

ZAKLJUČNO POROČILO
O REZULTATIH OPRAVLJENEGA RAZISKOVALNEGA DELA
NA PROJEKTU V OKVIRU CILJNEGA RAZISKOVALNEGA
PROGRAMA (CRP) »KONKURENČNOST SLOVENIJE 2006 – 2013«

I. Predstavitev osnovnih podatkov raziskovalnega projekta

1. Naziv težišča v okviru CRP:

Povezovanje ukrepov za doseganje trajnostnega razvoja

2. Šifra projekta:

V1-0293

3. Naslov projekta:

Starost, izvor in dinamika vod globokih vodonosnikov Ljubljanskega barja

3. Naslov projekta

3.1. Naslov projekta v slovenskem jeziku:

Starost, izvor in dinamika vod globokih vodonosnikov Ljubljanskega barja

3.2. Naslov projekta v angleškem jeziku:

Age, origin and dynamics of deep aquifer's groundwaters of Ljubljansko barje

4. Ključne besede projekta

4.1. Ključne besede projekta v slovenskem jeziku:

Tritij, H-3, svinec Pb-210, hidrogeologija, globoki vodonosniki, podzemne vode, tekočinsko scintilacijska spektrometrija, LSC, spektrometrija beta, gama, ranljivost vod, datiranje vod, Ljubljansko barje

4.2. Ključne besede projekta v angleškem jeziku:

Tritium, H-3, lead Pb-210, hydrogeology, deep aquifer, groundwater, liquid scintillation spectrometry (LSC), spectrometry beta, gama, groundwater vulnerability, groundwater dating, Ljubljansko barje

5. Naziv nosilne raziskovalne organizacije:

Institut "Jožef Stefan" (skupina Odsek za fiziko nizkih in srednjih energij)

5.1. Seznam sodelujočih raziskovalnih organizacij (RO):

Geološki zavod Slovenije (Skupina Podzemne vode)

Javno podjetje Vodovod - Kanalizacija d.o.o. (Skupina za vodovodne in kanalizacijske sisteme)

6. Sofinancer/sofinancerji:

Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije
Ministrstvo za okolje in prostor

7. Šifra ter ime in priimek vodje projekta:

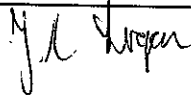
18545

Jasmina Kožar Logar

Datum: 13. 10. 2008

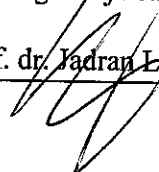
Podpis vodje projekta:

dr. Jasmina Kožar Logar



Podpis in žig izvajalca:

prof. dr. Jadran Lenarčič



Institut
"Jožef Stefan"
Ljubljana, Slovenija

6

II. Vsebinska struktura zaključnega poročila o rezultatih raziskovalnega projekta v okviru CRP

1. Cilji projekta:

1.1. Ali so bili cilji projekta doseženi?

- ☒ a) v celoti
- ☐ b) delno
- ☐ c) ne

Če b) in c), je potrebna utemeljitev.

1.2. Ali so se cilji projekta med raziskavo spremenili?

- ☐ a) da
- ☒ b) ne

Če so se, je potrebna utemeljitev:

2. Vsebinsko poročilo o realizaciji predloženega programa dela¹:

PROGRAM DELA in CILJI PROJEKTA iz prijave CRP projekta:

V prijavi projekta smo načrtovali štiri korake:

1. Optimizacija kombinirane metode za določitev starosti vod.
2. Postavitev mreže za odvzem vzorcev.
3. Spektrometrija gama, meritve stabilnih izotopov, hidrokemijske meritve.
4. Interpretacija rezultatov.

Cilj: Boljše razumevanje dinamike hidrogeološkega sistema

REALIZACIJA PROGRAMA

Ocenjujemo, da smo izvedli vse načrtovane aktivnosti, napovedane v programu dela:

Ad 1: Kombinirana metoda sestoji iz meritev tritija, sevalcev gama in fizikalno – kemijskih preskušanj. Metodo za določevanje tritija smo optimizirali, validirali in akreditirali. Dosegli smo mejo detekcije 50 Bq / m³, kar je bolje od načrtovanih 80 Bq / m³. Pokazalo se je, da so tudi sevalci gama lahko zelo signifikantni in koristni pri študiju dinamike podzemnih vod. Korelacije so prikazane v prilogi v poglavju Interpretacija rezultatov.

Ad 2: Postavili smo vzorčevalni mrežo z 21 vzorčevalnimi mesti. Zajeli smo vse najznačilnejše vodne strukture na Ljubljanskem barju: površinske vode, izvire in podzemne vode. Vzorčevanje je podrobneje opisano v prilogi v poglavju Vzorčevanje.

Ad 3: Skupno smo zbrali okrog 5000 novih merskih podatkov. Določevali smo naslednje količine: H-3, stabilna izotopa O-18 in H-2, naravne sevalce gama (radionuklidi iz uranove razpadne verige (U-228, Ra-226), torijeve razpadne verige (Ra-228, Th-228), K-40, Be-7 in Pb-210) in devet fizikalno – kemijskih parametrov (elektroprevodnost, kalcij, magnezij, natrij, kalij, klorid, sulfat, nitrat, hidrogenkarbonat).

Ad 4: Pregledali in analizirali smo vse izmerjene podatke. Interpretacija je podana v prilogi v poglavju Interpretacija rezultatov.

REZULTATI

1. Vpeljava in optimizacija metode za datiranje vod s tritijem.
2. Vpeljava sevalcev gama v študij karakterizacije vod.
3. 5000 novih podatkov za vode Ljubljanskega Barja in interpretacija.

KLJUČNE UGOTOVITVE

1. Vpeljana in optimizirana metoda za določitev tritija po elektrolitski obogatitvi je primerna za študij globokih vodonosnikov in drugih vodnih teles z zapleteno

¹ Potrebno je napisati vsebinsko raziskovalno poročilo, kjer mora biti na kratko predstavljen program dela z raziskovalno hipotezo in metodološko-teoretičen opis raziskovanja pri njenem preverjanju ali zavračanju vključno s pridobljenimi rezultati projekta.

hidrogeološko strukturo.

2. Sevalci gama so uporabni za študij dinamike vodnih teles.

3. Vodonosniki Ljubljanskega barja tvorijo zapleten hidrogeološki sistem, ki skriva še veliko zank in ugank. Novi podatki so nekatere dosedanje domneve potrdili, doprinesli k jasnejši sliki dinamike podzemnih vod in odprli nova vprašanja.

4. Raziskava je bila uspešna, vendar bi morali za razjasnitev še vedno odprtih vprašanj nadaljevati z meritvami in modeliranjem.

SKLEPI RAZISKOVALNEGA POROČILA

1. Vpeljane metode so učinkovito orodje za študij dinamike v hidrogeoloških sistemih.

2. Pridobljeni podatki za vode Ljubljanskega barja so izredno pomembni za razumevanje hidrogeoloških procesov in za odločitve o izrabi vodnih virov.

3. Ljubljansko barje je zelo zapleten hidrogeološki sistem, zaščiten z Naturo 2000 in istočasno vir pitne vode za Ljubljano. Za konkretne napotke upravljalcu in sonaraven razvoj področja bo potrebnih še več raziskav in meritev.

3. Izkoriščanje dobljenih rezultatov:

3.1. Kakšen je potencialni pomen² rezultatov vašega raziskovalnega projekta za:

- ☒ a) odkritje novih znanstvenih spoznanj;
- ☒ b) izpopolnitev oziroma razširitev metodološkega instrumentarija;
- ☒ c) razvoj svojega temeljnega raziskovanja;
- ☐ d) razvoj drugih temeljnih znanosti;
- ☐ e) razvoj novih tehnologij in drugih razvojnih raziskav.

3.2. Označite s katerimi družbeno-ekonomskimi cilji (po metodologiji OECD-ja) sovpadajo rezultati vašega raziskovalnega projekta:

- ☐ a) razvoj kmetijstva, gozdarstva in ribolova - Vključuje RR, ki je v osnovi namenjen razvoju in podpori teh dejavnosti;
- ☐ b) pospeševanje industrijskega razvoja - vključuje RR, ki v osnovi podpira razvoj industrije, vključno s proizvodnjo, gradbeništvom, prodajo na debelo in drobno, restavracijami in hoteli, bančništvom, zavarovalnicami in drugimi gospodarskimi dejavnostmi;
- ☒ c) proizvodnja in racionalna izraba energije - vključuje RR-dejavnosti, ki so v funkciji dobave, proizvodnje, hranjenja in distribucije vseh oblik energije. V to skupino je treba vključiti tudi RR vodnih virov in nuklearne energije;
- ☒ d) razvoj infrastrukture - Ta skupina vključuje dve podskupini:
 - transport in telekomunikacije - Vključen je RR, ki je usmerjen v izboljšavo in povečanje varnosti prometnih sistemov, vključno z varnostjo v prometu;
 - prostorsko planiranje mest in podeželja - Vključen je RR, ki se nanaša na skupno načrtovanje mest in podeželja, boljše pogoje bivanja in izboljšave v okolju;
- ☒ e) nadzor in skrb za okolje - Vključuje RR, ki je usmerjen v ohranjanje fizičnega okolja. Zajema onesnaževanje zraka, voda, zemlje in spodnjih slojev, onesnaženje zaradi hrupa, odlaganja trdnih odpadkov in sevanja. Razdeljen je v dve skupini:
- ☐ f) zdravstveno varstvo (z izjemo onesnaževanja) - Vključuje RR - programe, ki so usmerjeni v varstvo in izboljšanje človekovega zdravja;
- ☐ g) družbeni razvoj in storitve - Vključuje RR, ki se nanaša na družbene in kulturne probleme;
- ☐ h) splošni napredek znanja - Ta skupina zajema RR, ki prispeva k splošnemu napredku znanja in ga ne moremo pripisati določenim ciljem;
- ☐ i) obramba - Vključuje RR, ki se v osnovi izvaja v vojaške namene, ne glede na njegovo vsebino, ali na možnost posredne civilne uporabe. Vključuje tudi varstvo (obrambo) pred naravnimi nesrečami.

² Označite lahko več odgovorov.

3.3. Kateri so **neposredni rezultati** vašega raziskovalnega projekta glede na zgoraj označen potencialni pomen in razvojne cilje?

1. Vpeljava novih, neodvisnih parametrov v študije zapletenih vodonosnih sistemov prinašajo nova spoznanja.
2. Kombinirana večparametrna metoda je zahtevala optimizacijo in izboljšavo vseh posameznih merskih metod (predvsem meritve H-3 in sevalcev gama)
3. Meritve naravnih sevalcev za potrebe hidrogeologije predstavljajo enega od temeljev Laboratorija za tekočinskoscintilacijsko spektrometrijo
4. Pridobljeni podatki so pomembni za razumevanje zapletenega hidrogeološkega sistema Ljubljanskega barja, kar vpliva na načrtovanje in strategijo upravljanja z vodnimi viri.
5. Razumevanje hidrogeoloških razmer so temelj za sonaravni in trajnostni razvoj območja, ki je pomemben naravni habitat in vir pitne vode.

3.4. Kakšni so lahko **dolgoročni rezultati** vašega raziskovalnega projekta glede na zgoraj označen potencialni pomen in razvojne cilje?

Boljše razumevanje dinamike hidrogeološkega sistema je ključnega pomena za kasnejšo:

- izpopolnitev kombinirane večparametrne metode za datiranje vod in študij dinamike v vodonosnikih in njena uporaba na še drugih vodnih telesih v Sloveniji in drugod.
- vzpostavitev strokovnih podlag za celovito upravljanje vodnega telesa,
- vzpostavitev manjkajočih elementov za natančnejšo analizo vodne bilance obravnavanega območja,
- novelacijo strokovnih podlag za varovanje vodnih virov,
- strokovno utemeljeno odločitev o sedanji in prihodnji rabi vodnih virov na obravnavanem območju,
- napoved morebitnih poseganj občutljivih barjanskih plasti,
- vzpostavitev metodologije za raziskave dinamike podzemnih voda na drugih vodonosnih sistemih v Republiki Sloveniji,
- dolgoročno načrtovanje odlagališča Barje in vrste drugih gradbeno-inženirskih posegov ter hidrotehničnih ureditev, ki vplivajo na stanje v vodonosniku.
- pripravo izhodišč za priporočila o:
 - rabi virov pitne vode v izrednih razmerah in drugih vrst rabe vode, ki so trenutno v prostoru ali pa se načrtujejo,
 - stopnji in obsegu nadzora naravovarstvenih in drugih območij.

3.5. Kje obstaja verjetnost, da bodo vaša znanstvena spoznanja deležna zaznavnega odziva?

- ☒ a) v domačih znanstvenih krogih;
- ☒ b) v mednarodnih znanstvenih krogih;
- ☒ c) pri domačih uporabnikih;
- ☐ d) pri mednarodnih uporabnikih.

3.6. Kdo (poleg sofinancerjev) že izraža interes po vaših spoznanjih oziroma rezultatih?

Javno podjetje VODOVOD - KANALIZACIJA

Laboratoriji za LSC meritve okoljskih vzorcev (optimizacija merskih metod na LSC)

Hidrogeološki zavod Slovenije (merske metode na drugih njihovih projektih)

3.7. Število diplomantov, magistrov in doktorjev, ki so zaključili študij z vključenostjo v raziskovalni projekt?

4. Sodelovanje z tujimi partnerji:

4.1. Navedite število in obliko formalnega raziskovalnega sodelovanja s tujimi raziskovalnimi inštitucijami.

4.2. Kakšni so rezultati tovrstnega sodelovanja?

5. Bibliografski rezultati³ :

Za vodjo projekta in ostale raziskovalce v projektni skupini priložite bibliografske izpise za obdobje zadnjih treh let iz COBISS-a) oz. za medicinske vede iz Inštituta za biomedicinsko informatiko. Na bibliografskih izpisih označite tista dela, ki so nastala v okviru pričujočega projekta.

³ Bibliografijo raziskovalcev si lahko natisnete sami iz spletne strani: <http://www.izum.si/>

6. Druge reference⁴ vodje projekta in ostalih raziskovalcev, ki izhajajo iz raziskovalnega projekta:

1. Jasmina Kožar Logar, Janko Urbanc, Brigita Jamnik: Tritium concentrations in waters of Ljubljansko barje, poslano v objavo v revijo Radiocarbon

Opis – abstract:

The large wetland area with its numerous aquifers in the extreme south of the Ljubljana basin is a very important water resource with very complicated hydrological structure. In consideration of different interests in the area, detailed knowledge of the hydraulic system is necessary for sustainable development of the region. Tritium and oxygen isotope composition were therefore determined, beside others parameters such as concentrations of gamma-ray emitters and geochemical parameters (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+} , K^{+} , Cl^{-} , SO_4^{2-} , NO_3^{-} , HCO_3^{-} . Conductivity, pH, H_2). Obtained results confirmed existence of many different types of groundwaters in the basin and clarify the status of lower aquifers. The results imply that the lowest aquifers seem to be somewhat more robust, regarding vulnerability and water age.

2. Jasmina Kožar Logar, Denis Glavič-Cindro: Establishment of low-level tritium laboratory, poslano v objavo v revijo Radiocarbon

Opis – abstract:

Establishing a new laboratory is not an easy job. We started with a decision that we need a laboratory for liquid scintillation spectrometry where we would be able to introduce, improve and develop sampling and sample preparation methods, perform other analytical procedures necessary for determination of beta and alpha emitters in environmental samples and measure activity concentrations. The work in this laboratory should be organized in the way that the requirements of a quality system according to EN ISO/IEC 17025 standard are fulfilled. The first decision was that the determination of tritium is the method to start with. After installing the equipment the sequence of steps (sampling, maintenance of the samples, first distillation, electrolytic enrichment, second distillation, preparation of measurands and control samples, LSC counting, calculation and evaluation of final results) necessary to carry out the analytical procedure were carefully analysed. The main sources of uncertainties were identified and the plans for calibrations and validations were prepared, together with control charts. Several experiments were designed in order to check the reliability and to optimize the procedure. The analytical process was checked on several international intercomparisons and proficiency tests. The results and also many additional questions (and answers) that came out meanwhile are presented in the article.

3. Ustanovitev in vodenje Laboratorija za tekočinskoscintilacijsko spektrometrijo, akreditacija LP-022

Laboratorij je bil ustanovljen tik pred začetkom raziskovalnega projekta. V času trajanja projekta in za potrebe tega projekta sta bili uvedeni, validirani in optimizirani dve metodi za določevanje tritija v vzorcih vode. Laboratorij ima uveden sistem kakovosti in je aprila 2008 uspešno prestal obisk mednarodnega ocenjevalca s strani Slovenske akreditacije. V letu 2008 je laboratorij pridobil še en pomemben kos opreme, in sicer drugi

⁴ Navedite tudi druge raziskovalne rezultate iz obdobja financiranja vašega projekta, ki niso zajeti v bibliografske izpise, zlasti pa tiste, ki se nanašajo na prenos znanja in tehnologije.

Navedite tudi podatke o vseh javnih in drugih predstavitvah projekta in njegovih rezultatih vključno s predstavitvami, ki so bile organizirane izključno za naročnika/naročnike projekta.

tekočinskoscintilacijski števec Quantulus 1220.

4. Odsek za fiziko nizkih in srednjih energij (raziskovalna skupina 106 – 09) je z ustanovitvijo Laboratorija za tekočinskoscintilacijsko spektrometrijo in uvedbo ter akreditacijo dveh metod za določevanje tritija v vzorcih vode razširil svojo dejavnost in trgu ponudil storitev, ki je tako v Sloveniji prvič dostopna in uporabna za študij in karakterizacijo vod. To pa so pomembni vhodni podatki pri načrtovanju trajnostnega razvoja in varovanja okolja.

5. Organizacija delavnice in predavanja dr. Rozanskega in dr. Kuca za parterje na projektu, sofinancerje in strokovno javnost.

Dr. Rozanskega, priznanega profesorja s Krakovske Univerze smo gostili v februarju 2007, dr. Kuca pa aprila 2007. Oba sta pri nas ostala dober teden. Izvedli smo delavnico o kalibraciji LSC števec, optimizaciji elektrolize in izvedli več okroglih miz o datiranju vod, pasteh obravnavanih metod in se seznanili s konkretnimi primeri s celega sveta.

6. V pripravi je še nekaj publikacij:

- a. Karakterizacija parametrov, validacija in optimizacija metode za določitev tritija z elektrolitsko obogatitvijo
- b. Kombinirana metoda: kaj nam povedo korelacije med sevalci gama in tritijem
- c. Predstavitev rezultatov za Barje – več publikacij
- d. Prikaz korelacij med različnimi parametri in kaj pomenijo.

Večina publikacij bo poslana v objavo do konca leta oziroma v roku pol leta. Do zamude je prišlo zaradi tehničnih težav oziroma preureditve merilnice Laboratorija za LSC in nabave nove opreme, zaradi česar smo morali ustaviti prvi LSC števec. Meritve so v zadnjih mesecih nekoliko zastale in zato s publikacijami še nismo zaključili.

Povzetek projekta V1-0293

Prejeto: 22-10-2008	Šifra: 0110
03113-356 / 2008	Priloge:
	Vrednost:

Starost, izvor in dinamika vod globokih vodonosnikov Ljubljanskega barja

Za cilj projekta smo si zastavili boljše razumevanje sistema. Za dosego cilja smo v prijavi projekta načrtovali štiri korake:

1. Optimizacija kombinirane metode za določitev starosti vod.
2. Postavitev mreže za odvzem vzorcev.
3. Visokoločljivostna spektrometrija gama, meritve tritija, stabilnih izotopov, hidrokemijske meritve.
4. Interpretacija rezultatov.

Ocenjujemo, da smo izvedli vse načrtovane aktivnosti, napovedane v programu dela:

1. Vpeljali in optimizirali smo metodo za datiranje vod s tritijem.
2. Sevalce gama smo vključili v študij karakterizacije vod.
3. Pridobili smo 5000 novih podatkov za vode Ljubljanskega Barja.

Sklepi:

1. Vpeljane metode so učinkovito orodje za študij dinamike vod.
2. Pridobljeni podatki za vode Ljubljanskega barja so izredno pomembni za razumevanje hidrogeoloških procesov in za odločitve o izrabi vodnih virov.
3. Ljubljansko barje je zelo zapleten hidrogeološki sistem, zaščiten z Naturo 2000 in istočasno vir pitne vode za Ljubljano. Za konkretne napotke upravljalcu in sonaraven razvoj področja bo potrebnih še več raziskav in meritev.

Age, origin and dynamics of deep aquifer's groundwaters of Ljubljansko barje

Better understanding of dynamics of hydrological system was the main mission of the project. We planned four steps to achieve this aim:

1. Optimization of combined method for water dating.
2. Setting up the proper and suitable sampling network.
3. High resolution gamma spectrometry, measurements of tritium, stable isotopes, hydrochemical parameters.
4. Interpretation of results.

We estimate that all announced activities were completed:

1. We introduced and optimized the method for water dating with tritium.
2. Gamma emitters were incorporated in the studies of water characterization.
3. We obtained 5000 new data for waters of Ljubljansko barje.

Conclusions:

1. Introduced methods are effective tools for studies of water dynamics..
2. Obtained data for waters of Ljubljansko barje are very important for understanding of hydrological processes and for decisions about exploitation of water resources.
3. Ljubljansko barje is very important hydrological system, protected by Natura 2000 and in the same time also a resource of potable water for Ljubljana. More studies and measurements will be necessary for concrete instructions to the administration for planning the sustainable development of the region.

PREDSTAVITEV IN INTERPRETACIJA MERSKIH REZULTATOV

ARRS projekt »Datiranje vod s H-3 in Pb-210: dinamika in ranljivost podzemne vode v globokih vodonosnikih» in CRP projekt »Starost, izvor in dinamika vod globokih vodonosnikov Ljubljanskega barja» časovno in vsebinsko sovpadata. Skupna razpoložljiva sredstva so bila precej nižja od prvotno zaprosenih, program dela na obeh projektih pa zelo ambiciozen. Hidrogeološka struktura vodonosnikov Ljubljanskega barja je namreč izredno heterogena in zapletena, zato smo morali obdržati tako veliko število vzorčevalnih mest in frekvenco vzorčevanj kot število opazovanih neodvisnih parametrov, da bi se dokopali vsaj do osnovne in sistematične baze podatkov za obravnavano vodno telo. V prilogi so tako prikazani vsi merski rezultati, pridobljeni v okviru obeh projektov.

Ocenjujemo, da smo izvedli vse načrtovane aktivnosti, napovedane v programu dela obeh projektov.

VZORČEVANJE IN PRIPRAVA VZORCEV**Vzorčevalna mesta**

Načrt vzorčevanja je izdelan tako, da so vzorčevalni objekti locirani približno na profilu sever - jug od Dolgega mostu na severu do Bresta oziroma Iškega vršaja na jugu. V načrtu vzorčevanja so zajete vse glavne hidrološke enote Ljubljanskega barja razen dolomitnega vodonosnika v podlagi, ki ga zaradi nelegalne prilastitve vrtine TB-3 ni mogoče vzorčevati.

Tabela 1 prikazuje vrsto vzorčevalnih mest in število vzorčevanj, ki so v času od februarja 2006 do junija 2008 potekala na 21 mestih. Skupno je bilo preskušanih 387 vzorcev: vsem vzorcem se je določilo 9 fizikalno - kemijskih parametrov (elektroprevodnost, kalcij, magnezij, natrij, kalij, klorid, sulfat, nitrat, hidrogenkarbonat), v 43 vzorcih smo določili sevalce gama, v 103 vzorcih pa vsebnost tritija.

Tabela 1. Opis vzorčnih mest in število vzorčenj.

Vrsta vzorčnega mesta	Opis
Površinske vode	Gradaščica ^r (28), Iška ^r (28), Ižica ^r (28), <i>Ljubljaničica^r</i> (9)
Izviri	<i>Pako^r</i> (8), <i>Strojarček^r</i> (9), <i>Podpeško jezero^r</i> (9)
Holocenski vodonosnik	VD Brest-7 ^{aw} (28), DBP-4 ^p (26)
Zgornji preistocenski vodonosnik	OP-1 ^p (28), G-12 ^p (26), Pb-6gl ^p (25), <i>Iš-6gl^p</i> (9), <i>Pb-1gl^p</i> (9), <i>Pb-2gl^p</i> (9), <i>Vd-4^w</i> (7), <i>DBG-4^p</i> (8)
Spodnji pleistocenski vodonosnik	A-1gl ^w (28), A-2gl ^{aw} (28), <i>Iš-4gl^{aw}</i> (27), <i>Pb-5gl^p</i> (10)

r: reka, l: jezero, s: izvir, p: piezometer, w: vrtina, aw: aktivna vrtina; italic: vzorčenje na tri mesece. Število v oklepaju: število vzorčevanj.

METODOLOGIJA VZORČEVANJA; PRIPRAVE VZORCEV in MERITEV

Za študij zapletene hidrogeološke strukture podzemnih vod smo uporabili več neodvisnih parametrov, ki smo jih določili z naslednjimi metodami:

- Fizikalno- kemijska preskušanja
- Stabilni izotopi
- Visokoločljivostna spektrometrija gama
- Tekočinskoscintilacijska spektrometrija za določitev tritija

Za vsako od naštetih metod bomo posebej opisali metodologijo vzorčevanja, priprave vzorcev, meritev.

Fizikalno- kemijska preskušanja

Za potrebe fizikalno-kemijskih preskušanj smo vzorčili 1 L vode. Določali smo 9 parametrov (elektroprevodnost, kalcij, magnezij, natrij, kalij, klorid, sulfat, nitrat, hidrogenkarbonat).

Uporabljene metode za preskušanje osnovnih fizikalno-kemijskih parametrov so akreditirane in prikazane v tabeli 2.

Tabela 2. Uporabljene akreditirane metode za preskušanje osnovnih fizikalno-kemijskih parametrov.

Parameter	Metoda	Opis	Delovno območje	Merilna negotovost
Elektroprevodnost	SIST EN ISO 27888:1998	Konduktometer, Metrohm	100-800 μ S/cm	5%
Natrij	SIST EN ISO 14911: 2000	Ionski kromatograf MIC-3, Metrohm	0,50 – 10,0 (200,0)* mg/l	0,5-5 mg/l: 10% nad 5 mg/l: 5%
Kalij	SIST EN ISO 14911: 2000	Ionski kromatograf MIC-3, Metrohm	0,25 – 5,0 (50,0) mg/l	0,25-2,5 mg/l: 10% nad 2,5 mg/l: 5%
Kalcij	SIST EN ISO 14911: 2000	Ionski kromatograf MIC-3, Metrohm	4,0 – 80,0 (400,0) mg/l	4-40 mg/l: 10% nad 40 mg/l: 5%
Magnezij	SIST EN ISO 14911: 2000	Ionski kromatograf MIC-3, Metrohm	2,0 – 40,0 (200,0) mg/l	2-20 mg/l: 10% nad 20 mg/l: 5%
Klorid	SIST EN ISO 10304: 1998	Ionski kromatograf MIC-3, Metrohm	0,75-15 mg/l (255)	0,75-7,5 mg/l: 10% nad 7,5 mg/l: 5%
Sulfat	SIST EN ISO 10304: 1998	Ionski kromatograf MIC-3, Metrohm	0,5-30 mg/l (270)	0,5-15 mg/l: 10% nad 15 mg/l: 5%
Nitrat	SIST EN ISO 10304: 1998	Ionski kromatograf MIC-3, Metrohm	0,5-10 mg/l (50)	0,5-5 mg/l: 10% nad 5 mg/l: 5%
Hidrogenkarbonat	ASTM D 1067.mod	Titracija s HCl z metiloranžem kot indikatorjem	-	2%

* številke v oklepajih označujejo zgornjo mejo delovnega območja z razredčevanjem.

Stabilni izotopi

Za določitev stabilnih izotopov O-18 in H-2 smo vzorčili 100 mL vode. Meritve so izvedli v akreditiranih laboratorijih Hydroisotope GmbH, Heidelberg, Nemčija.

Visokoločljivostna spektrometrija gama

Za določevanje sevalcev gama z visokoločljivostno spektrometrijo se zbere približno 50 L vode. Vzorčevanje se ne opravlja ob ekstremnih pogojih, na primer ob visokem ali nizkem vodostaju, neposredno po velikih padavinskih dogodkih itd. Nefiltrirane vzorce vode se izpareva na temperaturi pod 70 °C.

Laboratorijske meritve aktivnosti sevalcev gama in rentgenskih žarkov z visokoločljivostno spektrometrijo gama so akreditirane. Rezultati meritev so sledljivi k aktivnostim primarnih standardov v francoskem laboratoriju LPRI.

Tabela 3. Uporabljena akreditirana visokoločljivostna metoda za določanje sevalcev gama.

Tip obsega: fiksni / delno fleksibilni (opis) * / <i>Type of scope: fixed / partly flexible (opis) *</i> Mesto izvajanja: v laboratoriju / <i>Site in the laboratory</i> Področja preskušanja glede na vrsto preskušanja: radiokemija, sevanje (alfa, beta, gama spektrometrija) / <i>Testing fields with reference to the type of test: radiochemistry, radiation (alfa, beta, gamma spectrometry, radiation protection measurements)</i> Področja preskušanja glede na vrsto preskušanja: področje (podpodročje,...); ... / <i>Testing fields with reference to the type of test item: field (subfield,...); ...</i>				
Št. No.	Oznaka standarda ali nestandardne preskusne metode <i>Reference to standard or non-standard testing method</i>	Naslov standarda ali nestandardne preskusne metode in morebitne navezave na druge standarde ali metode <i>Title of standard or non-standard testing method and eventual relations to other standards or methods</i>	Območje preskušanja; Negotovost rezultata preskušanja (kjer je to pomembno) <i>Range of testing; Uncertainty of the result of testing (where relevant)</i>	Materiali; proizvodi <i>Materials; products</i>
1.	LMR-DN-10 Interna metoda <i>In-house method</i>	Meritve aktivnosti sevalcev gama in rentgenskih žarkov v homogenih cilindričnih vzorcih z visokoločljivostno spektrometrijo gama <i>Measurements of activities of gamma-ray and x-ray emitters in cylindrical homogenous samples with high-resolution gamma-ray spectrometry</i>	Območje emisij iz vzorca <i>Range of emissions from the sample:</i> ($0,5 \cdot 10^{-2}$ – $0,5 \cdot 10^5$) s ⁻¹ Območje energij <i>Energy range:</i> (5–3000) keV	trdni in tekoči materiali <i>solid and liquid materials</i>

Tekočinskoscintilacijska spektrometrija za določitev tritija

Za določevanje tritija se vzorči 1 L vode. Vsebnost tritija smo določevali po direktni metodi in po elektrolitski obogatitvi. Vzorce se destilira, elektrolitsko obogati, ponovno destilira in po dodatku scintilacijskega koktajla pomeri v tekočinskoscintilacijskem števcu. Za kalibracijo števca je bil uporabljen certificiran standard tritijeve vode Perkin Elmerja, za dodatno kontrolo rezultata meritve pa NIST-ov standard. Metoda je v postopku akreditacije.

Tabela 4. Uporabljena metoda za določanje tritija – predlog Slovenski akreditaciji.

Tip obsega: delno fleksibilni (možnost uvajanja manjših sprememb metode) / <i>Type of scope: partly flexible (possibility of implementing minor modifications of the method)</i> Mesto izvajanja: v laboratoriju / <i>Site: in the laboratory</i> Področja preskušanja glede na vrsto preskušanja: radiokemija, sevanje (alfa, beta, gama spektrometrija) / <i>Testing fields with reference to the type of test: radiochemistry, radiation (alfa, beta, gamma spectrometry, radiation protection measurements)</i> Področja preskušanja glede na vrsto preskušanca: - / <i>Testing fields with reference to the type of test item: -</i>				
St. No.	Oznaka standarda ali nestandardne preskusne metode <i>Reference to standard or non-standard testing method</i>	Naslov standarda ali nestandardne preskusne metode in morebitne navezave na druge standarde ali metode <i>Title of standard or non-standard testing method and eventual relations to other standards or methods</i>	Območje preskušanja: Negotovost rezultata preskušanja (kjer je to pomembno) <i>Range of testing; Uncertainty of the result of testing (where relevant)</i>	Materiali; proizvodi <i>Materials; products</i>
2.	LSC-DN-07, interna metoda <i>in-house method</i>	Tekočinskoscintilacijska spektrometrija za določitev tritija: - direktna metoda -po elektrolitski obogatitvi	direktna metoda, vodni vzorci / <i>direct method, water samples</i> 1000 Bq/m ³ –5000 Bq/m ³ negotovost / <i>uncertainty</i> ≥ 10 % ≥ 5000 Bq/m ³ negotovost / <i>uncertainty</i> ≥ 3 % direktna metoda, vzorci urina / <i>direct method, urine samples</i> 7200 Bq/m ³ –50.000 Bq/m ³ negotovost / <i>uncertainty</i> ≥ 10 % ≥ 50.000 Bq/m ³ negotovost / <i>uncertainty</i> ≥ 3 % metoda z elektrolitsko obogatitvijo, vzorec vode / <i>method with electrolytical enrichment, water sample</i> 50 Bq/m ³ –1000 Bq/m ³ negotovost / <i>uncertainty</i> ≥ 10 % ≥ 1000 Bq/m ³ negotovost / <i>uncertainty</i> ≥ 3 %	direktna metoda: voda, urin <i>direct method: water, urine</i> metoda z elektrolitsko obogatitvijo: voda <i>method with electrolytic enrichment: water</i>

OVREDNOTENJE REZULTATOV

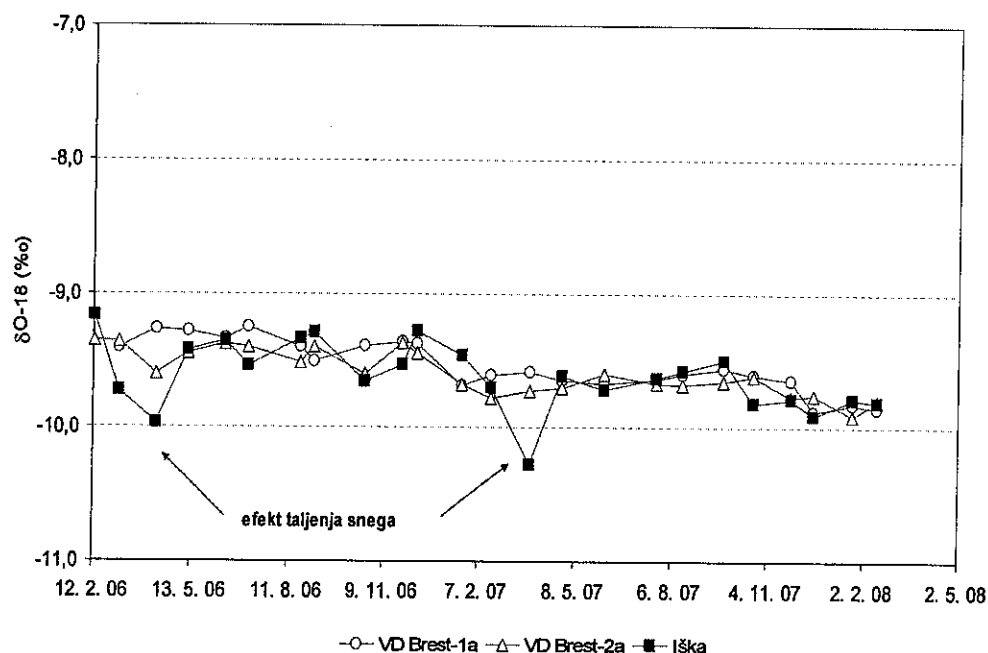
FIZIKALNO-KEMIJSKA PRESKUŠANJA IN STABILNI IZOTOPI

Vodonosni sistemi na Ljubljanskem barju so precej zapleten sistem hidrogeoloških struktur s kameninami in naplavinami različne starosti in različne dinamike napajanja le-teh z vodami različne starosti. Podzemne vode imajo svoj izvor na preiskovanem območju in vode različnih izvorov kažejo podobne fizikalno-kemijske lastnosti. Interpretacija zgolj na osnovi le-teh bi lahko prinesla napačno razlago. Prav tako je interpretacija lahko napačna zgolj na osnovi rezultatov izotopske sestave. Šele kombiniran pristop k interpretaciji ob upoštevanju prav vseh dostopnih rezultatov, vključno z upoštevanjem dosedanjih raziskovalnih del na tem območju, omogoča oblikovanje strokovno zanesljivega koncepta, ki bo postal osnova za dolgoročno naravnano trajnostno upravljanje vodnega vira in upravljalvske odločitve, ki dolgoročno v okolju ne bodo pustile negativnih posledic.

Fizikalno-kemijska preskušanja omogočajo pridobitev informacij o osnovnih lastnostih vzorcev vode, tako površinskih (tekočih in stoječih), kot podzemnih v obliki izvirov, aktivnih in neaktivnih vodnjakov ter piezometrov. Rezultati fizikalno-kemijskih preskušanj voda so osnova za razumevanje hidrogeoloških procesov v vodonosnih sistemih. V kombinaciji z drugimi terenskimi hidrološkimi in geološkimi meritvami in laboratorijskimi preskušnji omogočajo oblikovanje koncepta vodonosnega sistema, ki omogoča razumevanje razmer in dinamike podzemnih vod.

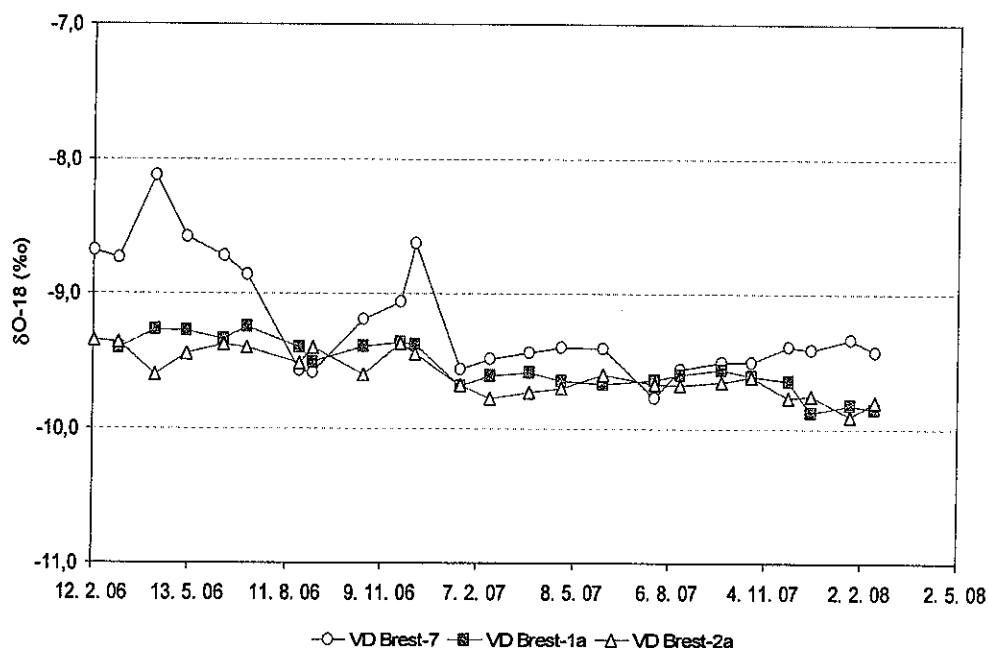
Proučevanje izotopske sestave kisika je pomemben del projekta, ki z vzporednim poznavanjem preostalih meritev omogoča zanesljivo interpretacijo rezultatov.

Graf 1 prikazuje spremembe izotopske sestave kisika v vodnjakih vodarne Brest (VD Brest-1a in Vd Brest-2a) ter reke Iške. Iz grafa lahko vidimo, da v toku opazovanj ni prihajalo do izrazitejših sprememb izotopske sestave kisika, razen v Iški v zimskem času, ko je zaradi taljenja snega prihajalo v vodi Iške do osiromašenja s težjim kisikovim izotopom. Slika 1 tudi jasno kaže, da Iška ne zateka neposredno v spodnji karbonatni vodonosnik, saj bi v tem primeru tudi v vodnjakih VD Brest-1a in VD Brest-2a pričakovali znižanje $\delta^{18}\text{O}$ vrednosti v zimskem času.



Slika 1. Časovni niz izotopske sestave $\delta^{18}\text{O}$ v globokih vodnjakih vodarne Brest (VD Brest-1a in VD Brest-2a) in v reki Iški.

Graf na sliki 2 prikazuje spremembe izotopske sestave kisika v vodnjaku VD Brest-7, ki je lociran v holocenskem vodonosniku Iškega vršaja ter globokih vodnjakih VD Brest-1a in VD Brest-2a, ki segata v pleistocenski vodonosnik Ljubljanskega barja. Že na prvi pogled lahko opazimo bistveno večjo variabilnost izotopskega signala v holocenskem vodonosniku, ki je bliže površini in s tem bolj izpostavljen vplivom lokalnih padavin in seveda tudi onesnaženju s površja. Na grafu lahko prav tako opazimo obogatitev vode iz vodnjaka VD Brest-7 s težjim kisikovim izotopom, kar je posledica večjega vpliva padavin z območja Ljubljanskega barja, ki imajo zaradi višinskega izotopskega efekta na kisiku-18 bolj pozitivne vrednosti $\delta^{18}\text{O}$ v vodi.



Slika 2. Časovni niz izotopske sestave $\delta^{18}\text{O}$ v globokih (VD Brest-1a in VD Brest-2a) in v plitvem vodnjaku vodarne Brest (VD Brest-7).

Vsebnost raztopljenih karbonatov, torej tudi kalcija in magnezija v vodi, je odvisna predvsem od dveh dejavnikov: deleža karbonatnih kamnin v zaledju vodonosnika ter parcialnega tlaka CO_2 v tleh, ki pa je odvisen od klimatskih in vegetacijskih značilnosti območja napajanja vodonosnika. Na območju Slovenije večinoma opazujemo, da imajo vode z višjimi zaledji zaradi nižjega talnega parcialnega tlaka CO_2 običajno manjšo karbonatno trdoto od vod, pri katerih je zaledje nižje.

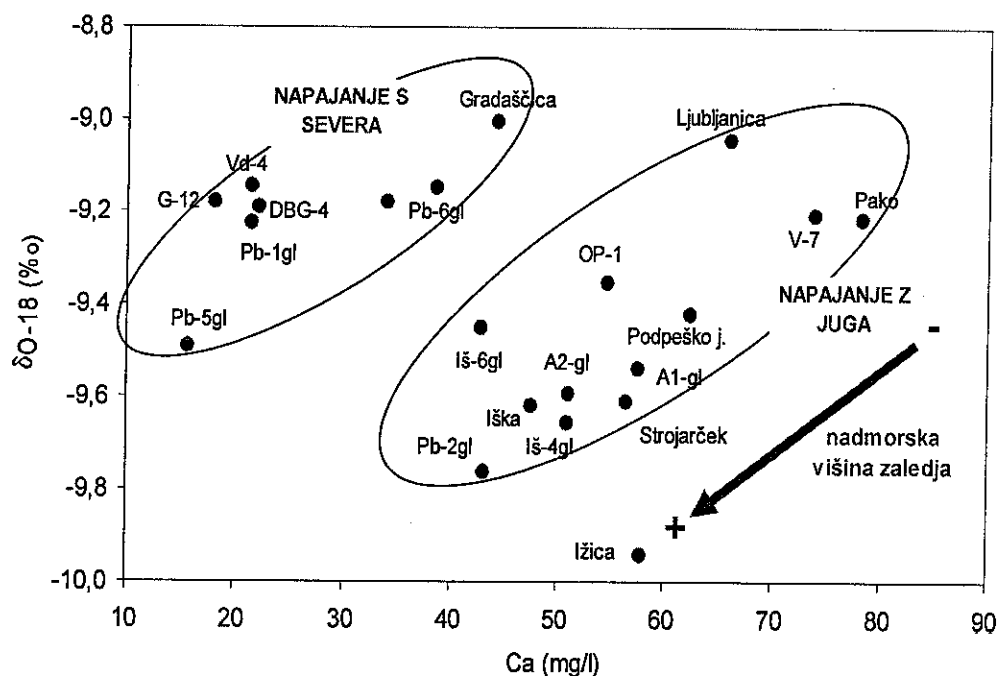
Z višjo nadmorsko višino so padavine večinoma vse bolj osiromašene s težjim kisikovim izotopom, kar opisujemo kot višinski izotopski efekt. V povprečju znaša višinski izotopski efekt na kisiku-18 okoli $0,3 \text{ ‰}$ na vsakih 100 m višinske razlike. Višinski izotopski efekt je v hidrogeoloških raziskavah zelo uporaben, saj z njim lahko opredelimo približne nadmorske višine zaledij posameznih vodonosnikov.

Graf Ca - $\delta^{18}\text{O}$ (slika 3) nam prikazuje vode po dveh parametrih, ki sta oba v določeni povezavi z nadmorsko višino zaledja vodonosnika: vode z višjih območij bodo imele zaradi višinskega izotopskega efekta bolj negativne $\delta^{18}\text{O}$ vrednosti ter nižjo karbonatno trdoto oziroma koncentracijo kalcija, kot vode z nižjih območij. Nižjo mineralizacijo vode pa bomo izmerili tudi pri vodah, v katerih zaledjih je manjši delež karbonatnih kamnin.

Iz grafa 3 je razvidno, da rezultate analiz v grobem lahko razvrstimo v dve glavni skupini. Prvo skupino tvorijo vode, ki imajo v povprečju najvišje koncentracije HCO_3^- oziroma najvišjo karbonatno trdoto ob dokajšnji osiromašenosti vode z izotopom ^{18}O . Za te vode lahko sklepamo, da je njihovo zaledje zgrajeno praktično izključno iz karbonatnih kamnin, bodisi apnencev ali dolomitov. Glede na geološke razmere okrog Ljubljanskega barja lahko sklepamo, da te vode dotekajo z juga; širšega območja Krma oziroma Rakitniške planote.

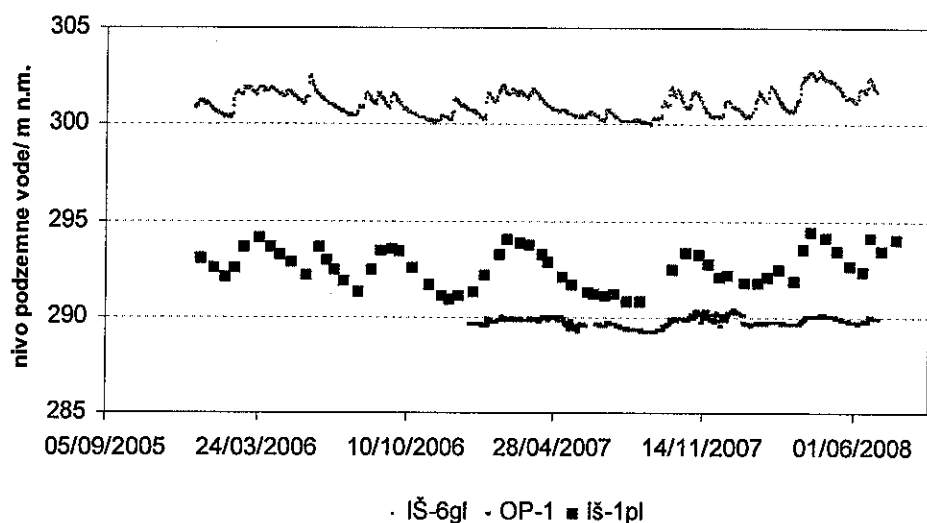
V drugi skupini so vode, katerih karbonatna trdota je ob enaki izotopski sestavi kisika v povprečju nižja približno za polovico, kar kaže na manjši delež karbonatnih kamnin v zaledju.

V tej skupini se nahaja tudi Gradaščica, iz česar bi lahko sklepali, da gre za vode, ki se napajajo s severnega obrobja Barja oziroma iz Gradaščice. Do podobnih zaključkov lahko pridemo tudi na osnovi geološke zgradbe obrobja Ljubljanskega barja. V zaledju Gradaščice najdemo glinaste skrilavce iz karbona in perma ter grodenske peščenjake in skrilavce, v katerih praktično ni karbonatov. Karbonatno komponento v zaledju Gradaščice pa predstavljajo skitski in anizijski apnenci in dolomiti. Zaradi litološko mešanega zaledja ima tudi voda manjšo trdoto kot v primeru, da bi bilo območje napajanja zgrajeno pretežno iz karbonatnih kamnin.



Slika 3. Koncentracija kalcija proti izotopski sestavi $\delta^{18}\text{O}$.

Slika 4 prikazuje nivo podzemne vode na opazovalnem mestu IŠ-6gl, ki predstavlja opazovalno mesto zgornjega pleistocenskega vodonosnika južno od vodarne Brest in na opazovalnem mestu OP-1, ki predstavlja opazovalno mesto zgornjega pleistocenskega vodonosnika severno od vodarne Brest. Za primerjavo je prikazano tudi spreminjanje nivojev podzemne vode v holocenskem vodonosniku znotraj vodarne Brest (IŠ-1pl). Nivo podzemne vode najintenzivneje niha v plitvem holocenskem vodonosniku, kjer je razlika v najvišjim in najnižjim nivojem v času projekta cca 3,6 m. Na opazovalnem mestu IŠ-6gl, ki leži na južnem robu Iškega vršaja, a zajema spodnje vodonosne plasti, niha nivo za cca 2,4 m, na opazovalnem mestu OP-1, kjer je neposreden vpliv napajanja manjši, pa je razlika le 1 m.



Slika 4. Nivo podzemne vode v holocenskem (IŠ-1pl) in pleistocenskem vodonosniku (IŠ-6gl, OP-1).

Tabela 5 prikazuje povprečje rezultatov fizikalno-kemijskih preskušanj na opazovalnih mestih za vse preskušane parametre. Krepko in podčrtano so označene najvišje vrednosti parametra, krepko pa najnižje.

Tabela 5. Povprečne vrednosti preskušanih parametrov.

	El. prev./ μS/cm	Ca/ mg/l	Mg/ mg/l	Na/ mg/l	K/ mg/l	Cl/ mg/l	SO ₄ / mg/l	NO ₃ -N/ mg/l	HCO ₃ / mg/l
Ižica	420	58	22	1.4	0.6	2.5	5.7	1.4	276
Iška	408	48	29	0.8	0.4	1.5	6.4	0.8	278
Gradašnica	346	44	19	3.7	1.1	5.2	9.4	0.9	208
Ljubljana	405	66	12	3.9	0.7	5.9	9.7	1.2	251
Podpeškoje	398	62	16	1.1	0.5	1.8	5.6	1.1	286
Strojarski	421	56	22	2.5	0.6	4.0	5.0	1.1	270
Pako	436	78	12	0.8	0.2	1.3	5.5	1.0	283
VD Brest-7	586	74	37	1.3	1.6	2.9	6.4	3.0	370
DBP-4	307	34	19	4.8	0.6	2.2	0.0	0.0	210
OP-1	433	55	26	1.0	0.4	1.8	7.4	1.1	282
G-12	180	18	7	7.3	0.6	1.4	0.0	0.0	122
PB-6gl	351	39	22	5.7	0.7	4.8	4.2	0.0	239
IŠ-6gl	368	42	24	2.2	0.5	1.7	8.5	1.0	246
PB-1gl	205	21	10	7.0	0.7	1.7	0.0	0.0	134
PB-2gl	389	44	20	10.9	0.5	0.8	0.0	0.0	271
DBG-4	218	22	12	5.4	0.6	2.0	0.0	0.0	139
VD-4/85	205	22	10	5.9	0.4	0.9	0.0	0.0	137
VD Brest-4a	410	51	25	0.7	0.5	1.6	3.8	1.3	272
VD Brest-2a	414	51	26	0.7	0.4	1.6	3.6	1.8	272
VD Brest-1a	463	57	29	0.7	0.4	3.2	4.2	5.5	287
Pb-5gl	228	16	<2	11.2	6.6	3.1	0.0	0.0	93

Opazovani parametri na obravnavanem območju nihajo znotraj meja, ki so za posamezen parameter odvisne od narave opazovalnega mesta, pri najvišjih vrednostih pa so zaznavni tudi

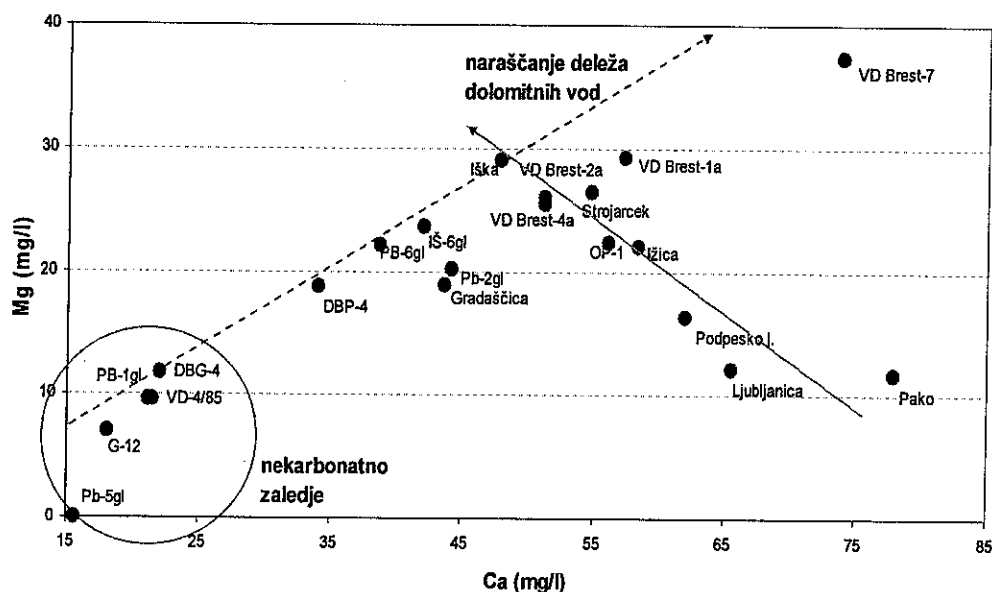
antropogeni vplivi. Elektroprevodnost preiskovanih vzorcev voda, skupaj s koncentracijo kalcija in magnezija, je prvi kazalec geoloških lastnosti ozadja. Zaradi litološko mešanega zaledja z nizko karbonatno komponento ima voda reke Gradaščice v povprečju nižjo elektroprevodnost in manjšo karbonatno trdoto kot v primeru reke Iške in Ižice, katerih prispevno območje je zgrajeno pretežno iz karbonatnih kamnin.

Visoko vrednost elektroprevodnosti v vodnjaku VD Brest-7 tako lahko pripišemo relativno visoki vrednosti kalcija in magnezija, ki izvirata iz naravnega karbonatnega ozadja, del pa prispeva tudi človekovo delovanje na prispevnem področju, ki kaže povečano koncentracijo tudi vseh ostalih ionov (nitrati, sulfati). Nizka vrednost elektroprevodnosti ob nizki koncentraciji kalcija in magnezija v podzemni vodi piezometra G-12 dokazuje prisotnost vode, ki nima povezave s karbonatnim zaledjem. Podzemna voda, zajeta v piezometru G-12, ki leži v bližini sotočja rek Iške in Ljubljanice na njenem desnem bregu, na podlagi hidrokemijskih parametrov kaže na izrazito napajanje iz lokalnih padavin. Medtem pa voda v piezometru OP-1, severno od vodarne Brest, kaže podobnost z rezultati spodnjega pleistocenskega vodonosnika, to je na možnost napajanja iz karbonatnega zaledja Krimskega pogorja kljub predpostavljeni zaglinjeni barieri na južnem obrobju, katere razpon pa ni poznan. Visoka konc. natrija v G-12 ob nizki koncentraciji klorida dokazuje, da natrij prihaja iz naravnega ozadja. Prisotni so redukcijski pogoji, saj sulfat in nitrat nista prisotna.

Karbonatnega zaledja prav tako ne dokazujemo v piezometru Pb-5gl, kjer so redukcijski pogoji in visoka koncentracija natrija ter tudi nekoliko manj geokemično mobilnega kalija. Najvišja koncentracija nitratov je ugotovljena v podzemni vodi VD Brest-1a, kar se povezuje z neželeno komunikacijo podzemne vode pleistocenskega vodonosnika z zgornjimi vodonosnimi plastmi, ki so v neposredni bližini tega vodnjaka obremenjene s primerljivo koncentracijo sulfata, nitrata in klorida. Reka Iška vsebuje v primerjavi z reko Ižico manj kalcija, a več magnezija, kar dokazuje v večji meri njen dolomitni izvor. Spodnji pleistocenski vodonosnik ima v povprečju nekaj nižjo koncentracijo magnezija kot Iška, zato neposrednega kontakta spodnjega vodonosnika z reko Iško ne predpostavljamo.

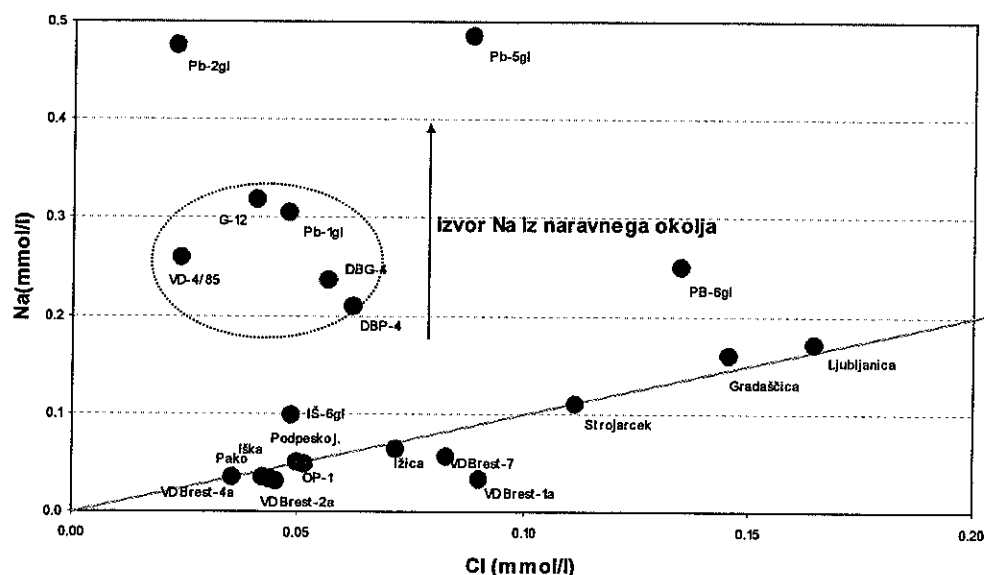
Globoki vodnjak VD Brest-1a trenutno ni aktiven, kar je poleg različnega zajema vodonosnih plasti s filtrskimi cevmi tudi vzrok za razlike v parametrih v primerjavi z načrpano vodo vodnjaka VD Brest-2a.. Podzemna voda obravnavanih vodnjakov kaže izvor v karbonatnem zaledju. Karbonatna trdota podzemne vode globokih vodnjakov je nekoliko nižja kot je le-ta v vodi plitvih vodnjakov vodarne Brest (VD Brest-7). Vode z višjimi zaledji imajo običajno zaradi nižjega parcialnega tlaka CO₂ manjšo karbonatno trdoto od vod, pri katerih je zaledje nižje. Trditev meritve potrjujejo.

Reka Iška, ki napaja holocenski vodonosnik, se na poti do osrednjega dela vodarne Brest obogati z natrijem in kloridom, ki (ker je dvig obeh ionov zgodi vzporedno) izvirata pretežno iz soljenja cest ter kalija in nitrata, ki izvirata iz kmetijstva. Sulfat v VD Brest-7 ostane na približno enakem koncentracijskem nivoju, kot ga zaznavamo že v reki Iški. Podpeško jezero in Pako dokazujeta najmanj vpliva dolomitnega okolja, Strojareček pa zajema že nekoliko več dolomitnih vod. V podzemni vodi v osrednjem delu Barju (PB-1gl, DBG-4) so prisotni redukcijski pogoji, vodom pa ne pripisujemo karbonatnega izvora.



Slika 5. Masna koncentracija magnezija proti kalciju.

Slika 5 prikazuje masno koncentracijo magnezija proti kalciju. S črtkano linijo je označeno teoretično razmerje med obema parametroma za čiste dolomitne vode. Graf kaže, da kar nekaj rezultatov pada neposredno na teoretično premico. V tem pogledu izstopajo vode, katerih zaledje je bolj v apnencih. Najnižje koncentracijsko območje prikazuje vzorčna mesta z nekarbonatnim ozadjem, največjo trdoto pa zaznavamo v holocenskem vodonosniku (VD Brest-7). Podzemna voda vodnjakov VD Brest-2a in Brest-4a kaže podobne lastnosti, VD Brest-1a odstopa v smeri proti holocensku vodonosniku. Vzrok lahko poiščemo v umetno vzpostavljeni komunikaciji med holocenskim in pleistocenskim vodonosnikom. Delež dolomitnih vod v površinskih vodah oz. izviri narašča v smeri od Ljubljane, Podpeškega jezera, Ižice, Strojarka do Iške z najvišjo koncentracijo magnezija.



Slika 6. Masni delež natrija proti kloridu.

Masni delež natrija proti kloridu (Slika 6) prikazuje linearno naraščanje od antropogeno neobremenjenih vod (VD Brest-4a) do vod, obremenjenih s sledmi človekovega delovanja (Ljubljana). Odstopanja od premice v smeri navzgor kažejo izvor natrija iz naravnega okolja, predvidoma zaradi preperevanja aluminosilikatov.

Preskušanje na izbrane fizikalno-kemijske parametre dokazuje pomembne razlike v izvoru voda in napajanju posameznih območij. Fizikalno-kemijska preskušanja vod na območju Ljubljanskega barja so kljub podobnemu izvoru vod pokazala zadostno raznolikost v vrednostih fizikalno-kemijskih parametrov, ki potrjuje, da na območju vodarne Brest ločujemo dvoje pomembnejših vodonosnikov, prav tako je opazna razlika v osnovnih lastnosti površinskih voda in izvirov. V osrednjem delu Barja nastopajo vode z nekarbonatnim zaledjem, vpliv reke Gradaščice na napajanje vodonosnikov v osrednjem delu Barja pa je zgolj na osnovi fizikalno-kemijskih parametrov manj opazen.

SEVALCI GAMA

Zaradi razmeroma nizke občutljivosti meritev spektrometrije gama v primerjavi z radiokemijskimi meritvami, je potrebno analizirati večje količine vzorca. Ugodno pri tem je, da so večji vzorci bolj reprezentativni. Pri meritvah s spektrometrijo gama zato analiziramo vzorce vode z volumnom okrog 40 L. Tako velikih vzorcev ne moremo filtrirati, zato v primeru, da je potrebno meriti koncentracije radionuklidov, ki so v vodi raztopljeni in ne vezani na delce, počakamo, da se suspendirana snov usede. Zgornjo mejo za vpliv nepopolnega usedanja na rezultate lahko ocenimo iz aktivnosti usedline. Aktivnost usedline smo izmerili pri osmih vzorcih. Med temi vzorci je imela usedlina najvišjo aktivnost pri vzorcu s Podpeškega jezera. Pri tem vzorcu je sistematski vpliv aktivnosti usedline na rezultat meritve manjši od negotovosti meritve. Zato ocenjujemo, da je vpliv nepopolnega usedanja na merske rezultate zanemarljiv.

Da bi preverili zanesljivost zbiranja vzorcev, ki so namenjeni meritvam s spektrometrijo gama, smo na lokaciji OP1 zbrali zaporedoma dva vzorca. Razlike med koncentracijami radionuklidov, ki smo jih izmerili v obeh vzorcih, ne presegajo negotovosti rezultatov. Povprečna vrednost u-statistike je 0.55, kar kaže na dobro ujemanje rezultatov.

Vzorci vode (okrog 40 L) smo izparili in izmerili koncentracije sevalcev gama v suhem ostanku, pridobljenem z izparevanjem. Koncentracije so preračunane na količino izparevanega vzorca. V okviru projekta smo izmerili 43 vzorcev.

V vzorcih smo izmerili koncentracije naravnih sevalcev gama, členov uranove razpadne verige (U-228, Ra-226), torijeve razpadne verige (Ra-228, Th-228) in K-40, ki izvirajo iz raztapljanja kamnin v vodi, ter sevalcev, ki pridejo v vodo z deževnico (Be-7 in Pb-210).

Koncentracija K-40 v vodi je sorazmerna koncentraciji kalija in ne predstavlja novega podatka, ker koncentracijo kalija merimo z kemijsko metodo. Koncentracija K-40 je med 5 in 20 Bq/m³. Povišane koncentracije so v Gradaščici in v vodi iz vrtine VD Brest-7.

Na koncentracijo sevalcev, ki se izpirajo iz atmosfere, vpliva starost vodonosnika. V sledeči tabeli so predstavljene povprečne koncentracije vzorcev površinskih vod, holocenskih vodonosnikov, zgornjih pleistocenskih in spodnjih pleistocenskih vodonosnikov.

Tabela 6. Koncentracije radioizotopov, ki se izpirajo iz ozračja v površinskih vodah ter podtalnicah iz holocenskih ter zgornjih in spodnjih pleistocenskih vodonosnikov.

Vodonosnik	št. vzorcev	a(Be-7) [Bq/m ³]	a (Pb-210) [Bq/m ³]
Površinska voda oz. izvir	18	3.3 ± 1.1	2.2 ± 1.2
Holocenski	5	6.2 ± 4	2.8 ± 2.7
Zgornji pleistocenski	10	1.5 ± 0.5	1.4 ± 1.0
Spodnji pleistocenski	10	1.4 ± 1.2	2.4 ± 1.0

Iz Tabele 6 je razvidno, da so najvišje koncentracije Be-7 in Pb-210 v vodah iz holocenskih vodonosnikov in nižje iz pleistocenskih vodonosnikov. V odsotnosti drugih podatkov in pri predpostavkah, da se površinske vode napajajo iz holocenskih in pleistocenskih vodonosnikov in da lokacije, kjer so bili vzorci zbrani in časi vzorčevanja predstavljajo reprezentativen vzorec (v prostoru in času), lahko tvegamo domnevo, da so višje koncentracije v mlajših vodonosnikih posledica večje mobilnosti vode v teh vodonosnikih. Iz primerjave koncentracij Be-7 v površinskih vodah in izviri, holocenskih in pliocenskih vodonosnikih lahko ocenimo povprečen prispevek obeh vodonosnikov k napajanju površinskih vod. Če označimo s a_{PO} povprečno koncentracijo v površinskih vodah, s a_H povprečno koncentracijo v holocenskih vodonosnikih in z a_{PL} (1.5 ± 0.7 Bq/m³) povprečno koncentracijo v pleistocenskih vodonosnikih ter z d_H in d_{PL} prispevke holocenskih in pliocenskih vodonosnikov k napajanju površinskih vod, velja zveza:

$$a_{PO} = d_H a_H + d_{PL} a_{PL}$$

Ker velja zveza

$$d_H + d_{PL} = 1$$

lahko deleža izračunamo. Rešitev pove, da se površinske vode napajajo približno enako iz holocenskih in iz pleistocenskih vodonosnikov. Zaključimo lahko, da se holocenski vodonosniki v večji meri napajajo z deževnico kot pleistocenski in da so zato bolj ranljivi od pleistocenskih. To napajanje je direktno in ne preko površinskih vod.

Podoben račun lahko naredimo tudi s koncentracijami Pb-210, vendar so to negotovosti večje in bi bila ocena deleža bolj negotova. Omeniti je treba tudi, da Pb-210 v podtalnici ne izvira le iz izpiranja iz ozračja, ampak tudi iz raztapljanja v kamninah in iz razpadanja radona.

Koncentracije členov torijeve razpadne verige Ra-228 in Th-228 so okrog 1 Bq/m^3 ali manj. Negotovosti merskih rezultatov so tako visoke, da zakrijejo variacije v koncentracijah.

Povprečne koncentracije U-238, Ra-226, Ra-228 in Th-228 v površinskih vodah, vodah iz holocenskih vodonosnikov in iz zgornjih in spodnjih pleistocenskih vodonosnikov so prikazane v tabeli 2.

Tabela 7. Koncentracije U-238, Ra-226, Ra-228 in Th-228 (v Bq/m^3) v površinskih vodah, vodah iz holocenskih vodonosnikov in iz zgornjih ter spodnjih pleistocenskih vodonosnikov.

Izotop	U-238	Ra-226	Ra-228	Th-228
Površinska voda oz. izvir	4.9 ± 0.7	1.6 ± 0.5	1.2 ± 0.3	0.4 ± 0.1
Holocenski	2.4 ± 1.2	3.3 ± 1.7	1.4 ± 0.3	0.7 ± 0.2
Zgornji pleistocenski	1.5 ± 0.9	1.0 ± 0.3	0.5 ± 0.2	0.4 ± 0.1
Spodnji pleistocenski	2.6 ± 0.9	0.8 ± 0.6	0.9 ± 0.3	0.3 ± 0.2

Iz tabele 7 sledi, da je najvišja koncentracija U-238 v površinskih vodah, najvišja koncentracija Ra-226 pa v podtalnicah iz holocenskih vodonosnikov. V tem oziru se Ra-226 obnaša podobno kot Be-7, ki ima najvišjo koncentracijo v vodi iz holocenskih, najnižjo pa v podtalnicah iz pleistocenskih vodonosnikov.

Koncentracije členov razpadnih verig so posledica raztapljanja kamnin v vodi in bi jih lahko pojasnili le s primerjavami koncentracij v kamninah, ki sestavljajo vodonosnike. Odvisnosti koncentracije U-238 in Ra-226 od pH sta na slikah. Iz slik je razvidno, da koncentracija Ra-226 v, okviru dosežene natančnosti, ni odvisna od pH, pri koncentraciji U-238 pa te odvisnosti ne moremo izključiti.

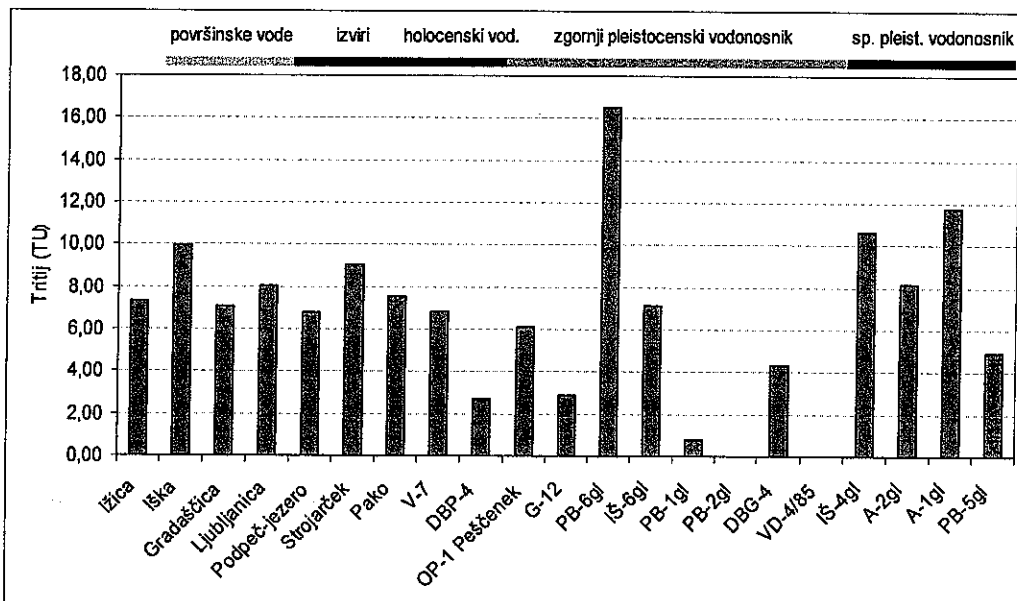
Izračunali smo korelacijo med koncentracijama Be-7 in tritija. K podatkom za korelacijo lahko prispevajo le tisti vzorci, ki imajo hkrati koncentracijo tritija in Be-7 nad detekcijsko mejo. Takšni vzorci so le vzorci površinskih vod. Med koncentracijama ni opazne korelacije, verjetno zaradi razmeroma kratkega razpadnega časa Be-7. Koncentracija Be-7 je odvisna pred vsem od starosti vode, koncentracija tritija pa od koncentracije tritija v vodonosnikih, iz katerih se površinske vode napajajo. Da bi lahko izdelali zanesljivejši model, bi potrebovali več meritev.

Meritve s spektrometrijo gama niso zadosti občutljive, da bi lahko opazili razlike v koncentracijah sevalcev gama med posameznimi lokacijami. Zato smo merske rezultate povprečili po lokacijah, ki pripadajo površinskim vodam in posameznim vodonosnikom. Meritve kažejo, da je koncentracija U-238 povprečena po vzorcih površinskih vod oziroma vzorcih iz raznih vodonosnikov najvišja v površinskih vodah, koncentraciji Be-7 in Ra-226 pa najvišji v podtalnicah iz holocenskih vodonosnikov. Najnižje koncentracije imajo vzorci iz pleistocenskih vodonosnikov. Med vzorci iz zgornjih in spodnjih pleistocenskih vodonosnikov ni značilnih razlik.

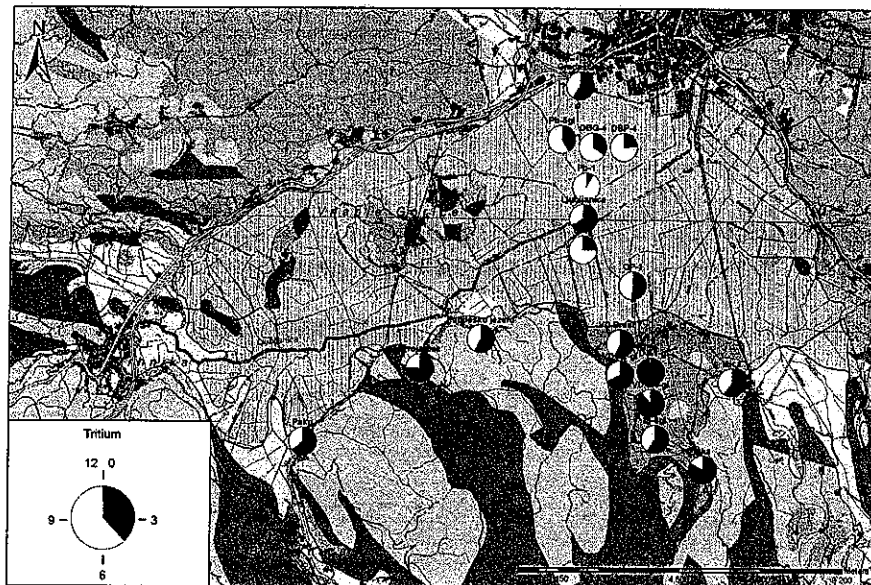
Meritve koncentracij tritija v površinskih vodah kažejo, da ni značilnih razlik med posameznimi vzorčevalnimi mesti. Razlike med mesti pa so izrazite tako pri holocenskih kot pri pleistocenskih vodonosnikih. To kaže na znatne razlike v starosti vode med posameznimi vzorčevalnimi mesti.

TRITIJ

Tritij je bil določen v 103 vzorcih. Za vsako vzorčevalno mesto imamo od enega do sedem rezultatov. Povprečne vrednosti za koncentracije tritija v podzemnih vodah, površinskih vodah in izviri so predstavljene na sliki 7, na sliki 8 pa porazdelitev istih vrednosti v prostoru.



Slika 7. Povprečne vrednosti za tritij za vsa vzorčevalna mesta.

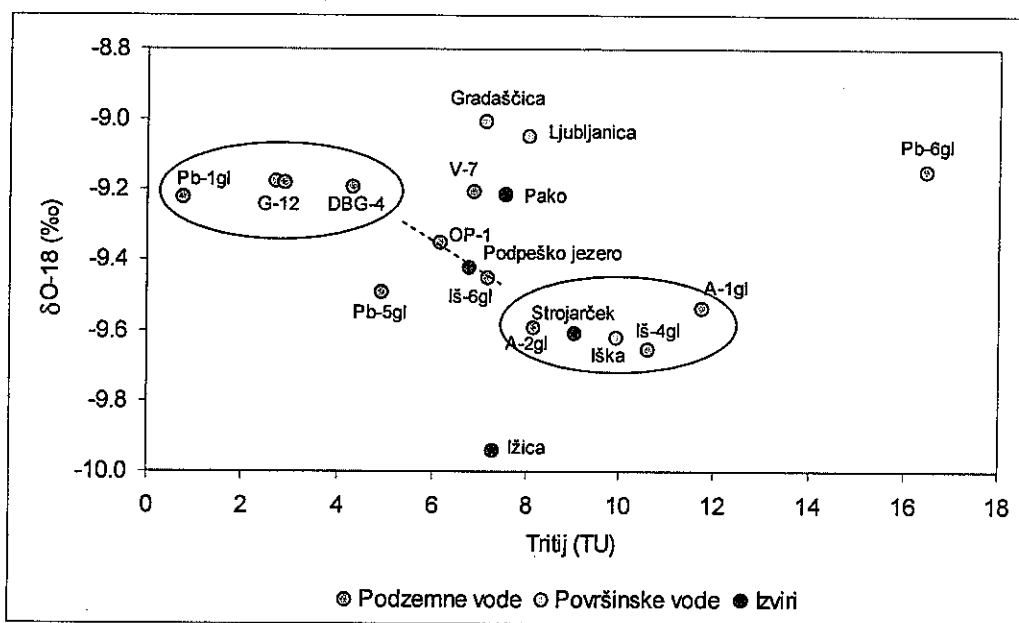


Slika 8. Tritij na Ljubljanskem barju – prostorska porazdelitev.

Koncentracije tritija za površinske vode in izvire so podobne (U – test da vrednost 0.71) in se gibljejo med 7 in 9 TU. Najnižje koncentracije so značilne za zgornji pleistocenski vodonosnik in v splošnem ne presegajo 6 TU. Izjema je vzorčevalno mesto Pb-6gl na

severnem delu Ljubljanskega barja, na katerem koncentracije dosežejo sploh maksimalno povprečno vrednost za tritij, izmerjene v okviru obeh projektov. Na osnovi najizrazitejše obogatitve tako s tritijem kot izotopom kisik-18 predvidevamo, da gre na tem vzorčnem mestu za izrazit neposredni vpliv deževnice.

Najvišje koncentracije tritija so bile izmerjene v nizkem pleistocenskem vodonosniku, kar bi lahko kazalo na zelo dinamičen sistem z zelo mlado vodo in sorazmerno hitrim dotokom svežih padavin. Z upoštevanjem rezultatov za stabilne izotope, hidrokemijskih preskušanj, rednih meritev nivoja podzemne vode in dinamike v vodonosniku pa je vseeno bolj verjetna interpretacija, da je bila večji del vode v spodnjem pleistocenskem vodonosniku zadnjič v stiku z ozračjem v sredini prejšnjega stoletja. Ker je bila takrat koncentracija tritija v ozračju zelo visoka zaradi nadzemnih jedrskih poskusov, lahko sorazmerno visoke vrednosti za tritij v vzorcih to domnevo podprejo.



Slika 9 Razmerje med koncentracijo tritija in izotopsko sestavo kisika v vodah Ljubljanskega barja.

Iz slike 10, ki prikazuje razmerje med koncentracijo tritija ter izotopsko sestavo kisika v vodi, je razvidno, da lahko posebej izdvojimo dve značilni skupini podzemnih vod. Za prvo skupino je značilna nizka koncentracija tritija, večinoma manj kot 5 TU. To so podzemne vode iz osrednjega oziroma severnega dela barja, kjer je med glinastimi plastmi podzemna voda ujeta v bolj prepustnih peščeno-prodnih plasteh. Gre torej za vodonosnik, v katerem se voda pretaka dokaj počasi, na kar kažejo dokaj nizke koncentracije tritija. Za drugo skupino podzemnih vod so značilne koncentracije tritija med 8 in 12 TU, kar pomeni, da imamo opraviti z mlajšimi vodami. V tej skupini so vsi trije globoki vodnjaki v vodarni Brest na južnem obrobju Ljubljanskega barja. Za te vode je značilno tudi osiromašenje s težjim kisikovim izotopom ^{18}O , kar kaže na višjo srednjo nadmorsko višino zaledja teh vod. Na osnovi hidrogeoloških razmer sklepamo, da imajo te vode napajalno zaledje v višjih predelih karbonatnega masiva Krma, ki je deloma zakrasel. Zaradi večje dinamike podzemne vode v kraškem sistemu so koncentracije tritija v podzemni vodi bolj podobne koncentracijam tritija v padavinski vodi.

Zelo zanimiva je tudi izotopska sestava kraškega izvira Ižica pri Igu. Po koncentraciji tritija lahko sklepamo, da gre za dinamični hidravlični sistem z mlajšo vodo, podoben drugi skupini podzemnih vod, medtem ko izotopska sestava kisika kaže pomembno razliko. Voda Ižice je izrazito osiromašena s težjim kisikovim izotopom, kar kaže na izrazito višinsko napajalno

območje tega izvira, ki ga na tem območju lahko iščemo v najvišjih delih krimskega pogorja. Izotopske značilnosti vode na vzorčnem mestu Pb-5gl bi lahko kazale, da gre v tej vrtini za podzemno vodo z zaledjem v Krimskem pogorju, vendar za starejšo vodo zaradi počasnega toka podzemne vode pod glinastmi plastmi Ljubljanskega barja.