po vzporednem neznanem prevodniku.



Slika 4.1.3: Odvisnost pretoka curka I od nivoja (za $H > 10,2$ mm).



Slika 4.1.4: Hidrogram curka I za hidrološko leto 2003-04 (pretoki so izračunani na osnovi meritev nivojev) ter vzporedno ročno merjene vrednosti.

Curek J

Meritve pretoka stalnega curka J, ki sem ga ocenjevala, da mu pretok niha do nekako 140 ml/min, sem morala zasnovati drugače. Vodo s curka sem speljala v posodo z majhnim iztokom (luknjico), v kateri smo s sondo merili višino vode (H) vsakih 15 minut (slika 4.1.5).

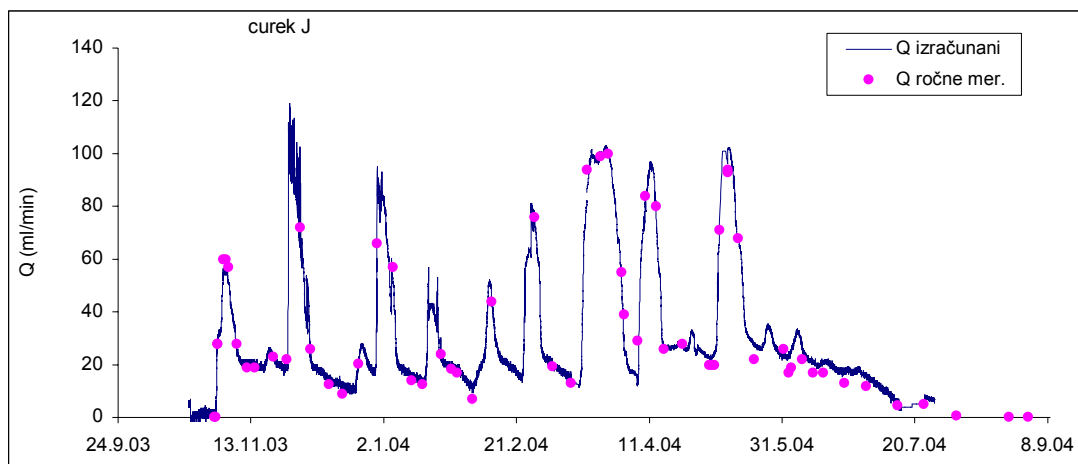
Enako kot za curek I sem z občasnimi vzporednimi ročnimi meritvami pretoka izdelala umeritveno krivuljo in izračunala funkcijsko odvisnost pretoka od nivoja. Ta je bila za leto 2003-04:

$$Q = 48,128 \ln H - 105,72 \quad z \quad R^2 = 0,97.$$



Slika 4.1.5: Meritve fizikalnih parametrov in vzorčenje curka J (levo). Detajl (desno) s posodico kamor doteka voda curka, ki nato protitočno teče v celico z WTW elektrodo za meritev temperature in SEP in odteka v posodo z iztokom, kjer je sonda, ki meri nivo za izračun pretokov. Ob visokih vodah odvajajo presežno vodo, ki ne more odtekati skozi omenjeni sistem, cevka neposredno v posodo, kjer se meri nivo.

Preračun pretoka iz izmerjenih vrednosti nivoja nam je dal hidrogram curka J. Vrednosti najnižjih pretokov (pod 5 ml/min) sem povzela iz ročnih meritev oz. sem najnižje pretoke preračunala iz natekle količine vzorca v časovnem intervalu. Slika 4.1.6 podaja hidrogram curka J za hidrološko leto 2003-04 in ročno izmerjene vrednosti.



Slika 4.1.6: Hidrogram curka J za hidrološko leto 2003-04 (pretoki so izračunani na osnovi meritev nivojev) ter vzporedno ročno merjene vrednosti.

Curek L

Za curek oz. kapljanje L sem v okviru predhodnih, občasnih meritev ugotavljala, da mu pretok prek leta niha med 0 in 10 ml/min. Ker nismo imeli na razpolago merilnika nivoja z dataloggerjem, sem si pomagala s starim evaporimetrom z mehansko uro, ki sem ga ustrezno opremila s posodo z natego in ga tako priredila za meritve pretoka. Vsakokrat izteklo vodo iz natege sem zbirala v večji posodi. Sicer zamudnim odčitavanjem iz papirnega zapisa, preračunavanjem pretokov in kontrolo tako dobljenih vrednosti s količino iztekle vode v zbirni posodi, sem dobila hidrogram tudi za to točko. Podobno kot v primeru curka I, so tudi v tem primeru šele podrobna opazovanja pokazala pravo naravo kapljanja. Izkazalo se je, da je kapljanje L stalno, medtem ko so predhodna, le občasna opazovanja nakazovala, da kapljanje tudi presahne (slika 4.1.7).



Slika 4.1.7: Meritve pretoka curka oz. kapljanja L. Voda kapljanja priteka v natego na evaporimetru. Ko se natega napolni, voda odteče v spodnjo zbirno posodo. Na papirnem registratorju se zabeleži hitrost polnjenja natege in iztok vode.

4.1.4 Meritve temperature in specifične električne prevodnosti curkov

Specifično električno prevodnost – SEP (referenčna temperatura 25 °C) in temperaturo smo v začetnem obdobju, ko še nismo imeli merilnikov z datalogerji, izmerili takoj ob zajemu vzorca s prenosnim konduktometrom LF 196 firme WTW, kasneje pa z aparati LF 597 in MultiLine P4 iste firme. Inštrumente sem umerjala z raztopino KCl ter večkrat opravila tudi medsebojno primerjavo. Od jeseni 2003 dalje smo na točkah I in J poleg zveznih meritev nivoja hkrati merili tudi temperaturo in SEP, na točki I pa določen čas še pH, ob elektronskem shranjevanju podatkov (datalogerji).

Na točki I sem od poletja 2003 merila temperaturo, SEP in pH najprej s kombinirano sondo YSI 600 v povezavi z avtomatskim zajemalnikom ISCO 6700. Ker curek občasno presuši tudi za daljši čas in je nivo vode v zajezitvi zaradi izhlapevanja tako

upadel, da sonda občasno ni bila v vodi, je prišlo pri registraciji SEP in pH do velikih nihanj, odstopanj in napak.

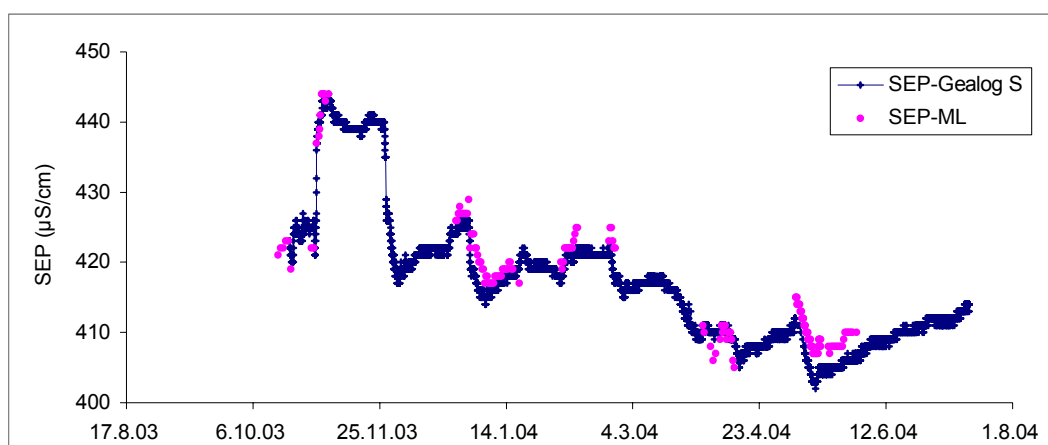
Zato smo marca 2005 namestili nov merilnik Gealog S - B. Sondo za nivo smo pritrdili ob preliv na kopi, medtem ko smo sondo za meritve SEP in temperaturo namestili pod kopo v sifonski nastavek, tako da je bila stalno v vodi. Seveda zato meritve temperature in SEP v času presušitve curka niso bile reprezentativne in sem jih izločila. V času minimalnih pretokov je na meritve temperature vode vplivala temperatura zraka v jami, ki je pozimi zniževala, poleti pa zviševala T vode, zato sem tudi te meritve izločila.

Na točki J so potekale ves čas meritve temperature, SEP in nivoja z istim merilnikom Gealogom S (obnovljeni inštrument A), le v obdobju 16.2.06 – 18.5.06 z Gealogom S – C. Sondo za meritve temperature in SEP sem namestila v stekleno merilno celico, kjer je dotekala voda curka na dnu in odtekala ob vrhu celice. V začetnem obdobju sem imela težave z mehurčki zraka, ki motijo meritve SEP. Ker je bila ob velikih pretokih curka prepustnost te celice premajhna, sem presežno vodo iz zbirne posode speljala po posebni cevki neposredno v merilno posodo za merjenje pretoka. Pretok skozi celico bi bil lahko moten, zato sem meritve SEP primerjala z vzorednimi meritvami SEP zajetih vzorcev (slika 4.1.8). Ta primerjava je pokazala odstopanja v okviru natančnosti uporabljenih elektrod (1 %). V času pobiranja vzorcev sem ugotavljala, da je naše zadrževanje v neposredni bližini sonde (do 2 uri) povzročilo segrevanje zraka v okolici sonde, kar se je odrazilo višji zabeleženi temperaturi, od ene do dveh desetink stopinje Celzija. Tudi te meritve sem kasneje izločila.

Na točki L (najmanjši curek oz. kapljanje) smo imeli možnost zveznih meritev SEP z merilnikom in shranjevalnikom podatkov Thermos data TC1 firme ENEA z običajno sondo le v začetnem obdobju od oktobra do decembra 2003. Za tako majhne pretoke bi bila primernejša ustrezna mikro-sonda. Ob minimalnih pretokih sem ugotavljala tudi izločanje kalcijevaga karbonata in zato tedaj meritve SEP niso bile reprezentativne.

Meritve z dataloggerji na izbranih točkah so potekale zvezno v intervalu 15 oz. 30 minut. Občasno je prihajalo do težav z napajanjem prek baterijskih vložkov predvsem zaradi velike vlage v jami, ko smo zato ostali krajša obdobja brez meritev. V sklopu opazovanj so se prav te težave izkazale kot najbolj moteče. Težave z izpadi električnega napajanja ali težave z merilnimi sondami so pomenile izostanek reprezentativnih meritev. Zato smo ob kasnejših opazovanjih posebno pozornost namenili stalnemu servisiranju in kontroli merilnikov, predvsem pred napovedanimi padavinami.

Umerjanje sond (SEP) in njihovo medsebojno umerjanje (interkalibracijo) sem izvajala tako, da sem jih umerjala po predpisanih protokolih z ustrezno raztopino KCl in jih kasneje preverjala s prenosnim merilnikom LF597, WTW, ki nam je služil kot referenčni merilnik. V določenih obdobjih sem izvajala tudi vzporedne meritve SEP zajetih vzorcev. Meritve so bile izvedene z MultiLine P4 aparatom firme WTW, ki sem ga umerila na LF 597. Pokazalo se je, da zvezne meritve z inštrumentom Gealog S dobro sovpadajo z meritvami z merilnikom MultiLine P4 v okviru natančnosti obeh merilnikov (natančnost $\pm 1\%$ meritve), kar je razvidno tudi iz slike 4.1.8.



Slika 4.1.8: Vzporedne zvezne meritve SEP z merilnikom Gealog S ter ročne meritve z MultiLine P4 merilnikom v curku J.

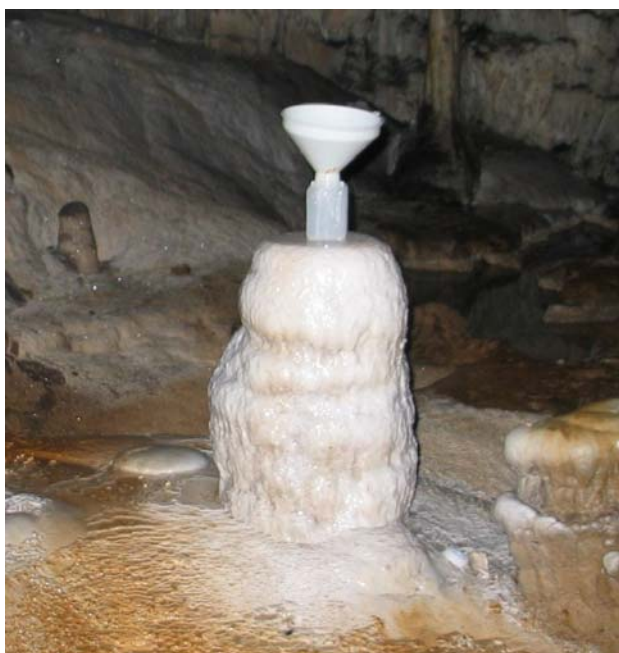
Izkazalo se je tudi, da je v primeru sočasnih meritev na več mestih, posebno v času vodnih valov, za kasnejšo podrobno medsebojno primerjavo meritev potrebno imeti

usklajene tudi čase, tako da sem uporabljala za vse nastavitve časa, tako dataloggerjev kot avtomatskih zajemalnikov, čas izbrane štoparice s sončno uro, saj so meritve potekale tekom več let. Meritve temperature so se pokazale kot zelo zanesljive, kar so potrdile tudi vzporedne meritve temperature z dvema različnima sondama na točki I.

4.1.5 Zajemanje vzorcev vode curkov in kemijske analize

Vzorci vode curkov smo zajemali za analizo vode na fluorescenco v okviru sledilnih poskusov ter za kemijske in izotopske analize.

V obdobju od leta 1988 do 2002 smo vodo curkov za kemijske analize vzorčili le občasno. Vzorčili smo ročno neposredno v polietilenske steklenice, tako da smo počakali, da so se napolnile (slika 4.1.9). V času zelo nizkih pretokov smo nastavili plastenke in prišli po vzorce naslednji dan zjutraj. Vsakokrat smo izmerili tudi pretok, temperaturo in SEP. Skušala sem zajeti značilnosti kemijske sestave voda ob najrazličnejših hidroloških razmerah, tako ob nizkih kot visokih pretokih, ob naraščanju in upadanju pretoka.



Slika 4.1.9: Občasno vzorčenje vode za kemijske analize v obdobju 1988 – 2002.

V začetnem obdobju kombiniranega sledilnega poskusa od junija 2002 do oktobra 2003 smo vzorce za fluorescenco v času višjih pretokov po padavinah zajemali ročno 1 do 2-krat dnevno na 12 točkah, v sušnih obdobjih pa smo frekvenco zajemanja prilagajali hidrološkim razmeram (Kogovšek, 2007a).

Od jeseni 2003 dalje smo imeli na točkah I in J postavljene avtomatske zajemalnike (sliki 4.1.2 in 4.1.5), ki so vzorce zajemali glede na nastavljeno dinamiko (od 1-krat do 6-krat dnevno), najpogosteje v vodnih valovih po padavinah.

Občasne prve analize sestave vode curkov in kapljanj na območju Kristalnega rova in dela Glavnega rova so pokazale povišane koncentracije kloridov, nitratov, sulfatov in o-fosfatov ob visokih vrednostih specifične električne prevodnosti. Vir onesnaženja je bila odpadna voda iz ponikovalnice, kot je bilo že podano (poglavje 3).

Zato sem v obdobju od leta 1988 do 2002 izbrane curke z različno prepustnostjo njihovega zaledja (I, J, L, G in H) redno spremljala z občasnimi analizami karbonatov, kalcija, magnezija, kloridov, nitratov, sulfatov in o-fosfatov. Vzoredno smo za primerjavo sočasno vzorčili in analizirali tudi »čisti«, nekontaminirani curek A, ki leži izven kontaminiranega območja. Leta 2003 in 2004 smo v okviru podrobnejših opazovanj curkov pogosteje vzorčili tudi vodo za kemijske analize. Poseben poudarek je bil na podrobnejšem vzorčenju v času vodnih valov. Kemijske analize na izbrane parametre so podale prenos kontaminantov v celem hidrološkem letu 2003-04, kot tudi njihov prenos v času vodnih valov.

Vzorcem smo v našem laboratoriju določali vsebnost nitratov, o-fosfatov, kloridov in sulfatov. Vsebnost kloridov smo določevali po standardni metodi z živosrebrom nitratom, sulfate po standardni turbidimetrični metodi, o-fosfate po standardni metodi s kositrovim kloridom (Standard Methods, 1992), vsebnost nitratov pa po metodi z natrijevim salicilatam.

4.1.6 Izvedba sledilnih poskusov

Izvedli smo več sledilnih poskusov s fluorescentnimi sledili z različnim načinom injiciranja (z začetnim spiranjem z dodatno vodo ali ko smo spiranje sledila prepustili le padavinami) in z različnih mest na površju (4 m pod površjem v vadozni coni oz. na dnu ponikovalnice ali na površju po prsti in vegetaciji). Tako sem pridobila izčrpnjše informacije o pretakanju vode v danem sistemu.

Prvič smo sledilo injicirali (60 g uranina) v ponikovalnico 4 m pod površjem (Slika 4.1.10), neposredno na skalno osnovo v sorazmerno sušnem obdobju in ga zalili s 6 m³ vode (poskus z zalivanjem). Želela sem ugotoviti oz. potrditi, v katere curke in kapljanja je odtekala onesnažena voda iz ponikovalnice. Poskus je podal tudi hitrosti pretakanja v posameznih smereh v takih razmerah in pokazal kako hitro in kako močno bi se pojavilo onesnaženje 100 m pod kraškim površjem, če bi prišlo do nesreče z razlitjem večje količine nevarne snovi, topne v vodi. Prisotnost uranina sem spremljala 2 leti.



Slika 4.1.10: Površju nad Kristalnim rovom, ponikovalnica odpadnih voda, kjer smo injicirali sledila.

Z drugim sledilnim poskusom sem želela ugotoviti, kako se pretaka voda s sledilom skozi vadozno cono z iste točke (z dna ponikovalnice) v naravno namočenih razmerah, brez dodatnega zalivanja injiciranega sledila. Zato smo sledilo raztopili v minimalni količini vode in ga injicirali ob ugodnih hidroloških razmerah, ko so injiciranju sledile intenzivne padavine. Tak način prenosa topnih snovi poteka z odlagališč odpadkov z razgaljenih kraških terenov, kjer je bila odstranjena prst (odlaganje v opuščenih kamnolomih, peskokopih in podobno). Prisotnost sledila sem redno spremljala 1 leto, kasneje pa le občasno.

V tretjem kombiniranem sledenju smo eno sledilo injicirali na dnu ponikovalnice kot v predhodnih dveh sledenjih, drugo pa na površju ob ponikovalnici, tako da smo ga polili po prsti, porasli s travo, brez spiranja z dodatno vodo. Spiranje sledil smo prepustili padavinam. S tem sledenjem sem želela ugotoviti razlike v načinu pretakanja in prenosa topnih snovi s poraslega in z razgaljenega kraškega površja, ko je odstranjena plast prsti, v naravnih razmerah ob spiranju le s padavinami. Meritve fluorescence sledila, injiciranega po prsti, od injiciranja junija 2002 v letu 2009 še vedno potekajo.

Vzorčenje je potekalo v stekleničke iz temnega stekla. V okviru sledilnih poskusov smo fluorescenco uranina v vzorcih merili z luminiscenčnim spektrometrom LS 30 PERKIN ELMER pri ekscitacijskem maksimumu E_{ex} 491 nm in emisijskem maksimumu E_{em} 512 nm z mejo določljivosti 0,005 ppb (1 ppb = 1 mg/m³), fluorescenco eozina pa pri E_{ex} 516 nm in E_{em} 536 nm z mejo določljivosti 0,01 ppb.

Hitrosti pretakanja vode sem računala glede na linearno razdaljo med točko injiciranja in curkom, kjer se je pojavilo sledilo in glede na čas po injiciranju, ko je sledilo doseglo maksimalno vrednost (dominantne hitrosti). Tako dobljene vrednosti so navidezne hitrosti pretakanja. Dejanske vodne poti so daljše in zato so tudi dejanske hitrosti pretakanja večje.

Sledilni poskus z zalivanjem

V sledilnem poskusu z zalivanjem je bilo injiciranje v sorazmerno sušnih razmerah, 7. junija 1993, saj je od januarja do dne injiciranja padlo skupno le 190 mm padavin, od tega 30 mm 4 dni pred injiciranjem. Pred injiciranjem 60 g raztopljenega uranina na dno ponikovalnice smo vlili 0,5 m³ vode, po injiciranju pa smo sledilo zalili še s 5,5 m³ vode v času 1 ure. Sto metrov globlje v jami smo opazovali 20 curkov (Kogovšek, 1995c, 1997a; Knez in sodel., 1995). Najpodrobneje smo spremljali curke I, J, G in H ter kapljanje L in občasni curek K v neposredni bližini curka L (sliki 3.4a in 3.4b).

Pretoki curkov in kapljanj so bili v času injiciranja zelo nizki (tabela 4.1). Po injiciranju vse do začetka septembra, ko so vsi curki v jami prvič izrazito reagirali, so sledile le manj izdatne padavine, skupno kar 330 mm. Količina efektivno infiltriranih padavin je bila manjša, saj je potrebno upoštevati evapotranspiracijo v tem obdobju. Septembra in oktobra je nato padlo skoraj 700 mm dežja.

Sledilni poskus v naravno namočenih razmerah

Drugi sledilni poskus smo izvedli v naravno namočenih razmerah. Štiri tedne pred injiciranjem je padlo skupno le 15 mm dežja, medtem ko so bili september in prvi dve dekadi oktobra dobro namočeni (380 mm dežja). Dne 17. novembra 1996 je pred injiciranjem raztopine 15 g uranina na dno ponikovalnice, kjer smo sledilo injicirali tudi v prvem sledilnem poskusu, padlo 5,2 mm dežja. Ponovno je začelo deževati 4

Tabela 4.1: Minimalni in maksimalni pretoki (ml/min) opazovanih curkov in kapljanj ter pretoki v času injiciranja sledila junija 1993 in novembra 1996.

Curek	G	H	I	J	K	L
Q _{min}	0,5	1	1	1	0	0
Q _{max}	55	85	1500	184	128	16
Q _{7.6.1993}	0,5	12	1	1	0	3,5
Q _{17.11.1996}	1	20	5	1,5	0	2

ure po injiciranju, naslednji dan pa je padlo prek 90 mm dežja. Do konca meseca je nato padlo še dobrih 100 mm dežja (Kogovšek, 2000). Vzorčili smo na 9 točkah v jami, saj prvi poskus ni pokazal širšega raztekanja skozi 100 m debel jamski strop (tabela 4.1).

Kombinirani sledilni poskus s površja

V tretjem kombiniranem sledilnem poskusu, ki smo ga začeli 7.6.2002, smo ob 8.45 injicirali raztopino 15 kg NaCl na dnu ponikovalnice, 4 m pod površjem. Ob 9.00 smo injicirali 60 g eozina, ki smo ga raztopili v 5 l vode in polili po površju ob ponikovalnici. Spiranje smo prepustili padavinam, ki so sledile. Pred injiciranjem, aprila in maja 2002 je padlo v Postojni (postaja Zalog, podatki Agencije Republike Slovenije za okolje, Urad za meteorologijo) 160 in 154 mm. Po injiciranju je še isti dan padlo 34 mm dežja, sicer pa je v juniju 2002 padlo skupno le 110 mm. V juliju so bile padavine skromne (82 mm), avgusta pa izdatnejše (201 mm), ko je večina padavin padla v prvi polovici avgusta. Septembra, ko se je začelo jesensko deževje, je padlo 151 mm dežja, večina od 20. do 26. septembra, ko so se zopet povečali pretoki curkov. Izdatnejše padavine v sledečih mesecih so zagotavljale vodo stalnim curkom do sredine maja.

V Postojnski jami, 100 m pod površjem, smo zajemali vzorce na 9 točkah. Od junija 2002 do oktobra 2003 smo vzorce zajemali ročno, v času padavin tudi do dvakrat dnevno, v času nizkih pretokov pa manj pogosto (Kogovšek, 2007a). Ob vzorčenju smo vsakokrat izmerili tudi pretoke curkov. Od jeseni 2003 dalje pa smo na točkah I in J zajemali vzorce z avtomatskima zajemalnikoma, pri čemer sem frekvenco zajemanja prilagajala hidrološkim razmeram. Ko je koncentracija eozina na nekaterih točkah padla pod mejo določljivosti in ko sledila nismo zaznali tudi po večkratnih izdatnejših padavinah, ki so oblikovale izrazite vodne valove (leto oz. leto in pol po injiciranju), smo na teh točkah zaključili z vzorčenjem. Na točkah I, J in Lp pa vzorčenje v letu 2009 še vedno poteka, saj meritve izkazujejo, da prenos eozina še vedno poteka. Vzorčimo 1-krat dnevno.

4.1.7 Metoda električne tomografije SuperSting Rq/IP

Sistem SuperSting Rq/IP, proizvajalca Advanced Geoscience Inc. (slika 4.1.11) omogoča enostavno snemanje navidezne upornosti v poljubni postavitvi elektrod. Pri tem na nizu elektrod sistem sam izbira vse možne pare tokovnih in potencialnih elektrod ter beleži vrednosti navidezne upornosti, ki jih zazna med posameznimi pari. Navidezna upornost je volumsko povprečna upornost, ki je odvisna od upornosti vseh plasti skozi katere teče tok. Pravo sliko upornosti dobimo z numerično obdelavo podatkov (t.i. inverzijo), pri čemer program preko serije približkov išče sliko upornosti, ki najbolj ustreza izmerjeni sliki navidezne upornosti. V ta namen smo uporabili program AGI Earthimager 2D. Zavedati se moramo, da rezultat inverzije ni enoznačen, kar zahteva pazljivost pri interpretaciji. Vsaka postavitev



Slika 4.1.11: Za snemanje zgradbe zgornje vadozne cone smo uporabili sistem SuperSting Rq/IP, proizvajalca Advanced Geoscience Inc.



Slika 4.1.12: Sonde smo zabili v tla, kjer so ostale ves čas meritev.

(npr. Wennerjeva, Schlumbergerjeva, Dipol-Dipol) ima svoje prednosti in slabosti (Telford in sodel., 1990; Zhou in sodel., 2002).

Uporabili smo postavitev dipol-dipol, ki ima največjo ločljivost, a majhen globinski doseg (Telford in sodel., 1990). Uporabili smo 20 nerjavečih elektrod v 4 metrskem razmaku (slika 4.1.12). Elektrode smo zabili v tla in jih pustili na mestu prek celotnega obdobja raziskav.

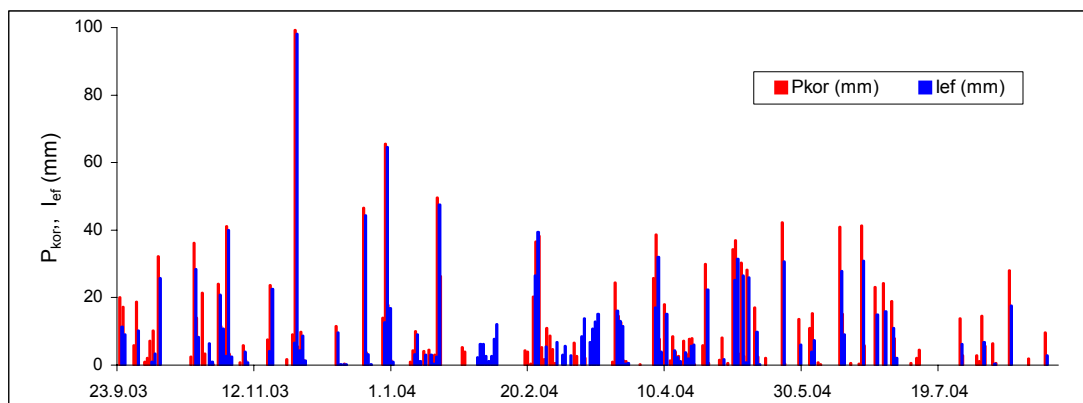
5 REZULTATI

5.1 ODZIV HIDROGRAMOV CURKOV NA PADAVINE

5.1.1 Hidrološko leto 2003 - 2004

Hidrološko leto je omejeno z minimalnim pretokom curkov v dveh zaporednih letih. Obsega reakcije pretokov na padavine po daljšem poletnem sušnem obdobju in traja še naslednje poletno sušno obdobje, ko se pretoki zopet približujejo minimalnim vrednostim.

Na osnovi meritev količine padavin v hidrološkem letu 2003-2004 (23.9.03 – 31.8.04) so bile izračunane korigirane dnevne padavine in dnevna efektivna infiltracija – I_{ef} (Petrič, 2001), kar je razvidno iz slike 5.1.1. Korigirane padavine so bile izračunane iz meritev padavin ob upoštevanju korekcije zaradi vetra in omočitve dežemera. Količina dnevne efektivne infiltracije pa je bila izračunana iz dnevnih padavin ob upoštevanju vpliva prestrežanja padavin v vegetacijskem pokrovu, snežnih padavin in taljenja snega, evapotranspiracije in uskladiščenja vode v tleh.

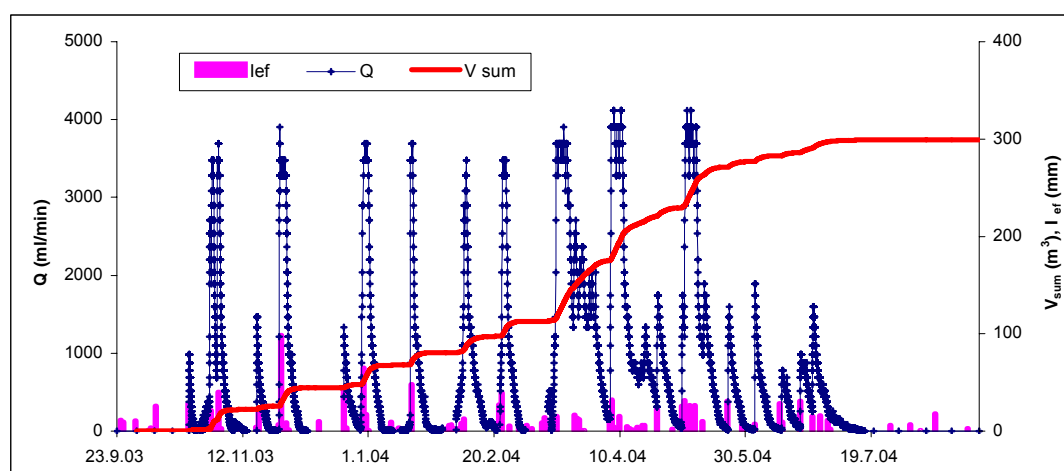


Slika 5.1.1: Dnevne korigirane padavine (P_{kor}) in dnevna efektivna infiltracija (I_{ef}) na površju nad raziskovalnim poligonom v Postojnski jami za hidrološko leto 2003-04.

Pozno jesenske in zgodnje zimske padavine dokaj dobro sovpadajo z I_{ef} . Večja odstopanja nastopajo v času snežnih padavin in nizkih temperatur, ko infiltracija lahko izostane, spomladi v času prebujajoče se vegetacije s povečano transpiracijo in

v toplih poletnih mesecih s povečano evapotranspiracijo. Letna količina korigiranih padavin za hidrološko leto 2003-04 znaša 1618,3 mm, letna količina efektivno infiltriranih padavin pa 1225,9 mm oz. 75,8 % korigiranih padavin, kar je razvidno tudi iz tabele 5.1.2.

Curek I v Postojnski jami v odvisnosti od vsakokratnih razmer na dovolj izdatne padavine reagira najhitreje. V namočenih obdobjih oblikuje vodne valove s hitrim naraščanjem pretoka, ko doseže pretok maksimalno vrednost v 6 do 60 urah. V hidrološkem letu 2003-04 je 5 krat presahnil za 3 do 15 dni (slika 5.1.2).

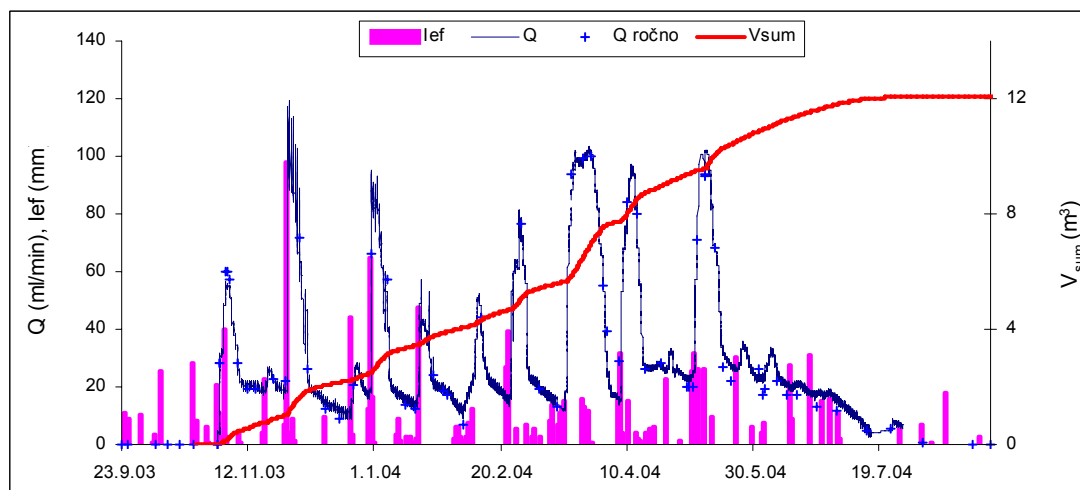


Slika 5.1.2: Hidrogram curka I, kumulativna krivulja iztekle vode in dnevna efektivna infiltracija za hidrološko leto 2003-04.

Največji vodni valovi, ko se v podzemlje infiltrira največja količina padavin (tudi taljenje snega), nastopajo v spomladanskem času, kar prikazuje tudi kumulativna krivulja prenikle vode. Količina prenikle vode, ki je iztekla skozi curek I v hidrološkem letu 2003/2004, znaša 299 m³ (tabela 5.1.3).

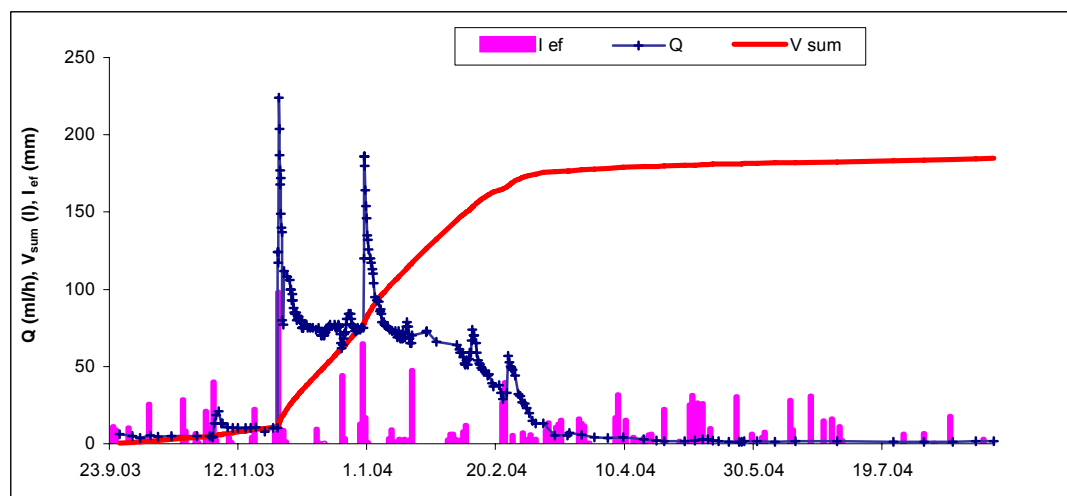
Pri manj izdatnem curku J prihaja do močnejšega dušenja infiltriranih padavin. Curek prek leta nikoli ne presahne, na padavine reagira z večjimi časovnimi zamiki v primerjavi s curkom I, njegovi vodni valovi pa so zaobljeni s počasnim naraščanjem in upadanjem pretoka. Po daljšem poletnem sušnem obdobju je konec oktobra 2003 na padavine reagiral 2,5 dni za curkom I (slika 5.1.3), v dobro namočenih obdobjih pa je ta časovni zamik opazno manjši. Hidrograma obeh curkov sta si v grobem dokaj podobna, predvsem v pojavljanju zaporednih vodnih valov. Ko je curek I presahnil za krajša obdobja, je bil pretok curka J v počasnem upadanju in ni upadel

pod 10 ml/min, razen konec hidrološkega leta, ko je dosegal minimalne vrednosti. Količina iztekle vode skozi ta curek v času hidrološkega leta 2003-04 znaša 12,2 m³ (tabela 5.1.3). Primerjava kumulativnih krivulj obeh curkov nakazuje bolj enakomerno iztekanja infiltrirane vode v primeru curka J.



Slika 5.1.3: Hidrogram curka J, kumulativna krivulja in dnevna efektivna infiltracija za hidrološko leto 2003-04.

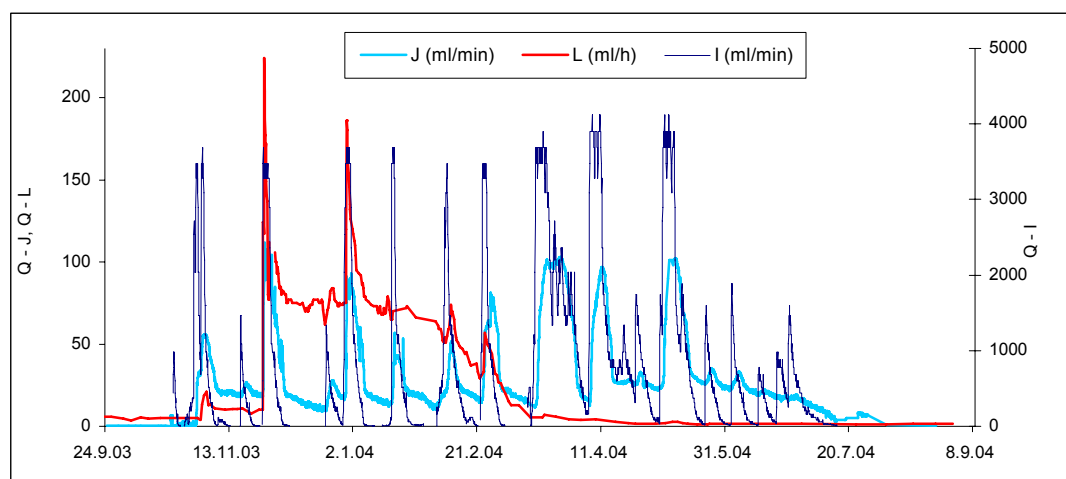
Bistveno drugačen pa je hidrogram kapljanja L. Na padavine konec oktobra 2003 je minimalno reagiral, skoraj 3 dni za curkom J in 5 dni za curkom I. Izrazita reakcija pa je sledila šele čez 24 dni po naknadnih padavinah (slika 5.1.4). V obdobju treh in pol mesecev je prišlo do intenziviranega zveznega iztekanja vode z dvema izrazitima viškoma konec novembra in decembra 2003 po najizdatnejših padavinah.



Slika 5.1.4: Hidrogram kapljanja L, kumulativna krivulja in dnevna efektivna infiltracija za hidrološko leto 2003-04.

Kasnejše padavine so se le minimalno odrazile v pretoku in so predvsem pogojevale počasno upadanju pretoka.

Od srede marca 2004 do konca hidrološkega leta, ko je voda izdatno iztekala skozi curka I in J ob taljenju snega marca in kasnejšem dežju, so iztekale skozi kapljanje L le minimalne količine vode, kar nakazuje, da je v danih razmerah prihajalo predvsem do shranjevanja vode v dokaj spraznjeno zaledje curka L, ki se zaradi slabe prepustnosti počasneje zapolnjuje kot zaledje z bolj prepustnimi prevodniki, ki se hitro zapolni, a tudi hitreje sprazni. Izračunana količina iztekle vode za hidrološko leto 2003-2004 znaša za to kapljanje 180 l (tabela 5.1.3).

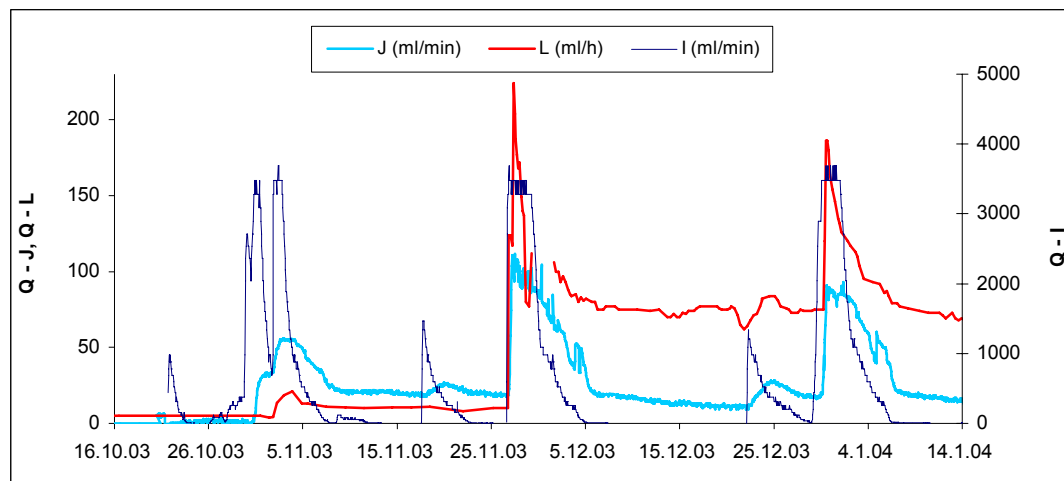


Slika 5.1.5: Hidrološko leto 2003-04 – hidrogrami curkov I, J in L.

Iz slik 5.1.5 in 5.1.19 so razvidne razlike v oblikovanju vodnih valov curkov I, J in L v hidrološkem letu 2003-04. Bistvene razlike v reakciji posameznih curkov so bile zabeležene po dolgi poletni suši (slika 5.1.6), ko sta curka J in L reagirala skromnejše in z velikim zaostankom za curkom I. Nadaljnje izdatne in intenzivne padavine pa so ob dobri namočenosti pogojevale skoraj sočasno oblikovanje največjega vodnega vala v hidrološkem letu pri vseh treh curkih, kar se v sledečih treh letih ni več ponovilo.

Tako je v hidrološkem letu 2003-04 do sredine marca 2004 skozi curek L iztekla skoraj celotna letna količina, medtem ko je skozi curek J v tem obdobju izteklo 47 %, skozi curek I pa le 39 % vode, ki je v tem hidrološkem letu iztekla skozi curka

(tabela 5.1.1). To odraža različne načine polnjenja in posledično praznjenja zaledij curkov z različno zgradbo njihovega zaledja.



Slika 5.1.6: Hidrogrami curkov **I**, **J** in **L** v začetku hidrološkega leta 2003-04. Pretoki najmanjšega curka **L** so v ml/h.

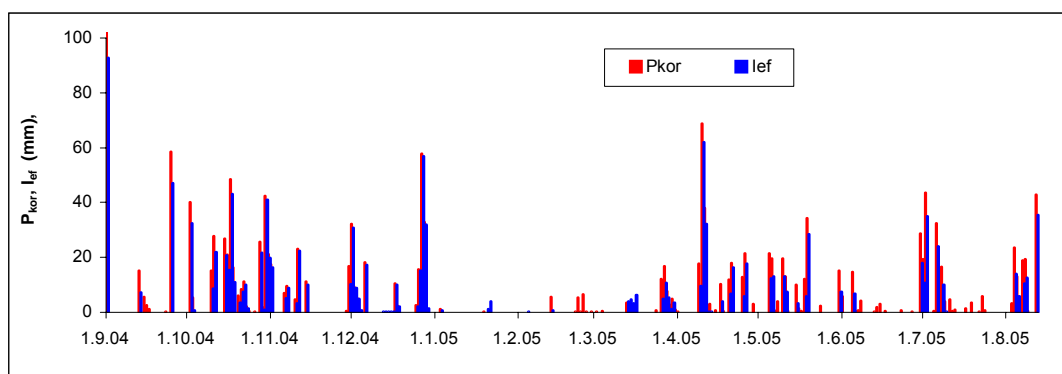
Tabela 5.1.1: Iztekle letne količine vode skozi curke **I**, **J** in **L** ter iztekle količine vode v obdobju 23.9.03 do 15.3.04 in njihov letni delež.

	Curek I (m ³)	Curek J (m ³)	Curek L (l)
V _{2003/04}	299,8	12,2	181
V _{23.9.03 – 15.3.2004}	116,8	5,8	176
V _{23.9.03 – 15.3.2004} / V _{2003/04}	39 %	47 %	97 %

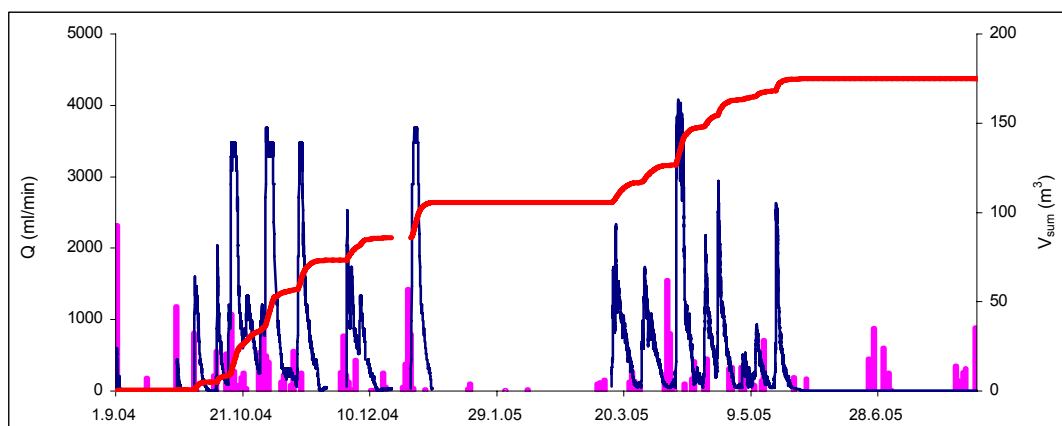
Skupna količina vode, ki je iztekla skozi curke **I**, **J** in **L** v hidrološkem letu 2003-04, je bila 312,23 m³ (tabela 5.1.3). Hitra ocena površine skupnega zaledja na osnovi učinkovite infiltracije in iztekle vode skozi curke za hidrološko leto 2003-2004 pokaže površino 255 m². Seveda se zavedam, da je na obravnavanem območju še nekaj kapljanj v rovu, neznan del vode pa odteče tudi izven rova, kar potrjujejo tudi manjkajoči vrhovi vodnih valov curka **I**, tako da je skupno zaledje celote večje. Vendar podana ocena zaledja lahko služi za primerjavo s sledečimi hidrološkimi leti. Zapolnjenost vadozne cone na začetku oz. ob koncu hidrološkega leta se lahko nekoliko razlikuje, kar pomeni, da se v začetku zaporednih hidroloških let različna količina padavin najprej porablja za zapolnjevanje vadozne cone, preden pride do povečanega iztekanja iz nje.

5.1.2 Hidrološko leto 2004 – 2005

Hidrološko leto 2004-2005 je trajalo od 1.9.2004 do 12.8.2005. Količina korigiranih padavin je bila manjša kot predhodno hidrološko leto, $P_{kor} = 1560,7$ mm. Letna efektivna infiltracija je bila $I_{ef} = 1105,4$ mm oz. 70,8 % korigiranih letnih padavin, kar pomeni, da se je infiltriral manjši delež padavin kot v predhodnem hidrološkem letu (tabela 5.1.2). Razmere na površju so pogojevale večjo evapotranspiracijo ($ETR = 455,3$ mm oz. 29,2 %). Korigirane dnevne padavine in efektivna infiltracija prek leta so razvidne iz slike 5.1.7, in bistveno odstopajo od predhodnega hidrološkega leta (slika 5.1.1). Izstopa predvsem trimesečna zimska suša od januarja do marca z nizkimi temperaturami na površju in snežnimi padavinami, ko je bila infiltracija minimalna, kar se je odrazilo v hidrogramih curkov I, J in L in je razvidno iz slik 5.1.8, 5.1.9, 5.1.10 in 5.1.20.

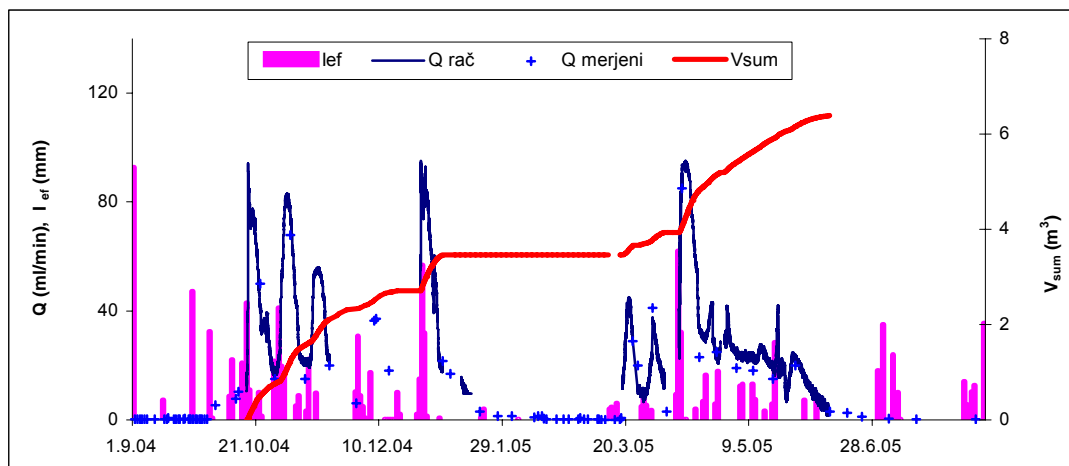


Slika 5.1.7: Dnevne korigirane padavine (P_{kor}) in dnevna efektivna infiltracija (I_{ef}) nad raziskovalnim poligonom v Postojnski jami za hidrološko leto 2004-05.

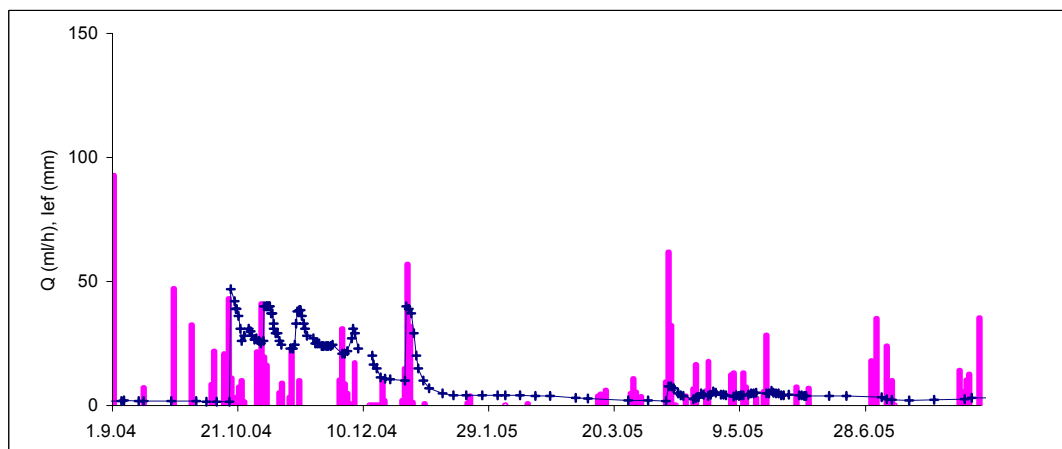


Slika 5.1.8: Hidrogram curka I, kumulativna krivulja in dnevna efektivna infiltracija za hidrološko leto 2004-05.

Curek I je v zimskem obdobju za dva meseca in pol presušil, pretok curka J pa je upadal in nato mesec dni dosegal minimalen pretok pod 1 ml/min. Curek L je oblikoval podoben val ko leto poprej, le da so bile vrednosti okoli 3-krat nižje.



Slika 5.1.9: Hidrogram curka J, kumulativna krivulja in dnevna efektivna infiltracija za hidrološko leto 2004-05.



Slika 5.1.10: Hidrogram curka L za hidrološko leto 2004-05.

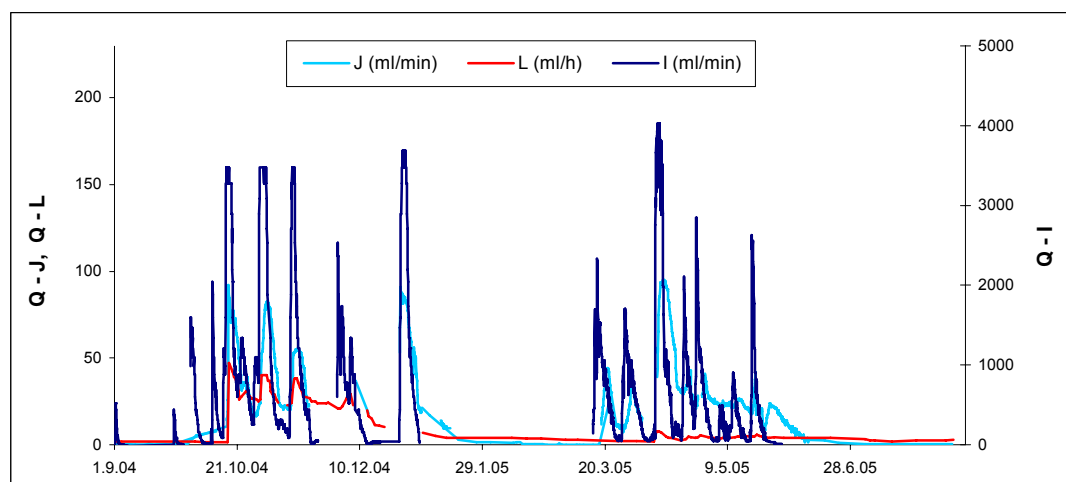
Skozi curek I je v tem hidrološkem letu izteklo skoraj 175 m³, skozi curek J 7,3 m³, skozi kapljanje L pa le 64 l vode (tabela 5.1.3). Podobno kot v hidrološkem letu 2003-04 je večina vode skozi curek L iztekla v jesensko-zimskem obdobju v času 3 mesecev, vendar so bili pretoki okoli 3-krat manjši kot predhodno leto.

Skupna količina vode, ki je iztekla skozi curke I, J in L v hidrološkem letu 2004-05 v času od 1.9.2004 do 12.8.2005, je bila le 182,2 m³. Ocena površine skupnega zaledja

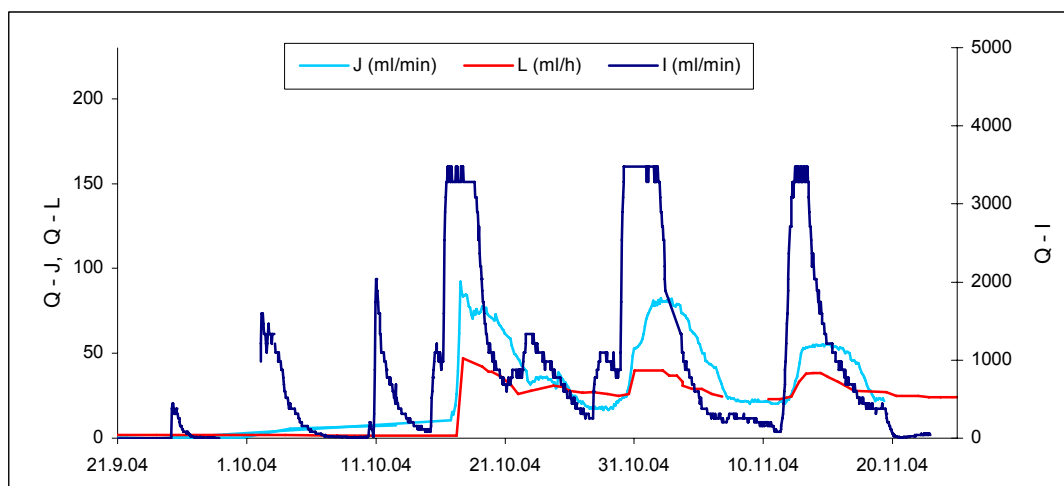
bi bila glede na količino efektivno infiltriranih padavin in količino iztekle vode skozi curke za to obdobje le 165 m².

Izračunano večje zaledje za hidrološko leto 2003-2004 si delno razlagam z dotokom padavin z večjega zaledja, predvsem pa s takratnimi padavinskimi razmerami z enakomerno razporeditvijo dokaj izdatnih padavin. Te so pogojevale stalno, dobro namočenost površja ter sorazmerno dobro zapolnjenost širšega zaledja curkov, ko ni prišlo do daljših presušitev curka I oz. do minimalnih pretokov curka J, saj pretok curka J ni upadel pod 10 ml/min. Take razmere so omogočale zvezno in širše neovirano odtekanje vode v curke. To je pokazal tudi sledilni poskus novembra 1996 (poglavje 5.6.2), ko smo sledilo injicirali v času jesenskega deževja in so sledilo spirale le padavine. Tako iztekanje pa pomeni ob koncu hidrološkega leta manjše uskladiščenje vode v 100 m debelem jamskem stropu. Zato pa se padavine, ki sledijo takemu obdobju, v večji meri porabljajo za zapolnjevanje tako spraznjenega zaledja in je posledično iztok iz vadozne cone šibkejši.

Slika 5.1.11 podaja dinamiko iztekanja vode skozi curke I, J in L v hidrološkem letu 2004-05. Razlike v infiltraciji padavin v različno prepustna zaledja curkov so pogojevale različno iztekanje vode skozi curke. V začetku hidrološkega leta je prišlo do večjih časovnih zamikov (1 do 2 dni) v reakciji curkov J in L glede na curek I (slika 5.1.12).



Slika 5.1.11: Iztekanje vode skozi curke I, J in L v hidrološkem letu 2004-05.



Slika 5.1.12: Iztekanje vode skozi curke I, J in L v začetku hidrološkega leta 2004-05 po daljšem sušnem obdobju.

Razlika v volumnu iztekle vode skozi curke v zaporednih hidroloških letih ($V_{03-04} - V_{04-05}$) znaša kar 130 m^3 (tabela 5.1.3). V sušnem obdobju, pred pričetkom hidrološkega leta 2003-04, se je v zaledje infiltriralo 104 mm dežja, pred hidrološkim letom 2004-05 pa nekoliko manj (34 mm). Predpostavljam, da se je precejšen del infiltriranih padavin v hidrološkem letu 2004/05 porabljal za zapolnjevanje dokaj spraznjenega zaledja. Uskladiščil se je predvsem v slabše prepustnem delu zaledja. To delno potrjuje skromnejše iztekanje vode iz vadozne cone skozi curek I, predvsem pa skozi curek J, ko so se oblikovali manjši in manj izdatni vodni valovi. Najbolj skromen pa je bil iztok skozi curek L (slika 5.1.11). V kolikor privzamemo površino zaledja 255 m^2 , bi bila količina infiltriranih padavin v letu 2004-05 $281,9 \text{ m}^3$, količina iz vadozne cone iztekle vode pa je bila $182,2 \text{ m}^3$ (tabela 5.1.3), kar pomeni, da se je okoli 100 m^3 infiltrirane vode shranilo v zaledju.

Na osnovi ugotovljenega sklepam, da je zaledje curkov večje, kot pa je pokazal izračun za hidrološko leto 2004/05 na osnovi iztekle vode skozi curke, ker se je precejšen del infiltriranih padavin v tem hidrološkem letu porabljal za zapolnjevanje zaledja curkov, predvsem slabše prepustnega dela ne le v začetku hidrološkega leta, ampak prek celega hidrološkega obdobja. V zaledju curka L, kjer prevladuje slabo prepustna zgradba, so se infiltrirane padavine ob minimalnem iztoku predvsem shranjevale, to pa se je nadaljevalo še vse do konca maja 2006 v naslednjem hidrološkem letu 2005/06 (slika 5.1.17). Šele tedaj je bilo njegovo zaledje dovolj

zapolnjeno, da so izdatne padavine konec maja 2006 sprožile iztekanje vode v značilnem več mesecev trajajočem vodnem valu. Delež slabo prepustne zgradbe je v zaledju curka J manjši, zato se je shranjevanje infiltriranih padavin nekoliko manj izrazito odrazilo v curku J. V zaledju curka I imajo pomembno vlogo dobro prepustni prevodniki, ki hitro odvajajo vodo, zato je oblikoval značilne izrazite, le nekoliko skromnejše vodne valove.

Sklepam, da prihaja zaradi razlik v infiltraciji (različna razporeditev, intenzivnost in količina padavin ter različni pogoji v prsti in vadozni coni) v zaporednih hidroloških letih do bistveno različnega razmerja med količino vode, ki se infiltrira v zaledje in tisto, ki izteka skozi vadozno cono in napaja globlje dele vodonosnika. Zvezne in intenzivnejše padavine ob dobro namočeni prsti in dobro zapolnjeni vadozni coni pogojujejo intenzivno, zvezno iztekanje vode iz celotne hierarhije prevodnikov, tudi iz najslabše prepustnih delov zgornje vadozne cone, ki se sicer prazni le občasno ob ustreznih pogojih. Ob intenzivnem iztekanju iz vadozne cone delujejo prepustnejši prevodniki verjetno kot nekakšna »vakuumska črpalka«, ki dodobra izprazni tudi manj prepustni del zaledja curkov (hidrološko leto 2003-04). Zato pa v sledečem obdobju prihaja do povečanega shranjevanja infiltrirane vode. Nakazuje se najpočasnejše polnjenje najslabše prepustne strukture zaledja, ki ima največji delež v curku L. Tako prihaja le do skromnega napajanja globljih delov vodonosnika iz tega dela vadozne cone, vendar z bistveno drugačno dinamiko.

V obdobjih nizkih pretokov, ko curek I le šibko reagira na padavine ali pa celo za dalj časa presahne, curka J in L pa dosejata minimalne pretoke, se pretežni del infiltriranih padavin shranjuje v slabo prepustnem delu zaledja curkov. Take razmere običajno nastopajo od pomladi do intenzivnega jesenskega dežja, ko se začne novo hidrološko leto. Iz tega sklepam, da se iztekanje iz vadozne cone ojača po padavinah šele tedaj, ko vadozna cona doseže določeno mejno zapolnjenost z vodo.

V primeru ko razmere na površju ter razporeditev padavin pogojujejo pogoste osušitve prsti, prihaja do večjih razlik v napajanju različno prepustnih delov zaledja ter posledično do razlik v iztekanju iz vadozne cone. Sledenje v sušnih razmerah junija 1993, ko smo sledilo sprali s 6 m^3 vode, je pokazalo hitro reakcijo le najbolj

prepustnega curka I, sicer pa uskladiščenje sledila v slabše prepustnem delu vadozne cone kar za tri mesece; njegovo iztekanje so povzročile šele intenzivne in izdatne jesenske padavine.

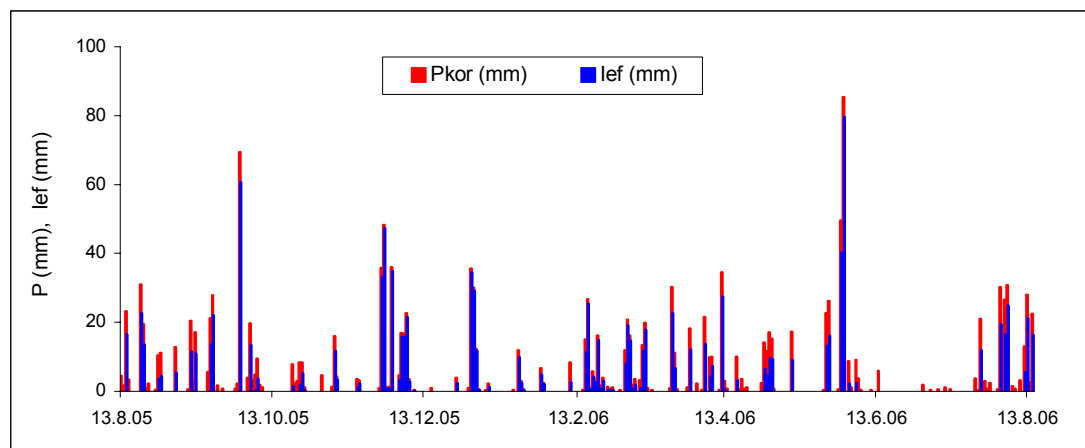
5.1.3 Hidrološko leto 2005 – 2006

Meritve padavin in pretoka sem nadaljevala še sledeče hidrološko leto 2005-2006 od 13.8.05 do 15.8.06. Količina korigiranih padavin je znašala v tem obdobju 1525,5 mm, infiltriralo pa se je 1052,5 mm oz. 69 % padavin. Količina infiltriranih padavin je bila še manjša kot predhodno hidrološko leto (tabela 5.1.2). ETR je bila 473 mm oz. 31%. Za to obdobje so značilna kar tri daljša obdobja, ko ni bilo učinkovite infiltracije oz. je bila minimalna (slika 5.1.13), kar se je podobno kot prejšnje hidrološko leto odrazilo v poteku hidrogramov curkov.

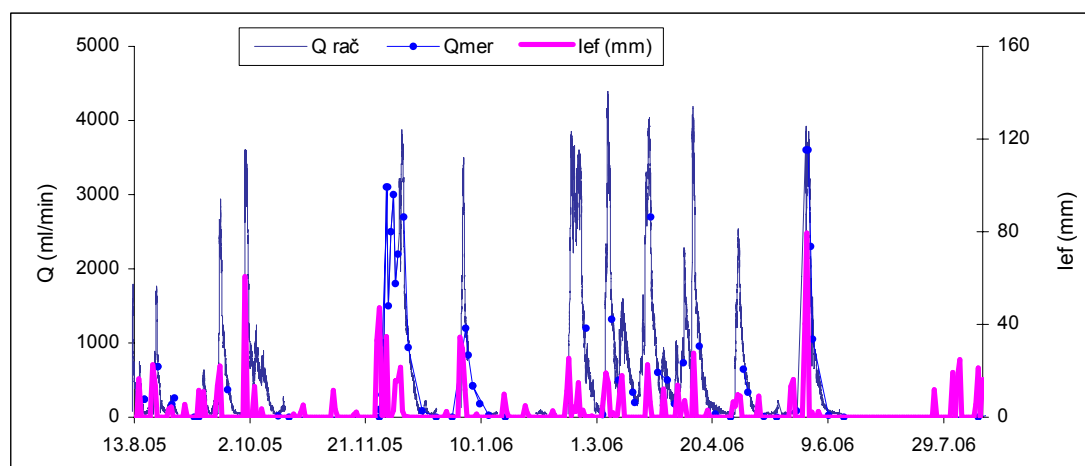
V prvem obdobju od sredine oktobra do 27.11.05 se je infiltriralo le 27 mm padavin. Drugo sušno obdobje je nastopilo 5. januarja in je trajalo do sredine februarja 2006, ko je bil na površju sneg in so bile temperature pretežno pod lediščem, tako, da se je infiltriralo le 24 mm padavin. V teh obdobjih je bil curek I suh, curek J in kapljanje L pa sta dosegala minimalne vrednosti pretoka, kar pomeni, da se je večina infiltriranih padavin v teh obdobjih shranjevala v zaledjih curkov in da so vodo v globlji del kraškega vodonosnika prispevali le manjši stalni curki oz. curki kot sta curka J in L. Tretje sušno obdobje je bilo junija in julija 2006, ko po intenzivnih in izdatnih padavinah konec maja, skoraj 2 meseca (6.6. do 24.7.06) ob minimalnih padavinah ni bilo učinkovite infiltracije. Curek I je presahnil sredi junija, curek J pa dosegel minimalni pretok v začetku julija. Popolnoma drugače pa je reagiral curek L, ki je po dežju konec maja začel oblikovati značilni več mesecev trajajoči vodni val (slika 5.1.16).

V curku I so se v prvem delu tega hidrološkega leta (slika 5.1.14) oblikovali sorazmerno skromni vodni valovi, ki niso dosegali maksimalne vrednosti pretoka (okoli 4 l/min). V sušnem obdobju enega meseca, ko je bil na površju sneg, je skozi curek ob občasnih otoplitvah na površju vsakokrat pritekla voda, a minimalne količine. Šele dež sredi februarja je dokončno stalil sneg in do konca hidrološkega

leta so se oblikovali izdatnejši vodni valovi, v katerih smo zopet beležili značilne upade SEP (poglavje 5.1.2). Največji vodni val v hidrološkem letu 2005-06 se je oblikoval konec maja 2006, vendar pa tudi ta vodni val ni dosegel količinske izdatnosti vodnih valov v hidrološkem letu 2003-04.



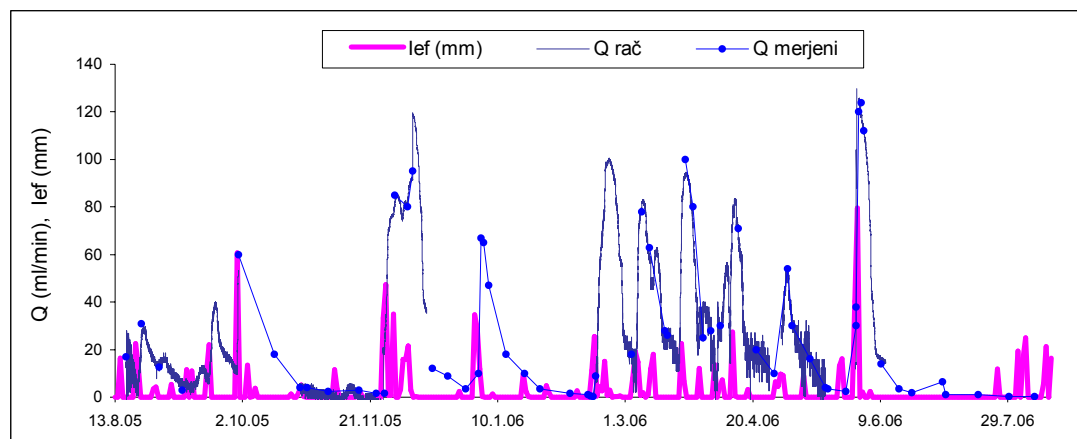
Slika 5.1.13: Dnevne korigirane padavine (P_{kor}) in dnevna efektivna infiltracija (I_{ef}) nad raziskovalnim poligonom v Postojnski jami za hidrološko leto 2005-06.



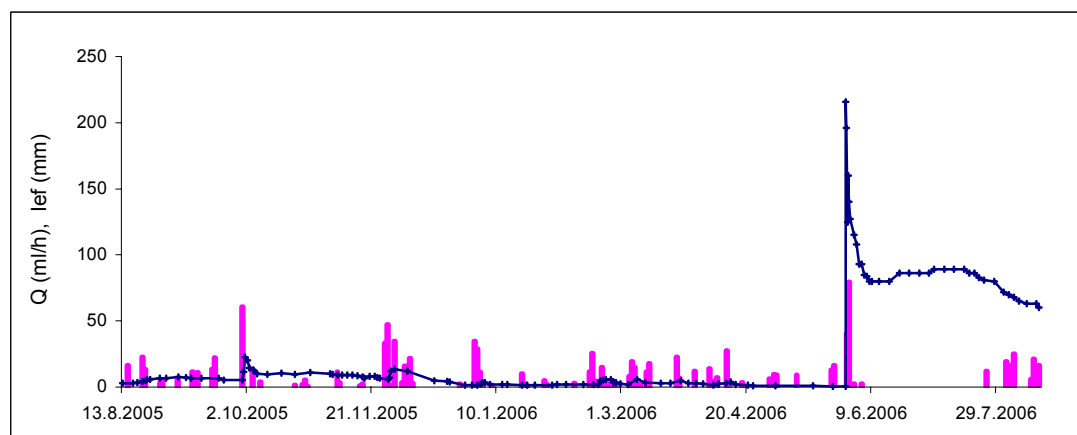
Slika 5.1.14: Hidrogram curka I za hidrološko leto 2005-06.

Curek J je v prvem delu hidrološkega leta podobno kot curek I reagiral na padavine z manj izrazitimi vodnimi valovi (slika 5.1.15), medtem ko so se v drugem delu leta oblikovali izrazitejši vodni valovi z maksimalnimi pretoki okoli 100 ml/min in več, kjer izstopa vodni val konec maja z maksimalnim pretokom 130 ml/min, kar je največji izmerjeni pretok v zadnjih treh hidroloških letih in primerljiv z najvišjim

pretokom konec leta 2002. Curek J je dosegel maksimalni pretok zelo hitro (v 10 urah), podobno kot curek L, kar nakazuje dobro zapolnjenost njunega zaledja pred intenzivnimi padavinami 29. maja 2006.



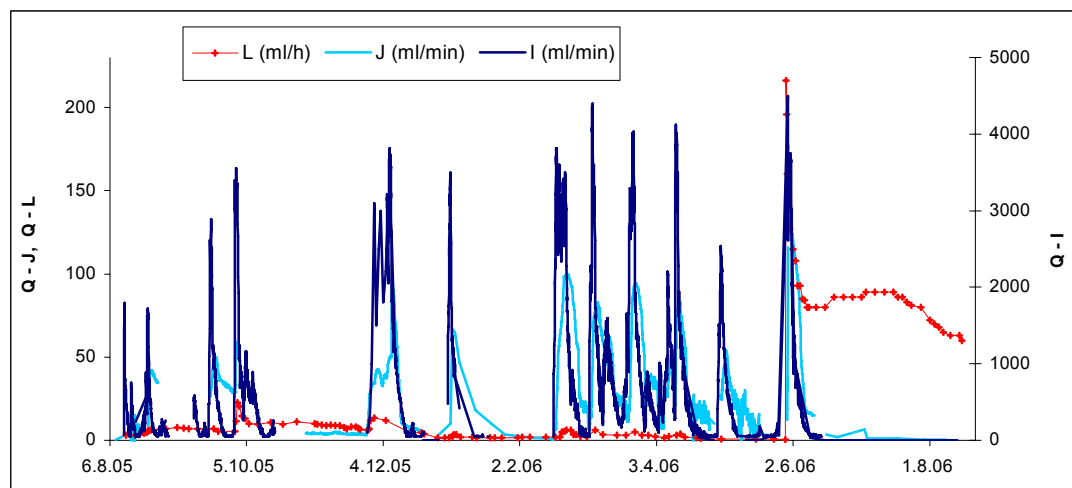
Slika 5.1.15: Hidrogram curka J za hidrološko leto 2005-06.



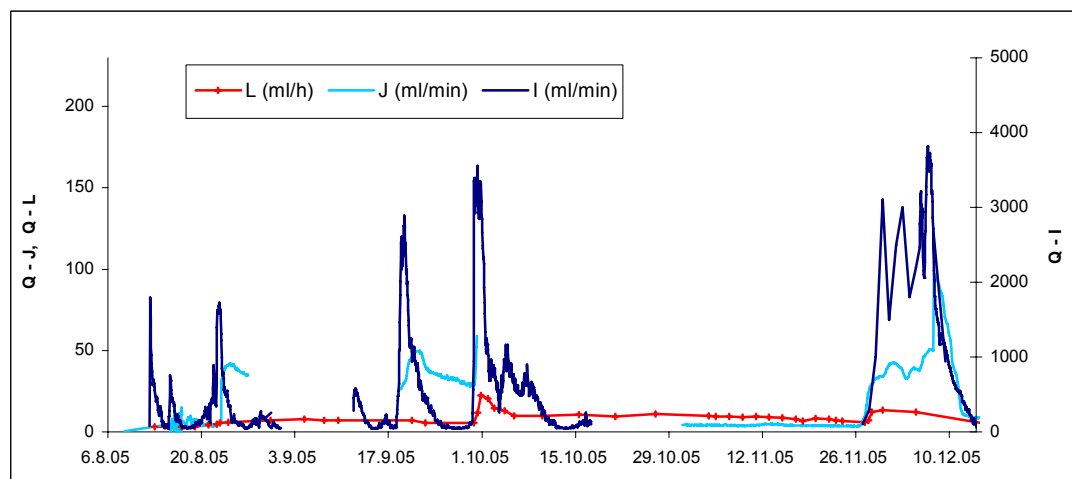
Slika 5.1.16: Hidrogram curka L za hidrološko leto 2005-06

Hidrogram curka L za hidrološko leto 2005-06 popolnoma odstopa od vzorca prejšnjih let (slika 5.1.16). Že predhodno hidrološko leto 2004-05 (slika 5.1.10) pa vse do konca maja 2006 je dosegal curek L nizke pretoke, ko so se infiltrirane padavine porabljele predvsem za zapolnjevanje njegovega zaledja, ki je bilo konec maja 2006 že tako zapolnjeno, da je na intenzivne padavine 29.5.06 reagiral najhitreje, ko je padlo prvih 26 mm dežja oz. 15% dežja v padavinskem dogodku. Začel je oblikovati značilni več mesecev trajajoči vodni val, ki se je v predhodnih hidroloških letih sicer oblikoval v zimskih mesecih.

Naraščanje pretoka curka I v vodnih valovih običajno prehiteva curka J in L. Konec novembra 2005, ko je bil na površju sneg, pa je ob občasnem dežju in temperaturi zraka nad lediščem prišlo do sočasnega oblikovanja vodnih valov curkov I in J. To odraža dobro predhodno namočenost prsti in dobro zapolnjenost tudi slabše prepustnega dela zaledja (slike 5.1.17, 5.1.18 in 5.1.21).



Slika 5.1.17: Primerjava nihanj pretokov curkov I, J in L v hidrološkem letu 2005-06.



Slika 5.1.18: Primerjava pretokov curkov I, J in L v začetnem obdobju hidrološkega leta 2005-06.

Skozi curek I je v tem hidrološkem letu izteklo 216 m³, skozi curek J 10,4 m³, skozi kapljanje L pa 186 l vode (tabela 5.1.3). Skupno je izteklo 226,6 m³ vode. Izračun

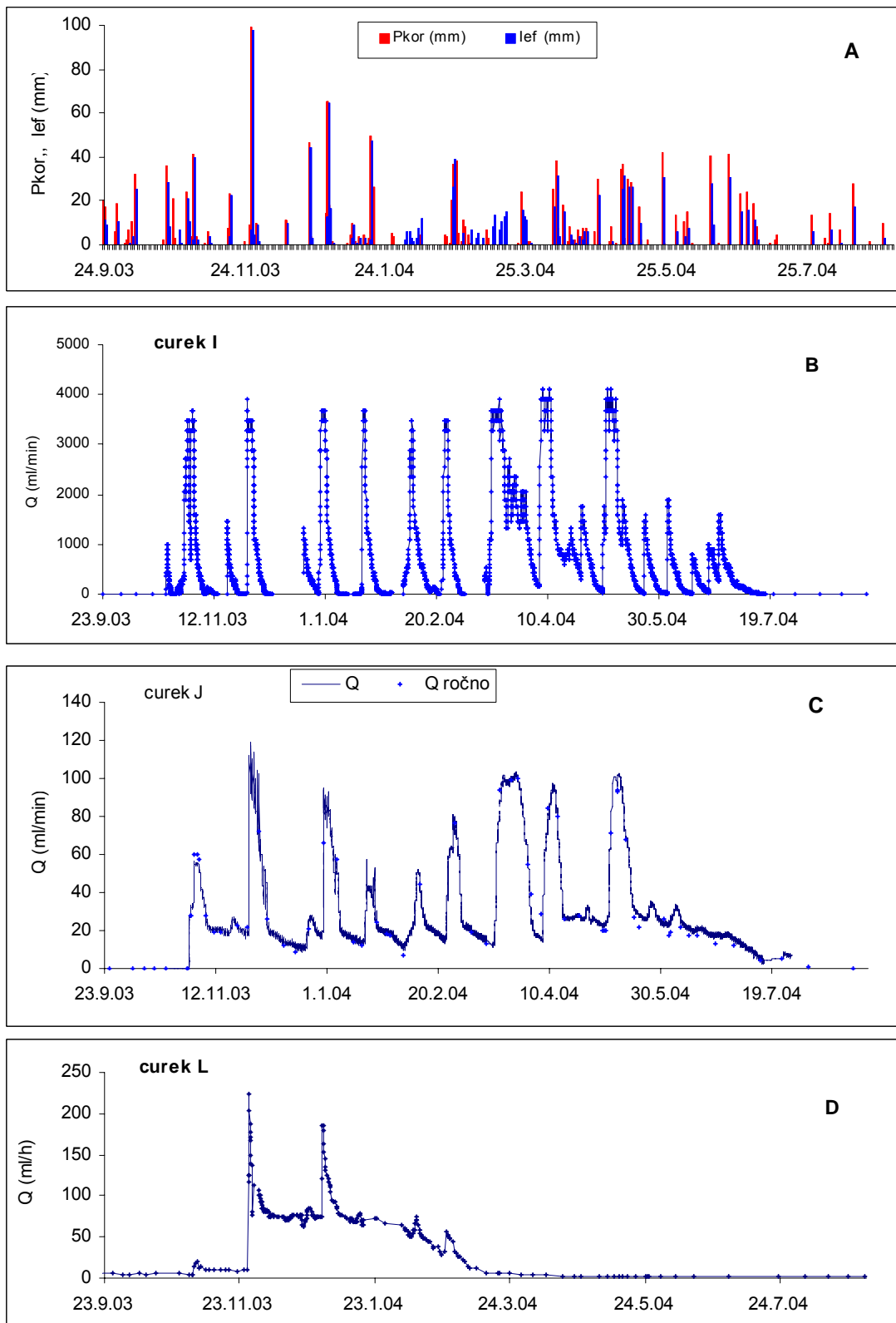
infiltrirane vode ob površini zaledja 255 m² pa pokaže za 41,8 m³ večjo količino. Zato predpostavljam, da se je del infiltriranih padavin shranil v zaledju. Večina vode je skozi curek L iztekla v skoraj štiri mesece trajajočem vodnem valu, ki se je začel konec maja ob koncu hidrološkega leta in se nadaljeval v sledečem hidrološkem letu. Tedaj se je v dveh dneh infiltriralo 120 mm dežja. Enako izrazito reakcijo smo zabeležili le še konec novembra 2003, ko se je infiltriralo 105 mm dežja. Oba vodna vala sta bila skoraj identična. Podobna količina (94 mm) se je infiltrirala tudi aprila 2005, vendar je curek L tedaj le minimalno reagiral. To nakazuje, da kapljanja izrazito reagirajo na izdatne in intenzivne padavine, vendar mora biti njihovo zaledje predhodno dovolj dobro zapolnjeno z vodo. V takih razmerah prihaja do iztiskanja vode tudi iz najslabše prepustnega dela zaledja z največjim uporom.

5.1.4 Dolgotrajno opazovanje v zaporednih hidroloških letih

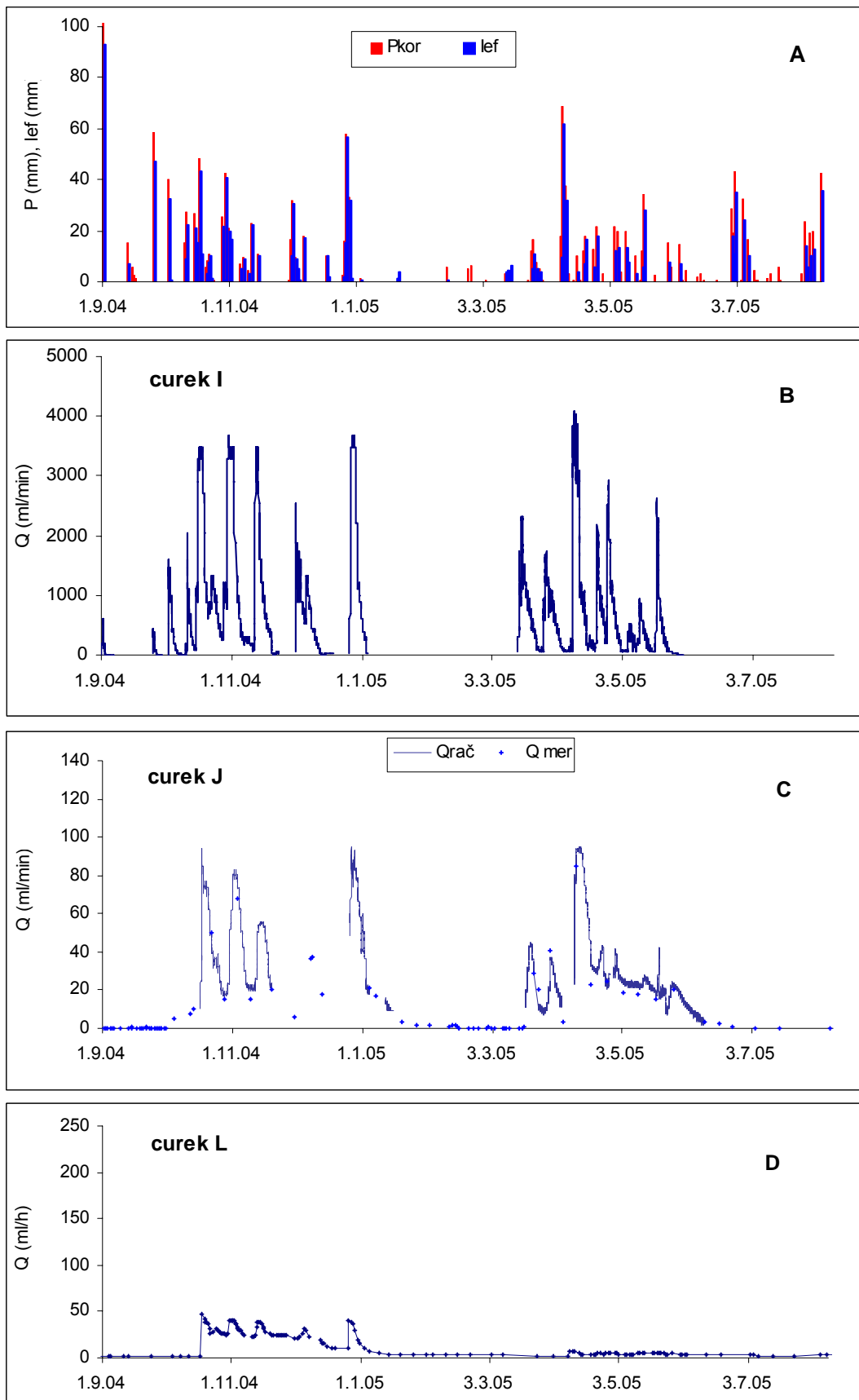
Iz tabele 5.1.2 je razvidno upadanje letne količine padavin oz. korigiranih padavin v zaporednih hidroloških letih, kar je vplivalo na letno količino infiltriranih padavin. Na infiltracijo padavin so dodatno vplivale še razmere na površju ter razporeditev in izdatnost padavin. V zaporednih letih je upadal namreč tudi delež padavin, ki se je infiltriral v vadozno cono. Iz slik 5.1.19, 5.1.20 in 5.1.21 je razvidna dnevna efektivna infiltracija in oblikovanje hidrogramov curkov I, J in L za zaporedna hidrološka leta.

Tabela 5.1.2: Letni količini korigiranih padavin in efektivne infiltracije ter delež efektivne infiltracije.

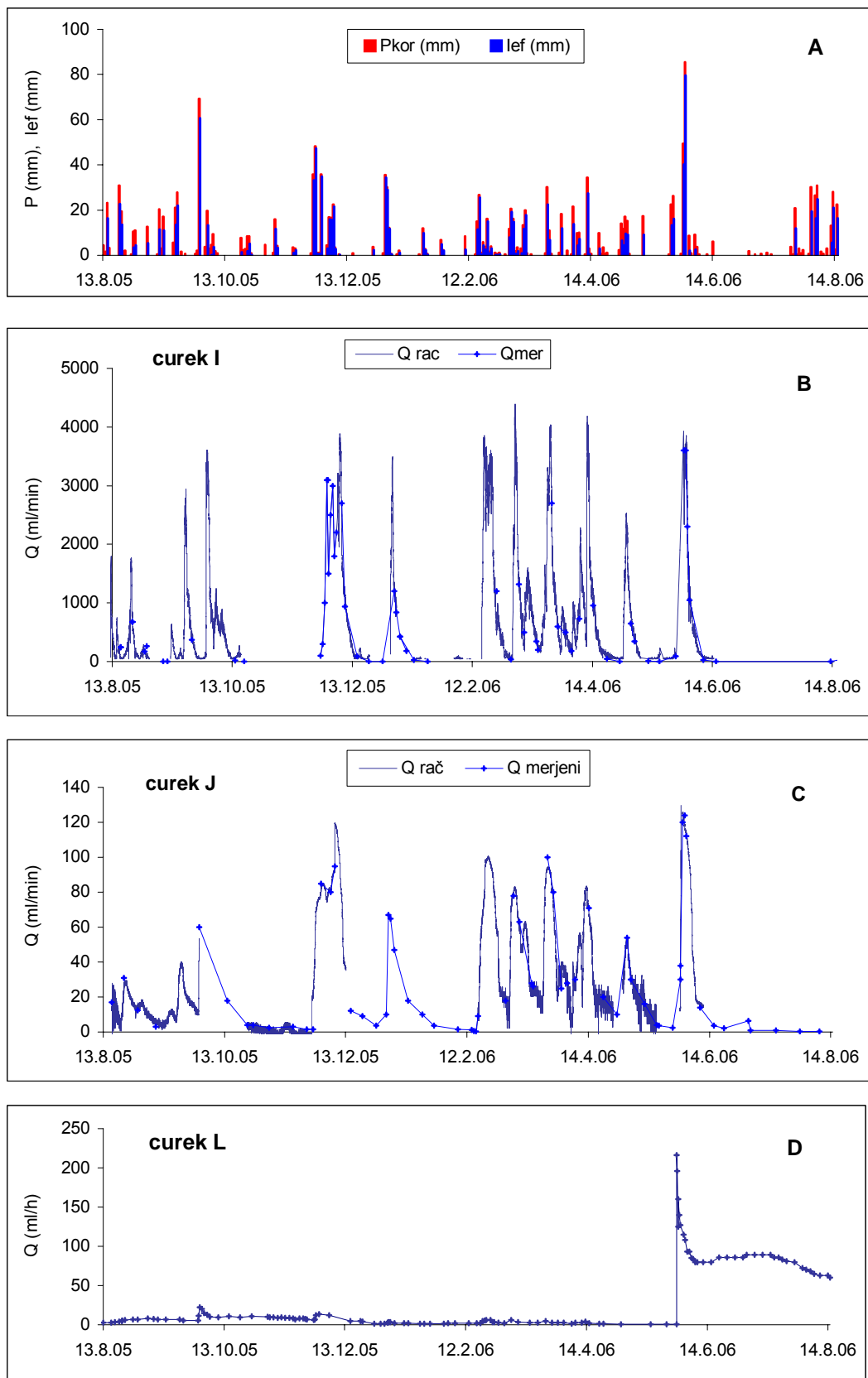
Hidrološko leto	P _{kor} (mm)	I _{ef} (mm)	Delež I _{ef} (%)
2003-2004	1618,3	1225,9	75,8
2004-2005	1560,7	1105,4	70,8
2005-2006	1525,5	1052,5	69,0



Slika 5.1.19: Hidrološko leto 2003-04: dnevne padavine in dnevna efektivna infiltracija ter hidrogrami curkov I, J in L.



Slika 5.1.20: Hidrološko leto 2004-05: dnevne padavine in dnevna efektivna infiltracija ter hidrogrami curkov I, J in L.



Slika 5.1.21: Hidrološko leto 2005-06: dnevne padavine in dnevna efektivna infiltracija ter hidrogrami curkov I, J in L.

Bilanca iztekle vode skozi curke I, J in L v zaporednih letih kaže na močan upad v hidrološkem letu 2004-05, v sledečem hidrološkem letu 2005-06 pa na povečanje, ki pa ni doseglo vrednosti v hidrološkem letu 2003-04 (tabela 5.1.3).

V hidrološko bogatih letih, kot je bilo leto 2003-04, s pogostimi in izdatnimi vodnimi valovi, se curki napajajo iz širšega zaledja, posebno v času izdatnih in intenzivnih padavin, ko gre sočasno za zvezno iztekanje in izsesavanje vode (vakumska črpalka) tudi iz najslabše prepustnega dela zaledja curkov, ki se kasneje tudi najdlje polni. Zaledje se tako dodobra sprazni, kar pa vpliva na oblikovanje vodnih valov v sledečem hidrološkem letu (slika 5.1.22).

V hidrološkem letu 2004-05 in v začetku hidrološkega leta 2005-06 smo beležili skromnejše vodne valove, šele ob koncu hidrološkega leta 2005-06 pa zopet nastopajo izdatnejši vodni valovi. V začetnem delu hidrološkega leta 2005-06 je bil tudi potek SEP bistveno drugačen, ko so v curku I izostajali značilni upadi SEP v vodnih valovih (poglavje 5.2.3). Vse to pripisujem drugačni infiltraciji in posledično drugačnemu iztekanju vode iz zaledja.

Tabela 5.1.3: *Volumen iztekle vode skozi posamezne curke I, J in L ter skupna količina iztekle vode (V_{skupni}) v zaporednih hidroloških letih ter na osnovi tega izračunano potencialno skupno zaledje curkov (P).*

Hidrološko leto	I (m ³)	J (m ³)	L (m ³)	V_{skupni} (m ³)	P (m ²)
2003-04	299	12,2	0,16	311,4	255
2004-05	175	7,3	0,06	182,2	165
2005-06	216	10,4	0,186	226,6	215

Razmerje med količino vode, ki sta jo v posameznih hidroloških letih prispevala curka I in J kaže na vse večji delež stalnega, manjšega curka J (tabela 5.1.4), kar pomeni da v bolj sušnih letih z manj padavinami, ko je posledično tudi količina infiltriranih padavin vse manjša, pomembnejši prispevek vode v vodonosnike daje ta tip pretankanja oz. curkov.

Kapljanje L kaže popolnoma svoj vzorec dinamike iztekanja iz vadozne cone. Do izdatnega praznjenja njegovega zaledja prihaja občasno. Na osnovi dosedanjih

meritev sklepamo, da le vsakih nekaj let ob ustreznih razmerah. Temu sledijo leta z vse bolj skromnim iztekanjem oz. leta, ko gre predvsem za shranjevanje infiltriranih padavin v zaledje, ki lahko traja tudi skoraj 2 hidrološki leti. Šele intenzivne in izdatne padavine v času dovolj dobre zapolnjenosti njegovega zaledja sprožijo ponovni značilni zvezni obsežni vodni val, ki nato traja kar tri mesece. Tako je bilo konec maja 2006, ko so manjši curki (kot curek J) dosegali že minimalne pretoke, večji curki (tip curka I) pa so že presahnili.

Tudi ta tip pretakanja, čeprav je količinsko skromen, je pa zelo pogost, lahko pomembno prispeva vodo v kraške vodonosnike v času, ko so drugi tipi curkov že brez vode ali v iztekanju. Delež vode takega pretakanja je bil v primerjavi s curkom J v hidrološkem letu 2004-05 opazno manjši kot v hidrološkem letu 2003-04; ter znatno večji v hidrološkem letu 2005-06 (tabela 5.1.4) in to v poletnem času sicer skromnega napajanja vodonosnika po prepustnejših prevodnikih.

Tabela 5.1.4: Delež efektivne infiltracije ter razmerja letnih volumnov iztekle vode curkov I in J ($V-I / V-J$) ter J in L ($V-J / V-L$) v treh zaporednih hidroloških letih.

Hidrol. leto	I_{ef} (%)	$V-I / V-J$	$V-J / V-L$
2003-04	75,8	24,5	68
2004-05	70,8	23,8	114
2005-06	69,0	20,8	56
Povprečno	71,9	23	80

Po letni količinski izdatnosti, ob upoštevanju treh hidroloških let, so curki kot je curek I v povprečju 23-krat izdatnejši od curkov kot je curek J; in curek J kar 80-krat izdatnejši kot so kapljanja, ki jih predstavlja curek L (tabela 5.1.4). Pri tem je potrebno upoštevati tudi pogostost posameznih tipov pretakanja. Seveda obstaja verjetno še cela vmesna paleta različnih tipov, vendar ocenjujem, da v tej fazi opazovani trije curki dokaj dobro podajajo stanje v vadozni coni. V kolikor so curki tipa L 80-krat pogostejši kot curki tipa J, bi pomenilo, da v sušnih obdobjih, ko so curki tipa curka I običajno suhi, prispevajo v kraški vodonosnik vsaj enako pomemben del vode kot curki tipa J. Ob tem se kažejo pri curku L velike razlike med hidrološkimi leti.

Posamezni tipi pretakanja in iztekanja iz vadozne cone so prispevali v globlje dele kraškega vodonosnika v zaporednih hidroloških letih različne količine vode. Dinamika iztekanja vode iz vadozne cone v zaporednih 4 hidroloških letih še ne kaže vzorca ponovljivosti, zato raziskave nadaljujem.

Izdatnejši, a nestalni curki, kot je curek I, v sušnih obdobjih običajno ne prispevajo vode v globlji del vodonosnika. Imajo pa pomembno vlogo pri prenosu morebitnega onesnaženja s površja, saj omogočajo hiter prenos kontaminantov. Ker odvajajo velike količine infiltriranih padavin, pomenijo v deževnih obdobjih spiranje in »očiščevanje« širših kraških zaledij ob velikih razredčevalnih učinkih, tako da povečanih koncentracij kontaminantov običajno ne zaznamo oz. le v začetnem delu vodnih valov.

Zapolnjenost vadozne cone ob koncu posameznega hidrološkega leta se lahko od leta do leta dokaj razlikuje. Iz naštetih meritev učinkovite infiltracije padavin in pretokov curkov je razvidno, da se v poletnih sušnih obdobjih, ki trajajo od 2,5 do 6 mesecev, ko se zaključujejo hidrološka leta, tudi večja količina manj intenzivnih padavin običajno le shranjuje v vadozni coni. Preden pride do odločilnih padavin, ki sprožijo izrazito povečanje iztoka, prihaja le do minimalnih iztokov iz nje (tabela 5.1.5). Izračun je podan v poglavju 5.1.5. Lahko pride do odstopanj, kot se je zgodilo avgusta 2005 in 2006. V avgustu 2005 je prispeval vodo v globlji del vodonosnika tudi curek I, ko je skozi curek izteklo $7,7 \text{ m}^3$, skozi curek J pa okoli $0,6 \text{ m}^3$, kar se v predhodnih poletjih (2003, 2004) ni zgodilo. Na to so vplivale izdatnejše in intenzivnejše padavine v avgustu, ko je po predhodni infiltraciji 77 mm padavin, prihajalo po vsakih nekoliko izdatnejših padavinah do nekoliko povečanega iztekanja iz vadozne cone skozi curka I in J (sliki 5.1.21 in 5.1.22). To je pomemben prispevek v napajanju globljih delov vodonosnika in kraških izvirov v obdobju, ko običajno takega napajanja ni. Izrazitejše napajanje kraškega vodonosnika in s tem iztekanje, pa se je začelo šele konec novembra 2005, ko se je predhodno v 6 mesečnem obdobju infiltriralo skupno 230 mm padavin.

Tabela 5.1.5: Količina infiltriranih padavin, ki se je shranila v vadozni coni v navedenih poletnih obdobjih (I_{ef}), volumen shranjene vode ob upoštevanju površine zaledja curkov 255 m^2 ($V_{shranjeno}$), volumen iztekle vode ($V_{iztekle}$), preračunan iz merjenih pretokov curkov in količina infiltriranih nadaljnjih padavin ($I_{ef-reakcija}$), ki je sprožila povečano iztekanje iz vadozne cone (poglavje 5.1.5).

Poletno obdobje	P (mm)	I_{ef} (mm)	$V_{shranjena}$ (m^3)	$V_{iztekle}$ (m^3)	$I_{ef-reakcija}$ (mm)
1.5. – 20.10.2003	391,2	165	42	0,01	36,8
4.7. – 1.10.2004	284,1	179,4	46	1,0	32
1.6. – 11.8.2005	274,2	144,5	37	8,3	35,3
12.8.05 – 29.9.05	264,5	159,4	41	20,4	

Zapolnjevanje vadozne cone v času daljšega ali krajšega poletnega sušnega obdobja vpliva na začetek oblikovanja značilnih vodnih valov v naslednjem hidrološkem letu. Oblikovanje vodnih valov, kar je razvidno iz hidrogramov curkov, je odvisno predvsem od količine in razporeditve padavin prek leta oz. od efektivno infiltracije ter od zapoljenosti zaledja. Iz slike hidrogramov curkov I, J in L v zaporednih hidroloških letih (slika 5.1.22) so razvidne razlike med leti ob dokaj podobnem poteku pri curkih I in J, vendar je curek J stalen in prispeva vodo tudi v daljših sušnih obdobjih, ko curek I nima vode. Curek L popolnoma odstopa od tega vzorca. Kapljanja, kot je opazovani curek L, stalno prispevajo minimalne količine vode v kraški vodonosnik, izdatneje in daljši čas pa šele ko je njihovo zaledje dovolj zapolnjeno z vodo. To več-mesečno povečano iztekanje sprožijo prve izdatnejše padavine. Vendar, ko zapoljenost zaledja upade na določeno mero, prispevajo zopet le minimalne količine vode, kar lahko traja več kot eno hidrološko leto. Iz 5.1.22 je lepo razviden majhen prispevek takih kapljanj v hidrološkem letu 2004-05 in pomemben prispevek v poletnem obdobju (junija do avgusta) 2006, ko so curki kot je curek I suhi, manjši curki, kot je curek J pa prispevajo sorazmerno majhne količine vode. Kljub relativno skromni izdatnosti takih kapljanj pa je zaradi njihove pogostosti, njihov prispevek v kraške vodonosnike v sušnih obdobjih pomemben.

Zgradba zaledij stalnih curkov, kot sta curka J in L, ima večjo sposobnost shranjevanja infiltrirane vode. Zato so taki curki stalni in odvajajo vodo globlje v kraške vodonosnike tudi v sušnih obdobjih, ko so izdatnejši curki suhi. Iz tabele 5.1.6

Tabela 5.1.6: *Napajanje globljih delov vodonosnika oz. izvira v sušnem poletnem obdobju iz slabo prepustnega dela vadozne cone, ko curek I ni aktiven.*

Obdobje	V – J (l)	V – L (l)	V–J / V-L
15.7.04 – 31.8.04	214	3	71
28.5.05 – 12.8.05	276	6	46
10.6.06 – 15.8.06	252	100	2,5

je razvidno iztekanje vode iz vadozne cone oz. napajanje kraškega vodonosnika v sušnih obdobjih v opazovanih hidroloških letih, ko curek I ni bil aktiven. V zaporednih letih je vidno naraščanje deleža drobnih kapljanj (curek L) v primerjavi s curkom J. Vse to nakazuje, da polnjenje in praznjenje vadozne cone poteka v daljšem časovnem obdobju več hidroloških let.

Lahko pa izrazito sušno obdobje oz. obdobje s snegom in nizkimi temperaturami nastopi tudi pozimi, ko curki, kot je curek I za daljše obdobje presahnejo, curki kot sta curka J in L pa tedaj prispevajo vodo globlje v vodonosnik oz. kraški izvir, čeprav minimalno. Verjetno ima pri tem pomembno vlogo tudi predhodna zapolnjenost zaledij z vodo.

5.1.5 Sušna obdobja med hidrološkimi leti

Od konca aprila 2003 do začetka novega hidrološkega leta, 23.9.2003, se niso več oblikovali vodni valovi in so se infiltrirane padavine (104,4 mm) le shranjevale. Od 23.9. pa do 20.10.03, ko so curki reagirali z izrazitimi povišanji pretokov, se je infiltriralo še 60,5 mm padavin. To pomeni na 255 m² (privzeta velikost zaledja) 28 in 15 m³ (skupno 43 m³) vode, ki je vstopila v zaledje curkov, medtem ko je skozi curka J in L izteklo le 11 litrov vode (7,5 in 3,5 l), curek I pa je bil suh. Tako da se je v poletnem obdobju od 1.5. do 21.5.03 dejansko vsa infiltrirana voda (42 m³) shranila v zaledju curkov (tabela 5.1.5). Vse izračune sem naredila glede na največjo izračunano velikost zaledja za hidrološko leto 2003-04, ko sem si večjo letno količino iztekle vode skozi opazovane curke delno razlagala z dotokom padavin z večjega zaledja.

Od julija 2004 pa do konca hidrološkega leta 2003-04 (31.8.04), ko je bil curek I ponovno suh, se je infiltriralo 33,9 mm dežja. Pri obsegu zaledja 255 m² pomeni to okoli 8,5 m³ vode, od katere je skozi curka J in L izteklo le 26 l. Vendar pa so curki v naslednjem hidrološkem letu po skromni reakciji v začetku septembra izrazito reagirali šele 2. oktobra 2004, ko se je dodatno infiltriralo še 145,5 mm padavin, kar pomeni dodatnih 37 m³ vode, od katere je skozi curke izteklo slab 1 m³ vode. Tako se je od 2. julija 2004, ko je curek I presušil, curka J in L pa sta iztekala v minimalnih količinah, pa vse do prvega povečanja iztoka iz vadozne cone v sledečem hidrološkem letu (2.10.2004), v zaledje curkov shranilo okoli 45 m³ infiltriranih padavin.

Podobno se je tudi ob koncu hidrološkega leta 2004-05 v zaledje curkov uskladiščila večja količina infiltriranih padavin. Od 1.6. do 11.8.05 se je v zaledje curkov infiltriralo kar 144,5 mm dežja. Skozi curek J je v tem času izteklo 70 l vode, skozi kapljanje L pa le 5 l, medtem ko je bil curek I suh. Na privzeti površini zaledja 255 m² se je infiltriralo 37 m³ padavin, ki so se skoraj vse shranile v zaledju curkov.

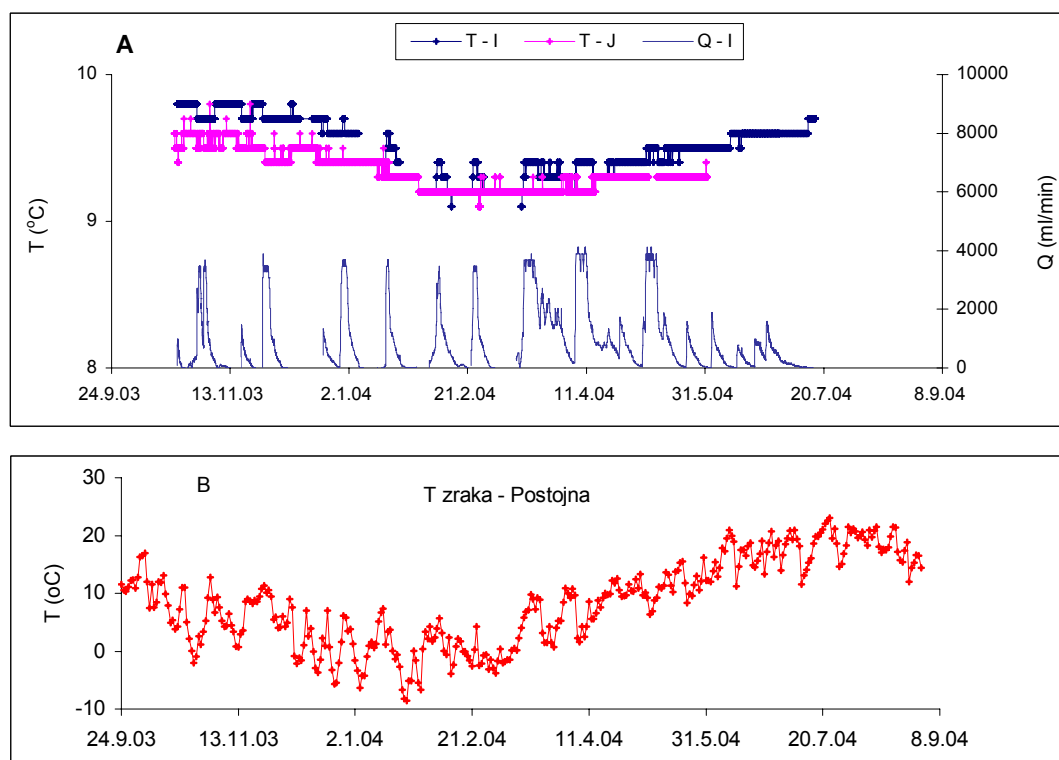
V začetku naslednjega hidrološkega leta 2005-06 se je do izrazite reakcije pretokov curkov 29.9.2005 infiltriralo še dodatnih 159,4 mm dežja, kar pomeni dodatnih 40,6 m³ vode. Vendar je v tem obdobju skozi curek I v obliki manjših valov izteklo 19,5 m³, skozi curek J 900 l, skozi kapljanje L pa okoli 4 l, skupno 20,4 m³. To pomeni da se je količina shranjene vode v zaledju curkov do časa, ko so se začeli oblikovati izdatnejši vodni valovi, povečala še za okoli 20 m³ in je tako znašala 57 m³ (tabela 5.1.5).

V hidrološkem letu 2004-05 smo zabeležili tudi drugačen potek SEP v primerjavi s predhodnim hidrološkim letom (poglavje 5.2.3). Beležili smo izostanek značilnih upadov SEP v vodnih valovih. Izgleda, da je prihajalo do iztiskanja predvsem stare vode v sicer skromnejših vodnih valovih vse tja do oktobra 2005, kar pa bi veljalo še preveriti (poglavje 5.2.3).

5.2 TEMPERATURA IN SPECIFIČNA ELEKTRIČNA PREVODNOST

5.2.1 Temperatura curkov I in J

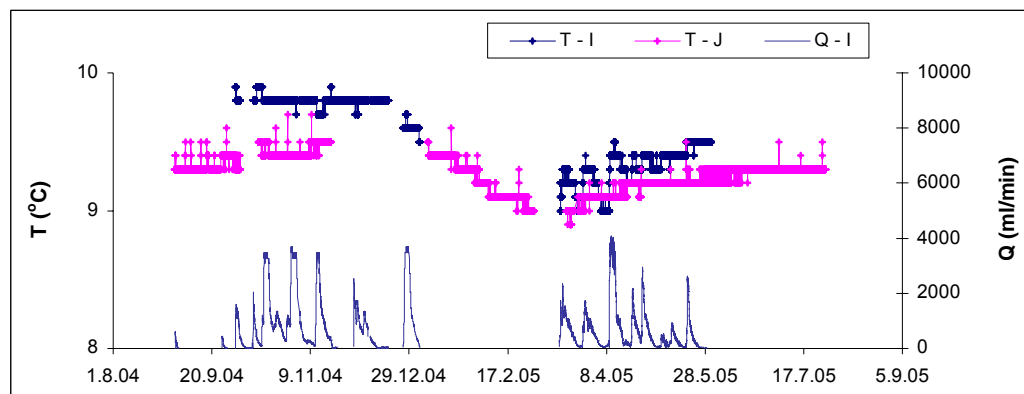
Nihanja temperature curka I je bilo v hidroloških letih 2003-04 in 2004-05 v intervalu 9,3 – 9,8 °C, v letu 2005-06 pa v intervalu 9,4 – 9,8 °C. Upoštevala sem meritve le v času višjih pretokov, saj sem ugotavljala, da je na merilnem mestu ob nižjih pretokih prihajalo v hladnih mesecih do zniževanja temperature zaradi vpliva hladnejšega zraka v rovu. Nakazuje se sezonsko nihanje temperature, ko smo najvišje vrednosti beležili od oktobra do decembra, najnižje pa od februarja do aprila (sliki 5.2.1 in 5.2.2).



Slika 5.2.1: Nihanje temperature curkov I in J in pretoka curka I v času hidrološkega leta 2003-04 (A) ter nihanje temperature zraka na površju – Postojna (B).

V hidrološkem letu 2003-04 je bilo pri curku J razpoznavno sezonsko nihanje v intervalu 9,1 do 9,5 °C z minimalnimi vrednostmi od februarja do srede aprila in maksimalnimi novembra (slika 5.2.1). Tudi v sledečih hidroloških letih 2004-05 in

2005-06 je dosegal curek J maksimalno temperaturo 9,5 °C novembra in minimalno 9,1 °C od srede februarja do srede aprila (slika 5.2.2).



Slika 5.2.2: Potek temperature v curkih I in J in pretoka curka I v času hidrološkega leta 2004-05.

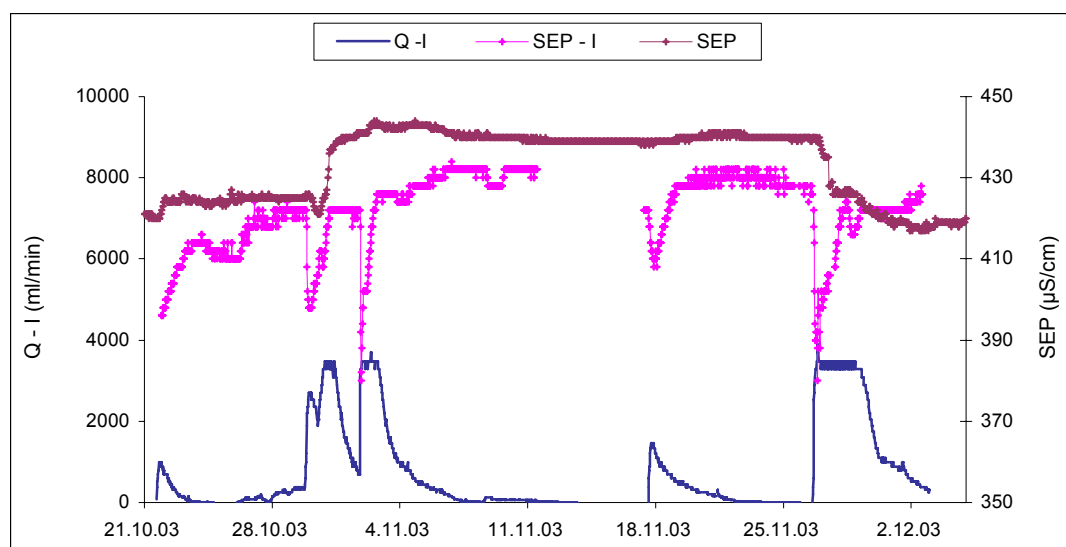
V času vodnih valov sem le občasno ugotavljala minimalne spremembe temperature in to le do 0,1°C, kar pa je tudi ločljivost naših inštrumentov. Pri curku J je v času največjega vodnega vala v okviru 3-letnih meritev, novembra 2003 prišlo do upada temperature za 0,1 °C, sicer pa v vodnih valovih ni prihajalo do sprememb. V curku I pa smo zabeležili porast za 0,1 °C v vodnem valu konec decembra 2003 in upad za 0,1 °C v vodnem valu marca 2004.

Zabeležena nihanja temperature prek leta so bila v intervalu 0,4 °C. Meritve temperature obeh curkov nakazujejo, da se voda pri pretakanju skozi 100 m debel jamski strop izenači s svojim okoljem. Tudi izotopske analize (poglavje 5.3) so pokazale, da se padavine določen čas zadržijo v vadozni coni, preden iztečejo iz nje. Ugotovljena povprečna starost vode curka I, ki na padavine najhitreje reagira, je bila 2,5 mesecev, za curek J pa najmanj eno leto.

Temperatura v našem primeru tako ni naravno sledilo, ki bi odražalo dinamiko pretakanja skozi 100 m debelo vadozno cono, saj pride tudi ob hitrem pretakanju na 100 m dolgi poti do temperaturne homogenizacije z okoljem.

5.2.2 Specifična električna prevodnost curkov I in J

Zvezne meritve specifične električne prevodnosti (SEP) curka I v času hidrološkega leta 2003-04 so pokazale značilen potek SEP curka I. Ob oblikovanju vodnih valov po izdatnem dežju ob hitrem naraščanju pretoka (ko v dveh do nekaj urah doseže vrednosti blizu 4000 ml/min) smo beležili enako hitre upade SEP. Tako je curek I ob doseženem maksimalnem pretoku dosegel minimalno vrednost SEP, ki pa je začela hitro zopet naraščati in se približevati izhodni vrednosti. Jeseni 2003 je po dežju, ki je sledil dolgotrajni suši (slika 5.2.3) SEP z izhodne vrednosti 422 $\mu\text{S}/\text{cm}$ upadla v prvem vodnem valu do 398 (upad za 24 $\mu\text{S}/\text{cm}$), v drugem pa do 380 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (upad za 42 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Vendar pa je po doseženi minimalni vrednosti, SEP začela hitro naraščati in se vrnila na izhodno vrednost, ko je pretok šele začel upadati. Ob nadaljnjem upočasnjem upadanju pretoka (pri $Q < 500$ ml/min) je SEP nekoliko naraščala in v iztekajočem delu vala dosegala vrednost 432 $\mu\text{S}/\text{cm}$.



Slika 5.2.3: Potek SEP curkov I in J v času vodnih valov (podan je tudi pretok curka I) po prvih izdatnih padavinah, ki so sledile dolgemu poletnemu sušnemu obdobju v začetku hidrološkega leta 2003-04.

Upad SEP v prvem manjšem vodnem valu nakazuje, da se je v curku povečal prispevek manj mineralizirane vode. Sklepam, da je prišlo ob prvem naraščanju pretoka do iztiskanja vode, ki se je manj časa zadrževala v nekoliko bolj prepustnem delu zaledja in do mešanja s staro vodo (slika 5.2.3). Vendar pa je upadanju pretoka

takoj sledilo naraščanje SEP, ki se je nadaljevalo kljub ponovnemu večjemu naraščanju pretoka curka. Iz tega sklepam, da je dobra namočenost prsti na površju pogojevala zapolnjevanje celotne strukture vadozne cone, kar je sprožilo iztiskanje predhodno shranjene vode iz slabše prepustnega dela zaledja. Take razmere nastopajo po daljših sušnih razmerah, po poletni suši, ko se padavine pretežno le shranjujejo v zaledju, njihov iztok pa z večjimi časovnimi zamiki pogojujejo šele prve izdatnejše padavine, ki sledijo.

V drugem vodnem valu, ki se je začel 1.11.2003, sem ugotavljala 5 urni strm upad SEP sočasno z naraščanjem pretoka, kar pripisujem pomembnemu dotoku sveže infiltrirane, manj mineralizirane vode, ki je sicer ob mešanju s predhodno shranjeno vodo z visoko SEP dosegala nizke vrednosti SEP. Vendar pa ocena na osnovi meritev SEP pred vodnim valom in v vrhu vodnega vala, če privzamem za SEP vstopajočih padavin $40 \mu\text{S}/\text{cm}$ (Kogovšek in Kranjc, 1988), pokaže, da je bil delež nove vode v času najnižje SEP le dobrih 10 %, oz. 13 %, če upoštevam, da prihaja pri sicer hitrem pretakanju sveže infiltrirane vode skozi vadozno cono tudi do delnega raztapljanja kamnine in privzamem za SEP te vode $100 \mu\text{S}/\text{cm}$. Kljub nadaljnjemu manjšemu naraščanju pretoka je SEP naraščala dokler ni začel pretok upadati. Dosegla je vrednost $426 \mu\text{S}/\text{cm}$ in na tej vrednosti vztrajala, dokler ni pretok upadel pod $500 \text{ ml}/\text{min}$, ko je začela minimalno naraščati ($432 \mu\text{S}/\text{cm}$). Sklepam, da je v danih pogojih prihajalo do iztekanje vode iz celotne hierarhije prevodnikov, predvsem pa iz slabše in najslabše prepustnega dela vadozne cone, ki se aktivira le ob dobri namočenosti prsti, ki pogojuje njegovo zapolnjevanje in sočasno praznjenje. V vodnem valu 26.11.2003 je SEP z $426 \mu\text{S}/\text{cm}$ v vrhu vala upadla na $380 \mu\text{S}/\text{cm}$, kar pomeni do 14 % nove vode.

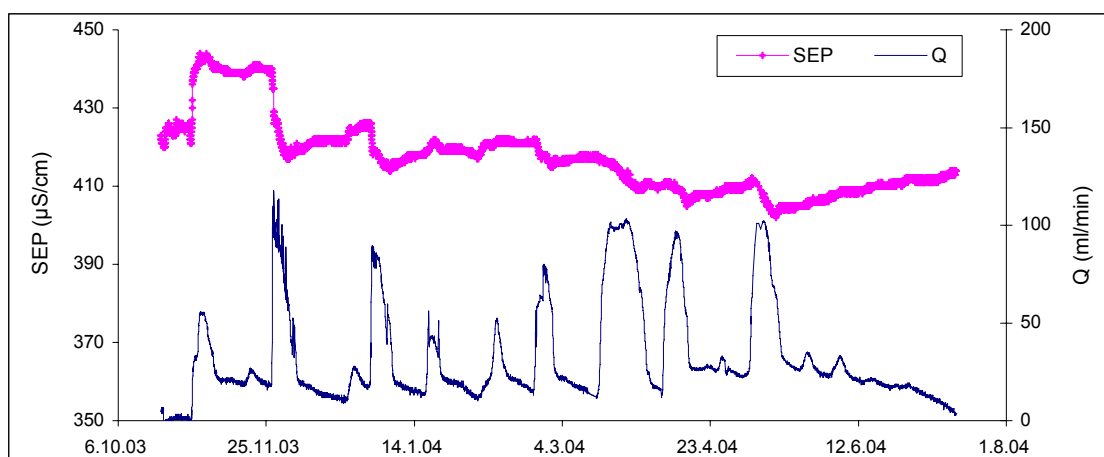
Podobno sliko nihanj SEP curka I v odvisnosti od pretoka sem ugotavljala tudi spomladi 2005, ko sem meritve nadaljevala z merilnikom Geolog S. SEP je z izhodnih vrednosti $422 \mu\text{S}/\text{cm}$ v zaporednih vodnih valovih upadala do $372 \mu\text{S}/\text{cm}$ (slika 5.2.7), podobno kot jeseni 2003. To pomeni do 15 % nove vode v vodnih valovih. Opazno je postopno upadanje najvišjih SEP pred pričetkom zaporednih novih valov oz. ob koncu vodnih valov do konca maja 2005, ko je SEP dosegla vrednost $410 \mu\text{S}/\text{cm}$.

Konec maja 2005 je curek presahnil za 2,5 meseca. Pojavil se je zopet za pol meseca konec avgusta in po krajši presušitvi je bil aktiven še en mesec do sredine oktobra. V tem času so se v curku I oblikovali le manjši valovi in SEP je ves čas ob manjših nihanjih postopno naraščala, ko ni prihajalo do značilnih upadov SEP v vodnih valovih. Občasne vzporedne meritve SEP v zajetih vzorcih so potrjevale ta bistveno drugačen potek SEP, ki bi ga bilo dobro v prihodnje še dodatno preveriti. V tem času je opazno manjše nihanje SEP ob stalnem naraščanju vrednosti SEP do začetka januarja 2006, ko smo izmerili vrednost 440 $\mu\text{S}/\text{cm}$. V času izdatnega, največjega vodnega vala, ki se je začel konec novembra 2005, je bil na površju sneg, padlo je tudi nekaj dežja, medtem ko je v nekaj zaporednih nočeh prišlo do zmrzovanja na površju. Kasneje je padlo še nekaj dežja, ko je bila temperatura nad lediščem. Vse to je vplivalo na način infiltracije in posledično na iztiskanje vode iz celotne hierarhije prevodnikov, tudi tistega najslabše prepustnega dela. Glede na to, da je izteklo skozi curek I okoli 35 m³ vode z visoko SEP (436 do 440 $\mu\text{S}/\text{cm}$) sklepam, da je iztekala pretežno le uskladiščena voda. V sušnih obdobjih, ko curek I nima vode, sem pogosto ugotavljala, da curek ni reagiral na manjše in manj intenzivne padavine in da so se le-te shranjevale v njegovem zaledju. To shranjeno vodo potisnejo skozi curek šele prve sledeče izdatnejše padavine.

Februarja 2006, ko se je curek I zopet pojavil po taljenju snega na površju ter ponovno oblikoval velike vodne valove, sem ponovno ugotavljala stari vzorec upadanja SEP v vodnih valovih ob naraščanju pretoka. SEP je v vodnih valovih z izhodne vrednosti 434 $\mu\text{S}/\text{cm}$, ki je postopno upadala in je v začetku junija 2006 dosegla 415 $\mu\text{S}/\text{cm}$, upadala v vrhovih vodnih valov na vrednosti od 409 do 388 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Gre za postopno vse večje, a opazno manjše upade SEP v vrhovih vodnih valov (do 30 $\mu\text{S}/\text{cm}$) kot spomladi 2005.

Vse te posebnosti dajejo slutiti, da je prihajalo v omenjenih obdobjih do drugačnega zadrževanja in pretakanja infiltriranih padavin v najširši hierarhiji različno prepustnih prevodnikov, kar se je odrazilo v meritvah SEP, pa tudi v hidrogramu curka I.

Zvezne meritve SEP curka J v času hidrološkega leta 2003-04 so pokazale postopno dokaj zvezno upadanje SEP od jeseni do naslednjega poletja ob stopničastih nihanjih v času zaporednih vodnih valov (slika 5.2.4).



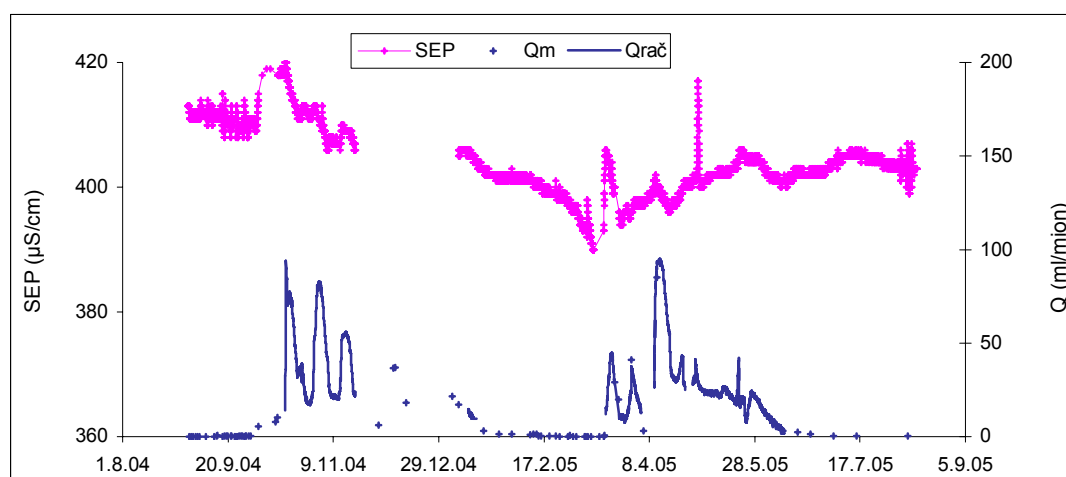
Slika 5.2.4: Nihanje SEP in pretoka curka J v hidrološkem letu 2003-04.

Ob naraščanju pretoka v prvem vodnem valu 30. oktobra 2003 po dolgi poletni suši se je SEP izrazito povečala s 422 na 443 $\mu\text{S}/\text{cm}$ in vztrajala na visokih vrednostih cel mesec, čeprav je medtem prvi vodni val počasi upadel in je pretok nato vztrajal 2 tedna na vrednostih okoli 20 ml/min. Šele ko je sledeči vodni val, ki je bil največji v hidrološkem letu 2003-04 in se tudi v naslednjih treh hidroloških letih ni ponovil, dosegel maksimalno vrednost, je prišlo do spremembe SEP, ki je začela strmo upadati in pri pretoku 50 ml/min dosegla vrednost 418 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Očitno je prišlo po predhodnem iztiskanju uskladiščene vode, ki se je v zaledju zbirala in zadrževala prek dolgega poletnega sušnega obdobja, verjetno pa še znatno dlje, do preboja z vodo, ki se je zadrževala v zaledju manj časa in do mešanja z njo. Ob nadaljnjem upadanju pretoka je SEP nato zopet zmerno naraščala, a le do 426 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Sledeči manjši vodni valovi so povzročili manjša povečanja SEP, večji pa manjša zmanjšanja ob siceršnjem trendu počasnega upadanja SEP. Šele ob upadanju pretoka k minimalnim vrednostim konec hidrološkega leta je SEP zopet počasi naraščala.

V naslednjem hidrološkem letu 2004-05 z bistveno drugačnim hidrogramom, se je SEP v času prvega vodnega vala po poletni suši podobno povečala kot leto prej, a le s 411 do 420 $\mu\text{S}/\text{cm}$ in vztrajala na visokih vrednostih le dobra dva tedna (slika 5.2.5). Nato je upadala in minimalno letno vrednost 392 $\mu\text{S}/\text{cm}$ dosegla v času zimske suše. Ob nadaljnjih skromnejših vodnih valovih v primerjavi s predhodnim

hidrološkim letom, se je vsakokrat nekoliko povečala in ob koncu hidrološkega leta dosegla vrednost 403 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Izstopa izrazit enodnevni porast in upad SEP konec aprila 2005 ob sočasnem manjšem povečanju pretoka, ki ga le težko razložim. Morda se je aktiviral nek prevodnik in kratkotrajno dovajal vodo iz najslabše prepustnega dela zaledja. Največja SEP namreč sovпада z vrednostmi na začetku hidrološkega leta oktobra 2004. Podobna pogosta kratkotrajna povečanja smo beležili tudi v koncentraciji sledila v okviru sledilnega poskusa, ko je bilo sledilo injicirano junija 2002 na površju po prsti.



Slika 5.2.5: Curek J – potek SEP in pretoka v hidrološkem letu 2004-05

5.2.3 Meritve SEP curkov I in J v zaporednih hidroloških letih

Ker sem curku J določeno obdobje merila SEP že v letu 2002, je iz slike (slika 5.2.6) lepo viden večleten potek SEP, ki po štirih hidroloških letih še ne kaže vzorca ponovljivosti in narekuje nadaljevanje meritev, podobno kot sem ugotavljala tudi pri meritvah pretoka oz. iz dobljenih hidrogramov. Z meritvami SEP curka I smo imeli v letu 2004 težave in zato razpolagam s podatki za nekoliko krajše obdobje (slika 5.2.7).

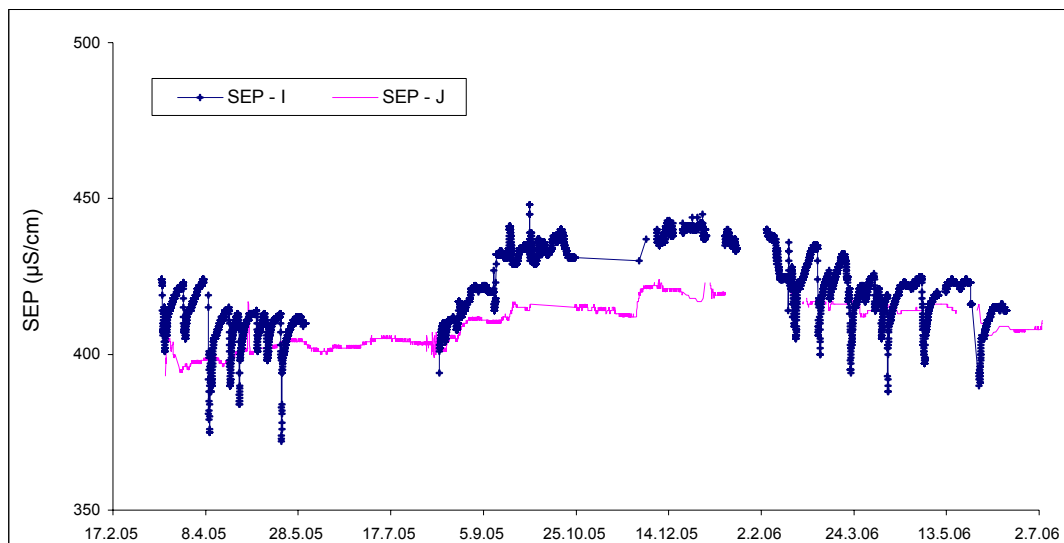
Sklepam, da najvišje SEP nakazujejo iztekanje vode iz najslabše prepustnih delov zaledja, kjer se infiltrirane padavine zadržijo najdlje. V času 3 hidroloških let je bila največja vrednost SEP nekaj več kot 440 $\mu\text{S}/\text{cm}$ in je bila zabeležena pri obeh

curkih, a ne sočasno (pri curku J novembra 2003, pri curku I pa decembra 2005). Jeseni 2002, ko so potekale le zvezne meritve curka J, smo izmerili celo višje vrednosti. Največjo vrednost, nekaj prek 450 $\mu\text{S}/\text{cm}$, sem zabeležila v curku J že oktobra 2002. To dodatno nakazuje velike razlike tekom let in s tem razlike v napajanju in praznjenju vadozne cone z obsežno hierarhijo prevodnikov različne prepustnosti ter procesov raztapljanja karbonatov, ki so vezani na to dogajanje. Različna količina raztopljenih karbonatov se odraži v različni SEP. V primeru prisotnosti drugih ionov, pa je potrebno upoštevati tudi učinek le-teh.

Zanimiva je sočasna primerjava SEP obeh curkov v začetku hidrološkega leta 2003-04, ko je šlo za iztekanje prve vode po dolgem sušnem poletnem obdobju, in je podana na sliki 5.2.3. Razvidna je minimalna razlika v SEP curkov I in J pred začetkom oblikovanja vodnih valov, nato pa bistveno drugačen potek, ko je curek J skoraj mesec dni dosegal stalno znatno višje vrednosti SEP. To si razlagam z iztiskanjem stare vode z višjo vrednostjo SEP, ki se je v zaledju curka shranjevala prek dolgega poletnega obdobja, in je po zelo izdatnih in intenzivnih padavinah prišlo do iztiskanja tudi stare vode, shranjene v najslabše prepustnem delu zaledja. Za upad SEP v curku J je bil odločilen velik vodni val konec novembra 2003 s pretokom okoli 120 ml/min (slika 5.1.3), tako da je v upadajočem delu vodnega vala curek I dosegal celo nekoliko višje vrednosti kot curek J. SEP curka I je v času vodnih valov značilno upadala.

Primerjava poteka SEP obeh curkov (slika 5.2.8) nakazuje izrazito homogenizacijo vode v zaledju curka J v primerjavi s curkom I, ko vrednosti SEP curka I nihajo okoli vrednosti SEP za curek J.

Od marca do maja 2005 in od februarja 2006 dalje so razvidna značilna nihanja SEP curka I, ko dosega pred vodnimi valovi najvišje vrednosti, celo večje vrednosti kot curek J (slika 5.2.8). Ta razlika se je od začetnih več kot 20 $\mu\text{S}/\text{cm}$ do konca hidrološkega leta 2004-05 zmanjševala na okoli 5 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Podobno se je dogajalo od marca do junija 2006, le da so bile razlike nekoliko manjše.



Slika 5.2.8: Vzporedne meritve SEP curkov I in J.

Izstopa vmesno obdobje od avgusta 2005 do januarja 2006, ko so v curku I izostali značilni upadi SEP v sorazmerno skromnih vodnih valovih v tem obdobju (slika 5.2.8). Ob manjših nihanjih je curek I stalno dosegal višje vrednosti SEP kot curek J, in sicer do 20 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Sklepam, da SEP odraža različno zgradbo zaledij obeh curkov. Curek I s prepustnejšim osrednjim prevodnikom, ki ga je oblikovalo intenzivnejše raztapljanje zaradi odtoka odpadnih voda iz vojašnice, po intenzivnih in izdatnih padavinah hitreje odvaja večje količine vode z nižjimi vrednostmi SEP. Ta del pa dopolnjuje še slabo prepusten del zaledja, ki se prazni le v namočenih razmerah po padavinah in ga označujejo visoke SEP v začetnem in iztekajočem delu velikih vodnih valov. V sušnih obdobjih se občasne infiltrirane padavine v njem le shranjujejo, saj curek presuši. Po občasnih skromnih padavinah, kot je bilo v obdobju od avgusta 2005 do januarja 2006, pa padavine izpodrivajo le predhodno uskladiščeno vodo in zato ne prihaja do značilnih upadov SEP v vodnih valovih.

Zaledje curka J pa gradi hierarhija različno, sicer slabše prepustnih prevodnikov, ki deluje povezano, tako, da se vse infiltrirane padavine močno homogenizirajo, občasna izrazitejša povišanja v začetku hidroloških let po daljšem sušnem obdobju pa predstavljajo iztiskanje vode iz najslabše prepustnega dela zaledja po dovolj izdatnih padavinah, ki se aktivira le občasno.

Vrednosti SEP za curek I nekako nihajo okoli vrednosti SEP curka J (slika 5.2.8). To kaže na močno homogenizacijo v curku J, medtem ko se v curku I po izdatnejših padavinah izrazito odražajo posamezni dotoki, najprej iz zelo slabo prepustnega dela zaledja z visokimi vrednostmi SEP, (ki pa ne prispeva vode v curek v sušnih razmerah), kasneje pa iz bolj prepustnega dela.

Vse to nakazuje, da je SEP pomembno naravno sledilo, ki odraža dogajanje v sistemu, predvsem različno intenzivno iztekanje iz različno prepustnih delov zaledja. Očitno ima pri tem odločilno vlogo razporeditev in količina efektivno infiltriranih padavin ter predhodna zapolnjenost zaledja, ki se zelo spreminja; v petih letih še nismo zabeležili ponovljivosti v poteku SEP. Zato pričakujem, da bi nadaljevanje teh meritev (posebno ob s padavinami bolj izdatnih letih) ob vzporednem spremljanju več parametrov, predvsem pretoka, lahko še bolje pojasnili dogajanje v vadozni coni v odvisnosti od SEP vode, ki izstopa iz vadozne cone.

5.2.4 Potek SEP v vodnih valovih

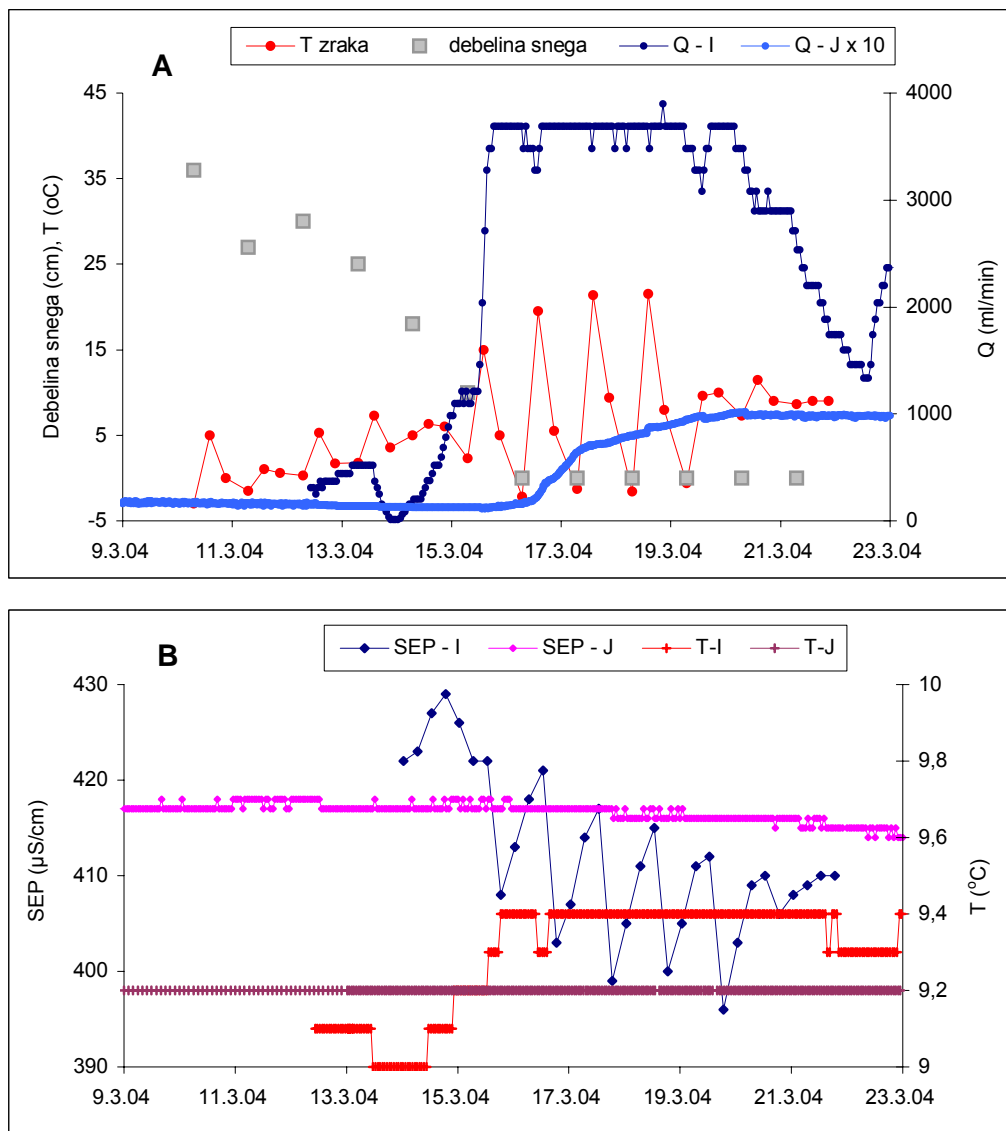
Najbolj pestro dogajanje nastopa v času vodnih valov, ki jih sprožijo različno izdatne in intenzivne padavine. V prvem vodnem valu po daljših sušnih obdobjih je potek SEP bistveno drugačen kot pa v vodnih valovih v dobro namočenih obdobjih. V zimskem obdobju vpliva na infiltracijo padavin snežna odeja oz. zamrznjena tla, saj pride do infiltracije padlih padavin v vadozno cono lahko z veliko zakasnitvijo.

Največje spremembe SEP nastopajo v času vodnih valov v curku I, kjer ob hitrem naraščanju pretoka SEP strmo upada, a se tudi hitro vrača na izhodno stanje, ki ga doseže že pri pretoku okoli 3000 ml/min. Minimalne zabeležene vrednosti v času naših meritev niso dosegale nižjih vrednosti od 374 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Posebne razmere nastopajo v času obilnih snežnih padavin, ko ob nizkih temperaturah sneg dalj časa ostaja na površju in se kasneje postopno tali. Ob namočenih prsti prihaja do napajanja vadozne cone po najširši hierarhiji prevodnikov, ko se oblikujejo izdatni vodni valovi curkov v podzemlju.

Tak primer sem spremljala marca 2004. Razmere na površju so podrobno razložene v poglavju 5.3.2. Obilna snežna odeja je tedaj vztrajala na površju do 16. marca (slika 5.3.7 A). Do 11.3.2004 je bila temperatura zraka na površju večino dni pod lediščem, tako da sklepam, da v tem obdobju ni prihajalo do taljenja snega ali pa je bilo minimalno in praktično ni bilo učinkovite infiltracije. Od 12.3.04 dalje, ko je temperatura na površju tudi ponoči ostajala nad lediščem, je skozi curek I začela iztekati prva voda (slika 5.2.9 A). Pretok je začel 14.3. počasi zvezno naraščati. Dne 15. 3.04 se je stalilo še preostalih 10 cm snega. Curek I je v 9 urah dosegel maksimalni pretok. Sledili so dnevi z maksimalno temperaturo prek 20 °C, medtem ko je temperatura v štirih zaporednih nočeh upadla pod 0 °C. Vsakodnevne odmrznitve so se odrazile v dnevnem nihanju pretoka curka I in SEP.

Vrhovi vsakodnevnih vodnih valov zaradi maksimiranega pretoka niso dobro vidni, boljše so vidni upadi pretoka vsak dan okoli 13:00 (slika 5.2.9 A), ki nakazujejo zaviranje pretakanja skozi vadozno cono ob zmrzovanju na površju. Nihanje pretoka se je odrazilo v dnevnih nihanjih SEP (slika 5.2.9 B), pa tudi v nihanjih koncentracije eozina, ki je bil injiciran na površju junija 2002 ter nitratov curka I. Vsak dan okoli 13.00 ure, ko je pretok upadel, sem beležila povečanje vrednosti SEP ter sočasna povečanja koncentracije nitratov in eozina (v poglavju 5.4 in 5.6). Sočasno je prišlo le do majhne spremembe temperature vode curka I. Dne 15.3.04 ob 13.00 je z 9,2 °C porasla na 9,3 °C in ob 18.00 na 9,4 °C. Ob povečanju pretoka in upadu SEP čez 6 ur pa je upadla za 5 ur na 9,3 °C. Kasneje tudi teh minimalnih sprememb nismo več izmerili (slika 5.2.9 B). Nižje temperature curka I pred 15.3.04 ob 13.00 pripisujem ohlajanju dotekajoče vode ob manjših pretokih zaradi hladnejšega zraka v Glavnem rovu Postojnske jame.

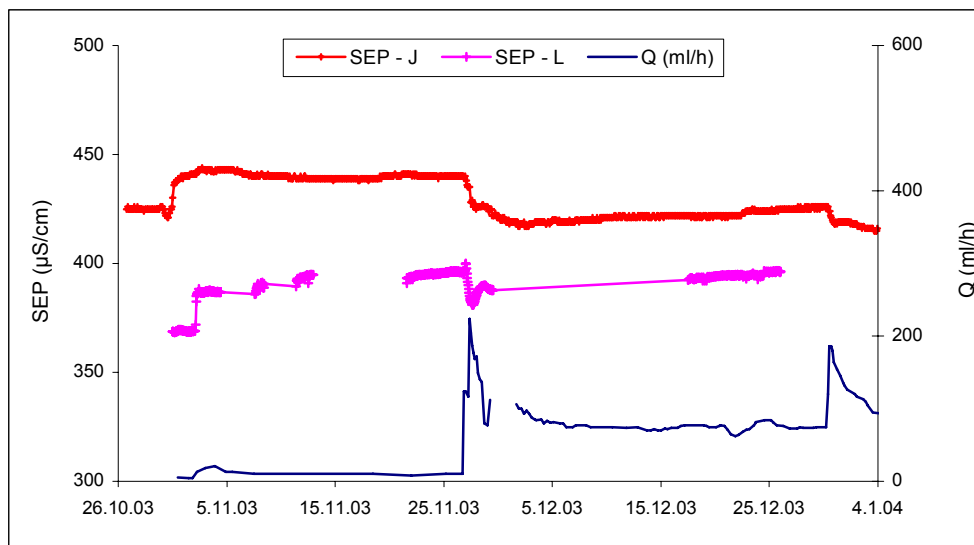
Curek J je imel ves čas vodnega vala konstantno temperaturo 9,2 °C, medtem ko je bila SEP v trendu počasnega upadanja. Zgradba zaledja tega curka pogojuje dobro homogenizacijo infiltriranih padavin, ne le temperaturno ampak tudi homogenizacijo kemijske sestave. To so potrdile tudi izotopske analize (poglavje 5.3), spremljanje prenosa injiciranega sledila in prenosa nitratov.



Slika 5.2.9: Vodni val curkov I in J marca 2004 po taljenju snega na površju.

5.2.5 Curek L

Krajši čas smo merili SEP tudi v curku L (poglavje 4.1.4). Kljub težavam pri shranjevanju podatkov, sem uspela dobiti potek SEP ob naraščanju pretoka v prvi izraziti vodni val po dolgem sušnem obdobju. Pretok curka L dosega minimalne pretoke, ki se gibajo okoli 1 ml/h, maksimalni pretoki pa se dvignejo na nekaj ml/min. Najnižji pretoki pogojujejo delno izločanje kalcijevega karbonata in posledično nižje vrednosti SEP. Zato je pri vrednotenju meritev ob najnižjih pretokih potrebna previdnost.



Slika 5.2.10: curek L - nihanje SEP v odvisnosti od pretoka.

Curek L je po dolgi poletni suši na izdatnejše padavine konec oktobra 2003 reagiral zelo skromno, šele 2. novembra, ko so se padavine končale. Curek J je reagiral 2 dni, curek I pa 3 dni pred curkom L. Hkrati s porastom pretoka sem v curku L zabeležila porast SEP za 20 $\mu\text{S/cm}$ na 387 $\mu\text{S/cm}$. Glede na izločanje karbonatov zaradi počasnega pretakanja, je bil dejanski porast verjetno nekoliko manjši. Vendar pa je porast skladen s porastom pretoka in s porastom SEP v curku J. To si razlagam z izpodrivanjem stare vode iz zaledja. Višje vrednosti SEP sem merila vse do konca novembra, ko je dosegla vrednost 395 $\mu\text{S/cm}$. Ob prvem hitrem povečanju pretoka 27.11.2003 na prek 2 ml/min je nekoliko porasla tudi SEP (na 400 $\mu\text{S/cm}$), ob kasnejšem nadaljnjem naraščanju pretoka do maksimalne vrednosti 4 ml/min, pa je SEP upadala. Minimalno vrednost 382 $\mu\text{S/cm}$ je curek dosegel 10 ur za maksimalnim pretokom, nato pa je SEP zopet naraščala, in konec decembra dosegla 396 $\mu\text{S/cm}$.

Podoben potek SEP sem ugotavljala tudi v curku J, ki je z manjšim povečanjem, nato pa z znižanjem SEP reagiral tudi v sledečem izrazitem vodnem valu konec decembra 2003, ko smo imeli težave pri meritvah SEP curka L. Sklepam, da je verjetno prišlo tedaj tudi v curku L najprej do upada SEP, ki pa iz slike 5.2.10 ni razviden.

5.3 IZOTOPSKE ZNAČILNOSTI ($\delta^{18}\text{O}$) PADAVIN IN OPAZOVANIH CURKOV

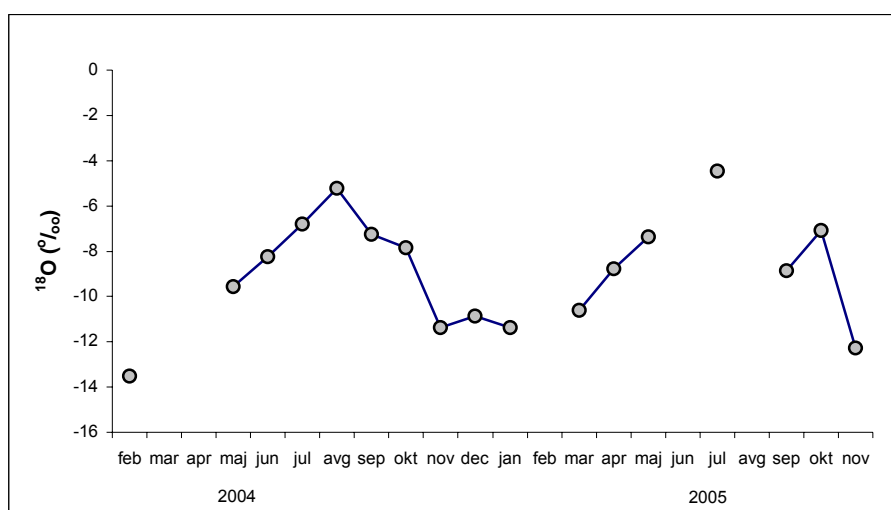
Dodatne informacije o značilnostih pretakanja v curka I in J sem želela pridobiti z analizami izotopske sestave kisika v padavinah in v vodi curkov (Pezdič, 1999). Zato sem zajemala mesečne kompozitne vzorce padavin in trenutne mesečne vzorce curkov I in J v jami v letih 2004 in 2005. Želela sem ugotoviti izotopske značilnosti baznega toka obeh curkov, zadrževalni čas padavinske vode v tem delu vodonosnika, zato sem vzorce zajemala v upadajočem delu vodnih valov, ko je curek I dosegal pretok okoli 400 ml/min oz. curek J okoli 20 ml/min. Izotopske analize vzorcev so bile opravljene na inštitutu Joaneum Research v Gradcu (tabela 5.3.1).

Tabela 5.3.1: Rezultati izotopskih meritev $\delta^{18}\text{O}$ vzorcev padavin ter vzorcev curkov I in J (v promilih). Ugotovljen evaporacijski efekt (moder izpis vrednosti).

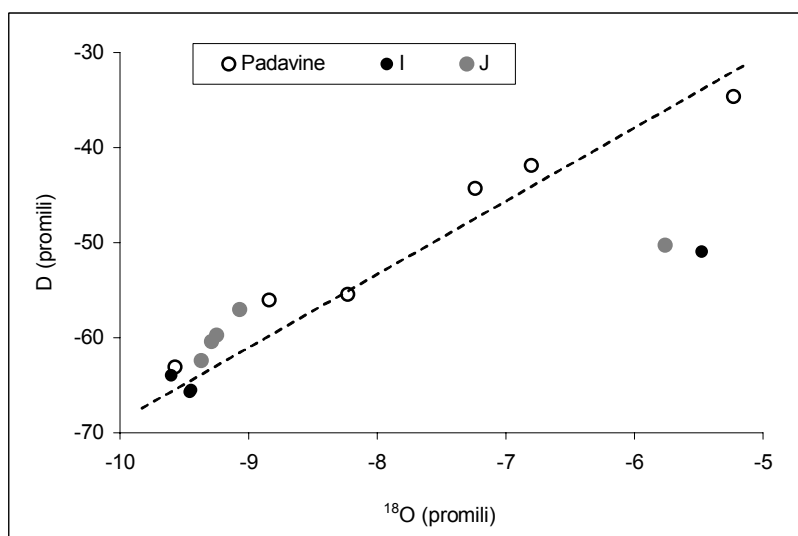
Čas zajema			$\delta^{18}\text{O}$		
padavin	curka I	curka J	padavine	curek I	curek J
maj 2004	20.5.04 9:00	18.5.04 10-16:00	-9,57	-9,60	-9,29
junij 2004	19.6.04 6:00 25.6.04 0:00	23.6.04 18:00	-8,23	-5,48 -9,62	-9,25
julij 2004	13.7.04 12:00	13.7.04 11:00	-6,80	-9,46	-9,37
avgust 2004	curek je suh!	3.8.04 18:00	-5,23		-5,76
september 2004	27.9.04 18:00	21.9.04 18:00	-7,24	-9,45	-9,07
oktober 2004	13.10.04 12:00	26.10.04 0-12:00	-7,84	-5,98	-5,68
november 2004	18.11.04 0:00	19.11.04 0-12:00	-11,37	-5,56	-9,24
december 2004	9.12. 04 12:00	12.12. 04 0-12:00	-10,86	-9,06	-9,24
Januar 2005	5.1.05 0:00	4.1. 10:30-5.1.05 0:00		-9,03	-9,11
jan + feb 2005	curek je suh!	23.2. - 24.2.05 0:00	-11,37		-8,82
marec 2005	21.3.2005 18:00 23.3.05 0:00	22.3. 05 0-12:00	-10,60	-7,74 -8,66	-9,15
april 2005	16.4.2005 0:00 17.4.05 0:00	18.4. 05 12- 19.4. 0:00	-8,77	-7,60 -4,62	-9,12
maj 2005	24.5.05 0:00	10.5.05 0:00	-7,37	-6,51	-9,17
maj + junij 2005			-4,47		
junij 2005	curek je suh!	Q ~ 2 ml/min			
julij 2005	curek je suh!	Q ~ 0,5 ml/min			
avgust 2005	24.8.05 0:00	17.8.05 16.30		-6,16	-9,18
september 2005	23.9.05 0:00	23.9.05 12:00	-8,86	-6,86	-7,07
oktober 2005	11.10.05 0:00	14.10.05 9:15-0:00	-7,09	-6,11	-6,74
november 2005			-12,28		

5.3.1 Celoletno spremljanje izotopske sestave $\delta^{18}\text{O}$

Krivulja povprečne mesečne izotopske sestave padavin je imela v opazovalnem obdobju približno obliko sinusoide (slika 5.3.1). Najbolj pozitivne vrednosti $\delta^{18}\text{O}$ so nastopale v poletnem obdobju, medtem ko krivulja izotopske sestave dosega svoj minimum v zimskem obdobju. Povprečna izotopska sestava mesečnih padavin znaša -9 ‰. V opazovalnem obdobju so imele padavine večinoma razpon med -5 ‰ in -12 ‰, kar pomeni, da znaša amplituda izotopskega signala 7 ‰ (Kogovšek in Urbanc, 2007).



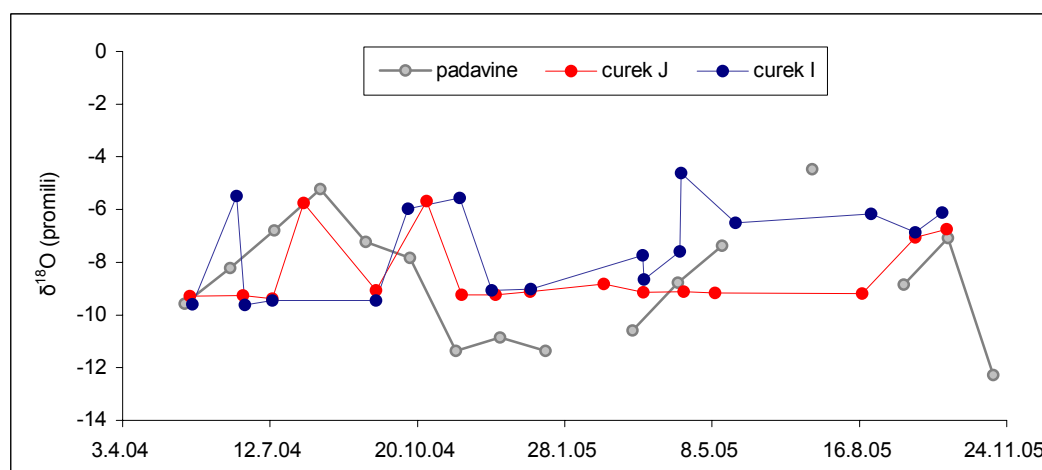
Slika 5.3.1: Nihanje $\delta^{18}\text{O}$ v vzorcih mesečnih padavin v opazovanem obdobju.



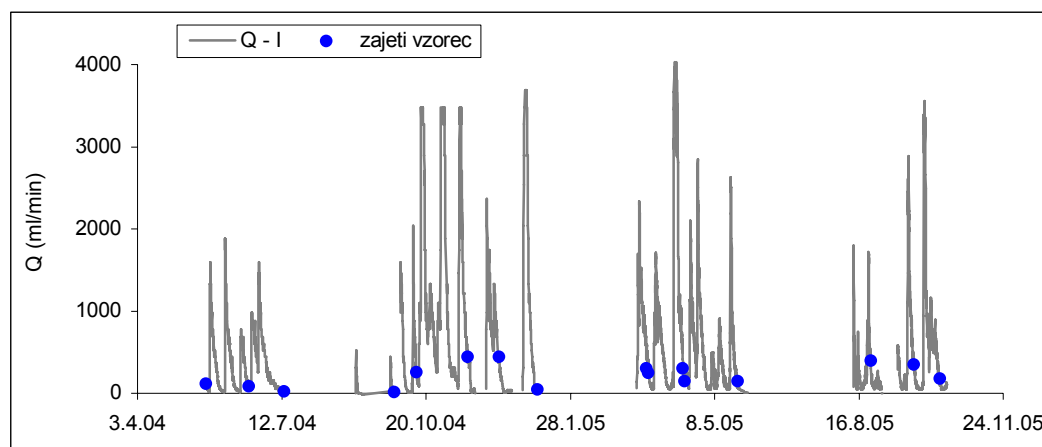
Slika 5.3.2: Razmerje med izotopsko sestavo kisika in deuterija v opazovanih vodah.

V prvi seriji vzorcev v letu 2004 sta bila v padavinah in prenikajoči vodi analizirana izotopa ^{18}O in devterij. Primerjava med obema parametroma je prikazana na sliki 5.3.2. Iz grafa je razvidno, da večina meritev leži blizu oziroma tik nad meteorno linijo. V tem pogledu predstavljata izjemo le vzorca prenikajoče vode odvzeta v poletnem času (curek I junija in curek J avgusta 2004 ob nizkem pretoku), pri katerih je očitno prišlo do premika vrednosti $\delta^{18}\text{O}$ v pozitivno smer zaradi izotopskega evaporacijskega efekta.

Izotopska sestava kisika v vodi obeh curkov (I in J) je podana na sliki 5.3.3A, slika 5.3.3B je hidrogram curka I z oznakami, kdaj so bili zajeti vzorci, slika 5.3.3C pa za curek J. Opazne so bistveno različne značilnosti krivulje sprememb izotopske sestave

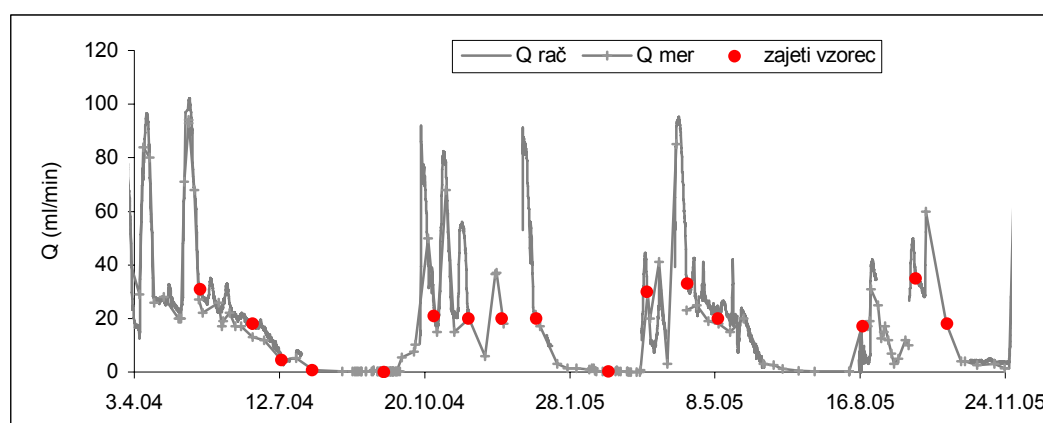


Slika 5.3.3A: Izotopska sestava kisika padavin in curkov I in J.



Slika 5.3.3B: Hidrogram curka I za opazovano obdobje ter čas in pretok, ko so bili zajeti vzorci.

curkov I in J (slika 5.3.3A) opazovalnem obdobju. Izotopska sestava kisika v vodi curka J se v celotnem obdobju razen v nekaj izjemnih primerih giblje nekoliko pod vrednostjo – 9 ‰, kar je praktično identično povprečni izotopski sestavi padavin na območju Postojnske jame. Amplituda izotopskega signala ne presega niti 0,5 ‰, razen v nekaj primerih, kar jasno kaže na izrazito homogenizacijo padavinske vode v tej vodonosni strukturi. Tudi meritve v curku 1 v Planinski jami v letu 1983 so pokazale amplitudo le 0,6 ‰ ob sicer nekoliko bolj pozitivnih vrednostih (Pezdič in sodel., 1984).



Slika 5.3.3C: Hidrogram curka J za opazovano obdobje ter čas in pretok, ko so bili zajeti vzorci.

V primerjavi s curkom J ima curek I povsem drugačne izotopske značilnosti. Amplituda izotopskega signala je večja in presega 4 ‰. Posebej v letu 2005 je v poletnem obdobju prišlo do izrazite obogatitve vode s težjim kisikovim izotopom oziroma do povečanja vrednosti $\delta^{18}\text{O}$. Takšni rezultati kažejo, da se ob posameznih padavinah v curku v mnogo večjem volumskem deležu pojavlja voda zadnjih padavin. Stopnja obnavljanja vode v vodonosni strukturi je torej mnogo večja, kar pomeni tudi bistveno manjšo povprečno starost vode. Tudi meritve pretoka in letne bilance infiltriranih padavin ter iztekle vode skozi curka za hidrološko leto 2003-04 (23.9.03 do 31.8.04) in hidrološko leto 2004-05 (1.9.04 do 12.8.05) so pokazale na velike razlike v teh dveh obdobjih.

V hidrološkem letu 2004-05 se je infiltriralo kar 120 mm manj padavin kot predhodno hidrološko leto. Bilanca iztekle vode skozi curke I, J in L v zaporednih hidroloških letih je pokazala, da je v letu 2004-05 izteklo skozi curke 130 m³ manj

vode kot predhodno hidrološko leto 2003-04 oz. 100 m³, če upoštevamo manjšo efektivno letno infiltracijo, kar je bilo razloženo v poglavju 5.1.2. To pomeni, da se je velik delež padavin shranil oz. porabil za zapolnjevanje zaledja curkov. Tudi zvezne meritve SEP (poglavje 5.2.5) in prenos fluorescentnega sledila skozi curka (poglavje 5.6.3), ki je bilo injicirano na površju, so pokazale drugačne značilnosti kot v predhodnem obdobju. Vse to kaže na spremembe v režimu polnjenja oziroma praznjenja zaledja obeh curkov, kar bo v bodoče potrebno podrobneje pojasniti z dodatnimi raziskavami.

Poleg skromnejših vodnih valov, ko ni prihajalo do intenzivnega iztiskanja vode iz celotnega zaledja curkov, pa je za obdobje od septembra 2004 do avgusta 2005 značilna tudi presušitev curka I in minimalni pretoki curka J v obdobju od januarja do srede marca 2005 zaradi temperatur pod lediščem in debelejše plasti snega, ki je vztrajala do srede marca 2005. Sledilo je taljenje snega in nato manjše padavine z izjemo padavin v začetku aprila, ko se je infiltriralo 100 mm dežja.

V poletnem obdobju leta 2005 (marec - oktober) je znašala povprečna izotopska sestava padavin -7,5 ‰, medtem ko se je izotopska sestava vode v curku I dvignila na -6,8 ‰. Torej je v curku prišlo še do večje obogatitve s težjim kisikovim izotopom ¹⁸O kot v padavinah. Izrazito obogatitev izotopske sestave kisika v curku I si delno razlagamo s separacijo padavinske vode v padavinskem valu: očitno imajo na vodonosno strukturo večji vpliv začetne padavine, ki so običajno bolj obogatene s težjim kisikovim izotopom ¹⁸O in manjši vpliv nadaljnje padavine, v katerih je postopoma vse manj težjega kisikovega izotopa. Pri tem dopuščamo tudi možnost, da je v drugem delu padavinskega vala vodonosna struktura povsem zapolnjena z vodo, tako da ta padavinska voda odteče mimo strukture po drugih poteh. To bi bilo skladno z meritvami pretoka curka, saj sem ugotavljala, da je pretok, ko se približuje vrednosti okoli 4000 ml/min maksimiran, in da v hidrogramu manjkajo vrhovi vodnih valov, iz česar sem sklepala, da prihaja do odtoka vode mimo curka I.

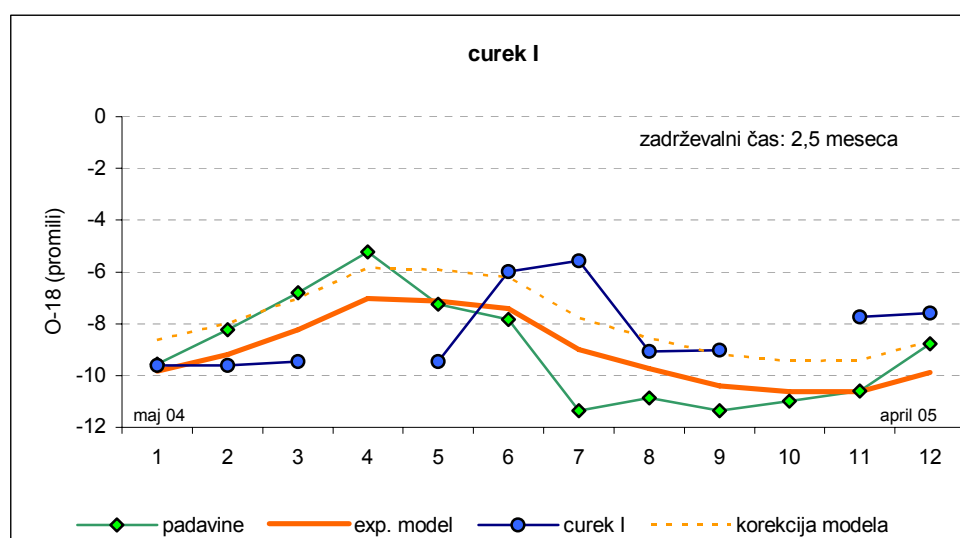
Podoben vodni val v curku I se je oblikoval v začetku aprila 2005. Verjetno pa je tedaj na bolj pozitivne vrednosti vplival tudi staljeni sneg, ki je tri tedne ležal na površju in kjer je ob občasnih manjših otoplitvah prihajalo do sublimacije, taljenja in izhlapevanja ter do bogatitve težjega kisikovega izotopa v snegu, ki se je kasneje

stalil in infiltriral. V prvih dveh manjših vodnih valovih je iztekala skozi curek I stara uskladiščena voda, v aprilskem, največjem vodnem valu pa v upadajočem delu tudi voda staljenega snega z bolj pozitivnimi vrednostmi. Podobno sem sklepala v vodnem valu marca 2004 (poglavje 5.3.2).

Modeliranje zadrževalnega časa prenikajoče vode

Vhodni parameter pri modeliranju zadrževalnega časa baznega toka vode v curkih iz Postojnske jame je bila časovna serija podatkov o izotopski sestavi padavin nad jamo. Modelirani padavinski izotopski signal smo primerjali z izotopsko sestavo iztoka, to je curkov I in J v jami (Kogovšek in Urbanc, 2007).

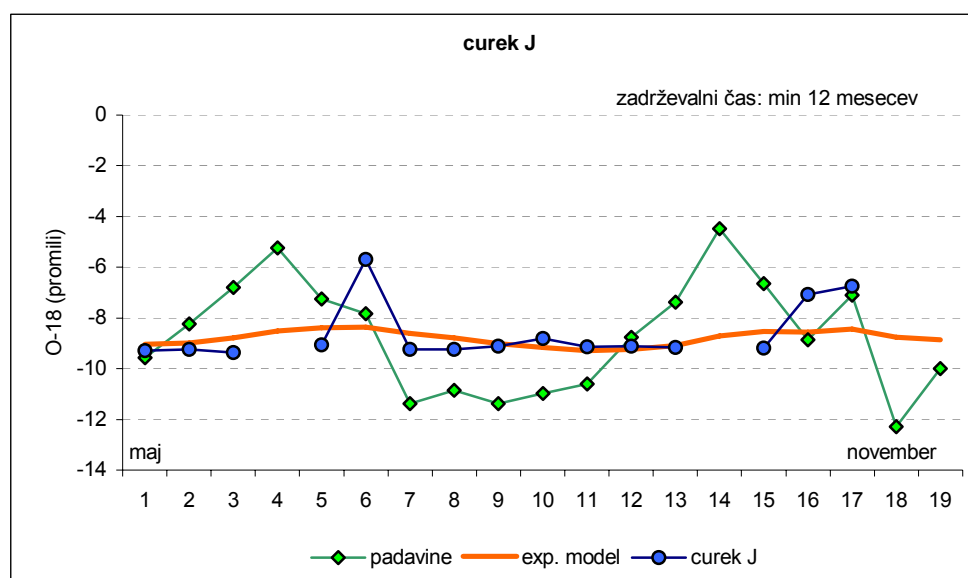
Za modeliranje zadrževalnega časa je bil uporabljen eksponencialni model oziroma model popolnega mešanja (Maloszewski in Zuber, 1982). Pri eksponencialnem modelu privzamemo, da se vhodna voda popolnoma zmeša z vodo v vodonosni strukturi. Vhodni izotopski signal na izhodu iz sistema izteka v obliki eksponencialne krivulje, katere oblika je odvisna od zadrževalnega časa vode v sistemu. Čim daljši je zadrževalni čas, tem počasnejše je upadanje krivulje, ki jo imenujemo tudi porazdelitvena funkcija (angleško »distribution function, weighting function«).



Slika 5.3.4: Eksponencialni model dinamike vode v curku I.

Pri curku I (slika 5.3.4) iz Postojnske jame znaša modelirani zadrževalni čas vode okoli 2,5 meseca. Gre torej za dokaj hitro pretočni sistem, kar se odraža tudi v precejšnjem nihanju izotopske sestave kisika v vodnem curku.

Pri curku J zaradi velikega dušenja oziroma zelo majhne amplitude izotopskega signala le-tega nismo mogli modelirati s primerjavo oblike izhodnega ter modeliranega padavinskega signala, ampak smo iz amplitude izhodnega signala ocenili, da znaša zadrževalni čas podzemne vode v tem curku najmanj 12 mesecev, seveda pa je lahko še občutno daljši (slika 5.3.5). V tem primeru odmikov od homogenizirane krivulje nismo obravnavali kot resnični izotopski signal, ampak jih pripisujemo vplivu direktne padavinske vode, ki se je ob določenih meteoroloških pogojih mešala z vodo baznega toka.



Slika 5.3.5: Eksponencialni model dinamike vode v curku J.

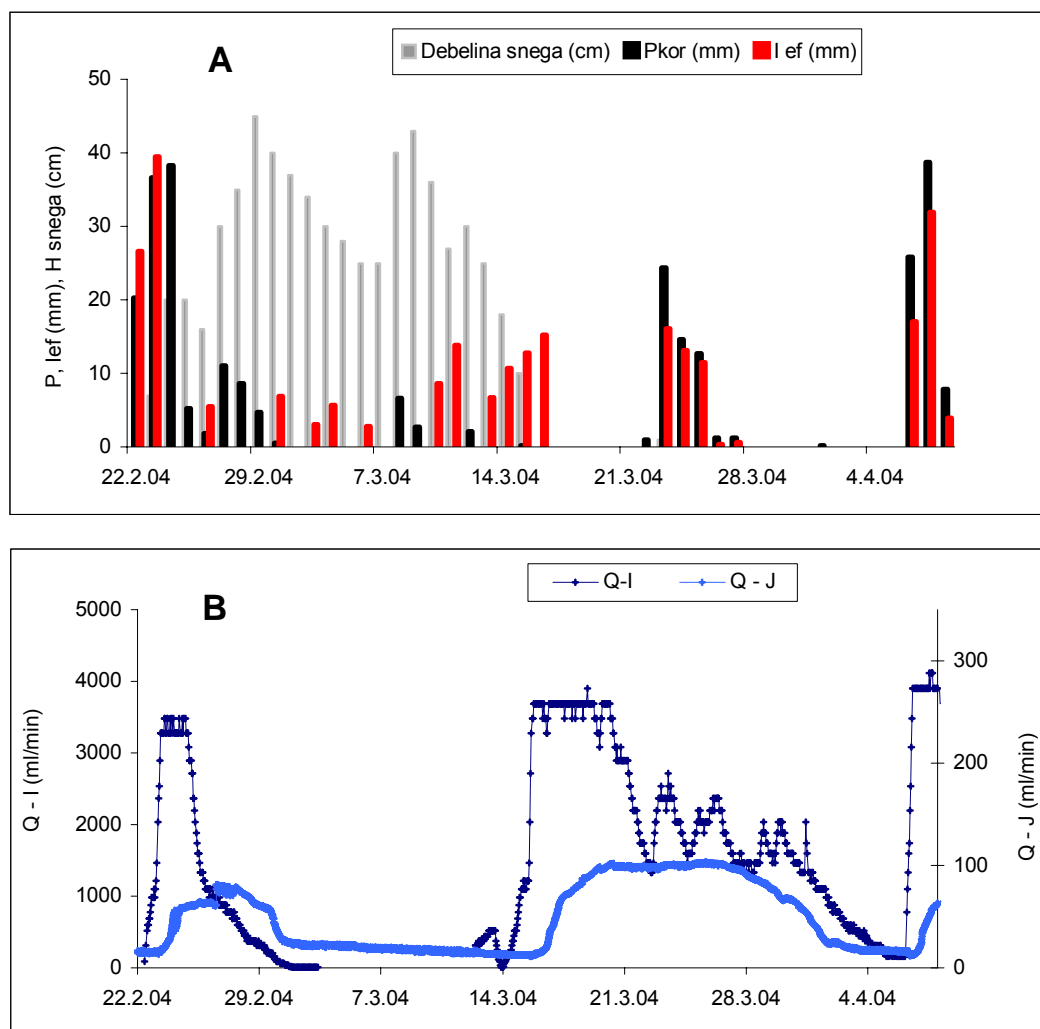
5.3.2 Vodni val marca 2004 po taljenju snega

Podrobneje sem spremljala vodni val marca 2004, ki se je oblikoval po taljenju snega na površju.

Prvi sneg v zimi 2003-2004 je padel 19.1.2004 (30 cm), čez 10 dni pa je zapadlo še dodatnih 12 cm. Ob temperaturah pod lediščem je 25 cm debela plast snega vztrajala

do 1. februarja, nato pa se je v enem tednu ves stalil in oblikoval vodni val v curkih I in J. Nato je sneg padel 19. in 20.2.2004, tako da je bila naslednji dan njegova debelina 18 cm. Vendar pa ga je dež, ki je padel 22. do 23.2.20 04 zjutraj (55 mm) ob temperaturi nad lediščem, skoraj popolnoma stalil, preostala je le še 7 cm plast. Voda se je hitro infiltrirala in curka I in J sta oblikovala značilna vodna vala. Curek I je 3.3.2004 presahnil, curek J pa je bil tedaj v fazi počasnega upadanja proti vrednosti 13 ml/min (slika 5.3.6 A).

Na 7 cm starega snega je od 24. do 29.2.2004 padel svež sneg, tako da je bila 29. februarja debelina snega 45 cm. V naslednjih dveh dneh je padlo še 17 cm snega. V tednu, ki je sledil, ni bilo padavin, sneg pa se je sesedal. Dodatni novi sneg, ki je padel 7. do 9. 3.04 zjutraj, je ponovno obogatil snežno odejo (43 cm). V danih nizkih



Slika 5.3.6 : *A - Debelina snaga na površju, padavine (P_{kor}) in efektivna infiltracija (I_{ef}) ter B – hidrograma curkov I in J v opazovanem obdobju.*

temperaturah je snežna odeja vztrajala na površju do 16. marca (slika 5.3.6 A). Ves ta čas do 11.3.2004 je bila temperatura zraka na površju (meritve ob 7.00, 14.00 in 21.00) večino dni pod lediščem, le občasno se je nekoliko dvignila, tako da sklepam, da v tem obdobju praktično ni bilo učinkovite infiltracije. Relativna vlaga je prek dneva dosegala vrednosti od 52 do 87 %, razen 7. in 8. marca, ko je bila prek 90% in je zapadel nov sneg. Osončenost je trajala že od 2 do 3 ure, večino dni pa je pihal tudi veter s hitrostjo med 2 in 5 m/s (podatki Agencije Republike Slovenije za okolje).

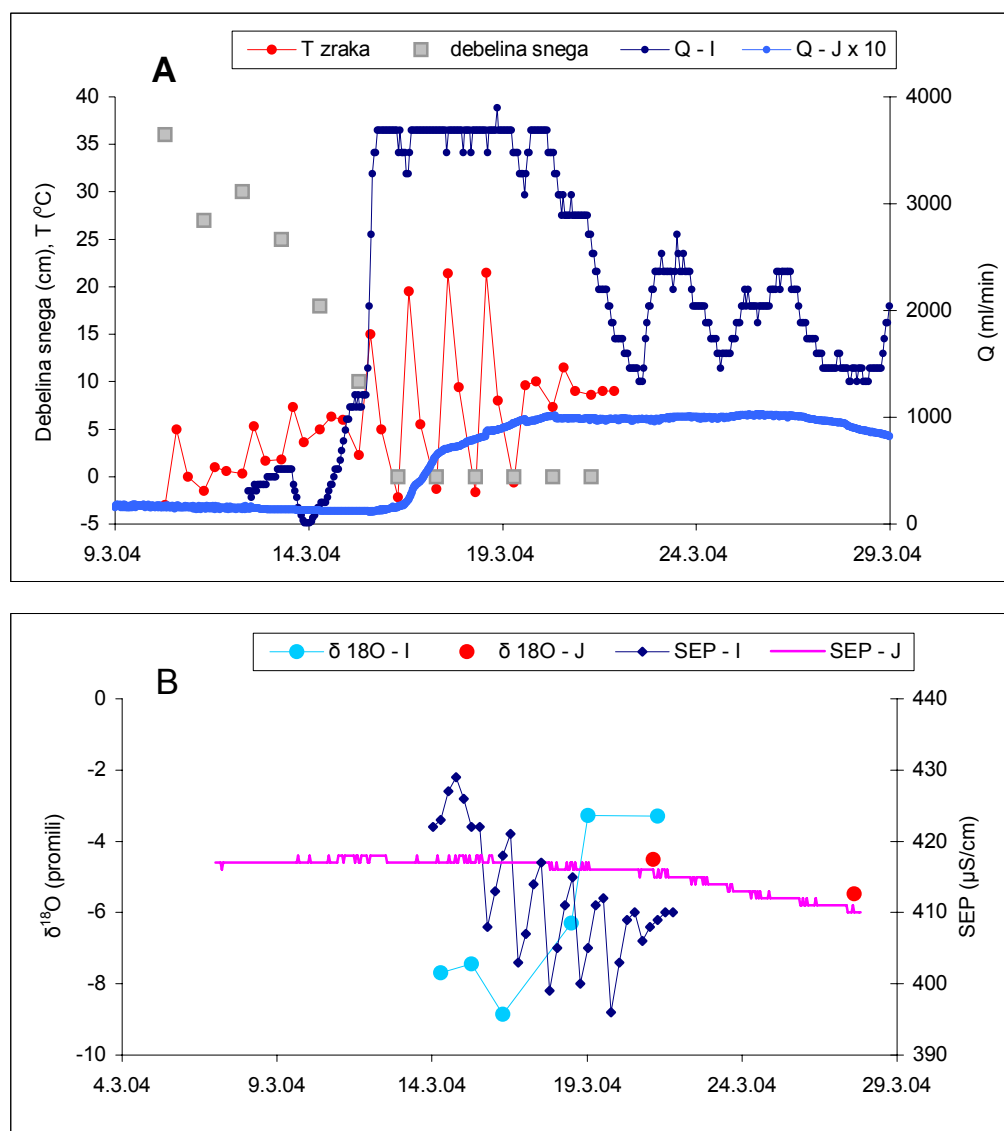
Reakcija curkov I in J v Postojnski jami 100 m pod površjem

Od 12.3.04 dalje, ko je temperatura na površju tudi ponoči ostajala nad lediščem in je debelina snežne odeje od začetnih 30 cm upadala, je skozi curek I, ki je bil prej suh, začela iztekati prva voda, najprej z zelo skromnim pretokom, ki pa je začel 14.3.04 počasi zvezno naraščati. Dne 15. 3.04 se je prek dneva ogrelo kar na 15 °C in stalilo se je še preostalih 10 cm snega. Pretok curka I je začel v takih razmerah hitro naraščati in v 9 urah dosegel maksimalni pretok (slika 5.3.7 A). Sledili so dnevi z maksimalnimi temperaturami prek 20 °C, medtem ko je temperatura v štirih zaporednih nočeh upadla pod 0 °C (do -2,2 °C).

Dnevno nihanje temperature na površju z zmrzovanjem vrhnje plasti prsti ponoči od 16. do 19. marca se je izrazito odrazilo v curku I, ki je v tem času dnevno nihalo. Vrhovi vsakodnevnih vodnih valov zaradi maksimiranega pretoka niso dobro vidni, boljše so vidni upadi pretoka vsak dan okoli 13:00, predvsem pa sočasni porasti SEP (slika 5.3.7 B) ki nakazujejo, da prihaja ob zmrzovanju na površju do zaviranja pretakanja skozi vadozno cono.

Najvišji pretoki sovpadajo z najnižjimi vrednostmi SEP (6-urni interval meritev), to je zvečer okoli 19:00, kar nakazuje 6 do največ 12 urno zakasnitev za najvišjo temperaturo zraka na površju. Nato je SEP postopno naraščala ob sočasnem upadanju pretoka (postopno zmrzovanje površja) do drugega dne ob okoli 13:00, ko je pretok dosegel minimalno vrednost. Tedaj je bil prispevek vode po nekoliko prepustnejših poteh v celotni hierarhiji različno prepustnih prevodnikov minimalen in

še v času, ko je površje zopet odmrznilo, je ta prispevek zopet narasel, kar se je odrazilo v SEP. Ta vzorec se je nato ponavljal 4 dni. Nihanja SEP so bila v intervalu 15 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Zelo podoben potek sem ugotavljala pri prenosu eozina, ki je bil injiciran junija 2002 po prsti na površju in se je spiral s staljenim snegom na površju (slika 5.4.6).



Slika 5.3.7 : *A – Debelina snega in temperatura na površju ter hidrogram curkov I in J ter B – nihanje SEP in izotopske sestave kisika v curkih I in J.*

Sočasne izotopske analize kisika zajetih vzorcev so pokazale, da je skozi curek v začetnem delu vodnega vala iztekala voda z izotopsko sestavo kisika med $-7,7$ in

- 8,9 ‰. Voda, ki je iztekala skozi curek I 16.3.2004 ob maksimalnem pretoku, je imela vrednost – 8,86, kar sem pripisala iztiskanju stare vode iz zaledja curka (slika 5.3.7 B). Opoldne 18.3.04 je dosegala že bolj pozitivno vrednost (- 6,3 ‰), čez nadaljnjih 12 ur pa vrednost – 3,3 ‰. Tudi čez 3 dni je bila ugotovljena enaka vrednost. Te najbolj pozitivne vrednosti pripisujem staljenemu snegu, ki je bil na površju daljši čas.

Kot je bilo že omenjeno, so izotopske analize sveže zapadlega snega (23./24.2. in 26./27.2.2004) pokazale močno negativne vrednosti kisikove izotopske sestave (- 11,64 in -15,38 ‰), vendar sklepam, da se je sestava snega na površju, kjer se je zadrževal daljši čas (do 3 tedne) ob zgoraj že opisanih pogojih, verjetno bistveno spremenila, preden se je stalil in infiltriral v vadozno cono.

Sklepam, da je v danih razmerah prišlo do sesedanja, sublimacije, do skoraj vsakodnevnega delnega taljenja snega in izhlapevanja ter ponovnega zmrzovanja. Staljeni sneg na površini je prodiral v globlje in hladnejše plasti, kjer je zmrzoval. Pri tem se sprošča latentna toplota, ki prispeva k segrevanju plasti snega, kar pospešuje izhlapevanje (Dingman, 1994). Vendar pa se izhlapevanje odraži v ohlajanju preostalega snega, kar ob temperaturah le nekoliko nad 0 °C zavira taljenje snega, ki ostaja tako dalj časa na površju. Po 11. marcu je bila temperatura zraka stalno nad lediščem (tudi ponoči), kar je povzročilo intenzivnejše taljenje snega in izhlapevanje. Debelina snega je s 30 cm hitro upadala in do 16. marca se je ves sneg stalil. Ves ta čas ni bilo dodatnih padavin, prve sledeče padavine v obliki dežja so padle šele 23.3.04.

Stichler in sodelavci (2001) so z meritvami izotopske sestave ledu v tropskih Andih na nadmorski višini 5536 m ugotavljali obogatitev vrhnje plasti (do 10 cm v globino) z vsebnostjo ^{18}O in ^2H podnevi zaradi manjše vlage zraka in relativno visoke temperature vrhnje plasti ledu (0 do -5°C). Nizke nočne temperature pa so preprečevale prehod izotopsko obogatene frakcije v globlje plasti zaradi velike gostote ledu. Prek dneva je prihajalo do obogatitve ^{18}O predvsem zaradi sublimacije ob nizki relativni vlagi in sicer 0,7 ‰ na dan. Ti rezultati so primerljivi z ugotovitvijo Grootesa in sodelavcev (1989), ki so ugotovili na ledeniku Tapado obogatitev za 0,5 ‰ na dan.

V našem primeru je bil sneg na površju do tri tedne ob nihanju temperature okoli ledišča. V danih razmerah nad Postojnsko jamo, je prihajalo do sesedanja in sublimacije ob nizkih ter do delnega taljenja in intenzivnega izhlapevanja ob višjih temperaturah. Sklepam, da so se sublimacija, pogosto delno taljenje snega in kasnejše ponovno zmrzovanje ter spremljajoče izhlapevanje odrazili v $\delta^{18}\text{O}$ oz. v bogatenju težjega izotopa kisika v preostalem snegu, tako da je bil staljeni sneg, ki se z večjim časovnim zamikom infiltriral v vadozno cono, bistveno bolj pozitiven kot sveže zapadli sneg. Analize svežega snega so pokazale, da je imel sneg, ki je padel 23.2.04 (20 cm) izotopsko sestavo kisika $-11,64\text{ ‰}$, sneg, ki je padel 27.2.04 (15 cm) pa $-15,38\text{ ‰}$. Žal ne razpolagam z meritvami starega snega, ki bi pokazale, ali je tako sklepanje pravilno. V kolikor bodo naknadne raziskave to potrdile, se odpira vprašanje napak pri določevanju zadrževalnih časov in starosti vode v primerih, ko je njihov vir tudi star sneg.

Sneg se je najintenzivneje talil 4 dni od 12. do 15. marca 2004, medtem ko je osrednji vodni val curka I, ki ga je povzročila infiltracija staljenega snega, trajal od 14. do 21. marca 2004, kar je 7 dni. To nakazuje sorazmerno majhno dušenje vstopnega signala. Sočasne meritve pretoka manjšega curka J so pokazale, da je reagiral z dvo-dnevnim zamikom za curkom I, vodni val je trajal dva tedna brez opaznih nihanj pretoka. Konec marca (24. in 25.3.) je padlo še 33 mm dežja, ki pa v curku J ni povzročil oblikovanje samostojnih vodnih valov, kot se je to zgodilo pri curku I (slika 5.3.7 B). Dež se je shranil v vadozni coni, prišlo je do mešanja s staro vodo in homogenizacije, tako da se je oblikoval en sam, podaljšan vodni val. Izotopska analiza kisika curka J je 21.3.04 pred dežjem pokazala vrednost $-4,51\text{ ‰}$, čez 6 dni po dežju pa $-5,48\text{ ‰}$. V primerjavi s curkom I so to bolj negativne vrednosti, vendar pa so opazno bolj pozitivne kot je povprečna letna vrednost za ta curek (-9 ‰).

Tudi meritve izotopske sestave kisika v vodnem valu curka v Taborski jami (Urbanc in sodel., 1990) so pokazale na pomembne procese homogenizacije v jamskem stropu, ki vodo močno zadržujejo in homogenizirajo, delno pa prepustijo le večje padavinske vode, ki se mešajo s shranjenimi padavinami v vadozni coni.

5.4 PRENOS SNOVI SKOZI VADOZNO CONO

Na pretakanje vode skozi vadozno cono je vezan tudi prenos topnih, pa tudi netopnih snovi. Od topnih snovi prenaša voda v raztopini predvsem karbonatne, kalcijeve in magnezijeve ione, ki so rezultat raztapljanja karbonatne kamnine. V podzemnih jamah, kjer so bistveno drugačni pogoji, postane v večini primerov prenikla voda prenasichena in prihaja do izločanja kalcijevega karbonata. Voda prenaša tudi razpoložljive topne kontaminante, ki so rezultat onesnaževanja na kraškem površju. Dovolj prepustni prevodniki pa omogočajo tudi prenos majhnih trdnih delcev, posebno ob hitrem naraščanju pretoka z večjo transportno močjo, kar sem ugotavljala na točki I, pa tudi že v raziskavah v obdobju 1977 do 1979 v Planinski jami (Kogovšek in Habič, 1981). Vodne poti ubirajo tudi izlite netopne tekočine (Kogovšek 1995b).

5.4.1 Spremljanje prenosa kontaminantov v obdobju 1988 - 2006

Raziskave prenikanja padavin skozi vadozno cono na območju Kristalnega rova je sprožilo vidno onesnaženje, ki sem ga v osemdesetih letih opazila na točki I v Glavnem rovu neposredno ob vhodu v Kristalni rov, medtem ko so nas jamarji opozorili na črne madeže na bližnji točki J v Kristalnem rovu. Prve občasne analize prenikle vode na širšem območju, s katerimi sem začela v letu 1988, so podale sestavo voda ob nizkih in visokih pretokih kot tudi ob naraščanju in upadanju pretokov. Analize so pokazale visoke vrednosti nitratov, kloridov, sulfatov in o-fosfatov curkov I in J ter kapljanja L (slika 3.3). Opazno manj sta bila onesnažena curka G in H, medtem ko curki izven tega območja (za kasnejše primerjalne meritve sem izbrala le curek A) niso imeli povišanih vrednosti. Večje koncentracije kontaminantov so se odrazile tudi v večjih specifičnih električnih prevodnostih in večjih celokupnih trdotah vode (slika 5.4.1).

Po prenehanju aktivnega onesnaževanja spomladi 1991 sem v času sledečih treh let ugotavljala hitro upadanje koncentracij vseh kontaminantov v curkih I in J ter v kapljanju L zaradi naravnega spiranja s padavinami. V tem obdobju je padlo prek 4700 mm padavin. Sklepam, da je prišlo do intenzivnega prenosa kontaminantov, ko

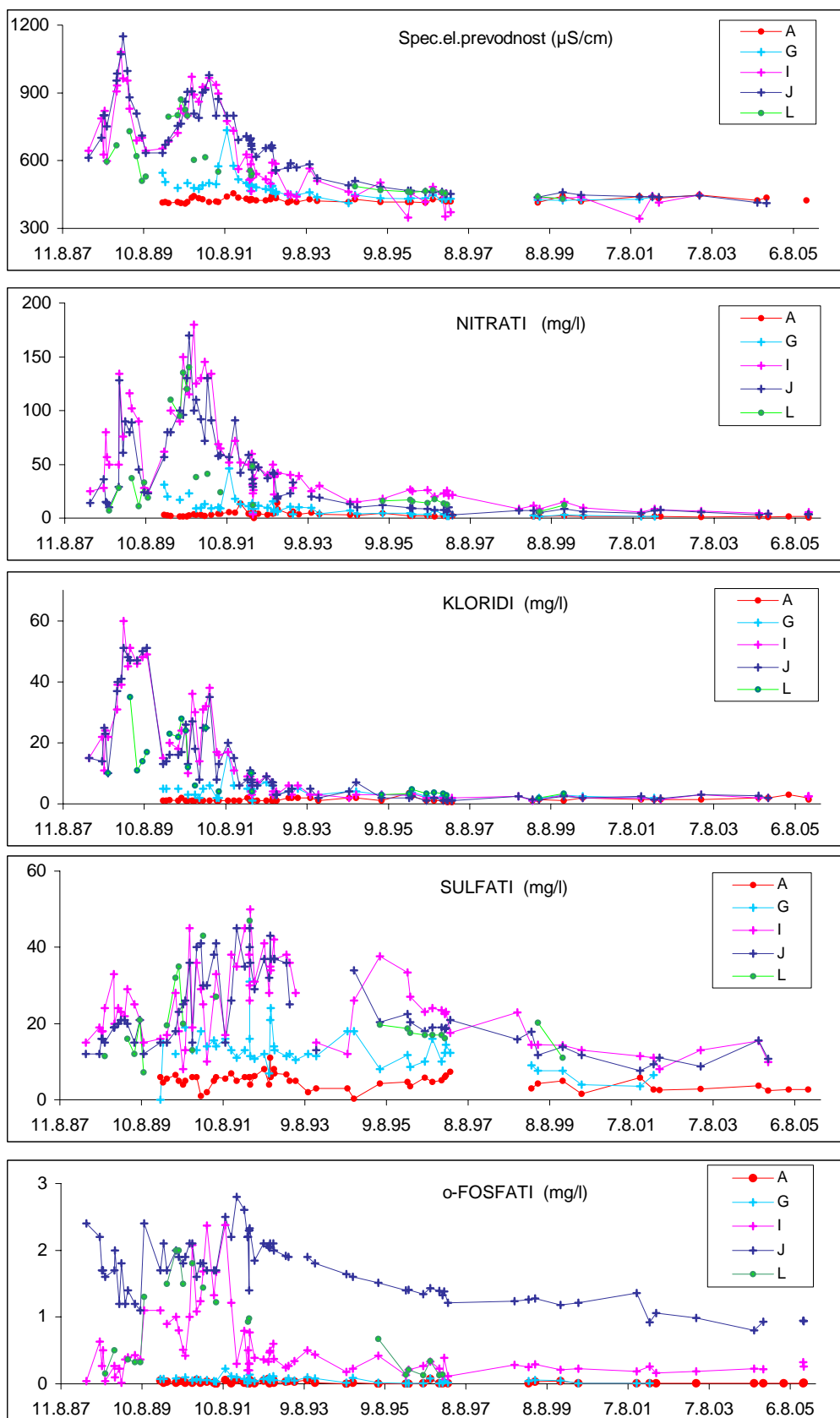
so se v večji meri spirali bolj prepustni prevodniki, tako da se je preostali del kontaminantov zadržal le še v slabo prepustnem delu zaledja. V nadaljnjih letih sem beležila počasnejše upadanje koncentracij in približevanje izhodnim vrednostim oz. vrednostim referenčnega nekontaminiranega curka A.

Curka I in J sta imela zelo podoben potek specifične električne prevodnosti, vsebnosti nitratov in kloridov (slika 5.4.1), tako po vrednostih kot po časovni razporeditvi (Kogovšek, 1997a). Spiranje kloridov je izmed vseh kontaminantov potekalo najhitreje. Po desetih letih spiranja s padavinami (povprečna letna količina padavin v tem obdobju je bila 1557 mm) po prenehanju aktivnega onesnaževanja na površju so vsi kontaminirani curki dosegli vrednost kloridov nekontaminiranega curka A, vrednosti pod 2 mg Cl⁻/l. Ta vrednost odraža naravno ozadje, kar pomeni, da curki niso več onesnaženi s kloridi.

Spiranje nitratov je bilo podobno spiranju kloridov, le da je potekalo nekoliko počasneje oz. še poteka, saj so kontaminirani curki I, J in L v letu 2006 še vedno dosegali nekoliko povišane vrednosti.

Spiranje sulfatov in o-fosfatov je drugačno, v splošnem je počasnejše in po 15 letih še vedno traja, kar kaže na razlike v spiranju posameznih kontaminantov. Koncentracija sulfatov je v času nihala izraziteje kot koncentracije ostalih kontaminantov. Največje koncentracije sulfatov so nastopile z večjim časovnim zamikom za največjimi izmerjenimi koncentracijami ostalih kontaminantov, šele spomladi 1992 (slika 5.4.1). Tudi v nekontaminiranem curku A smo zabeležili nekoliko večja nihanja koncentracije sulfatov v primerjavi z drugimi kontaminanti, vendar pod vrednostjo 8 mg SO₄²⁻/l.

Najpočasneje poteka prenos o-fosfatov, predvsem skozi curek J v primerjavi s curkoma I in L, kar je verjetno predvsem odraz drugačnih značilnosti zaledja, ki pogojuje daljše zadrževanje vode in kontaminantov, ki omogoča različne fizikalne in kemijske procese. Curka I in J po 16 letih spiranja s padavinami tako še vedno dosejata povišane vrednosti o-fosfatov, curek I okoli 0,2 mg PO₄³⁻/l, curek J pa le nekoliko pod 1,0 mg PO₄³⁻/l. To pomeni, da se fosfati v slabo prepustnem delu



Slika 5.4.1: Prenos nitratov, kloridov, sulfatov in o-fosfatov, ki so se odrazili tudi v SEP, skozi onesnažene curke I, J, L in G v Kristalnem rovu ter skozi nekontaminirani curek A v času 17 let.

vadozne cone krasa zadržujejo opazno dlje kot nitrati in kloridi. To spoznanje narekuje nadaljnje raziskave in previdnost pri različnih vnosih fosfatnih snovi v kraško okolje. Prvi korak je bil narejen, ko so iz pralnih sredstev izločili fosfatne spojine.

5.4.2 Podrobno spremljanje kontaminantov v obdobju 2003-2005

Občasno spremljanje prenosa kontaminantov od leta 1988 do 2003 sem dopolnila s podrobnejšimi vzorčenjem v vodnem valu marca 1992. Meritve in analize so pokazale, da prihaja v vodnih valovih po vsakokratnih dovolj intenzivnih padavinah do največjega prenosa kontaminantov: kloridov, nitratov, sulfatov in o-fosfatov. Zato sem v času celotnega hidrološkega leta 2003-04 ter občasno v času vodnih valov še v naslednjih hidroloških letih podrobneje spremljala njihov prenos. Poseben poudarek je bil na spremljanju prenosa v vodnih valovih po izdatnejših padavinah.

Curek I

Podrobnejše vzorčenje curka I prek hidrološkega leta 2003-04 s poudarkom na vodnih valovih ter analize vzorcev na vsebnost nitratov, o-fosfatov, kloridov in sulfatov so pokazale nihanje njihovih koncentracij v odvisnosti od nihanj pretoka curka (slika 5.4.2). Predvsem je razvidno upadanje koncentracij vseh kontaminantov v času vodnih valov, najizraziteje nitratov (slika 5.4.4). To si razlagam z intenzivnejšim dotokom vode v vodnih valovih po prepustnejših prevodnikih, ki ob mešanju z dotokom vode iz slabše prepustnega dela zaledja z višjo vsebnostjo kontaminantov, pomeni razredčevanje. Vendar pa se koncentracija nitratov, ki ob naraščanju pretoka upada, vrne na izhodno vrednost že, ko pretok šele začne upadati. To nakazuje povečan dotok po prepustnejših, spranih prevodnikih v začetnem delu vodnih valov, medtem ko v upadajočem delu zopet prevladuje dotok iz slabše prepustnega dela zaledja z večjo vsebnostjo kontaminantov.

Tudi podrobno spremljanje koncentracije na površju injiciranega sledila v curku I je pokazalo, da se je večina sledila shranila v slabo prepustnem delu zaledja curka.

V letnem poteku prek celega hidrološkega leta 2003-04 nisem zabeležila opaznega trenda upadanja kontaminantov, kot sem to ugotavljala pri curku J. Vendar pa je koncentracija nitratov, ki je jeseni 2003 nihala med 2 in 11 mg NO₃⁻/l, v letu 2005 dosegala vrednosti pod 8 mg NO₃⁻/l, še nižje pa konec maja 2006, kar nakazuje trend upadanja vsebnosti nitratov v curku I.

Sulfati so močnejše nihali in sicer v intervalu 7 - 20 mg SO₄²⁻/l. Do določene mere je v vodnih valovih njihov potek sorazmeren poteku nitratov. Nižje koncentracije (pod 15 mg SO₄²⁻/l) smo podobno kot pri nitratih zabeležili v letu 2005.

Koncentracija o-fosfatov je v hidrološkem letu 2003-04 nihala v intervalu od 0,05 do 0,28 mg PO₄³⁻/l, ko smo minimalne vrednosti beležili v vrhovih večjih vodnih valov, vendar potek ni skladen s potekom nitratov. V upadajočem delu vodnih valov njihova koncentracija počasneje narašča, približno sočasno z upadanjem pretoka. Občasne analize v letih 2005 do 2007 ne izkazujejo bistvenih razlik glede na predhodno leto.

Kloridi so se v letu 2004 pojavljali v enako nizkih koncentracijah kot v curku A. Tako nizke vrednosti smo beležili v curku I že od leta 2001 dalje, kar pomeni, da se je ta kontaminant spral iz širše vadozne cone že do leta 2001.

Curek J

Podobno sočasno vzorčenje curka J v hidrološkem letu 2003-04 in analize vzorcev na iste parametre kot pri curku I so pokazale na bistveno drugačen prenos kontaminantov. Po dolgi poletni suši z najnižjimi pretoki se je konec oktobra 2003 po izdatnem dežju začel oblikovati prvi vodni val. Sočasno z naraščanjem pretoka sta naraščali tudi koncentraciji nitratov in o-fosfatov. Začetno spiranje nitratov in o-fosfatov skozi curek J je bilo zelo podobno (slika 5.4.3). Visoke koncentracije nitratov in o-fosfatov so vztrajale skoraj cel mesec. Šele v sledečem, največjem

vodnem valu v hidrološkem letu 2003-04, je prišlo do upadanja koncentracij nitratov in z določenim časovnim zamikom tudi o-fosfatov. Podoben potek sem beležila tudi pri SEP (poglavje 5.2). Sklepam, da so se padavine infiltrirale v danih pogojih v celotno zaledje curka, tudi v slabo in najslabše prepusten del zaledja in povzročile iztekanje prek poletja shranjene vode z visoko koncentracijo kontaminantov. Šele nadaljnje intenzivne in izdatne padavine pa so povzročile razredčevanje.

Nitrati so se kasneje ob vsakem povečanju pretoka po padavinah nekoliko intenzivneje spirali, vendar v opazno nižjih koncentracijah kot v vodnih valovih v začetku hidrološkega leta. Do pomladi 2004 je koncentracija nitratov stalno postopno upadala do izhodne oz. nekoliko nižje vrednosti. Podobno začetno intenzivnejše spiranje in kasnejše upadanje sem ugotavljala tudi pri o-fosfatih, vendar pa so spomladi 2004 v velikem vodnem valu njihove vrednosti zopet nihale okoli 1,0 mg $\text{PO}_4^{3-}/\text{l}$ ob rahlem trendu naraščanja njihove koncentracije. Tedaj so tudi sulfati dosegali največje vrednosti v hidrološkem letu 2003-04, ki so ob kasnejšem upadanju pretoka ponovno upadli. Njihova koncentracija je ob od novembra 2003 do pomladi 2004 večjih nihanjih naraščala (slika 5.4.3).

Nitrati in o-fosfati so se ponovno intenzivneje spirali v prvem jesenskem vodnem valu oktobra 2004 (začetek hidrološkega leta 2004-05), vendar ne tako izrazito kot v jeseni 2003. Nitrati so porasli le do 6 mg NO_3^-/l , o-fosfati pa do 1,05 mg $\text{PO}_4^{3-}/\text{l}$. V drugi polovici marca 2005, ko so se po daljšem sušnem obdobju zopet začeli oblikovati vodni valovi, ti vodni valovi niso bili tako izdatni kot jeseni 2003, kar pomeni manj intenzivno infiltriranje padavin v slabo prepustni del zaledja in posledično šibkejšo spiranje kontaminantov iz tega dela zaledja v curek.

Če gledamo celotno obdobje od leta 2003 do 2007, je opazen trend počasnega upadanja koncentracije nitratov in še počasnejšega upadanja o-fosfatov. Sulfati so prek hidroloških let močnejše in manj značilno nihali v intervalu od 16 do 6,3 mg $\text{SO}_4^{2-}/\text{l}$, medtem ko so kloridi že v letu 2003 dosegali vrednosti med 1,5 in 2,5 mg Cl^-/l , kar pomeni, da so dosegli vrednost naravnega ozadja in da tudi ta curek ni več onesnažen s kloridi.

5.4.3 Prenos kontaminantov v vodnih valovih

Celoletno spremljanje kontaminantov v curkih je pokazalo, da je njihov prenos skozi vadozno cono neposredno vezan na dinamiko pretakanja infiltriranih padavin skozi vadozno cono, torej na način infiltracije padavin. Do najintenzivnejšega prenosa je prihajalo po daljših sušnih obdobjih v času vodnih valov po intenzivnih in izdatnih padavinah. Za infiltracijo padavin in prenos kontaminantov, ki so bili »shranjeni« v slabo prepustnem delu zaledij curkov, je bila poleg izdatnosti in intenzivnosti padavin pomembna tudi predhodna zapolnjenost njihovega zaledja in namočenost prsti.

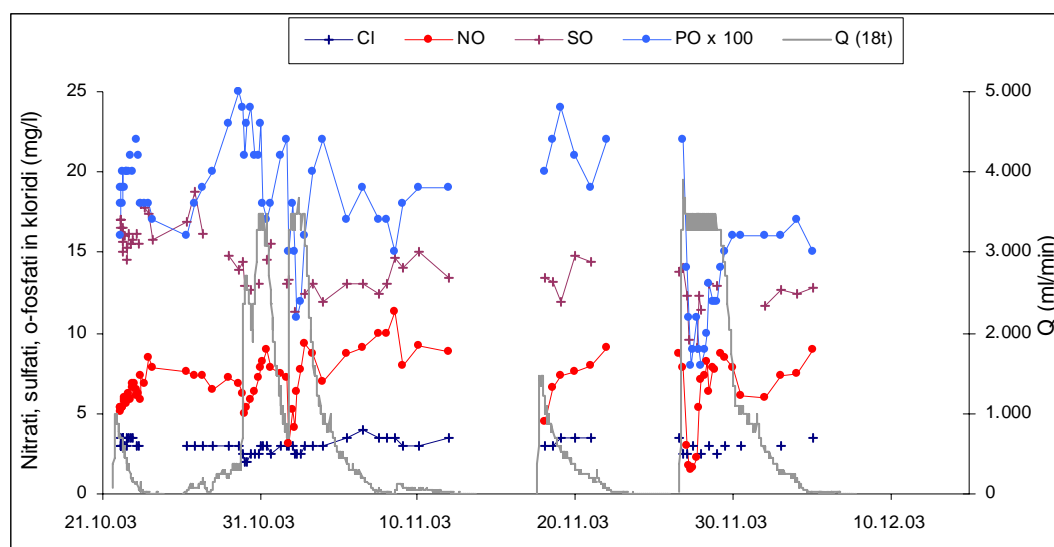
Do najmanjšega prenosa kontaminantov je prihajalo v času minimalnih pretokov curkov, ko infiltrirane padavine pretežno le zapolnjujejo zaledje curkov in ko prihaja le do omejenega prenosa kontaminantov predvsem znotraj epikraške oz. zgornje vadozne cone. Za iztiskanje vode in prenos kontaminantov skozi 100 m debelo vadozno cono so potrebne dovolj izdatne padavine oz. dovolj velika infiltracija padavin ob predhodni ustrezni zapolnjenosti vadozne cone z vodo in ob dobri namočenosti prsti. Posebne razmere nastopajo po dolgotrajnejših sušah tako v poletnih kot v zimskih obdobjih, ko je prst osušena, zaledje curkov pa dokaj spraznjeno, kar je pokazalo podrobno spremljanje vodnih valov v takih razmerah.

5.4.3.1 Vodni val konec oktobra 2003 - curek I

V dvojnem vodnem valu, ki se je začel konec oktobra 2003 po dolgi poletno-jesenski suši, se je pričel prenos o-fosfatov skozi curek I že ob prvem manjšem naraščanju pretoka, medtem ko pri nitratih še ni prišlo do bistvenih sprememb (slika 5.4.4). Šele ob sledečem hitrem naraščanju pretoka in oblikovanju velikega vodnega vala je prišlo do značilnega upadanja nitratov in o-fosfatov, ko je prevladal učinek razredčevanja z dotokom vode po prepustnejših in že spranih prevodnikih nad učinkom iztiskanja shranjene vode iz slabo prepustnega dela zaledja.

Vendar pa se je koncentracija nitratov v vodnem valu z izhodne vrednosti 7,5 mg NO₃⁻/l hitro vrnila na izhodno stanje oz. celo na nekoliko višjo vrednost (okoli 9

mg NO₃⁻/l), ko je pretok šele začel upadati. V zaporednih vodnih valovih je vsebnost nitratov v vrhovih vodnih valov postopno vse bolj upadala, v prvem do 5, v drugem do 3 in v tretjem do 1,5 mg/l nitratov. To odraža postopno spiranje zaledja in ustrezne, vse večje razredčevalne učinke.



Slika 5.4.4: Curek I - prenos kloridov, nitratov, sulfatov in o-fosfatov ob nihanjih pretoka v prvih vodnih valovih po daljšem sušnem obdobju.

Podobno so v zaporednih vodnih valovih upadali tudi o-fosfati. Z izhodne vrednosti 0,25 mg/l so v prvem vodnem valu upadli na 0,17 v drugem na 0,11 in tretjem na 0,08 mg PO₄³⁻/l. Tudi to pripisujem vse večjemu učinku razredčevanja, saj so bili vodni valovi, ki so si sledili, vse bolj izdatni. V primerjavi z nitraty, ki so se vrnili na izhodno vrednost, ko je pretok v vodnem valu šele začel upadati, so o-fosfati zaostajali za cel dan oz. so naraščali sočasno z upadanjem pretoka. To obnašanje o-fosfatov je podobno tako pri curku I in J in je značilno za ta kontaminant.

V času naraščanja in upadanja pretoka v kasnejših vodnih valovih je pri curku I vsakokrat opazen izrazit upad vsebnosti nitratov. Minimalno vrednost dosežejo, ko se pretok šele približuje ali pa ko doseže maksimalno vrednost. Na izhodno vrednost pa se vrnejo že, ko pretok šele pričinja upadati. Tudi o-fosfati v vodnih valovih podobno upadajo. Ob prvem naraščanju pretoka se običajno nekoliko povečajo, nato pa v vrhu valov dosežejo minimalne vrednosti, a nekoliko kasneje kot nitraty.

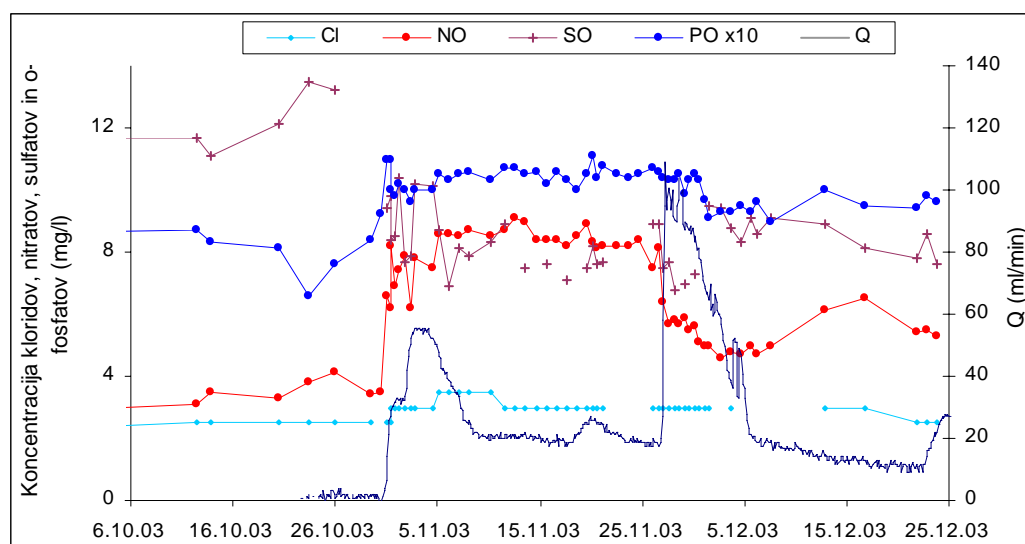
Ta prenos nitratov, pa tudi o-fosfatov skozi curek I v vodnih valovih dokaj dobro sovпада s potekom SEP (slika 5.2.3) in v veliki meri tudi s spiranjem sledila, ki je bilo injicirano junija 2002 po prsti in rastju na površju. To nakazuje, da se začetnemu iztekanju vode iz slabo prepustnega dela zaledja curka pridruži večji dotok vode po prepustnejših, že spranih prevodnikih, kar se odrazi v razredčevalnem učinku. To intenzivno iztekanje vode iz širše hierarhije prevodnikov aktivira nadaljnje iztekanje iz manj prepustnega dela zaledja, ko izostane dotok po najprepustnejših prevodnikih. To se odrazi v naraščanju nitratov, SEP ter koncentracije sledila, ko pretok šele začenja upadati.

Tudi sulfati nakazujejo upadanje koncentracije v vodnih valovih, vendar manj izrazito in ob večjih nihanjih; upadi kloridov pa so komaj zaznavni, saj so bili tisti, ki so izvirali iz onesnaževanja na površju že sprani, minimalna nihanja pa pripisujem nihanju naravnemu ozadja. Dogajanje v prvih vodnih valovih po daljšem sušnem obdobju se razlikuje od dogajanja v vodnih valovih, ki si sledijo v namočenem obdobju.

5.4.3.2 Vodni val konec oktobra 2003 - curek J

V curku J je po daljših sušnih obdobjih prepoznavno intenzivno daljše spiranje kontaminantov z izdatnimi padavinami. Po dolgi poletni suši z najnižjimi pretoki so se konec oktobra 2003 po izdatnem dežju začeli oblikovati prvi vodni valovi. V prvem vodnem valu sta se sočasno z naraščanjem pretoka povečali tudi koncentraciji nitratov s 3,5 na 9 mg NO_3^-/l in o-fosfatov z 0,7 na 1,1 mg $\text{PO}_4^{3-}/\text{l}$ (slika 5.4.5). Te visoke koncentracije nitratov in o-fosfatov so vztrajale skoraj cel mesec. V tem času je prvi vodni val že upadel, pretok pa je vztrajal na vrednosti nekoliko nad 20 ml/min dobra dva tedna. Šele ko je sledeči veliki vodni val, ki je bil največji v hidrološkem letu 2003-04, dosegel maksimalni pretok, je začela koncentracija nitratov upadati. Podobno so se spirali o-fosfati, le da je njihova koncentracija začela naraščati že ob prvem minimalnem naraščanju pretoka, upadati pa je začela kar 4 dni kasneje kot nitrati, šele ko je pretok v upadanju dosegal vrednost okoli 90 ml/min (slika 5.4.5). Tudi pri tem curku je potek nitratov skoraj enak poteku SEP, kot tudi poteku spiranja sledila, ki je bilo injicirano junija 2002.

Skleпам, da je ob infiltraciji padavin iztekala skozi curek J najprej voda, ki se je prek poletja po vsakih padavinah shranjevala v vadozni coni, ko je imel curek v obdobju šestih mesecev minimalen pretok. V tem obdobju je namreč padlo 470 mm padavin, 210 mm pa se jih je infiltriralo. Ta voda je zapolnjevala zaledje curka vse do izdatnih



Slika 5.4.5: Curek J: prenos kloridov, nitratov, sulfatov in o-fosfatov v odvisnosti od pretoka v prvih vodnih valovih po daljšem sušnem obdobju.

in intenzivnih padavin konec oktobra 2003, ki so sprožile oblikovanje prvih vodnih valov. Take ugodne razmere v zaledju curka J ter izdatne in intenzivne padavine, ki so sledile, so dobro namočile prst in omogočile zapolnjevanje tudi najslabše prepustnega dela zaledja oz. so povzročile njegovo sočasno praznjenje.

Ko v razmerah dobro zapolnjenega zaledja curka sledijo izdatne in intenzivne padavine, prihaja do iztiskanja vode po celotni hierarhiji prevodnikov, tudi skozi najslabše prepustne, ki se aktivirajo le ob takih izjemnih razmerah. Take razmere so nastopile jeseni 2003, ko je visoke koncentracije nitratov in o-fosfatov, pa tudi eozina pogojevalo predhodno dolgo zadrževanje vode v zaledju curka prek poletja. Intenzivne padavine, ki so sledile so omogočile intenziven prenos kontaminantov skozi vadozno cono. Kasneje vse do leta 2008 take razmere nismo več nastopile.

V času 27 dni (slika 5.4.5) od 31.10. do 26.11.03 je ob stalno visokih vrednostih nitratov in o-fosfatov, pa tudi koncentracij eozina in SEP, iztekla skozi curek J kar 1 m³ vode, kar je dobrih 8 % količine vode, ki je iztekla skozi curek J v hidrološkem letu 2003-04. Delež padavin, ki se je prek poletja infiltriral v zaledje curka, pa je bil 2-krat večji. Očitno je velik del te vode ostal shranjen v zaledju oz. se je spiral kasneje ob ustreznih pogojih. Šele v začetku drugega največjega vodnega vala v hidrološkem letu konec novembra, ko je pretok ob naraščanju presešel 110 ml/min, pa je prišlo do »preboja« in mešanja z vodo, ki je pritekala po bolj prepustnih prevodnikih. Zaradi razredčevanja je prišlo do upadanja koncentracij vseh kontaminantov. Vendar so bile najnižje koncentracije nitratov in o-fosfatov ob koncu tega vodnega vala še vedno višje, kot pred začetkom vodnega vala ob nižjem pretoku. Ko je pretok v upadanju dosegel 20 ml/min, so začele koncentracije nitratov in o-fosfatov ponovno počasi naraščati, kar pomeni, da ob takih pogojih ni več vpliva razredčevanja. Dane razmere so pogojevale stalen in zvezen prenos teh kontaminantov.

Značilno spiranje nitratov v prvih vodnih valovih po daljšem sušnem obdobju odstopa od vzorca dogajanja v sledečih vodnih valovih, ki si sledijo zvezno v krajših časovnih intervalih (slika 5.4.3). V času teh vodnih valov je prihajalo do opazno skromnejšega prenosa kontaminantov, saj se je širše zaledje curka doklaj dobro spralo v času prvih vodnih valov. To nakazuje pomemben vpliv načina infiltracije padavin na prenos nitratov, tako po razporeditvi kot količini.

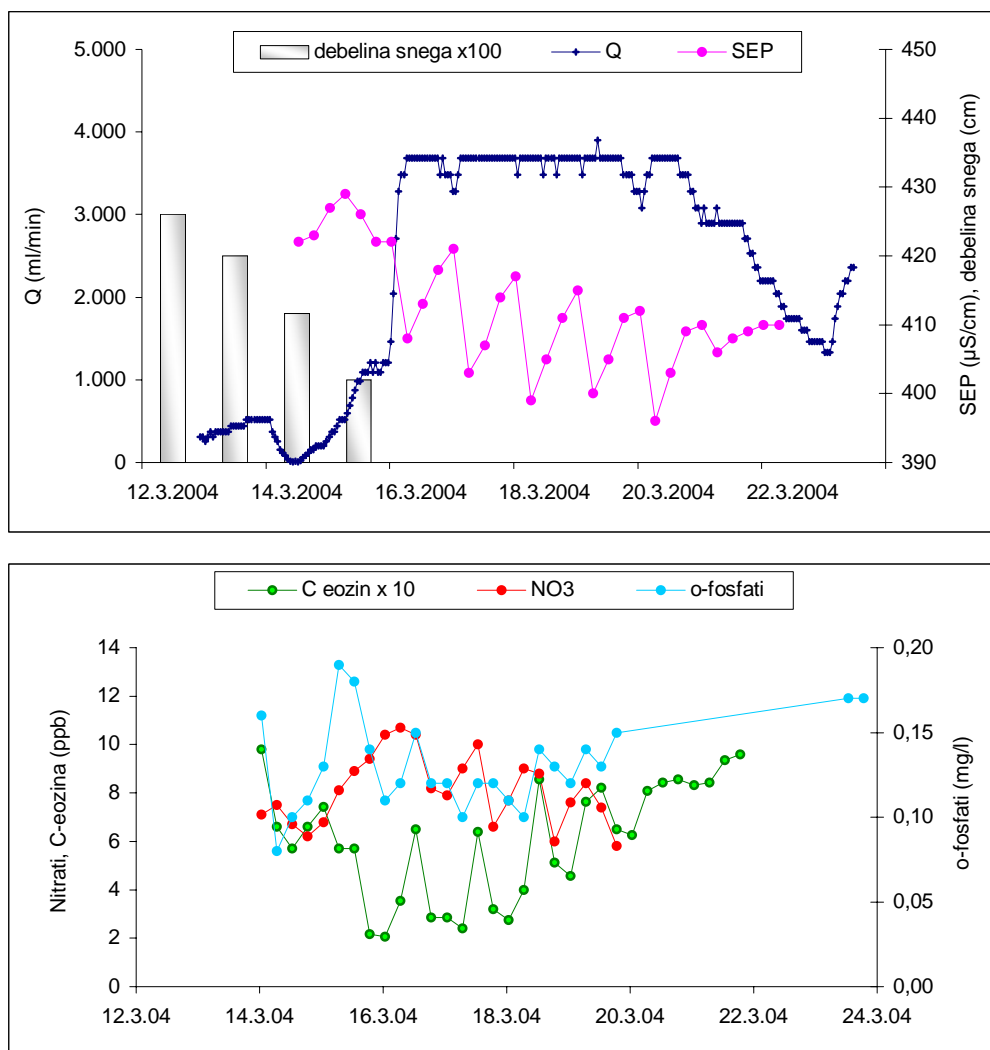
5.4.3.3 Vodni val marca 2004 po taljenju snega - curek I

Tudi v zimskih mesecih pogosto prihaja do krajših ali daljših sušnih obdobj, ko zapadli sneg ob nizkih temperaturah lahko obleži na površju daljši čas, tako da v takih obdobjih ni infiltracije. Ob kasnejših otoplitvah površja prihaja do taljenja snega in do njegove infiltracije ter oblikovanja izdatnih vodnih valov v curkih I in J, kot se je to zgodilo tudi marca 2004. Na 7 cm starega snega je konec februarja 2004 padel svež sneg, tako da je bila njegova debelina 45 cm. V naslednjih dveh dneh je padlo še 17 cm snega, ki se je v naslednjem tednu brez padavin sesedal. Dodatni novi sneg je padel do 9. 3.04 zjutraj, tako da je bila snežna odeja ob temperaturi pretežno

pod 0 °C debela 43 cm. Od 12.3.2004 pa je bila temperatura tudi ponoči nekoliko nad 0 °C in sneg se je počasi talil. V danih razmerah je snežna odeja vztrajala na površju do 15. marca. Razmere na površju so podrobno opisane v poglavju 5.3.

Po 12 dnevni presušitvi curka I, ko je temperatura na površju od 12.3.04 tudi ponoči ostajala nad lediščem, je začela skozi curek iztekati voda, najprej z zelo skromnim pretokom, ki je začel 14.3. počasi zvezno naraščati. Do 15. 3.04, ko se je stalilo še preostalih 10 cm snega, je curek I v 9 urah dosegel maksimalni pretok. Sledili so dnevi z maksimalno temperaturo zraka na površju prek 20 °C, ki pa je v štirih zaporednih nočeh upadla pod 0 °C (do -2,2). Dnevno nihanje temperature na površju z zmrzovanjem ponoči od 16. do 19. marca se je izrazito odrazilo v nihanjih pretoka curka I in tudi v prenosu nitratov. Zabeležene spremembe nakazujejo, da prihaja že ob kratkotrajnem zmrzovanju površja do pomembnih sprememb v pretakanju vode in prenosu kontaminantov skozi vadozno cono.

Vsak dan okoli 13.00 ure je pretok upadel. Hkrati z upadi pretoka sem beležila povečanje vrednosti SEP, ki so bolj vidna, ter sočasna povečanja koncentracije nitratov in delno o-fosfatov ter koncentracije eozina (slika 5.4.6). Meritve in analize so potekale v 6-urnem intervalu. Le prvi dan ob naraščanju pretoka, ko se je talil še zadnji sneg na površju, potek o-fosfatov in nitratov odstopa od vzorca dnevnih nihanj. Skleпам, da je prišlo najprej do potiskanja najdlje uskladiščene vode iz najširše hierarhije prevodnikov po predhodni 10 dnevni presušitvi curka z višjo koncentracijo nitratov in o-fosfatov. Koncentracija o-fosfatov je začela naraščati že ob prvem počasnem naraščanju pretoka, podobno kot v jesenskem vodnem valu (slika 5.4.4), medtem ko je naraščanje koncentracije nitratov nekoliko zaostajalo. Vendar pa je koncentracija o-fosfatov začela upadati že ko je pretok dosegel vrednost okoli 2500 ml/min. Medtem pa je koncentracija nitratov naraščala sočasno s pretokom vse do maksimalnega pretoka. Podobno sočasno naraščanje pretoka in koncentracije nitratov sem ugotavljala že na začetku hidrološkega leta 2003-04 (slika 5.4.5), kot tudi manj izrazito po vsakih padavinah, ki so sledile sušnim obdobjem. V naslednjih treh dneh pa je značilno sočasno dnevno nihanje koncentracije nitratov in SEP, pa tudi koncentracije eozina.



Slika 5.4.6: Curek I – nihanje pretoka in SEP ter prenos nitratov, o-fosfatov in eozina v času vodnega vala, ki ga je oblikoval staljeni sneg.

Nakazuje se 6 urni zamik povečanj pretoka za najvišjimi temperaturami na površju oz. potreben čas, ko se površje zopet odmrzne in omogoči neovirano, intenzivnejše odtekanje vode po tistih nekoliko bolj prepustnih prevodnikih, z vodo sicer dokaj dobro nasičenega zaledja curka. Izračun količinskega prenosa nitratov in eozina na osnovi merjenih koncentracij, pretoka in časa je pokazal, da je njun prenos ob višjem pretoku v danih razmerah celo nekoliko manjši kot v času nižjih pretokov zaradi zamrznitve tal, ko so bile koncentracije kontaminantov večje. Ta manjši prenos je posledica večjega dotoka »sveže« infiltrirane vode iz zgornjega dela vadozne cone predvsem po bolj prepustnih in spranih prevodnikih, kar nakazujejo tudi sočasne nižje vrednosti SEP.

Nitrati po začetnem intenzivnem spiranju ob kasnejših dnevnih nihanjih koncentracije v vodnem valu nakazujejo trend upadanja in postopnega spiranja. Enak potek izkazuje tudi SEP in delno koncentracija eozina. Po 18.3.06 se je spiranje eozina povečalo, ko je začela koncentracija ob nihanjih naraščati in ob koncu tega obsežnega vodnega vala dosegla izhodno vrednost. Naraščanje koncentracije eozina kaže na manjše razredčevanje in na dejstvo, da je eozin prisoten še v veliki količini v prsti in zgornji vadozni coni, saj se je njegovo intenzivnejše spiranje po injiciranju junija 2002 začelo šele konec oktobra 2003.

Primerjava prenosa eozina kot konservativnega sledila in nitratov kaže podoben potek, razlike v začetnem in končnem delu vala pa si delno razlagam s tem, da je bil eozin injiciran na površju, nitrati pa so vstopali v vadozno cono 4 m pod površjem in so po 15 letih spiranja s padavinami prisotni le še v slabo prepustnem delu zaledja curka.

Na primeru tega vodnega vala lahko vidimo, kako že majhne spremembe v sistemu, v opisanem primeru zamrznitev površja za nekaj ur, pomembno vplivajo na pretakanje vode in hkrati na prenos kontaminantov skozi vadozno cono.

Opazen je tudi trend postopnega upadanja SEP v tem vodnem valu, kar si razlagam z začetnim iztiskanjem vode iz najširšega zaledja curka, tudi iz tistega najmanj prepustnega dela, kjer se je voda najdlje zadrževala in jo označujejo velike vrednosti SEP, ter hkrati z napajanjem z novo vodo. Do napajanja in posledično praznjenja tega slabo prepustnega dela zaledja prihaja le ob ekstremnih pogojih, ob dobro namočenem površju in ob dobri zapoljenosti vadozne cone z vodo.

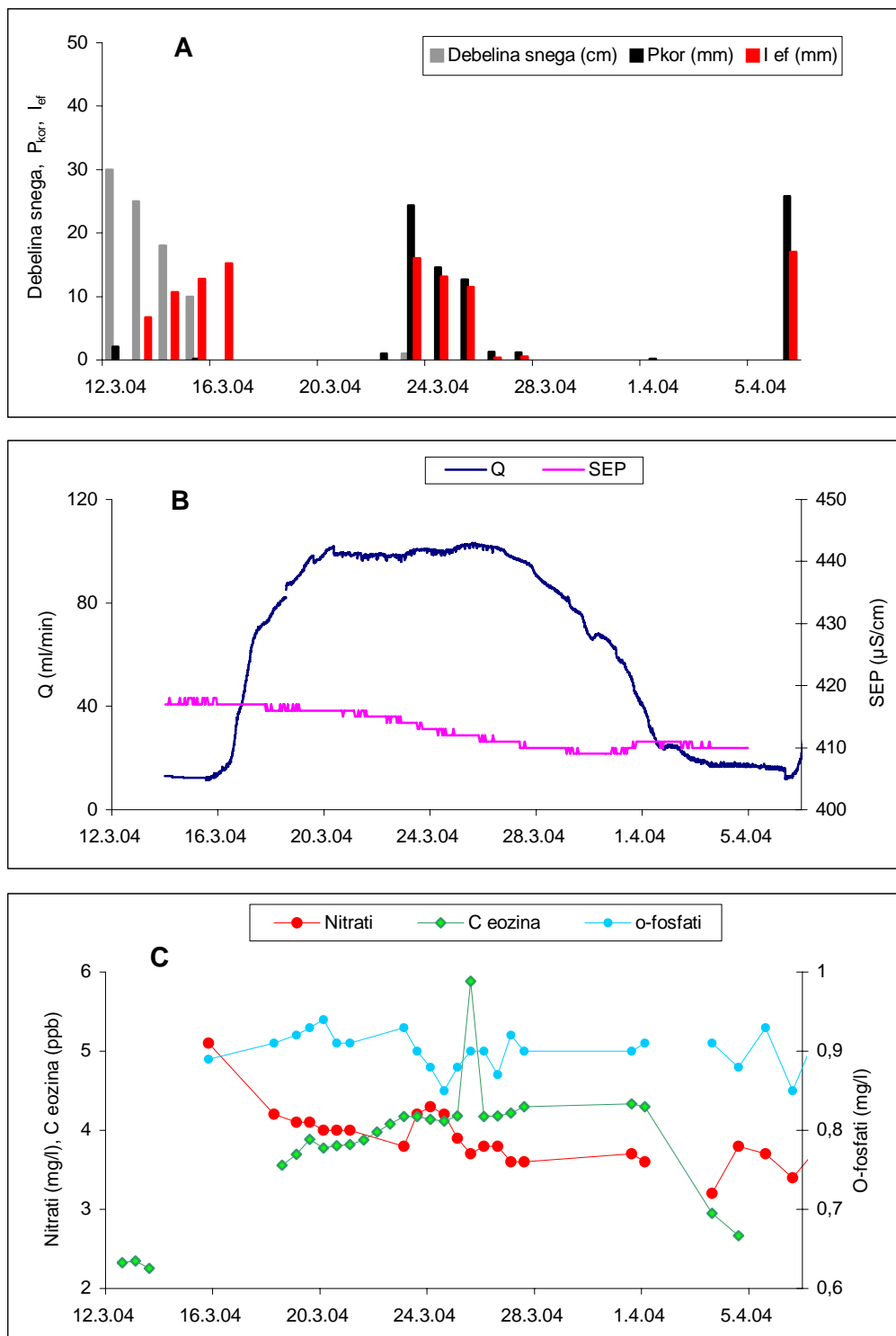
Vzporedne izotopske analize (slika 5.3.7) so pokazale, da so vzorci od 18.3.04 dalje izkazovali vse bolj pozitivne vrednosti izotopske sestave kisika, zaradi česar sem sklepala, da je začela dotekati tudi voda staljenega snega s površja. Nekako sočasno smo zabeležili tudi naraščanje koncentracije eozina, ki se je po injiciranju še vedno zadrževal tudi v prsti, kar je skladno s prejšnjo ugotovitvijo.

5.4.3.4 Vodni val marca 2004 po taljenju snega - curek J

Tudi curek J je reagiral na staljeni sneg, vendar je začel njegov pretok hitreje naraščati en dan za hitrim naraščanjem pretoka curka I. Oblikoval je obsežen vodni val, ki je trajal kar 17 dni brez dnevno-nočnih nihanj pretoka (slika 5.4.7 B). V tem vodnem valu se je odrazilo tudi 51,7 mm dežja, ki je padel od 23. do 25.3.04 in tako tvoril skupen »snežno-deževni« vodni val. Vodni val curka I je trajal le en teden, kasnejši dež pa je oblikoval samostojne manjše vodne valove. Ko je curek J presegel pretok 70 ml/min, je SEP začela počasi upadati s 417 $\mu\text{S}/\text{cm}$ in ob koncu vodnega vala dosegla 410 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (slika 5.4.7 B), medtem ko je bila temperatura ves čas konstantna. Vse to ponovno kaže na dobro homogenizacijo infiltrirane vode v zaledju curka J.

Tudi vzporedno spremljanje vsebnosti nitratov in o-fosfatov ni pokazalo opaznejših sprememb. Koncentracija nitratov je v času vodnega vala minimalno zvezno upadala. Po prvem dežju, ki je sledil od 23. do 25. marca, ko se je infiltriralo 40 mm dežja in je pretok komaj zaznavno porasel, je prišlo do manjšega porasta koncentracije nitratov (slika 5.4.7C). Sočasno je prišlo do manjšega upada koncentracije o-fosfatov, ki je sicer v vodnem valu manj izrazito nihala.

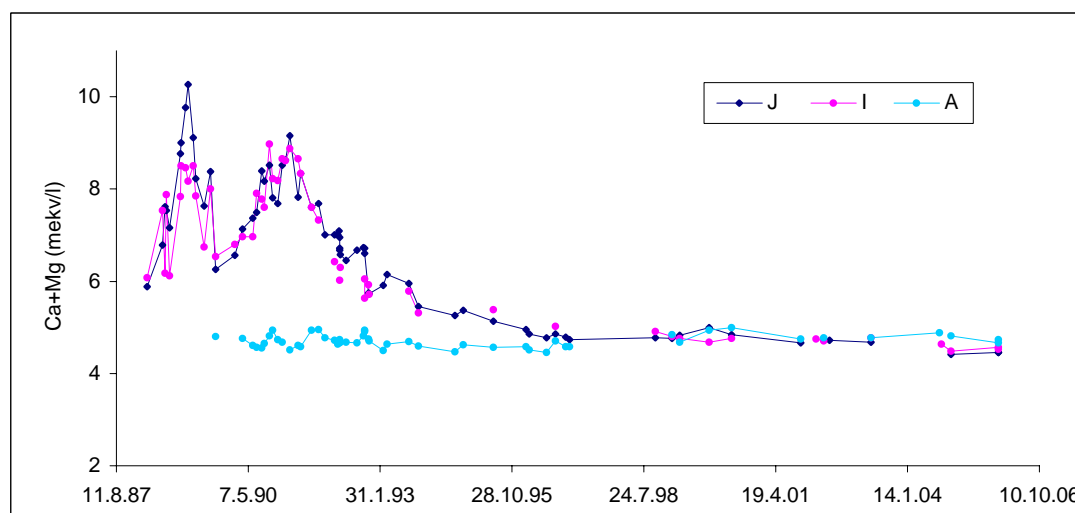
V celotnem vodnem valu sem beležila tudi povišano koncentracijo eozina, ki se je vrnila na izhodno vrednost šele 6. aprila, ko je pretok upadel na 12 ml/min. Izstopa kratkotrajno in izrazito povečanje koncentracije eozina dan po povečanju koncentracije nitratov. Vse to odraža način infiltracije in posledično iztekanje vode iz prsti in vadozne cone. V primeru taljenja snega gre za počasno, zvezno zapolnjevanje zaledja in enakomerno iztekanje iz vadozne cone skozi curke, medtem ko se je ob intenzivnem in izdatnem dežju ob dobri namočenosti prsti aktiviralo tudi iztekanje vode iz najslabše prepustnega dela zaledja z večjo vsebnostjo kontaminantov in injiciranega sledila.



Slika 5.4.7: Curek J – Prenos nitratov in o-fosfatov v vodnem valu, ki se je začel oblikovati po taljenju snega, kasneje pa ga je podaljšal dež, ki je padel 23. do 25.3.2004.

5.5 VPLIV POVEČANIH KONCENTRACIJ KONTAMINANTOV NA PROCES RAZTAPLJANJA APNENCA

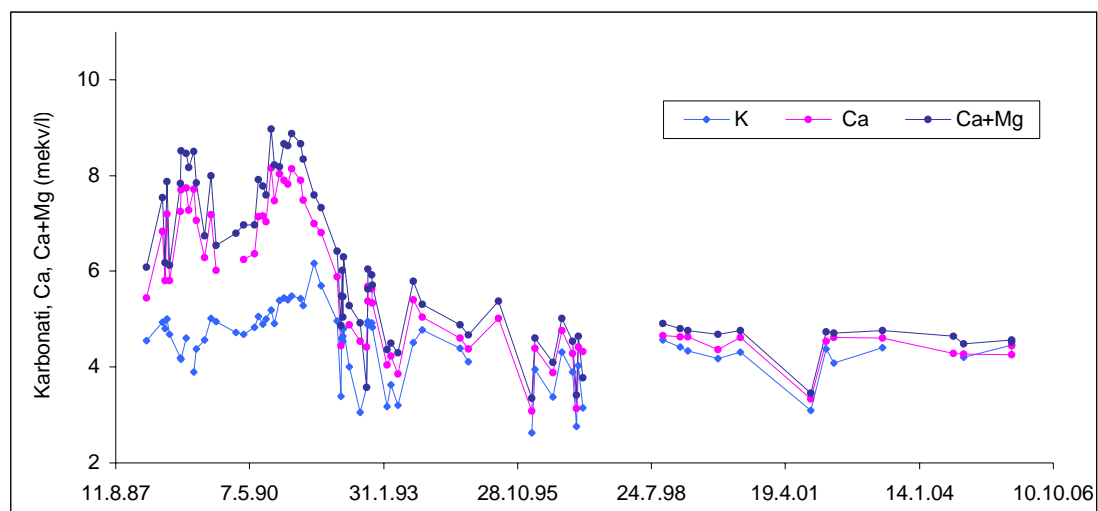
Curka I in J sta imela v opazovanem obdobju od leta 1988 do vključno leta 1996 v primerjavi z referenčnim curkom A ob povečanih vsebnostih kloridov, nitratov, o-fosfatov, sulfatov ter povečanih vrednostih SEP, tudi sočasno povečane vsebnosti kalcija in celokupne trdote (slika 5.5.1). Celokupna trdota curkov I in J je bila do 2-krat višja od celokupne trdote referenčnega, nekontaminiranega curka A oz. od celokupne trdote, ki ju curka I in J dosemeta od leta 1997 dalje, ko beležimo le še minimalno povečane koncentracije kontaminantov (z izjemo o-fosfatov).



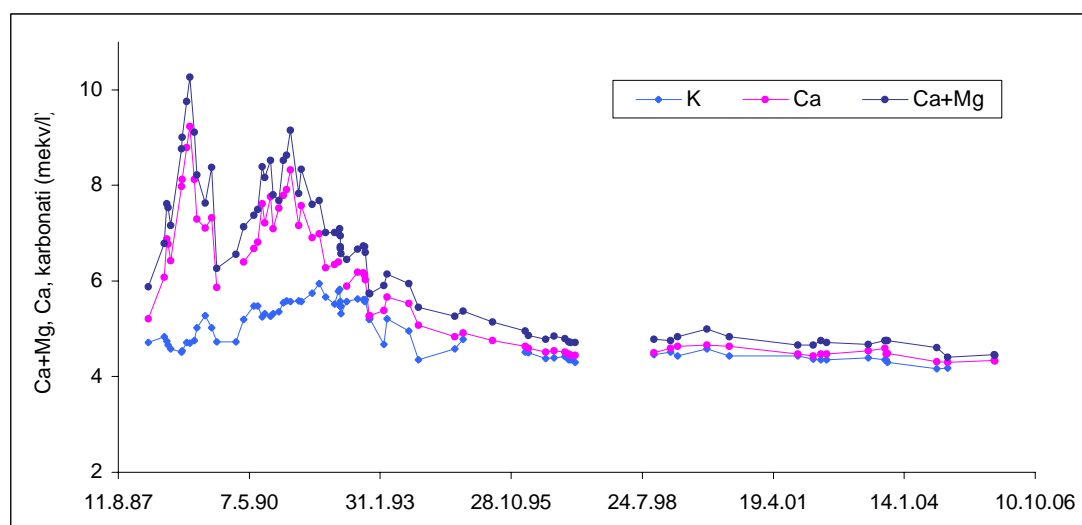
Slika 5.5.1: Potek celokupne trdote (Ca+Mg) v onesnaženih curkih I in J ter v čistem curku A v obdobju 1988-2006.

Izrazito povečano celokupno trdoto (do okoli 10 mekv/l, medtem ko je čisti curek dosegal vrednosti okoli 4,5 mekv/l) sem ugotavljala v okviru občasnih vzorčenj do pomladi 1992 v različnih razmerah, ob najnižjih do visokih pretokih, ko je pretok naraščal oz. ko je upadal. Iz slike 5.5.2 je razviden časovni potek koncentracij karbonatov, kalcija in celokupne trdote (Ca+Mg) za curek I, iz slike 5.5.3 pa za curek J. Potek karbonatne in celokupne trdote ter vsebnosti kalcija je bil pri curkih I in J približno enak. Izstopajo občasne najnižje vrednosti vseh treh parametrov pri curku I ob minimalnih pretokih, ki odražajo izločanje kalcijevega karbonata ob počasnem polzenju po sigovi kopi pred zajemom vzorcev. Ob pogostejšem vzorčenju v času nekaj vodnih valov sem pri curku I ob naraščanju pretoka ugotavljala sočasen upad

vseh treh parametrov. Sklepala sem, da tedaj prihaja po izdatnejših padavinah do pomembnega prispevka sveže, manj mineralizirane vode, kar sem kasneje tudi podrobno spremljala.

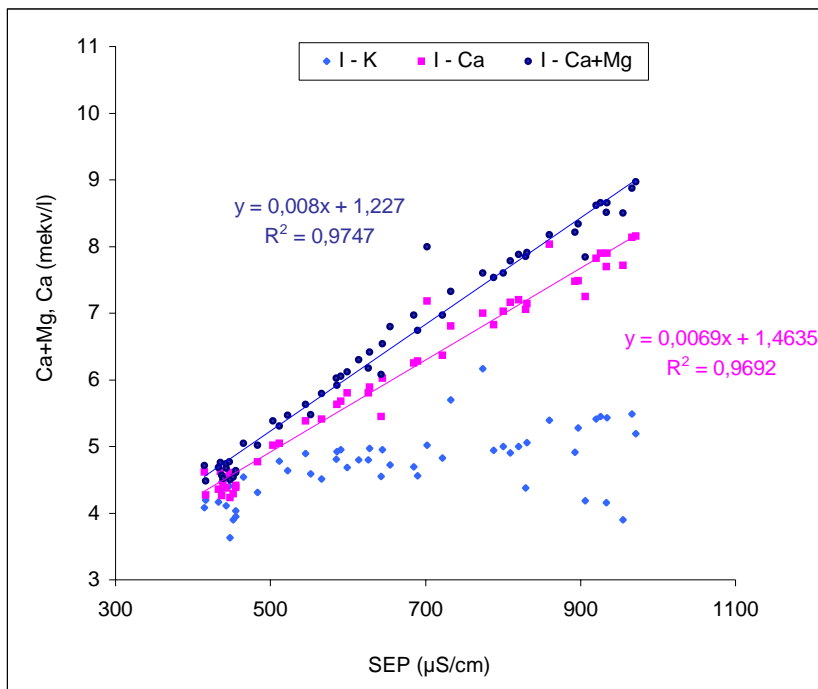


Slika 5.5.2: Curek I – potek karbonatov (K), kalcija (Ca) in celokupne trdote (Ca+Mg) po letu 1988.

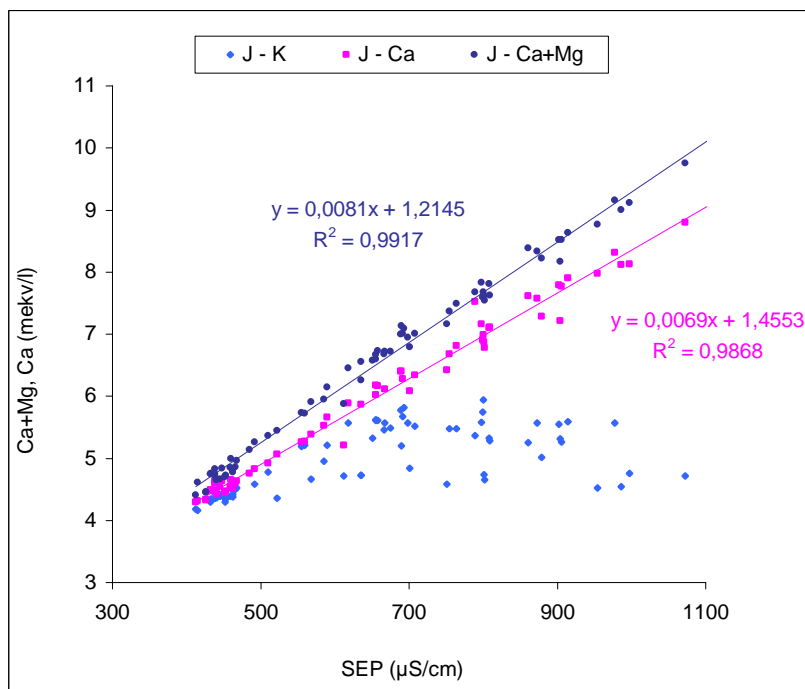


Slika 5.5.3: Curek J – potek karbonatov (K), kalcija (Ca) in celokupne trdote (Ca+Mg) po letu 1988.

Primerjava SEP in trdot je pokazala, da sta celokupna trdota in vsebnost kalcija premo sorazmerni SEP. Slika 5.5.4 prikazuje odvisnost za curek I, slika 5.5.5 pa za curek J. Pri curku I sem izločila vzorce, ki so bili zajeti ob minimalnih pretokih, ko je prihajalo do pomembnega izločanja kalcijevega karbonata ob polzenju vode po sigovi kopi pred zajemom vzorca, ker vzorci niso odražali sestave dotekajoče vode



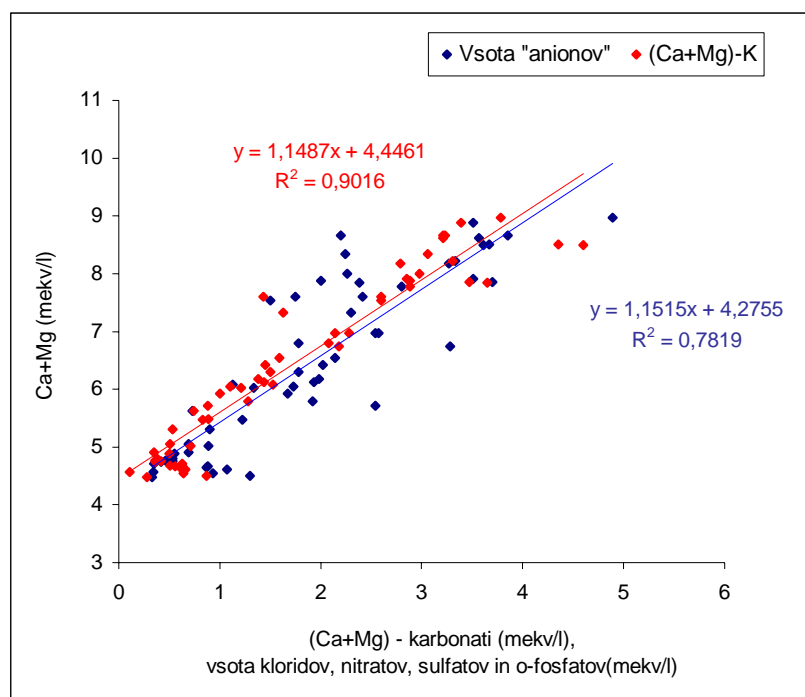
Slika 5.5.4: Odvisnost celokupne trdote (Ca+Mg) in kalcija (Ca) od SEP v curku I.



Slika 5.5.5: Odvisnost celokupne trdote (Ca+Mg) in kalcija (Ca) od SEP v curku J.

vrh kope. Koeficient korelacije celokupne trdote (Ca + Mg) in SEP za curek I je bil tako $R^2 = 0,97$, za curek J pa $R^2 = 0,99$. Iz tega sledi, da je SEP v našem primeru dobro merilo količine raztopljenega apnenca v prenikli vodi.

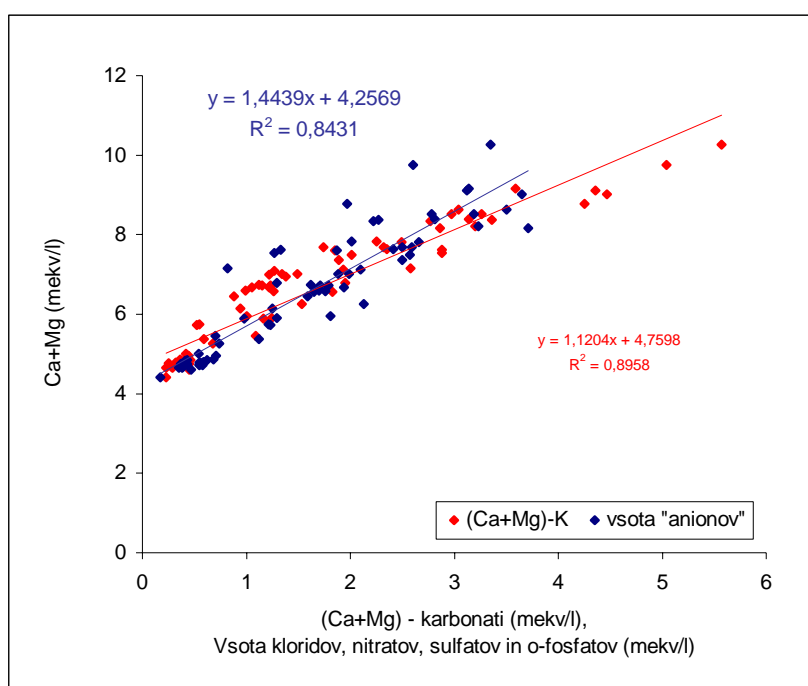
Večjo korozijo oz. večje raztapljanje apnenca v vadozni coni (nad 4,5 mekv/l) sem pripisala prisotnim anionom močnih kislin zaradi onesnaževanja na površju. Tuji ioni v kraških vodah vplivajo na ionsko moč (kloridi, sulfati). V kolikor povečajo ionsko moč se zmanjša topnostni produkt in poveča topnost kalcita (Dreybrodt, 1988; 2000). Količina raztopljenega apnenca, ki ga je voda curkov prinašala v jamo oz. celokupna trdota je bila premo sorazmerna s količino prisotnih anionov kontaminantov (vsota kloridov, nitratov, o-fosfatov in sulfatov), ki smo jih določevali v vzorcih. Slika 5.5.6 prikazuje meritve za curek I, ki kažejo premo sorazmerno odvisnost z $R^2 = 0,78$. Vendar sklepam, da so prisotni še drugi anioni, ki jih naše analize niso zajele in vplivajo na raztapljanje apnenca. Te anione nam okvirno predstavlja razlika celokupne in karbonatne trdote. Celokupna trdota je sorazmerna s količino teh anionov s korelacijo $R^2 = 0,9$.



Slika 5.5.6: Curek I – raztapljanje karbonatne kamnine v vadozni coni je odvisno tudi od količine prisotnih kloridov, nitratov, sulfatov in o-fosfatov (vsota »anionov«), oz. še drugih prisotnih anionov, ki jih nismo določevali in ki jih podaja razlika celokupne in karbonatne trdote ((Ca+Mg)-K).

Ocenjujem tudi, da je v primeru določitve kloridov, nitratov, sulfatov in o-fosfatov oz. vsote teh anionov verjetna večja laboratorijska napaka kot v primeru določevanja celokupne in karbonatne trdote oz. njune razlike.

Enaki odvisnosti za curek J podaja slika 5.5.7; odvisnost celokupne trdote od vsote kontaminantov, ki smo jih določevali (vsota kloridov, nitratov, o-fosfatov in sulfatov) z $R^2 = 0,84$ ter odvisnost celokupne trdote od anionov, ki jih podaja razlika celokupne in karbonatne trdote, s korelacijo $R^2 = 0,9$.

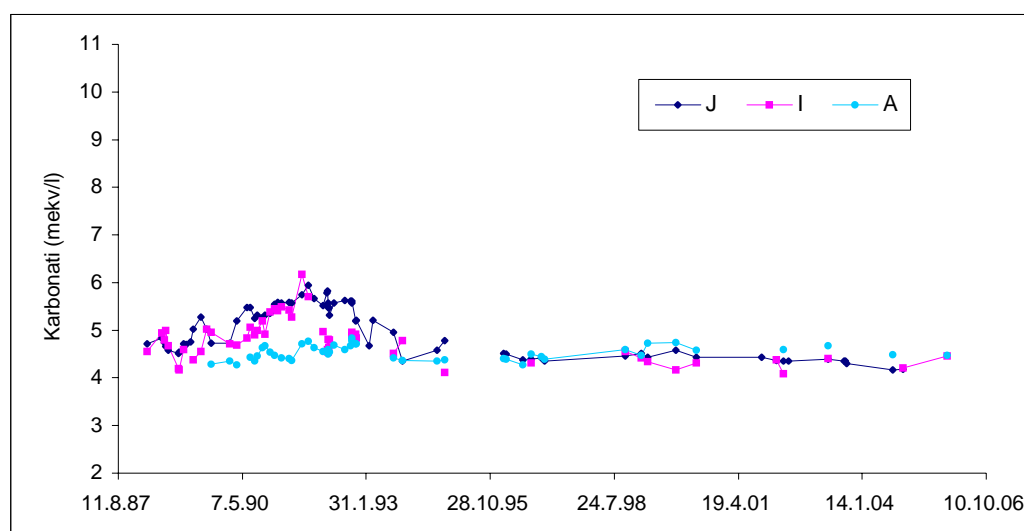


Slika 5.5.7: Curek J – raztapljanje karbonatne kamnine v vadozni coni je odvisno tudi od količine prisotnih kloridov, nitratov, sulfatov in o-fosfatov (vsota »anionov«), oz. še drugih prisotnih anionov, ki jih nismo določevali in ki jih podaja razlika celokupne in karbonatne trdote ((Ca+Mg)-K).

Ob najvišjih vrednostih celokupne trdote (do leta 1992), ko sta curka I in J dosegala do dvakratne vrednosti referenčnega čistega curka A oz. za okoli 4 mekv/l višje vrednosti, je bila vsebnost karbonatov v curkih I in J le do največ 1,2 mekv/l višja kot v čistem referenčnem curku A (slika 5.5.8). To pa predstavlja le do nekako 20% povečanja celokupne trdote (slika 5.5.1). Seveda so tudi v curku A opazna sezonska nihanja trdot, ki pa v primeru karbonatov ne presegajo nekaj desetink mekv/l (slika 5.5.8).

Očitno imajo pri raztapljanju apnenca pomembno vlogo kloridi, nitrati, sulfati in fosfati, saj kot anioni močnih kislin v procesu raztapljanja izpodrivajo karbonatni ion iz apnenca pri čemer se sprošča CO₂. Tako sproščeni CO₂ oz. ogljikova kislina pa je sposobna dodatne korozije, kar se je odrazilo v nekoliko povišani karbonatni trdoti v obdobju visokih vrednosti navedenih kontaminantov.

Ko je konec leta 1996 celokupna trdota curkov J in I upadla na 5 mekv/l, je bilo prisotnih le še manj kot 4 mg Cl⁻/l kloridov, manj kot 20 mg SO₄²⁻/l sulfatov in manj kot 20 mg NO₃⁻/l nitratov, povišani pa so ostajali o-fosfati. O-fosfati so v curku I dosegali vrednosti pod 0,4 mg PO₄³⁻/l, v curku J pa pod 1,4 mg PO₄³⁻/l. Sklepam, da je bilo tedaj raztapljanje zaradi prisotnih kontaminantov majhno, oz. da dodatnega raztapljanja zaradi prisotnih kontaminantov z uporabljenimi metodami nismo več zaznali.



Slika 5.5.8: Karbonatna trdota curkov I, J in A v opazovanem obdobju.

V primeru opisanega manjšega izpusta predhodno sedimentiranih komunalnih odpadnih voda nad Kristalnim rovom je bilo raztapljanje apnenca kar do dvakrat večje, kot je bilo v curkih v neposredni bližini, a izven območja onesnaženja. To pomeni pospešeno širjenje prevodnikov pod izpusti odpadnih voda. Agresivna voda postopno raztaplja kamnino vse globlje v vadozni coni. Po vse bolj prepustnih prevodnikih voda s kontaminanti vse hitreje prodira globlje v vadozno cono ob

minimalnih učinkih raztapljanja, tako da prihaja do pomembnega raztapljanja vse globlje v vadozni coni.

Tako je posledično omogočeno tudi vse hitrejše prodiranje kontaminantov skozi vadozno cono. V končni fazi takega razvoja prepustnih vodnih poti lahko pričakujemo zelo hiter prenos kontaminantov skozi vadozno cono in naprej skozi vodonosnik prav do kraških izvirov z minimalnimi učinki samoočiščevanja. Pri tem so odvisno od hidroloških razmer prisotni le različno veliki razredčevalni učinki. Pretoki kraških izvirov se lahko povečajo tudi do 100-krat in več. Ti lahko tako razredčijo kontaminante, da kemijske analize vode izvirov, kamor odtekajo, pogosto ne pokažejo slabe kakovosti. Le podroben monitoring kakovosti takih izvirov v vodnih valovih ob ne prevelikih razredčitvah lahko pokaže na nihanje kakovosti.

Tako moramo pod izpusti odpadnih komunalnih voda neposredno na kraškem površju, pod kanaliziranimi odtoki s prometnic na krasu (Kogovšek, 1995a, 2007b) ter pod drugimi podobnimi izpusti v kras, kot so tudi najrazličnejša odlagališča odpadkov na krasu, iz katerih padavine spirajo topne kontaminante (Kogovšek, 1996), računati s povečanim raztapljanjem apnenca, in s tem z večanjem prepustnosti vodnih poti, ki omogočajo hitrejši prenos tudi topnih kontaminantov. Ko postanejo te vodne poti dovolj prepustne, pa prihaja tudi do prenosa trdnih delcev, kar smo opazili pri curku I v Kristalnem rovu. Večja prepustnost v zgornji vadozni coni pogojuje hitrejši odtok in intenzivnejše raztapljanje ter večanje prepustnosti vse globlje v vadozni coni.

Na odlagališčih odpadkov na našem krasu, ki obratujejo že okoli 30 let, prihaja tako po vsakem dovolj izdatnem dežju do iztiskanja raztopine kontaminantov v vadozno cono pod odlagališčem, kjer prihaja do povečanega raztapljanja karbonatnih kamnin. Meritve padavin, pretokov izvirov in pojavljanje sledila v izvirov v okviru sledilnih poskusov z odlagališč odpadkov Ribnice, Sežane in Kočevja so pokazale, da so se manjše padavine v sušnih obdobjih infiltrirale le v plasti odpadkov in delno v vadozno cono. V takih razmerah je prišlo le do skromnega nadaljnega prenosa sledila do izvirov, ali pa je tak prenos celo izostal (slike 5.7.3, 5.7.8 in 5.7.13). Zato pa so kasnejše izdatne padavine intenzivneje potisnile shranjeno sledilo v smeri

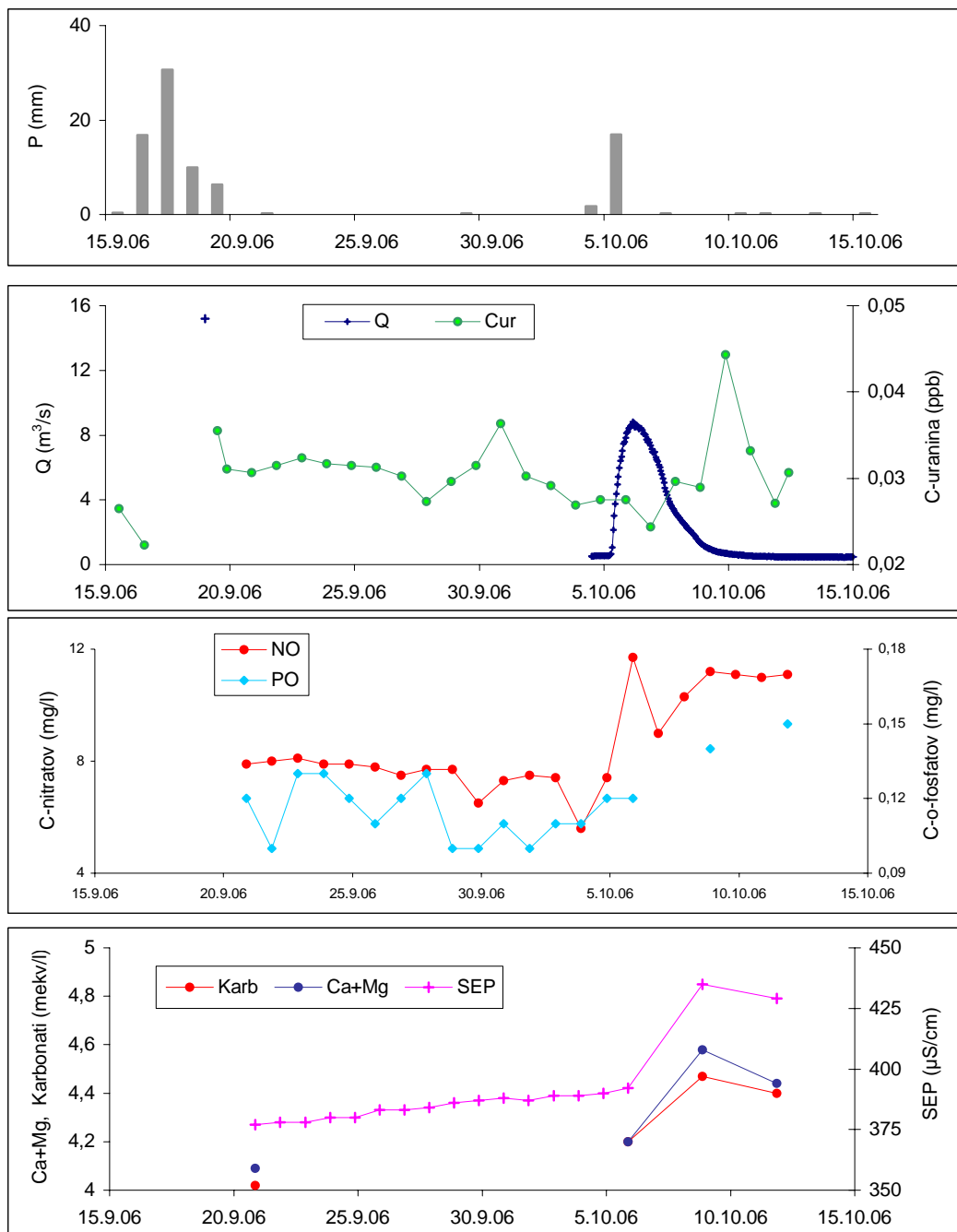
izvirov. Enako padavine potiskajo tudi kontaminante iz odlagališč in vadozne cone pod njimi.

Vzporedne kemijske analize vode Bilpe in Kolpe so pokazale na opazno večje vrednosti SEP, kalcija, karbonatov in celokupne trdote ter večjo vsebnost nitratov, o-fosfatov in kloridov v Bilpi (tabela 5.5.1). Najnižje vrednosti smo določili v Bilpi ob nizkem vodostaju spomladi, 24.4.2007 ter ob nizkem vodostaju 3.10.06 pred začetkom opazovanega vodnega vala (slika 5.5.9). V takih razmerah sem ugotavljala, da je izcejanje kontaminantov iz odlagališča zelo majhno ali pa celo izostane, zato je nadaljnji prenos kontaminantov skozi vadozno cono do izvira minimalen.

Tabela 5.5.1: Osnovne fizikalno-kemijske značilnosti Kolpe in Bilpe ob nižjih vodostajih.

	Q	SEP	Kloridi	Nitrati	O-fosfati	Ca+Mg
	m ³ /s	μS/cm	mg/l			mekv/l
Kolpa 24.4.07 12.00		294	5,5	1,8	0,01	3,15
Kolpa 11.5.07 12.00		300	6,5	3,2	0,02	3,19
Bilpa 24.4.07 12.00	0,46	398	6,5	6,5	0,12	4,25
Bilpa 11.5.07 12.00	0,61	413	7,5	7,3	0,16	4,4

Spremljanje vodnega vala Bilpe v času sledilnega poskusa oktobra 2006 (slika 5.5.9) je pokazalo, da se je pričel prenos kontaminantov že ob prvem naraščanju pretoka do maksimalne vrednosti 8,7 m³/s, to je 5. in 6. oktobra. Vendar pa je tedaj pomemben delež vode prispevala tudi onesnažena Rinža, kar se je odrazilo v upadu koncentracije sledila. Sklepam, da izrazito povečanje koncentracije nitratov (11,7 mg NO₃⁻/l ob pretoku 7,8 m³/s) 5. oktobra ob naraščanju pretoka odraža spiranje struge Rinže, delno pa tudi iztekanje vode s kontaminanti po slabo prepustni mreži prevodnikov v vadozni coni pod odlagališčem, ki je bilo prisotno vse od dežja sredi septembra. To iztekanje je primerljivo s sočasnim prenosom sledila skozi vadozno cono Postojnske jame po slabše prepustnih prevodnikih, kot jih predstavlja curek J, medtem ko izdatnejši curek I tedaj ni bil aktiven.



Slika 5.5.9: Spremljanje prenosa nitratov(NO), o-fosfatov (PO), karbonatov (Karb), celokupne trdote (Ca+Mg) in SEP v vodnem valu Bilpe oktobra 2006, ko je potekal sledilni poskus.

Nadaljnje naraščanje koncentracije nitratov do 11,2 mg NO₃⁻/l in o-fosfatov do 0,15 mg PO₄³⁻/l ter celokupne in karbonatne trdote je bilo sočasno s povečanjem koncentracije sledila v Bilpi. Zato sklepam, da je tedaj prišlo do pomembnega prenosa kontaminantov predvsem iz odlagališča odpadkov in iz vadozne cone pod

njim. Pretok Bilpe je v tem času upadal z vrednosti okoli 4 na 0,5 m³/s. Podobne povečane vrednosti celokupne trdote, SEP in koncentracije o-fosfatov smo zabeležili tudi v izteku manjšega vodnega vala 11.5.2007 ob pretoku 0,6 m³/s.

Pri odkrivanju oz. dokazovanju negativnih vplivov odlagališč je poleg sledenj z umetnimi sledili možnost tudi v podrobnem vzorčenju ne prevelikih vodnih valov izvirov z analizami vzorcev na značilne kontaminante. Tak način vzorčenja izvirov, je smiselni tudi kot monitoring vpliva odlagališč odpadkov na krasu na kraške izvire, za katere je bila s predhodnim sledilnim poskusom ugotovljena povezava z odlagališčem.

Raziskava vpliva odlagališč gradbenih odpadkov na izvire v času 25 let, je v Nemčiji (Hötzl, 1995) pokazala povečano mineralizacijo ter povečane vsebnosti kloridov, nitratov in sulfatov izvirov. Žal niso navedene hidrološke razmere ob zajemih vzorcev. Pri ugotavljanju takih vplivov moramo biti previdni, saj je prenos kontaminantov močno odvisen od vsakokratnih hidroloških razmer. Primerjamo lahko le vrednosti v primerljivih hidroloških razmerah oz. le vrednosti primerljivih vodnih valov.

V okviru raziskav preniklih voda na kitajskem krasu v provinci Yunnan sem ugotavljala v več primerih opazno višje celokupne trdote (nad 6 mekv/l), kot sem jih beležila na slovenskem krasu (Kogovšek, 1998), kar sem pripisovala predvsem večjim korozijskim učinkom na kitajskem krasu ob bistveno drugačnih pogojih, saj vegetacijsko obdobje z visokimi temperaturami sovpada z deževnim obdobjem. Julija 2008 pa sem v preniklih vodah določevala tudi vsebnost nitratov, fosfatov in sulfatov in pokazalo se je, da imajo nekateri vzorci ob visoki celokupni trdoti tudi povišane koncentracije nitratov. Zato sem sklepala, da na večje raztapljanje karbonatne kamnine vpliva tudi onesnaženje na kraškem površju, podobno, kot sem ugotavljala za prenikle vode v Kristalnem rovu. Ugotavljam, da le preiskave, ki vključujejo vse možne vplive, lahko podajo pravo stanje oz. omogočajo pravilne sklepe.

5.6 SLEDILNI POSKUSI S FLUORESCENTNIMI SLEDILI SKOZI VADOZNO CONO

Pri raziskovanju načina pretakanja vode in prenosa v vodi topnih snovi skozi vadozno cono sem uporabila poleg sledenj naravnih sledil tudi sledenja z umetnimi, fluorescentnimi sledili. Izvedla sem več sledenj z različnim načinom injiciranja sledila. Glede na to, kako smo injicirali sledilo, ali neposredno v epikraško cono ali na površju po prsti in vegetaciji, z dodatnim zalivanjem sledila z vodo ali brez, ko smo spiranje prepustili le padavinam, sem pridobila različne informacije o značilnostih pretakanja skozi vadozno cono.

Prvi sledilni poskus z injiciranjem v zgornji vadozni coni 4 m pod površjem in s spiranjem sledila z večjo količino vode nam je podal smeri in način odtekanja vode skozi 100 m debelo vadozno cono do Postojnske jame. Pokazal je na velike razlike odtoka vode z injicirne točke po dobro prepustnih do slabo prepustnih prevodnikih, kar se je odrazilo v različnih hitrostih pretakanja in v različni količini povrnjenega sledila v posameznih točkah oz. curkih v jami. Drugo sledenje z injiciranjem na isti točki, 4 m pod površjem, ko so injicirano sledilo spirale le padavine, ki so sledile, pa nam je podalo dinamiko pretakanja vode v danih naravnih razmerah. Tretje sledenje, ko smo sočasno injicirali eno sledilo po prsti na površju, drugo pa 4 m pod površjem, kot v predhodnih sledenjih, prenos sledila pa prepustili spiranju s padavinami, je pokazalo na način pretakanja v naravnih razmerah, ko prst pomeni pomemben filter za vodo in v vodi raztopljene snovi.

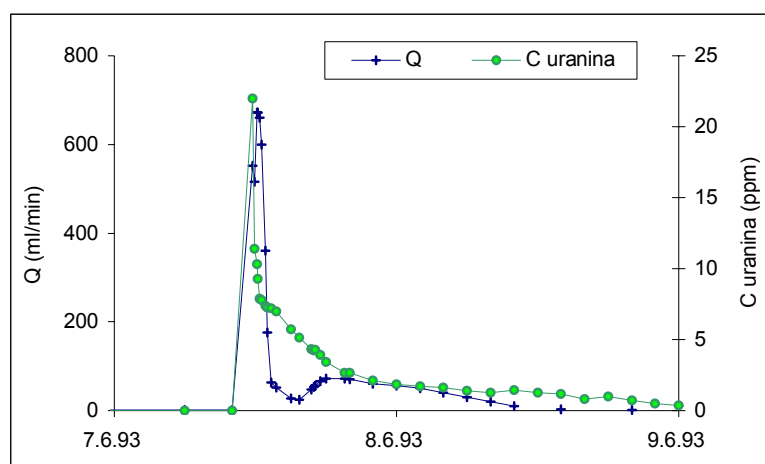
Ker sem želela pridobiti čim bolj izčrpne informacije, sem spremljala pojavljanje sledila tako dolgo, dokler se ni dokončno spralo pod mejo določljivosti. V sledilnih poskusih skozi vadozno cono se namreč oblikujejo številni sledilni valovi, saj se spiranje sledila poveča po vsakih dovolj izdatnih padavinah. V sušnih obdobjih je prenos sledila minimalen, ali pa celo izostane, do ponovnega prenosa pa prihaja v deževnih obdobjih. Tako je prvi sledilni poskus trajal 3,5 leta, drugi skoraj 1 leto, zadnji z injiciranjem po prsti pa poteka že 6 let.

5.6.1 Sledilni poskus z zalivanjem

Po izredno skromnih padavinah od januarja do konca maja 1993, je 4 dni pred injiciranjem, v času prebujajoče se vegetacije, padlo 30 mm dežja. Zaledje curka I je bilo očitno slabo zapolnjeno z vodo, del dežja pa je porabila tudi vegetacija, saj je curek tudi po tem dežju ostal suh. Šele ko smo ob injiciranju raztopine 60 g uranina injicirali še 6 m³ vode, ki je sprala sledilo, se je 75 minut po končanem vlivanju pojavila v curku I voda z uraninom (slika 5.6.1). Oblikoval se je manjši vodni val, ki je trajal le 24 ur, saj je curek nato ponovno presahnil. Minimalne količine vode s sledilom so kasneje pritekale le skozi kapljanja na kopo curka I (Kogovšek, 1997a).

Kasnejše podrobne meritve pretoka curka I so pokazale, da smo z meritvami pretoka ob dnu kope pred letom 2003 zajeli le približno polovičen pretok curka I (ocena), ki doteka vrh kope. V 24 urah, kolikor časa je bil aktiven, je skozi curek I (če upoštevamo oceno pretoka) priteklo 230 litrov vode, to je le slabe 4 % injicirane vode, ki je skozi curek prinesla 1,3 g oz. 2,2 % injicirane količine uranina. To pomeni, da se je skoraj 5,8 m³ (oz. 97 %) injicirane vode in skoraj 98 % injiciranega uranina shranilo v zelo spraznjenem zaledju curka.

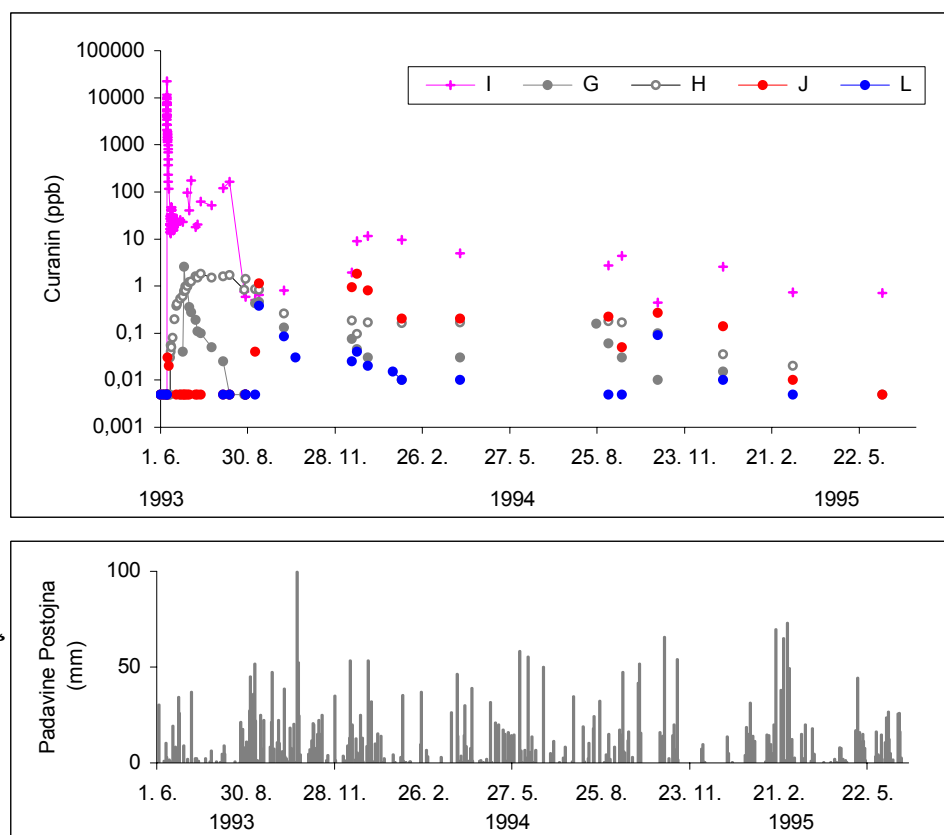
Prva voda, ki je pritekla skozi curek I, je imela največjo koncentracijo sledila, kar 22 ppm, ki pa je v 15 minutah upadla na polovično vrednost, ko je pretok dosegel največjo vrednost. Nato je koncentracija sledila zvezno upadala (slika 5.6.1).



Slika 5.6.1: Sledenje z zalivanjem z vodo: pojav vode in sledila v curku I, ki je bil pred injiciranjem suh.

Očitno je vlita voda le delno razredčila injiciran uranin in del koncentrirane raztopine takoj potisnila po najbolj prepustnem prevodniku v smeri curka I, kar nakazuje velika začetna koncentracija uranina in njegov sočasen pojav s pojavom prve vode v curku. V kolikor bi bila zgradba zaledja takšna, da bi omogočila dobro mešanje in homogenizacijo, bi koncentracija uranina dosegla zgolj 10 ppm (60 g injiciranega uranina smo zalili s 6 m³ vode), v kolikor zanemarimo še razredčevanje z vodo, ki je bila že prej shranjena v jamskem stropu. Izračun povprečne koncentracije sledila v 24 urah na osnovi količine iztekle vode in količine sledila, pa pokaže vrednost 6 ppm. Glede na konec zalivanja z vodo in na prvi pojav sledila je bila navidezna hitrost pretakanja v curek I kar 80 m/h.

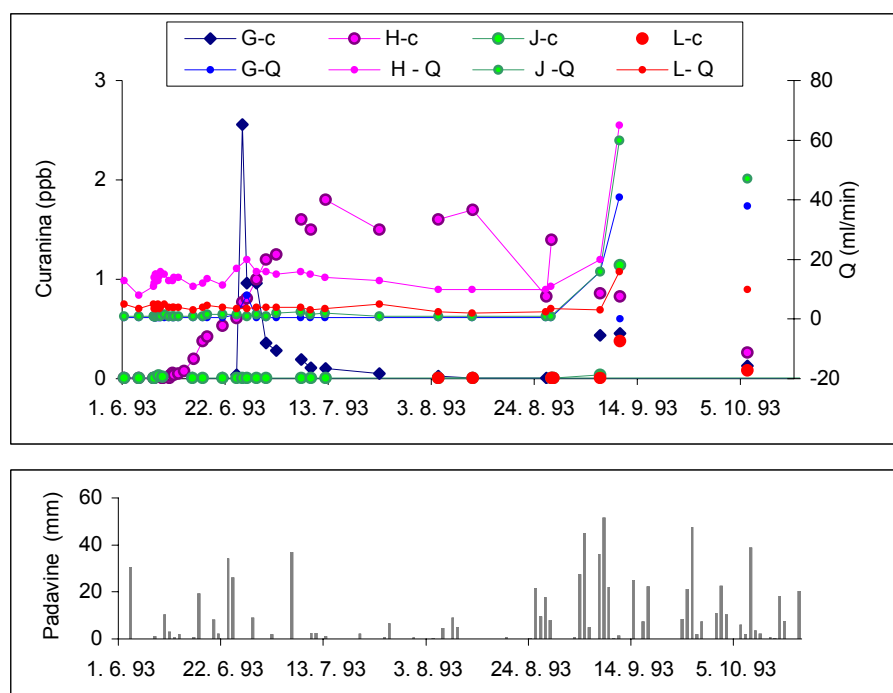
Curek I je kasneje ponovno reagiral, a šele konec junija in v začetku julija po padavinah, ko je padlo najprej prek 100 mm, nato pa še blizu 50 mm dežja. Tedaj je prišlo tudi do intenzivnejšega prenosa sledila. Po ponovni daljši presušitvi, ki je sledila, je dobil ponovno vodo v začetku septembra, ko se je konec avgusta začelo deževje, ki se je ob krajših prekinitvah nadaljevalo do konca oktobra. Konec avgusta



Slika 5.6.2: Pojav injiciranega sledila v curkih **I**, **G**, **H**, **J** in **L** ter padavine v časovnem obdobju dveh let.

in v začetku septembra je prišlo do intenzivnejšega prenosa sledila tudi skozi curka G in H oz. se je začel prvi prenos sledila skozi curka J in L. Prenos sledila skozi curek I smo nato beležili še dve leti po vsakih izdatnejših padavinah (slika 5.6.2).

V curku H se je uranin pojavil že po prvih skromnih padavinah (10 mm), ki so sledile 3 dni po injiciranju. Pri tem je pretok le minimalno zanihal. Padavine konec junija in v začetku julija pa so pogojevale, da se je oblikovala obsežna sledilna krivulja ob manjšem povečanju pretoka. Po padavinah konec avgusta je prišlo do intenzivnega iztiskanja sledila ob močnem naraščanju pretoka, kar je pogojevalo razredčevanje in sočasnega zniževanje koncentracije uranina (slika 5.6.3).



Slika 5.6.3: Pretok in prisotnost sledila v curkih **G**, **H**, **J** in **L** (*G-c*, *H-c*, *J-c* in *L-c*) ter padavine v prvih 4 mesecih po injiciranju.

Curek G je reagiral kasneje kot curek H in sicer z minimalnim povečanjem pretoka šele na padavine konec junija. Tedaj je hitremu naraščanju koncentracije uranina sledilo tudi njeno sorazmerno hitro upadanje do meje določljivosti. Ponoven prenos uranina pa je skozi ta curek nastopil po padavinah septembra (slika 5.6.3).

V curku J tri mesece po injiciranju vse do 6. septembra, ko je v celotnem obdobju padlo 330 mm dežja, nismo beležili niti sprememb pretoka, niti prisotnosti uranina.

Po padavinah pa je začel v začetku septembra naraščati njegov pretok, hkrati pa se je začel tudi prenos uranina (slika 5.6.3). Nekaj dni kasneje, ko je padel še dodaten dež, se je povečal tudi pretok kapljanja L in izmerili smo tudi prvi pojav uranina v tem curku. Meritve in vzorčenje je bilo tedaj le vsakih nekaj dni, tako da je možno, da se je uranin pojavil tako v curku J kot v kapljanju L že dan prej.

Nadaljnji prenos sledila skozi curke je razviden iz slike 5.6.2. Uranin je bil v curkih G, H, J in L prisoten dve leti, ko je padlo skupno 3600 mm padavin. Po dveh letih je v vseh opazovanih curkih padla koncentracija uranina pod mejo določljivosti, razen v curku I, kjer je dosegala vrednost 0,7 ppb. Skozi curek I se je uranin spiral 3,5 let, ko je padlo skupno 6000 mm padavin. To nakazuje, da se je del dokaj koncentrirane raztopine uranina shranil v slabo prepustnem delu zaledja curka I, kjer je izmenjava vode počasnejša.

Že Bakalowicz in sodelavci (1974), Williams (1983), Gunn (1983) in Klimchouk (1995) so ugotavljali, da lahko prihaja v epikraški coni do daljšega zadrževanja infiltriranih padavin in da iztok iz vadozne cone lahko zaostaja za padavinami 2 do 14 tednov. Glede na prvi pojav sledila v posameznih curkih po injiciranju junija 1993 ugotavljam, da gre za celo vrsto curkov, od tistih ki so reagirali zelo hitro pa do tistih, ki so potrebovali kar 14 tednov. Prvi pojav sledila je vezan na pretakanje vode po najprepustnejših prevodnikih v zaledju posameznih curkov. Glede na to, kako dolgo se je sledilo spiralo skozi curke, pa ugotavljam, da se v tistih najslabše prepustnih delih zaledij voda lahko zadržuje še znatno dlje, kar nakazuje zelo kompleksno zgradbo zaledij curkov z obsežno hierarhijo različno prepustnih prevodnikov. V tabeli 5.6.1 so zbrani značilni podatki opazovanih curkov, kjer se je pojavilo sledilo.

Očitno je z vodo slabo zapolnjeno zaledje curkov ob točkovno vliti vodi (6 m^3) s sledilom v vadozni coni, 4 m pod površjem, pogojevalo najprej predvsem zapolnjevanje zaledja in odtok le po najprepustnejšem osrednjem prevodniku v curek I. Šele kasnejše padavine, ki so razpršeno zapolnjevale celotno zaledje curkov pa so pogojevale pretakanje vode po širši mreži razpok in spiranje zaostalega uranina. Za

Tabela 5.6.1: Čas od injiciranja do pojava sledila v curkih, količina padavin, ki je padla v tem obdobju, količine iztekle vode pred pojavom sledila, dominantna hitrost pretakanja ter maksimalna koncentracija sledila v opazovanih curkih.

Curek	I	H	G	J	L	K
Čas do pojava sledila (dnevi)	75 min	3,3	17	92	95	95
Padavine do pojava sledila (mm)	0	14	107	330	440	440
Iztekla voda pred pojavom sledila (l)	0	70	10	160	420	
V _{dominantna} (m/h)	80	0,12	0,23	0,045	0,044	0,044
C _{maksimalna} (ppb)	22000	1,8	2,6	1,8	0,38	0,4

začetek spiranja sledila skozi curek H in G je zadostovala že manjša količina padavin (14 in 93 mm), ki je povečala njun pretok. Te padavine pa niso bile zadostne, da bi vplivale na pretok curka J in kapljanja L, zato je uranin čakal v njunem zaledju prek celega poletja. V tem času je padlo skupno kar 330 mm dežja, vendar je evapotranspiracija zmanjševala količino infiltrirane vode, ki pa se je le shranjevala v zaledju. Šele po prvih izdatnejših padavinah konec avgusta in v začetku septembra (110 mm), ki so vplivale na večja povečanja pretokov vseh curkov, je prišlo tudi do prenosa uranina skozi ta dva curka.

5.6.2 Sledilni poskus v naravno namočenih razmerah

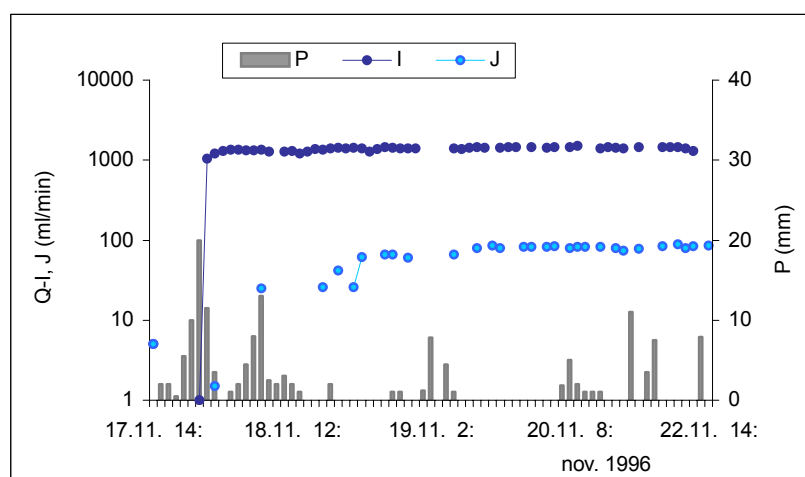
V zgoraj opisanem sledilnem poskusu smo sledilo zalili z večjo količino vode in s tem pospešili pretakanje. Želela pa sem ugotoviti tudi, kako se pretaka voda v naravnih razmerah, ko sledilo spirajo le padavine. Zato smo izvedli sledilni poskus v deževnem obdobju, 17. novembra 1996, ko smo raztopili 15 g uranina v minimalni količini vode in ga injicirali na isti točki kot v sledilnem poskusu z zalivanjem z vodo (na dnu ponikovalnice 4 m pod površjem) ter spiranje prepustili padavinam (Kogovšek, 2000).

Ob injiciranju v sledilnem poskusu 17. novembra 1996 so bili pretoki curkov nizki, a nekoliko večji kot ob injiciranju junija 1993. Vendar sem na osnovi padavin, ki so

padle od septembra 1996 do injiciranja (400 mm) sklepala, da je bilo zaledje curkov boljše zapolnjeno z vodo kot ob sledenju junija 1993.

5.6.2.1 Curek I

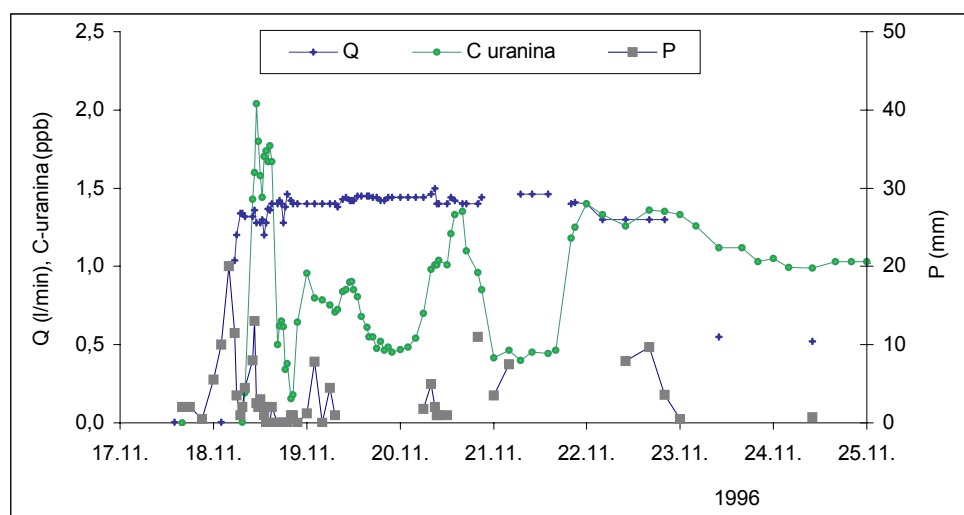
Curek I v času injiciranja ni bil aktiven. Šele 56 mm dežja, ki je padel takoj po injiciranju do 18. novembra ob 7.00, večina v zadnjih 7 urah, je zadostovalo, da je dobil vodo in da je začel njegov pretok hitro naraščati. V času do reakcije pretoka curka I se je tako ob upoštevanju $ETR = 28\%$ (povprečna vrednost treh hidroloških let, kar je razvidno iz tabele 5.1.4) in površine zaledja 255 m^2 (tabela 5.1.3) infiltriralo v zaledje curkov okoli 10 m^3 vode. V naslednjih dneh je padlo še 110 mm dežja. Ob manjših nihanjih je pretok curka I v danih razmerah vztrajal na visokih vrednosti 5 dni (slika 5.6.4). Nato je začel pretok izrazito upadati, konec novembra pa je že dosegal minimalne vrednosti (sliki 5.6.5 in 5.6.6). Očitno ob dobri zapoljenosti zaledja curek hitro odvajala infiltrirane padavine iz vadozne cone po celotni hierarhiji prevodnikov. Ko pa zapoljenost vadozne cone zaradi izostanka padavin pade na neko mejno vrednost, iztok hitro upade, ko izteka voda pretežno le še iz slabo prepustnega dela zaledja.



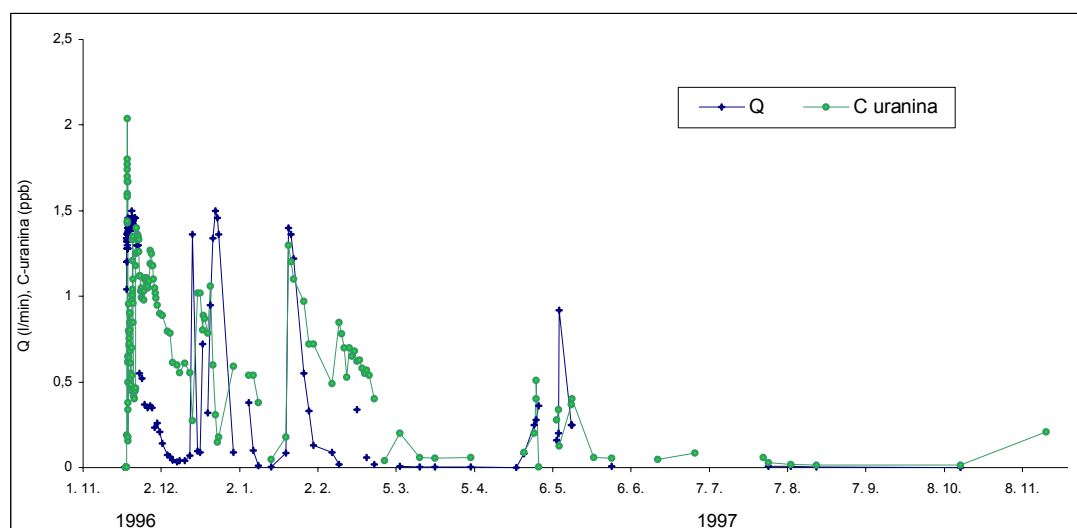
Slika 5.6.4: Reakcija pretoka curkov I in J na padavine novembra 1996, ko je bil injiciran uranin.

Iz slike 5.6.5 je razvidno iztekanje vode s sledilom ob stalno visokem pretoku kar 5 dni. Prve sledi uranina smo določili 4 ure za povečanjem pretoka. Izračun iztekle

količine vode pred pojavom uranina na osnovi meritev pretoka je pokazal 300 l čiste vode. Glede na to, da sem na osnovi kasnejših podrobnih meritev ugotovila, da so tedaj meritve pretoka zajele le del curka, ocenjujem da je bila dejanska količina iztekle vode okoli 800 l. Ta voda je bila shranjena v širšem, manj prepustnem delu zaledja curka I že pred injiciranjem sledila in je po padavinah, ki so dovajale novo vodo s sledilom, prva iztekala skozi curek I.



Slika 5.6.5: Začetni prenos uranina skozi curek I - ob stalno povečanem pretoku je prihajalo do povečanega prenosa po padavinah.



Slika 5.6.6: Dinamika spiranja injiciranega uranina skozi curek I. Po padavinah ob povečanem pretoku je prihajalo do povečanega prenosa sledila. Spiranje sledila je trajalo 20 mesecev.

Dež, ki je padel po injiciranju uranina 18. novembra in sprožil naraščanje pretoka curka I, je prispeval v zaledje curkov okoli 10 m^3 vode, kar predstavlja nekako 0,04 % volumna jamskega stropa v zaledju opazovanih curkov, ob predpostavljeni površini zaledja 255 m^2 . Tam je bila pred tem že shranjena voda v slabo prepustnem delu zaledja. Glede na to in na ugotovitev (poglavje 5.1.2), da se je v hidrološkem letu 2004-05 glede na predhodno hidrološko leto v slabše prepustnem delu zaledja curkov I, J in L shranilo okoli 100 m^3 infiltrirane vode, kaže na to, da najprepustnejši prevodniki začnejo dovajati vodo v curek I, ko je njegovo zaledje zapolnjeno z vodo do določene mere.

Le v sledilnem poskusu junija 1993 je najbolj prepustni prevodnik v curek I kljub slabi zapoljenosti zaledja (curek je bil suh) hitro odvajal injicirano sledilo in vodo, vendar je iztekla skozi curek le minimalna količina vode (4 % injicirane vode), preostala voda pa se je očitno shranila v vadozni coni. To je bila predvsem posledica zalivanja sledila z veliko količino vode (6 m^3) v kratkem času.

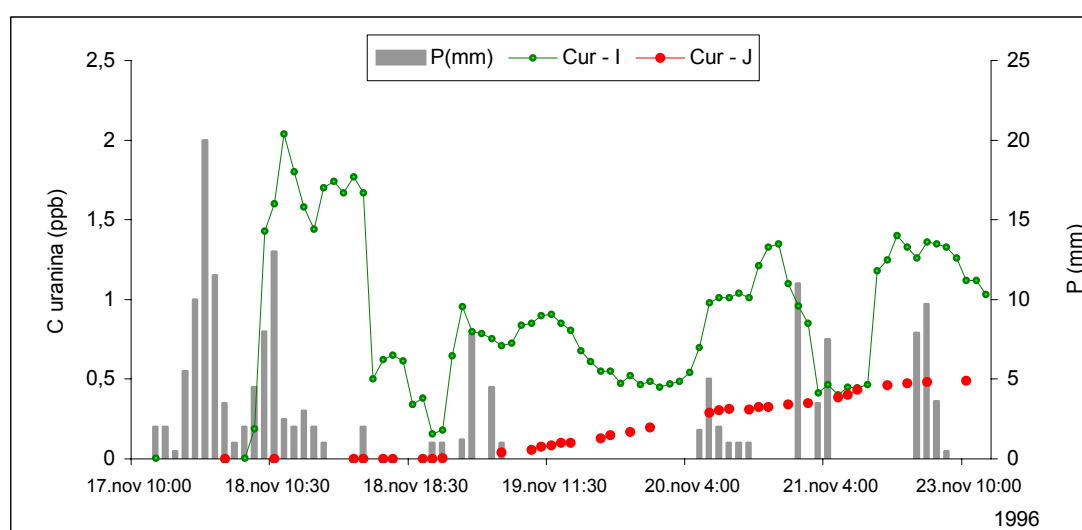
Padavine so najprej potisnile skozi curek I del predhodno shranjene vode brez sledila, nato pa še injicirano sledilo, predvsem po prepustnejših prevodnikih. Kasneje, ko se je dobro namočila prst, pa so vsakokratne nadaljnje padavine potiskale vodo s sledilom skozi celotno hierarhijo prevodnikov, tudi skozi manj prepustni del zaledja, kar se je odrazilo v povečanjih koncentracije sledila v curku po padavinah (sliki 5.6.6 in 5.6.7). Le občasno ob močno povečanem pretoku pa sem ugotavljala razredčevalni učinek, kot posledico sorazmerno večjega dotoka po dobro prepustnih prevodnikih, kjer je sledilo že dokaj sprano.

Sledilni poskus je pokazal, da je bila navidezna hitrost pretakanja v curek I ob sorazmerno dobri predhodni namočenosti tal in po izdatnih padavinah glede na maksimalno koncentracijo v prvem sledilnem valu (v_{dom}) $4,3 \text{ m/h}$ (tabela 5.6.2). V prvem mesecu po injiciranju, ko je padlo 270 mm padavin, je izteklo skozi curek I le 0,2 % injiciranega uranina. Spiranje uranina skozi curek I v zaporednih valovih po vsakokratnih padavinah, ko je koncentracija uranina večkrat upadla pod mejo določljivosti, je trajalo 20 mesecev. V tem obdobju je padlo 2250 mm padavin. Verjetno pa se je uranin v koncentracijah pod mejo določljivosti pojavljal še po padavinah, ki so sledile.

Dolgotrajno, v številnih valovih ponavljajoče spiranje sledila skozi curek I v primeru injiciranja v vadozni coni nakazuje, da vsakokratne padavine potisnejo skozi vadozno cono le del predhodno shranjene vode s sledilom iz slabše prepustnega dela zaledja.

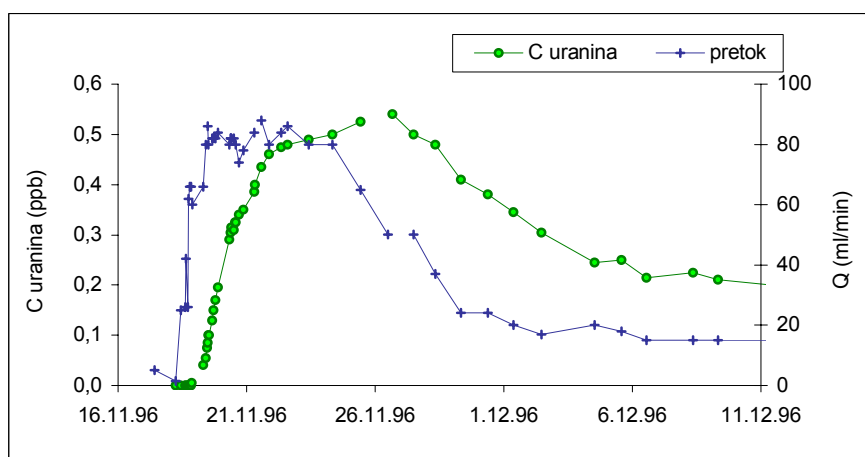
5.6.2.2 Curek J

Pretok curka J je reagiral 6 ur za curkom I, ko je padlo 113 mm dežja, kar pomeni, da se je moralo slabše prepustno zaledje curka J, enako pa tudi slabše prepustni del zaledja curka I, najprej zapolniti z vodo do določene mere, da je lahko prišlo do iztekanja vode iz tega dela zaledja (slika 5.6.4). Infiltracija v slabo prepusten del zaledja je težja, nanjo pa je neposredno vezano iztekanje vode iz vadozne cone. Uranin se je pojavil v curku šele okoli 20 ur po povečanju njegovega pretoka, tako da je pred določitvijo prisotnosti uranina izteklo 60 l čiste vode oz. pred injiciranjem shranjene vode (tabela 5.6.2 in slika 5.6.7). Sklepam, da prihaja po infiltraciji padavin najprej do iztiskanja shranjene vode iz spodnjega dela slabše prepustne vadozne cone, medtem ko je v zgornjem delu vadozne cone potekala homogenizacija, ki rezultira v nižjih koncentracijah uranina v curku J v primerjavi s curkom I (slika 5.6.10).



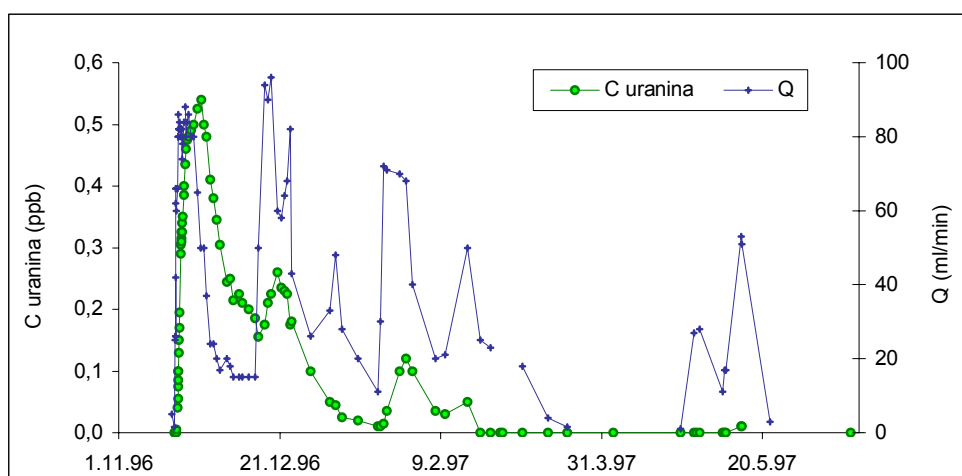
Slika 5.6.7: Padavine in začetni prenos sledila skozi curka I in J.

Nakazuje se znatno počasnejše pretakanje vode skozi slabše prepustne prevodnike curka J z večjo upornostjo, čeprav so se najprej aktivirali tisti najbolj prepustni v celotni hierarhiji slabo prepustne mreže. Iz slike 5.6.7 je razviden začetni zvezen pojav uranina v curku J v primerjavi s curkom I. Zvezen pojav sledila v curku J brez nihanj koncentracije odraža izrazito homogenizacijo v njegovem zaledju. Iz slike 5.6.8. je razvidno najprej zvezno iztekanje že prej shranjene vode v njegovem zaledju, sledil pa je zvezen prehod uranina, ki so ga potiskale infiltrirane padavine.



Slika 5.6.8: Začetni prenos injiciranega sledila skozi curek J in njegov pretok.

Vsakokratne nadaljnje padavine, ki so se odrazile tudi v povečanem pretoku, so povečale spiranje uranina (slika 5.6.9). Iztekanje uranina skozi curek J je trajalo 4 mesece ob zveznem iztekanju vode, saj je curek J stalen.



Slika 5.6.9: Dinamika prenosa uranina skozi curek J v odvisnosti od njegovega pretoka.

Glavni prehod uranina, dokler njegova koncentracija ni dokončno upadla pod mejo določljivosti, je trajal 4 mesece. Do novembra 1998 smo uranin določevali le še občasno in le v sledih po padavinah. Hitrost pretakanja glede na največjo izmerjeno koncentracijo v_{dom} je bila za ta curek 0,67 m/h (tabela 5.6.2).

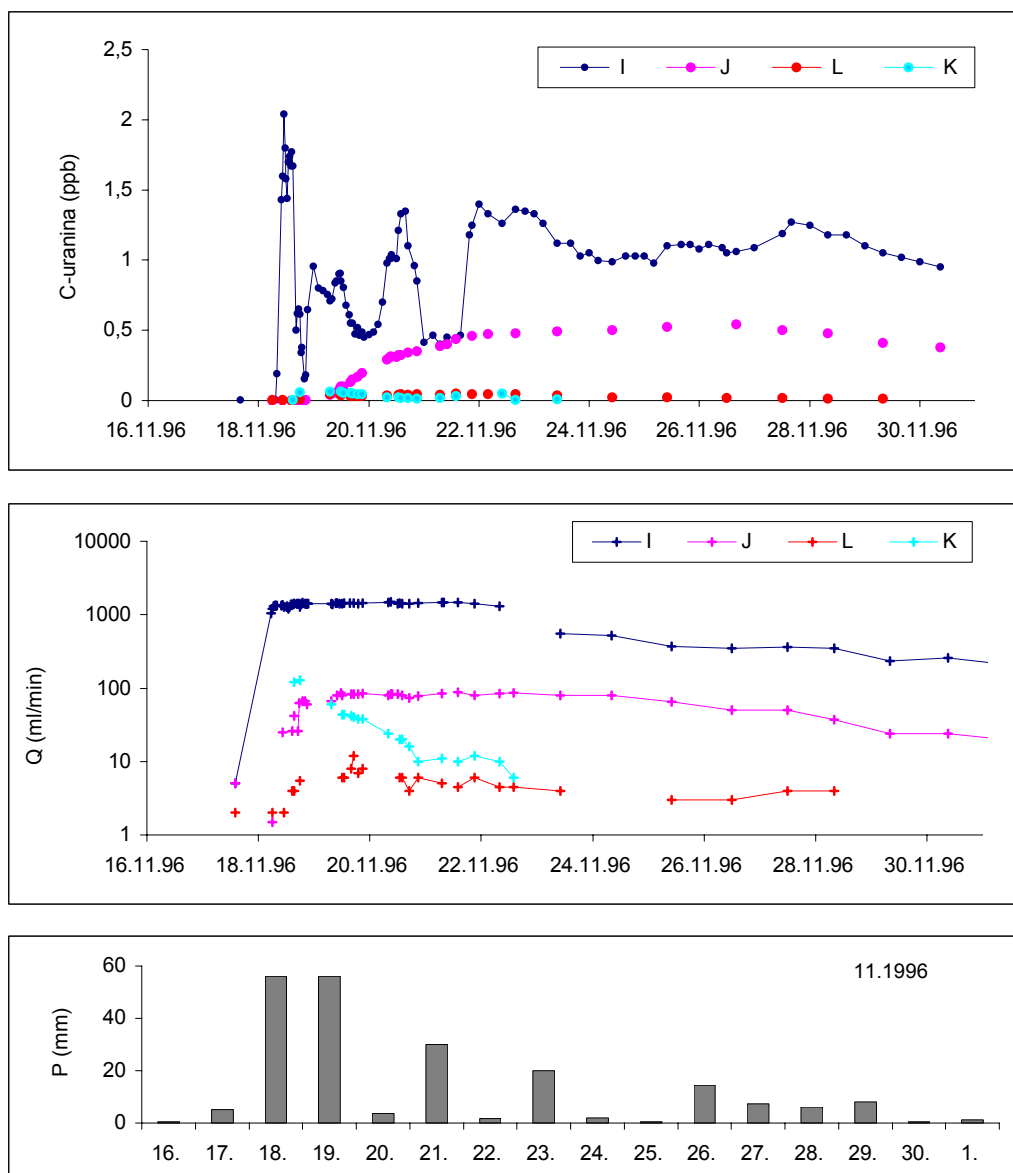
Tabela 5.6.2: Čas od injiciranja do pojava sledila v curkih, količina padavin, ki je padla v tem obdobju, količine iztekle vode pred pojavom sledila, dominantna hitrost pretakanja ter maksimalna koncentracija sledila v opazovanih curkih.

Curek	I	J	L	K
Čas do pojava sledila (ure)	21	43	30	30
Padavine do pojava sledila (mm)	62	111	95	95
Iztekla voda pred pojavom sledila (l)	800	60	4	22
$V_{dominantna}$ (m/h)	4,3	0,67	1,0	1,0
$C_{maksimalna}$ (ppb)	2	0,54	0,05	0,06

5.6.3.3 Ostali opazovani curki in kapljanja

Kapljanje L je stalno, curek K pa se pojavi le občasno po izdatnih in dalj časa trajajočih padavinah. V času injiciranja sledila je bil curek K suh, kapljanje L pa je imelo pretok 1,5 ml/min. Pretok kapljanja L je reagiral deset ur za curkom I, po nadaljnjih 3 urah pa se je v njem pojavil tudi uranin. Dominantna hitrost pretakanja v kapljanje L je bila 1,0 m/h. Skozi kapljanje L je izteklo pred pojavom prvih sledi uranina le 4 l, skozi curek K pa 22 l shranjene vode. Curek K je bil aktiven le 5 dni. Koncentracija uranina v kapljanju L je padla pod mejo določljivosti po dveh mesecih spiranja s padavinami.

Uranin se je v curkih G in H pojavil le v sledih, medtem ko sta se v obeh curkih ob sledenju 1993 oblikovali izraziti sledilni krivulji. To si razlagam s 4-krat manjšo količino injiciranega sledila novembra 1996, predvsem pa z večjim razredčevanjem, saj je bil pretok curka G 10-krat, curka H pa 5-krat večji kot pa ob sledenju junija 1993. Sledenje je tudi pokazalo, da je za popolnejšo sliko pretakanja skozi vadozno cono v sledilnih poskusih potrebno uporabiti dovolj veliko količino sledila.



Slika 5.6.10: Padavine, nihanje pretokov in koncentracije uranina v curkih **I**, **J**, **L** in **K** v času jesenskega vodnega vala takoj po injiciranju.

Spremljanje iztekanja vode s sledilom v vodnem valu novembra 1996 (slika 5.6.10) nakazuje tudi zgradbo zaledij stalnih curkov J in L. Ob upadanju pretoka zgradba njihovega zaledja pogojuje vse slabše iztekanje vode iz vadozne cone, kar zagotavlja curkom tipa J in L stalno vodo ob sicer minimalnih pretokih tudi v sušnih obdobjih. Občasen in izdaten curek I nakazuje močan upad pretoka kmalu ko izostanejo padavine in ko zapolnjenost njegovega zaledja pade do določene mere. Njegova

zgradba zaledja mu ne omogoča stalnosti, saj pogosto ob izostanku padavin presahne.

5.6.3 Kombinirani sledilni poskus s površja z injiciranjem 7. junija 2002

Zgoraj opisana sledilna poskusa sta pokazala, kakšno je pretakanje vode s sledilom skozi 100 m debelo vadozno cono, ko je bilo sledilo injicirano v vadozni coni na kamnino, 4 m pod površjem, prvič, ko smo injicirano sledilo sprali z večjo količino vode in drugič v naravnih razmerah, ko so sledilo spirale padavine. Pri takem injiciranju je bil izključen vpliv prsti na prenos sledila.

S kombiniranim sledilnim poskusom, ko smo 7. junija 2002 eno sledilo (NaCl) injicirali 4 m pod površjem v vadozni coni, na istem mestu kot v predhodnih dveh sledenjih, drugo (eozin) pa na površju neposredno po prsti in rastlinju, sem želela ugotoviti vpliv prsti. Sledili smo raztopili v minimalnih količinah vode, spiranje sledil pa prepustili padavinam, ki so sledile. Tako sem ugotavljala razlike v pretakanju in prenosu obeh sledil v naravnih razmerah.

Padavinske in hidrološke razmere v času injiciranja

Glede na skromne padavine aprila in maja 2002 pred injiciranjem sledil 7.6.2002, so curki dosegali sorazmerno nizke pretoke (tabela 5.6.3), vendar sem sklepala na boljšo zapolnjenost zaledja curkov kot ob sledenju novembra 1996, saj je bil aktiven tudi curek I.

Tabela 5.6.3: Pretoki curkov v času injiciranja sledil junija 2002.

(ml/min)	I	J	L	G	G*	H	N	K
Q _{7.6.2002}	180	9	0,3	2	10	28	12	0

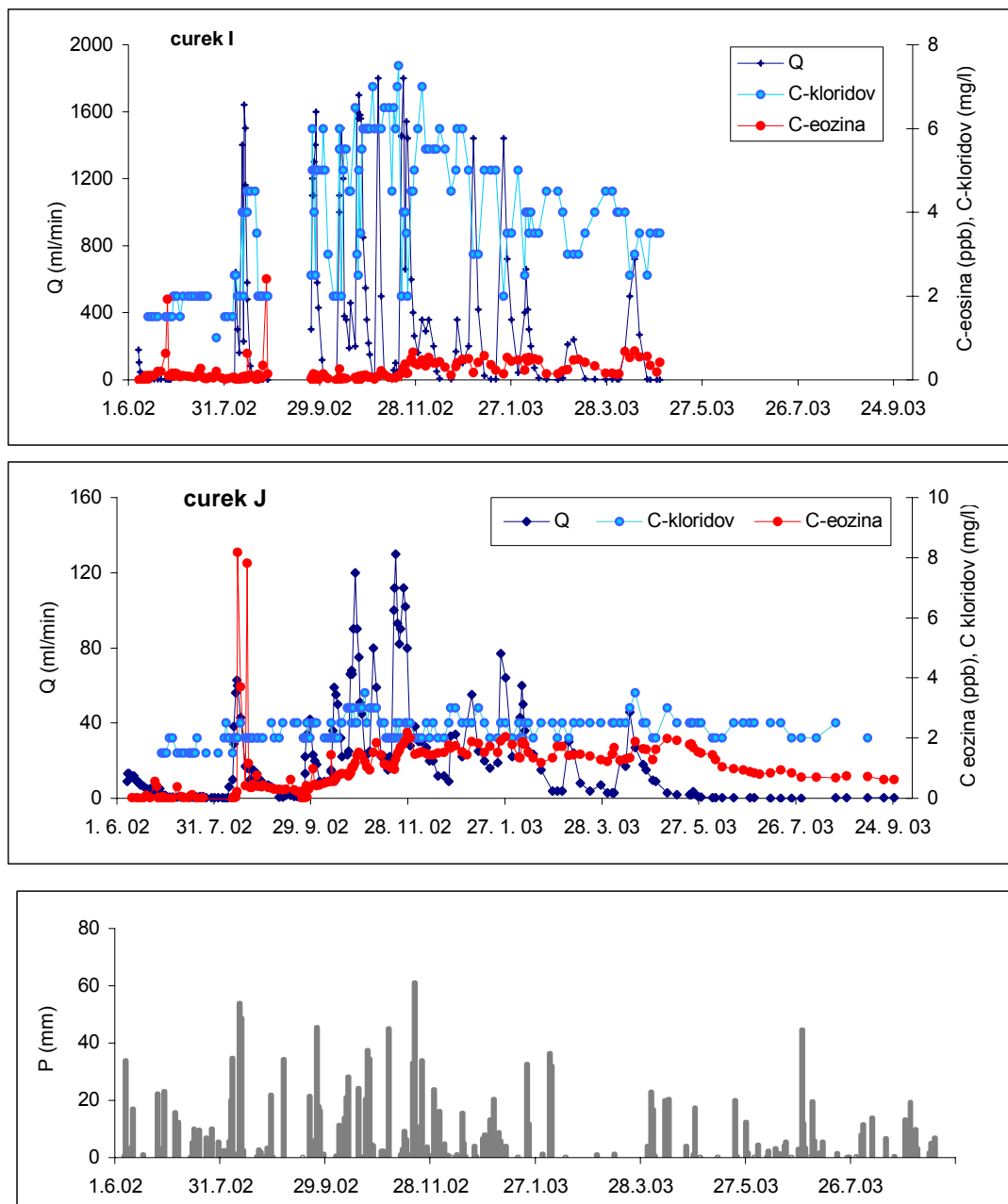
Padavine, ki so padle po injiciranju junija in julija, so bile skromne (110 in 82 mm). Šele avgusta so izdatne padavine (201 mm), ki so padle pretežno v prvi polovici avgusta (slika 5.6.11), prvič po injiciranju povzročile večje naraščanje pretoka

curkov. Izdatno jesensko deževje se je začelo konec septembra, ko so se začeli oblikovati vodni valovi. Padavine so nato zagotavljale vodo stalnim curkom do sredine maja 2003. V takih razmerah se je začel intenzivnejši prenos injiciranih sledil.

5.6.3.1 Prenos kloridov

Prvo minimalno povečanje kloridov v curku I smo zaznali po manjših padavinah konec junija, ko je skupaj padlo 50 mm dežja. Tedaj so bila aktivna le še kapljanja na kopo, saj ni bilo več dotoka vrh kope. Izrazitejše povišanje do 4,5 mg Cl⁻/l pa je nastopilo v prvem vodnem valu 2 meseca po injiciranju, sredi avgusta 2002 (slika 5.6.11), po izdatnih padavinah. V nadaljnjih vodnih valovih, ki so sledili izdatnejšim padavinam, je vsakokrat opazno naraščanje koncentracije kloridov. Ob maksimalnih pretokih v vodnih valovih je koncentracija kloridov vsakokrat močno upadla, kar pripisujem dotoku vode po prepustnejših prevodnikih oz. njegovemu razredčevalnemu učinku, ki tedaj prevlada nad učinkom spiranja. Najvišje vrednosti smo določevali novembra (7 mg Cl⁻/l). Tedaj se je začelo obdobje najvišjih pretokov v hidrološkem letu in se je skozi curek I začel tudi zvezni prenos eozina. Koncentracija kloridov je nato upadala do konca hidrološkega leta 2002-03. Glede na največjo koncentracijo je bila navidezna hitrost pretakanja (v_{dom}) v danih razmerah 0,03 m/h. Dokončno spiranje kloridov skozi curek I se je nadaljevalo v naslednjem hidrološkem letu vse do zime 2003-04.

Primerjava tega sledenja s sledenjem novembra 1996, ko je bilo v obeh sledenjih sledilo injicirano na isti točki in so ga spirale le padavine, je pokazala, da so za prenos sledila poleg namočenosti prsti in zapolnjenosti vadozne cone odločilne dovolj izdatne in intenzivne padavine. Tako se je prenos sledila novembra 1996 začel takoj po injiciranju, ko je padlo prek 160 mm dežja, junija 2002 pa je sledilo čakalo v vadozni coni kar 2 meseca (ko je padlo sicer skoraj 200 mm neintenzivnih padavin) na dovolj izdatne in intenzivne padavine, to je 160 mm dežja, ki je padel v 7 dneh v začetku avgusta.



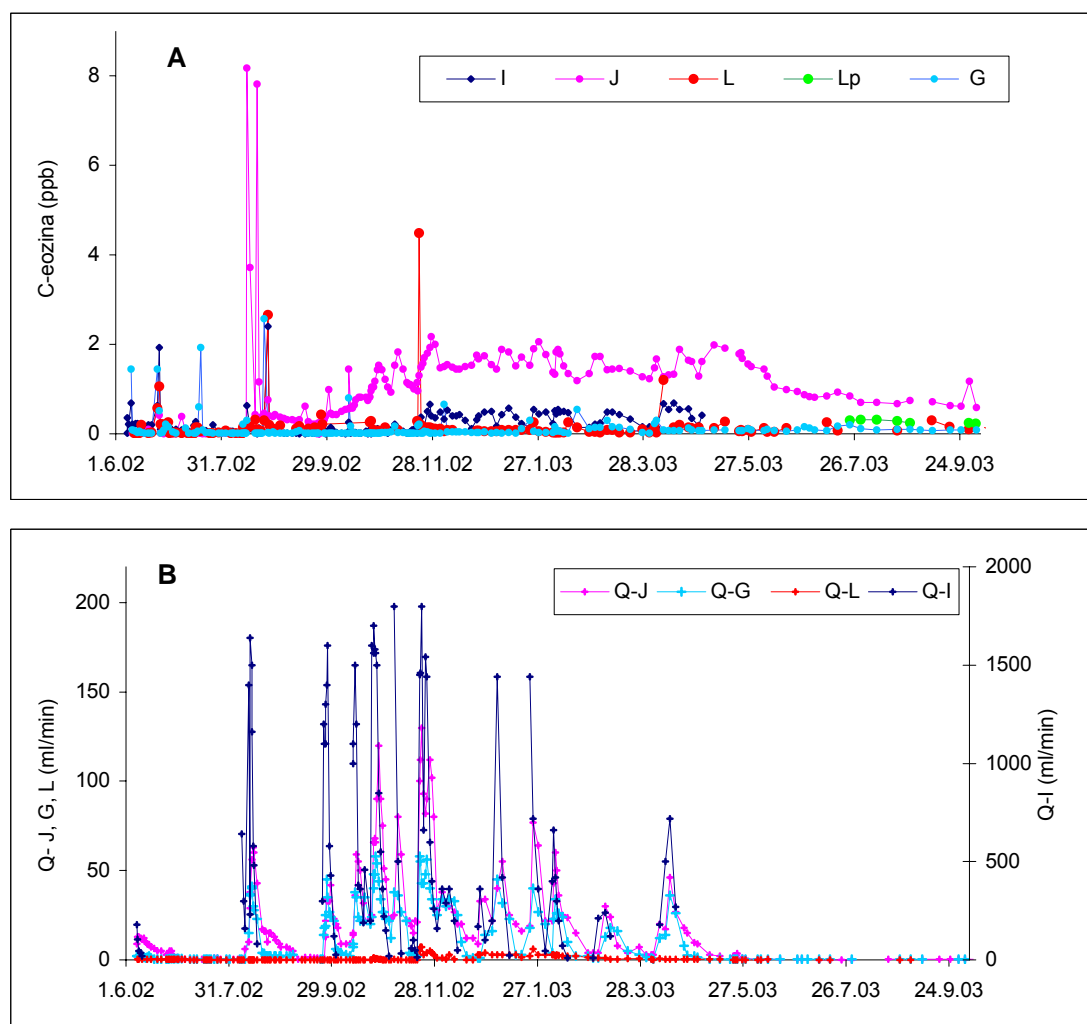
Slika 5.6.11: Padavine, pretok ter prenos kloridov in eozina skozi curka **I** in **J**.

V curku J so se pojavili kloridi manj izrazito, a podobno kot v curku I. Vidno je naraščanje koncentracije z izhodne vrednosti 1,5 mg Cl⁻/l ob naraščanju pretoka avgusta 2002. V začetku novembra 2002 so kloridi s koncentracijo 3,5 mg Cl⁻/l dosegli maksimalno vrednost. Nato je koncentracija kloridov do konca hidrološkega leta nihala okoli vrednosti 2,5 mg /l. Pojav kloridov v curku J v nižjih koncentracijah dalj časa kot v curku I nakazuje homogenizacijo v prenosu kloridov, ki je vezana na daljše zadrževanje vode in injiciranih kloridov v vadozni coni.

V ostalih opazovanih curkih: G, G*, H, N in L nismo zaznali značilnih povečanj kloridov, kar sem pričakovala, saj je bila injicirana količina sledila relativno majhna. Njihova koncentracija je nihala od 1,5 do 2,5 mg Cl⁻/l.

5.6.3.2 Prenos eozina

Kratkotrajni pojav prvih sledi eozina smo podobno kot pri kloridih zaznali konec junija 2002 v curkih I, J, L, G in H. Kasneje, avgusta 2002 po prvih izdatnih padavinah, smo ob prvem izrazitem povečanem pretakanju skozi vadozno cono in oblikovanju vodnih valov v curkih, zabeležili najizrazitejši pojav eozina v curku J,



Slika 5.6.12: Koncentracija eozina v curkih I, J, L, Lp in G v času 15 mesecev po injiciranju (slika A) ter sočasno nihanje pretokov (slika B).

kjer se je pojavil v koncentraciji prek 8 ppb, a kratkotrajno (slika 5.6.11). V curkih I, G, H, G* in L se je tedaj pojavil eozin manj izrazito, kratkotrajno in s časovnimi zamiki (slika 5.6.12). Koncentracija eozina je nato ob upadanju pretoka upadla pri vseh curkih, razen pri curku J, pod mejo določljivosti.

V kapljanju L z minimalnimi pretoki smo zabeležili le občasna, kratkotrajna, a izrazita povečanja koncentracije eozina (avgusta in novembra 2002), sicer pa je koncentracija nihala na meji določljivosti. Zato smo začeli z vzorčenjem bližnjega, nekoliko izdatnejšega stalnega curka Lp, ki je imel avgusta 2003 nekoliko povečano koncentracijo eozina.

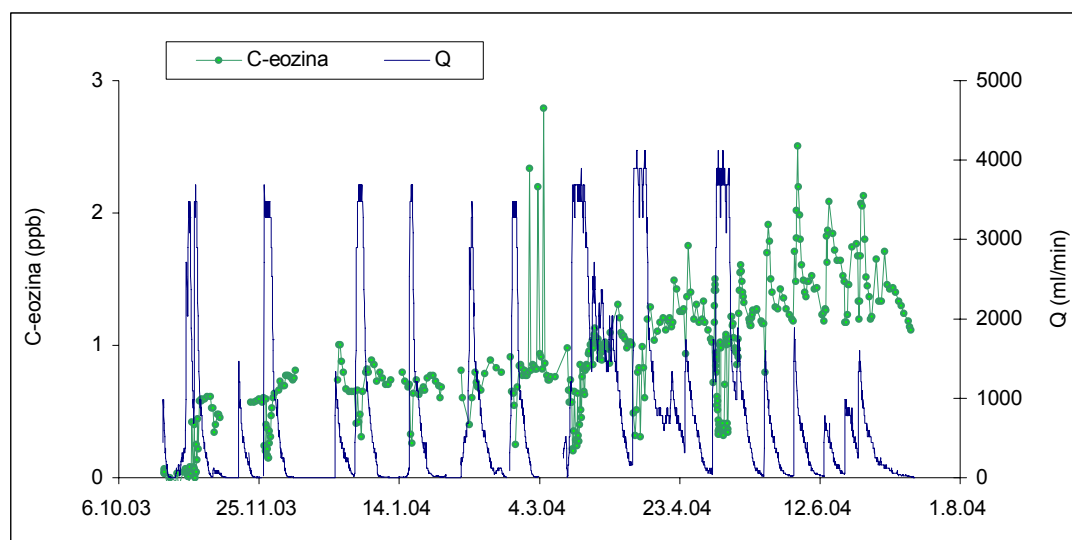
Občasno in kratkotrajno pojavljanje višjih koncentracij eozina v curkih N in G* je trajalo do konca leta 2002, v curkih G in H pa do pomladi 2003, nato pa je koncentracija eozina dokončno padla pod mejo določljivosti. Spiranje eozina skozi curke I, J in Lp se je zvezno nadaljevalo v naslednjem hidrološkem letu 2003-04.

Curek I

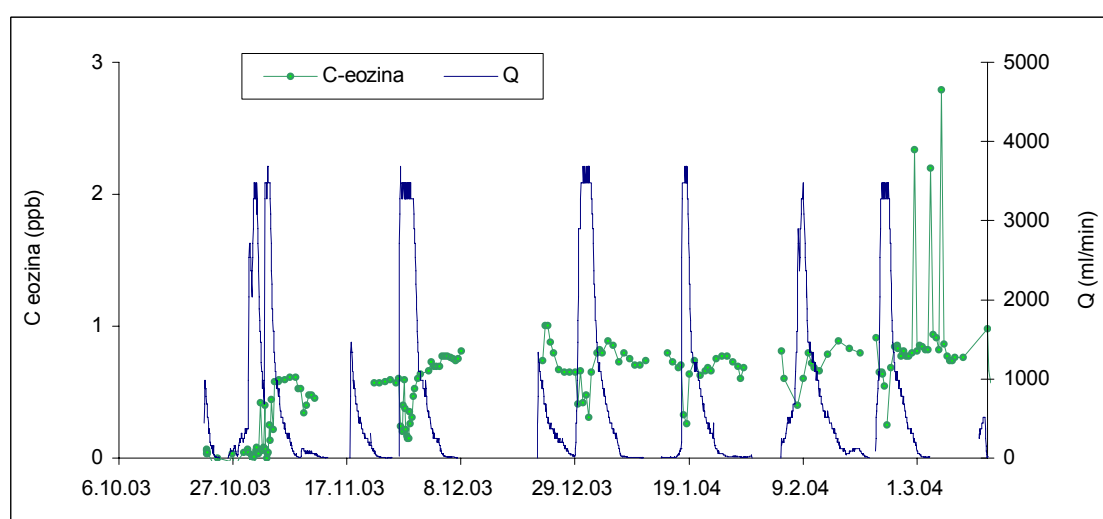
V curku I se je eozin v obdobju petih mesecev po injiciranju vse do sredine novembra, ko se je oblikoval najizdatnejši vodni val v hidrološkem letu, pojavljal v koncentracijah le nekoliko nad mejo določljivosti (do 0,1 ppb) z izjemo nekaj kratkotrajnih povišanj. Šele dež konec novembra je bil odločilen za začetek intenzivnejšega zveznega prenosa eozina skozi curek I. Koncentracija eozina je vse do konca aprila, ko je curek presahnil, nekoliko nihala, a ni presegla koncentracije 0,7 ppb, čeprav so se oblikovali izdatni vodni valovi (slika 5.6.12). Konec aprila 2003 je curek I presahnil in izostal je tudi prenos sledila. Ponovni prenos sledila skozi ta curek se je začel šele naslednje hidrološko leto, septembra 2003.

Slika 5.6.13 prikazuje nadaljevanje spiranja eozina skozi curek I v hidrološkem letu 2003-04. Opazen je trend naraščanja koncentracije eozina prek hidrološkega leta z 0,5 na 1,5 ppb ob stalnih nihanjih v vodnih valovih. Izstopa zakasnelo spiranje eozina v prvem vodnem valu po poletnem sušnem obdobju in kratkotrajne visoke vrednosti v iztekajočem vodnem valu konec februarja in v začetku marca (slika 5.6.14).

Intenzivni prenos eozina v prvem vodnem valu se je začel šele, ko je izteklo 15 m³ vode s koncentracijo eozina pod 0,08 ppb. Zakasnelo pojavljanje eozina glede na oblikovanje vodnega vala pripisujem začetnemu dotokanju vode po prepustnejših poteh skozi razsušeno prst in nadalje skozi vadozno cono z velikimi učinki razredčenja. Šele ko je padlo 273 mm dežja in se je od tega infiltriralo 178 mm, je bila prst dovolj namočena, da je omogočila napajanje tudi slabo prepustnega dela zaledja, ko je sočasno prišlo do iztekanja shranjene vode s sledilom.



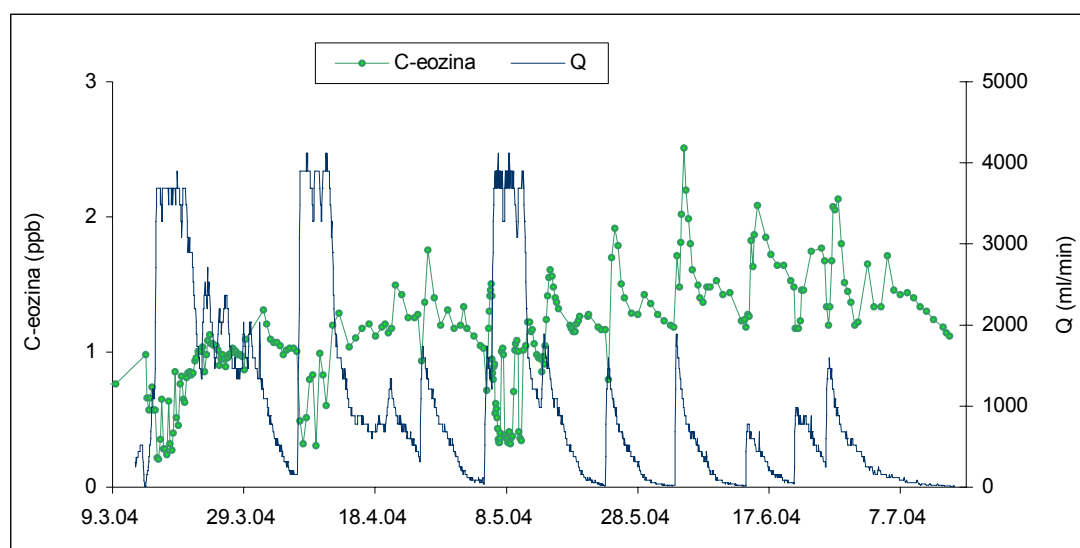
Slika 5.6.13: Curek I – prenos eozina v hidrološkem letu 2003-04.



Slika 5.6.14: Curek I – prenos eozina v prvem vodnem valu po poletnem sušnem obdobju je zaostajal za naraščanjem pretoka.

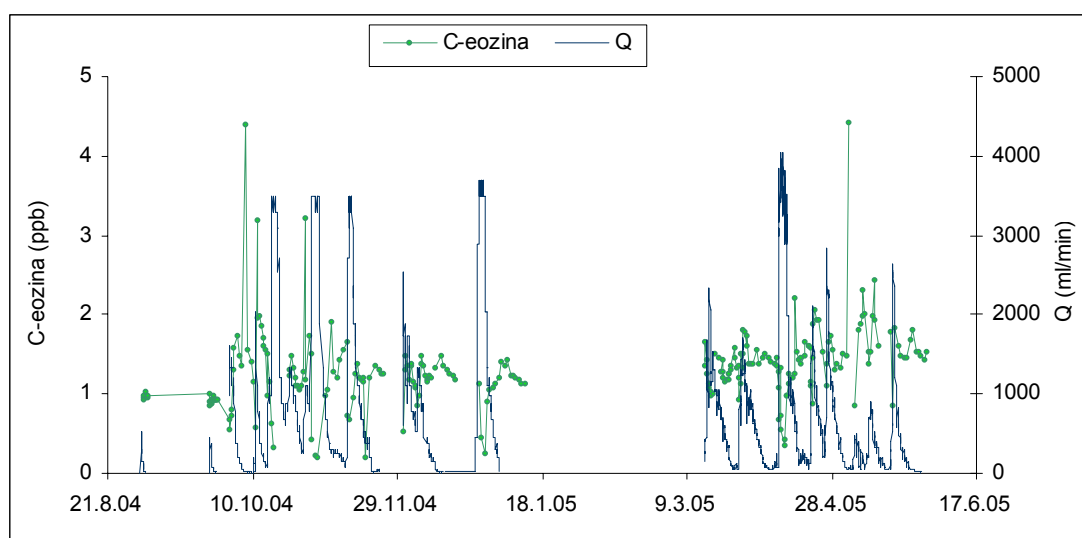
Do kratkotrajnih izrazitih povečanj koncentracije eozina ob minimalnem pretoku curka je prišlo konec februarja 2004, ko je bil na površju sneg. Občasna povišanja temperature prek dneva nad ledišče so verjetno pogojevala minimalna povečanja pretoka, ki jih z našimi meritvami sicer nismo zaznali, ter sočasen kratkotrajen prenos sledila. Sklepam, da se je odrazil v visokih koncentracijah, ker je bilo razredčevanje minimalno.

Sicer pa je prihajalo v času velikih vodnih valov ob naraščanju pretoka do sočasnega upadanja koncentracije eozina. V času vodnih valov, ki so trajali tudi več kot en teden, je prišlo ob nihanjih pretoka do obratno sorazmernega nihanja koncentracije eozina (slika 5.6.15). To si razlagam z občasnim dotokom večje količine vode po dobro prepustnih, že delno spranih prevodnikih, kar je pomenilo razredčevanje bolj koncentriranega dotoka iz slabše prepustnega dela zaledja. V manjših vodnih valovih od junija 2004 do konca hidrološkega leta, ko pretok ni več presegel 1900 ml/min, pa je vidno sočasno naraščanje pretoka in koncentracije eozina, ko gre pretežno za iztekanje vode s sledilom iz slabše prepustnega dela zaledja oz. je bil dotok po prepustnejših prevodniki zelo skromen ali pa je izostal in je bil zato učinek razredčevanja minimalen.

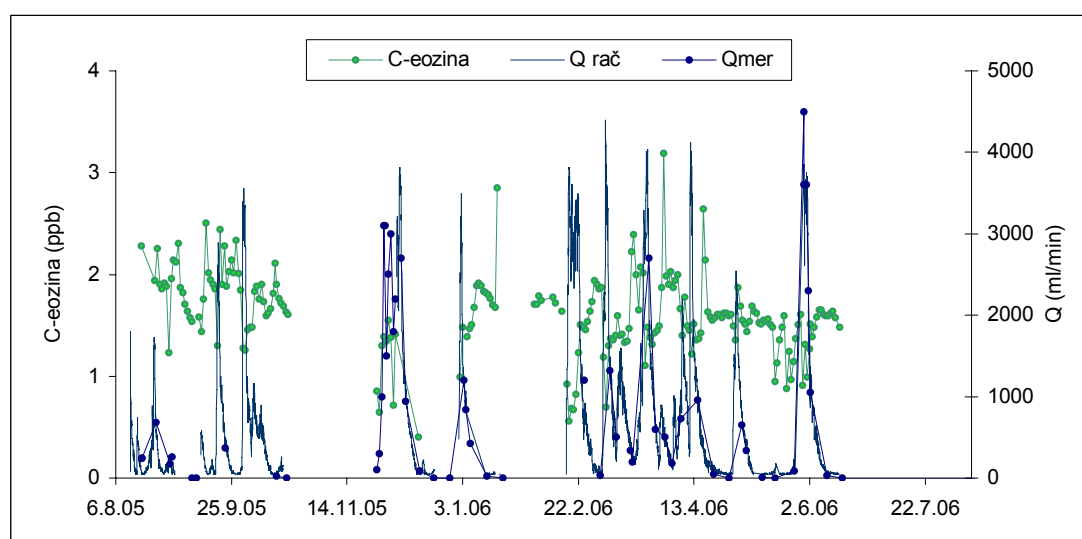


Slika 5.6.15: Curek I – v velikih vodnih valovih je prihajalo ob nihanjih pretoka do nihanj koncentracije eozina. Ob povečanjih pretoka je koncentracija eozina upadla.

Podobne ugotovitve lahko sklenem za hidrološki leti 2004-05 (slika 5.6.16) in 2005-06 (slika 5.6.17), ko je padlo manj padavin. V hidrološkem letu 2004-05 se je infiltriralo 120 mm manj padavin (skoraj 10 %) kot v letu 2003-04; v hidrološkem letu 2005-06 pa 170 mm (14 %) manj. V obeh letih so se pojavljali manj izdatni vodni valovi kot v hidrološkem letu 2003-04 z daljšimi obdobji, ko je bil curek suh. Značilne upade koncentracije eozina v vodnih valovih smo zabeležili le nekajkrat v največjih vodnih valovih.



Slika 5.6.16: Curek I - prenos eozina v hidrološkem letu 2004-05 ter sočasen potek pretoka curka.



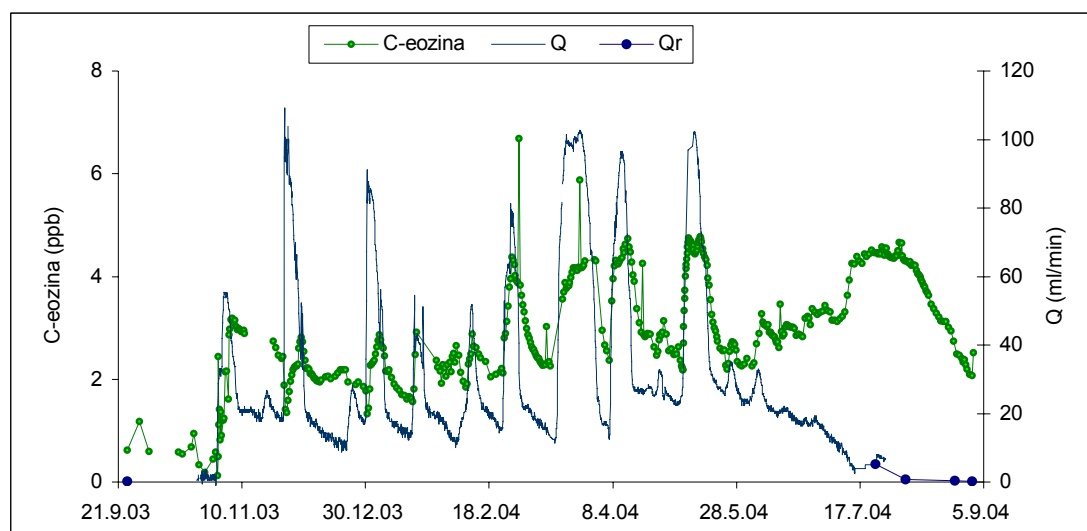
Slika 5.6.17: Curek I - prenos eozina v hidrološkem letu 2005-06 ter sočasen potek pretoka curka.

V splošnem pa je razviden trend naraščanja koncentracije eozina od njegovega pojava do jeseni 2005, ko smo določevali koncentracije okoli 2 ppb ob sicer stalnih nihanjih njegove koncentracije. Tedaj so se oblikovali le skromnejši vodni valovi, kar je tudi možen vzrok višjih koncentracij (manjše razredčevanje). Konec junija 2006 se je eozin spiral v koncentracijah do okoli 1,6 ppb in tako spiranje se je nadaljevalo do konca leta 2007. Tudi za to obdobje so značilni upadi koncentracije eozina v večjih vodnih valovih, ob nizkih pretokih v iztekajočih vodnih valovih pa občasna kratkotrajna izrazita povečanja koncentracije eozina, podobno kot pri curku J. Očitno lahko že minimalne spremembe v pretakanju v vadozni coni, ki jih z našim načinom merjenja pretoka občasno nismo niti zaznali, vplivajo na kratkotrajen povečan prenos sledila, ko se zaradi majhnega razredčenja pojavi bolj izrazito. Tudi podrobno spremljanje eozina in SEP v času vodnega vala marca 2004, ko je prišlo do nihanj pretoka zaradi zmrzovanja površja v zaporednih nočeh (slika 5.4.6), je pokazalo sočasna povišanja koncentracije eozina in SEP ob upadih pretoka.

Curek J

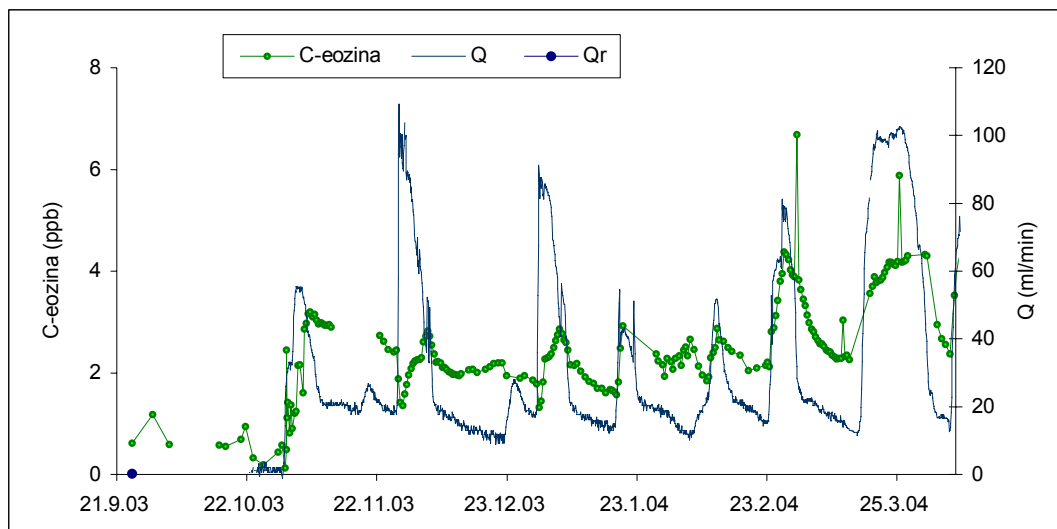
V curku J smo vse od avgusta 2002 dalje zvezno beležili povišane vrednosti eozina (pod 0,5 ppb) (slika 5.6.12), kar je pomenilo, da se je začel zvezni prehod eozina skozi ta curek. Izdatne padavine so v vodnih valovih vse intenzivneje potiskale eozin skozi curek J, tako da je od konca novembra 2002 do začetka maja 2003 iztekal v koncentracijah do 2 ppb. Za intenzivnejši prenos so bile odločilne razmere v času večjih vodnih valov oktobra in novembra 2002. Upadanju pretoka od maja do septembra 2003, ko se je začelo hidrološko leto 2003-04, je ob manjših padavinah najprej sledilo naraščanje koncentracije eozina, ko pa je pretok upadel pod 1 ml/min, pa zvezno upadanje njegove koncentracije. Vse to nakazuje pomemben vpliv načina infiltracije padavin, ki pogojujejo sočasno iztekanje vode in shranjenega sledila skozi vadozno cono curka. Za infiltracijo padavin ima pomembno vlogo tudi namočenost prsti. V sušnem obdobju z manj izdatnimi in manj intenzivnimi padavinami ne prihaja do iztekanja vode iz celotne hierarhije prevodnikov, ampak le iz tistih nekoliko bolj prepustnih, kar se je odrazilo v nižjih koncentracijah eozina.

Zvezni pojav eozina v curku J se je začel že po intenzivnejših padavinah avgusta 2002 in se okreplil po jesenskih padavinah. Za to obdobje, kot tudi za naslednja hidrološka leta, je značilno naraščanje koncentracije eozina v curku J predvsem v velikih vodnih valovih, kar nakazuje iztiskanje uskladiščene vode z eozinom iz njegovega celotnega zaledja, tudi najslabše prepustnega. Tudi za zaledje curka J je značilna hierarhija različno prepustnih prevodnikov, vendar v primerjavi s curkom I brez najbolj prepustnih prevodnikov, kar omogoča daljše, a še vedno različno dolgo zadrževanje vode in injiciranega sledila ter njuno homogenizacijo. Slika 5.6.18 prikazuje spiranje eozina skozi curek J v hidrološkem letu 2003/04. Po padavinah se najprej aktivirajo tisti bolj prepustni, šele nato pa vse manj prepustni prevodniki do tistih najmanj prepustnih. Le-ti se aktivirajo le občasno po daljših in intenzivnih padavinah, ko dobro namočena prst omogoča enakomerno infiltracijo padavin in ko dovolj velik hidrostatični pritisk premaga upornost slabo prepustnih prevodnikov v vadozni coni, ko pride do infiltracije in sočasno do iztekanja vode s sledilom tudi iz tega dela zaledja.



Slika 5.6.18: Curek J - prenos eozina v hidrološkem letu 2004-05 in hidrogram curka.

Tak sistem so nakazale že meritve SEP ter spremljanje spiranja kontaminantov, predvsem nitratov. Vendar pa se le-ti spirajo iz zgornje vadozne cone iz slabo prepustnega dela zaledja, saj so bolj prepustni deli po 15 letih že sprani. Izstopa predvsem intenzivnejše spiranje nitratov po daljših sušnih obdobjih. Eozin se je



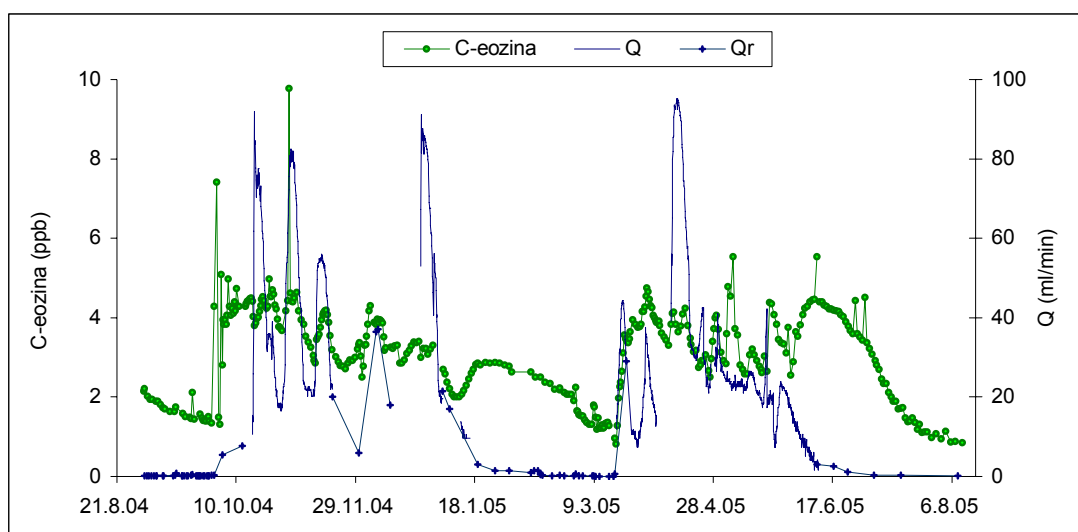
Slika 5.6.19: Curek J – začetni prenos eozina po sušnem poletnem obdobjju je nekoliko zaostajal za naraščanjem pretoka curka.

spiral iz prsti prek vadozne cone, zato so vsake dovolj izdatne padavine intenzivneje spirale tudi eozin. Iz slike 5.6.19 je razvidno ponovno intenzivnejše spiranje eozina po poletni suši, ki je v začetku hidrološkega leta 2003-04 v prvem manjšem vodnem valu nekoliko zaostajala za naraščanjem pretoka, medtem ko je bilo spiranje kontaminantov, nitratov in o-fosfatov sočasno z naraščanjem pretoka.

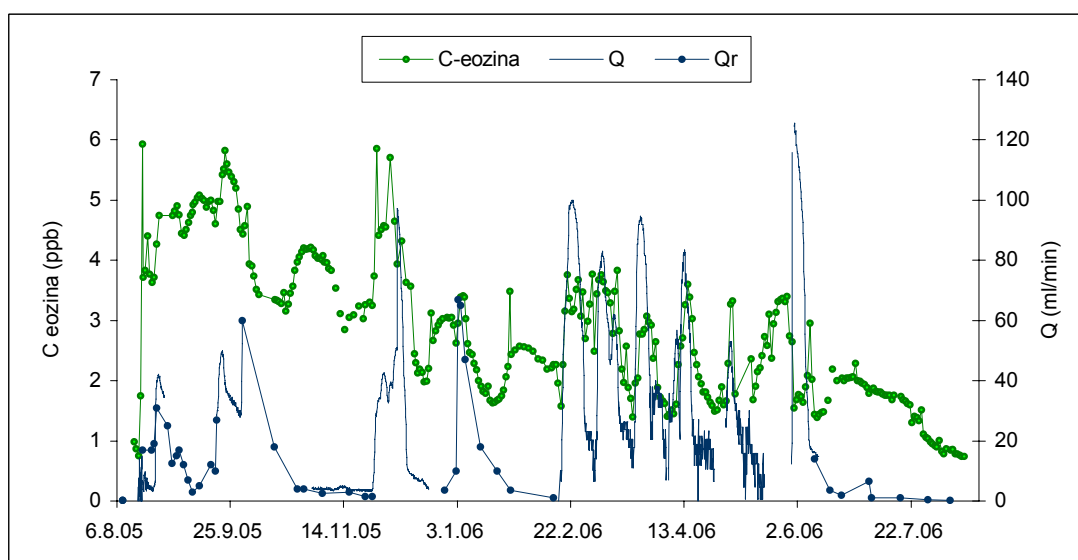
Sklepam, da se je tedaj eozin še vedno pretežno zadrževal v prsti in le manjši del v vadozni coni, kjer pa so bili kontaminati že daljše obdobje. Skozi curek J je v vodnem valu najprej iztekala shranjena voda, nato pa infiltrirana voda s sledilom. Kasneje, v naslednjih hidroloških letih 2004-05 (slika 5.5.20) in 2005-06 (slika 5.5.21) smo zabeležili že ob prvem manjšem povečanju pretoka tudi povečano spiranja eozina, zato predvidevam, da so ga padavine v predhodnem obdobjju že pretežno sprale iz prsti v zgornjo vadozno cono. Prst se je pokazala kot pomemben filter v pretakanju padavin in prenosu sledila. Dolgemu spiranju injiciranega eozina botruje do določene mere verjetno tudi adsorpcija v prsti.

V času največjih vodnih valov, konec novembra in konec decembra 2003, je prišlo v curku J do kratkotrajnega upada koncentracije eozina ob hitrem naraščanju pretoka, medtem ko je sicer koncentracija eozina ob naraščanju pretoka običajno naraščala.

Konec maja 2006, po 4 letih spiranja, sem zabeležila izrazit upad koncentracije eozina v največjem vodnem valu v hidrološkem letu 2005-06. Ocenjujem, da v določenih razmerah lahko pride do »preboja«, ko intenzivne in izdatne padavine pogojujejo hitro dotekanje tudi dela sveže infiltrirane vode v curek po prepustnejših prevodnikih in se oblikujejo veliki vodni valovi. Ta dotok se je odrazil v znižanju koncentracije eozina in koncentracij kontaminantov ter upadu SEP.



Slika 5.6.20: Curek J - prenos eozina v hidrološkem letu 2004-05 in hidrogram curka.



Slika 5.6.21: Curek J - prenos eozina v hidrološkem letu 2005-06 in hidrogram curka.

Občasna kratkotrajna povečanja koncentracije eozina ob začetnem naraščanju in kasneje ob upadanju pretoka, pa tudi v vrhovih vodnih valov pripisujem spiranju iz najslabše prepustnega dela vadozne cone ali iz nehomogene prsti, kjer se je eozin shranil, delno adsorbiral in se občasno intenzivneje spiral, saj se tudi v razsušeni prsti ob padavinah različno aktivirajo različno prepustne poti. Tooth in Fairchild (2003) ugotavljata, da prst predstavlja dvojno porozni sistem, ki omogoča vodi na eni strani hiter prehod (po razpokah, makro-porah), na drugi strani pa veliko sposobnost shranjevanja vode v mikro razpokah, kar omogoča trajnejše napajanje vadozne cone. Prst je kompleksen sistem, ki pogojuje način infiltracije padavin, ki nato vstopajo v vadozno cono krasa.

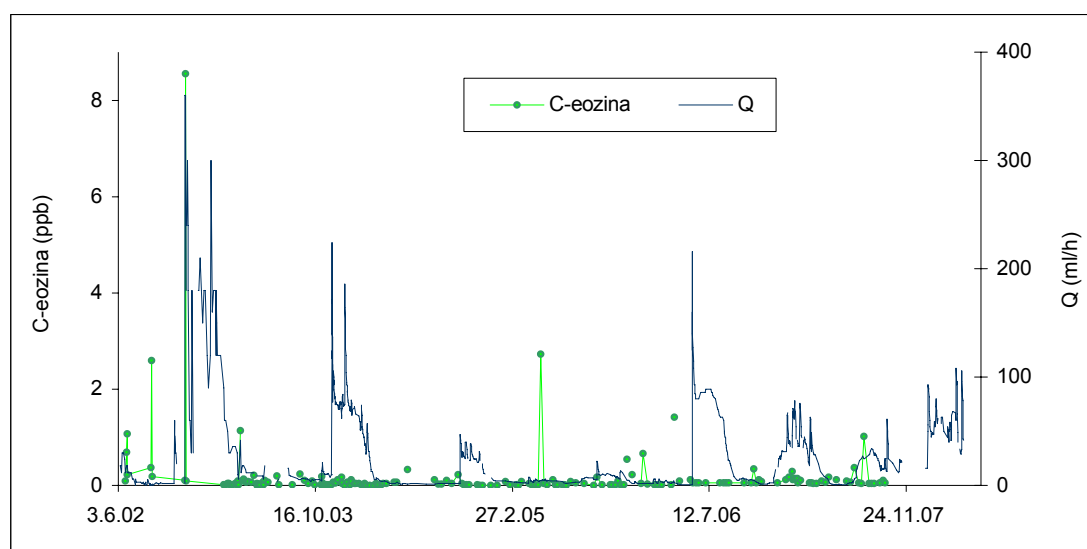
Izstopa tudi značilno zvezno upadanje koncentracije eozina v sušnih obdobjih ob postopnem upadanju pretoka k minimalnim letnim vrednostim julija in avgusta 2004 (slika 5.6.18), od sredine januarja do začetka marca 2005 ter junija in julija 2005 (slika 5.6.20) in manj izrazito od sredine junija do sredine avgusta 2006 (slika 5.5.21). Ob upadanju pretoka v zadnjem vodnem valu v hidrološkem letu koncentracija eozina običajno narašča, ko narašča delež vode iz slabo prepustnega dela zaledja. Ob nadaljnjem upadanju pretoka se deaktivirajo najslabše prepustni prevodniki in koncentracija eozina upada.

Ostali opazovani curki

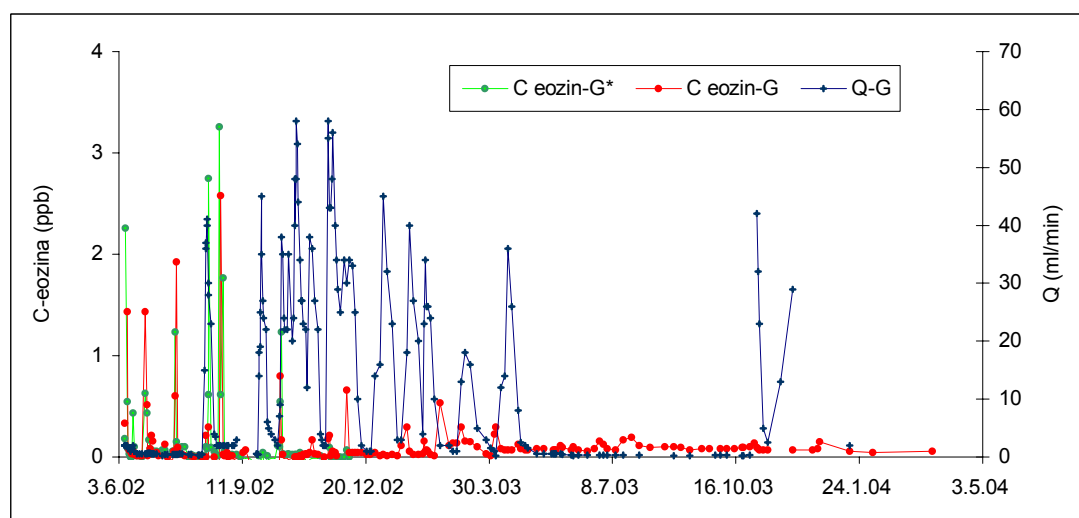
Prisotnost injiciranega eozina sem preverjala tudi v manjšem curku oz. kapljanju L in kasneje še v bližnjem curku L_p ter v curkih G, G* in H v neposredni bližini curka I. Sledilni poskus z zalivanjem injiciranega sledila junija 1993 je namreč pokazal povezavo tudi s curki L, G in H.

Prva kratkotrajna povišanja koncentracije eozina v kapljanju L smo zabeležili po padavinah konec junija in sredi avgusta, največje pa konec novembra 2002, podobno kot pri drugih curkih. Vendar pa v nadaljevanju ni prišlo do zveznega prenosa eozina skozi curek, saj je koncentracija eozina ob nihanjih okoli meje določljivosti le nekajkrat dosegla kratkotrajna povišanja (slika 5.6.22).

Podobno sem ugotavljala pri curkih G, G* in H v neposredni bližini curka I (sliki 5.6.23 in 5.6.24). Kratkotrajna izrazita povečanja koncentracije injiciranega sledila so se običajno pojavljala ob manjših spremembah pretoka, ob začetnem naraščanju pretoka v vodnem valu ali pa v upadajočem delu valov. Očitno je v takih razmerah nekaj eozina odteklo v smeri omenjenih izvirov, ker pa je bilo razredčevanje majhno, se je pojavil v visokih vrednostih. Vendar pa so ta nihanja v curkih G, G* in H



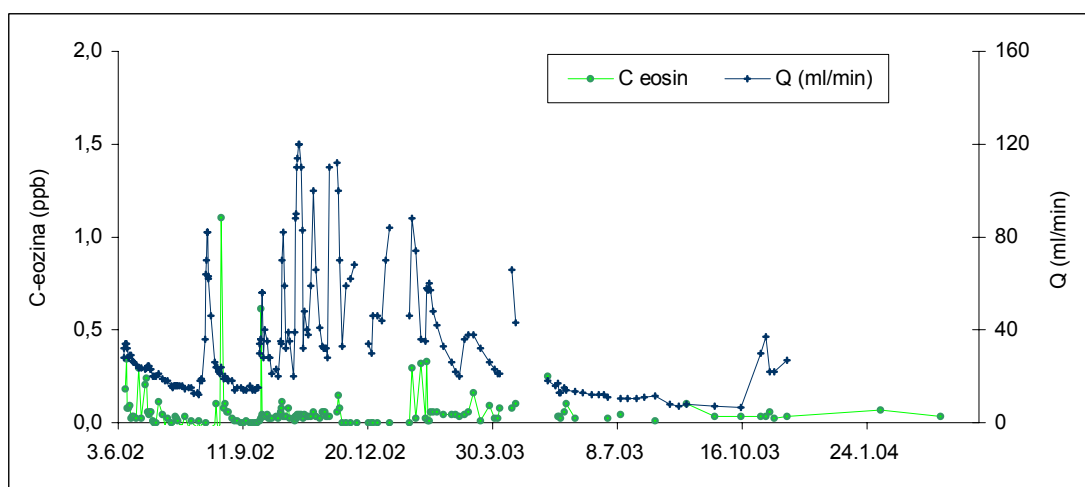
Slika 5.6.22: Curek L – pojavljanje eozina v curku L ob nihanju njegovega pretoka v času 6 let.



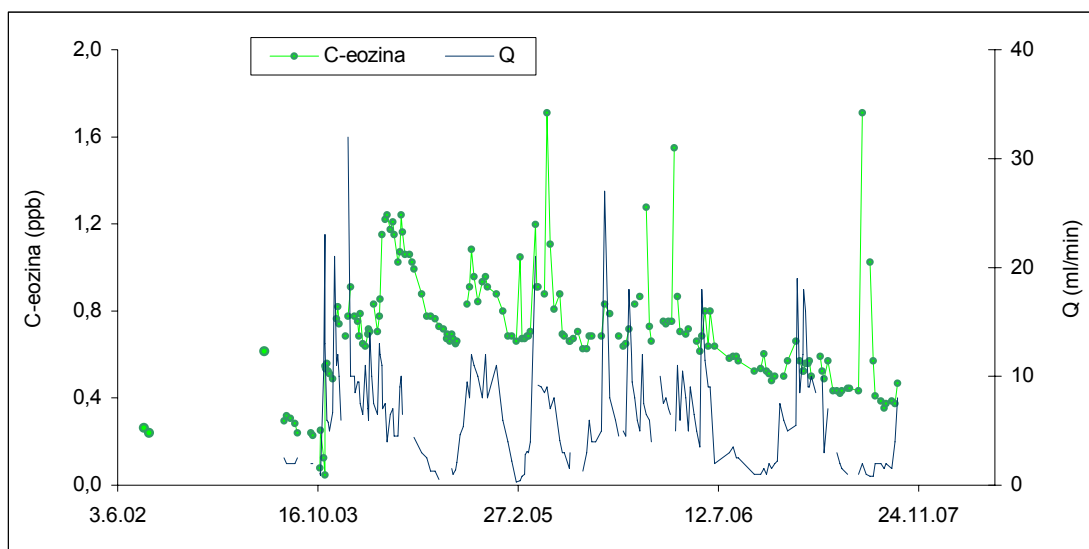
Slika 5.6.23: Prenos eozina skozi curka G in G ter pretok curka G. Pretok curka G* je nihal podobno kot pretok curka G, le da je dosegal nekoliko nižje vrednosti.*

spomladi 2003, nekako leto dni po injiciranju, dokončno izostala, koncentracija eozina pa je vztrajala le nekoliko nad mejo določljivosti.

Nekaj prvih analiz manjšega curka Lp v neposredni bližini curka L je pokazalo povišano vsebnost eozina, zato smo začeli jeseni 2003 še z zajemanjem tega curka. Ob oblikovanju vodnih valov sem zabeležila zvezen prenos sledila, ki se je nadaljeval ob občasnih kratkotrajnih povišanjih še v naslednjih letih, podobno kot v curkih I in J. V curku Lp smo določali nekoliko nižje vrednosti kot v curkih I in J.



Slika 5.6.24: Prenos eozina skozi curek H in njegov hidrogram.



Slika 5.6.25: Curek Lp – prenos eozina skozi curek in njegov hidrogram.

Koncentracija se je zvezno dvignila do koncentracije 1,24 ppb spomladi 2004, nato pa je bil ob nihanjih in občasnih kratkotrajnih povišanjih do 1,7 ppb opazen trend postopnega upadanja koncentracije (slika 5.6.25).

5.6.3.3 Ugotovitve, ki jih je podalo sledenje junija 2002

Na osnovi razmer v vadozni coni v času injiciranja sledil junija 2002, ko je bil curek I brez vode, curek J pa je dosegal pretok 13 ml/min, in sorazmerno visokih temperatur na površju ugotavljam, da so bila tla suha in se padavine, ki so sledile, niso mogle zvezno infiltrirati. Prva občasna in kratkotrajna pojavljanja eozina v curkih pripisujem potiskanju eozina s padavinami le po najprepuščajših poteh skozi suho prst, in dalje le po tistih najbolj prepustnih prevodnikih skozi vadozno cono (angleško »preferencial flow«). Tedaj se je eozin v vseh curkih pojavljal le kratkotrajno in v sorazmerno visokih koncentracijah.

Šele izdatne padavine v avgustu 2002, dobra dva meseca po injiciranju, so pogojevale oblikovanje izrazitejših vodnih valov pri vseh curkih, razen pri kapljanju L, kjer je pretok minimalno zanihal. Take razmere so pogojevale začetek zveznega pojavljanja eozina le v curku J. Za začetek zveznega prenosa skozi curek I pa so bile potrebne znatno večje padavine. Te so padle konec septembra in v začetku novembra 2002. Ko so dobro namočile prst, so začele zapolnjevati tudi slabše prepusten del zaledja curka, kar je omogočilo intenzivno zvezno iztekanje vode in zvezen prenos eozina tudi skozi curek I.

5.6.4. Primerjava vseh opisanih sledenj

V primerjavi z ugotovitvami sledenja v sušnih razmerah junija 1993 je v razmerah boljše zapolnjene vadozne cone z vodo in izdatnejših padavinah, ki sledijo injiciranju (sledenje novembra 1996), pretakanje vode in prenos topnih snovi takojšen, zvezen in brez daljšega zadrževanja v vadozni coni. Pri tem sem ugotavljala opazno manjše razlike v hitrostih pretakanja skozi vadozno cono v različne curke kot pa v primeru

sledenja leta 1993 (tabela 5.6.4). Sistem deluje v takih razmerah zvezno in sorazmerno homogeno.

Razlike v pretakanju in prenosu snovi, ki sta ga pokazala sledilna poskusa junija 1993 in novembra 1996, pripisujem predvsem razlikam v predhodni zapolnjenosti epikraške cone v času injiciranja ter načinu spiranja, z večjo količino vlite vode oz. s padavinami.

V sledenju leta 1993 je hiter pojav vode in uranina v veliki koncentraciji v sicer suhem curku I pogojevalo zalivanje sledila z veliko količino vode (6 m^3) v kratkem času (pol ure). V curek I je po osrednjem najbolj prepustnem prevodniku oz. prevodnikih priteklo le 4 % te vode, ki je potisnila skozi curek tudi del injiciranega sledila. Pri tem ni prišlo niti do homogenizacije sledila z vlito vodo. Zelo velike razlike v koncentracijah uranina v curkih J, K in L v primerjavi s curkom I (tabela 5.6.1) pripisujem dejstvu, da je uranin čakal v slabše prepustnem zaledju curkov J, L in K čez celo poletje in se je spiranje začelo šele z intenzivnejšimi in izdatnejšimi padavinami jeseni, kar pa je pomenilo tudi izdatno razredčevanje in homogenizacijo.

V kolikor bi za prenos sledila v sledilnem poskusu leta 1993 za curek J privzeli kot odločilne padavine (kot da bi bilo sledilo injicirano tik pred padavinami) 2. do 4. septembra 1993 (78 mm dežja) oz. za kapljanje L dež od 6. do 8. septembra (110 mm), bi bile hitrosti pretakanja v curka J in L okoli 1 m/h, kar se dobro ujema z ugotovitvami pretakanja v sledenju novembra 1996 (tabela 5.6.3). To potrjuje sklep, da se je sledilo v danih razmerah uskladiščilo v vadozni coni.

Tabela 5.6.3: Navidezne hitrosti pretakanja sledila - v_{dom} v m/h v posamezne curke v sledenjih junija 1993 in novembra 1996, računane glede na čas injiciranja.

Trickle	I	J	K	L
V_{dom} (m/h): 6.1993	80	0,045	0,044	0,044
V_{dom} (m/h): 11.1996	4,3	0,67	1,0	1,0

Dvakrat dalj časa trajajoče spiranje uranina, ko je padlo 2,5-krat več padavin, po injiciranju 60 g sledila junija 1993 v primerjavi z injiciranjem 15 g sledila novembra 1996, je do določene mere odraz večje količine sledila. Vendar pa mislim, da je

predvsem posledica različne zapolnjenosti epikraške cone in omočenosti prsti pred injiciranjem ter načina začetnega spiranja. Junija 1993 vlita voda je vplivala le na pojav vode in prenos uranina v curek I in to le po najprepustnejšem prevodniku. Curek je bil aktiven le 24 ur, ko je skozi curek izteklo slabe 4 % vlite vode z 2,2 % injiciranega uranina. Nadaljnji prenos uranina, ki se je zadržal v vadozni coni globlje kot 4 m pod površjem, so pogojevale padavine, podobno kot so pogojevale prenos uranina v druge curke in podobno kot so prenos sledila pogojevale padavine tudi v sledenju novembra 1996. Padavine, ki so padle prek poletja do septembra 1993 (330 mm) in so se infiltrirale, so zapolnjevale vadozno cono in vplivale le na prenosa sledila v sami vadozni coni, ni pa prišlo do povečanega iztoka vode, niti sledila iz nje.

Vse to kaže na pomembno akumuliranje večjih količin vode, pa tudi v vodi topnih snovi v vadozni coni, ko je iztok iz nje minimalen. V takih razmerah so le tisti najbolj prepustni prevodniki sposobni prevajati vodo v primeru večjih točkovnih izliti, kot je bilo injiciranje 6 m^3 vode junija 1993. Do takega odtoka prihaja na kraškem površju tudi v prometnih nesrečah, v katerih pride običajno do izliti velikih količin naftnih derivatov. Izkazalo se je, da naftni derivati že v 15-20 minutah odtečejo s površja (Kogovšek, 1995b; Kogovšek in Petrič 2002a). Koncentrirano pa odteka v kras tudi manj ali bolj onesnažene kanalizirane meteorne vode s cestišč (Kogovšek, 1995a). V vseh takih primerih lahko pričakujemo hitro odtekanje brez večjih razredčitev po prepustnejših prevodnikih. Na območjih slabše prepustnosti pa ne pride do takojšnjega prenosa, temveč do uskladičenja za daljši čas. Šele dovolj izdatne in intenzivne padavine potisnejo uskladiščene tekočine v prepustnejše dele vadozne cone in naprej v smeri kraških izvirov.

V razmerah dokaj dobre zapolnjenosti vadozne cone, kot je bilo v sledenju novembra 1996, pa po padavinah prihaja ob dobri namočenosti prsti do zvezne infiltracije padavin ter zapolnjevanja celotnega zaledja curkov, vključno z mrežo najslabše prepustnih razpok, ter sočasnega potiskanje uskladiščene vode skozi vadozno cono. Gre za zvezen, dokaj homogen prenos snovi po vseh razpoložljivih prevodnikih, razpokah, ko v hitrosti pretakanja med njimi ni večjih razlik in ko prihaja tudi do pomembnih razredčitev.

Na osnovi podrobnega geološkega kartiranja (poglavje 3.1) smo sklepali, da v opazovanem sistemu najprepustnejši prevodnik I sledi razpoklinski do zdrobljeni coni; počasnejše pretakanje v kapljanja in manjše curke (L in J) pa voda po prečenju epikrasa sledi tektonsko zdrobljeni coni oz. lezikam (Kogovšek in Šebela, 2004). Pri tem pa lahko dodam, da je k večanju prepustnosti najprepustnejših prevodnikov, ki vodijo v curek I, pomembno doprineslo povečano raztapljanje kamnine zaradi prisotnih kontaminantov. Sklepam, da imata curka I in J v svojem zaledju podoben slabo prepusten del, bistveno pa se razlikujeta v najprepustnejših prevodnikih, ki so postali v curku I zaradi korozijskih učinkov in odvajanju vse večjih količin vode znatno bolj prepustni.

Kombinirano sledenje junija 2002 je pokazalo velik pomen prsti na površju, ki pomeni pomemben filter tako za infiltracijo padavin kot tudi za prenos topnih in netopnih snovi, katerih transport je vezan na pretakanje vode. Natrijev klorid, ki je bil injiciran v vadozni coni, 4 m pod površjem na ožjem območju dobro prepustnih prevodnikov curka I, se je v sledih pojavil že po dežju dobra dva tedna po injiciranju, od avgusta 2002 dalje pa sem beležila zvezen prenos kloridov skozi curka I in J, izraziteje skozi curek I. Tedaj se je začel tudi zvezen, sicer skromen prenos eozina skozi curek J. Ko se je začel zvezen in intenzivnejši prenos eozina tudi skozi curek I, novembra 2002, je koncentracija kloridov začela že upadati. Padavine, ki so tedaj potiskale eozin skozi curek I, so preostale kloride razredčevale in spirale v vse nižjih koncentracijah. Decembra 2003 je koncentracija kloridov v curku I že dosegla izhodno vrednost, spomladi 2004 pa tudi v curku J.

Prenos eozina je naraščal vse do jeseni 2005, več kot tri leta, ko smo izmerili najvišje vrednosti njegove koncentracije. Po šestih letih spiranja so koncentracije eozina v curkih I in J in Lp še dokaj velike (slika 5.6.26). Zato pričakujem, da bo spiranje s padavinami trajalo še nekaj let. Za prenos sledila je zelo pomembna količina infiltriranih padavin in njihova razporeditev. Od hidrološkega leta 2003-04 sta količina infiltriranih padavin kot tudi delež infiltracije stalno upadala (tabela 5.1.2), pogostejša pa so bila tudi daljša sušna obdobja, tudi pozimi, ko prihaja ob infiltraciji padavin le do minimalnega iztoka iz vadozne cone. Take razmere podaljšujejo prenos snovi skozi vadozno cono, kar pa pomeni možnost akumuliranja snovi in daljše zadrževanje. To pa verjetno pogojuje razne fizikalne in kemijske procese.

Rezultati sledenj skozi vadozno cono (Kogovšek, 1981, 1994a), pa tudi številnih regionalnih sledenj s kraškega površja (Kogovšek, 1999; Kogovšek in Petrič, 2004, 2006, 2007) nam podajajo novo znanje o značilnostih vadozne cone, zato so zelo uporabna metoda pri ugotavljanju ne le smeri raztekanja vode, temveč tudi načina pretakanja skozi vadozno cono in dalje v smeri kraških izvirov. Perrin in sodelavci (2004) so ugotavljali, da pri validaciji modelov ranljivosti kraških območij sledenja z injiciranjem v vodni tok ne daje dovolj dobrih rezultatov in da je potrebno dati prsti večji faktor. Omenjena sledenja skozi vadozno cono pa nakazujejo ne le pomen razmer na površju in v prsti za infiltracijo padavin in prenos kontaminantov do kraških izvirov, temveč tudi razmer v vadozni coni.

5.7 PRIMERJAVA PRETAKANJA SKOZI VADOZNO CONO NA RAZLIČNIH LOKACIJAH

V času opazovanj pretakanja skozi 100 m debelo vadozno cono na območju Postojnske jame smo izvedli tudi več sledilnih poskusov z injiciranjem na kraškem površju, na območju odlagališč odpadkov Mala gora pri Ribnici, Sežana in Mozel pri Kočevju. Sledilo je tako moralo najprej preiti vadozno cono, nato pa je po sklenjenih podzemnih vodnih tokovih sorazmerno hitreje nadaljevalo pot do kraških izvirov. Tako je bila možna primerjava pretakanja skozi vadozno cono Postojnske jame s pojavljanjem sledil v kraških izvirih in s tem sklepanje na način pretakanja skozi vadozno cono pod odlagališči. Ob injiciranju sledil na kraškem površju je za njihov pojav v kraških izvirih odločilen prav prenos skozi vadozno cono, saj je nadaljnje pretakanje po sklenjenih kraških kanalih hitro. V vseh navedenih primerih sledenj smo sledilo zalili z večjo količino vode, da bi preprečili večjo adsorbcijo na prst in sedimente, kar pa je morda nekoliko vplivalo na pretakanje skozi vadozno cono. Vendar pa je sledenje s Počka (Kogovšek, 1999) pokazalo, da intenzivno spiranje sledila s kar 11 m³ vode ni vplivalo na pojav sledila v izviru Malenščice.

5.7.1 Sledenje z odlagališča odpadkov Mala gora pri Ribnici

Sledilni poskus z odlagališča Mala gora pri Ribnici smo izvedli v sorazmerno dobri namočenosti tal, saj je pred injiciranjem 10. in 11. 10. 2004 deževalo. V tem času so meritve pretokov curkov skozi vadozno cono Postojnske jame pokazale po poletnem sušnem obdobju drugi, sicer manjši vodni val, ki je bil v času injiciranja v upadanju. Tudi pretoki opazovanih izvirov na vplivnem območju odlagališča so bili v upadanju. Sledilo smo injicirali 14.10.2004 ob 13:30 (slika 5.7.1) in ga sprali s 5 m³ vode iz cisterne.

Injicirano sledilo je moralo najprej preiti vadozno cono debeline okoli 100 m. Nato se je voda s sledilom pridružila hitrim podzemnim tokovom, verjetno tudi podzemnemu toku Tržiščice, ki ponika v Tenteri (slika 5.7.2). Sledenje, ko je bilo sledilo injicirano na ponoru Tržiščice v Tenteri (Kogovšek in Petrič, 2002b), je tudi pokazalo povezavo z Javornikovim, Tominčevim in Debeljakovim izvirov.

Najmanjše razredčenje je bilo v obeh sledenjih na poti do Javornikovega izvira, kjer smo izmerili najvišjo maksimalno koncentracijo.

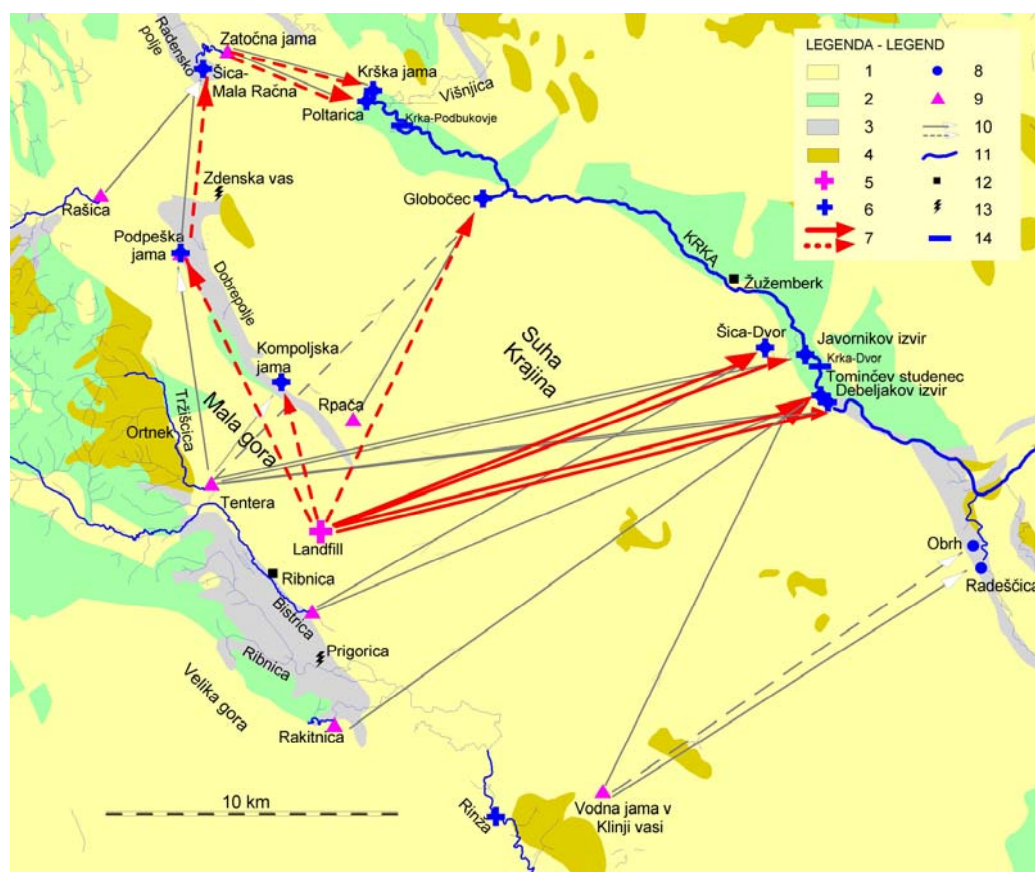


Slika 5.7.1: Injiciranje sledila.

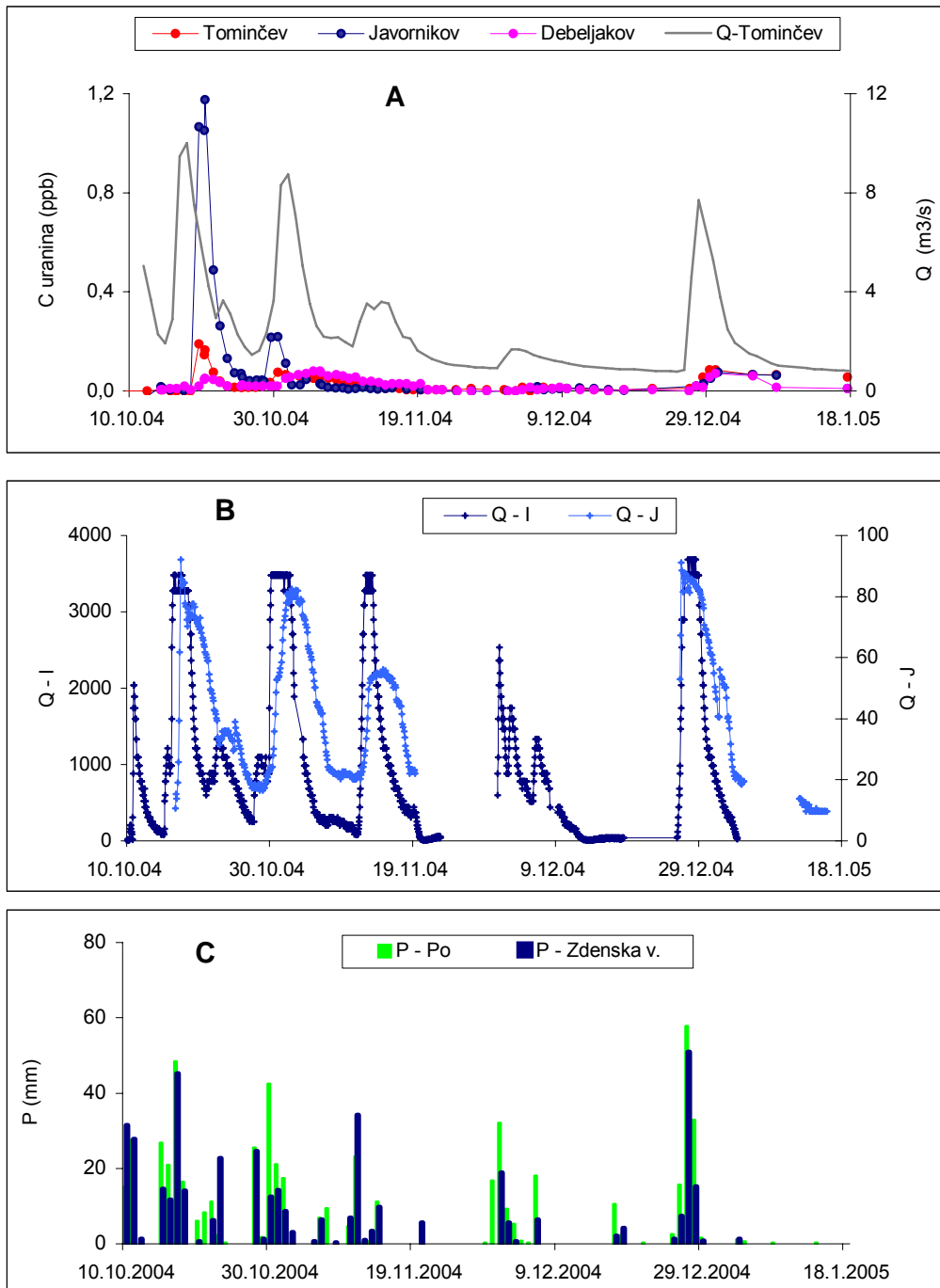
V razmerah, ko sledilo speremo z večjo količino vode, se sledilo z vodo hitro pretaka predvsem po prepustnejših prevodnikih (poglavje 5.6.1). Dobra namočenost prsti in izdatne padavine, ki so sledile že naslednji dan, so vplivale na nadaljnji prenos sledila tudi po manj prepustnih prevodnikih. V izvirihih sta se oblikovala dva večja vodna vala z maksimalnim pretokom 18. in 31.10. 2004 (Kogovšek in Petrič, 2006), medtem ko so vodni valovi v curkih I in J v Postojnski jami dosegli največjo vrednost že 1 dan prej (slika 5.7.3).

Glede na približno enako porazdelitev padavin na Postojnskem in na območju sledenja na Mali gori sklepam, da je prišlo do približno sočasnega intenzivnejšega pretakanja oz. oblikovanja vodnih valov v vadozni coni na območju injiciranja in v vadozni coni Postojnske jame. Na pretakanje padavin je vezan tudi prenos sledila. Sledilo se je pojavilo v Javornikovem in Debeljakovem izviru ter v Tominčevem studencu približno 1 dan za maksimalnimi pretoki izvirov, oz. približno 2 dni po prehodu vadozne cone v času vodnih valov. Na osnovi ocene debeline vadozne cone okoli 100 m (Kogovšek in Petrič, 2006) in ocenjenega časa, v katerem je prva

količina sledila prešla vadozno cono (24 ur), je bila ocenjena največja hitrost pretakanja skozi vadozno cono v danih ugodnih hidroloških razmerah na okoli 4 m/h. Nadaljnje pretakanje sledila s podzemnimi vodnimi tokovi do izvirov oz. do prvega pojava sledila (17,8 km) je trajalo nekako dva dni, kar da okvirno hitrost pretakanja okoli 350 m/h. Glede na najizrazitejši pojav sledila v občasnem Javornikovem izviru



Slika 5.7.2: Ugotovljeno raztekanje voda z odlagališča Mala gora pri Ribnici in starejše ugotovljene povezave na širšem območju (Kogovšek in Petrič, 2006). (Legenda: 1. kraški vodonosnik, 2. razpoklinski vodonosnik, 3. medzrnski vodonosnik, 4. zelo slabo prepustne kamnine, 5. deponija »Mala gora« - točka injiciranja sledila ob sledenju v oktobru 2004, 6. točka zajemanja vzorcev ob sledenju oktobra 2004, 7. s sledenjem oktobra 2004 dokazana glavna in stranska smer podzemnega pretakanja, 8. izvir, 9. točka injiciranja sledila pri starejših sledenjih, 10. glavna, stranska in vprašljiva smer podzemnega pretakanja, ugotovljena pri starejših sledenjih, 11. površinski tok, 12. naselje, 13. padavinska postaja).



Slika 5.7.3: Prehod injiciranega sledila skozi opazovane izvire (A), sočasno spremljanje pretakanja padavin skozi 100 m debelo vadozno cono Postojnske jame (B) ter padavine v Postojni in na območju sledilnega poskusa (padavinska postaja Zdenška vas) v obdobju treh mesecev po injiciranju.

sklepam, da se je sledilo oz. da se kontaminanti z odlagališča odpadkov v podobnih hidroloških razmerah najintenzivneje spirajo v smeri Javornikovega izvira. Sklepam, da ob pretakanju v Tominčev studenec prihaja do večjega razredčevanja oz. dotokov

sveže vode, saj je bila maksimalna koncentracija v Tominčevem studencu kar 6-krat manjša.

Nadaljnji prenos uranina se je povečal po padavinah v sledečih vodnih valovih in je bil skladen z oblikovanjem vodnih valov curkov v Postojnski jami. Sklepam, da pojav uranina v Javornikovem izviru sledi prenosu po bolj prepustnih prevodnikih (kot je curek I na območju vadozne cone Postojnske jame), saj so največje koncentracije nastopile ob prvem manjšem povečanju iztoka iz vadozne cone oz. minimalnem povečanju pretoka izvirov, medtem ko je nadaljnje naraščanje pretoka pomenilo močno razredčevanje sledila. Prenos kontaminantov skozi ta izvir, ki občasno presahne, je vezan na obdobja, ko ima vodo in na dovolj izdatne padavine.

V Tominčevem studencu in Debeljakovem izviru se nakazuje spiranje v opazno nižjih koncentracijah s časovnim zamikom za naraščanjem pretoka. To je primerljivo z naraščanjem pretoka curka J v Postojnski jami, zato sklepam da se je v oba izvira pomemben del sledila spiral predvsem po mreži slabše prepustnih prevodnikov v vadozni coni. predvidevam pa, da se oba izvira dobivata pomemben del vode tudi z drugih delov svojega zaledja.

Spiranje uranina v sledilnem poskusu je trajalo vse do sredine novembra 2004, nato pa so koncentracije uranina nihale blizu meje določljivosti, ko skromne padavine niso omogočale večjega prenosa zaostalega sledila iz vadozne cone. Ob ponovnem izrazitejšem povečanju pretoka izvirov in sočasno pretoka curkov iz vadozne cone v Postojnski jami konec decembra, smo tudi v izvirih ponovno zabeležili povečanje pretokov ter zvezno, dalj časa trajajoče iztekanje zaostalega uranina v sorazmerno nizkih koncentracijah.

Glavni prehod sledila je trajal 1 mesec, do sredine novembra 2004. Spiranje zaostalega sledila v nizkih koncentracijah pa je potekalo po vsakih dovolj izdatnih padavinah še dobro leto dni, do decembra 2005. Ker ni uradnih meritev pretokov izvirov, kjer se je pojavil uranin, žal tudi ni bil možen količinski izračun povrnjene količine sledila oz. določitev dinamike količinskega iztekanja sledila.

Sorazmerno hiter pojav in začetno zvezno iztekanje sledila skozi izvire ($v_{\text{dom}} = 3,5$ oz. 4 cm/s) so omogočile ugodne razmere na površju in v vadozni coni v času injiciranja ter izdatne padavine, ki so mu sledile. Hitrost prenosa snovi, kontaminantov s površja do izvirov je odvisna predvsem od prenosa skozi vadozno cono, saj je nadaljnje pretakanje po sklenjenih tokovih znatno hitrejše. Primerjava z iztekanjem vode skozi vadozno cono na območju Postojnske jame je pokazala na primerljiv sočasen prenos sledila skozi vadozno cono pod odlagališčem.

5.7.2 Sledenje z odlagališča odpadkov Sežana

Sočasno z raziskavami pretakanja skozi vadozno cono nad Postojnsko jamo je bil izveden tudi sledilni poskus z odlagališča Sežana z injiciranjem sledila na površju, neposredno ob odlagališču. Pred injiciranjem smo izvedli poskus požiralnosti, ki je pokazal hitro, neposredno odtekanje vode s škrapljišča, kjer smo kasneje injicirali sledilo. Tudi enak poskus na bližnjem zatravljenem terenu je dal podoben rezultat, neoviran odtok, brez zadrževanja na površju (slika 5.7.4).

Injicirano sledilo in 12 m³ vode, s katero smo sprali sledilo, in padavine, ki so sledile, so morali najprej preiti več kot 200 m debelo vadozno cono, preden so se pridružili podzemnemu toku Reke. Ocenjeno je bilo (Kogovšek in Petrič, 2007), da niha kraška voda na območju odlagališča 185 do 255 m pod površjem.



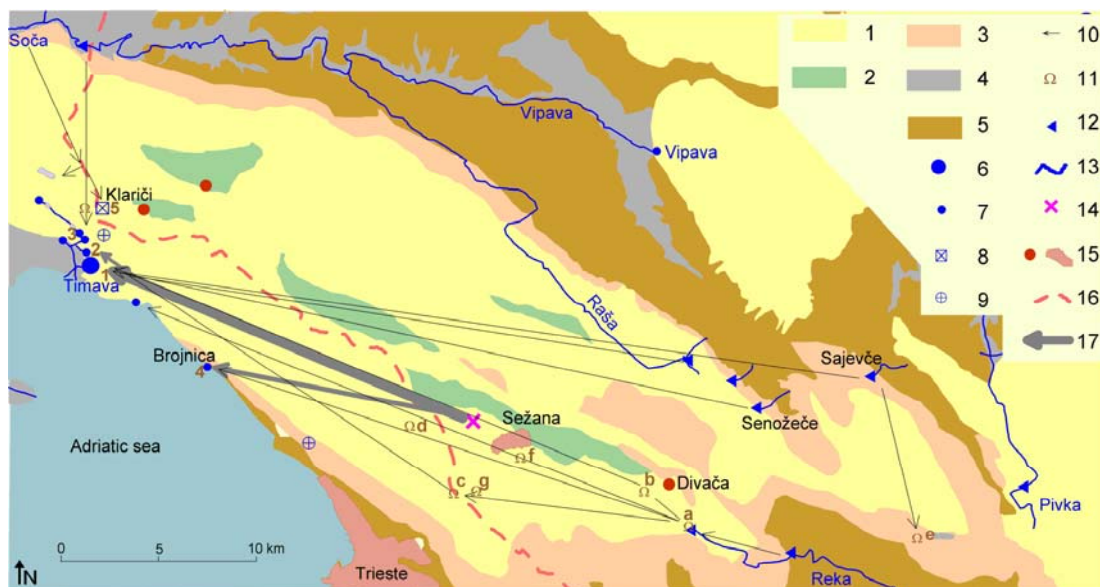
Slika 5.7.4: Poskus požiralnosti na zatravljenem površju ob injicirnem mestu.

Injiciranje (slika 5.7.5) je bilo izvedeno v času razmeroma dobre namočenosti tal (20.4.2005). Pretok Timava je bil tedaj 44 m³/s, 28. aprila pa je dosegel v vodnem valu maksimalni dnevni pretok 67 m³/s, sicer pa je upadal. Vlita voda (12 m³) po injiciranju in le dobrih 30 mm padavin na območju odlagališča v tednu po injiciranju je v danih razmerah pogojevala, da je prva količina uranina po najprepuščajših prevodnikih (kot je tudi curek I v vadozni coni Postojnske jame) prešla vadozno cono in nato s podzemno Reko pritekla v izvir Timave 2. maja 2005, to je 12 dni po injiciranju, v Brojnico pri Nabrežini pa po 30 dneh (slike 5.7.6, 5.7.7 in 5.7.8). Padavine smo merili na samem odlagališču. Podatke o pretoku in kalnosti Timave so nam posredovali s podjetja ACEGAS v Trstu.



Slika 5.7.5: Injiciranje fluorescentnega sledila uranin po škrapljišču ob robu sežanskega odlagališča odpadkov.

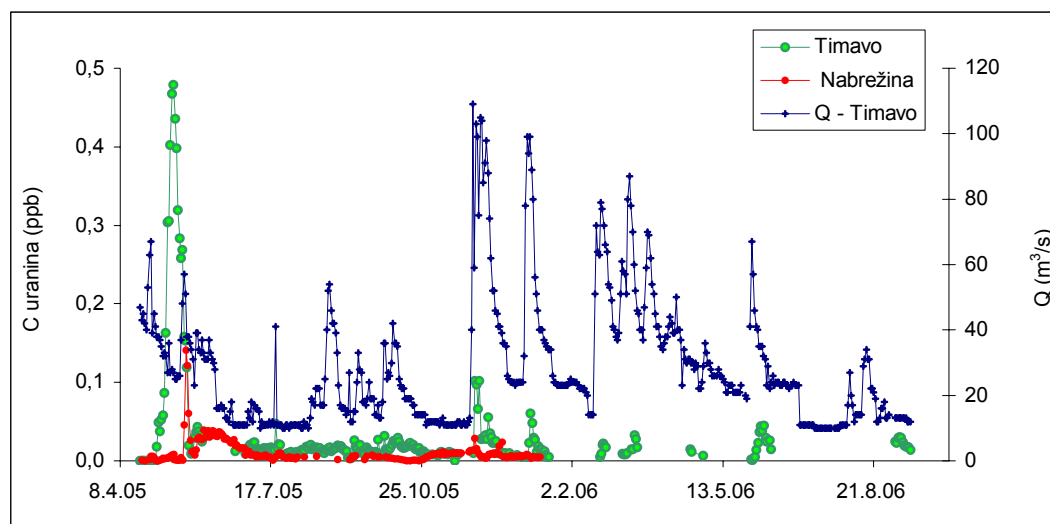
Reka je dotok Timave, ki skozi Škocjanske jame odvaja pomemben del površinske vode s fliša, posebno po izdatnejših padavinah. Ugotavljala sem, da je bilo prvo naraščanje koncentracije uranina v Timavi sočasno s povečanjem kalnosti (2.5.2005 ob 8.00). Sklepam, da povečana kalnost v Timavi odraža vodni val Reke, ki je pri Cerkvnikovem mlinu pred Škocjanskimi jamami dosegel maksimalni dnevni pretok 26.4.2005. Tako je voda potrebovala za okoli 40 km dolgo pot (zračna razdalja) dobrih 6 dni, kar da povprečno navidezno hitrost okoli 260 m/h.



Slika 5.7.6: Hidrogeološka karta Krasa z rezultati starejših sledenj, označenimi lokacijami injiciranja in vzorčenja pri poskusu v letu 2005 ter rezultati tega sledenja (Legenda: 1. dobro prepusten kredni apnenec, 2. nekoliko slabše prepusten kredni dolomit, 3. prepustni terciarni apnenci in dolomiti, 4. medzrnski vodonosnik, 5. zelo slabo prepusten eocenski fliš, 6. izvir Timave, 7. izvir, 8. črpališče, 9. piezometer, 10. s starejšim sledilnim poskusom dokazana podzemna vodna zveza, 11. kraška jama (a. Škocjanske jame, b. Kačna jama, c. Labodnica, d. Lazzaro Jerko, e. Gabranca), 12. ponikalnica, 13. površinski tok, 14. odlagališče Sežana, 15. naselje, 16. državna meja, 17. pri sledenju 2005 dokazane podzemne vodne zveze). Mesta zajemanja vzorcev (številke v rjavi barvi): 1. izviri Timave, 2. izvir Sardoč, 3. izvir Moščenice-N, 4. Brojnica pri Nabrežini, 5. črpališče Klariči (Kogovšek in Petrič, 2007).

V času sledilnega poskusa so potekale tudi meritve nivojev Reke pri Cerkevnikovem mlinu ter na več točkah podzemne Reke: v Martelovi dvorani Škocjanskih jam, v Kačni jami in v Jami 1 v Kanjaducah (Gabrovšek in Peric, 2006) s poudarkom na spremljanju poplavnih valov. Največji val je bil aprila 2005, ko je dosegel 25. aprila maksimalni pretok pri Cerkevnikovem mlinu $120 \text{ m}^3/\text{s}$. Ta poplavni val Reke pri Cerkevnikovem mlinu je dosegel območje pod odlagališčem odpadkov Sežana oz. Jamo 1 v Kanjaducah že v 10 urah, kar da oceno hitrost pretakanja podzemnega toka Reke na tem odseku okoli 1800 m/h . Na tej osnovi izračunana nadaljnja hitrost pretakanja do Timave (razdalja med odlagališčem in izviro Timave je dobrih 21 km) je bila kar 10-krat manjša (okoli 150 m/h). O velikih hitrostih podzemnega

pretakanja Reke v vodnih valovih do Timave, okoli 1000 m/h in več, ki sta jih ugotavljala na osnovi meritev nivojev, temperature in SEP, sta poročala tudi Cucchi in Zini (2002).

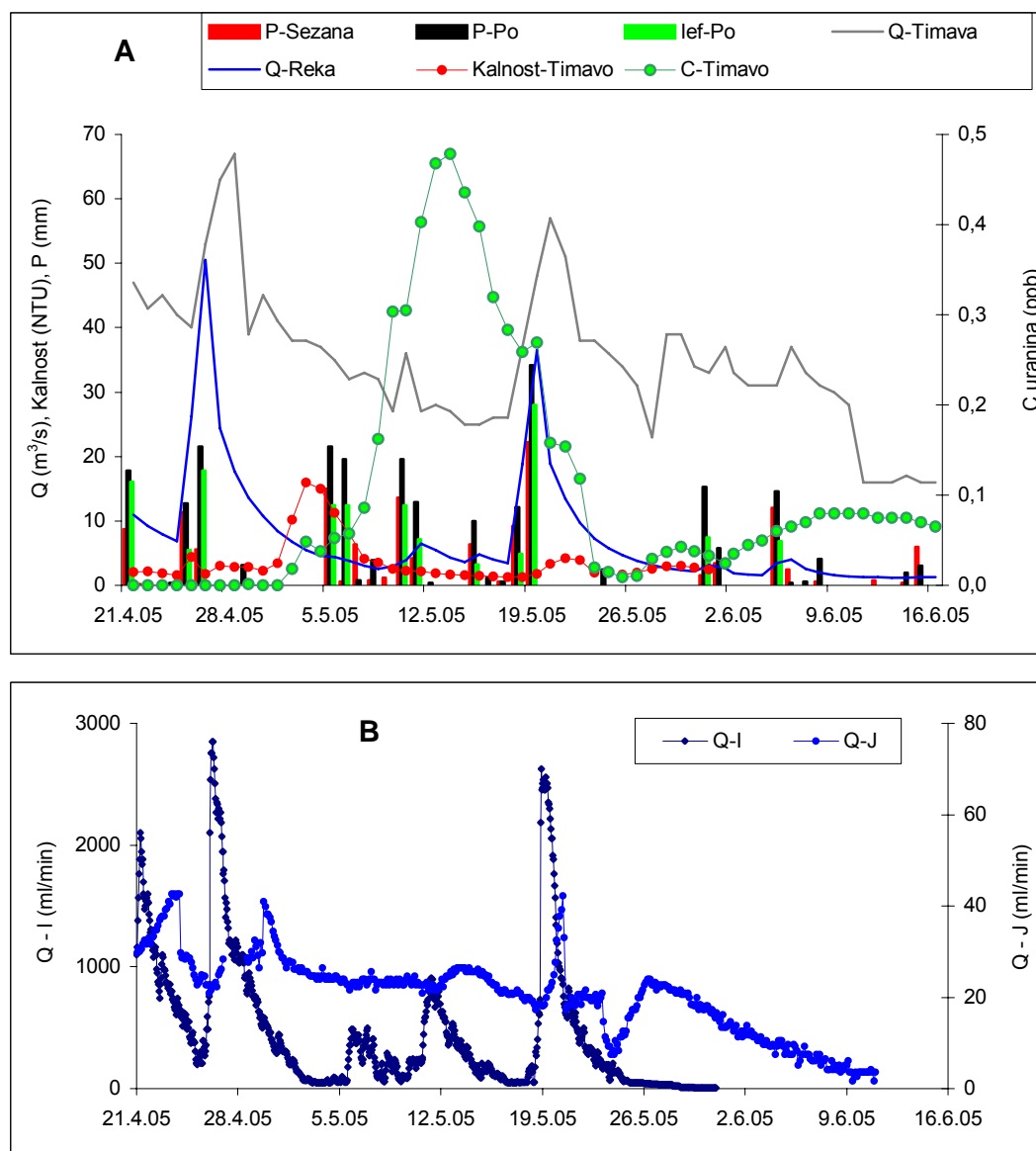


Slika 5.7.7: Pretok Timave in pojavljanje injiciranega sledila v Timavi in Brojnici pri Nabrežini v obdobju 17 mesecev po injiciranju.

Na območju pod odlagališčem odpadkov Sežana je Reko najprej dosegel del injiciranega uranina, ki je pritekkel predvsem po najprej prepustnejših prevodnikih. Skleпам, da je sledilo doseglo Reko že pred vodnim valom Reke (26.4.2005) in da je z njim potovalo do Timave. Sledilo je za pot skozi vadozno cono do podzemne Reke tako potrebovalo skoraj 6 dni (140 h), kar da maksimalno navidezno hitrost pretakanja skozi vadozno cono okoli 1,5 m/h. V sledenjih skozi 100 m debelo vadozno cono Postojnske jame, kjer pa je bilo sledilo injicirano 4 m pod površjem, je bila maksimalna hitrost pretakanja 4,9 m/h v namočenem obdobju, ob zalivanju sledila z večjo količino vode pa celo 80 m/h (Kogovšek, 1997a; 2000). Test požiralnosti vode (slika 5.7.4) pred injiciranjem je pokazal neovirano odtekanje, medtem ko je enak test na odlagališču Kočevje (poglavje 5.7.3) pokazal, da vrhnja plast lahko pomembno zmanjšuje hitrost pretakanja.

Maksimalno koncentracijo uranina v Timavi smo izmerili po nadaljnjih 11 dneh (13. maja 2005), ko je padlo v času enega tedna le 42 mm dežja, ki je dodatno spiral zaostali uranin. Skozi vadozno cono Postojnske jame smo tedaj ugotavljali stalno pretakanje po slabše prepustnih prevodnikih (curek J) ter občasno povečano po

prepustnejših prevodnikih (curek I). To nakazuje razmere počasnega spiranja injiciranega uranina skozi vadozno cono. Pretok Reke je bil nizek in je malo nihal.



Slika 5.7.8: Padavine na odlagališču odpadkov Sežana in nad Postojnsko jamo z efektivno infiltracijo (I_{ef}), pretok Reke in Timave ter kalnost in koncentracija uranina v Timavi (A); ter sočasno oblikovanje vodnih valov curkov I in J v Postojnski jami (B).

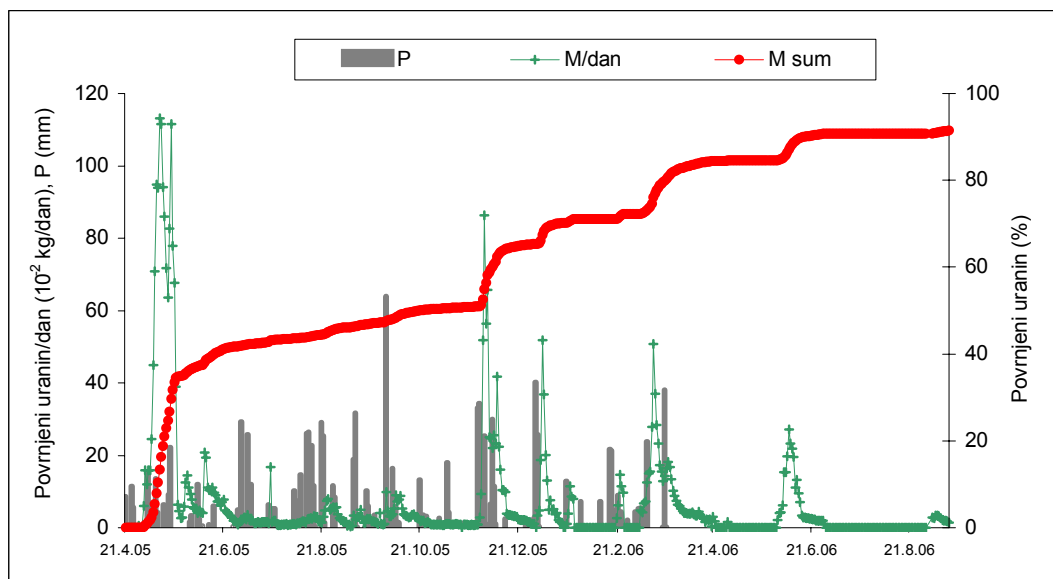
Ob doseženi maksimalni koncentraciji sledila je pretok Timava dosegal le $27 \text{ m}^3/\text{s}$ in je bil v upadanju. Šele ko je bila koncentracija uranina že v upadanju, se je po 38 mm dežja, ki je padel v petih dneh od 15. do 19.5.2005, povečal prenos uranina. Dež je povzročil oblikovanje drugega vodnega vala Reke in Timave v obdobju po

injiciranju, ki je zniževal koncentracijo uranina, vendar pa je prišlo do pomembnega prenosa sledila, kar je razvidno iz slik 5.7.7 in 5.7.8. Tudi hidrogrami curkov v Postojnski jami nakazujejo vodne valove, ki so vplivali na prenos skozi vadozno cono. Sklepam, da je do takega dogajanja prihajalo tudi v vadozni coni pod odlagališčem.

Predvidevam, da je bilo ob ugotovljeni dobri požiralnosti v času injiciranja, pomembno dodatno spiranje s 14 m³ vode iz cisterne, ki je podobno kot ob sledenju nad Kristalnim rovom leta 1993 (poglavje 5.6.1), potisnila del sledila le po najprepustnejših prevodnikih. Iztekanje uranina se je povečalo po padavinah, ki pa so bile skromne. Sklepam, da je šlo v takih razmerah najprej za prenos predvsem po prepustnejših prevodnikih, podobno kot smo sočasno ugotavljali za pretakanje skozi vadozno cono Postojnske jame (curek I) (slika 5.7.7). Sorazmerno hiter prenos 40 % injicirane količine uranina v času dveh mesecev, ko so padle le manjše, neintenzivne padavine, kaže na veliko prepustnost vadozne cone oz. najprepustnejših prevodnikov v vadozni coni na območju injiciranja.

Od konca junija do konca novembra 2005 je na območju odlagališča Sežana padlo prek 540 mm (slika 5.7.8). Timava (sliki 5.7.7 in 5.7.11) in Reka sta dosegali v tem obdobju nizke pretoke z občasnimi manjšimi poplavnimi valovi. Koncentracija uranina v Timavi je nihala le nekoliko nad mejo določljivosti. Očitno so padavine potiskale uranin le globlje v vadozno cono, le majhne količine pa so dosegle prek Reke tudi izvir Timave.

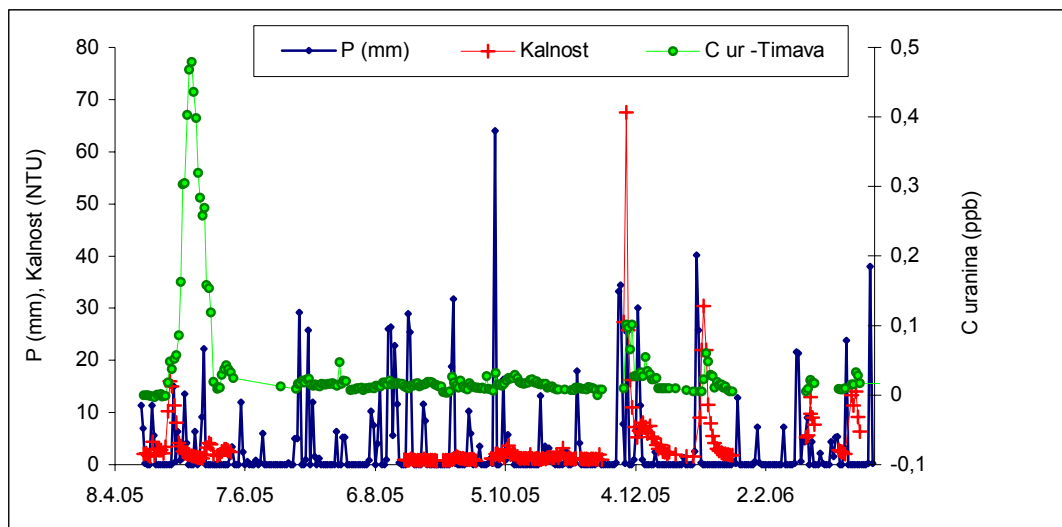
Nad Postojnsko jamo je v istem obdobju padlo 600 mm dežja, ki se je pretežno shranjeval v vadozni coni. Šele po padavinah septembra 2005, ki so bile enako intenzivne in izdatne kot na območju Sežane, je prišlo do nekoliko povečanega iztekanja vode iz vadozne cone in oblikovanja manjših vodnih valov (sliki 5.1.14 in 5.1.15), kar je skladno s skromnim prenosom sledila skozi vadozno cono pod odlagališčem Sežana (slika 5.7.9). Očitno se v poletnih obdobjih tudi večje padavine, ko evapotranspiracija pomembno zmanjšuje delež padavin, ki se infiltrirajo, pretežno shranjujejo v slabo zapolnjeni vadozni coni in ne omogočajo intenzivnejšega prenosa topnih snovi skozi več kot 200 m debelo vadozno cono. Zato čakajo uskladiščene na prve večje in intenzivnejše padavine.



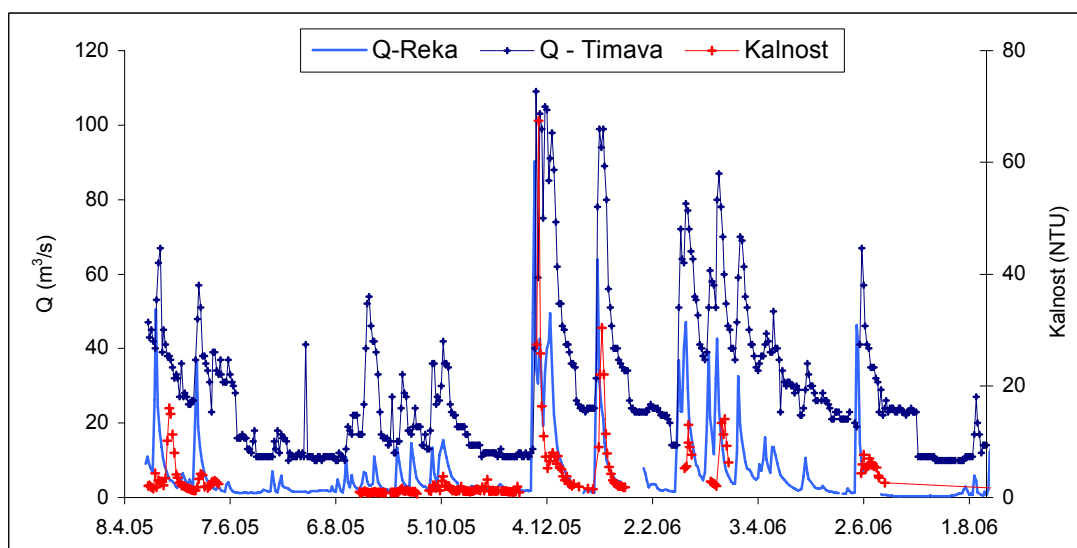
Slika 5.7.9: Dinamika iztekanja injiciranega uranina skozi Timavo ob meritvah padavin na odlagališču (do marca 2006): dnevne količine izteklega uranina (M/dan), iztekanje uranina s časom (M sum).

Te so nastopile šele konec novembra (100 mm v 5 dneh, nato pa po treh dneh še 50 mm), ki so oblikovale obsežen vodni val Timave, ki je trajal kar 2 tedna, podobno kot vodni val curka J v Postojnski jami, medtem ko je curek I, ki hitro odvaja padavine po prepustnejših prevodnikih, oblikoval le 9 dni trajajoč vodni val. V vadozni coni pod odlagališčem Sežana je prišlo tedaj do ponovnega pomembnega prenosa shranjenega sledila po prvem izrazitem pojavu maja, ko je izteklo 35 % injiciranega sledila. Tokrat je skozi izvir Timave izteklo 14 % injicirane količine (slika 5.7.9). Spiranje uranina se je nadaljevalo do junija 2006, ko je izteklo skupno 91 % injicirane količine sledila.

Pretok Reke na ponoru v Škocjanske jame po padavinah narašča sočasno s pretokom Timave, ali celo nekoliko prej. Skleпам, da se v izviru Timave Reka odrazi v velikih vodnih valovih v povišani kalnosti (sliki 5.7.10 in 5.7.11) nekako po 3 do 5 dneh (v okviru dnevnih meritev!), kar pomeni v danih razmerah povprečno navidezno hitrost pretakanja med Škocjanskimi jamami (Cerkvenikov mlin) in Timavo nad 280 m/h. Le v majhnem vodnem valu aprila 2005, ko se je začel prehod sledila skozi Timavo, sem ugotavljala zamik za dobrih 6 dni.



Slika 5.7.10: Meritve kalnosti in koncentracije uranina (c_{ur}) v Timavi v času sledilnega poskusa z odlagališča odpadkov Sežana ter padavine na območju odlagališča.



Slika 5.7.11: Pretok Reke pri Cerkvnikovem mlinu, pretok in kalnost Timave v času sledenja.

Po skromnejših padavinah (69 mm) v začetku januarja 2006 se je uranin pojavil v Timavi dan kasneje, kot je nastopila največja kalnost, kar nakazuje počasnejši prehod glavnine uranina skozi vadozno cono ob manj izdatnih in intenzivnih padavinah.

Lahko sklenem, da prenos sledila oz. topnih kontaminantov s površja do kraških izvirov pogojuje predvsem prenos skozi vadozno cono. Ta prenos pogojujejo padavine, ki pa se v poletno-jesenskem obdobju predvsem le shranjujejo v vadozni

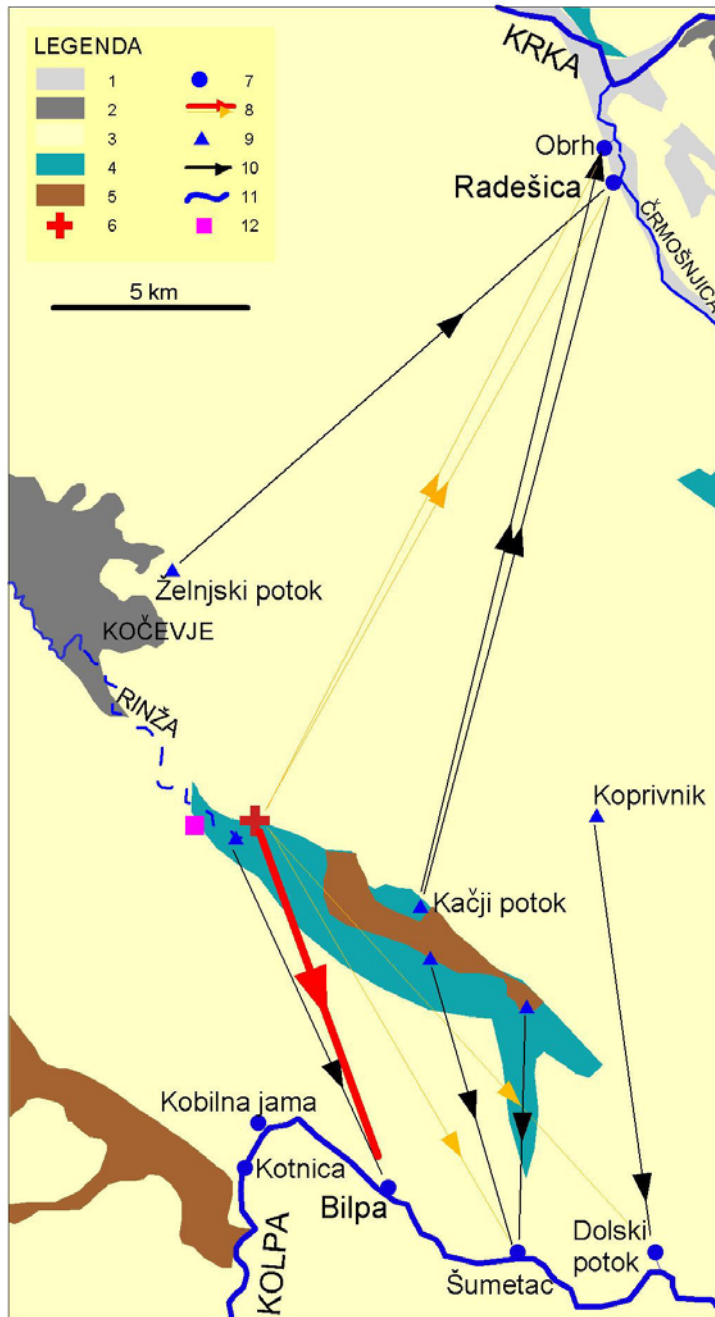
coni in je zato tedaj prenos sledila skozi vadozno cono sorazmerno skromen, v kolikor celo ne izostane. Očitno pa tedaj prihaja do pomembnejšega prenosa v sami vadozni coni, saj smo v prvem intenzivnejšem dežju po takem obdobju beležili ponoven intenzivnejši prenos sledila do izvira. Ta prenos je odvisen predvsem od količine in intenzivnosti padavin oz. od načina infiltracije. V primeru sledenja s sežanskega odlagališča odpadkov so skromne padavine v daljšem obdobju narekemale dolgotrajno postopno spiranje sledila. Enako se spirajo tudi kontaminanti iz odlagališča, ki pomeni stalen vir onesnaževanja.

5.7.3 Sledenje z odlagališča odpadkov Mozelj pri Kočevju

Medtem ko smo na sežanskem odlagališču odpadkov s poskusom požiralnosti ugotavljali neoviran odtok tudi s poraslega terena, smo na kočevskem odlagališču ugotavljali slabo požiralnost. To je nakazovalo slabše prepustno vadozno cono, ki je bila ocenjena na 30 do 70 m debeline (Kogovšek in Petrič, 2007). Spiranje injiciranega sledila (slika 5.7.12) z dodatno vodo je potekalo precej dlje.



Slika 5.7.12: Injicirano sledilo (injiciranje je trajalo 15 minut) smo sprali s cisterno vode (5 m^3) v času nekaj ur, ker je bila požiralnost sorazmerno slaba.

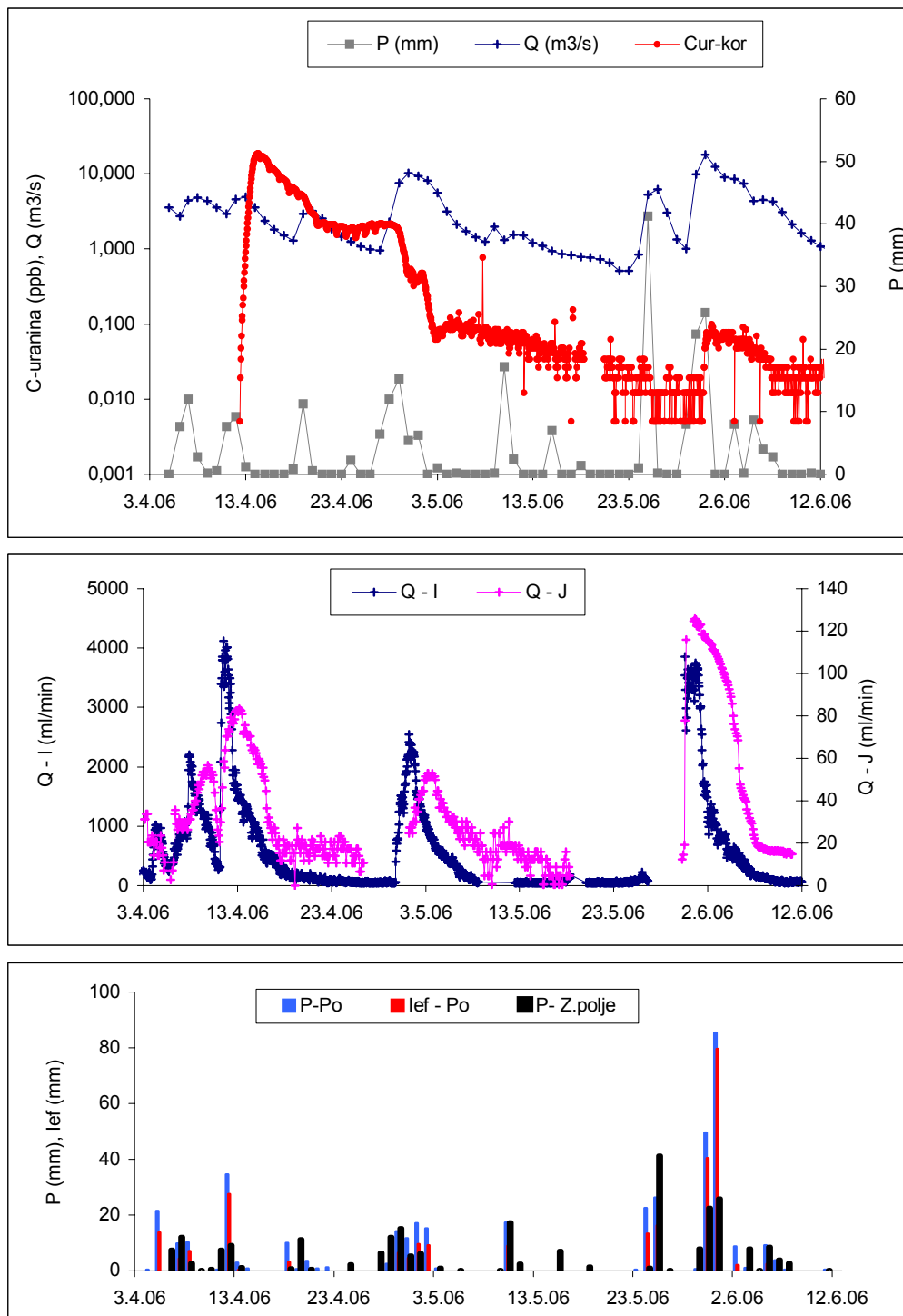


Slika 5.7.13: Hidrogeološka karta širšega območja odlagališča Mozelj z rezultati sledilnih poskusov (Legenda: 1. kvartarne rečne naplavine, 2. kvartarni jezerski sedimenti, 3. kredni in jurski apnenci in dolomiti, 4. triasni dolomiti, 5. permijski klastiti, 6. deponija Mozelj - točki injiciranja sledil ob sledenju v aprilu 2006, 7. kraški izvir - točka zajemanja vzorcev ob sledenju aprila 2006, 8. s sledenjem aprila 2006 dokazana glavna in stranska smer podzemnega pretakanja, 9. točka injiciranja sledila pri starejših sledenjih, 10. dokazana smer podzemnega pretakanja, ugotovljena pri starejših sledenjih, 11. površinski tok, 12. padavinska postaja).

Hidrološke razmere v času injiciranja 5.4.2006 so bile dokaj podobne kot ob sledenju na sežanskem odlagališču eno leto prej. Nakazovale so počasno pretakanje, vendar pa se je sledilo pojavilo v kraškem izviru Bilpa že 7 dni po injiciranju (sliki 5.7.13 in 5.7.14). V danih razmerah je že 5 m³ vode, s katero smo sprali sledilo in 41 mm dežja, ki je sledil, zadostovalo za pojav sledila v Bilpi, ko ni prišlo do opaznejšega razredčenja. Kar 80 % sledila je izteklo v prvem sledilnem valu v treh tednih, večina v prvih dveh tednih ob upadanju pretoka Bilpe s 4,5 m³/s na 1 m³/s. Vse to nakazuje pod površjem zelo dobro prepustno vadozno cono. Skleпам, da se je voda s sledilom kmalu pridružila hitremu podzemnemu toku Rinže, kar je pogojevalo sorazmerno hiter pojav sledila v Bilpi.

Razporeditev padavin na območju odlagališča (Zajčje polje) je bila podobna kot nad Postojnsko jamo, le količina je bila običajno manjša (slika 5.7.14). Primerjava prenosa sledila s sočasnim pretakanjem skozi vadozno cono Postojnske jame nakazuje začetno skromno iztekanje iz vadozne cone, ki se je povečalo po prvih padavinah, posebno tistih 11. in 12.4.2006. Le z enodnevnim zamikom za povečanim iztekanjem skozi curka I in J, ko predpostavljам, da je tudi injicirano sledilo prešlo vadozno cono pod odlagališčem, se je začel intenziven prenos sledila skozi izvir Bilpe. Ocenjujem, da so prve količine sledila potrebovale za prehod vadozne cone v danih razmerah nekako 140 h, kar da ocenjeno navidezno hitrost pretakanja okoli 0,5 m/h. Za nadaljnjo pot okoli 10 km do izvira Bilpe pa je bil potreben približno en dan, kar da maksimalno hitrost pretakanja okoli 400 m/h.

Začetno iztekanje sledila skozi Bilpo visokih koncentracijah (slika 5.7.14), ki je trajalo teden dni, sovpada s povečanim pretakanjem skozi curek J, ki predstavlja pretakanje skozi slabše prepustni del vadozne cone nad Postojnsko jamo. Največja koncentracija sledila je nastopila v Bilpi en dan za največjim pretokom v vodnem valu curka J, medtem ko je upadanje sledila v Bilpi zaostajalo za nekako 3 dni za upadanjem pretoka curka J. To si razlagam delno z vse počasnejšim pretakanjem po kanalih do izvira kot tudi z manjšim razredčevanjem zaradi upadanja pretoka Bilpe.

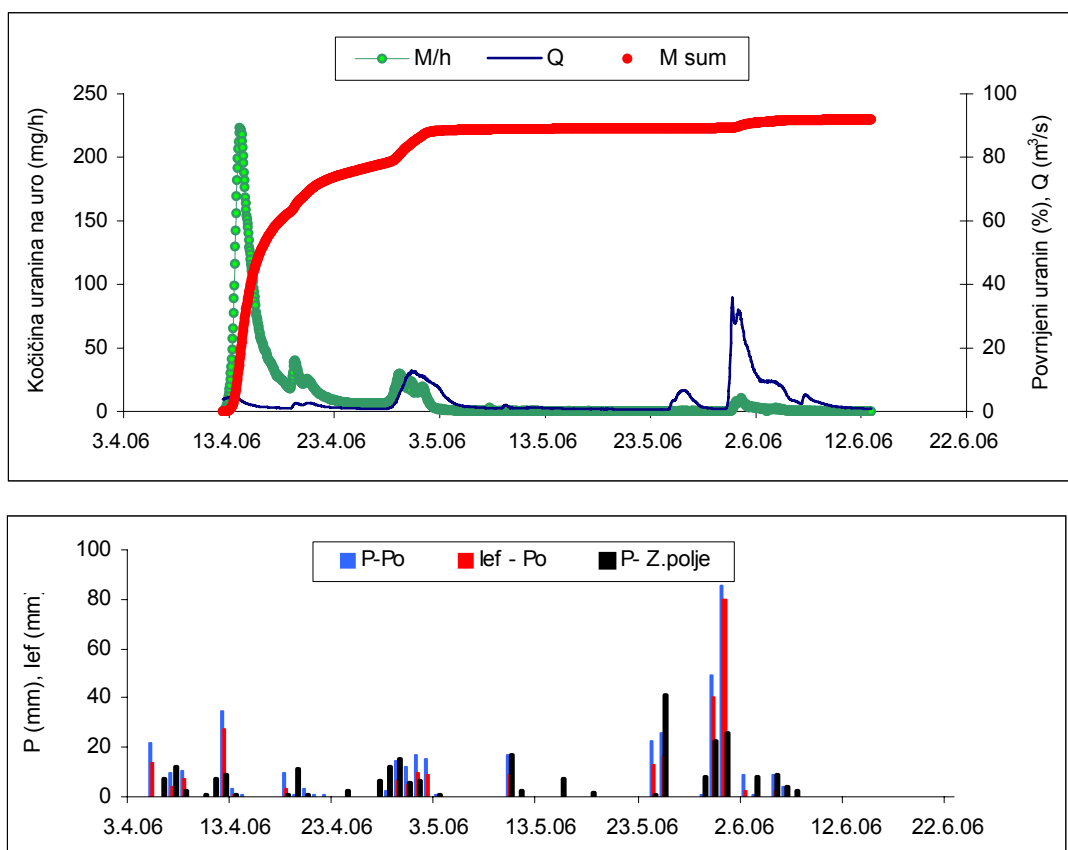


Slika 5.7.14: Prenos injiciranega sledila na odlagališču odpadkov Kočevje do izvira Bilpa, njen pretok ter padavine v Zajčjem polju in sočasno pretakanje skozi vadozno cono Postojnske jame.

Padavine, ki so sledile konec aprila in oblikovale vodni val Bilpe z maksimalnim pretokom prek 10 m³/s, so pospešile spiranje sledila, a je prišlo hkrati zaradi razredčevanja do upadanja koncentracije sledila, ki je v petih dneh upadla pod

vrednost 0,1 ppb. Ta vodni val sovпада z oblikovanjem vodnih valov v curkih skozi vadozno cono Postojnske jame.

Pretok Bilpe je pred ponovnimi padavinami 25.5.2006 dosegal vrednost le 0,5 m³/s, koncentracija sledila pa je nihala okoli meje določljivosti. Po padavinah je pretok v glavnem vodnem valu dosegel kar 18 m³/s, največjo vrednost v času sledilnega poskusa. Zopet je prišlo do povečanega spiranja, a le v koncentracijah pod 0,09 ppb. Nato je iztekanje sledila do meje določljivosti trajalo še dober mesec. Zaostalo sledilo se je v nizkih koncentracijah spiralo še avgusta 2006 po izdatnih padavinah, ko so se tudi v Postojnski jami oblikovali vodni valovi curkov I in J ter po vsakih intenzivnejših in izdatnejših padavinah vse do aprila 2007.



Slika 5.7.15: Bilpa: količinski prenos sledila na uro (M/h), povrjnjena količina sledila (%), pretok Bilpe in padavine v sledilnem poskusu z odlagališča Kočevje.

V treh tednih od prvega pojava sledila v Bilpi je skozi izvir izteklo kar 89 % injiciranega sledila, v vodnem valu v začetku junija pa še dobra 2 % (slika 5.7.15). Vse to kaže na izredno veliko prepustnost vadozne cone pod odlagališčem ter

neposredno nadaljnjo povezavo z izviro Bilpe. To nakazuje, da kljub ugotovljeni slabi požiralnosti vrhnje plasti, obstaja zelo neposredna povezava, ki omogoča hitro pretakanje skozi vadozno cono in naprej v smeri izvira Bilpe že po manjših padavinah. Navidezna dominantna hitrost pretakanja v 10 km oddaljeno Bilpo je bila 48 m/h, v primeru sežanskega sledenja pa v 34 km oddaljeno Timavo 39 m/h. Padavinske in hidrološke razmere so bile v primeru obeh sledenj primerljive.

5.7.4 Sklepi

Na osnovi sledenja s površja nad Postojnsko jamo v sušnih razmerah, ko smo sledilo zalili z dodatno vodo, ugotavljam, da izlitje večje količine vode v kratkem času omogoči tudi v razmerah slabe namočenosti prsti in slabe zapolnjenosti vadozne cone pretakanje in delen prenos sledila. Vendar pa je zelo skromen in poteka le po tistih najbolj prepustnih prevodnikih. Nadaljnji prenos pogojujejo padavine.

Sledenje v primeru dobre namočenosti prsti in dobre zapolnjenosti vadozne cone pa je pokazalo, da poteka prenos takoj in zvezno po širši hierarhiji različno prepustnih prevodnikov.

V primeru sledenj z že omenjenih odlagališč smo sledila injicirali na površju in jih sprali z določeno količino vode, nadaljnje pretakanje pa prepustili padavinam. Sledenje z odlagališča Mala gora pri Ribnici v ugodnih hidroloških pogojih, ko so injiciranju sledile izdatne padavine, je pokazalo zelo hitro pretakanje skozi vadozno cono in naprej po sklenjenih kanalih.

Sledenje z odlagališč Sežana in Kočevje je pokazalo v razmerah, ko so injiciranju sledile le skromne padavine, počasnejši prehod vadozne cone. Do pomembnega prenosa injiciranega sledila je prišlo v prvem sledilnem valu, ko sta bila pretoka Timave in Bilpe v upadanju. Sledil je manj intenzivni, občasni prenos v obdobju enega leta, odvisno od razporeditve in količine padavin. Prenos skozi Timavo je bil postopen, kar je verjetno posledica tudi debelejše vadozne cone in daljšega podzemnega toka Reke z majhnim strmecem. Večina injiciranega sledila na kočevskem odlagališču je izteklo skozi Bilpo (velik strmec) že v pol meseca.

Tabela 5.7.1: Ocenjene maksimalne navidezne hitrosti pretakanja skozi vadozno cono in maksimalne hitrosti podzemnih tokov na obravnavanih območjih ter njihov strmec.

Sledenje	$V_{\text{skozi vadozno cono}}$ (m/h)	$V_{\text{podzemni tokovi}}$ (m/h)	Strmec podzem. toka (‰)
Odlagališče Ribnica	4	350	16,6
Odlagališče Sežana	1,5	150	1
Odlagališče Kočevje	0,5	400	22,6

V primeru sledenja z območja vojaškega poligona Poček (Kogovšek, 1999) so bile ob enakem načinu injiciranja (injiciranje v razpoko in zalivanje z 11 m³ vode) potrebne za prenos sledila znatno večje padavine (prek 100 mm). Prenos sledila je potekal v treh delih, ko so se oblikovali trije večji samostojni sledilni valovi, vsakokrat po izdatnejših padavinah, največji šele po izdatnih jesenskih padavinah 5 mesecev po injiciranju. To do neke mere lahko odraža geološko zgradbo, vendar pa menim, da je pomemben vzrok za tak prenos le majhno razpršeno onesnaževanje na Počku v primerjavi z odlagališči odpadkov, kjer sklepam, da prihaja do pomembnega raztapljanja karbonatne kamnine v vadozni coni pod odlagališči ob odtoku izcednih voda (poglavje 5.5). Učinkovanje teh voda veča prepustnost prevodnikov pod odlagališči, kar se odrazi v hitrem odtekanju voda. V primeru sledenj z odlagališč smo sledila injicirali neposredno ob odlagališčih, ki obratujejo že blizu 30 let.

Za sledenja oz. prenos kontaminantov s površja do izvirov je značilen prenos v več zaporednih valovih. Prenos pogojujejo predhodna namočenost prsti in zapolnjenost vadozne cone z vodo ter padavine, ki sledijo.

Na osnovi vseh teh spoznanj zaključujem, da v primeru točkovnih odtokov onesnaženih voda na kraškem svetu, kot so tudi izcedne vode odlagališč odpadkov, prihaja do intenzivnejšega raztapljanja apnenca, kar je bilo obdelano že v poglavju 5.5. To vodi do postopnega oblikovanja vse bolj prepustnih vodnih poti, ki odvajajo padavine oz. izcedne vode iz odlagališč vse hitreje skozi vadozno cono do podzemnih vodnih tokov v smeri kraških izvirov. To pojasnjuje relativno hitro pretakanje sledil skozi vadozno cono odlagališč Ribnica, Sežana in Kočevje že po

skromnih padavinah in pojav večine injiciranega sledila v prvem sledilnem valu, v primeru sežanskega odlagališča 40 %, v primeru kočevskega kar 80 % v primerjavi s sledenjem s Počka, kjer je skozi Malenščico izteklo v prvem sledilnem valu le 4 % injiciranega sledila.

Vse večja prepustnost pod odlagališči odpadkov pomeni hitrejši prenos kontaminantov v izvire ter postopno slabšo kakovost teh izvirov. V kolikšni meri pa se odrazi v povečanih vrednostih posameznih parametrov, je odvisno od razredčevanja, od dotoka voda s celotnega zaledja. Pogosto razredčevalni učinki lahko prekrijejo tak prenos.

V okviru načrtnega varovanja kakovosti kraških izvirov, posebno tistih, ki so zajeti za oskrbo prebivalstva s pitno vodo, se danes uporabljajo številne metode oz. kombinacije različnih metod (Biondić, 2000; Biondić s sodel., 2006), med katerimi pomembno mesto zavzemajo tudi sledilni poskusi z naravnimi in umetnimi sledili. Vse to znanje je potrebno tudi pri izdelavi kart ranljivosti zaledij in kart ogroženosti kraških izvirov (Ravbar, 2007). Težnja je čim bolje spoznati značilnosti vodonosnikov, saj le na osnovi dobrega poznavanja njihovega delovanja lahko sklepamo na prenos kontaminantov, in lahko uspešno dolgoročno varujemo kakovost njihovih voda.

5.8. VLOGA VADOZNE COLE V VODONOSNIKU – PRIMER IZVIRA KORENTAN

Vzporedno z opazovanji v Kristalnem rovu je potekal tudi monitoring na kraškem izviru Korentan pri Postojni. Oba poligona pripadata isti strukturni enoti, ki jo gradi pretežno zakraseli, dobro prepustni apnenec. Območje med njima sicer pokriva fliš z razvito površinsko drenažno mrežo, vendar je debelina fliša relativno majhna, saj je kraški vodonosnik razvit tudi pod njim, kar je pokazalo sledenje (Kogovšek, 1999). Lahko torej rečemo, da oba poligona generalno pripadata istemu kraškemu vodonosniku. Ker sta znotraj območja Pivške kotline, so za oba značilne tudi zelo podobne klimatske razmere.

Korentan izvira na kontaktu s flišem na severnem robu kraškega vodonosnika na območju Orehovškega krasa, ki ga gradijo kredni in paleocenski apneneci. Glede na rezultate sledilnih poskusov (Gospodarič in sodel., 1970; Schulte 1994), poznane geološke razmere in hidrološko bilanco je bil obseg zaledja izvira ocenjen na 5,8 km² (Petrič in Šebela, 2004). Od tega je le 0,2 km² flišnega zaledja ponikalnice Črmelice. Povprečni delež tega sekundarnega napajanja je manj kot 4 %, je pa možno, da je vpliv ponikalnice na izvir večji po intenzivnih večjih padavinskih dogodkih, posebno ob dobri namočenosti prsti.

V izviru Korentan so potekale meritve nivoja, temperature in specifične električne prevodnosti vode v hidrološkem letu 2003-2004 med 11.10.03 in 31.8.04. Tako je bilo možno ob primerjavi meritev na obeh poligonih ugotoviti vpliv in pomen procesov v vadozni coni na funkcioniranje izvira.

5.8.1 Primerjava učinkovite infiltracije in hidrogramov izvira in curkov

Za hidrološko leto 2003-2004 so bile izmerjene padavine na postaji Postojna privzete kot reprezentativne za oba študijska poligona. Pri tem je bila ob enakovrednih meteoroloških in pedoloških značilnostih upoštevana razlika v rabi tal, saj v zaledju Korentana prevladuje gozd (80 %), nad Postojnsko jamo pa travnik (20

% gozda). Za izračun efektivne infiltracije je bil uporabljen model PREPAD, ki je bil izdelan v okviru študije značilnosti odnosa med napajanjem in praznjenjem kraškega vodonosnika v zaledju izvirov Vipave in temelji na metodi bilance vode v tleh (Petrič, 2002). Na obeh obravnavanih poligonih je efektivna infiltracija značilno manjša od padavin, predvsem v spomladanskem in poletnem obdobju, ko so vrednosti za efektivno infiltracijo nad jamo večje kot v zaledju Korentana.

V hidrološkem letu 2003-2004 je bila skupna količina efektivne infiltracije v zaledju Korentana 998 mm, nad jamo pa 1242 mm. Čeprav te razlike ne gre zanemariti, pa na režim spreminjanja pretokov vpliva predvsem razporeditev te vhodne funkcije v času. Tako sem primerjala hidrograme curkov v jami in hidrogram izvira Korentan.

Pretok Korentana se giblje med 1 l/s in 3 m³/s s srednjim pretokom 0,194 m³/s. Pretoki curkov so bistveno manjši (poglavje 5.1). Curek I ob nizkem vodostaju presahne, maksimalna vrednost pa doseže okoli 4 l/min. Dolgoletna opazovanja so pokazala na maksimiranost pretoka ob visokih vodostajih, ko so vrhovi hidrograma »odsekani«. Sklepamo lahko, da del najvišjih voda odteka po vzporednem neznanem prevodniku. Curka J in L sta stalna, maksimalni vrednosti pretokov v obravnavanem obdobju pa sta bili 109 ml/min oz. 3,7 ml/min.

Primerjava reakcij na padavine oz. primerjava hidrogramov curkov in hidrograma izvira Korentan je podana na sliki 5.8.1. Curek I se zelo hitro odzove na vsakokratni padavinski dogodek, pretok mu hitro naraste in nato sorazmerno hitro upade. Na padavine reagira praktično sočasno z izvirov Korentana. Curek J reagira z določenim časovnim zamikom za curkom I, oblikuje dalj časa trajajoče vodne valove brez opaznejših nihanj pretoka, kar nakazuje dušenje v njegovem zaledju. Curek J se je v hidrološkem letu 2003-04 podobno kot curek I odzval na vse izdatnejše padavinske dogodke, odstopa dogajanje po maju 2004, ko se ni več odzival na padavine. Curek L je na padavine konec oktobra 2003 reagiral le minimalno in z velikim časovnim zamikom za curkoma I in J, nato pa začel oblikovati en sam, tri mesece trajajoči vodni val. Njegov pretok je nato upadel in vztrajal do konca hidrološkega leta na minimalnih vrednostih kljub občasno sorazmerno izdatnim

padavinam, ko sta curka I in J oblikovala najizrazitejše vodne valove v hidrološkem letu (poglavje 5.1).

Primerjava hidrogramov izvira Korentan in curka I je pokazala, da njuni vrhovi skozi celotno hidrološko leto sovpadajo. Korentan je oblikoval največje vodne valove in dosegal najvišje pretoke v jesensko-zimskem obdobju, ko je imel tudi curek L stalno visok pretok. Tako je od konca novembra 2003 do konca februarja 2004 večkrat presegal pretok $3 \text{ m}^3/\text{s}$, medtem ko kasneje do konca hidrološkega leta, v spomladansko-poletnem obdobju, teh vrednosti ni več dosegal. Tedaj je imel curek L minimalne pretoke, medtem ko sta curka I in J oblikovala obsežne vodne valove z maksimalnimi pretoki.

Glede na to, da so največji vodni valovi Korentana nastopali v obdobju, ko je curek L stalno dosegal visoke vrednosti pretoka, bi lahko sklepali na pomemben delež napajanja izvira z vodo, ki je bila predhodno uskladiščena v slabše prepustnih conah kraškega vodonosnika in so jo šele dovolj intenzivne padavine iztisnile iz njih. Ob dobri namočenosti prsti in predhodni zapolnjenosti vadozne cone je sistem razpok v vadozni coni hidravlično povezan, kar omogoča ob padavinah njihovo infiltracijo po celotni hierarhiji prevodnikov in posledično praznjenje celotnega sistema, tudi tistega dela z najslabšo prepustnostjo, ki se sicer prazni le občasno (curka J in L). V teh slabše prepustnih delih vadozne cone pa se voda uskladišči tudi za daljši čas in napaja izvir v sušnih obdobjih, ko ponikalnica in bolj prepustne razpoke nimajo vode (sliki 5.8.1 in 5.8.2).

Na pretok Korentana vpliva tudi občasna ponikalnica Čermelice. Njen prispevek je največji v jesensko-zimskem namočenem obdobju po izdatnih padavinah, ko je ETR v primerjavi s pomladansko-poletnim obdobjem majhna, in priteče do ponora več vode. Nekajkratne razširjene kemijske analize ponorne vode v Čermelicah in Korentana (Schulte, 1994) nakazujejo nižje vrednosti SEP in nižje vrednosti razmerja Ca/Mg (8,2) ter višjo vsebnost silicijeve kisline ($2 \text{ mg SiO}_2/\text{l}$) ponornice v Čermelicah v primerjavi s Korentanom. Te komponente lahko obravnavamo kot naravna sledila. Tako ob srednjih pretokih Korentana nekoliko nad 200 l/s nižja vrednost Ca/Mg (27) in višja vsebnost silicijeve kisline ($1,14 \text{ mg SiO}_2/\text{l}$) v Korentanu

nakazuje večji delež ponikalnice, kot ob nižjem vodostaju s pretokom 90 l/s, ko je bilo razmerje Ca/Mg 38, vsebnost silicijeve kisline le 0,8 mg SiO₂/l.

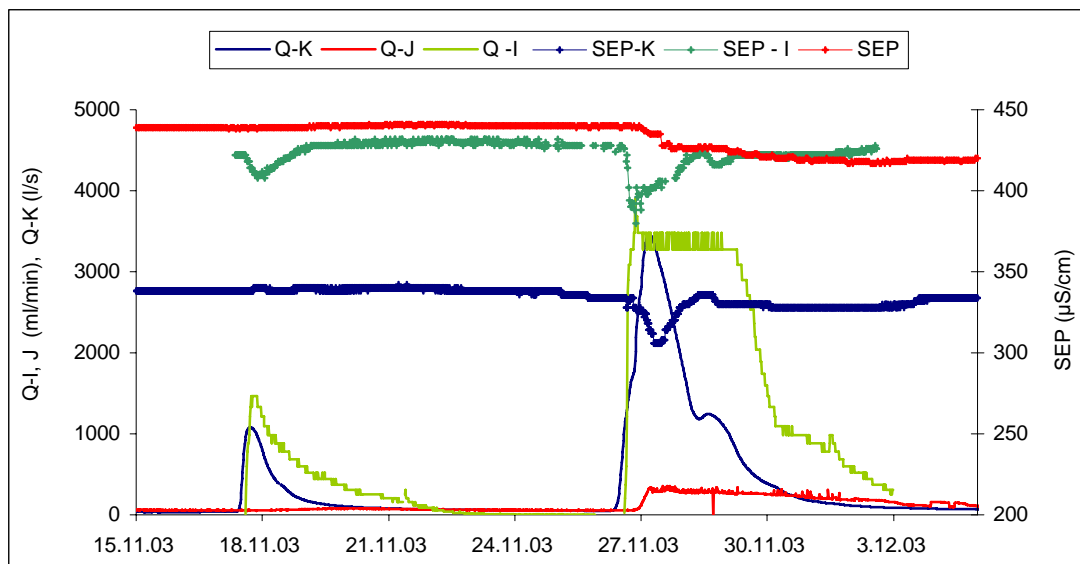
Korentan je oblikoval v spomladansko-poletnem obdobju, v primerjavi s curki v Postojnski jami, opazno skromnejše vodne valove. To bi lahko razložila z manjšo učinkovito infiltracijo v tistem obdobju v zaledju Korentana (slika 5.8.1). Marca 2004, ko je bil na površju sneg, pa bi skromnejše vodne valove morda lahko razložili z verjetnostjo, da je v zaledju Korentana padlo manj snega kot nad Postojnsko jamo. Te razlike bi lahko pojasnile le meritve padavin v zaledju Korentana, a tedaj nismo razpolagali z dovolj ustrezne opreme.

5.8.2 Potek specifične električne prevodnosti (SEP) v času hidrološkega leta

Iz slike 5.8.23 je razviden potek SEP in pretoka v opazovanem hidrološkem letu za izvir Korentan in curek J. Opazen je trend upadanja SEP Korentana z izhodne vrednosti 340 $\mu\text{S}/\text{cm}$ na 310 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ob koncu hidrološkega leta ob sicer značilnih upadih SEP v vodnih valovih. Podobne upade SEP sem beležila v velikih vodnih valovih v curku I v času meritev v treh hidroloških letih (poglavje 5.2.2). V curku I v velikih vodnih valovih SEP ob naraščanju pretoka hitro upada in se nato hitro vrača na izhodno vrednost, ko pretok šele začne upadati. V letu 2003-04 razpolagam zaradi težav na terenu le s podatki za krajše obdobje (slika 5.8.4). SEP curka J je v času opazovanega hidrološkega leta postopno upadala s 425 na 410 $\mu\text{S}/\text{cm}$. V prvih vodnih valovih po poletni suši pa je prišlo do skoraj enomesečnega iztekanja vode z višjo vrednostjo SEP (do 443 $\mu\text{S}/\text{cm}$).

V jesenskem namočenem obdobju, konec novembra 2003, so se z manjšimi časovnimi zamiki za povečanjem pretoka Korentana po padavinah odzvali tudi vsi trije curki (curek I le 3 ure, curka J in L pa 10 ur). SEP v curku I je začela upadati hkrati z naraščanjem njegovega pretoka, to je že nekaj ur (5h) prej kot v Korentanu, medtem ko je v curku J začela upadati nekaj ur kasneje (5h). Minimalno vrednost (upad za 38 $\mu\text{S}/\text{cm}$) je curek I dosegel nekako 12 ur prej kot Korentan (upad za 24 $\mu\text{S}/\text{cm}$), medtem ko je do tedaj v curku J SEP upadla le minimalno (za 5 $\mu\text{S}/\text{cm}$) in je

upadala še nadaljnjih 6 dni. SEP Korentana je ob začetnem naraščanju pretoka le minimalno upadla, ko pa se je približeval maksimalni vrednosti, je začela SEP izraziteje upadati.



Slika 5.8.4: Potek SEP in pretokov Korentana ter curkov J in I v vodnem valu konec novembra 2003.

Iz tega sklepam, da je na zmanjšanje SEP Korentana v vodnih valovih vplival predvsem dotok vode po prepustnejših razpokah, kot je curek I, ki pa se v Korentanu odrazijo z bolj oddaljenih delov zaledja z določenim časovnim zamikom. Raziskave sestave vode curka I v letih 1988 do 2002 so pokazale visoke vrednosti nitratov, o-fosfatov, kloridov in sulfatov, kar je pogojevalo večje raztapljanje kamnine oz. hitrejše večanje prevodnikov tega curka. Zato sklepam, da imajo podobne razpoke v zaledju Korentana ob normalnem učinkovanju deževnice nekoliko manj prepustne prevodnike. Manj mineralizirano vodo prispeva tudi ponikalnica iz Čermelic, ki je od izvira oddaljena približno 2 km.

Če delež novo infiltrirane vode in ponikalnice v vrhu vodnega vala 27.11.2003 ocenimo na osnovi primerjave merjenih vrednosti SEP izvira Korentana ($306 \mu\text{S/cm}$) ter predpostavljenih vrednosti SEP za staro vodo, ki je bila predhodno uskladiščena v sistemu ($336 \mu\text{S/cm}$) in padavinsko vodo na osnovi dvoletnih meritev v Postojni (Kogovšek in Kranjc, 1989) ($40 \mu\text{S/cm}$), bi bil delež novo infiltrirane vode do 13 %

skupnega pretoka izvira. Pri tem je bilo upoštevano tudi to, da padavine ob prenikanju raztopijo še nekaj karbonatov (ocenjena SEP = 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$), vrednost ponikalnice v Čermelicah pa dosega vrednosti okoli 110 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Tudi delež novo infiltrirane vode v curku I dosega vrednosti do 13 % skupnega pretoka curka (poglavje 5.2.2).

Lahko zaključim, da celoten sistem sorazmerno hitro reagira na padavine, izvir Korentan in curek I reagirata praktično sočasno, običajno prej kot v pol dneva po padavinskem dogodku. Curek J reagira z zakasnitvijo do 2 dni, curek L pa še z večjim zamikom. Na osnovi hidrogramov izvira in curkov v vadozni coni sledi, da v namočenem jesensko-zimskem obdobju, ko Korentan dosega največje pretoke, dobiva vodo iz celotne hierarhije različno prepustnih prevodnikov vadozne cone. V takih razmerah dobre zapolnjenosti vadozne cone in dobre namočenosti prsti na površju, so hidravlično povezane tudi najmanjše razpoke (kot sta opazovana curka J in L), kar omogoča ob infiltraciji padavin iztekanje vode iz celotne mreže različno prepustnih razpok. Gosta mreža majhnih razpok (kot sta curka L in J) v zaledju Korentana pomembno prispeva k njegovemu pretoku, v obdobjih brez padavin pa vzdržuje njegov pretok, saj so večje razpoke (curek I) tedaj suhe. Vendar pa ti najbolj prepustni curki omogočajo hiter prenos večjih količin infiltriranih padavin proti izviru tudi v času manjše namočenosti celotnega sistema. Del vode v izvir, posebno v jesensko-zimskem obdobju, prispeva tudi občasna ponikalnica iz Čermelic, ki po podzemnih kanalih sorazmerno hitro doseže izvir.

Analiza meritev SEP pa je pokazala, da je delež sveže infiltrirane vode v Korentanu relativno majhen (do 13 %), podobno pa tudi v curku I, kar pomeni, da tudi skozi dobro prepustne razpoke v vadozni coni, izteka predvsem shranjena voda. Zadrževanje v zaledju manj prepustnih razpok (curek J) je daljše in prihaja do homogenizacije.

Korentan odraža kompleksnost značilnosti različnih tipov curkov, pri čemer ima dodaten vpliv tudi njihova različna oddaljenost od izvira. Dodatno pa na Korentan vpliva še dinamika dotoka ponikalnice iz Čermelic.

V primeru onesnaženja na površju lahko tako pričakujemo pojav kontaminantov skladno z dinamiko pretakanja vode, po ponikalnici in prepustnejših razpokah sorazmerno hitro, po mreži manjših razpokah pa je prenos lahko zelo upočasnen, ko prihaja do akumuliranja za daljši čas in kasnejšega daljšega spiranja ob intenzivnejših in izdatnih padavinah.

5.9 POSKUS UGOTAVLJANJA ZGRADBE OZ. DINAMIKE NAPAJANJA IN PRAZNJENJA VADOZNE CONE Z ELEKTRIČNO TOMOGRAFIJO

Rezultate v predhodnih poglavjih že naštetih raziskav pretakanja skozi 100 m debelo vadozno cono Postojnske jame sem želela dopolniti še z rezultati snemanja zgradbe zgornje vadozne cone z električno tomografijo. Pri tem smo uporabili sistem SuperSting Rq/IP, proizvajalca Advanced Geoscience Inc. Snemanje upornostnega profila v času, ki naj bi nam podalo značilnosti zgornje vadozne cone, smo načrtovali na površju raziskovalnega poligona. Ker pa so bili na tem območju v preteklosti izvedeni razni posegi, ki bi motili meritve upornosti, smo meritve opravili približno 200 m stran.

5.9.1 Izhodišče

Električna upornost kamnin, prsti, sedimentov in vode se močno razlikujejo. V splošnem velja, da so najbolj uporne magmatske kamnine, najmanj pa sedimentne. Žal se že upornost ene same kamnine spreminja in lahko razpenja več redov velikosti, tako da z električno tomografijo ne moremo enoznačno določiti, za kakšno kamnino gre.

Vrednosti upornosti za apnenec so v intervalu $50 - 10^7 \Omega\text{m}$ (Telford in sodel., 1990). Velike razlike v upornosti so posledica različnih primesi, razpokanosti ter predvsem različne nasičenosti z vodo. Upornost vode je znatno manjša, $10 - 100 \Omega\text{m}$ oz. je specifična električna prevodnost med 1000 in $100 \mu\text{S/cm}$. Prevodnost čiste vode v vadozni coni na območju raziskav dosega vrednosti okoli $400 \mu\text{S/cm}$, onesnažene pa do $1100 \mu\text{S/cm}$ (Kogovšek, 1997a). Če predvidimo, da se od vseh parametrov, ki vplivajo na prevodnost, spreminja zgolj nasičenost z vodo, lahko metodo uporabimo za določanje slednje (Barker in Moore, 1998; Daily in sodel., 1992). Na tej predpostavki temelji tudi naša raziskava, v kateri smo prek časovnega niza upornostnih slik poskušali spremljati infiltracijo in pretakanje vode skozi zgornji del vadozne cone.

5.9.2 Meritve

Odločili smo se za postavitev dipol-dipol, ki ima največjo ločljivost, a majhen globinski doseg (Telford in sodel., 1990). Uporabili smo 20 nerjavečih elektrod v 4 metrskem razmaku, ki smo jih pustili v tleh ves čas meritev.

Simulacijo padavinskega dogodka smo izvedli tako, da smo območje med elektrodama 6 in 18, na dolžini 48 m in v širini približno 3 m, zalili s 6 m³ vode iz gasilske cisterne. Pri tem smo pazili, da neposredne okolice elektrod nismo zmočili. Pred simulacijo dežja smo izmerili ničelno stanje, nato pa zaporedno ponavljali snemanje (eno snemanje je trajalo približno pol ure), prvi dan v kratkih časovnih intervalih (do 6-krat), kasneje pa nekajkrat do enkrat na dan.

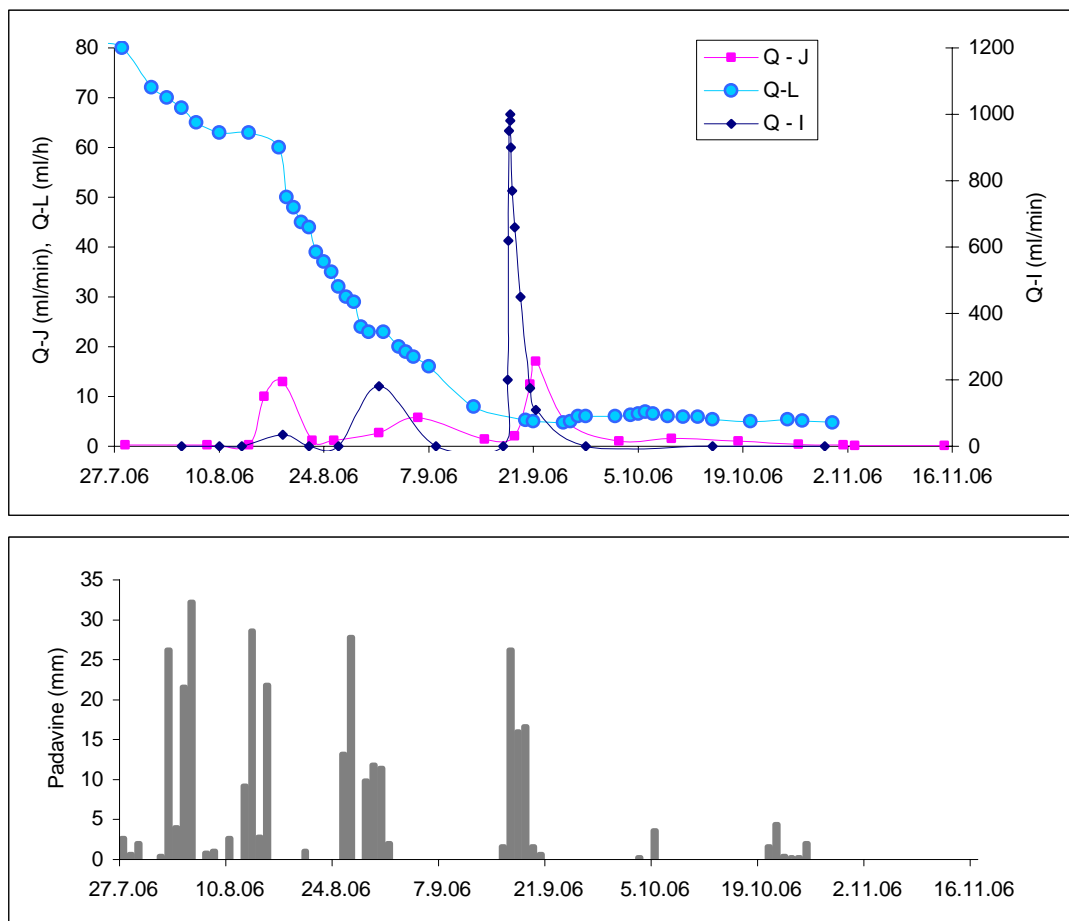
V prvem poskusu 4.9.2006 smo dež simulirali le na eni strani črte elektrod (slika 5.9.2), drugič, 11.10.2006 pa po obeh straneh črte elektrod, na vsako stran približno 3 m v širino (slika 5.9.4). Septembra smo snemanje vršili od 4. do 14.9.2006 in opravili 17 snemanj, oktobra pa od 10. do 17.10.2006 in opravili 13 snemanj.

5.9.3 Hidrološke razmere v času pred in med snemanjem upornostnega profila

Vrhova zadnjega vodnega vala opazovanih curkov I in J v Postojnski jami v hidrološkem letu 2005-06 sta nastopila 30.5.06. Ta vodni val je bil največji v celem hidrološkem letu. Curek I je nato od srede junija do srede avgusta 2006 ostal brez vode, medtem ko je pretok curka J upadal in dosegel minimalno vrednost. V upadanju je bil tudi pretok kapljanja L. Za poletna obdobja je na opazovanem poligonu značilno predvsem shranjevanje padavin v vadozni coni, le občasno pa prihaja do skromnega iztekanja iz nje.

Prek poletja 2006 do konca januarja 2007 je padlo 525 mm dežja, od katerega se je infiltriralo 345 mm. Skozi curke je v tem času iztekla le minimalna količina vode v času treh majhnih vodnih valov, saj so se izraziti vodni valovi začeli šele konec januarja 2007. Od konca julija do konca avgusta 2006 se je infiltriralo 150 mm padavin. V opazovanih curkih je prišlo do skromnega povečanja pretokov konec

avgusta in v začetku septembra (slika 5.9.1), ko smo izvedli prvi poskus (meritve upornosti od 4. do 13.9.2006).



Slika 5.9.1: Padavine ter pretoki curkov I, J in L v času izvedenih snemanj upornostnega profila.

Razmere v času snemanja upornostnega profila septembra 2006

V občasni curek I, ki sicer dosega pretok do 4000 ml/min, je skromno pritekala voda od 15. do 21.8.06, nato je presušil in imel ponovno vodo še v času od 27.8. do 8.9.06 (31.8.06 je imel pretok 180 ml/min). Tudi stalni, manjši curek J, z maksimalnim pretokom okoli 130 ml/min, je sredi avgusta oblikoval manjši vodni val ($Q_{max} = 13$ ml/min), podobno pa tudi konec avgusta (pretok je 5.9.06 dosegal 6 ml/min). Hidrogram kapljanja L je bistveno drugačen. Tri mesece trajajoči vodni val, ki se je začel oblikovati konec maja, je bil v času meritev v upadanju. Pretok kapljanja L, ki

dosega minimalne vrednosti okoli 1 ml/h (slika 5.9.1) je 4.9.06, ko smo začeli s prvim poskusom, dosegal vrednost 19 ml/h. Meritve smo opravljali do 13.9.2006.

Razmere v času snemanja upornostnega profila oktobra 2006

Kasneje je v dneh od 15. do 19.9.2006 padlo še 67 mm dežja, od katerega se ga je 38 mm infiltriralo. Curek I je ponovno dobil vodo in oblikoval manjši, kratkotrajen, a izrazitejši vodni val z vrhom 17.9.06 (1000 ml/min) in nato presušil, tako da je bil v času drugega poskusa suh. Tudi curek J je oblikoval vodni val, z vrhom šele 21.9.06 (17 ml/min) in je od 2.10.06 dalje dosegal minimalni pretok pod 1 ml/min. Pretok kapljanja L je minimalno nihalo okoli vrednosti 5 ml/h. V takih razmerah smo izvedli meritve v okviru drugega poskusa (meritve upornosti od 11. do 18.10.2006).

V času obeh snemanj je bilo zaledje curkov sorazmerno slabo zapolnjeno z vodo, vendar pa je bilo septembra 2006 nekoliko bolje zapolnjeno, saj je voda iztekala tudi skozi curek I, pretok curkov J in L pa je bil nekoliko višji kot oktobra.

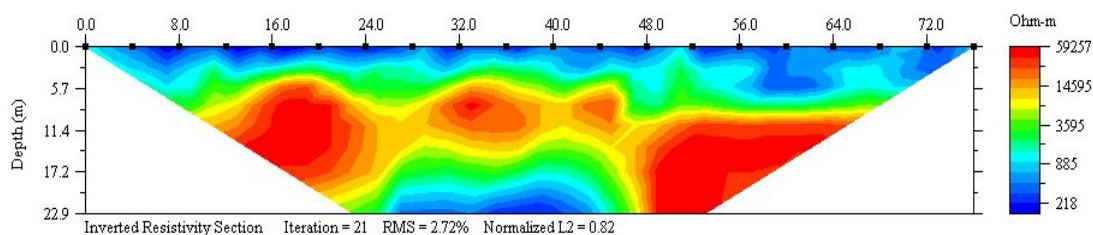
5.9.4 Izvedba snemanja upornostnega profila

5.9.4.1 Prvi poskus: snemanje od 4. do 13.9.2006

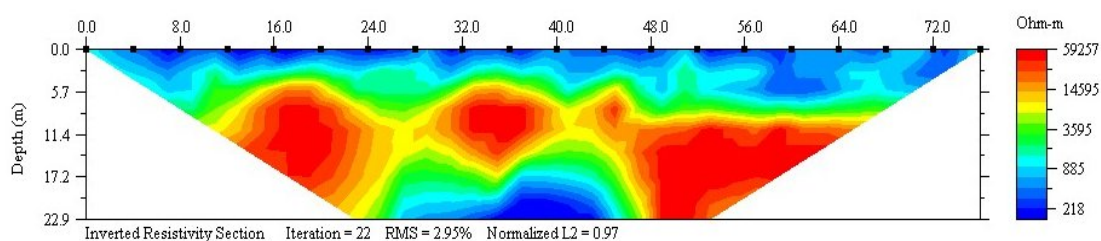


Slika 5.9.2: Simuliranje dežja po eni strani elektrod septembra 2006.

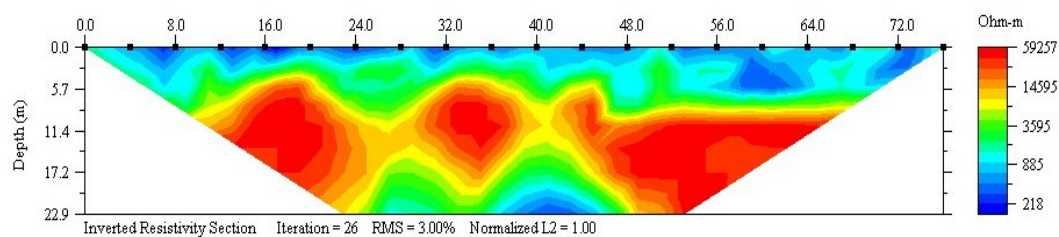
Prvič smo dež simulirali 4.9.2006 ob 8.15 do 8.45, ko smo na površino okoli 130 m² po eni strani elektrod injicirali 6 m³ vode, kar pomeni, da smo razpršili okoli 45 l vode na m². Vodo smo injicirali med 6. in 18. elektrodo. Iz tabele 5.9.1 je razviden potek zaporednih snemanj upornostnega profila.



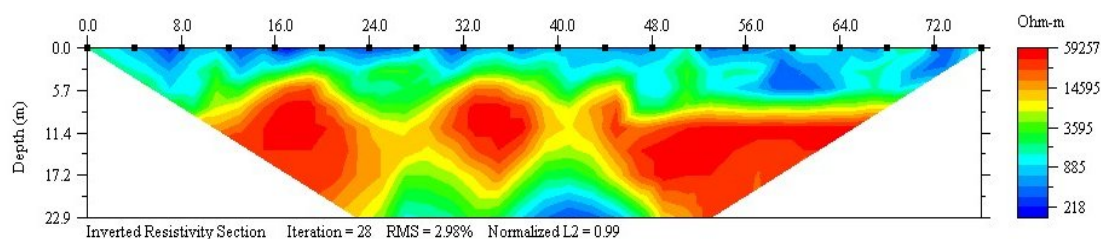
Slika 5.9.3a: Posnetek upornostnega profila PO0 4.9.2006 v času od 8.15 do 8.45 pred injiciranjem vode.



Slika 5.9.3b: Prvi posnetek upornostnega profila PO1 4.9.06 v času od 9.35 do 10.05 takoj po injiciranju vode.



Slika 5.9.3c: Posnetek upornostnega profila (PO14) 7 dni po injiciranju vode (11.9.2006).



Slika 5.9.3d: Posnetek upornostnega profila (PO17) 9 dni po injiciranju vode (13.9.2006).

Tabela 5.9.1: Zaporedna snemanja upornostnega profila v prvem poskusu septembra 2006.

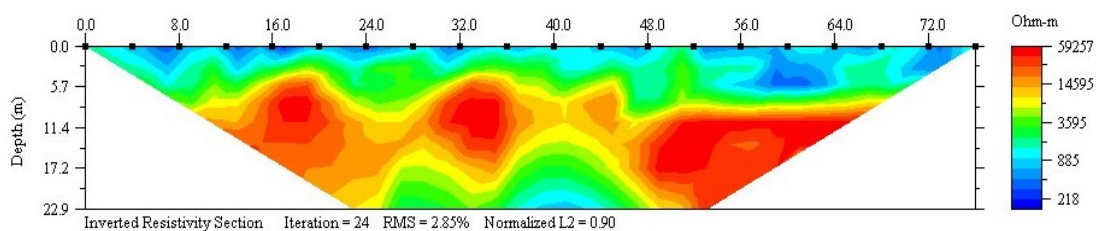
Oznaka meritve	Čas meritve
PO0	4.9.06 8.15 - 8.45
injiciranje 6 m ³ vode	4.9.06 9.05 - 9.35
PO1	4.9.06 9.35 - 10.05
PO2	4.9.06 10.10 - 10.40
PO3	4.9.06 11.50 - 12.20
PO4	4.9.06 14.00 - 14.30
PO5	4.9.06 18.00 - 18.30
PO6	4.9.06 22.00 - 22.30
PO7	5.9.06 7.30 - 8.00
PO8	5.9.06 9.30 - 10.00
PO9	5.9.06 14.00 - 14.30
PO10	5.9.06 19.22 - 19.52
PO11	6.9.06 7.10 - 7.40
PO12	6.9.06 14.00 - 14.30
PO14	11.9.06 14.35 - 15.05
PO15	12.9.06 7.00 - 7.30
PO16	12.9.06 14.05 - 14.35
PO17	13.9.06 7.10 - 7.40

5.9.4.2 Drugi poskus: snemanje 11. do 18.10.2006

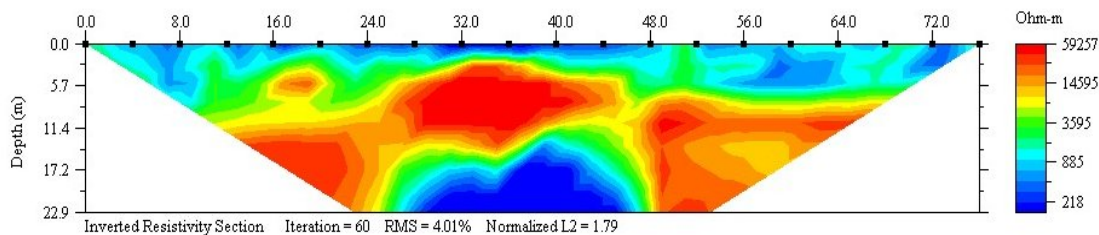
Dež smo drugič simulirali 11.10.2006 od 11.05 do 11.25, ko smo v 20 minutah razpršili 6 m³ vode z intenzivnostjo dobrih 20 l/m² na istem odseku med 6. in 18. elektrodo kot septembra 2006, le da smo tokrat vodo injicirali po obeh straneh linije elektrod. Iz tabele 5.9.2 je razviden potek zaporednih snemanj upornostnega profila.



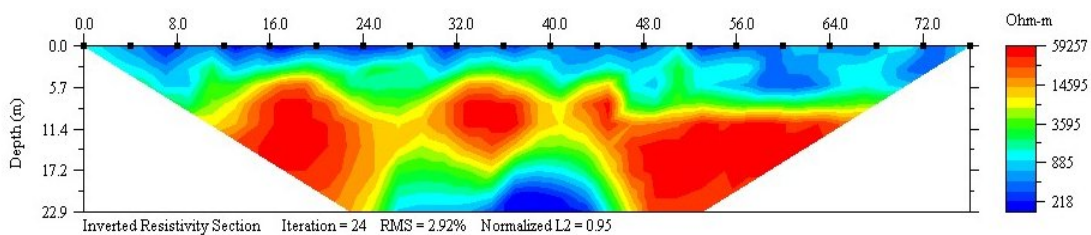
Slika 5.9.4: Simuliranje dežja v poskusu oktobra 2006 je potekalo po obeh straneh črte elektrod.



Slika 5.9.5a: Posnetek upornostnega profila POK00 pred injiciranjem vode.



Slika 5.9.5b: Posnetek upornostnega profila POK1 takoj po injiciranju vode.



Slika 5.9.5c: Posnetek upornostnega profila 7 dni po injiciranju vode (POK 13).

Tabela 5.9.2: Zaporedna snemanja upornostnega profila v drugem poskusu oktobra 2006.

Oznaka meritve	Čas meritve
POK0	10.10.06 14.00
POK00	11.10.06 9.30
Injiciranje 6 m ³ vode	11.05 – 11.25
POK1	11.10.06 11.20
POK2	11.10.06 11.47
POK3	11.10.06 13.07
POK4	11.10.06 14.50
POK6	11.10.06 18.15
POK7	12.10.06 7.13
POK8	12.10.06 16.30
POK9	13.10.06 12.00
POK10	16.10.06 11.25
POK11	16.10.06 15.50
POK12	17.10.06 11.30
POK13	18.10.06 12.00

5.8.5 Ugotovitve

Meritve padavin na območju nad opazovanim poligonom v Postojnski jami ter zvezne meritve pretokov izbranih značilnih curkov v jami tekom štirih zaporednih hidroloških let so pokazale, da se v sušnih poletno-jesenskih obdobjih padavinska voda predvsem shranjuje v vadozni coni ob minimalnem iztekanju iz nje. Le občasne intenzivnejše padavine pa lahko pogojujejo pretakanje v globljo vadozno cono vse do curkov v jami, ki pa oblikujejo le manjše vodne valove. Podobne razmere so bile tudi v času, ko smo izvedli oba poskusa s snemanjem upornostnega profila po injiciranju vode na površju.

V času prvega snemanja z začetkom 4.9.2006 je bila 100 m debela vadozna cona nekoliko bolje napolnjena z vodo kot ob drugem oktobra, saj so bili vsi trije curki aktivni, čeprav so dosegali sorazmerno nizke pretoke (tabela 5.9.3).

Tabela 5.9.3: Pretoki curkov v Postojnski jami v času začetka snemanj upornostnih profilov v prvem in drugem poskusu.

	4.9.2006	11.10.2006
Curek I (ml/min)	80	0
Curek J (ml/min)	6	1,5
Curek L (ml/h)	19	6

Zaporedno snemanje upornostnega profila na liniji stalno postavljenih elektrod nakazuje dobro ponovljivost. Iz slike začetnega stanja pred injiciranjem vode je razvidna manjša upornost oz. večja prevodnost na površju, kjer je prst in nekako v globini 14 m.

Posnetka stanja pred injiciranjem vode septembra in oktobra 2006 odražata slabšo zapolnjenost vadozne cone oktobra (sliki 5.9.3a in 5.9.5a), kar je skladno z ugotovljenimi hidrološkimi razmerami. Dobljena slika uro po injiciranju vode kaže na nekoliko povečano območje višje prevodnosti v območju strukture v globini 14 m (sliki 5.9.3b in 5.9.5b), medtem ko je to območje opazno večje oktobra 2006, ko smo snemanje začeli še preden smo končali z injiciranjem vode (5 minut prej). V vmesnem delu med površjem in globino 14 m ni bilo opaznih večjih sprememb.

Verjetno pa je na posnetek delno vplival tudi drugačen način injiciranja vode (v 2. poskusu po obeh straneh elektrod).

Iz zabeleženih razlik v času pred injiciranjem vode in po njem sklepamo na hiter odtok injicirane vode s površja, saj smo pol ure po končanem injiciranju vode, kolikor časa je trajalo snemanje upornostnega profila, ugotovili predvsem povečano območje večje prevodnosti nekako 10 m in globlje pod površjem. Skepamo, da bi bil to lahko star, s sedimenti zapolnjen rov, kamor se je pretežno infiltrirala injicirana voda, ki je nato le počasi odtekala v globljo vadozno cono, kar je pokazalo zaporedno snemanje 8 oz. 9 dni po injiciranju vode.

Po 7 dneh dobljeni posnetek septembra 2006 nakazuje nekoliko manjšo zapolnjenost zgornje vadozne cone oz. s sedimenti zapolnjenega rova kot je bila pred injiciranjem vode (slika 5.9.3c), po nadaljnjih 2 dneh pa še nekoliko manjšo (slika 5.9.3d). V poskusu oktobra 2006 pa je bila struktura po 7 dneh boljše zapolnjena z vodo kot pred injiciranjem vode. Iz pretokov curkov v jami, 100 m pod površjem sklepam, da je oktobra 2006 izraziteje prihajalo do shranjevanja injicirane vode.

Lahko sklenem, da se v prvem poskusu septembra 2006 nakazuje hitrejše zvezno odtekanje injicirane vode v globljo vadozno cono kot v drugem poskusu oktobra 2006. To je skladno z ugotovitvami načina pretakanja ob različno zapolnjeni vadozni coni, ki so jih podale druge metode (meritve pretokov, sledilni poskusi, prenos kontaminantov). Posnetek z izrazitejšo zapolnjenostjo strukture v globini pod 10 m v 2. poskusu oktobra 2006 (slika 5.9.5b) je delno verjetno tudi posledica drugačnega načina injiciranja vode.

To je bil prvi poskus, da bi ugotovili, kaj lahko opisana metoda doprinese k razumevanju zgradbe vadozne cone in k pretakanju padavin skozi njo. Zavedamo se, da bi naše sklepe lahko potrdila le vrtina, ki bi pokazala ustrezno zapolnitev s sedimenti oz. nadaljnje raziskave.

6 ZAKLJUČKI

Meritve pretakanja padavin skozi vadozno cono sem izvajala na treh bistveno različnih curkih v Postojnski jami, 100 m pod površjem. Čeprav se zavedam, da obstaja cela vmesna paleta različnih tipov, ocenjujem, da so opazovani curki dokaj dobro podali stanje v vadozni coni.

Na osnovi rezultatov zveznih meritev padavin na površju ter pretoka, specifične električne prevodnosti (SEP) in temperature curkov v vadozni coni sem zaključila:

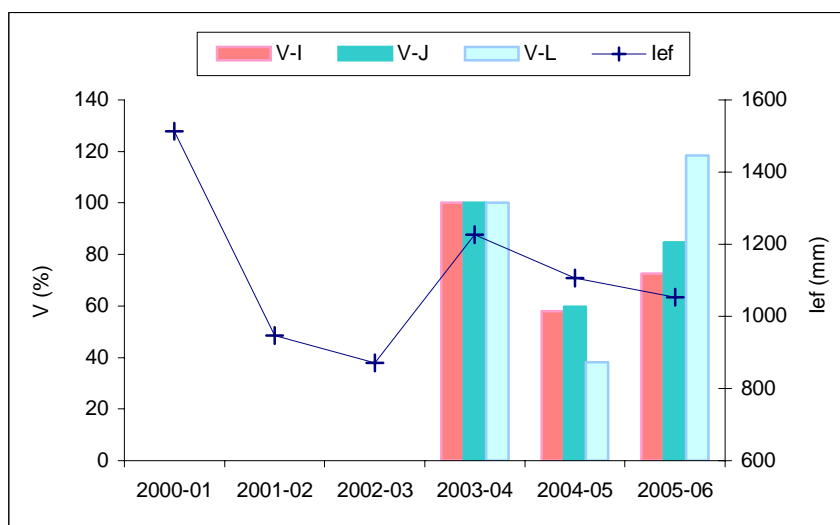
- Dinamika iztekanja vode iz vadozne cone je neposredno vezana na dotok sveže vode, a ni odvisna le od intenzivnosti in količine efektivno infiltriranih padavin, temveč tudi od vsakokratne namočenosti prsti ter zapoljenosti vadozne cone. Le ob dobri namočenosti prsti in ustrezni zapoljenosti vadozne cone prihaja do zveznega iztekanja po celotnih hierarhiji različno prepustnih razpok v vadozni coni. Ob slabi namočenosti prsti, se padavine infiltrirajo le po bolj prepustnih prevodnikih skozi prst in se v vadozni coni pretežno shranjujejo.
- Primerjava dnevne efektivne infiltracije na obravnavanem poligonu in hidrogramov opazovanih curkov v treh zaporednih hidroloških letih (poglavje 5.1.4) je pokazala na bistveno različno pretakanje po različno prepustnih razpokah, prevodnikih. Največji, nestalni curek I (maksimalni pretok okoli 4 l/min), po padavinah hitro odvaja v zaledju shranjeno vodo, s katero se v začetnem delu vodnih valov ob največjih pretokih mešajo tudi sveže infiltrirane padavine oz. padavine, ki so se v zaledju zadrževale le krajši čas, kar se je odrazilo v značilnih upadih SEP. Vendar pa je delež teh v vodnih valovih dosegal le do 15 %. Manj izdatni curki, ki so stalni, kot je curek J (maksimalni pretok 140 ml/min), reagirajo na padavine z določenim časovnim zamikom za curkom I (od 1/2 do 2 dni). Njihova zgradba zaledja omogoča dobro homogenizacijo infiltriranih padavin, kar se je odrazilo tako v pretoku, SEP, temperaturi in izotopski sestavi kisika. Izotopske analize baznega toka curka J so pokazale, da je povprečni zadrževalni čas več kot eno leto, medtem ko je za curek I le 2,5 meseca. Stalno kapljanje L, z maksimalnim pretokom le nekaj ml/min, ima popolnoma svoj vzorec iztekanja. Do zveznega izdatnega praznjenja njegovega pretežno slabo

prepustnega zaledja in oblikovanja obsežnega vodnega vala, ki traja do več mesecev, prihaja občasno (ne vsako leto), šele ko je njegovo zaledje dovolj zapolnjeno in prst namočena, da izdatne in intenzivne padavine potisnejo shranjeno vodo iz njegovega zaledja. Tudi ta tip prevodnikov, čeprav je količinsko zelo skromen, je pa pogost, lahko poleg curkov, kot jih predstavlja curek J, pomembno prispeva vodo v kraške izvire v sušnih obdobjih, ko so bolj prepustni prevodniki suhi. Izdatnejši curki (kot je curek I), pa v deževnih obdobjih, ko hitro odvajajo velike količine vode, omogočajo hiter prenos morebitnih kontaminantov in učinkovito spiranje širših zaledij kraških izvirov ob velikih razredčevalnih učinkih.

- V poletnih sušnih obdobjih, ki trajajo od 2,5 do 6 mesecev, se tudi večja količina manj intenzivnih padavin (do 390 mm padavin oz. do 180 mm efektivno infiltriranih padavin) pretežno shranjuje v zaledje curkov in prihaja le do minimalnega iztoka iz vadozne cone, ali pa ta celo izostane.
- Na osnovi izračunov celoletnih količin infiltriranih padavin in iztekle vode skozi opazovane curke v vadozni coni v treh zaporednih hidroloških letih sklepam, da prihaja zaradi razlik v infiltraciji (različna razporeditev, intenzivnost in količina padavin) ter zaradi različnih razmer na površju, v prsti in v vadozni coni, do bistveno različnega razmerja med letno količino vode, ki se infiltrira v zaledje in tisto, ki izteka skozi vadozno cono in napaja globlje dele vodonosnika. Zvezne in intenzivnejše padavine v času hidrološkega leta pogojujejo dobro namočeno prst in dobro zapolnjenost vadozne cone ter zvezno iztekanje vode iz celotne hierarhije povezanih razpok. Pri tem prihaja do iztekanja tudi iz najslabše prepustnih delov vadozne cone, ki se sicer prazni le občasno ob ustreznih pogojih (hidrološko leto 2003-04). Zato pa se padavine, ki sledijo takemu obdobju, v večji meri porabljajo za zapolnjevanje dokaj spraznjenega zaledja in je posledično iztok iz vadozne cone šibkejši (celo hidrološko leto 2004-05 in vse do februarja 2006). Tudi meritve SEP curka J so za hidrološko leto 2004-05 podale v primerjavi s predhodnim hidrološkim letom (poglavje 5.2.3) bistveno drugačen potek. V curku I pa so od avgusta 2005 do februarja 2006 izostali značilni upadi SEP v vodnih valovih (slika 5.2.7), kar nakazuje iztekanje pretežno shranjene vode.

- Potek SEP curkov I in J (slika 5.2.8) izkazuje nihanje vrednosti curka I okoli vrednosti curka J. SEP odraža zgradbo curkov in nakazuje v zaledju curka J veliko stopnjo homogenizacije. Curek J gradi hierarhija različno, a slabše prepustnih prevodnikov, ki so hidravlično povezani. V zaledju curka I pa dobro prepustni osrednji prevodnik, ki se je oblikoval z intenzivnejšim raztapljanjem zaradi odtoka odpadnih voda, dopolnjuje slabo prepustni del zaledja, ki ga označujejo visoke SEP. Najpočasnejše je polnjenje in posledično iztekanje iz najslabše prepustne strukture zaledja, ki ima največji delež v curku L. Iz tega dela vadozne cone izteka voda z bistveno drugačno dinamiko. Vse to nakazuje, da je SEP pomembno naravno sledilo, ki odraža dogajanje v sistemu, predvsem različno dinamiko iztekanja iz različno prepustnih delov zaledja.
- V obdobjih nizkih, upadajočih pretokov, običajno od pomladi do intenzivnega jesenskega dežja, ko curek I za dalj časa presahne, ali pa le šibko reagira na padavine, curka J in L pa dosežeta minimalne pretoke, se infiltrirane padavine pretežno shranjujejo v vadozni coni. Ko razmere na površju pogojujejo pogoste osušitve prsti, prihaja do velikih razlik v napajanju različno prepustnih delov zaledja ter posledično do največjih razlik v iztekanju iz vadozne cone. Ob izlitju večje količine vode (6 m^3) s sledilom v sušnih razmerah (poglavje 5.6.1), je le manjši del vode (4%) hitro sledil najprepustnejšim potem skozi prst in dalje skozi vadozno cono, medtem ko se je večina vode shranila v slabše prepustnem delu zaledja. Iztekanje iz tega dela sprožijo šele dovolj izdatne in intenzivne padavine ob ustrezni namočenosti prsti in zapolnjenosti vadozne cone, lahko šele čez nekaj mesecev in več.
- Razmerje količin vode, ki sta jo v zaporednih hidroloških letih (2003-2006) ob upadajoči letni efektivni infiltraciji prispevala curka I in J kaže na vse večji delež stalnega, manjšega curka J (tabela 5.1.4). Delež curka L, ki je v hidrološkem letu 2004-05 upadel, pa je v hidrološkem letu 2005-06 izrazito porasel (slika 6.1). Vse to kaže na pomembno vlogo predhodno shranjene vode v letnem oz. tudi večletnem merilu, najbolj izrazito pri curku L. V hidrološkem letu 2004-05, ko je bila efektivna infiltracija 10 % nižja kot predhodno leto, je prišlo do močno zmanjšane iztekanja skozi vse curke.

Očitno se je velik del infiltriranih padavin porabil za zapolnjevanje zaledij curkov, saj so v naslednjem hidrološkem letu 2005-06 kljub še nižji letni efektivni infiltraciji curki izraziteje reagirali in je bila letna iztekla količina vode večja, najizraziteje pri curku L (slika 6.1). Pri tem se kaže pomen razporeditve intenzivnih in izdatnih padavinskih dogodkov, ki pogojujejo infiltracijo padavin po celotni hierarhiji različno prepustnih razpok in posledično iztekanje vode iz nje.



Slika 6.1: Letna efektivna infiltracija in letne iztekle količine vode skozi curke I, J in L v zaporednih hidroloških letih glede na leto 2003-04 za vsak curek ločeno, izraženo v odstotkih.

- Sočasno opazovani kraški izvir Korentan odraža kompleksnost značilnosti različnih tipov curkov, pri čemer ima dodaten vpliv tudi njihova različna oddaljenost od izvira ter občasna ponikalnica. Delež sveže infiltrirane vode v izviru je relativno majhen (do 13 %), podobno kot v najprepustnejšem curku I, kar pomeni, da tudi skozi dobro prepustne razpoke v vadozni coni, izteka predvsem shranjena voda.

Vzporedno spremljanje prenosa snovi skozi vadozno cono je podalo nova spoznanja:

- Prenos snovi skozi vadozno cono je neposredno vezan na dinamiko pretakanja infiltriranih padavin. Onesnaževanje na površju, vse do pomladi 1991, se je odrazilo v povečanih koncentracijah nitratov (do 180 mg NO₃⁻/l), kloridov (do 60 mg Cl⁻/l), sulfatov (do 50 mg SO₄²⁻/l) in o-fosfatov (do 2,8

mg $\text{PO}_4^{3-}/\text{l}$) opazovanih curkov. V sledečih treh letih so koncentracije kontaminantov zaradi spiranja s padavinami (skupno 4700 mm) hitro upadale (spiranje prepustnejših razpok), nato pa opazno počasneje (spiranje iz slabo prepustnega dela zaledja) (slika 5.4.1). Najhitreje so se spirali kloridi (10 let), počasneje nitrati (okoli 20 let), ki so leta 2006 še nekoliko povečani. Bistveno počasneje se spirajo o-fosfati. Po spiranju prepustnejših razpok, se je po 17 letih del kontaminantov zadrževal le v slabo in najslabše prepustnem delu zaledja, kar je skladno z ugotovitvami polnjenja in praznjenja različno prepustnih delov vadozne cone. Dolgotrajno spremljanje prenosa tega onesnaženja je pokazalo, da se tudi manjše onesnaženje s površja spira do vzpostavitve izhodnega stanja več desetletij.

- V letih 2003 do 2005 je prihajalo do najslabšega prenosa kontaminantov v sušnih obdobjih, v času minimalnih pretokov ter do najintenzivnejšega prenosa po padavinah v vodnih valovih po daljših sušnih obdobjih, skladno z dinamiko vode. V curku I prihaja ob naraščanju pretoka do upada koncentracij nitratov in o-fosfatov, pa tudi sulfatov, kar sovпада s potekom SEP in v veliki meri tudi s spiranjem sledila, ki je bilo injicirano junija 2002 po prsti na površju. To nakazuje, da se začetnemu iztekanju vode iz slabo prepustnega dela zaledja curka pridruži dotok vode po prepustnejših, že spranih razpokah, kar se odrazi v razredčevalnem učinku. Tudi za curek J, s hierarhijo slabše prepustnih razpok, je značilen najintenzivnejši prenos kontaminantov v prvih vodnih valovih po daljši suši, ki lahko traja cel mesec in odstopa od vzorca spiranja v nadaljnjih vodnih valovih v hidrološkem letu, ko prihaja do skromnejšega prenosa. Pri curkih I in J je po letu 2003 opazen trend počasnega upadanja koncentracije nitratov in še počasnejšega upadanja o-fosfatov.
- Kako že majhne spremembe v sistemu pomembno vplivajo na dinamiko pretakanja in na prenos snovi po prepustnejših prevodnikih je pokazalo opazovanje vodnega vala curka I po taljenju snega in kratkotrajnem zmrzovanju površja v zaporednih nočeh (poglavje 5.4.3.3). Ob vsaki zamrznitvi je prišlo do zmanjšanja pretoka curka in hkrati do povečanja SEP, koncentracije eozina ter koncentracij nitratov in o-fosfatov, kar nakazuje v curku večji delež shranjene vode iz slabo prepustnega dela zaledja ob zmanjšanem dotoku vode po prepustnejših prevodnikih, ki se je v zaledju

zadrževala krajši čas (poglavje 5.3.2). V curku J je pretok tedaj oblikoval zvezen val brez nihanj in tudi ostali parametri odražajo homogenizacijo v njegovem zaledju (poglavje 5.4.3.4).

- Analiza sočasno povečanih vsebnosti kalcija in celokupne trdote ter kontaminantov: kloridov, nitratov, sulfatov in o-fosfatov v opazovanih curkih je pokazala linearno odvisnost med obema kategorijama. To pomeni, da sta bili ob večji količini kontaminantov sorazmerno večja tudi vsebnost kalcija in celokupna trdota, oz. je prišlo do povečanega raztapljanja apnenca. Raztapljanje apnenca v jamskem stropu je bilo na območju izpusta odpadnih voda kar do dvakrat večje kot v curkih v neposredni bližini, a izven območja onesnaženja (poglavje 5.5). To pomeni pospešeno širjenje prevodnikov vse globlje v vadozni coni. S tem pa je omogočeno tudi vse hitrejše prodiranje kontaminantov skozi vadozno cono. V končni fazi takega razvoja bi prišlo do hitrega prenosa kontaminantov skozi vadozno cono do podzemnih kanalov in naprej skozi vodonosnik vse do izvirov.
- Tako moramo pod izpusti odpadnih voda neposredno v kraško okolje ter drugimi podobnimi izpusti, kot so tudi najrazličnejša odlagališča odpadkov, iz katerih padavine spirajo topne kontaminante, računati s povečanim raztapljanjem apnenca in posledično večjo prepustnostjo prevodnikov za vodo in kontaminante.

Tudi sledilni poskusi z umetnimi sledili z različnim načinom injiciranja so podali koristne izsledke:

- Različno izvedeni sledilni poskusi skozi vadozno cono so tudi pokazali, da je ob dobri zapoljenosti vadozne cone prenos topnih snovi skozi vadozno cono po padavinah zvezen, s hitrostmi do nekaj m/h (4,3 m/h), ko so bile hitrosti po različno prepustnih prevodnikih v razmerju 1:6 (tabela 5.6.2).
- Ob slabi zapoljenosti vadozne cone pa, kljub spiranju sledila z veliko količino vode (6 m^3), le minimalne količine hitro preidejo vadozno cono le po najprepustnejših razpokah ($v_{\text{dom}} = 80 \text{ m/h}$), medtem ko se večina sledila za več mesecev shrani v slabše prepustni del zaledja. Do dolgotrajnega postopnega spiranja prihaja šele po izdatnih in intenzivnih padavinah. To

pomeni do skoraj 2000-krat manjše hitrosti pretakanja (tabela 5.6.1), z $v_{\text{dom}}=0,05$ m/h.

- Kombiniran sledilni poskus, ko sta bili sledili injicirani junija 2002 v sorazmerno sušnih razmerah (poglavje 5.6.3) je pokazal, da prst in sedimenti na površju pomenijo pomemben filter tudi za prenos topnih snovi v naravnih razmerah. Sledilo, ki je bilo injicirano neposredno v vadozno cono, je oblikovalo več zaporednih sledilnih valov in doseglo maksimalno koncentracijo v curkih po petih mesecih ($v_{\text{dom}} = 0,03$ m/h). Hkrati injicirano sledilo po prsti na površju (z 10 cm prsti, pod njo pa debelejši zasip mešanice prsti s kosi apnenca) je v času hidroloških let oblikovalo številne sledilne valove. Vendar pa je šele po treh letih in treh mesecih doseglo največjo koncentracijo sledila. Glede na to koncentracijo, je dominantna hitrost pretakanja skoraj desetkrat manjša kot pa pretakanje sledila, injiciranega neposredno v vadozno cono.
- Kombinirano sledenje je pokazalo vpliv prsti in sedimenta na dolgotrajnost prenosa topnih snovi s površja skozi vadozno cono ob spiranju s padavinami, kjer imajo poleg izmenjave vode verjetno pomembno vlogo tudi razni fizikalni in morda kemijski procesi, kar ponuja nove možnosti raziskovanja. Spremljanje več kot 6-letnega spiranja injiciranega sledila pa nakazuje zadrževalni čas vode in topnih snovi v najslabše prepustnem delu zaledja v vadozni coni.

Sočasno izvajanje sledenj z odlagališč odpadkov na slovenskem krasu ter spremljanje pretakanja skozi vadozno cono v Postojnski jami je pomagalo razložiti prenos sledil skozi vadozno cono pod odlagališči:

- Sledilni poskusi z odlagališč (poglavje 5.7), ki obratujejo že okoli 30 let, so pokazali hitro pretakanje skozi vadozno cono do kraških izvirov. V primeru odlagališča pri Ribnici, ko je injiciranju sledilo izdatno deževje, je bila hitrost pretakanja do izvirov zelo velika ($v_{\text{dom}} = 4$ cm/s oz. 144 m/h). V primeru kočevskega in sežanskega odlagališča, ko so injiciranju sledile le manjše padavine in je prišlo do prenosa sledil do izvirov Bilpe oz. Timave ob upadajočem, sorazmerno nizkem pretoku, je bila hitrost pretakanja do Bilpe $v_{\text{dom}} = 1,4$ cm/s (50 m/h) in do Timave $v_{\text{dom}} = 2$ cm/s (72 m/h). V Bilpi se je kar 2/3 injiciranega sledila pojavilo v prvem sledilnem valu v času enega

meseca, v Timavi pa blizu 40 %. Hitro pretakanje tudi v takih razmerah nakazuje tudi veliko prepustnost osrednjih prevodnikov v vadozni coni pod odlagališči, kar je skladno z ugotovljenim povečanim raztapljanjem karbonatnih kamnin zaradi kontaminantov.

- V primerljivih razmerah je sledenje z vojaškega poligona Poček (razpršeno onesnaževanje predvsem s kovinami) pri Postojni podalo znatno počasnejše pretakanje ($v_{\text{dom}} = 0,7 \text{ cm/s}$ oz. 25 m/h) glede na prvi sledilni val, ko je izteklo le 4 % injiciranega sledila.
- Izvir Bilpe, kamor odteka tako onesnažena Rinža kot izcedne vode odlagališča odpadkov, ima tudi povišane vsebnosti nitratov in o-fosfatov ter SEP in celokupno trdoto. Opazovanje manjšega vodnega vala Bilpe je pokazalo ob naraščanju pretoka vpliv onesnažene Rinže, v upadajočem delu vala ob povečanem prenosu sledila pa prenos kontaminantov z odlagališča ob sočasno povečani celokupni trdoti. Pri odkrivanju oz. dokazovanju negativnih vplivov odlagališč je tako poleg sledenj z umetnimi sledili možnost tudi v podrobnem opazovanju izbranih kontaminantov v ne prevelikih vodnih valovih.

Meritve SEP in sledilni poskusi so pokazali različno dolgo zadrževanje infiltriranih padavin v različno prepustnih delih vadozne cone. To so potrdile tudi izotopske analize kisika, ki so pokazale, da je povprečni zadrževalni čas vode v zaledju curka I le 2,5 meseca, v zaledju curka J pa več kot eno leto.

Uporaba električne tomografije ob sočasnem injiciranju vode je pokazala zelo hiter odtok vode ter njeno akumulacijo oz. povečanje območja večje prevodnosti nekako 10 m pod površjem. Verjetno gre za s sedimenti zapolnjen star rov, iz katerega pa je voda nato le počasi odtekala. S temi raziskavami bi bilo smiselno nadaljevati, saj imamo še premalo izkušenj in rezultatov.

Primerjava navedenih številnih merjenih parametrov z meritvami pretoka je pokazala, da je potrebno v raziskavah, ki so vezane na dinamiko pretakanja vode skozi vadozno cono oz. skozi kraške vodonosnike do kraških izvirov (prenos snovi, kontaminantov, raztapljanje karbonatnih kamnin), upoštevati hidrodinamiko, oz. da je nujno njeno vzporedno spremljanje. Razlage prenosa snovi, kontaminantov in

sledil v sledilnih poskusih so neposredno vezane na pretakanje in procese shranjevanja v vadozni coni. Izostanek takojšnjega pojava nekega izlitega kontaminanta ob nesreči še ne pomeni, da ni prišlo do kontaminacije določenega izvira, kakor tudi hiter pojav, v kolikor ni možno izmeriti njegove povrnjene količine, še ne pomeni, da se ne bo kontaminant še izraziteje pojavil kasneje, ali pa se pojavil še v kakšnem drugem izviru.

Raziskave so podale dinamiko dogajanja v vadozni coni, dinamiko pretakanja in zadrževanje infiltriranih padavin v odvisnosti od razmer na površju kot v vadozni coni, prenos kontaminantov, vpliv kontaminantov na raztapljanje kamnine ter doprinesle k razumevanju vloge vadozne cone, pa tudi vloge prsti v kraškem vodonosniku. Nova spoznanja o načinu prenosa kontaminantov s kraškega površja (vadozna cona Postojnske jame, odlagališča odpadkov), bodo uporabna pri načrtovanju rabe prostora kot tudi v načrtnem varovanju kakovosti kraških vodnih virov.

V poletnih sušnih obdobjih je prenos kontaminantov najslabši, ko v vadozni coni niso aktivni niti najbolj niti najmanj prepustni prevodniki. Sklepam, da tedaj v izvire dovajajo vodo stalni, slabo prepustni prevodniki iz vadozne cone z majhnimi pretokih (J, L), ki so pogosti v zaledju izvirov. To so neposredno pokazale meritve prenosa kontaminantov in spiranje sledila v sledilnih poskusih, posredno pa tudi meritve SEP in izotopske analize. V večje kraške izvire tako v sušnih obdobjih pritekajo vode z obsežnega zaledja, kjer so običajno vnosi kontaminantov sorazmerno majhni v primerjavi z dotoki čiste vode z neobremenjenih delov zaledja, pa tudi vpliv ponikalnic, ki presušijo ali pa imajo minimalne pretoke, je majhen. Tako je kakovost voda sorazmerno dobra. Zato pa izdatne padavine, ki sledijo, intenzivno spirajo zaledja kraških izvirov, akumulirano onesnaženje, in prihaja do najintenzivnejšega prenosa kontaminantov.

V okviru zveznih dolgotrajnih meritev sem prišla tudi do nekaterih metodoloških zaključkov:

- Pri raziskovanju je zelo pomembna izbira primernih opazovanih točk, kar pomeni predhodne raziskave, oz. predhodno znanje. Pomembno je sočasno

spremljanje na vseh opazovanih točkah (padavine, curki in izviri), saj so razmere na vseh nivojih neponovljive.

- Zaradi meritev na več točkah daljši čas se je pokazala kot nujna medsebojna interkalibracija merilnih inštrumentov ter enaka nastavitve časa, ki je bila pomembna predvsem pri spremljanju hitrih sprememb v vodnih valovih.
- Meritve pretokov različno izdatnih curkov, ki sem jih zasnovala na merjenju nivojev, sem preračunavala na osnovi občasnih neposrednih meritev pretoka oz. umeritvene krivulje. Te meritve je potrebno opravljati ves čas opazovanj, saj pomenijo preverjanje meritev.
- Pokazalo se je tudi, da je prenos snovi neločljivo vezan na dinamiko pretakanja vode po različno prepustnih razpokah v vadozni coni in da je za pravilno razumevanje tega prenosa nujno potrebno njeno vzporedno spremljanje. Sklepam, da je to nujna osnova pri vseh raziskavah, ki so vezane na pretakanje vode (spremljanje raztapljanja in izločanje karbonatov, biološke, mikrobiološke raziskave.....).
- Vzporedna uporaba velikega nabora parametrov: pretok, temperatura, specifična električna prevodnost, vsebnost karbonatov, kalcija, magnezija, kloridov, nitratov, sulfatov, o-fosfatov, izotopske analize kisika in sledilni poskusi z umetnimi sledili ter metoda upornostnega slikanja so pokazali, da se njihovi rezultati pogosto dopolnjujejo in potrjujejo, kar pomeni preverjene rezultate. Odpirajo pa tudi nova vprašanja, ki usmerjajo nadaljnje raziskave.

Upam, da bodo vsa našeta nova spoznanja dobra osnova pri nadaljnjih raziskavah, predvsem pa neposredno uporabna pri načrtnem dolgoročnem varovanju kakovosti kraških izvirov, saj moramo težiti k ohranjanju njihove čim boljše kakovosti in ne le k doseganju sprejetih normativov.

7 SUMMARY

CHARACTERISTICS OF WATER FLOW THROUGH THE KARST VADOSE ZONE

In the past researches have been indicating that rainfall that relatively fast infiltrates into vadose zone may remain in this part of the aquifer for a longer time. This knowledge was achieved by observations of karst springs or by observations in the vadose zone for a shorter time only or, sometimes, long lasting studies did not include trickles with essentially different background permeability that would be representative for the entire vadose zone. Within my thesis I wished to recognize the dynamics of infiltrated rainfall flow and transport of substances through the vadose zone within the period of one hydrological year with a special emphasis to water pulses after the rainfall. The researches are based on my own measurements; after the first year I continued with them and thus here are given the results of the three consecutive hydrological years.

Measurements and samplings were executed within the test site in the vadose zone of Postojnska jama, 100 m below the surface at three essentially different trickles that I have chosen on the base of previous observations. The most abundant trickle I with maximal discharge up to 4 l/min dries up from time to time, while the trickles J ($Q_{\max}=140$ ml/min) and L ($Q_{\max}=10$ ml/min) are permanent. I am aware that the whole palette of intermediary types exists yet I assume that the observed trickles rather well correspond to circumstances in the vadose zone. According to the structural mapping, the fastest percolation (trickle I) occurs in tectonically fissured to moderately broken zones, while slower percolation flows along tectonically broken zones (trickle J) and bedding planes (trickle L).

At the trickles I and J, I carried out physical measurements by WTW recorder and datalogger Gealog S (temperature, electric conductivity (EC) and level measurements for discharge calculations) in time intervals of 15 or 30 minutes. As I did not have at my disposal enough measuring scales for dripping discharge measurements at the trickle L, I used an old evaporimetre with weekly mechanical clock and written record of paper band fitted out by a vessel with pipette and thus equipped it well

served for discharge measurements. Beside the adjustment of single recorders I carried out the intercalibration. Due to long lasting measurements I used GMT+1 time only; as a precise equal time setting on all the instruments was very important, in particular at water pulses, I used for all the settings the time on the chosen stopwatch. On the surface above the test site I simultaneously measured distribution and quantity of rainfall by rain gauge Onset RG2-M and sampled composite rainfall samples for isotope oxygen analyses.

At the same time the automatic sampler ISCO 6700 collected samples at the trickles I and J to check the transport of contaminants: nitrates, sulfates, chlorides and o-phosphates. Chemical analyses were done at the Karst Research Institute ZRC SAZU laboratory according to standard methods (Standard Methods, 1992). Samples were additionally taken for the isotopic analyses of oxygen carried out at the institute Joanneum Research in Graz and for the analyses of calcium, magnesium and carbonate levels. Water tracing was done not only by natural tracers but also by fluorescent tracers. Fluorescence was defined by luminiscence spectrometer LS30 Perkin Elmer. By the method of resistivity imaging SuperSting Rq/IP, I wished to get the information about the structure of the upper vadose zone.

The accent was given to multiparameter simultaneous observations as the circumstances at the surface, in the soil and in the vadose zone are unique every time. Thus the effective infiltration as the entrance function was compared by the outflow from the vadose zone and also through the near karst spring Korentan (one year measurements) as the outflow function. At that time also several water tracing tests were carried out from the waste disposal sites Ribnica, Sežana and Kočevje, all lying on the karst. Thus I was able to compare the drainage through the vadose zone below the waste disposal sites with the drainage through the vadose zone in Postojnska jama.

Based on the results of continuous measurements of rainfall on the surface and discharge, EC and trickle temperature in the vadose zone I concluded:

- The water outflow dynamics out of the vadose zone is directly connected to inflow of fresh water, but not only dependant on intensity and quantity of really infiltrated rainfall but also on how the soil was moistened and how

much the vadose zone was filled by water. Only at well saturated soil and correspondingly filled up vadose zone the continuous outflow occurs all over the hierarchy of differently permeable fissures in the vadose zone. If the soil is not moistened enough the rainfall infiltrates through better permeable conduits in the soil and a great majority is stored in the vadose zone.

- The comparison of daily effective infiltration at the test site and hydrographs of the observed trickles in these consecutive three hydrological years (Chapter 5.1.4) showed essentially different drainage through differently permeable fissures – conduits. The largest, temporary trickle I after a rainfall rapidly conveys the water preserved in its background; at the beginning of water pulse during the highest discharges this water is mixed with freshly infiltrated rainfall and this is seen in characteristic decrease of EC. However the share in these water pulses did not exceed 15%. Less abundant but permanent trickles, such as trickle J react to rainfall with a certain delay after the trickle I (from ½ to 2 days). The structure of their background allows a good homogenization of infiltrated rainfall; this is reflected in discharge, EC, temperature and isotopic structure of oxygen. Isotopic analyses of the trickle J base flow showed that the average residence time is more than one year, while at trickle I it is 2,5 months only. Permanent dripping L with maximal discharge of only some ml/min has its peculiar pattern of outflow. Only periodically (not every year) a continuous complete emptying of its predominantly poorly permeable background and formation of a long lasting water pulse, up to several months, occur only when its background is filled up and soil saturated and then abundant and intense rainfall squeezes stored water from its background. Such type of conduits, although very modest regarding the quantity, is rather frequent and can together with trickles, as for example trickle J, importantly contribute into karst springs during dry periods when larger conduits are already dry. Abundant trickles (such as trickle I) rapidly drain a large quantity of water in rainy periods thus allowing a fast transport of eventual contaminants and efficient washing of wider vicinity of karst springs together with strong dilution effects.
- In summer dry periods, lasting from 2,5 to 6 months, a large quantity of less intensive rainfall (up to 390 mm of rainfall or up to 180 mm effectively infiltrated rainfall) is predominantly stored into the trickles background and

only a minimal outflow from the vadose zone occurs or it may even fail to come.

- Based on the calculations of annual quantities of infiltrated rainfall and quantity of water that drained out through the observed trickles in the vadose zone in three consecutive hydrological years I conclude that due to the differences at the infiltration (different distribution, intensity and quantity of rainfall) and because of different conditions at the surface, in the soil and in the vadose zone, the relation between the annual quantity of water that infiltrates into background and the water that drains out through the vadose zone and feed deeper parts of the aquifer differs significantly. Continuous and intensive rainfall during one hydrological year result in well saturated soil and well filled up vadose zone and continuous water drain from the entire hierarchy of interconnected fissures. Under the circumstances flowing out occurs also from poorly permeable parts of the vadose zone; these parts are emptied only temporary under special conditions (hydrological year 2003-2004). This is why the rainfall following such a period is mostly used for filling up the rather emptied background and consecutively the outflow from the vadose zone is smaller (the whole hydrological year 2004-2005 up to February 2006). In the hydrological year 2004-2005 in comparison with the previous year (Chapter 5.2.3) the EC measurements of the trickle J recorded essentially different course. From August 2005 to February 2006 the characteristic decrease in EC levels in trickle I failed to come in water pulses (Fig. 5.2.7.) evidencing the predominant outflow of previously stored water.
- The course of EC levels in trickles I and J (Fig. 5.2.8.) showed the oscillation of the values of trickle I around the values of trickle J. EC reflects the structure of trickles and indicates a high degree of homogenisation in the trickle J background. Trickle J has different hierarchy yet there are less permeable conduits that are hydraulically connected. In the background of trickle I a well permeable central conduit, enlarged due to intensive dissolution because of waste water drainage, supplements poorly permeable part of the background marked by high EC levels. The slowest is filling up and consecutively flowing out from the least permeable structure of the background; the largest share of it exists at trickle L. From this part of the vadose zone water flows out with essentially different dynamics. All this

proves that EC levels are an important natural tracer reflecting the functioning of the system and above all a changing dynamics of outflow from differently permeable parts of the background.

- In the period of low, decreasing discharges, usually since spring up to intensive autumn rain, when trickle I dries up for a longer time or only feebly reacts to rainfall, and trickles J and L reach minimal discharges, the infiltrated rainfall is predominantly stored in the vadose zone. When the conditions allow frequent soil drying up great differences occur in feeding the variously permeable parts of the background and consecutively the highest differences in outflow from the vadose zone occur. During watering with a huge quantity of water ($6 \text{ m}^3 \text{ m}$) with tracer in dry conditions (Chapter 5.6.1.) only a smaller share of water (4%) rapidly followed the most permeable conduits through the soil and further on through the vadose zone, while most of the water was stored in less permeable part of the background. The outflow from this part is released only after abundant and intensive rain providing that the soil is saturated and vadose zone full of water; this may occur after some months or even later.
- The ratio between the water quantities contributed by trickles I and J in consecutive hydrological years (2003-2006) together with decreased annual effective infiltration shows more and more large portion of permanent, smaller trickle J (Table 5.1.4.). The share of trickle L which decreased in the hydrological year 2004-2005 substantially increased (Fig. 6.1.) in the hydrological year 2005-2006. All this show the important role of previously stored water in annual or even of several years scale; this was the best seen at trickle L. In the hydrological year 2004-2005 when the effective infiltration was 10% lower than the previous year a distinctive decrease of outflow through all the trickles was noticed. Obviously a large part of infiltrated rain was used to fill up the background of trickles, as in the following hydrological year 2005-2006 in spite of even lower annual effective infiltration the reaction of trickles was more pronounced and annual quantity of water that drained through was larger, the most distinctive at trickle L. This also shows the importance of distribution of intensive and abundant rainfall controlling the infiltration of precipitations over the entire hierarchy of variously permeable fissures and consecutively their outflow.

- At the same time observed karst spring Korentan reflects the complexity of different types of conduits with the additional impact of various distances from the spring and temporary secondary recharge by the sinking stream. The share of freshly infiltrated water in a spring is relatively low (up to 13%), similar as in the most permeable among the observed trickles; this means that also through well permeable fissures in the vadose zone the stored water is predominantly drained.

Observations of contaminants transport through the vadose zone offer new cognitions:

- Transport of substances through the vadose zone is directly connected with the drainage dynamics of the infiltrated precipitations. Since spring 1991 the pollution at the surface is reflected in increased concentrations of nitrates (up to 180 mg NO_3^-/l), chlorides (up to 60 mg Cl^-/l), sulfates (up to 50 mg $\text{SO}_4^{2-}/\text{l}$) and o-phosphates (up to 2,8 mg $\text{PO}_4^{3-}/\text{l}$) in observed trickles. In the following three years the contaminant concentrations rapidly decreased due to washing out by rainfall (altogether 4700 mm) (splashing of more permeable fractures) and later this process was noticeably slower (rinsing poorly permeable part of background) (Fig. 5.4.1.). The first to be rinsed were chlorides (10 years), slower nitrates remaining in 2006 still in a slight increase. Essentially slower is rinsing of o-phosphates. After 17 years when more permeable fractures were already rinsed, a part of contaminants was still preserved in the least permeable parts of the background; this is concordant with findings about filling up and emptying the variously permeable parts of the vadose zone. Long lasting observations of the transport of this pollution have shown that also a minor pollution at the surface needs more decades until the reestablishment of the initial stage is set underground.
- In the years 2003 to 2005 during the minimal discharges there was the worst transport of contaminants in dry periods. The most intensive transport occurred after an intensive rain after long dry periods during water pulses concordantly with water dynamics. In trickle I the nitrate and o-phosphate level concentrations decrease during the discharge increase, the same sulfates coinciding with EC and in a great extent also with tracer rinsing that was injected in June 2002 over the soil at the surface. This shows that the initial

outflow of water from poorly permeable part of the background is joined by inflow of water through more permeable, already rinsed fractures reflected in a dilution effect. Also trickle J with hierarchy of poorly permeable fractures is characterised by the most intensive transport of contaminants in the very first water pulses after a longer drought which can last for the whole month and deviate from the pattern of rinsing in the following water pulses in the hydrological year when the transport is more modest. After 2003 at trickles I and J a trend of slow decrease of the nitrate concentrations is noticeable and even slower decrease in o-phosphate levels.

- Slight changes in the system importantly influence on the dynamics of drainage and on transport of substances through permeable conduits; this was seen at the observations of the trickle I water pulse after the snow melting and short lasting freezing of the surface in consecutive nights (Chapter 5.4.3.3.). At each freezing the trickle discharge diminished but EC, eosine concentration and nitrate and o-phosphate levels increased; this is pointed out by a higher rate of stored water from less permeable part of the background at diminished discharge through more permeable conduits; this water was retained in the background for a shorter time (Chapter 5.3.2.). In trickle J the discharge formed a continuous pulse without oscillations and also other parameters reflect homogenisation in its background (Chapter 5.4.3.4.).
- The analyses of contemporary increased levels of calcium, total hardness and contaminants: chlorides, nitrates, sulfates and o-phosphates in observed trickles showed a linear dependence between the both categories. This means that at higher quantity of contaminants also the calcium and total hardness have increased, or in other words, increased limestone dissolution occurred. The limestone dissolution in the cave ceiling through which the waste water percolated was twice as big as in trickles nearby lying out of the sphere of pollution (Chapter 5.5). This means an accelerated widening of the conduits deeper in the vadose zone. But this also allows spreading of contaminants through the vadose zone. In the final stage of such development I conclude that a rapid transport of contaminants through the vadose zone and through the underground conduits further into aquifer up to karst spring takes place.
- We must take into account that below the release of waste water directly into karst environment and other similar releases, such as various waste disposal

sites from where the rainfall rinses soluble rocks, limestone dissolution is increased and consecutively conduits are more permeable for water and contaminants.

The water tracing tests with artificial tracers by different ways of tracer injection gave us new results:

- They showed that when the vadose zone is well filled up the transport of soluble substances through it is continuous after rainfall, with velocities up to 4.3 m/h when the velocities in differently permeable conduits were at ratio 1:6 (Table 5.6.2.)
- When the vadose zone was not well filled up in spite of washing the tracer by a large amount of water (6 m³) only minimal quantities reached the vadose zone through the most permeable conduits ($v_{\text{dom}}=0.05$ m/h) and the majority of tracer was stored for several months in a less permeable part of the background. Long lasting gradual washing is occurring after abundant and intensive rainfall only. This means almost up to 2000-times smaller velocities (Table 5.6.1), $v_{\text{dom}}=0.05$ m/h.
- In June 2002 the combined water tracing test when the tracers were injected in relatively dry conditions (Chapter 5.6.3.) showed that soil and sediments on the surface present an important filter for transport of soluble substances in natural conditions. The tracer that was injected directly into the vadose zone shaped several tracing pulses and reached the maximal concentration after five months ($v_{\text{dom}}=0.03$ m/h). At the same time injected tracer over the soil on the surface (10 cm of soil and below a thicker layer of mixture of soil and limestone pieces) in the time of consecutive hydrological years formed several tracing pulses. But the highest tracer concentration was reached only after three years and three months. Related to this concentration the dominant drainage velocity is ten times lower than the drainage of tracer injected directly into vadose zone.
- Combined tracing showed the influence of soil and sediment to long duration of transport of soluble substances through the vadose zone by rinsing with rainfall; not only exchange of water but also various physical and chemical processes probably play an important role providing new possibilities for

research. Observations of more than 6 years lasting washing of injected tracer indicate the residence time of water and soluble substance in the worst permeable part of the background in the vadose zone.

- The isotopic analyses of oxygen showed that the average residence time of a rainfall in the background of trickle J composed by a hierarchy of less permeable conduits is at least one year but may be a lot longer.

Water tracings from the waste disposal sites on the Slovene karst executed at the same time and observations of drainage through the vadose zone in Postojnska jama helped to explain the transport of tracer through the vadose zone below the waste disposal sites:

- Water tracing tests from the waste disposal sites (Chapter 5.7) that are in operation for about 30 years showed fast drainage through the vadose zone up to karst springs. In the case of the waste disposal site near Ribnica when the injection was followed by a heavy rain, the drainage velocity was very high ($v_{\text{dom}} = 4 \text{ cm/s}$). At tracing at Kočevje and Sežana waste disposal sites when only slight rainfall accompanied the tracing the transport of tracer reached the Bilpa and Timavo springs at decreasing, relatively low discharge; the velocity up to Bilpa was $v_{\text{dom}} = 1.4 \text{ cm/s}$, and up to Timavo $v_{\text{dom}} = 2 \text{ cm/s}$. In Bilpa two thirds of the injected tracer appeared in the first tracing pulse in the time of one month and in the Timavo less than half. Fast drainage in such conditions indicates high permeability of central conduits in the vadose zone below the waste disposal sites; this fact corresponds to stated increase in dissolution of carbonate rocks due to contaminant impact.
- In comparable conditions the tracing from the military training area Poček (dispersed pollution by metals mainly) near Postojna indicated a considerably slower drainage ($v_{\text{dom}} = 0.7 \text{ cm/s}$) as for the first tracing pulse when only 4% of injected tracer were recovered.
- The Bilpa spring combining both the polluted water of the Rinža and waters oozed out the waste disposal site has increased nitrate and o-phosphate levels and EC and total hardness. Observations of a smaller water pulse of Bilpa showed at the discharge increase the influence of the polluted Rinža, and in the decreasing part of the pulse along with increased transport of tracer also

the transport of contaminants from the waste disposal site and at the same time an increased total hardness. To reveal and demonstrate the negative influences of waste disposal sites there is the possibility not only by water tracing tests with artificial tracers but to observe minutely the chosen contaminants in less distinctive water pulses.

The uses of resistivity imaging in the time of the water injection showed a very fast drainage and the accumulation of water or increase of the area of higher conductivity somewhere 10 m below the surface. Probably this is an old cave passage filled by sediments, out of which water drains slowly. It would be reasonable to continue these researches as the acquired results and experience are not yet enough.

The comparison of numerous measured parameters with the discharge measurements showed that the researches linked to dynamics of water drainage through the vadose zone, or, otherwise through karst aquifers up to karst springs (transport of substances, contaminants, dissolution of rock) must take into account hydrodynamics and that this part of study is compulsory. The explanations of the substances transport, contaminants and tracers in water tracing tests are directly linked to water flow and processes of storage in the vadose zone. The absence of an immediate appearance of a spilt contaminant after an accident does not necessarily mean that the contamination of a certain karst spring did not occur; but also its fast appearance, if one cannot measure its recovered quantity, does not mean that the contaminant will not reappear later even more distinctively or appear in some other karst spring.

The researches indicate the dynamics in the vadose zone, the dynamics of water flow and storage of infiltrated rainfall depending on the conditions at the surface and in the vadose zone, the transport of contaminants, the influence of contaminants on the rock dissolution and contributed to the understanding of the vadose zone role, and additionally the importance of the soil in the karst aquifer. New knowledge related to the transport of contaminants from the karst surface (the vadose zone of Postojnska jama, waste disposal sites) will be useful at planning the space use and also at methodical safeguarding the quality of karst water sources.

Within the continuous long-lasting measurements I reached some methodological conclusions:

- The choice of suitable observation points based on the previous researches or the preceding knowledge is very important at researching. Important is also simultaneous monitoring of all the chosen points (rainfall, trickles, springs) as the circumstances at all the levels are unique.
- Due to long-lasting measurements at several points the mutual intercalibration of instruments and equal setting of time proved to be indispensable especially important at measuring fast changes within the water pulses.
- The discharge measurements of variously abundant trickles conceived at the level measurements were calculated on the base of temporary direct measurements of discharge or adjustment curve. These measurements are required during the whole time of observations as this means a serious check up.
- It was shown that the substances transport is inseparably connected with the dynamics of water drainage through differently permeable fissures in the vadose zone and that the correct understanding of this transport urgently requires the parallel monitoring. I assume that this is the necessary base of all the researches connected to water drainage (dissolution and deposition of carbonates, biological, microbiological researches...).
- Parallel use of a large choice of parameters: discharge, temperature, specific electric conductivity, carbonate, calcium, magnesium, chloride, nitrate, sulfate, o-phosphate levels, isotopic analyses of oxygen and water tracing test with artificial tracers and the method of resistivity imaging have shown that the results are frequently complemented and confirmed and this means checked results. But they also open new questions that can direct further researches.

I hope that all the listed new knowledge will be a good base for further researches and, above all, that they will be directly useful at planned and long-lasting protection of the karst spring quality as we must tend towards safeguarding of the best possible quality of our karst springs and not only to attain the accepted normative.

8 VIRI

8.1 LITERATURA

- Atkinson, T.C. 1977. Carbon dioxide in the atmosphere of the unsaturated zone: An important control of groundwater hardness in limestones. *J. Hydrol.* 35: 11-125
- Bakalowicz, M., Blavoux B., Mangin, A. 1974. Apport du traçage isotopique naturel à la connaissance du fonctionnement d'un système karstique – teneurs en oxygène-18 de trois systèmes des Pyrénées, France. *Journal of Hydrology*, 23,1/2, 141-158
- Biondić, B. 2000. Karst groundwater protection: The case of the Rijeka region, Croatia. *Acta carsologica*, 29, 1: 33-46
- Biondić, B., Biondić, R., Kapelj, S. 2006. Karst groundwater protection of the Kupa catchment area and sustainable development. *Environmental Geology*, 49,6: 828-839
- Barker, J. and Moore, J. 1998. Application of time-lapse electrical tomography in groundwater studies. *Lead. Edge*, 17(10): 1454-1458
- Cucchi, F., Zini L. 2002. Underground Timavo river monitoring (Classical Karst). Monitoring of Karst caves. *Acta carsologica*, 31, 1: 75-84
- Čencur Curk, B., Trcek, B., Veselic, M. 2001. The study of solute transport with natural and artificial tracers at experimental field site Sinji Vrh. *RMZ-mater. geoenviron.*, 48, 3:401-413
- Daily, W., Ramirez, A., Labrecque, D., Nitao, J. 1992. Electrical-resistivity tomography of vadose water-movement. *Water Resources Research*, 28(5): 1429-1442.
- Dingman, S.L. 1994. *Physical hydrology*. New York, Macmillian College Publishing Company: 575 p.
- Dreybrodt, W., 1988. *Processes in Karst Systems (Physics, Chemistry, and Geology)*. Berlin/Heidelberg/New York/London/Paris/Tokyo, Springer-Verlag: 288 str.

- Dreybrodt, W. 2000. Equilibrium Chemistry of Karst Water in Limestone Teranes.- In: Speleogenesis, 126-135, Huntsville.
- Gabrovšek F., Peric B. 2006. Monitoring the flood pulses in the epiphreatic zone of Karst aquifers. *Acta carsologica*, 35, 1: 35-45
- Gospodarič R., 1976. Razvoj jam med Pivško kotlino in Planinskim poljem v kvartarju (Quaternary cave development between the Pivka Basin and Polje of Planina). *Acta carsologica*, 7: 9-139
- Gospodarič, R., Habe, F. & Habič, P. 1970. The karst of Orehek and the source of the Korentan. *Acta carsologica*, 5, 95-108
- Groote P. M., Stuiver M., Thompson L. G., Mosley-Thompson E. 1989. Oxygen isotope changes in tropical ice, Quelccaya, Peru. *J. Geophys. Res.* 94: 1187-1194
- Gunn J. 1983. Point recharge of limestone aquifers – a model from New Zealand karst. *Journal of Hydrology*, 61: 19-29
- Hötzl H. 1995. Project II: Bauschotter limestone platform. Hydrogeological aspects of groundwater protection in karstic areas. COST action 65: Final report. Brussels-Luxembourg, 124-131
- Jeannin, P-Y & A.D. Grasso, 1995: Recharge respective des volumes de roche peu perméable et des conduits karstiques, rôle de l'épikarst. *Bulletin d'Hydrologie*, 14, 95-111
- Klimchouk A. 1995. Karst Morphogenesis in the epikarstic zone. Cave and karst science. Inter. Symp. on changing karst environments, Oxford and Huddersfield 1994, 21, 2: 45-50
- Knez, M., Kogovšek, J., Kranjc, A., Mihevc, A., Šebela, S., Zupan Hajna, N. 1995. National report for Slovenia. V: COST action 65 : hydrogeological aspects of groundwater protection in karstic areas : final report. Luxembourg: European commission, 247-260
- Kogovšek, J., Habič, P. 1981. Preučevanje vertikalnega prenikanja vode na primerih Planinske in Postojnske jame. *Acta carsologica*. 9: 129-148

- Kogovšek J. 1982. Vertikalno prenikanje v Planinski jami v obdobju 1980/81. *Acta carsologica*. 10: 110-125
- Kogovšek J. 1983. Prenikanje vode in izločanje sige v Pisanem rovu Postojnske jame. *Acta carsologica*. 11: 63-76
- Kogovšek J. 1984. Vertikalno prenikanje v Škocjanskih jamah in Dimnicah. *Acta carsologica*. 12: 49-65
- Kogovšek J. 1987. Naravno čiščenje sanitarnih odplak pri vertikalnem prenikanju v Pivki jami = Natural purifications of sanitary sewage during the vertical percolation in Pivka jama. *Acta carsologica*. 16: 121-139
- Kogovšek J. 1990. Značilnosti pretakanja padavin skozi strop Taborske jame. *Acta carsologica*. 19: 139-156
- Kogovšek, J. 1994a. Kombinirano sledenje skozi strop Pivke jame. *Naše jame*, 36: 58-66
- Kogovšek J 1994b. Prenikajoča voda v jamah primorskega krasa. *Ann, Ser. hist. nat.*, 4, 4: 149-154
- Kogovšek J. 1995a. Podrobno spremljanje kvalitete vode, odtekajoče z avtoceste in njen vpliv na kraško vodo. *Annales*, 5, 7: 149-154
- Kogovšek J. 1995b. Izlitja nevarnih snovi ogrožajo kraško vodo: onesnaženje Rižane oktobra 1994 zaradi izlitja plinskega olja ob prometni nesreči pri Obrovu. *Annales*, 5, 7: 141-148
- Kogovšek J. 1995c. The surface above Postojnska jama and its relation with the cave : The case of Kristalni rov. V: CIGNA, Arrigo A. (ur.). *Grotte turistiche e monitoraggio ambientale : simposio internazionale*. preprint. Frabosa Soprana (Cuneo): 29-39
- Kogovšek J. 1996. Kako smetišča ogrožajo kakovost kraške vode. *Annales*, 6, 9: 111-114
- Kogovšek J. 1997a. Pollution transport in the vadose zone. V: GÜNAY, Gültekin (ur.), JOHNSON, A. Ivan (ur.), TEZCAN, Levent (ur.), ATILLA, A. Özlem

- (ur.). Karst waters & environmental impacts : proceedings. Rotterdam; Brookfield: A.A. Balkema: 161-165
- Kogovšek J. 1997b. Nekatere značilnosti prenikajoče vode na Lunanskem krasu, Yunnan, Kitajska = Some properties of the percolation water in the karst of Lunan, Yunnan province, China. *Acta carsologica*. 26, 2: 441-456
- Kogovšek J. 1998. Rock dissolution in stone forests. V: XIAOPING, Chen, GABROVŠEK, Franci, CHUXING, Huang, YUZHANG, Jin, KNEZ, Martin, KOGOVŠEK, Janja, HONG, Liu, PETRIČ, Metka, MIHEVC, Andrej, OTONIČAR, Bojan, SLABE, Tadej, MENGXIONG, Shi, ŠEBELA, Stanka, WENQING, Wu, SHOUYUE, Zhang, ZUPAN HAJNA, Nadja. South China karst, (Zbirka ZRC, 19). Ljubljana, Založba ZRC, ZRC SAZU, 68-81
- Kogovšek J. 1999. Nova spoznanja o podzemnem pretakanju vode v severnem delu Javornikov (Visoki kras) = New knowledge about the underground water drainage in the Northern part of Javorniki Mountains (High Karst). *Acta carsologica*, 28, 1: 161-200
- Kogovšek J. 2000. Ugotavljanje načina pretakanja in prenosa snovi s sledilnim poskusom v naravnih razmerah.. *Annales*, 10, 1=19, 133-142
- Kogovšek J. 2007a. Ugotavljanje dinamike pretakanja padavin skozi vadozno cono krasa na osnovi meritev pretoka = Rainwater percolation dynamics assessment through the vadose karst zone on the basis of discharge measurements. *Acta carsologica*. 36, 2: 245-254
- Kogovšek J. 2007b. Vpliv prometa na kraške vode. V: Knez M., Slabe T. (ur.). *Kraški pojavi, razkriti med gradnjo slovenskih avtocest. (Carsologica 7)*. Postojna, Ljubljana, Založba ZRC, ZRC SAZU: 225-238
- Kogovšek, J., Kranjc, A. 1988. Opazovanje kislosti padavin v Postojni v letih 1985-1987. *Geografski zbornik*, 60: 21-29
- Kogovšek J., Petrič M. 2002a: Ogroženost kraškega sveta. V: UŠENIČNIK, Bojan (ur.). *Nesreče in varstvo pred njimi*. Ljubljana: Uprava RS za zaščito in reševanje Ministrstva za obrambo, 170-183

- Kogovšek, J., Petrič M. 2002b. Podzemno raztekanje vode iz ponora Tržiščice (JV Slovenija). *Acta carsologica*, 31, 2: 75-91
- Kogovšek J., Petrič M. 2004. Advantages of longer-term tracing -- three case studies from Slovenia. *Environmental geology*, 47, 1: 76-83
- Kogovšek J., Petrič M. 2006. Tracer test on the Mala gora landfill near Ribnica in south-eastern Slovenia = Sledilni poskus na odlagališču Mala gora pri Ribnici v jugovzhodni Sloveniji. *Acta carsologica*, 35, 2: 91-101
- Kogovšek J., Petrič M. 2007. Directions and dynamics of flow and transport of contaminants from the landfill near Sežana (SW Slovenia) = Smeri in dinamika odtekanja vode in prenosa kontaminantov z odlagališča odpadkov pri Sežani (JZ Slovenija). *Acta carsologica*, 6, 3: 413-424
- Kogovšek J., Šebela S. 2004. Water tracing through the vadose zone above Postojnska Jama, Slovenia. *Environmental Geology*, 45, 992-1001
- Kogovšek J., Urbanc J. 2007. Ocena dinamike prenikajoče vode skozi vadozno cono Postojnske jame na osnovi izotopskih značilnosti = Estimation of percolating water dynamics through the vadose zone of the Postojna cave on the basis of isotope composition. *Geologija*, 50, 2: 477-486
- Miko, S., Kuhta, M., Kapelj, S. 2002. Environmental baseline geochemistry of sediments and percolating waters in the Modrić cave, Croatia. Monitoring of Karst caves. *Acta carsologica*, 31, 1: 135-149
- Maloszewski P., Stichler W., Zuber A., Rank, D. 2002. Identifying the flow systems in a karstic-fissured-porous aquifer, Schneealpe, Austria, by modelling of environmental ^{18}O and ^3H isotopes. *Journal of Hydrology*, 256, 1-2: 48-59
- Maloszewski P., Zuber A. 1982. Determining the turnover time of groundwater systems with the aid of environmental tracers - 1. Models and their applicability. *Journal of Hydrology*, 57: 207-231
- Mangin, A., 1973: Sur la dynamique des transferts en aquifère karstique. Proc. of the 6th Inter. Cong. of Speleology, Olomuc, 4:157-162
- Perrin J, Jeannin P.-Y., Zwahlen F. 2003a: Epikarst storage in a karst aquifer: a

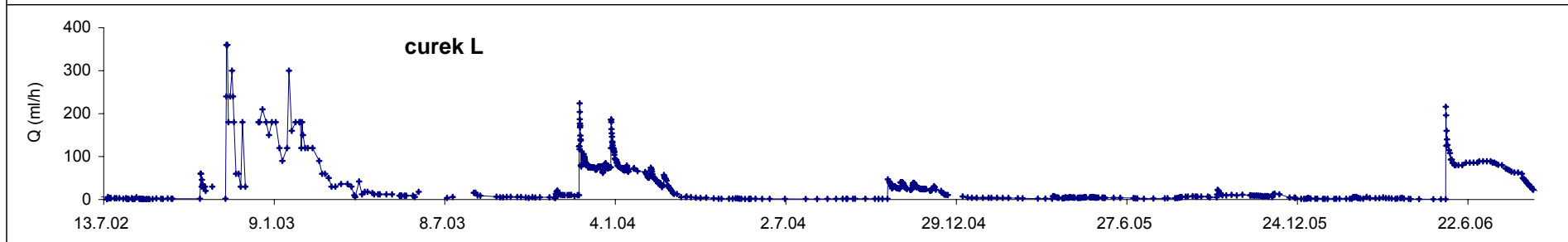
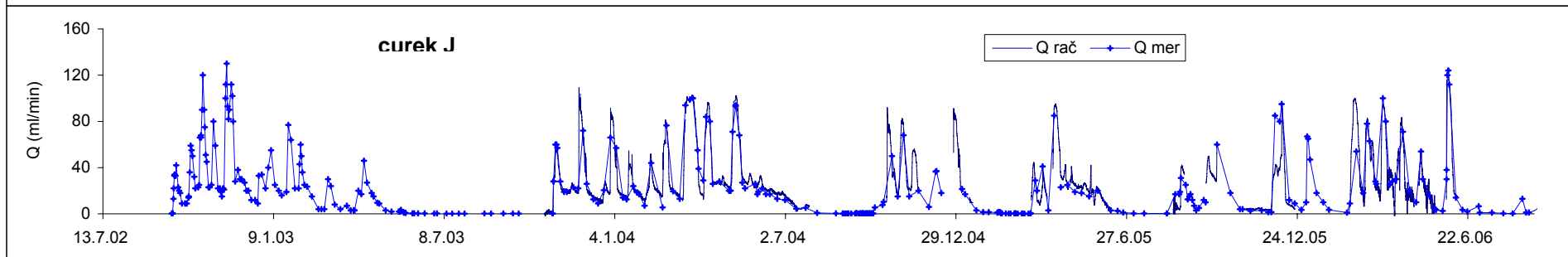
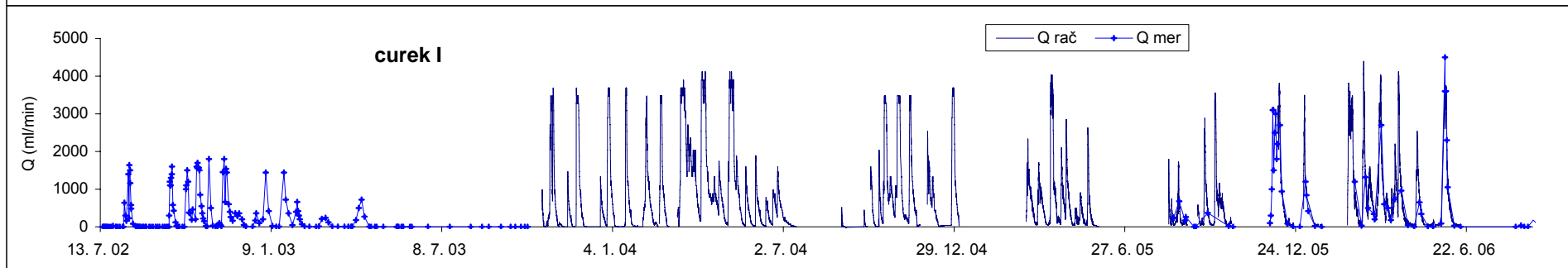
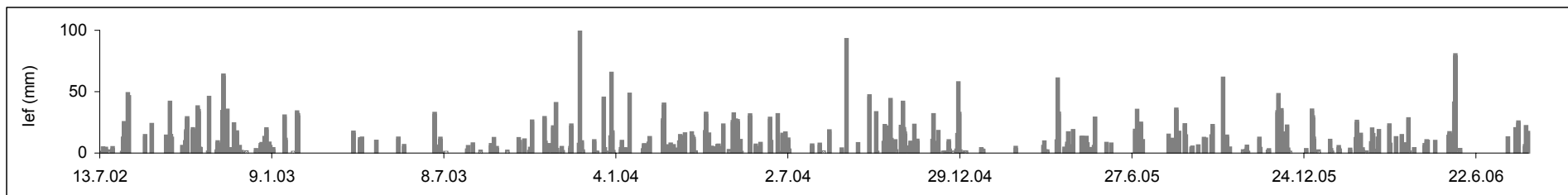
- conceptual model based on isotopic data, Milandre test site, Switzerland. *Journal of Hydrology*, 279, 1: 106-124
- Perrin J., Jeannin Y., Zwahlen F. 2003b. Implications of the spatial variability of infiltration-water chemistry for the investigation of a karst aquifer: a field study at Milandre test site, Swiss Jura. *Hydrogeology Journal*, 11, 6: 673-686
- Perrin J., Pochon A., Jeannin P.-Y., Zwahlen F. 2004. Vulnerability assessment in karstic areas: validation by field experiments. *Environmental Geology*, 46, 2: 237-245
- Petrič M., 2000. Značilnosti odnosa med napajanjem in praznjenjem kraškega vodonosnika v zaledju izvirov Vipave (Slovenija) = Characteristics of the recharge-discharge relation of the karst aquifer in the background of the Vipava springs (Slovenia). *Acta carsologica*, 29, 2: 271-292
- Petrič, M., 2001. The role of accurate recharge estimation in the hydrodynamic analysis of karst aquifers. *Acta carsologica*, 30, 1: 69-84
- Petrič, M., 2002. Characteristics of recharge-discharge relations in Karst aquifer. (Zbirka Carsologica). Postojna, Ljubljana, Založba ZRC SAZU: 154 str
- Petric, M., Sebel, S., 2004. Vulnerability mapping in the recharge area of the Korentan spring, Slovenia. *Acta carsologica*, 33, 2:151-168
- Pezdič, J., 1999. Izotopi in geokemijski procesi : univerzitetni učbenik. Ljubljana, Naravoslovnotehniška fakulteta, Oddelek za geologijo: 269 str.
- Pipan, T., 2005. Epikarst – a promising habitat. Copepod Fauna, its diversity and ecology: case study from Slovenia (Europe). *Carsologica* 5. Postojna, Ljubljana, Založba ZRC SAZU: 86 str.
- Ravbar, N. 2007. The protection of karst waters. A comprehensive slovene approach to vulnerability and contamination risk mapping. *Carsologica* 6. Postojna, Ljubljana, Založba ZRC SAZU: 254 str.
- Sket, B., Trontelj, P., Žagar, C.: Speleobiological characterization of the epikarst and its hydrological neighbourhood: its role in dispersion of biota, its ecology and vulnerability. Epikarst. Proc. of symposium 1-4 October, 2003, Shepherdstown, West Virginia, USA, 104-113

- Smart, P.L., Friedrich, H. 1986: Water movement and storage in the unsaturated zone of a maturely karstified carbonate aquifer, Mendip Hills, England, In: Proceedings of the Conference on environmental problems of karst terranes and their solutions, National Water Well Association, Dublin, 59-87
- Shevenell, L, McCarthy, J.F. 2002: Effects of precipitation events on colloids in a karst aquifer. *Journal of Hydrology*, 255, 1/4, 50-68
- Stichler, W., Trimborn, P., Maloszewski P., Rank D., Papesch, W., Reichert, B. 1997: Isotopic investigations. *Acta carsologica XXXVI/a: Karst Hydrogeological Investigations in South-Western Slovenia*, 213-235
- Stichler W., Schotterer U., Fröhlich K., Ginot P., Kull C., Gäggeler, H., Pouyaud, B. 2001. Influence of sublimation on stable isotope records recovered from high-altitude glaciers in tropical Andes. *Journal of geophysical research*, 106, D19: 22,613-22,620
- Šebela S. 1998. Tektonska zgradba sistema Postojnskih jam. Tectonic Structure of Postojnska jama Cave System. Postojna, Ljubljana, Založba ZRC SAZU:112 str.
- Telford, W.M., Geldart, L.P. and Sheriff, R.E., 1990. *Applied geophysics*. Cambridge University Press, Cambridge [England]; New York, 770 p.
- Tooth A.F., Fairchild I.J. 2003. Soil and karst aquifer hydrological controls on the geochemical evolution of speleothem-forming drip waters, Crag cave, southwest Ireland. *Journal of Hydrology*, 273: 51-68
- Trček, B., 2003. Epikarst zone and the karst aquifer behaviour. A case study of the Hubelj catchment, Slovenia. *Geološki zavod Slovenije, Ljubljana*, 100 p.
- Trček, B., Veselič, M. in Pezdič, J. 2002. The upper unsaturated zone of the karst aquifer in the catchment area of the Hubelj spring (SW Slovenia). V: GABROVŠEK, F. (ur.). *Evolution of karst: from prekarst to cessation, (Carsologica)*. Postojna, Ljubljana: Založba ZRC: 387-394
- Urbanc, J. & J. Kogovšek & J. Pezdič, 1990. Izotopska sestava kisika in ogljika v vodi iz Taborske jame. *Acta carsologica* 19, 157-163

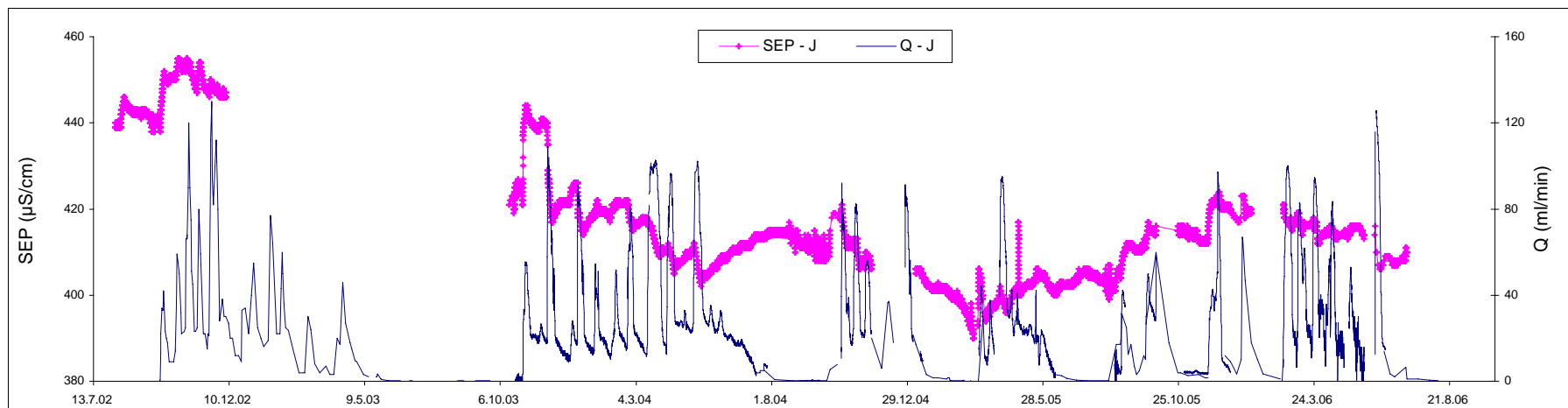
- White, B.W., 1988. *Geomorphology and Hydrology of Karst Terrains*.
Geochemistry of Karst Waters. Oxford University Press: 193-219
- White, B.W. 1999. Karst hydrology: recent developments and open questions.
Hydrogeology and Engineering Geology of Sinkhole and Karst –1999, Proc.
of conf. on sinkholes and the engineer. and environ. impacts of karst,
Harrisburg-Hershey, Pennsylvania, 3-21, Balkema, Rotterdam
- Williams, P.W., 1983: The role of the subcutaneous zone in karst hydrology. *Journal
of Hydrol.* 61,45-67, Amsterdam
- Zhou, W., Beck, B. and Adams, A., 2002. Effective electrode array in mapping karst
hazards in electrical resistivity tomography. *Environmental geology*, 42(8):
922-928

8.2 DRUGO GRADIVO

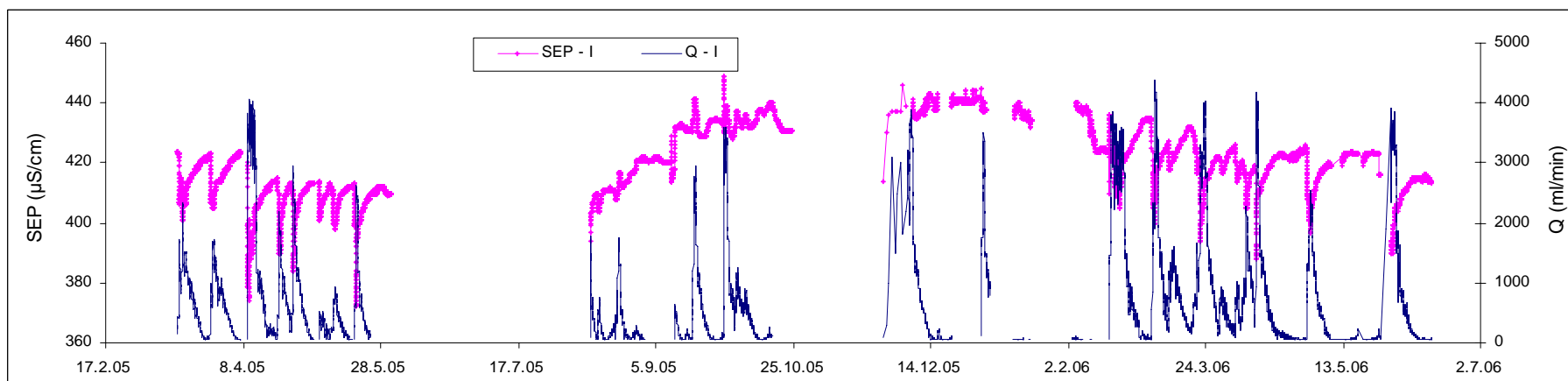
- Drole, F., 1992: Poročilo o prenosu koordinat jamskega poligona Pisanega rova
Postojnske jame na površje.- Arhiv IZRK, 2 str. + 3 priloge, Postojna
- Kogovšek, J., Petrič, M. 2007. Končno poročilo o rezultatih sledenja z območja
odlagališča Mozelj, Arhiv IZRK ZRC SAZU, 29 str.
- Pezdič, J., Leskovšek-Šefman, H., Dolenc, T., Urbanc, J., 1984. Isotopic study of
karst water. Final Report on Research Contract No.2845/RB. J.Stefan
Institute, University E. Kardelj, Ljubljana, 47 str.
- Schulte, U., 1994: *Geologische und Hydrogeologische Untersuchungen im Karst von
Orehek (Slowenien).*– Diplomarbeit, Universität Karlsruhe, Deutschland
- Standard Methods for Examination of Water and Wastewater, 1992, 18th Edition,
Washington



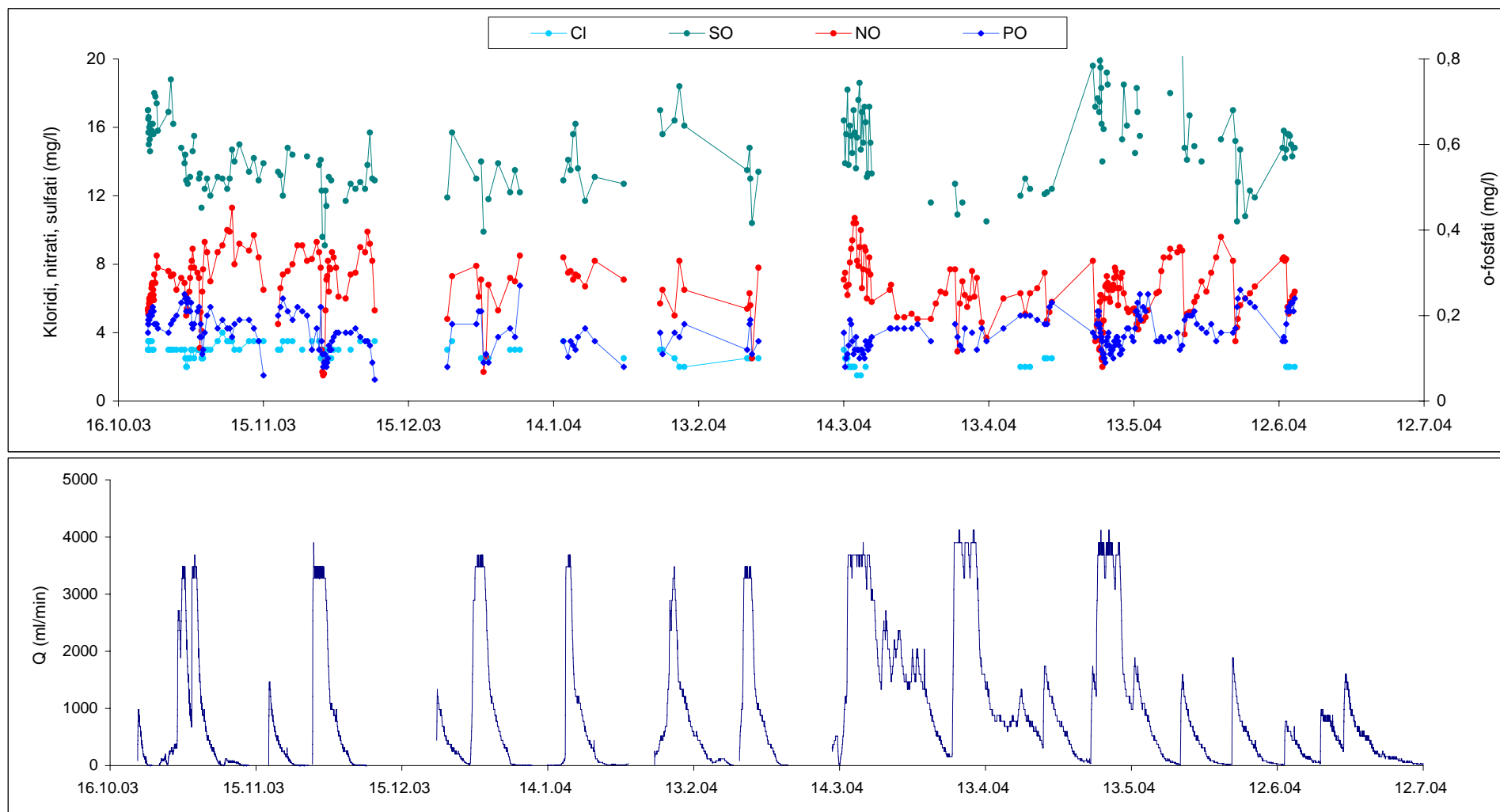
Slika 5.1.22: Efektivna infiltracija in hidrogrami curkov I, J in L v času štirih zaporednih hidroloških let.



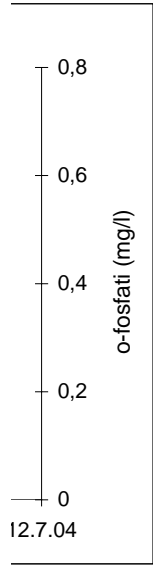
Slika 5.2.6: Curek J - potek SEP v zaporednih hidroloških letih ob danih nihanjih pretoka.

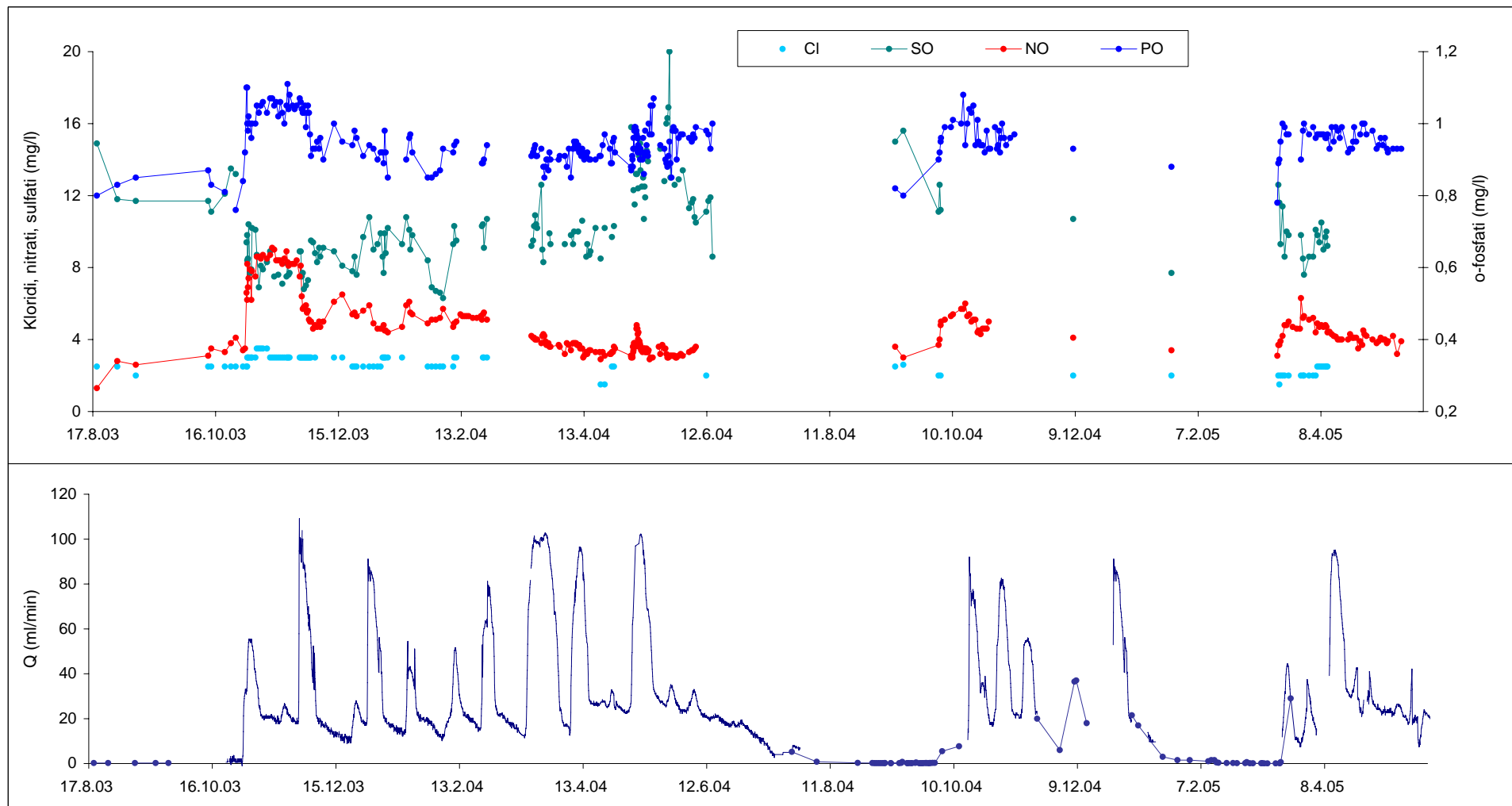


Slika 5.2.7: Curek I - potek SEP in hidrogram za obdobje od februarja 2005 do junija 2006.

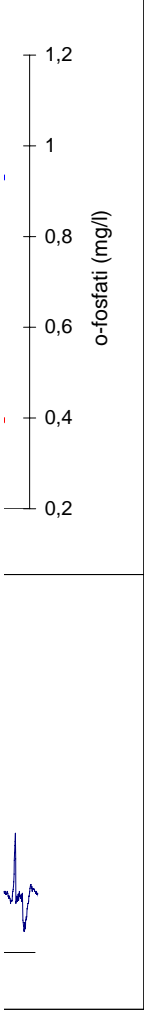


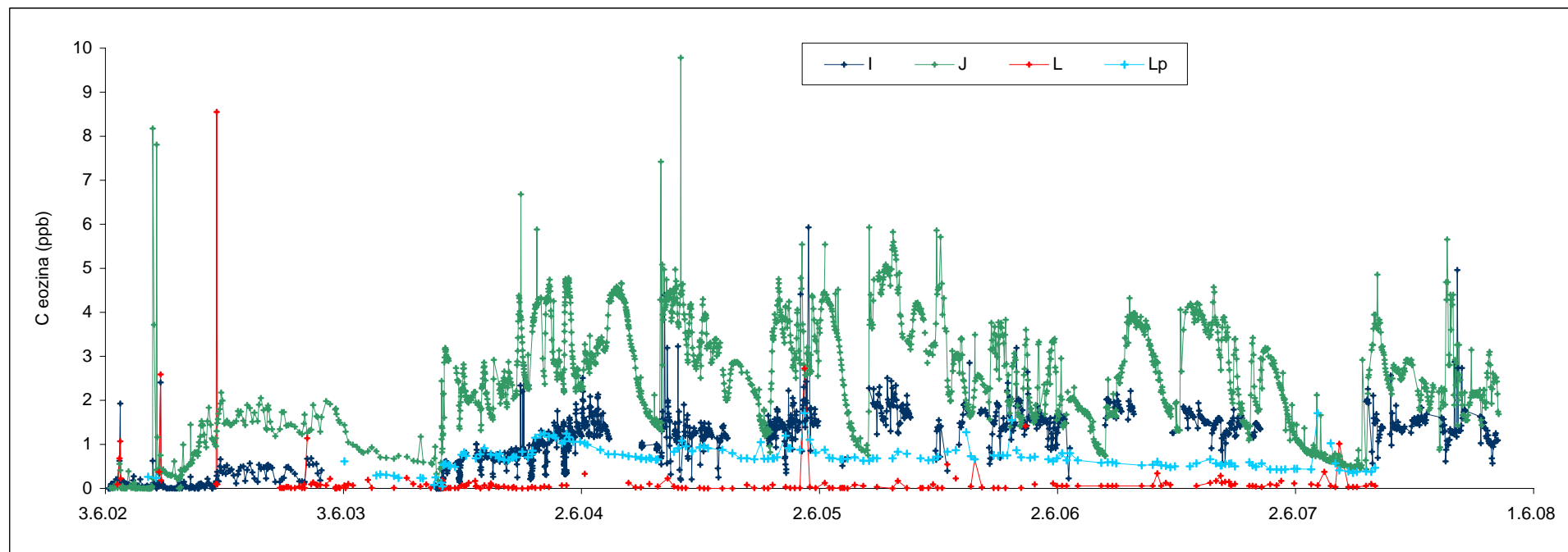
Slika 5.4.2: Curek I - prenos kloridov, nitratov, sulfatov in o-fosfatov ter hidrogram curka v času hidrološkega leta 2003-04.



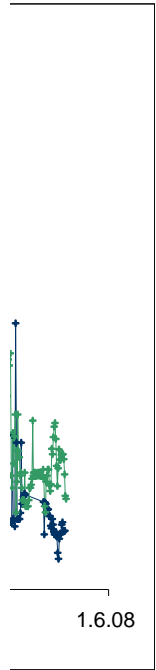


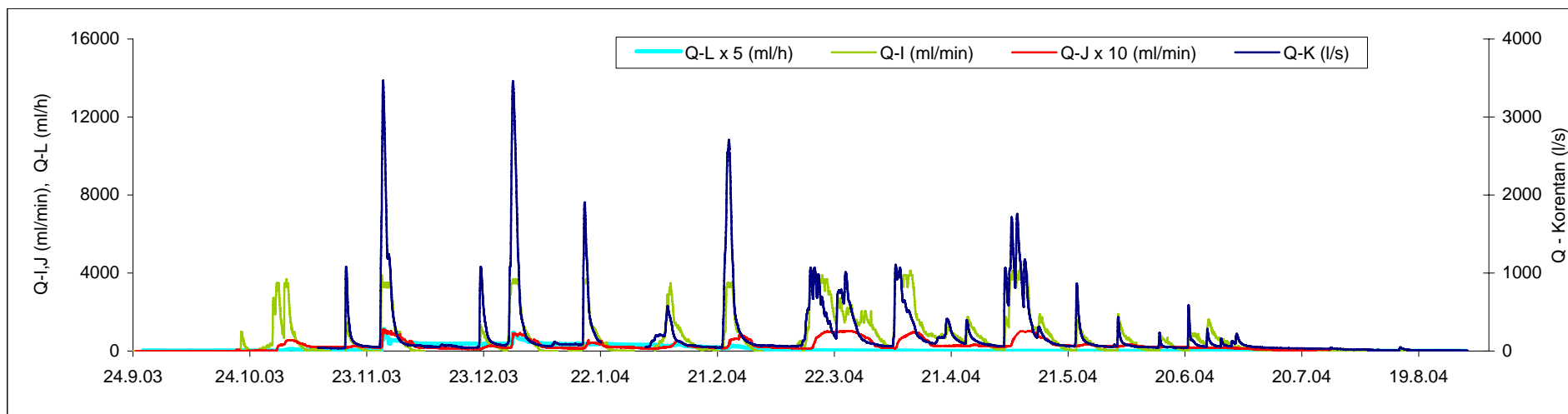
Slika 5.4.3: Curek J - prenos kloridov, nitratov, sulfatov in o-fosfatov ter hidrogram curka v hidroloških letih 2003-04 in 2004-05.



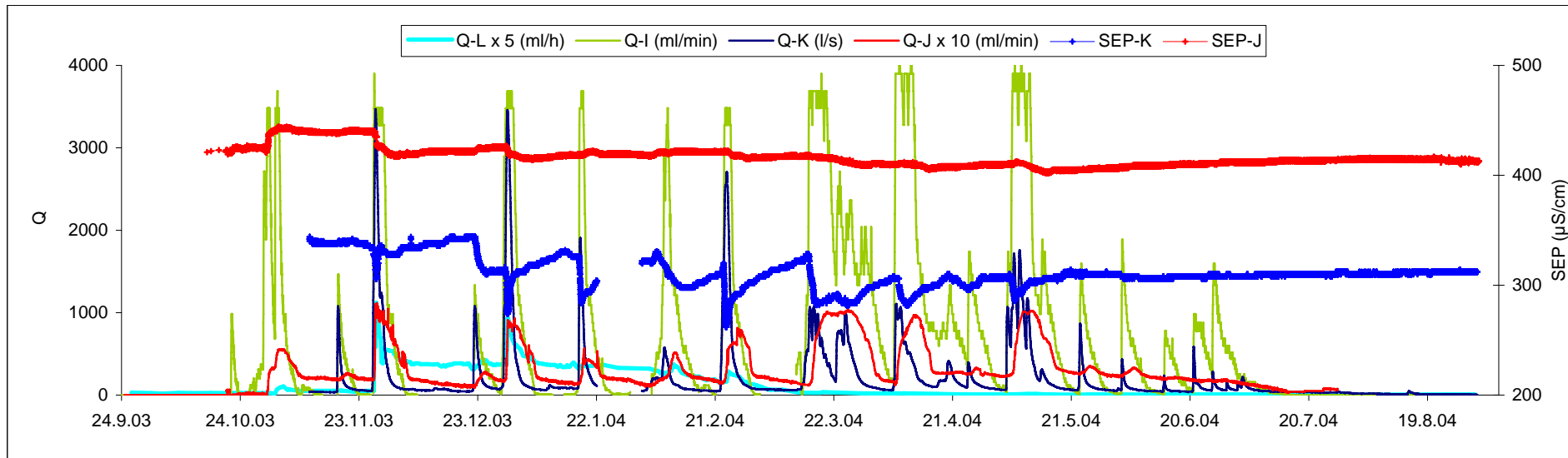


Slika 5.6.26: Prenos junija 2002 injiciranega sledila skozi curke I, J, L in Lp ob spiranju s padavinami v obdobju 6 let.





Slika 5.8.2: Hidrogrami curkov I, J in L ter hidrogram Korentana s poudarkom na primerjavi oblik vodnih valov.



Slika 5.8.3: Potek SEP Korentana in curka J ob danih nihanjih pretoka v hidrološkem letu 2003-04.

