



POSKUS OCENE KAKOVOSTI PODTALNICE V VODONOSNIKU OB MISLINJI

*Izvirni znanstveni članek
COBISS 1.01
DOI: 10.4312/dela.57.5-56*

Izvleček

Vodonosnik ob Mislinji zaradi majhne izdatnosti in dejstva, da se ne uporablja za vodooskrbo, ni vključen v redni državni monitoring kakovosti podzemnih voda. V članku na primeru devetih vzorčnih mest (zasebnih vodnjakov in vrtin) analiziramo vrednosti osnovnih fizikalno-kemijskih parametrov vode, na podlagi katerih preliminarno ocenjujemo njeno kakovost. Ugotavljamo, da se v podtalnici odražajo antropogeni vplivi, ki so izrazitejši v bližini območij strnjene kmetijske obdelave ter ob večjih naseljih. Pri večini vzorcev so prisotne povišane vrednosti nitratov in kloridov, pri nekaterih pa se v višjih koncentracijah pojavljajo tudi druga merjena onesnažila. Glede na aktualni Pravilnik o pitni vodi je kar pet od devetih vzorcev neustreznih, oziroma zgolj pogojno ustreznih, kar pomeni, da je podtalnica v vodonosniku ob Mislinji morda že preveč onesnažena, da bi nanjo lahko računali kot na možni rezervni vodni vir za vodooskrbo.

Ključne besede: podtalnica, medzrnski vodonosnik, Mislinjska dolina, Mislinja, kakovost podtalnice, fizikalno-kemijske analize vode

*Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za prostorsko planiranje, Oddelek za geodezijo, Jamova 2, SI-1000 Ljubljana, Slovenija
**Univerza v Ljubljani, Filozofska fakulteta, Oddelek za geografijo, Aškerčeva 2, SI-1000 Ljubljana, Slovenija
e-pošta: jana.breznik@fgg.uni-lj.si, tajan.trobec@ff.uni-lj.si
ORCID: 0000-0003-3482-4588 (J. Breznik), 0000-0002-8784-4366 (T. Trobec)

1 UVOD

Podzemna voda predstavlja pomemben vir sladke vode, ki se lahko uporablja za pitje, namakanje, v industrijski proizvodnji itd. Površinska in podzemna voda sta med seboj povezani. Slednja predstavlja primarni vir za napajanje izvirov in vodotokov ter ohranjanje pretoka v strugah v času brez padavin, zaradi česar je tudi z ekološkega vidika izjemno pomemben člen vodnega kroga. Po drugi strani pa se podzemna voda, poleg z neposrednimi padavinami nad vodonosnikom, v času visokih voda napaja tudi s površinskimi vodami (Brunke, Gonser, 1997).

Slovenija je s podzemno vodo bogata država. Njene dinamične zaloge po starejših ocenah znašajo $50,4 \text{ m}^3/\text{s}$ ali okoli 10 % skupnega internega odtoka (Uhan, Kranjc, 2003). Po novejših ocenah je, zaradi spremenjene metodologije izračunavanja obnovljivih zalog, podzemne vode v Sloveniji še bistveno več. V tridesetletnem obdobju 1991–2020 so obnovljive zaloge podzemne vode znašale $187,55 \text{ m}^3/\text{s}$ oziroma 37 % celotnega internega odtoka (Andjelov in sod., 2021).

Podzemna voda se pojavlja v različnih oblikah. V prodno-peščenih nanosih ob naših večjih rekah (Sava, Drava, Mura, Soča, Savinja ...) se v vodonosnikih z medzrnsko poroznostjo pojavlja kot podtalnica (Uhan, Kranjc, 2003). Območja podtalnice so zaradi naravnih danosti, kot so nižinska lega, uravnan relief, razpoložljivi vodni viri in kakovostne prsti, gosto poseljena, zaradi česar so tam prisotni tudi številni pritiski na okolje (Ambrožič in sod., 2008).

Onesnažila večinoma vstopajo v vodonosnik s površja točkovno, linijsko ali razpršeno (Jamnik in sod., 2014). Onesnažena podzemna voda ob uporabi za vodooskrbo predstavlja resno grožnjo za zdravje, hkrati pa negativno vpliva tudi na ekosistem in vodne vire, ki se napajajo iz vodonosnika (Fetter, 1999). Zaradi intenzivnega kmetijstva (Lampič, Rutar, 2019), prisotnosti podtalnice plitvo pod površjem in velike okoljske občutljivosti (Špes in sod., 2002) so v Sloveniji z onesnažili (predvsem z nitrati) najbolj onesnaženi nekateri vodonosniki z medzrnsko poroznostjo v severovzhodnem delu Slovenije (Spodnja Savinjska dolina, Dravsko in Ptujsko polje ter vodonosniki ob Muri) (Gacin, Mihorko, 2012; Kemijsko stanje ..., 2021).

Iz mreže opazovalnic za monitoring kakovosti podzemne vode (DRSV, 2021) je razvidno, da se v Sloveniji analize podtalnice izvajajo predvsem na območjih obsežnejših nižinskih vodonosnikov z medzrnsko poroznostjo (Ljubljansko polje, Kranjsko-Sorško polje, Spodnja Savinjska dolina, Krško-Brežiško polje ...). Tam se podtalnica tudi v večji meri uporablja za vodooskrbne in druge namene, hkrati pa je zaradi številnih pritiskov tudi bolj izpostavljena onesnaževanju. Tak način monitoringa pa zapostavlja manjše vodonosnike, kot je na primer vodonosnik ob reki Mislinji, ki je tudi osrednje območje našega preučevanja.

Zaradi majhnega vodozbirnega zaledja osrednjega vodotoka – Mislinje ter razmeroma tankega nanosa proda in peščene gline (Mioč, 1978) Mislinjska dolina nima večjih

zalog podtalnice. Podtalnica se na tem območju tudi ne uporablja za vodooskrbo nižinskih naselij, saj se ta praviloma oskrbujejo z vodo iz zajetij v okoliškem vzpetem svetu (GURS, 2021), temveč zgolj za zalivanje, namakanje in pranje. Posledično se v Mislinjski dolini ne izvajajo analize na podtalnici, zaradi česar tudi ne vemo, kakšno je njeno dejansko količinsko in kakovostno stanje. Pa vendar lahko glede na relativno gosto poselitev, prisotnost intenzivnega kmetijstva s poudarkom na hmeljarstvu ter številnih industrijskih obratov sklepamo, da so pritiski na podtalnico v vodonosniku ob Mislinji razmeroma veliki in bi lahko vplivali na slabšo kakovost vode.

Glede na razdelitev Slovenije na telesa podzemne vode (Pravilnik o določitvi ..., 2018) se Mislinjska dolina uvršča v vodno telo *podzemne vode Vzhodne Alpe*, ki je glede na obstoječe analize v dobrem kemijskem stanju (Kemijsko stanje ..., 2021). Pri tem je treba poudariti, da je to vodno telo izjemno velika in heterogena enota, saj poleg Mislinjske doline vključuje še celotno Pohorje, Kozjak in Strojno ter del Vitanjskih Karavank in je zato povsem neustrezno za ocenjevanje kakovosti podtalnice v vodonosniku ob Mislinji. Poleg tega je kemijsko stanje tega vodnega telesa (z izjemo merilnega mesta Zgornja Vižinga na Radeljskem polju ob Dravi) ocenjeno na podlagi analize vode zajetij v okoliškem vzpetem svetu (Mislinja MZ-4/95 v Vitanjskih Karavankah, Mrzli studenec na Pohorju, Ojstrica pri Dravogradu na Kozjaku). Zaradi zgostitve antropogenih pritiskov predvsem v nižjem svetu ni merodajno za dolinsko dno, kjer se nahaja vodonosnik ob Mislinji. Po našem vedenju, kot tudi po zagotovilih predstavnikov Oddelka za meritve podzemnih voda, Sektorja za hidrometrijo, Urada za okoljska merjenja na ARSO (Frantar, 2021) morebitni drugi, podrobnejši elaborati ali meritve kakovosti podtalnice v Mislinjski dolini niso bili izdelani.

Glede na to, da so po naši oceni pritiski na podtalnico v Mislinjski dolini razmeroma veliki, hkrati pa uradni podatki o njeni kakovosti ne obstajajo, je glavni namen raziskave ugotoviti, kako se vplivi iz okolja odražajo na kakovosti podtalnice. V ta namen smo na izbranem območju v obstoječih vodnjakih in zasebnih vrtinah na devetih lokacijah vzorčili podtalnico in izvedli analize za izbrane osnovne fizikalno-kemijske parametre vode. Poleg podtalnice smo na treh lokacijah analizirali tudi vodo reke Mislinje, kar nam je omogočilo medsebojno primerjavo površinskih voda in podtalnice na tem območju.

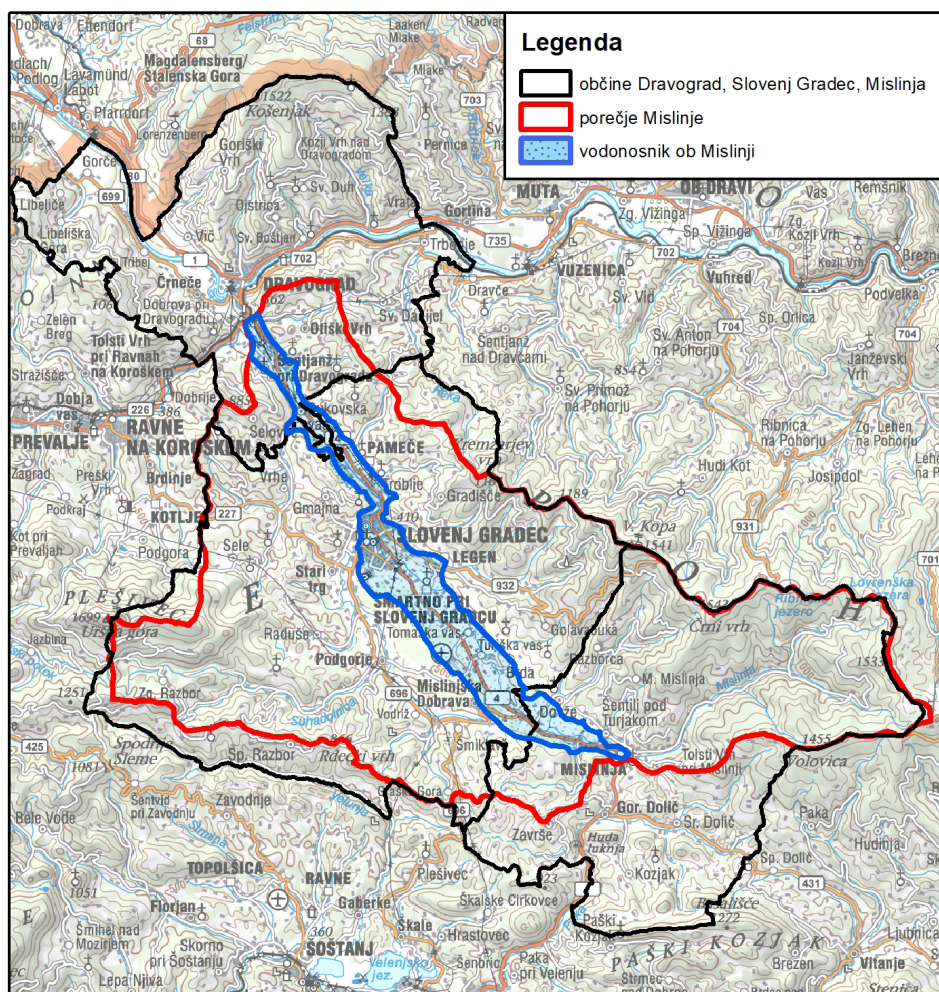
2 GEOGRAFSKI ORIS MISLINJSKE DOLINE

Preučevano območje predstavlja ravninsko dno Mislinjske doline, pod katerim se je v kvartarnih sedimentih ob Mislinji (Mioč, 1978) izoblikoval manjši vodonosnik (slika 1).

Mislinjska dolina leži med Pohorjem in vzhodnimi odrastki Karavank ter se uvršča med predalpske pokrajine. Nastala je ob labotski prelomni coni, ki poteka v dinarski smeri (Mioč, 1978). V upravnem smislu spada pod Koroško statistično regijo in je razdeljena med občine Mislinja, Slovenj Gradec in Dravograd. Dolga je 22 km ter v najširšem delu, ob sotočju Mislinje s Suhodolnico, do 5 km široka. Vodonosnik ob

Mislinji leži ob srednjem in spodnjem toku reke, med naseljema Mislinja in Otiški Vrh, kjer se Mislinja izliva v Mežo. Njegova površina znaša okoli 24 km² (Hidrogeološka karta, 2009). Je del telesa *podzemne vode Vzhodne Alpe*, podrobneje del kvartarnega, medzrnskega vodonosnika ob Dravi, Mislinji in Meži, ki se glede na hidrogeološko klasifikacijo uvršča v kategorijo *lokalnih, nezveznih, izdatnih oziroma obširnih, vendar nizko do srednje izdatnih vodonosnikov* (Gacin, Mihorko, Krajnc, 2009). Območje nad vodonosnikom ob Mislinji v povprečju prejme okoli 1200–1300 mm

Slika 1: Preučevano območje vodonosnika ob Mislinji.



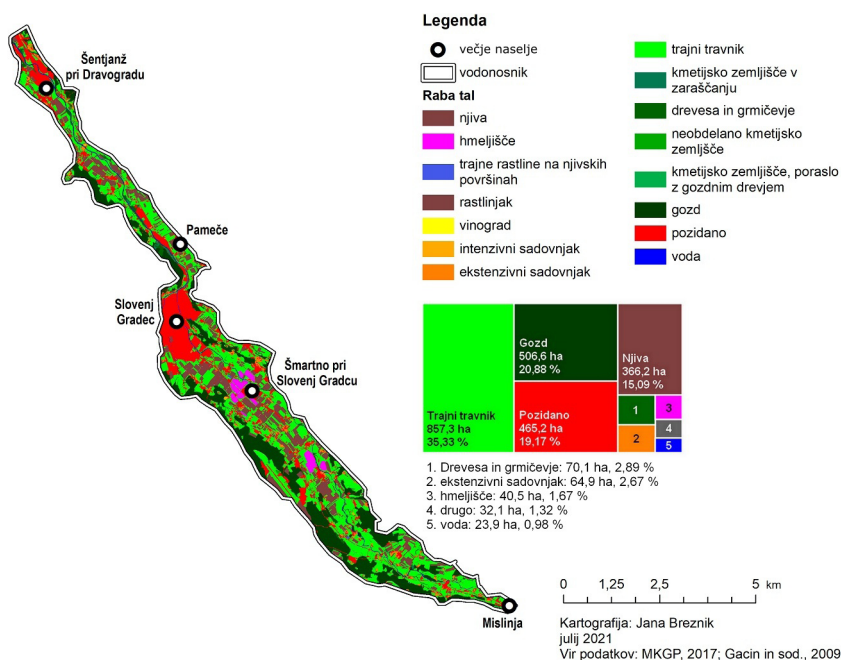
Kartografija: Jana Breznik
junij, 2017
Vir podatkov: GURS, 2017; ARSO, 2017; ARSO 2006

0 2 4 8 km

padavin letno (ARSO, 2021a). Na njem prevladujejo distrične in evtrične rjave prsti (KIS, 2021). Osrednji vodotok Mislinjske doline je hudourniška reka Mislinja (Gams, 1976), ki izvira na Pohorju in ima alpski dežno-snežni pretočni režim (Frantar, Hrvatini, 2005). Njen povprečni pretok v obdobju 1981–2010 pri Dovžah znaša $1,9 \text{ m}^3/\text{s}$, pri Otiškem Vrhu pa $4,6 \text{ m}^3/\text{s}$ (ARSO, 2021b). Po meritvah državnega monitoringa kakovosti vode je v dobrem kemijskem stanju (ARSO, 2017; ARSO, 2020).

Dno Mislinjske doline je zaradi ugodnih naravnih danosti (uravnan relief, zmerno podnebje, dostop do vodnih virov, kakovostne prsti) naseljeno že od neolitika (Djura Jelenko, 2010). Prevladujejo manjša do srednje velika podeželska naselja. Najširši del doline – Slovenjgraška kotlina (ob sotočju Suhadolnice in Mislinje) – pa je po podatkih Statističnega urada Republike Slovenije (2016) z več kot $250 \text{ prebivalcev}/\text{km}^2$ eno gosteje poseljenih območij v Sloveniji (mesto Slovenj Gradec je imelo v letu 2016 gostoto poselitve $1317 \text{ prebivalcev}/\text{km}^2$). Naravno- in družbenogeografske značilnosti se kažejo tudi v rabi tal. Nad vodonosnikom ob Mislinji je največ travniških površin (35 % območja vodonosnika), za katere je tako kot za njivske površine (15 %) in hmeljišča (1,7 %) značilna intenzivna kmetijska raba. Hmeljišč je sicer relativno malo, a so zgoščena v okolici Šmartna pri Slovenj Gradcu. Precej velik je tudi delež pozidanih površin, ki predstavljajo skoraj petino območja (19 %). Z gozdom (21 % površine) so večinoma porasla le robna območja vodonosnika (slika 2).

Slika 2: Raba tal na območju vodonosnika.

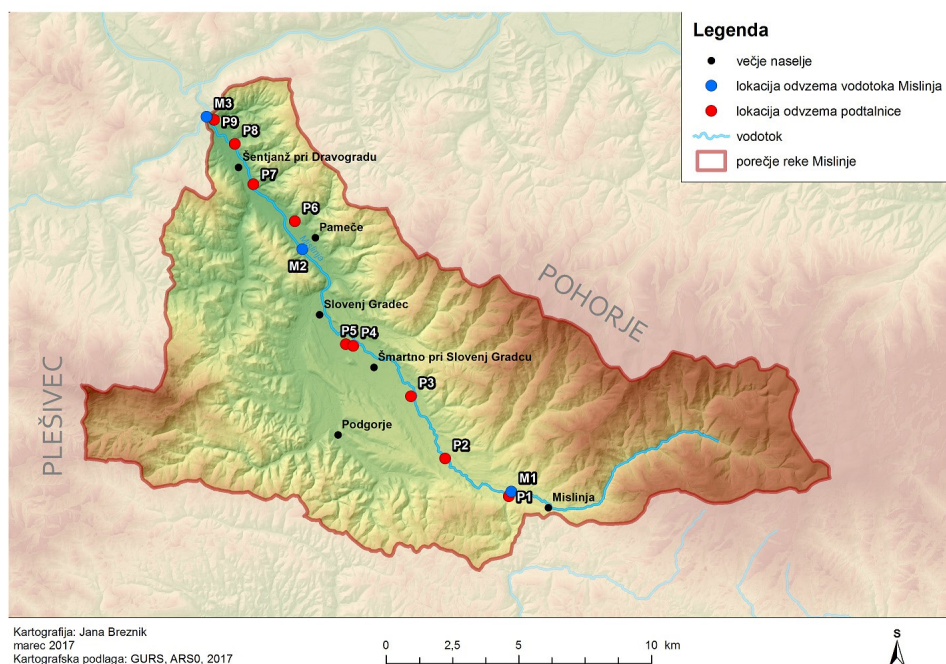


3 METODE

Na podlagi podatkov o vodnih dovoljenjih (ARSO, 2016) ter s preučitvijo prostorskega obsega vodonosnika glede na litološke značilnosti območja (Gacin, Mihorko, Krajnc, 2009; Mioč, 1978), smo izbrali čim bolj reprezentativne in prostorsko ustrezno razporejene lokacije za odvzem vzorcev podtalnice iz zasebnih vrtin in vodnjakov. Vzorčenje podtalnice na zasebnih vrtinah in vodnjakih se ob upoštevanju metodoloških priporočil in zavedanju objektivnih omejitev uvršča med uveljavljene pristope preliminarnega ocenjevanja kakovosti podtalnice na območjih, kjer se uradni monitoring kakovosti ne izvaja (Metodologija za opredelitev ..., 2021). Lokacije smo določili od točke, kjer Mislinja priteče iz Mislinjskega jarka v dolino, tj. pri naselju Mislinja, do njenega izliva v Mežo v Otiškem Vrhu (slika 1). Na podlagi podatkov iz evidence vodnih dovoljenj smo glede na priporočila za vzorčenje iz vodnjakov in vrtin (Metodologija za opredelitev ..., 2021) poskušali izbrati take lokacije, kjer se voda čim bolj redno uporablja, npr. kjer imajo vodne črpalke ali pa vodo pogosto uporabljajo za zalivanje, pranje in ostalo rabo.

Enkratno vzorčenje je potekalo 22. in 23. oktobra 2016. Vzorce smo odvzeli na dvanajstih lokacijah (slika 3). Na devetih lokacijah smo vzorčili podtalnico, na preostalih treh pa reko Mislinjo. Pred odvzemom vzorca podtalnice smo na zasebnih vrtinah, opremljenih s črpalkami, pustili vodo teči približno pet minut in šele nato izvedli vzorčenje. Na ta način smo odstranili morebitni vpliv zastajanja vode v sistemu na njene merjene fizikalno-kemijske lastnosti. Za potrebe nadaljnjih terenskih in laboratorijskih analiz smo odvzeli vzorce po dva litra ter poseben vzorec za določanje biokemijske potrebe po kisiku (BPK 5). Na lokaciji smo z električnim merilcem izmerili temperaturo vode, pH, prevodnost in vsebnost kisika. Na popisni list smo zapisali tudi druge značilnosti in okoliščine, ki so se nanašale bodisi na odvzeti vzorec bodisi na lokacijo in vplive v neposredni bližini (organoleptične lastnosti vode, pokrovnost in raba tal, razdalja od površja do podtalnice ter globina, na kateri je bil vzorec odvzet). Pri pridobivanju nekaterih informacij tehnične narave so nam pomagali tudi lastniki vrtin oziroma vodnjakov. Lokacije odvzemov so predstavljene v preglednicah 1 (odvzemi na vodotoku Mislinja) in 2 (odvzemi podtalnice). Primera vodnjakov sta prikazana na sliki 4.

Slika 3: Izbrane lokacije za vzorčenje podtalnice na vodonosniku ob Mislinji in na Mislinji.



Preglednica 1: Predstavitev lokacij odvzemov na vodotoku Mislinja.

Lokacija	Opis lokacije odvzema	Pretežna dejanska raba v okolici 500 m od odvzema
M1	- začetek srednjega toka (ob začetku doline) - manjše zgostitve prebivalstva	- trajni travniki – 58 % - gozd – 13 % - njiva ali vrt 11 % - pozidano in sorodno zemljišče 11 % - ostale rabe – 7 %
M2	ob industrijski coni Pameče	- trajni travniki – 37 % - gozd – 26 % - pozidano in sorodno zemljišče – 20 % - ostale rabe – 17 %
M3	- pred sotočjem z reko Mežo – v neposredni bližini industrijske cone Otiški Vrh ter večje zgostitve prebivalstva - pomemben tudi vpliv kmetijstva	- pozidano in sorodno zemljišče – 40 % - trajni travniki – 15 % - njiva ali vrt – 13 % - gozd – 13 % - ostale rabe – 19 %

Preglednica 2: Predstavitev lokacij odvzemov podtalnice.

Loka- cija	Vrsta	Globina		Opis lokacije odvzema	Pretežna de- janska raba v okolici 500 m od odvzema	Priključenost lokacije odvzema na javno kanali- zacijsko omrežje (stanje ob odvze- mu vzorca)
		vodnja- ka oz. vrtine	od površja do nivoja podtalnice			
P1	vodnjak	2,5 m	*	• zaselek Straže (naselje Mislinja) • vodnjak starejši in redkeje uporabljan • neposredno ob glavni cesti (Slovenj Gradec – Velenje)	• trajni travniki – 47 % • gozd – 27 % • pozidano in sorodno zemljišče – 11 % • ostale rabe – 15 %	ne (ima možnost priključitve, aglomeracija)
P2	vodnjak	3,5 m	na dan odvzema 1,83 m	• vodnjak za potrebe toplotne črpalke • redno vzdrževan in uporabljan • lokacija neposredno ob vodotoku Mislinja – možen večji vpliv površinskega toka na podtalnico (lastnik opaža močno nihanje temperature podtalnice glede na letni čas) • pretežno kmetijsko območje	• trajni travniki – 51,5 % • gozd – 25 % • pozidano in sorodno zemljišče – 8 % • ostale rabe – 15,5 %	ne (ni del aglomeracije)
P3	vrtina	*	*	• mlajša vrtina (2 leti), a razmeroma redko uporabljana – predvsem v namene namakanja in napajanja živine – aktivna kmetija z usmeritvijo v živinorejo – možnost vpliva dejavnosti lastnika na kakovost podtalnice • hmeljišča v neposredni okolici	• trajni travniki – 47 % • njiva ali vrt – 25 % • pozidano in sorodno zemljišče – 10 % • hmeljišče – 7 % • ostale rabe – 11 %	da

Loka- cija	Vrsta	Globina		Opis lokacije odvzema	Pretežna de- janska raba v okolici 500 m od odvzema	Priključenost lokacije odvzema na javno kanali- zacijsko omrežje (stanje ob odvze- mu vzorca)
		vodnja- ka oz. vrtine	od površja do nivoja podtalnice			
P4	vodnjak	*	*	• v okolici naselja Slovenj Gradec • lastnik se ukvarja z avtoprevozništvom – voda se uporablja za pranje voznega parka – možnost vpliva dejavnosti lastnika na kakovost podtalnice • v neposredni bližini ene največjih hmeljarskih družin • v okolici nekaj kmetij • vodnjak star okoli 20 let	• trajni travniki – 43 % • njiva ali vrt – 33 % • pozidano in sorodno zemljišče – 12 % • hmeljišče – 5 % • ostale rabe – 7 %	ne (priključen 2019)
P5	vodnjak	5 m	običajno okoli 4 m	• v okolici naselja Slovenj Gradec • vodnjak star okoli 50 let • neposredna bližina prometnice (Slovenj Gradec – Velenje)	• trajni travniki – 40 % • njiva ali vrt – 36 % • pozidano in sorodno zemljišče – 19 % • ostale rabe – 5 %	ne (priključen 2020)
P6	vrtina	6,8 m	*	• naselje Pameče • lastnik se ukvarja z avtoprevozništvom – voda se uporablja za čiščenje voznega parka in za toplotno črpal-ko – možnost vpliva dejavnosti lastnika na kakovost podtalnice • lokacija pod pobočjem – tokovi s pobočij lahko vplivajo na kvaliteto podtalnice • pretežno kmetijsko območje	• trajni travniki – 44 % • njiva ali vrt – 20 % • gozd – 10 % • pozidano in sorodno zemljišče – 10 % • ostale rabe – 16 %	ne (ni del aglomeracije)

Loka- cija	Vrsta	Globina		Opis lokacije odvzema	Pretežna de- janska raba v okolici 500 m od odvzema	Priključenost lokacije odvzema na javno kanali- zacijsko omrežje (stanje ob odvze- mu vzorca)
		vodnja- ka oz. vrtine	od površja do nivoja podtalnice			
P7	vodnjak	3,5 m	na dan odvzema 2,12 m	• naselje Otiški Vrh (južni del) • lastnik se ukvarja s kmetijstvom (živinoreja) • pretežno kmetijsko območje • okoli 20 let star vodnjak, redno uporabljan	• trajni travniki – 41,5 % • gozd – 21 % • njiva ali vrt – 12 % • pozidano in sorodno zemljišče – 11 % • ostale rabe – 14,5 %	ne (ni del aglomeracije)
P8	vrtina	6 m		• naselje Otiški Vrh • v neposredni bližini vodotoka Mislinja (30 m) • okoli 20 let stara vrtina – redno uporabljana • lokacija pod pobočjem – tokovi s pobočij lahko vplivajo na kvaliteto podtalnice	• pozidano in sorodno zemljišče – 40 % • gozd – 24 % • trajni travniki – 24 % • ostale rabe – 12 %	ne (del aglomeracije, kanalizacija še ni izgrajena)
P9	vodnjak	4,5 m	na dan odvzema 3,16 m	• naselje Otiški Vrh (sever) • voda se uporablja redno za potrebe toplotne črpalke • neposredna bližina industrijske cone Otiški Vrh – v zalednem območju vodnjaka • neposredna bližina glavne ceste Dravograd–Slovenj Gradec • neposredna bližina kemične čistilnice in avtoprevoznitva • močno pozidano območje	• pozidano in sorodno zemljišče – 39 % • trajni travniki – 19 % • gozd – 18 % • drevesa in grmičevje – 10,5 % • njiva ali vrt – 5 % • ostale rabe – 8,5 %	ne (del aglomeracije, kanalizacija še ni izgrajena)

Opomba: *podatek ni na voljo (globine od površja do nivoja podtalnice ni bilo možno izmeriti/lastnik nima informaciji o globini vrtine/vodnjaka).

Slika 4: Primer vrtine (a – vzorčna lokacija – vrtina P6) in vodnjaka (b – vzorčna lokacija – vodnjak P9) na izbranih lokacijah.



V laboratoriju smo izvedli analize vsebnosti nitratov, nitritov, amonija, kloridov, sulfatov in fosfatov. Določili smo tudi biokemijsko potrebo po kisiku in trdoto vode. Za analize nitratov, nitritov, amonija, kloridov, sulfatov in fosfatov so bili uporabljene terenski testerji Visocolor eco. Ti so cenovno dostopni in omogočajo enostavno uporabo z vizualnim odčitavanjem vrednosti koncentracije posameznih parametrov. Določevanje trdote smo izvedli s standardno metodo titracije z EDTA (Boyd, 2015). Določali smo karbonatno, skupno, kalcijevo in magnezijevo trdoto. V laboratoriju smo po standardni metodi določili tudi vrednost biokemijske potrebe po kisiku (Boyd, 2015).

Pridobljene podatke smo zbrali v evidenčni preglednici ter izrisali grafikone in karte, ki so nam omogočili prostorsko preučitev kakovosti vode odvzetih vzorcev. Ker vodonosnik ob Mislinji predstavlja tudi potencialni vir pitne vode, smo dobljene rezultate merjenih fizikalno-kemijskih parametrov primerjali z izbranimi mejnimi vrednostmi, podanimi v Pravilniku o pitni vodi (Uradni list RS, št. 19/04, 35/04, 26/06, 92/06, 25/09, 74/15 in 51/17). Vrednosti so prikazane v preglednici 3.

Preglednica 3: Izbrani parametri in mejne vrednosti po Pravilniku o pitni vodi (Uradni list RS, št. 19/04, 35/04, 26/06, 92/06, 25/09, 74/15 in 51/17).

Parameter	Mejna vrednost parametra/specifikacija	Enota
Amonij	0,50	mg/l
Nitrat	50	mg/l
Nitrit	0,50	mg/l
Klorid	250	mg/l
Sulfat	250	mg/l
Električna prevodnost	2500	μS/cm pri 20°C

Parameter	Mejna vrednost parametra/specifikacija	Enota
Koncentracija vodikovih ionov (pH vrednost)	med 6,5 in 9,5	enote pH
Barva	sprejemljiva za potrošnike in brez neobičajnih sprememb	
Motnost	sprejemljiva za potrošnike in brez neobičajnih sprememb	
Vonj	sprejemljiv za potrošnike in brez neobičajnih sprememb	

4 REZULTATI MERITEV IN ANALIZ

V nadaljevanju so podrobneje predstavljene vrednosti merjenih fizikalno-kemijskih parametrov, ločeno za vzorce podtalnice in vzorce Mislinje. V preglednici 4 in na slikah 5 so vzorci vodotoka Mislinja prikazani s temnejšo podlago, vzorci podtalnice pa s svetlejšo podlago.

4.1 Rezultati meritev za vzorce odvzete na Mislinji

Na vzorcih Mislinje smo za posamezne parametre pridobili naslednje rezultate:

- Vonj, barva in motnost vode so najbolj očitni in najlažje opazni parametri, iz katerih lahko sklepamo na kakovost vode. So izjemnega pomena, saj je ravno njihova neustreznost pogosto povod za nadaljnje analize kakovosti vode. Na območju vodotoka Mislinja nismo zaznali posebnosti pri nobenem izmed teh parametrov (preglednica 4).
- Najnižjo temperaturo je imela Mislinja v zgornjem delu Mislinjske doline (6,5 °C). Po toku navzdol je zaradi toplejšega ozračja ob vzorčenju temperatura naraščala do 10,7 °C (v spodnjem toku) (preglednica 4, slika 5a).
- Zaznano je rahlo naraščanje pH na Mislinji po toku navzdol, vendar so razlike med vzorci majhne (preglednica 4, slika 5a).
- Vsebnost raztopljenega kisika v vodi je pri Mislinji najvišja v zgornjem toku (8,6 mg/l), a po toku navzdol le malo upade (preglednica 4, slika 5b).
- Rezultati analize biokemijske potrebe po kisiku kažejo na stabilne vrednosti na Mislinji (nihanje med 4,6 do 5,6 mg/l) (preglednica 4, slika 5b).
- Nitrati so bili prisotni v vseh preučevanih vzorcih. Zaslediti je trend naraščanja vsebnosti nitratov po toku navzdol (od 3 mg/l v zgornjem toku in 10 mg/l v spodnjem toku Mislinje) (preglednica 4, slika 5c).
- Vsebnost nitritov je znašala med 0 in 0,03 mg/l. Njihova vsebnost se je po toku navzdol povečevala (preglednica 4, slika 5d).

- Vsebnost amonija je bila pod mejo zaznavnosti (preglednica 4, slika 5d).
- Pri Mislinji vsebnosti kloridov ne presegajo 7 mg/l, se pa po toku navzdol nekoliko povečujejo (preglednica 4, slika 5c).
- Vsebnost fosfatov in sulfatov je bila pri vseh vzorcih manjša od meje zaznavnosti, ki znaša pri fosfatih 0,1 mg/l, pri sulfatih pa 0,25 mg/l (preglednica 4, slika 5d).
- Pri trdoti vode je opazen očiten trend naraščanja vrednosti po toku navzdol. Opazen je prehod iz zelo mehke v mehko in zmerno trdo vodo (2,8 °NT do 8,9 °NT) (preglednica 4, slika 5e).
- Električna prevodnost je odvisna od prisotnosti elektrolitov v vodi. Ker med njimi izrazito prevladujeta kalcijev in magnezijev karbonat, ki kot hidrogenkarbonat opredeljujeta karbonatno trdoto, sta trdota in prevodnost med seboj precej povezani, večje razlike med vrednostmi pa nakazujejo na prisotnost preostalih elektrolitov (nitrati, nitriti, fosfati, amonij, sulfati idr.). Tudi pri električni prevodnosti je prisoten pozitiven trend vrednosti po toku navzdol (med 114,8 µS/cm in 314 µS/cm) (preglednica 4, slika 5e).

4.2 Rezultati meritev za vzorce podtalnice vodonosnika ob Mislinji

Ob analiziranju vzorcev podtalnice iz vodonosnika ob Mislinji smo za posamezne parametre dobili naslednje rezultate:

- Med parametri vonj, barva in motnost smo pri vzorcih P2 in P7 zaznali posebnosti pri parametrih barva in motnost. Vzorca sta bila rumeno obarvana in motna (preglednica 4), kar lahko nakazuje na onesnaženost in različne primese.
- Temperatura podtalnice se je gibala med 10,7 °C in 14,3 °C. Med vzorci podtalnice je imel najnižjo temperaturo vode vzorec P2 (10,7 °C), ki se nahaja v neposredni bližini Mislinje (oddaljenost 31 m). Lastnik navaja izrazito nihanje temperature podtalnice (Obreza, 2016). Izražen je majhen trend naraščanja temperature po toku navzdol (preglednica 4, slika 5a).
- pH se je pri vseh vzorcih podtalnice gibal med 7 in 8. Opazen je rahel trend upadanja pH po toku navzdol, a ni statistično značilen. Izstopajo vzorci P2, P3 in P8, ki imajo višji pH (preglednica 4, slika 5a).
- Med vzorci se vsebnost raztopljenega kisika precej razlikuje (vsebnosti od 2,8 mg/l do 6,1 mg/l). Prisoten je tudi trend upadanja vsebnosti raztopljenega kisika v vodi po toku navzdol (preglednica 4, slika 5b).
- Rezultati analize biokemijske potrebe po kisiku kažejo, da se vrednosti od lokacije do lokacije močno spreminjajo (od 2,26 do 9,81 mg/l). Opazna sta izrazita viška v vzorcih P5 in P8. Opazen je tudi trend naraščanja biokemijske potrebe po kisiku po toku navzdol, kar nakazuje na večjo organsko onesnaženost podtalnice ob spodnjem toku Mislinje (preglednica 4, slika 5b).
- Nitrati so bili prisotni v vseh preučevanih vzorcih. Povečane vrednosti smo zasledili v vzorcih P4 in P5, ki dosežeta 50 mg/l, kar hkrati predstavlja mejno vrednost

po Pravilniku o pitni vodi (Uradni list RS, št. 19/04, 35/04, 26/06, 92/06, 25/09, 74/15 in 51/17). Ta vzorca se nahajata v neposredni bližini Slovenj Gradca. Zasediti je trend naraščanja vsebnosti nitratov po toku navzdol. Trend zaradi izstopajočih vrednosti P5 in P4 ni statistično značilen (preglednica 4, slika 5c).

- Vsebnost nitritov v vzorcih podtalnice je bila, z izjemo vzorca P7 (0,01 mg/l), pod mejo zaznavnosti (preglednica 4, slika 5d).
- Prisotnost amonija smo zasledili zgolj pri dveh vzorcih podtalnice (P5 in P7). V vzorcu P5 je vrednost znašala 0,5 mg/l, s čemer je bila dosežena mejna vrednost glede na Pravilnik o pitni vodi (Ur.l. RS št.:19/04, 35/04, 26/06, 92/06, 25/09 in 74/15). V preostalih vzorcih je bila vsebnost amonija pod mejo zaznavnosti (preglednica 4, slika 5d).
- Kloridi so bili prisotni pri vseh vzorcih, pri čemer sta močno izstopala vzorca P1 z vsebnostjo kloridov več kot 60 mg/l (zgornja meja zaznavnosti) in P9 z vsebnostjo kloridov 60 mg/l. Vsebnosti kloridov v vzorcih podtalnice ne sledijo splošnemu trendu, opazno je ponovno povečanje vsebnosti kloridov v vzorcih P4 in P5 z 12 mg/l oziroma 20 mg/l, ki se nahajata v okolici Slovenj Gradca (preglednica 4, slika 5c).
- Fosfate smo zasledili zgolj v vzorcu P9, kjer je njihova vrednost znašala 0,1 mg/l, kar je hkrati tudi spodnja meja zaznavnosti uporabljenega testa. Povsem možno je torej, da so bili fosfati v zmernih količinah prisotni tudi pri drugih vzorcih, a jih z manj občutljivim testom nismo zaznali (preglednica 4, slika 5d).
- Vsebnost sulfatov je bila pri vseh vzorcih manjša od meje zaznavnosti, ki znaša 25 mg/l (preglednica 4).
- Pri trdoti vode je opazen očiten trend naraščanja vrednosti po toku navzdol. Opazen je prehod iz zelo mehke v mehko in zmerno trdo vodo (med 4,8 °NT do 17,5 °TN). Zaradi anomalije pri laboratorijski analizi (karbonatna trdota je bila višja od skupne) smo za vzorca P1 in P9 prikazali le skupno trdoto. Predvidevamo, da so pri teh dveh vzorcih prisotne povečane vrednosti onesnažil (najverjetneje kloridov), ki vplivajo na rezultat analize trdote. Posebnost je mogoče zaznati tudi pri električni prevodnosti, saj imata vzorca močno povečano vrednost v primerjavi z ostalimi vzorci (preglednica 4, slika 5e).
- Pri parametru električne prevodnosti je prisoten pozitiven trend vrednosti po toku navzdol. Meritve se gibljejo med 177 µS/cm in 880 µS/cm. Najvišji in močno izstopajoči vrednosti električne prevodnosti smo izmerili v vzorcih P1 in P9 (864 µS/cm oziroma 880 µS/cm), kar je verjetno posledica visoke vsebnosti klorida (preglednica 4, slika 5e).

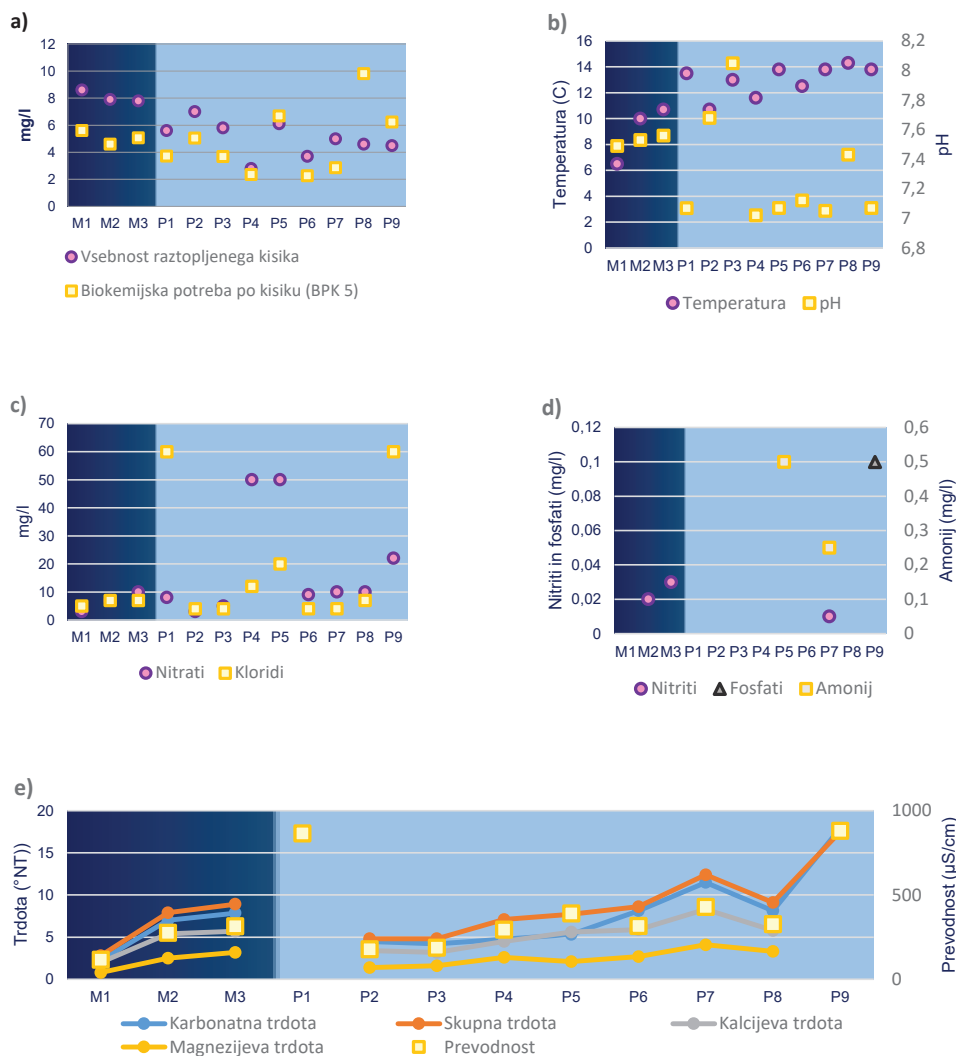
Preglednica 4: Rezultati analiz fizikalno-kemijskih parametrov na posameznih merilnih mestih.

Oznaka V Parameter	Vzorci vodotoka Mislinja			Vzorci podtalnice iz vodonosnika ob Mislinji								
	M1	M2	M3	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
Vonj	brez	brez	brez	brez	brez	brez	brez	brez	brez	brez	brez	brez
Barva	brez	brez	brez	brez	rahlo rumena	brez	brez	brez	brez	rahlo rumena	brez	brez
Motnost	brez	brez	brez	brez	motna	brez	brez	brez	brez	motna	brez	brez
Temperatura (°C)	6,5	10	10,7	13,5	10,7	13	11,6	13,8	12,5	13,8	14,3	13,8
pH	7,49	7,53	7,56	7,07	7,68	8,05	7,02	7,07	7,12	7,05	7,43	7,07
Vsebnost raztopljenega kisika (mg/l)	8,6	7,9	7,8	5,6	7	5,8	2,8	6,1	3,7	5	4,6	4,5
BPK 5(mg/l)	5,6	4,6	5,07	3,72	5,04	3,69	2,35	6,68	2,26	2,86	9,81	6,24
Nitrati (mg/l)	3	7	10	8	3	5	50	50	9	10	10	22
Nitriti (mg/l)	0	0,02	0,03	0	0	0	0	0	0	0,01	0	0
Amonij (mg/l)	< 0,25	< 0,25	< 0,25	< 0,25	< 0,25	< 0,25	< 0,25	0,5	< 0,25	0,25	< 0,25	< 0,25
Kloridi (mg/l)	5	7	7	> 60,00	4	4	12	20	4	4	7	60
Fosfati (mg/l)	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,1
Sulfati (mg/l)	< 25,0	< 25,0	< 25,0	< 25,0	< 25,0	< 25,0	< 25,0	< 25,0	< 25,0	< 25,0	< 25,0	< 25,0
Karbonatna trdota (°NT)	2,24	7	7,84	14,56*	4,48	4,2	4,76	5,32	8,12	11,48	8,12	17,92*
Skupna trdota	2,8	7,9	8,9	13,70*	4,8	4,8	7,1	7,7	8,6	12,4	9,1	17,50*
Kalcijeva trdota (°NT)	2	5,4	5,7		3,4	3,2	4,5	5,6	5,9	8,3	5,8	
Magnezijeva trdota (°NT)	0,8	2,5	3,2		1,4	1,6	2,6	2,1	2,7	4,1	3,3	
Prevodnost (µS/cm)	114,8	275	314	864	177	186,4	293	390	315	428	326	880
Kvalitativna oznaka vode	zelo mehka	mehka	mehka		zelo mehka	zelo mehka	mehka	mehka	mehka	zmerno trda	mehka	

V – vzorec; M1–M3 – merilna mesta na Mislinji; P1–P9 – merilna mesta na podtalnici;

*Vrednosti so kontradiktorne glede na običajne vrednosti za slovenske vode, saj je karbonatna trdota večja od celokupne trdote. Slednje je morda posledica izrazitega onesnaženja s kloridi. Analiza zaradi te anomalije ni bila dokončana.

Slika 5: Onesnažila, trdota in prevodnost glede na posamezne vzorčne lokacije (v temnejšem delu grafikonov so prikazane vrednosti na vzorčnih mestih Mislinje, v svetlejšem pa na vzorčnih mestih podtalnice).



5 DISKUSIJA

Po mnenju Narshima in sod. (2013, str. 74) je koncentracija nitratov nad 10 mg/l posledica antropogenih vplivov na podtalnico. Na obravnavanem območju v Mislinjski dolini vsebnost nitratov niha med 3 in 50 mg/l, manj kot 10 mg/l smo zaznali le v štirih vzorcih. Povišane vrednosti so tako verjetno v večini primerov posledica antropogenih vplivov. Koncentracija nitratov je najvišja pri vzorcih P4 in P5 na območju med Slovenj Gradcem in Šmartnim pri Slovenj Gradcu. Slednje je sodeč po rabi tal (MKGP, 2017) verjetno posledica intenzivnega kmetijstva s poudarkom na integrirani pridelavi hmelja, ki je najbolj razširjena in skoncentrirana ravno v tem delu doline (slika 2). Na problematiko vpliva hmeljišč na spiranje nitratov v podtalnico opozarja tudi Gale s sodelavci (1999). Prav tako možna, a manj verjetna je onesnaženost vode z nitrati zaradi večje gostote poselitve ter mestoma pomanjkljivo urejene kanalizacije. Širše območje Šmartna pri Slovenj Gradcu in južni del Slovenj Gradca sta bila namreč v večji meri ustrezno kanalizacijsko opremljena šele v času po izvajanju meritev, in sicer med letoma 2017 in 2021, nekatera območja v neposredni bližini vzorčnih mest pa še vedno nimajo ustrezno rešenega vprašanja odvajanje odpadne vode (GURS, 2021).

Naravna prisotnost nitritov v podzemni vodi običajno ne presega 0,3 mg/l (Nitrate and nitrite in drinking-water, 2011). Zaznane vrednosti so bistveno nižje od te meje in so tudi pod mejo vrednosti za pitno vodo. Tako Mislinja kot podtalnica v vodonosniku ob Mislinji z nitriti nista onesnaženi.

Naravna prisotnost amonija v podzemni in površinski vodi je običajno nižja od 0,2 mg/l (WHO, 1996). Večina odvzetih vzorcev ni imela povišanih vsebnosti amonija, izstopata le vzorca P5 in P7. V obeh vzorcih vrednosti presegajo 0,2 mg/l, kar kaže na antropogeni vpliv. Prisotnost amonija v podzemni vodi je običajno posledica kmetijstva, komunalnih odplak ali industrije. V vzorcih P5 in P7 je industrija dovolj oddaljena, da verjetno nima pomembnejšega vpliva na podtalnico. V vzorcu P5, ki se nahaja v bližini Slovenj Gradca, ni izključen vpliv komunalnih odplak, saj v času odvzema lastniki vrtine še niso bili priključeni na javno kanalizacijsko omrežje. Istočasno v vzorcu P4, ki se nahaja v neposredni bližini P5, amonija v večjih koncentracijah nismo zaznali, čeprav tudi tukaj kanalizacija v času vzorčenja še ni bila zgrajena. Možno bi bilo tudi onesnaženje zaradi kmetijstva, ki je najverjetnejši vzrok onesnaženja v vzorcu P7, katerega lastnik ima kmetijo usmerjeno pretežno v živinorejo (preglednica 2).

Bolj problematični so kloridi, katerih vrednosti so bile ponekod visoke, vendar niso presegle mejnih vrednosti za pitno vodo po slovenskih standardih. Po mnenju Kohnove in sod. (2016, str. 112) na antropogene vplive opozarjajo koncentracije kloridov nad 20 mg/l. Višje koncentracije kloridov je bilo moč zaznati v vzorcih P1 in P9, kjer so vrednosti dosegle in verjetno tudi presegle 60 mg/l, saj gre pri tej vrednosti tudi za zgornjo mejo zaznavnosti uporabljenega testa. Takšne koncentracije so, glede na bistveno nižje vrednosti v ostalih vzorcih, najverjetneje posledica točkovnega onesnaževanja, ki bi lahko v vzorcu P9 izviralo iz bližnje industrijske cone, kemične čistilnice ali avtopralnice

(preglednica 2). Vzorec P1 se nahaja v neposredni bližini glavne ceste G1-4 Slovenj Gradec–Velenje (preglednica 2), zato ni izključen niti vpliv uporabe soli pri zimskem vzdrževanju cest. Do podobnih ugotovitev so denimo prišli tudi v študiji *Skrb za pitno vodo* (Jamnik in sod., 2014), kjer so na primeru Ljubljanskega polja ugotovili, da so zmerne koncentracije kloridov posledica komunalnih odpadnih vod in uporabe soli za zimsko vzdrževanje cest. Vsebnost kloridov je bila nekoliko višja tudi v okolici Slovenj Gradca (vzorec P5), za kar bi lahko bile krive komunalne odpadne vode iz tedaj še pomanjkljivo urejenega kanalizacijskega omrežja (GURS, 2021) ter intenzivno kmetijstvo s poudarkom na hmeljarstvu (Gale in sod., 1999) na ožjem vplivnem območju ali prav tako uporaba soli za zimsko vzdrževanje cest.

Vsebnosti fosfatov v podtalnici so nizke, saj se fosfor običajno zadrži v prsti (Welch, Kingsbury, Coupe, 2010). Tudi v Mislinjski dolini v večini vzorcev, tako Mislinje kot podtalnice, fosfatov nismo zaznali v večjih količinah, čeprav potencialni viri onesnaževanja obstajajo: umetna gnojila, hlevski gnoj, detergenti ipd. Razlog za to je lahko tudi razmeroma majhna občutljivost uporabljenega testa z mejo zaznavnosti 0,1 mg/l. Edini vzorec, kjer smo fosfate zaznali (0,1 mg/l), je bil P9. Možni razlog vidimo predvsem v lokalnih vplivih, saj v bližini obratuje avtopralnica (preglednica 2), od koder bi se lahko v podtalnico spirali detergenti.

Sulfati se v naravi pojavljajo predvsem zaradi izpiranja kamnin, zato ima na primer morska voda koncentracije sulfatov 2700 mg/l (WHO, 2004), v tekočih vodah in podtalnici pa so vrednosti običajno bistveno nižje. Kamnine v zaledju reke Mislinje niso vir velike količine sulfatov, prav tako antropogeni vplivi, predvsem kot posledica industrije, niso v večji meri vplivali na njihovo vsebnost v vzorčni vodi. V vseh vzorcih smo namreč namerili manjše koncentracije od meje zaznavnosti uporabljenega testa (25 mg/l).

Pri biokemijski potrebi po kisiku (BPK 5) vzorci z vrednostjo med 1 in 2 mg/l nakazujejo na z organskimi snovmi neonesnaženo vodo, vzorci z vrednostjo med 3 in 5 mg/l na prisotnost organskega onesnaženja, vzorci z več kot 5 mg/l pa že na večje organsko onesnaženje (Oram, 2017). Povečane vrednosti smo zaznali predvsem pri reki Mislinji, kjer so bile vrednosti okoli 5 mg/l. Zanimivo je dejstvo, da so vrednosti BPK 5 višje tudi v nekaterih vzorcih, odvzetih v zgornjem toku Mislinje. Pri podtalnici vrednosti BPK 5 nad 5 mg/l beležimo v vzorcih P2, P5, P8 in P9. V preostalih vzorcih so vrednosti nižje, kar nakazuje na zmernejše vplive iz okolja.

pH je merilo ravnotežja med koncentracijo vodikovih in hidroksilnih ionov v vodi, nanj pa lahko vplivajo številni dejavniki (Boyd, 2015). Mejna vrednost za pitno vodo znaša 6,5 do 9,5. Vrednosti pH odvzetih vzorcev se gibljejo med 7,02 in 8,05, kar kaže na rahel alkalni značaj voda v Mislinjski dolini.

V podzemni vodi je generalno gledano manj raztopljenega kisika kot v površinskih vodnih virih, kar je posledica oksidacijskih procesov in odsotnosti vira kisika (Rose, Long, 1988). Rezultati analize vsebnosti kisika kažejo na različno prisotnost kisika v podtalnici, saj vrednosti nihajo med 2,8 in 6,1 mg/l. Razlog za večjo prisotnost kisika v nekaterih vzorcih je najverjetneje plitvost vodonosnika ter zatekanje Mislinje,

kjer so vsebnosti raztopljenega kisika nekoliko višje, v vodonosnik. Takšen je verjetno predvsem vzorec P2, ki je (za zgornji tok Mislinje) izkazoval tudi višjo vrednost BPK. Na vsebnost kisika v podtalnici potencialno vplivata tudi njena globina in stik z ozračjem. Tudi v našem primeru se je v povprečju pokazala razlika med vzorci vode iz vodnjakov in vrtin. V vzorcih iz vodnjakov je vsebnost kisika v povprečju nekoliko višja (5,1 mg/l), kar je verjetno posledica neposrednega stika podtalnice z ozračjem. Povprečna vsebnost kisika v vzorcih iz vrtin je nekoliko nižja (4,7 mg/l), kar je verjetno posledica odsotnosti neposrednega stika med podtalnico in ozračjem, saj se voda v vrtinah praviloma zajema iz nekoliko večjih globin. Kljub temu se vsebnost kisika v vzorcih iz vodnjakov in vrtin od vzorčnega mesta do vzorčnega mesta med seboj precej razlikujejo.

Izkazalo se je, da je vplive iz okolja, pogojene s pokrovnostjo in rabo tal na širšem območju vzorčnega mesta, možno povezati z vrednostmi analiziranih parametrov le v določeni meri (npr. vpliv intenzivnega hmeljarjenja in/ali odplak na povišane vrednosti nitratov v vzorcih P4 in P5). Rezultati analize vzorcev namreč ponekod nakazujejo močno odvisnost vrednosti posameznih fizikalno-kemijskih parametrov podtalnice od same mikrolokacije vzorčnega mesta ter od bolj ali manj poznanih vplivov na tej lokaciji (npr. povišane vrednosti kloridov, trdote in električne prevodnosti v vzorcih P1 in P9 zaradi nepoznanega lokalnega vira onesnaževanja ali pa zelo različna vsebnost amonija v vzorcih P4 in P5, ki sta med seboj oddaljena zgolj 180 m zračne razdalje). Slednje je med drugim verjetno tudi posledica metodoloških omejitev, vezanih na vzorčenje iz vodnjakov in zasebnih vrtin, zaradi katerih so rezultati lahko podvrženi morebitnim lokalnim vplivom in posledično le v določeni meri reprezentativno odražajo stanje na širšem območju vodonosnika (Metodologija za opredelitev ..., 2021).

Primerjava fizikalno-kemijskih lastnosti podtalnice in Mislinje je pokazala, da kljub hidrološki povezanosti obeh sistemov vrednosti posameznih parametrov pri eni in pri drugi niso nujno medsebojno primerljive. Pri podtalnici na vrednosti merjenih parametrov namreč poleg antropogenih vplivov s površja v veliki meri vplivajo tudi oddaljenost od površinskih voda in stopnja mešanja površinske vode in podtalnice, hitrost premikanja in obnavljanja podtalnice, izdatnost in globina vodonosnika ter njegova geološka sestava (Fetter, 1999). Podobnosti med sistemoma so se tako pokazale le pri trdoti in električni prevodnosti, vrednosti ostalih parametrov (temperatura, vsebnost kisika, BPK 5 ter vsebnost hranil) pa so se zaradi različne dinamike in zadrževalnih časov vode, trenutnih vremenskih vplivov in različnih samočistilnih sposobnosti precej razlikovale, zaradi česar jih med seboj niti ne moremo primerjati. Trdota vode je bila v obeh sistemih sprva nizka (do 4 °NT), nato pa se je po toku navzdol povečevala (do okoli 10 °NT). Podobno je bil tudi pri prevodnosti (če izvajamo P1 in P9) pri obeh sistemih prisoten trend naraščanja vrednosti po toku navzdol. Je pa tako za Mislinjo kot za podtalnico značilno, da se gledano v splošnem koncentracija onesnažil po toku navzdol stopnjuje, kar nakazuje na stopnjevanje pritiskov in prisotnost progresivnega onesnaževanja.

Rezultati velike večine analiz fizikalnih in kemijskih parametrov v vzorcih podtalnice (vonj, barva, nitrati, nitriti, amonij, pH, kloridi in sulfati) so pod pragom mejnih vrednosti, podanih v Pravilniku o pitni vodi (Uradni list RS, št. 19/04, 35/04, 26/06, 92/06, 25/09, 74/15 in 51/17). Ko pa obravnavamo posamezen vzorec kot celoto, kjer že zgolj neskladnost enega izmed parametrov vpliva na neskladnost celotnega vzorca, so rezultati še bistveno slabši, saj je kar pet od devetih vzorcev neustreznih oziroma pogojno ustreznih. Vzorec P2 je neustrezen zaradi rahlo rumene barve in motnosti, vzorec P7 prav tako zaradi rahlo rumene barve. Najvišje mejne vrednosti so dosegli vzorci pri nitratih. Vzorca P4 in P5, odvzeta v bližini Slovenj Gradca, dosegata mejno vrednost nitratov (50 mg/l), vzorec P5 pa še dodatno dosega mejno vrednost amonija (0,5 mg/l).

6 ZAKLJUČEK

Podtalnica je zaradi lokacije pod površjem očem skrit vodni vir. Zato je, kljub pomembnosti kot potencialni vir pitne vode, pogosto zapostavljena in slabše raziskana. Še posebej na območjih, kjer njene zaloge niso posebej izdatne in je dandanes ne uporabljajo za lokalno vodooskrbo. Takšne narave je tudi vodonosnik ob Mislinji, ki ga obravnavamo v prispevku. Gre za vodonosnik manjše izdatnosti, ki je za lokalno prebivalstvo pomemben predvsem za zalivanje, namakanje in pranje, ne pa tudi kot vir pitne vode. Zaradi visoke gladine podtalnice (preglednica 2) je ta razmeroma lahko dostopna, kar se odraža v številnih vrtinah in vodnjakih. Čeprav je visoka gladina podtalnice z vidika uporabe prednost, pa ima po drugi strani ob hkratni prepustnosti krovnih plasti za posledico, da se v podtalnico lahko izpirajo znatne količine onesnažil, ki so posledica različnih antropogenih dejavnosti.

V raziskavi smo preučevali fizikalno-kemijske lastnosti podtalnice v vodonosniku ob Mislinji, da bi ocenili njeno kakovost. Izsledki raziskave so preliminarne značaja, saj je šlo zgolj za enkratno vzorčenje v izbranih zasebnih vrtinah in vodnjakih. Poleg tega smo vzorčili na relativno majhnem številu vzorčnih mest (9) ter analizirali le najosnovnejše fizikalno-kemijske parametre (organoleptične lastnosti, temperatura, pH, vsebnost raztopljenega kisika, nitratov, nitritov, amonija, fosfatov, sulfatov, kloridov, biokemijska potreba po kisiku, električna prevodnost, analiza različnih trdot vode). Iz dobljenih rezultatov lahko torej le okvirno sklepamo na kakovost vode v vodonosniku ob Mislinji, saj ti nikakor ne morejo nadomestiti izsledkov rednega monitoringa.

Podtalnica vodonosnika ob Mislinji je bila glede na organoleptične lastnosti brez vonja ter pri večini vzorcev brez barve in brez motnosti. Izjema sta vzorca P2 in P7, kjer je bila voda motna in rahlo rumenkaste barve. Temperatura je znašala med 10,7 in 13,8 °C, pH pa je bil z vrednostmi med 7,02 in 8,05 rahlo bazičen. Vrednosti v vodi raztopljenega kisika so bile razmeroma nizke (med 2,8 in 6,1), kar je tudi sicer značilnost podzemnih voda. Na podlagi preostalih fizikalno-kemijskih analiz podtalnice v vodonosniku ob Mislinji ugotavljamo, da so med najpogostejše prisotnimi

onesnaževali nitrati, katerih vir je običajno kmetijska dejavnost. Nitrati smo v povečanih koncentracijah zaznali v večini vzorcev, najvišje vrednosti pa smo izmerili na območju intenzivnega kmetijstva v okolici Slovenj Gradca (P4 in P5; 50 mg/l). Pri dveh vzorčnih mestih smo zaznali tudi izrazito povečane vrednosti kloridov (P1 in P9; 60 mg/l), kar je verjetno posledica točkovnega onesnaženja ali soljenja cest. Glede na to, da je 60 mg/l tudi zgornja meja zaznavnosti uporabljenega testa, ni izključeno, da so vrednosti kloridov pri navedenih vzorčnih mestih realno še višje. Nekoliko povišane vrednosti kloridov so bile izmerjene tudi v okolici Slovenj Gradca (P5; 20 mg/l). Druga onesnažila so bila v povečanih koncentracijah prisotna manj pogosto in zgolj v posameznih vzorcih, zaradi česar so najverjetneje posledica lokalnih dejavnikov na ožjem vplivnem območju. Nitrite (P7; 0,01 mg/l) in fosfate (P9; 0,1 mg/l) smo tako zaznali zgolj v enem vzorcu, amonij pa v dveh (P5; 0,5 mg/l in P7; 0,25 mg/l). Sulfati so bili povsod pod mejo zaznavnosti uporabljenega testa, ki je 0,25 mg/l. Onesnaženje z organsko snovjo je najizrazitejše v spodnjem delu doline, kjer vrednost BPK 5 na merilnem mestu P8 doseže maksimalno vrednost 9,81 mg/l. Gledano v splošnem je podtalnica v vodonosniku ob Mislinji po toku navzdol postopno vse bolj onesnažena. Slednje se kaže v upadanju vsebnosti raztopljenega kisika in povečevanju biokemijske potrebe po kisiku in povečevanju vsebnosti nitratov. Po toku navzdol sta naraščali tudi trdota in električna prevodnost.

Na območju vodonosnika ob Mislinji je z vidika vpliva na kakovost podtalnice pomembno predvsem kmetijstvo, ki je prisotno na celotnem območju doline, še posebej zgoščeno pa na območju intenzivnega hmeljarstva pri naselju Šmartno pri Slovenj Gradcu. Možen vir onesnažil je tudi še ne povsem izgrajeno kanalizacijsko omrežje, saj nanj še vedno ni priključenih kar nekaj naselij ali njihovih delov (Otiški Vrh, del Šentjanža pri Dravogradu, Bukovska vas, Mislinjska Dobrava, Brda). Potencialni vpliv na slabšo kakovost podtalnice v Mislinjski dolini predstavljata še industrija (predvsem severno od Slovenj Gradca) ter promet (preko doline poteka glavna cesta, z izgradnjo tretje razvojne osi pa je pričakovati še večje prometne pritiske).

Vodonosnik ob Mislinji je, sodeč po razpoložljivih podatkih o kakovosti in zaglogah podtalnice, razmeroma slabo poznan in raziskan. Vseeno pa bi ob ustreznih zaščitni verjetno lahko predstavljal vsaj potencialni rezervni vir pitne vode za širše območje Mislinjske doline. Po drugi strani so naše analize pokazale, da je glede na Pravilnik o pitni vodi (Uradni list RS, št. 19/04, 35/04, 26/06, 92/06, 25/09, 74/15 in 51/17) kar pet od devetih vzorcev neustreznih oziroma zgolj pogojno ustreznih, pri čemer je treba poudariti, da smo analizirali zelo omejeno število parametrov. Povsem verjetno je, da bi podrobnejša analiza vseh parametrov iz omenjenega pravilnika v vzorcih razkrila še več neskladnosti in bi jih bilo neustreznih še več. Rezultati analize tako nakazujejo na zaskrbljujoče dejstvo, da je podtalnica v vodonosniku ob Mislinji trenutno preveč onesnažena, da bi nanjo lahko računali kot na možni rezervni vodni vir za vodooskrbo. Slednje pa je problematično, saj gre za strateški naravni vir, ki bi ga bilo v duhu trajnostnega razvoja treba obvarovati in ohraniti za prihodnje

generacije. Poleg tega je podtalnica vodonosnika ob Mislinji nerazdružljivo povezana tudi s površinsko tekočo Mislinjo, s katero si vodo, vključno z vsemi prisotnimi onesnažili, medsebojno izmenjujeta.

K večjemu zavedanju o onesnaženosti podtalnice v vodonosniku ob Mislinji ter k izboljšanju njene kakovosti bi lahko pripomogla vzpostavitev rednega državnega monitoringa na tem območju. Ta bi povečal zanimanje za to problematiko ter zavedanje prebivalcev in predvsem lokalnih oblasti, ki bi lahko z določenimi ukrepi in spodbudami vplivale na izboljšanje trenutnega stanja. Z rednim monitoringom bi omogočali spremljanje napredka ali poslabšanja stanja podtalnice. Po drugi strani pa je primerljivih medzrnskih vodonosnikov manjšega obsega in izdatnosti, kot je vodonosnik ob Mislinji, v Sloveniji še veliko. Vzpostavitev rednega ali vsaj občasnega monitoringa kakovosti podtalnice v vodonosniku ob Mislinji, ki bi bila med drugim povezana tudi s precejšnjimi investicijami in obratovalnimi stroški, bi tako terjala strateško odločitev na državni ravni in s tem sistemsko spremembo, s katero bi v monitoring vključili tudi nekatere manj izdatne, a zato nič manj pomembne vodonosnike.

Zahvala

Avtorja prispevka se zahvaljujeva Javni agenciji za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije za delno sofinanciranje študije iz državnega proračuna v okviru raziskovalnih programov Geoinformacijska infrastruktura in trajnostni prostorski razvoj Slovenije (P2-0227) in Trajnostni regionalni razvoj Slovenije (P2-0229).

Literatura in viri

- Ambrožič, Š., Cvitanich, I., Dobnikar Tehovnik, M., Gacin, M., Grbovič, J., Jesenovec, B., Kozjak Legiša, Š., Krajnc, M., Mihorko, P., Poje, M., Remec Rekar, Š., Rotar, B., Sodja, E., Krsnik, P., 2008. Kakovost voda v Sloveniji. Ljubljana: ARSO. URL: <https://www.arso.gov.si/vode/poro%C4%8Dila%20in%20publikacije/kakovost%20voda/Kakovost%20voda-SLO.pdf> (citirano 15. 6. 2020).
- Andjelov, M., Frantar, P., Pavlič, U., Rman, N., Souvent, P., 2021. Količinsko stanje podzemnih voda v Sloveniji. Ljubljana: ARSO. URL: https://meteo.arso.gov.si/uploads/probase/www/hidro/watercycle/text/sl/publications/monographs/Kolicinsko_stanje_podzemnih_voda_v_Sloveniji_OSNOVE_ZA_NUV_2022_2027.pdf (citirano 15. 6. 2020).
- ARSO [Agencija Republike Slovenije za okolje], 2006. Hidrogeološka karta (IAH) merila 1 : 250.000.
- ARSO [Agencija Republike Slovenije za okolje], 2016. Vodna dovoljenja. URL: http://gis.arso.gov.si/atlasokolja/profile.aspx?id=Atlas_Okolja_AXL@Arso (citirano 15. 4. 2017).
- ARSO [Agencija Republike Slovenije za okolje], 2017. Ocena kemijskega stanja vodotokov za obdobje 2009–2013. URL: <https://www.gov.si/assets/>

- organi-v-sestavi/ARSO/Vode/Stanje-voda/Ocena-kemijskega-stanja-vodotokov-za-Nacrt-upravljanja-2015-2021.pdf (citirano 11. 8. 2021).
- ARSO [Agencija Republike Slovenije za okolje], 2020. Ocena kemijskega stanja vodotokov za leto 2020. URL: <https://www.gov.si/assets/organi-v-sestavi/ARSO/Vode/Stanje-voda/Ocena-kemijskega-stanja-vodotokov-v-letu-2020.pdf> (citirano 11. 8. 2021).
- ARSO [Agencija Republike Slovenije za okolje], 2021a. Atlas okolja. Povprečna letna višina korigiranih padavin 1981–2010. URL: <http://gis.arso.gov.si/atlasokolja/> (citirano 11. 8. 2021).
- ARSO, 2021b. Mesečne statistike. Arhivski hidrološki podatki. URL: http://www.arso.gov.si/vode/podatki/arhiv/hidroloski_arhiv.html (citirano 11. 8. 2021).
- Boyd, C. E., 2015. Water quality – an introduction. 2nd ed. Cham, Heidelberg, New York, Dordrecht, London: Springer International Publishing Switzerland.
- Brnót, M., 2000. Odvisnost kakovosti podtalnice od njene dinamične izdatnosti in globine. *Geografski vestnik*, 72, 2, str. 23–31.
- Brunke, M., Gonser, T., 1997. The ecological significance of exchange processes between rivers and groundwater. *Freshwater Biology*, 37, str. 1–33. DOI: 10.1046/j.1365-2427.1997.00143.x.
- Busico, G., Cuoco, E., Sirna, M., Mastrocicco, M., Tedesco, D., 2017. Aquifer vulnerability and potential risk assessment: application to an intensely cultivated and densely populated area in Southern Italy. *Arabian Journal of Geosciences*, 10, 222. DOI:10.1007/s12517-017-2996-y.
- DRSV [Direkcija Republike Slovenije za vode], 2021. Atlas voda. Monitoring kakovosti podzemnih voda. URL: <https://gisportal.gov.si/portal/apps/webappviewer/index.html?id=11785b60acd4f599157f33aac8556a6> (citirano 11. 8. 2021).
- Djura Jelenko, S., 2010. Arheološka podoba Mislinje z okolico. V: Potočnik, J. (ur.). Občina Mislinja: zbornik. Mislinja: Občina Mislinja, str. 65–75. URL: <https://www.mislinja.si/files/other/news/90/24870Arheolo%C5%A1ka%20podoba%20Mislinje%20z%20okolico.pdf> (citirano 11. 8. 2021).
- Fetter, C. W., 1999. Contaminant hydrogeology. 2nd ed. New Jersey: Prentice Hall.
- Frantar, P., 2021. Monitoring kakovosti podzemne vode (osebni vir, 10. 3. 2021). Ljubljana.
- Frantar, P., Hrvatín, M., 2005. Pretočni režimi v Sloveniji med letoma 1971 in 2000. *Geografski vestnik*, 77, 2, str. 115–127.
- Gacin, M., Mihorko, P., 2012. Ocena kemijskega stanja podzemnih voda v Sloveniji v letu 2011. Ljubljana: ARSO. URL: http://www.arso.gov.si/vode/podzemne%20vode/publikacije%20in%20poro%C4%8Dila/Poro%C4%8Dilo_kemija_podzemne_10_10_2011.pdf (citirano 16. 3. 2017).
- Gacin, M., Mihorko, P., Krajnc, M., 2009. Poročilo o kakovosti podzemne vode v Sloveniji v letih 2007 in 2008. Ljubljana, Ministrstvo za okolje in prostor, Agencija Republike Slovenije za okolje, 234 str. URL: <http://www.arso.gov.si/vode/>

- podzemne%20vode/publikacije%20in%20poro%C4%8Dila/podzemne0708.html (citirano 16. 3. 2017).
- Gale, T., Pintar, M., Mikoš, M., 1999. Vpliv spiranja nitratov s hmeljišč na kvaliteto podtalnice. V: 10. Mišičev vodarski dan. Maribor: Vodnogospodarski biro, str. 25–31.
- Gams, I., 1976. Hidrogeografski oris porečja Mislinje s posebnim ozirom na poplave. Geografski zbornik, 15, str. 161–210.
- GURS [Geodetska uprava Republike Slovenije], 2008. Državna pregledna karta merila 1 : 250.000. URL: <http://egp.gu.gov.si/egp/> (citirano 10. 3. 2021).
- GURS [Geodetska uprava Republike Slovenije], 2017. Digitalni model nadmorskih višin - DMV 5. URL: <http://egp.gu.gov.si/egp/> (citirano 10. 3. 2021).
- GURS [Geodetska uprava Republike Slovenije], 2021. Zbirni kataster gospodarske javne infrastrukture. URL: <https://egp.gu.gov.si/egp/> (21. 7. 2021).
- Jamnik, B., Janža, M., Smrekar, A., Breg Valjavec, M., Cerar, S., Cosma, C., Hribernik, K., Krivc, M., Meglič, P., Pestotnik, S., Piepenbrink, M., Podboj, M., Polajnar Horvat, K., Prestor, J., Schüth, C., Šinigoj, J., Šram, D., Urbanc, J., Žibret, G., 2014. Skrb za pitno vodo. Geografija Slovenije 31. Ljubljana: Založba ZRC.
- Kemijsko stanje podzemne vode v Sloveniji – Kratko poročilo za leto 2020, 2021, ARSO. URL: https://www.arso.gov.si/vode/podzemne%20vode/publikacije%20in%20poro%C4%8Dila/Podzemne_vode_2020.pdf (citirano 21. 7. 2021).
- KIS [Kmetijski inštitut Slovenije], 2021. Portal e-Tla. URL: <https://www.kis.si/eTLA/> (citirano 11. 8. 2021).
- Kohn, J., Iwanyshyn, M., Miedema L., Olson, B., Kalischuk, A., 2016. Shallow groundwater quality at a beef feedlot in southern Alberta. Canadian Biosystems Engineering, 58, str. 111–119. DOI: 10.7451/CBE.2016.58.1.11.
- Lampič, B., Rutar, N., 2019. Vrednotenje intenzivnosti okoljskih pritiskov kmetijstva na podzemno vodo v Sloveniji. Dela, 51, str. 5–26. DOI: 10.4312/dela.51.5-26.
- Metodologija za opredelitev vodnih teles podzemne vode Republike Slovenije. Geološki zavod Slovenije. URL: <http://www.istra-hidro.eu/web/images/3-metodologija.pdf> (citirano 12. 8. 2021).
- Mioč, P., 1978. Osnovna geološka karta SFRJ. Tolmač za list Slovenj Gradec. 1978. Beograd, Zvezni geološki zavod, 74 str.
- MKGP [Ministrstvo za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano], 2017. Grafični podatki RABA za celo Slovenijo. URL: <http://si/GERK/> (citirano 10. 4. 2017).
- Narsimha, A., Anitha, N., Sudarshan, V., Manjulatha, 2013. Evaluation of groundwater quality and its suitability for drinking purposes in Gunthakal Area, Ananthapur District, Andhra Pradesh, India. Advances in Applied Science Research, 4, 2, str. 70–76. URL: <http://www.imedpub.com/articles/evaluation-of-groundwater-quality-and-its-suitability-for-drinking-purposes-ingunthakal-area-ananthapur-district-andhra-pradesh-in.pdf> (citirano 30. 3. 2017).
- Nitrate and Nitrite in Drinking-water. WHO. 2011. URL: http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/chemicals/nitratenitrite2ndadd.pdf (citirano 1. 4. 2017).

- Obreza, M., 2016. Nihanje temperature podtalnice glede na temperaturo reke Mislinje (osebni vir, 22. 10. 2016). Mislinjska Dobrava.
- Oram, B., Water quality terms glossary. URL: <http://www.water-research.net/index.php/glossary> (citirano 11. 4. 2017).
- Pravilnik o določitvi vodnih teles podzemnih voda. 2018. Uradni list RS, 63/05.
- Pravilnik o pitni vodi. 2017. Uradni list RS, št. 19/04, 35/04, 26/06, 92/06, 25/09, 74/15 in 51/17.
- Rose, S., Long, A., 1988. Monitoring dissolved oxygen in ground water: Some basic considerations. *Groundwater Monitoring & Remediation*, 8,1, str. 94–97.
- Statistični urad Republike Slovenije, 2016. Portal STAGE. Gostota prebivalstva. URL: <https://gis.stat.si/> (citirano 15. 8. 2021).
- Špes, M., Cigale, D., Lampič, B., Natek, K., Plut, D., Smrekar, A., 2002. Študija ranljivosti okolja (metodologija in aplikacija). *Geographica Slovenica* 35, 1-2. Ljubljana: Založba ZRC.
- Uhan, J., Kranjc, M., 2003. Podzemne vode. V: Uhan, J., Bat, M., (ur.). *Vodno bogastvo Slovenije*. Ljubljana: Ministrstvo za okolje, prostor in energijo, Agencija Republike Slovenije za okolje, str. 55–67. URL: https://www.arso.gov.si/vode/publikacije%20in%20poro%c4%8dila/Vodno_bogastvo_5podzemne_vode.pdf (citirano 15. 8. 2021).
- Welch, H. L., Kingsbury, J. A., Coupe, R. H., 2010. Occurrence of phosphorus in groundwater and surface water of northwestern Mississippi. 2010 Mississippi Water Resources Conference, str. 142–155. URL: <http://www.wrri.msstate.edu/pdf/welch10.pdf> (citirano 11. 4. 2017).
- WHO [World Health Organization], 1996. Ammonia in Drinking-water. URL: http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/ammonia.pdf (citirano 31. 3. 2017).
- WHO [World Health Organization], 2004. Sulphate in Drinking-water. URL: http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/chemicals/sulfate.pdf (citirano 1. 4. 2017).



A TEST CASE OF ASSESSING OF GROUNDWATER QUALITY IN THE MISLINJA AQUIFER

Izvirni znanstveni članek
COBISS 1.01
DOI: 10.4312/dela.57.5-56

Abstract

The Mislinja aquifer is not included in regular national groundwater quality monitoring due to its low yield and the fact that it is not used for water supply. For this paper, nine sampling sites (private wells and boreholes) were used to analyse the basic physico-chemical parameters of the water, serving as a basis for a preliminary assessment of water quality. We found that the groundwater reflects anthropogenic influences, which are more pronounced in the vicinity of areas of concentrated agricultural activity and in the vicinity of large settlements. Most samples show elevated levels of nitrates and chlorides, while some samples also show elevated levels of other measured pollutants. According to the current Rules on drinking water, five out of nine samples are unsuitable or only conditionally suitable, which means that the groundwater in the Mislinja aquifer may already be too polluted to be considered as a possible backup source for water supply.

Keywords: groundwater, intergranular aquifer, Mislinja Valley, Mislinja, groundwater quality, physico-chemical water analysis

*University of Ljubljana, Faculty of Civil and Geodetic Engineering, Chair of Spatial Planning, Department of Geodetic Engineering, Jamova 2, SI-1000 Ljubljana, Slovenia
**University of Ljubljana, Faculty of Arts, Department of Geography, Aškerčeva 2, SI-1000 Ljubljana, Slovenia
e-mail: jana.breznik@fgg.uni-lj.si, tajan.trobec@ff.uni-lj.si
ORCID: 0000-0003-3482-4588 (J. Breznik), 0000-0002-8784-4366 (T. Trobec)

1 INTRODUCTION

Groundwater is an important source of fresh water that can be used for drinking, irrigation, industrial production and other uses. Surface water and groundwater are interconnected. The latter is the primary source for recharging springs and watercourses and for maintaining the flow in watercourses in times when there is no rainfall, making it an ecologically very important link in the water cycle. Conversely, aside from direct precipitation above the aquifer, groundwater is also recharged by surface water during high water periods (Brunke, Gonser 1997).

Slovenia is a country rich in groundwater. According to older estimates, its dynamic reserves amount to 50.4 m³/s, or about 10% of the total internal runoff (Uhan, Kranjc, 2003). According to more recent estimates, utilising an amended methodology for calculating renewable reserves, the amount of groundwater in Slovenia is in fact significantly higher. In the 30-year period 1991–2020, the renewable groundwater reserves amounted to 187.55 m³/s, or 37% of the total internal runoff (Andjelov et al., 2021).

Groundwater comes in many forms. In the gravel-sand deposits alongside Slovenia's major rivers (Sava, Drava, Mura, Soča, Savinja, etc.), groundwater is found in the form of aquifers with intergranular porosity (Uhan, Kranjc, 2003). Due to natural features such as lowland location, flat topography, available water resources and good quality soils, groundwater areas are densely populated and therefore subject to many environmental pressures (Ambrožič et al., 2008).

Pollutants mostly enter an aquifer from the surface through point, linear or diffuse sources (Jamnik et al., 2014). Contaminated groundwater poses a serious threat to health when used for water supply, and also has a negative impact on the ecosystem and water resources that are recharged from the aquifer (Fetter, 1999). The most contaminated (mainly with nitrates) aquifers in Slovenia include certain intergranular porosity areas in the country's north-eastern part (Lower Savinja Valley, Drava and Ptuj fields as well as aquifers along the Mura River) (Gacin, Mihorko, 2012; Kemijško stanje ..., 2021), as a result of intensive agriculture (Lampič, Rutar, 2019), shallow groundwaters and high environmental sensitivity in these areas (Špes et al., 2002).

Looking at the network of groundwater quality monitoring stations (DRSV, 2021) it is evident that groundwater analysis in Slovenia is mainly carried out in areas of extensive lowland aquifers with intergranular porosity (Ljubljana Field, Kranj-Sora Field, Lower Savinja Valley, Krško-Brežice Field etc.). In these areas groundwater is also used more extensively for water supply and other purposes, while at the same time, faced with multiple pressures it is also more vulnerable to pollution. However, this type of monitoring neglects smaller aquifers, such as the Mislinja aquifer, which is the focus of our study.

Due to the small catchment area of the main watercourse, the Mislinja River, and the relatively shallow deposits of gravel and sandy clay (Mioč, 1978), the Mislinja Valley does not have significant groundwater reserves. Furthermore, groundwater in

the area is not used for the water supply of lowland settlements, which are generally supplied with water from sources in the surrounding uplands (GURS, 2021). Rather it is used exclusively for watering, irrigation and washing. As a result, no groundwater analyses are carried out in the Mislinja Valley, and we therefore do not know what the actual quantity and quality of groundwater is. However, given the area has relatively dense population, intensive agriculture, centred particularly around hop-growing, as well as numerous industrial plants, it can be concluded that the pressures on groundwater in the Mislinja aquifer are relatively high and could be contributing to the deterioration of water quality.

According to the division of Slovenia into groundwater bodies (Pravilnik o določitvi..., 2018), the Mislinja Valley is included in the Eastern Alps groundwater body (*vodno telo podzemne vode Vzhodne Alpe*), which according to existing analyses is in good chemical status (Kemijsko stanje ..., 2021). It should be stressed that this water body is an extremely large and heterogeneous unit, as it includes, in addition to the Mislinja Valley, the whole of the Pohorje, Kozjak and Strojna mountains as well as part of the Vitanjske Karavanke Mountains, and is therefore completely inappropriate for assessing the quality of groundwater in the Mislinja aquifer. In addition, the chemical status of this water body (with the exception of the Zgornja Vižinga monitoring station at Radelje Field on the Drava River) is assessed on the basis of the analysis of water from water sources in the surrounding uplands (Mislinja MZ-4/95 in the Vitanjske Karavanke Mountains, Mrzli studenec on Pohorje, Ojstrica near Dravograd on Kozjak). Given the concentration of anthropogenic pressures predominantly in the lower part of the area, it is not relevant for the valley floor, where the Mislinja aquifer is located. To the best of our knowledge, as well as according to the assurances of the representatives of the Slovenian Environment Agency (Frantar, 2021), no other, more detailed studies or measurements of groundwater quality in the Mislinja Valley have been conducted.

Given that we estimate that the pressures on groundwater in the Mislinja Valley are relatively high and that no official data on groundwater quality exist, the main objective of our study was to determine how influences from the environment are reflected in the groundwater quality. To this end, groundwater was sampled from existing wells and private boreholes at nine locations in the selected area and analysed for specified basic physico-chemical water parameters. In addition to groundwater, water from the Mislinja River was analysed at three locations, which allowed us to compare surface water and groundwater in the area.

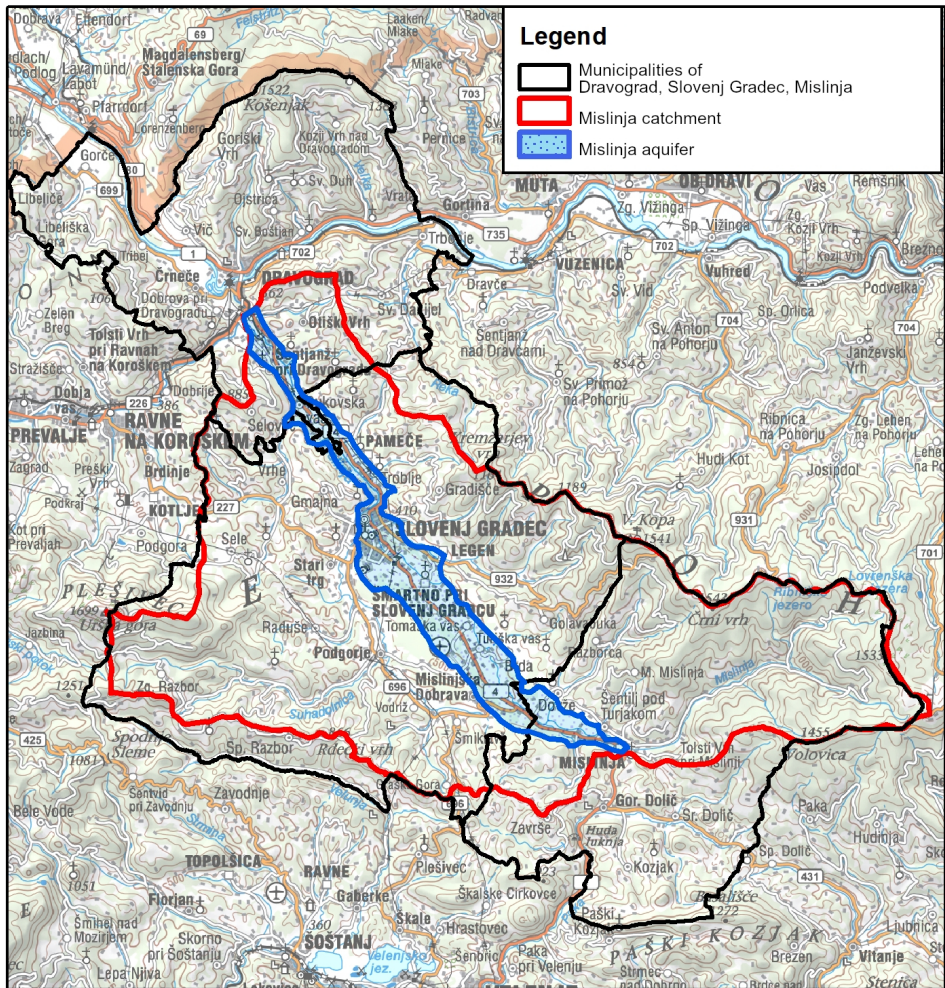
2 GEOGRAPHICAL OVERVIEW OF THE MISLINJA VALLEY

The study area encompasses the flat bottom of the Mislinja Valley, beneath which a minor aquifer has formed in Quaternary sediments along the Mislinja River (Mioč, 1978) (Figure 1).

The Mislinja Valley lies between the Pohorje Mountains and the eastern slopes of the Karavanke Mountains, and is classified as a pre-Alpine region. It was formed along the Labot fault zone, which runs in a Dinaric direction (Mioč, 1978). Administratively, it falls within the Carinthian Statistical Region and is divided between the municipalities of Mislinja, Slovenj Gradec and Dravograd. It is 22 km long and up to 5 km wide at its widest part, at the confluence of the Mislinja and the Suhodolnica rivers. The Mislinja aquifer lies along the middle and lower reaches of the river, between the settlements of Mislinja and Otiški Vrh, where the Mislinja River flows into the Meža River. It is part of the Eastern Alps groundwater body (*vodno telo podzemne vode Vzhodne Alpe*), more specifically part of the Quaternary, intergranular aquifer along the Drava, Mislinja and Meža rivers, which according to the hydrogeological classification is a local, unconfined, abundant or extensive, although low to moderate yield aquifer (Gacin, Mihorko, Krajnc, 2009). The area above the Mislinja aquifer receives on average around 1200–1300 mm of precipitation per year (ARSO, 2021a). It is dominated by distric and eutric brown soils (KIS, 2021). The central watercourse of the Mislinja Valley is the Mislinja torrential river (Gams, 1976), which has its source in the Pohorje region and has an alpine rain-snow discharge regime (Frantar, Hrvatín, 2005). Its average discharge in the period 1981–2010 was 1.9 m³/s at Dovže and 4.6 m³/s at Otiški Vrh (ARSO, 2021b). According to measurements of national water quality monitoring, it is in a good chemical status (ARSO, 2017; 2020).

The floor of the Mislinja Valley has been inhabited since the Neolithic period, due to its favourable natural conditions (flat topography, moderate climate, access to water resources, good quality soils) (Djura Jelenko, 2010). Small to medium-sized rural settlements predominate. The widest part of the valley is the Slovenj Gradec basin (at the confluence of the Suhadolnica and Mislinja rivers), which according to the Statistical Office of the Republic of Slovenia (Statistični urad ..., 2016) is one of the more densely populated areas in Slovenia, with a population of more than 250 inhabitants/km² (the town of Slovenj Gradec had a population density of 1317 inhabitants/km² in 2016). Natural and socio-geographical characteristics are also reflected in land use. The area of the Mislinja aquifer is mainly grassland (35% of the aquifer area), which along with arable land (15%) and hop fields (1.7%) are characterised by intensive agricultural use. Although there are relatively few hop fields, they are mainly concentrated in the vicinity of Šmartno pri Slovenj Gradcu. The proportion of built-up areas is also quite high, accounting for almost a fifth of the area (19%). Only the marginal areas of the aquifer are predominately covered with forest (21% of the area) (Figure 2).

Figure 1: Study area of the Mislinja aquifer.

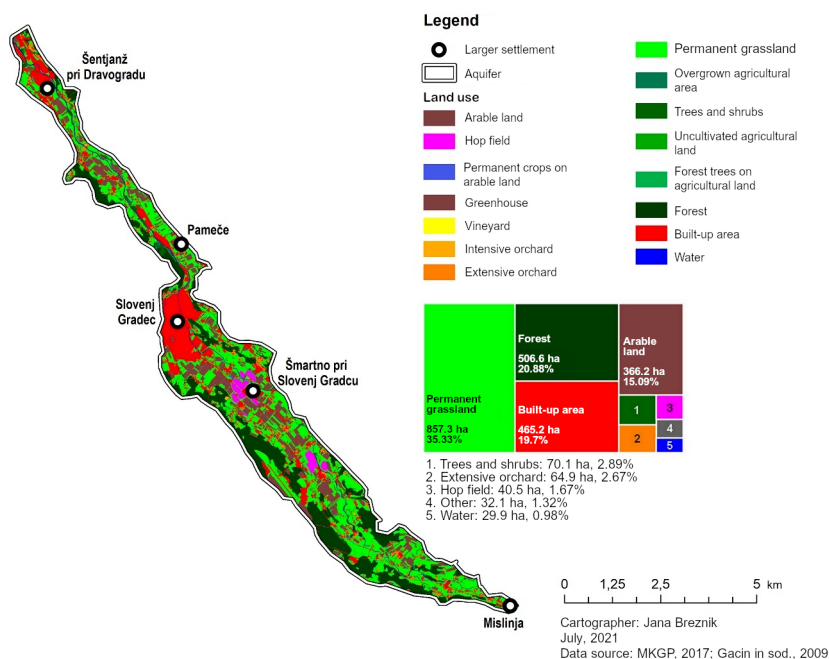


Cartographer: Jana Breznik
June, 2017

Data source: GURS, 2017; ARSO, 2017; ARSO 2006

0 2 4 8 km

Figure 2: Land use in the aquifer area.



3 METHODS

Based on water permit data (ARSO, 2016) and by examining the spatial extent of the aquifer in relation to the lithological characteristics of the area (Gacin, Mihorko, Krajnc, 2009; Mioč, 1978), we selected the most representative and appropriately spatially distributed locations for groundwater sampling from private boreholes and wells. Groundwater sampling at private boreholes and wells, in accordance with methodological guidelines and cognizant of objective limitations, is one of the established approaches for preliminary assessment of groundwater quality in areas where official monitoring of water quality is not carried out (Metodologija za opredelitev..., 2021). The locations were defined from the headwaters of the Mislinja River at Mislinjski jarek through to the valley, i.e. at the settlement of Mislinja, and to its confluence with the Meža River at Otiški Vrh (Figure 1). Based on data from water permit records, and in accordance with recommendations for sampling of wells and boreholes (Metodologija za opredelitev..., 2021), we tried to select locations where water is used as regularly as possible, e.g. where there are water pumps, or where water is frequently used for watering, washing and other uses.

The one-off sampling took place on 22 and 23 October 2016. Samples were collected at 12 sites (Figure 3). Groundwater was collected at nine sites, while at the remaining

three sites the Mislinja River was sampled. At the private boreholes equipped with a pump, before collecting the samples, we let the water run for about five minutes. In this way, the possible influence of stagnation in the system on the measured physico-chemical properties of the water was eliminated. To enable further field and laboratory analyses, two litre samples of water were taken, as well as a special sample for the determination of the biochemical oxygen demand (BOD 5). At the sites, we measured water temperature, pH, conductivity and oxygen content using an electric sensor. Other characteristics and circumstances relating either to the sample taken or to the site and influences in the immediate vicinity (organoleptic characteristics of the water, land cover and land use, distance from the surface to the water table and depth at which the sample was taken) were also recorded on the inventory sheet. The owners of the boreholes or wells also helped us to obtain some technical information. Locations of sampling sites are presented in Tables 1 (collection sites on the Mislinja watercourse) and 2 (collections sites of groundwater). Examples of wells are shown in Figure 4.

Figure 3: Selected locations for sampling of groundwater from the Mislinja aquifer and water from the Mislinja River.

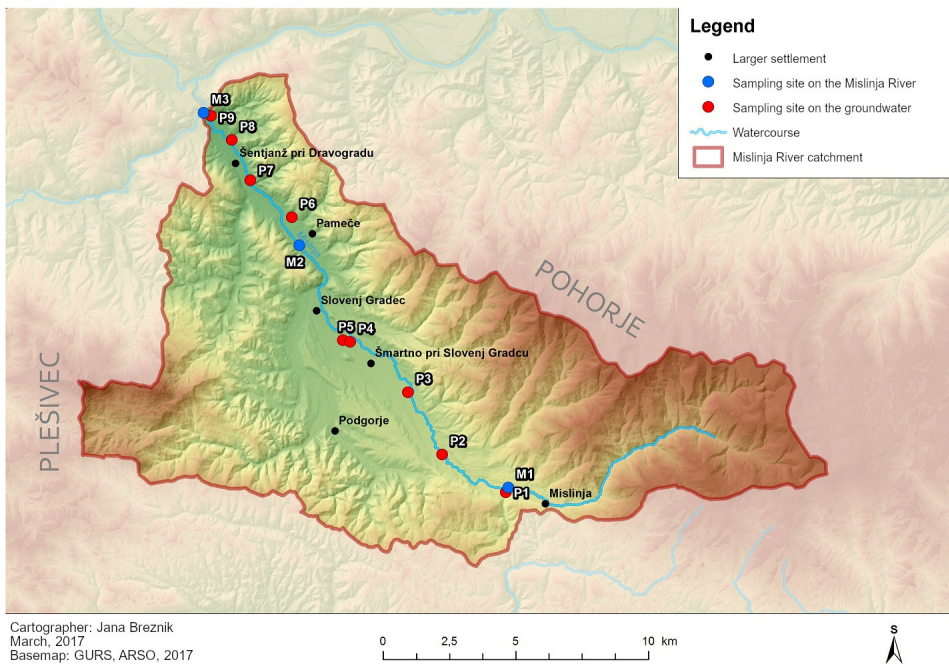


Table 1: Presentation of the sampling sites on the Mislinja watercourse.

Site	Description of sampling site	Predominant actual land use within 500 m of the sampling site
M1	- the beginning of the middle course (at the start of the valley) - smaller settlements	- permanent grassland – 58% - forest – 13% - arable land or gardens – 11% - built-up area and related surface – 11% - other land uses – 7%
M2	next to the Pameče industrial zone	- permanent grassland – 37% - forest – 26% - built-up area and related surface – 20% - other land uses – 17%
M3	- before the confluence with the Meža river – in the immediate vicinity of the Otiški Vrh industrial zone and a larger settlement. - the impact of agriculture is also significant	- built-up area and related surface – 40% - permanent grassland – 15% - arable land or gardens – 13% - forest – 13% - other land uses – 19%

Table 2: Presentation of groundwater sampling sites.

Site	Type	Depth		Description of sampling site	Actual land use within 500 m of the sampling site	Sampling site is connected to the public wastewater network (situation at the time of sampling)
		Wells / bore-holes	from the surface to the ground-water level			
P1	well	2,5 m	*	- Straže hamlet (settlement Mislinja) - well older and less frequently used - directly next to the main road (Slovenj Gradec - Velenje)	- permanent grassland – 47% - forest – 27% - built-up area and related surface – 11% - other land uses – %	no (has possibility to be connected, within agglomeration)

Site	Type	Depth		Description of sampling site	Actual land use within 500 m of the sampling site	Sampling site is connected to the public wastewater network (situation at the time of sampling)
		Wells / bore-holes	from the surface to the ground-water level			
P2	well	3,5 m	1.83 m at the time of sampling	• a well used for a ground-water heat pump • regularly maintained and used • location directly next to Mislinja watercourse – possible greater impact of surface flow on groundwater (owner observes significant temperature fluctuations in groundwater depending on the season) • predominantly agricultural area	• permanent grassland – 51,5%, • forest – 25% • built-up area and related surface – 8% • other land uses – 15,5%	no (is not part of agglomeration)
P3	bore-hole	*	*	• newer borehole (2 years old), though relatively rarely used – mainly for irrigation and livestock watering – active farm oriented towards livestock farming – potential for impact of the owner's activities on groundwater quality • hop fields in the immediate surroundings	• permanent grassland – 47% • arable land and gardens – 25% • built-up area and related surface – 10% • Hop fields – 7% • Other land uses – 11%	yes
P4	well	*	*	• in the vicinity of Slovenj Gradec • the owner is a truck carrier – water is used for washing vehicles – potential for impact of the owner's activities on groundwater quality • in close proximity to one of the largest hop-growing families • several farms in the surrounding area • well about 20 years old	• permanent grassland – 43% • arable land and gardens – 33% • built-up area and related surface – 12% • hop fields – 5% • other land uses – 7%	no (connected in 2019)

Site	Type	Depth		Description of sampling site	Actual land use within 500 m of the sampling site	Sampling site is connected to the public wastewater network (situation at the time of sampling)
		Wells / bore-holes	from the surface to the groundwater level			
P5	well	5 m	generally about 4 m	• in the vicinity of Slovenj Gradec • a well about 50 years old • in the immediate vicinity of a main road (Slovenj Gradec – Velenje)	• permanent grassland – 40% • arable land and gardens – 36% • built-up area and related surface – 19% • other land uses – 5%	no (connected in 2020)
P6	bore-hole	6,8 m	*	• Pameče settlement • the owner is a bus operator – water is used for cleaning vehicles and for a groundwater heat pump – potential for impact of the owner's activities on groundwater quality • downslope location – flows from slopes may have an impact on groundwater quality • predominantly agricultural area	• permanent grassland – 44% • arable land and gardens – 20% • forest – 10% • built-up area and related surface – 10% • other land uses – 16%	no (is not part of agglomeration)
P7	well	3,5 m	2.12 m at the time of sampling	• Otiški Vrh settlement (southern part) • owner is engaged in agriculture (livestock farming) • predominantly agricultural area • well, about 20 years old, regularly used	• permanent grassland – 41,5% • forest – 21% • land and gardens – 12% • built-up area and related surface – 11% • other land uses – 14,5%	no (is not part of agglomeration)
P8	bore-hole	6 m		• Otiški Vrh settlement • in the immediate vicinity of the Mislinja watercourse (30 m) • borehole about 20 years old – regularly used • downslope location – flows from slopes may have an impact on groundwater quality	• built-up area and related surface – 40% • forest – 24% • permanent grassland – 24% • other land uses – 12%	no (within agglomeration, though wastewater infrastructure is yet to be built)

Site	Type	Depth		Description of sampling site	Actual land use within 500 m of the sampling site	Sampling site is connected to the public wastewater network (situation at the time of sampling)
		Wells / bore-holes	from the surface to the ground-water level			
P9	well	4,5 m	3.16 m at the time of sampling	- Otiški Vrh settlement (north) - water is used regularly for a heat pump - in the immediate vicinity of the Otiški Vrh industrial zone – in the hinterland of the well - in close proximity to the main road Dravograd – Slovenj Gradec - in close proximity to a dry-cleaner and truck carrier - heavily built-up area	- built-up area and related surface – 9% - permanent grassland – 19% - forest – 18% - trees and shrubland – 10,5% - arable land and gardens – 5% - other land uses – 8,5%	no (within agglomeration, though wastewater infrastructure is yet to be built)

Note: * data not available (depth from surface to groundwater level could not be measured/ owner has no information on depth of borehole/well).

Figure 4: Example of a borehole (a – sampling site – borehole P6) and a well (b – sampling site – well P9) at selected sites.



In the laboratory we analysed concentrations of nitrate, nitrite, ammonium, chloride, sulphate and phosphate. We also determined the biochemical oxygen demand and water hardness. Visicolor eco field testers were used for analysis of nitrate, nitrite, ammonium, chloride, sulphate and phosphate. These are affordable and easy to use, with visual readings of the concentration values for each parameter. Hardness determination was performed using the standard titration method with EDTA (Boyd, 2015). We determined carbonate, total, calcium and magnesium hardness. We also determined the biochemical oxygen demand value in the laboratory using a standard method (Boyd, 2015).

The data were compiled in a spreadsheet and graphs and maps were drawn to allow us to spatially examine the water quality of the samples. As the Mislinja aquifer is also a potential source of drinking water, the results of the measured physico-chemical parameters were compared with selected limit values given in the Drinking Water Regulations (Pravilnik o pitni vodi, 2017). The values are shown in Table 3.

Table 3: Selected parameters and limit values according to the Drinking Water Regulation (Pravilnik o pitni vodi, 2017).

Parameter	Limit value for parameter/specification	Unit
Ammonium	0.50	mg/l
Nitrate	50	mg/l
Nitrite	0.50	mg/l
Chloride	250	mg/l
Sulphate	250	mg/l
Electrical conductivity	2500	µS/cm at 20°C
Hydrogen ion concentration (pH value)	between 6.5 in 9.5	pH unit
Colour	acceptable to users and without unusual variations	
Turbidity	acceptable to users and without unusual variations	
Scent	acceptable to users and without unusual variations	

4 RESULTS OF MEASUREMENTS AND ANALYSES

The values of the measured physico-chemical parameters are presented in more detail below, separately for the groundwater and Mislinja watercourse samples. In Table 4 and Figure 5, the Mislinja watercourse samples are shown with a darker background and the groundwater samples with a lighter background.

4.1 Results of measurements on samples taken from the Mislinja watercourse

The following results were obtained for the individual parameters on the Mislinja River samples:

- Scent, colour and turbidity are the most obvious and easily observable parameters that can be used to infer water quality. They are of paramount importance, as their inadequacy is often the trigger for further water quality analyses. In the Mislinja watercourse area, we did not detect any specificities in any of these parameters (Table 4).

- The lowest temperature was in the upper part of the Mislinja Valley (6.5 °C). Downstream, due to the warmer atmosphere at the time of sampling, the temperature rose to 10.7 °C (in the lower reaches) (Table 4, Figure 5a).
- There was a slight increase in pH moving downstream along the Mislinja River, but the differences between samples are small (Table 4, Figure 5a).
- The dissolved oxygen content of the water in the Mislinja River was highest upstream (8.6 mg/l), although moving downstream this value decreases only slightly (Table 4, Figure 5b).
- The results of the biochemical oxygen demand analysis show stable values along the Mislinja River (variation between 4.6 and 5.6 mg/l) (Table 4, Figure 5b).
- Nitrate was present in all the samples studied. There is a trend of increasing nitrate content downstream (from 3 mg/l in the upper reaches and 10 mg/l in the lower reaches of the Mislinja) (Table 4, Figure 5c).
- Nitrite levels ranged between 0 and 0.03 mg/l. Their content increased progressively downstream (Table 4, Figure 5d).
- Ammonium levels were below the detection limit (Table 4, Figure 5d).
- In the Mislinja River, chloride levels did not exceed 7 mg/l, but increase slightly downstream (Table 4, Figure 5c).
- Phosphate and sulphate levels in all samples were below the detection limit of 0.1 mg/l for phosphate and 0.25 mg/l for sulphate (Table 4, Figure 5d).
- In terms of water hardness, there is a clear trend of increasing values downstream. There is a transition from very soft to soft and moderately hard water (2.8 °dH to 8.9 °dH) (Table 4, Figure 5e).
- Electrical conductivity depends on the presence of electrolytes in the water. Since calcium and magnesium carbonate, which define carbonate hardness as a hydrogen carbonate, are the most prevalent of these, hardness and conductivity are quite correlated, with larger differences between values indicating the presence of the remaining electrolytes (nitrates, nitrites, phosphates, ammonium, sulphates, etc.). The electrical conductivity also shows a positive trend downstream (between 114.8 µS/cm and 314 µS/cm) (Table 4, Figure 5e).

4.2 Results of measurements on groundwater samples from the Mislinja aquifer

When analysing groundwater samples from the Mislinja aquifer, the following results were obtained for individual parameters:

- Among the odour, colour and turbidity parameters, we detected specificities in the colour and turbidity parameters for samples P2 and P7. The samples were yellow and cloudy (Table 4), which may indicate contamination and various impurities.
- The groundwater temperature ranged between 10.7 °C and 14.3 °C. Among the groundwater samples, sample P2 (10.7 °C), collected in the immediate vicinity

of the Mislinja River (distance 31 m), had the lowest water temperature. The owner reported that there is pronounced fluctuation of the groundwater temperature (Obreza, 2016). A small upward trend of the temperature downstream is evident (Table 4, Figure 5a).

- The pH of all groundwater samples ranged between 7 and 8. There is a slight downward trend in pH downstream, but it is not statistically significant. Samples P2, P3 and P8 stand out as having a higher pH (Table 4, Figure 5a).
- The dissolved oxygen content varied considerably between the samples (from 2.8 mg/l to 6.1 mg/l). There was also a decreasing trend of dissolved oxygen content in the water downstream (Table 4, Figure 5b).
- The results of the biochemical oxygen demand analysis show that the values vary significantly from site to site (from 2.26 to 9.81 mg/l). There are pronounced peaks in samples P5 and P8. There was also a trend of increasing biochemical oxygen demand downstream, indicating higher organic contamination of the groundwater along the lower reaches of the Mislinja River (Table 4, Figure 5b).
- Nitrates were present in all the samples studied. Increased levels were observed in samples P4 and P5, which reached 50 mg/l, which is also the limit value according to the Rules on drinking water (Pravilnik o pitni vodi, 2017). These samples were collected in the immediate vicinity of Slovenj Gradec. Moving downstream there is an upward trend in nitrate content. The trend is not statistically significant due to the outlying values of P5 and P4 (Table 4, Figure 5c).
- Concentrations of nitrites in the groundwater samples were below the detection limit, with the exception of sample P7 (0.01 mg/l) (Table 4, Figure 5d).
- The presence of ammonium was only observed in two groundwater samples (P5 and P7). In sample P5, the value was 0.5 mg/l, thus reaching the limit value according to the Rules on drinking water (Pravilnik o pitni vodi, 2017). In the remaining samples, the ammonium content was below the limit of detection (Table 4, Figure 5d).
- Chlorides were present in all samples, with P1 having a chloride content of more than 60 mg/l (upper detection limit) and P9 having a chloride content of 60 mg/l. Chloride levels in groundwater samples did not follow a general trend, with a noticeable increase in chloride levels again in samples P4 and P5 with 12 mg/l and 20 mg/l respectively, which were collected at sampling sites located in the vicinity of Slovenj Gradec (Table 4, Figure 5c).
- Phosphate was only detected in sample P9, where it was 0.1 mg/l, which is also the lower detection limit of the test used. It is therefore quite possible that phosphates were also present in moderate amounts in other samples but were not detected by the less sensitive test (Table 4, Figure 5d).
- The sulphate content was below the detection limit of 25 mg/l in all samples (Table 4).

- For water hardness, moving downstream there was a clear trend of increasing values. There was a transition from very soft to soft and moderately hard water (between 4.8 °dH and 17.5 °dT). Due to an anomaly in the laboratory analysis (carbonate hardness was higher than total hardness), only the total hardness is shown for samples P1 and P9. We assume that these two samples have elevated levels of contaminants (most likely chlorides) that affect the result of the hardness analysis. A peculiarity can also be detected in the electrical conductivity, as both samples have a strongly increased value compared to the other samples (Table 4, Figure 5e).
- For the electrical conductivity parameter, there is a positive downstream trend. The measurements range between 177 µS/cm and 880 µS/cm. The highest and strongly outlying values of electrical conductivity were measured in samples P1 and P9 (864 µS/cm and 880 µS/cm, respectively), which is probably due to the high chloride content (Table 4, Figure 5e).

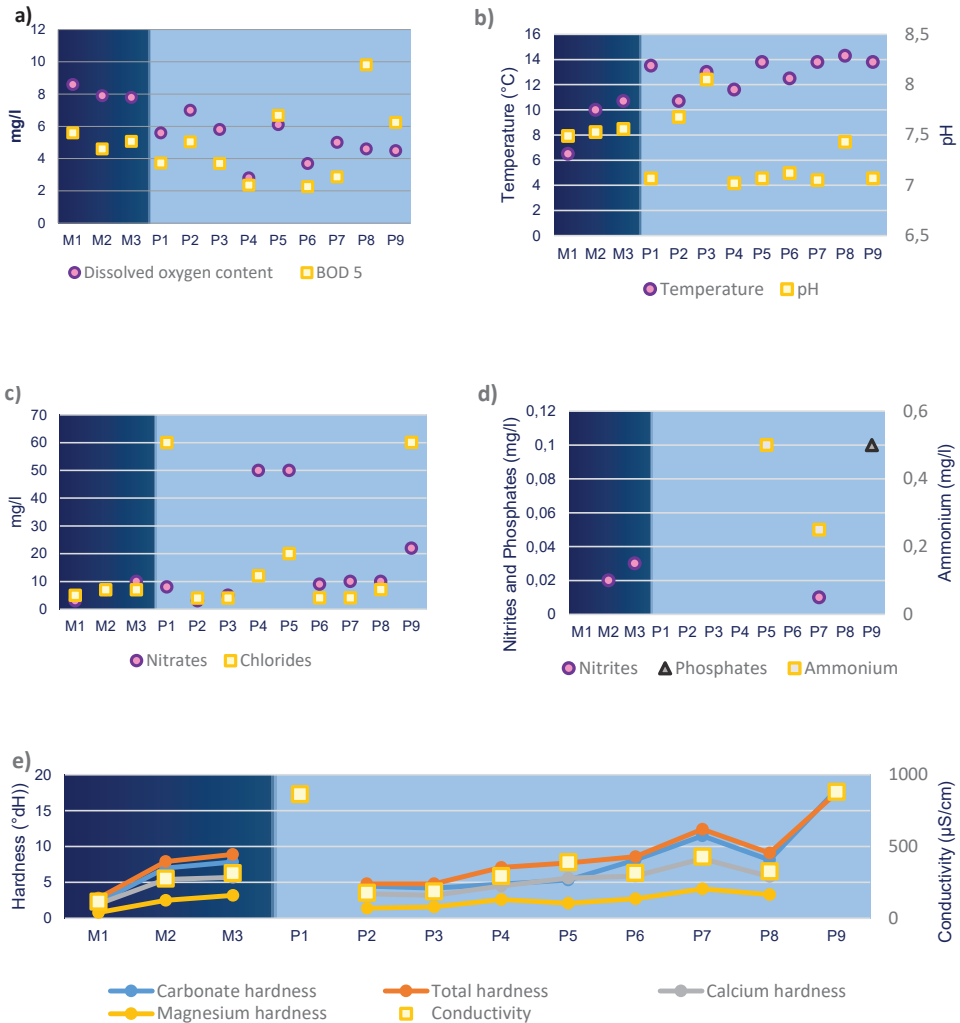
Table 4: Results of analyses of physico-chemical parameters at individual measurement sites.

Code S Parameter	Samples from the Mislinja watercourse			Groundwater samples from the Mislinja aquifer								
	M1	M2	M3	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
Scent	None	None	None	None	None	None	None	None	None	None	None	None
Colour	None	None	None	None	slightly yellow	None	None	None	None	slightly yellow	None	None
Turbidity	None	None	None	None	Cloudy	None	None	None	None	Cloudy	None	None
Temperature (°C)	6,5	10	10,7	13,5	10,7	13	11,6	13,8	12,5	13,8	14,3	13,8
pH	7,49	7,53	7,56	7,07	7,68	8,05	7,02	7,07	7,12	7,05	7,43	7,07
Dissolved oxygen content (mg/l)	8,6	7,9	7,8	5,6	7	5,8	2,8	6,1	3,7	5	4,6	4,5
BOD 5(mg/l)	5,6	4,6	5,07	3,72	5,04	3,69	2,35	6,68	2,26	2,86	9,81	6,24
Nitrates (mg/l)	3	7	10	8	3	5	50	50	9	10	10	22
Nitrites (mg/l)	0	0,02	0,03	0	0	0	0	0	0	0,01	0	0
Ammonium (mg/l)	< 0,25	< 0,25	< 0,25	< 0,25	< 0,25	< 0,25	< 0,25	0,5	< 0,25	0,25	< 0,25	< 0,25
Chlorides (mg/l)	5	7	7	> 60,00	4	4	12	20	4	4	7	60
Phosphates (mg/l)	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,1
Sulphates (mg/l)	< 25,0	< 25,0	< 25,0	< 25,0	< 25,0	< 25,0	< 25,0	< 25,0	< 25,0	< 25,0	< 25,0	< 25,0
Carbonate hardness (°dH)	2,24	7	7,84	14,56*	4,48	4,2	4,76	5,32	8,12	11,48	8,12	17,92*
Total hardness	2,8	7,9	8,9	13,70*	4,8	4,8	7,1	7,7	8,6	12,4	9,1	17,50*
Calcium hardness (°dH)	2	5,4	5,7		3,4	3,2	4,5	5,6	5,9	8,3	5,8	
Magnesium hardness (°dH)	0,8	2,5	3,2		1,4	1,6	2,6	2,1	2,7	4,1	3,3	
Conductivity (µS/cm)	114,8	275	314	864	177	186,4	293	390	315	428	326	880
Water quality designation	very soft	soft	soft		very soft	very soft	soft	soft	soft	moderately hard	soft	

S – sample; M1–M3 – measurement sites on the Mislinja River; P1–P9 – measurement sites of groundwater;

*Values are contradictory to the usual values for Slovenian waters, as the carbonate hardness is higher than the total hardness. The latter may be due to the pronounced chloride contamination. The analysis was not completed due to this anomaly.

Figure 5: Pollutants, hardness and conductivity by sample site (the darker part of the graphs shows the values at the Mislinja River sample sites, and the lighter part shows the values at the groundwater sample sites).



5 DISCUSSION

According to Narsimha et al. (2013, p. 74), nitrate concentrations above 10 mg/l are the result of anthropogenic influences on groundwater. In the studied area nitrate levels vary between 3 and 50 mg/l, with only four samples below 10 mg/l. The elevated values are therefore probably in most cases due to anthropogenic influences. Nitrate concentrations were highest in samples P4 and P5, from sites between Slovenj Gradec and Šmartno pri Slovenj Gradcu. Looking at land use (MKGP, 2017), we can see that the latter is probably due to intensive agriculture, particularly integrated hop production, which is the most common crop and is concentrated in this part of the valley (Figure 2). The issue of the impact of hops farms on nitrate leaching into groundwater is also highlighted by Gale et al. (1999). Nitrate contamination of water is also possible, but less likely, caused by higher population density and, in places, poorly managed sewers. The wider area of Šmartno pri Slovenj Gradcu and the southern part of Slovenj Gradec were only adequately sewered to a greater extent in the post-sampling period between 2017 and 2021, and some areas in the immediate vicinity of the sampling sites still do not have adequately addressed wastewater disposal (GURS, 2021).

Naturally occurring nitrite concentrations in groundwater do not normally exceed 0.3 mg/l (Nitrate and nitrite in drinking-water, 2011). The detected values are significantly below this limit and are also below the limit for drinking water. Thus, the Mislinja River and the groundwater in the Mislinja aquifer are not contaminated with nitrite.

Naturally occurring ammonium in groundwater and surface water is usually below 0.2 mg/l (WHO, 1996). Most of the samples taken did not have elevated ammonium levels, with only samples P5 and P7 standing out. In both samples, the values exceeded 0.2 mg/l, indicating an anthropogenic influence. The presence of ammonium in groundwater is usually linked to agriculture, municipal sewage or industry. In samples P5 and P7, industry is sufficiently distant that it is unlikely to have had a significant impact on groundwater. For sample P5, collected from a site near Slovenj Gradec, the influence of municipal sewage cannot be ruled out, as the borehole owners were not yet connected to the municipal wastewater network at the time of sampling. At the same time, ammonium was not detected in significant concentrations in sample P4, located in the immediate vicinity of P5, although here too the wastewater system had not yet been constructed at the time of sampling. It is also possible that the contamination is due to agriculture, which is the most likely cause of the contamination in sample P7, the owner of which has a farm predominantly oriented towards livestock farming (Table 2).

Chlorides, which were high in some places but did not exceed the limit values for drinking water according to Slovenian standards, were more problematic. According to Kohn et al. (2016, p. 112), chloride concentrations above 20 mg/l are indicative of anthropogenic influences. Higher chloride concentrations could be detected

in samples P1 and P9, where values reached and probably exceeded 60 mg/l, as this value is also the upper detection limit of the test used. Such concentrations, given the significantly lower values in the other samples, are most likely due to point source pollution, which in sample P9 could have originated from a nearby industrial area, dry cleaner or car wash (Table 2). Sample P1 comes from a site in close proximity to the main road G1-4 Slovenj Gradec-Velenje (Table 2), so to some extent the influence of salting for winter road maintenance cannot be excluded. Similar conclusions were also reached, for example, in the study *Skrb za pitno vodo [Caring for Drinking Water]* (Jamnik et al., 2014), where, using the example of Ljubljansko Polje, it was found that moderate chloride concentrations were linked to municipal wastewater and the use of salt for winter road maintenance. Chloride levels were also slightly higher in the vicinity of Slovenj Gradec (sample P5), which could be due to municipal wastewater from the then still poorly developed wastewater network (GURS, 2021) and intensive agriculture, especially hop production (Gale et al., 1999) in the immediate impact area, or it could also be due to the use of salt for winter road maintenance.

Phosphate levels in groundwater are low, as phosphorus is normally retained in the soil (Welch, Kingsbury, Coupe, 2010). In the Mislinja Valley, phosphate was not detected in significant quantities in most samples, be it from the Mislinja River or groundwater, although potential sources of contamination exist: fertilisers, manure, detergents, etc. This may also be due to the relatively low sensitivity of the test used, with a detection limit of 0.1 mg/l. The only sample where phosphate was detected (0.1 mg/l) was P9. We think it is mainly local influences that explain this situation, as there is a car wash in the vicinity (Table 2), from where detergents could be leaching into the groundwater.

Sulphates occur in nature mainly as a result of rock leaching, so for example seawater has sulphate concentrations of 2700 mg/l (WHO, 2004), while liquid water and groundwater typically have much lower levels. The rocks in the hinterland of the Mislinja River are not a source of significant quantities of sulphates, nor have anthropogenic influences, mainly as a result of industry, had a major impact on concentrations of these substances in the sampled water. In fact, all samples recorded concentrations below the detection limit of the test used (25 mg/l).

For the biochemical oxygen demand (BOD 5), samples with values between 1 and 2 mg/l indicate water that is not contaminated with organic matter, samples with values between 3 and 5 mg/l indicate the presence of organic contamination, and samples with values above 5 mg/l indicate higher levels of organic contamination (Oram, 2017). Elevated values were detected especially in the Mislinja River, where the values were around 5 mg/l. Interestingly, BOD 5 values were also higher in some samples taken in the upper reaches of the Mislinja River. For groundwater, BOD5 values above 5 mg/l were recorded in samples P2, P5, P8 and P9. In the remaining samples, the values were lower, indicating more moderate environmental influences.

pH is a measure of the balance between the concentration of hydrogen and hydroxyl ions in water, and can be affected by many factors (Boyd, 2015). The limit for

drinking water is 6.5 to 9.5. The pH values of the samples taken ranged between 7.02 and 8.05, indicating a slightly alkaline character of the waters in the Mislinja Valley.

In general, groundwater contains less dissolved oxygen than surface water sources, due to oxidation processes and the absence of an oxygen source (Rose, Long, 1988). The results of the oxygen content analysis indicate a variable presence of oxygen in groundwater, with values ranging from 2.8 to 6.1 mg/l. The higher oxygen content in some samples was most likely due to the shallowness of the aquifer and the inflow of the Mislinja River, which has slightly higher levels of dissolved oxygen, into the aquifer. This is probably particularly the case for sample P2, which (for the upper reaches of the Mislinja) also showed a higher BOD value. The oxygen content of groundwater is also potentially influenced by its depth and contact with the atmosphere. Likewise in our study, on average we observed differences between water samples from wells and boreholes. The oxygen contents of the well samples were slightly higher on average (5.1 mg/l), which is probably due to the direct contact of the groundwater with the atmosphere. The average oxygen content of the borehole samples was slightly lower (4.7 mg/l), probably due to the absence of direct contact between groundwater and the atmosphere, as water in boreholes is usually collected from slightly deeper depths. Nevertheless, the oxygen content of samples from wells and boreholes varied considerably from one sampling site to another.

It turned out that environmental influences, conditioned by land cover and land use in the wider area of the sample site, can only be linked to the values of the analysed parameters to a certain extent (e.g., the influence of intensive hops farming and/or sewage in the elevated nitrate values in samples P4 and P5). In fact, the results of the analysis of the samples sometimes indicate a strong dependence of the values of individual physico-chemical parameters of groundwater on the micro-location of the sample site itself, and on the more or less known influences at that site (e.g., elevated chloride, hardness and electrical conductivity values in samples P1 and P9 due to an unknown local pollution source, or very divergent ammonium levels in samples P4 and P5, which are only 180 m apart in air distance). The latter is likely due, among other things, to methodological constraints related to sampling from wells and private boreholes, which may make the results subject to potential local influences and consequently only to a certain extent representative of conditions in the wider aquifer area (Metodologija za opredelitev..., 2021).

A comparison of the physico-chemical properties of groundwater and the Mislinja River showed that, although the two systems are hydrologically linked, the values of individual parameters in one and the other are not necessarily comparable. In the case of groundwater, the values of the measured parameters are influenced to a large extent not only by anthropogenic influences from the surface, but also by the distance from surface water and the degree of mixing of surface water and groundwater, the rate of groundwater movement and recharge, the abundance and depth of the aquifer, and its geological composition (Fetter, 1999). Similarities between the two systems were thus

only found for hardness and electrical conductivity, while the values of the other parameters (temperature, oxygen content, BOD 5 and nutrient content) were quite different due to the different dynamics and retention times of the water, the current weather conditions and the different self-cleaning capacities, and therefore cannot be compared with each other. The water hardness in both systems was initially low (up to 4 °dH) and then increased downstream (up to about 10 °dH). Similarly, the conductivity (if P1 and P9 are excluded) showed an increasing trend downstream in both systems. However, it is characteristic for both the Mislinja River and the groundwater that, in general, the concentration of pollutants increases as you move further downstream, indicating an escalation of pressures and the presence of progressive pollution.

The results of the vast majority of analyses of physical and chemical parameters on groundwater samples (odour, colour, nitrate, nitrite, ammonium, pH, chloride and sulphate) are below the limit values set out in the Rules on drinking water (Pravilnik o pitni vodi, 2017). However, when considering the individual sample as a whole, where the non-compliance of one parameter alone affects the non-compliance of the whole sample, the results are significantly worse, with as many as five out of nine samples being non-compliant or conditionally compliant. Sample P2 is non-compliant due to a slightly yellow colour and turbidity, sample P7 is also non-compliant due to a slightly yellow colour. The samples with the highest limit values are for nitrate: samples P4 and P5, taken near Slovenj Gradec, reach the limit value for nitrate (50 mg/l). Furthermore, sample P5 also reaches the limit value for ammonium (0.5 mg/l).

6 CONCLUSIONS

Groundwater is a water source that is out of sight given its location below the surface. As a result, despite its importance as a potential source of drinking water, it is often neglected and less well understood, particularly in areas where its supplies are not abundant and where it is not used for local water supply. This is the case also for the Mislinja aquifer, which is the subject of this paper. Namely, it is an aquifer of low yield, which is utilised by the local population principally for watering, irrigation and washing, but not as a source of drinking water. The high water table (Table 2) makes groundwater relatively easily accessible, as reflected in the numerous boreholes and wells. While the high water table is an advantage in terms of use, on the other hand, the permeability of the covering layers means that significant quantities of pollutants from various anthropogenic activities can be leached into the groundwater.

In this study, we investigated the physico-chemical properties of groundwater in the Mislinja aquifer to assess its quality. The results of the study are preliminary, since it was only based on a one-off sampling of selected private boreholes and wells. In addition, a relatively small number of sampling sites (9) were sampled and only the most basic physico-chemical parameters were analysed (organoleptic properties,

temperature, pH, dissolved oxygen, nitrate, nitrite, ammonium, phosphate, sulphate, chloride, biochemical oxygen demand, electrical conductivity, analysis of various types of water hardness). The results obtained can therefore only provide a rough indication of the water quality of the Mislinja aquifer, as they are no substitute for the results of regular monitoring.

The groundwater of the Mislinja aquifer, based on organoleptic characteristics was odourless and in most samples colourless and clear. The exceptions were samples P2 and P7, where the water was turbid and slightly yellowish in colour. The temperature ranged from 10.7 to 13.8 °C and the pH was slightly alkaline with values between 7.02 and 8.05. Dissolved oxygen values were relatively low (between 2.8 and 6.1), which is also a characteristic of groundwater. Based on the remaining physico-chemical analyses of the groundwater in the Mislinja aquifer, the most frequently occurring pollutants are nitrates, which are usually derived from agricultural activities. Nitrate was detected at elevated concentrations in most samples, with the highest values measured in an area characterised by intensive agriculture in the vicinity of Slovenj Gradec (P4 and P5; 50 mg/l). Two sample sites also showed markedly elevated chloride levels (P1 and P9; 60 mg/l), probably due to point pollution or road salting. Given that 60 mg/l is also the upper detection limit of the test used, it cannot be excluded that the chloride levels at these sample points are in fact even higher. Slightly elevated chloride levels were also measured in the vicinity of Slovenj Gradec (P5; 20 mg/l). Other pollutants were present at elevated concentrations less frequently and only in isolated samples, and are therefore most likely due to local factors in the immediate impact area. For instance, nitrite (P7; 0.01 mg/l) and phosphate (P9; 0.1 mg/l) were only detected in one sample, while ammonium was detected in two samples (P5; 0.5 mg/l and P7; 0.25 mg/l). In all sites sulphates were below the detection limit of the test used, which is 0.25 mg/l. Organic matter contamination was most pronounced in the lower part of the valley, with a maximum value of 9.81 mg/l for BPK 5 at sampling site P8. Overall, the groundwater in the aquifer along the Mislinja is progressively more polluted downstream. This is reflected in a decrease in dissolved oxygen and an increase in the biochemical oxygen demand and an increase in nitrate content. Moving downstream water hardness and electrical conductivity also increased.

In the area of the Mislinja aquifer, agriculture has a particularly significant impact on groundwater quality, as it is present throughout the valley, and is particularly concentrated in the area of intensive hop-growing near the settlement of Šmartno pri Slovenj Gradcu. The wastewater network is also a potential source of pollutants, as several settlements or parts of settlements (Otiški Vrh, part of Šentjanž pri Dravogradu, Bukovska vas, Mislinjska Dobrava, Brda) are still not fully connected to it. Industry (especially north of Slovenj Gradec) and traffic (the main road passes through the valley, and with the construction of the third development axis, even higher traffic pressures are expected) are two additional factors potentially reducing the groundwater quality in the Mislinja Valley.

The Mislinja aquifer is relatively poorly known and explored, judging by the available data on groundwater quality and reserves. However, if properly protected, it could probably represent at least a potential reserve source of drinking water for the wider Mislinja Valley area. On the other hand, our analysis has shown that, according to the Rules on drinking water (Pravilnik o pitni vodi, 2017), as many as five out of nine samples were unsuitable, or only conditionally suitable, and it should be stressed that we have analysed a very limited number of parameters. It is quite likely that a more detailed analysis of all the parameters set out in the Regulation would reveal even more non-compliances in samples, and that even more sites would be inappropriate to use. The results of the analysis thus point to the worrying fact that the groundwater in the Mislinja aquifer is currently too contaminated to be counted on as a possible reserve source for water supply. This is a worrying finding, as drinking water is a strategic natural resource that should be protected and preserved for future generations in the spirit of sustainable development. Moreover, groundwater in the Mislinja aquifer is inextricably linked to the surface water in the Mislinja River, with water, including any pollutants present in it, being exchanged between the two.

The establishment of regular national monitoring in the area could help to raise awareness of groundwater pollution in the Mislinja aquifer and improve its quality. This would increase interest in the issue and raise the awareness of the population and, in particular, of local authorities. The latter have the potential to improve on the situation as it stands by introducing certain measures and incentives. Regular monitoring would make it possible to monitor the progress or deterioration of groundwater conditions. On the other hand, the Mislinja aquifer is but one of many comparable smaller sized and low-yield intergranular aquifers in Slovenia. Namely, the establishment of regular or at least periodic groundwater quality monitoring in the Mislinja aquifer, would entail considerable investment and operational costs, which would necessitate a strategic decision at the national level and so too a systemic change that would enable some more minor, though no less important, aquifers to be included in monitoring.

Acknowledgements

The authors acknowledge the financial support from the Slovenian Research Agency for the partial co-financing of the research programme Geoinformation Infrastructure and Sustainable Spatial Development of Slovenia (P2-0227) and Sustainable regional development of Slovenia (P2-0229).

References

- Ambrožič, Š., Cvitanič, I., Dobnikar Tehovnik, M., Gacin, M., Grbovič, J., Jesenovec, B., Kozjak Legiša, Š., Krajnc, M., Mihorko, P., Poje, M., Remec Rekar, Š., Rotar, B., Sodja, E., Krsnik, P., 2008. Kakovost voda v Sloveniji. Ljubljana: ARSO. URL:

- <https://www.arso.gov.si/vode/poro%C4%8Dila%20in%20publikacije/kakovost%20voda/Kakovost%20voda-SLO.pdf> (accessed 15.06.2020).
- Andjelov, M., Frantar, P., Pavlič, U., Rman, N., Souvent, P., 2021. Količinsko stanje podzemnih voda v Sloveniji. Ljubljana: ARSO. URL: https://meteo.arso.gov.si/uploads/probase/www/hidro/watercycle/text/sl/publications/monographs/Kolicinsko_stanje_podzemnih_voda_v_Sloveniji_OSNOVE_ZA_NUV_2022_2027.pdf (accessed 15.06.2020).
- ARSO [Agencija Republike Slovenije za okolje], 2006. Hidrogeološka karta (IAH) merila 1 : 250.000.
- ARSO [Agencija Republike Slovenije za okolje], 2016. Vodna dovoljenja. URL: http://gis.arso.gov.si/atlasokolja/profile.aspx?id=Atlas_Okolja_AXL@Arso (accessed 15.04.2017).
- ARSO [Agencija Republike Slovenije za okolje], 2017. Ocena kemijskega stanja vodotokov za obdobje 2009–2013. URL: <https://www.gov.si/assets/organi-v-sestavi/ARSO/Vode/Stanje-voda/Ocena-kemijskega-stanja-vodotokov-za-Nacrt-upravljanja-2015-2021.pdf> (accessed 11.08.2021).
- ARSO [Agencija Republike Slovenije za okolje], 2020. Ocena kemijskega stanja vodotokov za leto 2020. URL: <https://www.gov.si/assets/organi-v-sestavi/ARSO/Vode/Stanje-voda/Ocena-kemijskega-stanja-vodotokov-v-letu-2020.pdf> (accessed 11.08.2021).
- ARSO [Agencija Republike Slovenije za okolje], 2021a. Atlas okolja. Povprečna letna višina korigiranih padavin 1981–2010. URL: <http://gis.arso.gov.si/atlasokolja/> (accessed 11.08.2021).
- ARSO, 2021b. Mesečne statistike. Arhivski hidrološki podatki. URL: http://www.arso.gov.si/vode/podatki/arhiv/hidroloski_arhiv.html (accessed 11.08.2021).
- Boyd, C. E., 2015. Water quality – an introduction. 2nd ed. Cham, Heidelberg, New York, Dordrecht, London: Springer International Publishing Switzerland.
- Brnot, M., 2000. Odvisnost kakovosti podtalnice od njene dinamične izdatnosti in globine. Geografski vestnik, 72, 2, pp. 23–31.
- Brunke, M., Gonser, T., 1997. The ecological significance of exchange processes between rivers and groundwater. Freshwater Biology, 37, pp. 1–33. DOI: 10.1046/j.1365-2427.1997.00143.x.
- Busico, G., Cuoco, E., Sirna, M., Mastrocicco, M., Tedesco, D., 2017. Aquifer vulnerability and potential risk assessment: application to an intensely cultivated and densely populated area in Southern Italy. Arabian Journal of Geosciences, 10, 222. DOI:10.1007/s12517-017-2996-y.
- DRSV [Direkcija Republike Slovenije za vode], 2021. Atlas voda. Monitoring kakovosti podzemnih voda. URL: <https://gisportal.gov.si/portal/apps/webappviewer/index.html?id=11785b60acdf4f599157f33aac8556a6> (accessed 11.08.2021).
- Djura Jelenko, S., 2010. Arheološka podoba Mislinje z okolico. V: Potočnik, J. (ed.). Občina Mislinja: zbornik. Mislinja: Občina Mislinja, pp. 65–75. URL: <https://www.>

- mislinja.si/files/other/news/90/24870Arheolo%C5%A1ka%20podoba%20Mislinje%20z%20okolico.pdf (accessed 11.08.2021).
- Fetter, C. W., 1999. Contaminant hydrogeology. 2nd ed. New Jersey: Prentice Hall.
- Frantar, P., 2021. Monitoring kakovosti podzemne vode (personal source, 10.03.2021). Ljubljana.
- Frantar, P., Hrvatin, M., 2005. Pretočni režimi v Sloveniji med letoma 1971 in 2000. Geografski vestnik, 77, 2, pp. 115–127.
- Gacin, M., Mihorko, P., 2012. Ocena kemijskega stanja podzemnih voda v Sloveniji v letu 2011. Ljubljana: ARSO. URL: http://www.arso.gov.si/vode/podzemne%20vode/publikacije%20in%20poro%C4%8Dila/Poro%C4%8Dilo_kemija_podzemne_10_10_2011.pdf (accessed 16.03.2017).
- Gacin, M., Mihorko, P., Krajnc, M., 2009. Poročilo o kakovosti podzemne vode v Sloveniji v letih 2007 in 2008. Ljubljana, Ministrstvo za okolje in prostor, Agencija Republike Slovenije za okolje, 234 pp. URL: <http://www.arso.gov.si/vode/podzemne%20vode/publikacije%20in%20poro%C4%8Dila/podzemne0708.html> (accessed 16.03.2017).
- Gale, T., Pintar, M., Mikoš, M., 1999. Vpliv spiranja nitratov s hmeljišč na kvaliteto podtalnice. V: 10. Mišičev vodarski dan. Maribor: Vodnogospodarski biro, pp. 25–31.
- Gams, I., 1976. Hidrogeografski oris porečja Mislinje s posebnim ozirom na poplave. Geografski zbornik, 15, pp. 161–210.
- GURS [Geodetska uprava Republike Slovenije], 2008. Državna pregledna karta merila 1 : 250.000. URL: <http://egp.gu.gov.si/egp/> (accessed 10.03.2021).
- GURS [Geodetska uprava Republike Slovenije], 2017. Digitalni model nadmorskih višin - DMV 5. URL: <http://egp.gu.gov.si/egp/> (accessed 10.03.2021).
- GURS [Geodetska uprava Republike Slovenije], 2021. Zbirni kataster gospodarske javne infrastrukture. URL: <https://egp.gu.gov.si/egp/> (21.07.2021).
- Jamnik, B., Janža, M., Smrekar, A., Breg Valjavec, M., Cerar, S., Cosma, C., Hribernik, K., Krivc, M., Meglič, P., Pestotnik, S., Piepenbrink, M., Podboj, M., Polajnar Horvat, K., Prestor, J., Schüth, C., Šinigoj, J., Šram, D., Urbanc, J., Žibret, G., 2014. Skrb za pitno vodo. Geografija Slovenije 31. Ljubljana: Založba ZRC.
- Kemijsko stanje podzemne vode v Sloveniji – Kratko poročilo za leto 2020, 2021, ARSO. URL: https://www.arso.gov.si/vode/podzemne%20vode/publikacije%20in%20poro%C4%8Dila/Podzemne_vode_2020.pdf (accessed 21.07.2021).
- KIS [Kmetijski inštitut Slovenije], 2021. Portal e-Tla. URL: <https://www.kis.si/eTLA/> (accessed 11.08.2021).
- Kohn, J., Iwanyshyn, M., Miedema L., Olson, B., Kalischuk, A., 2016. Shallow groundwater quality at a beef feedlot in southern Alberta. Canadian Biosystems Engineering, 58, pp. 111–119. DOI: 10.7451/CBE.2016.58.1.11.
- Lampič, B., Rutar, N., 2019. Vrednotenje intenzivnosti okoljskih pritiskov kmetijstva na podzemno vodo v Sloveniji. Dela, 51, pp. 5–26. DOI: 10.4312/dela.51.5-26.

- Metodologija za opredelitev vodnih teles podzemne vode Republike Slovenije. Geološki zavod Slovenije. URL: <http://www.istra-hidro.eu/web/images/3-metodologija.pdf> (accessed 12.08.2021).
- Mioč, P., 1978. Osnovna geološka karta SFRJ. Tolmač za list Slovenj Gradec. 1978. Beograd, Zvezni geološki zavod.
- MKGP [Ministrstvo za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano], 2017. Grafični podatki RABA za celo Slovenijo. URL: <http://si/GERK/> (accessed 10.04.2017).
- Narsimha, A., Anitha, N., Sudarshan, V., Manjulatha, 2013. Evaluation of ground-water quality and its suitability for drinking purposes in Gunthakal Area, Ananthapur District, Andhra Pradesh, India. *Advances in Applied Science Research*, 4, 2, pp. 70–76. URL: <http://www.imedpub.com/articles/evaluation-of-groundwater-quality-and-its-suitability-for-drinking-purposes-ingunthakal-area-ananthapur-district-andhra-pradesh-in.pdf> (accessed 30.03.2017).
- Nitrate and Nitrite in Drinking-water. WHO. 2011. URL: http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/chemicals/nitratenitrite2ndadd.pdf (accessed 01.04.2017).
- Obreza, M., 2016. Nihanje temperature podtalnice glede na temperaturo reke Mislinje (personal source, 22.10.2016). Mislinjska Dobrava.
- Oram, B., Water quality terms glossary. URL: <http://www.water-research.net/index.php/glossary> (accessed 11.04.2017).
- Pravilnik o določitvi vodnih teles podzemnih voda. 2018. Uradni list RS, 63/05.
- Pravilnik o pitni vodi. 2017. Uradni list RS, št. 19/04, 35/04, 26/06, 92/06, 25/09, 74/15 in 51/17.
- Rose, S., Long, A., 1988. Monitoring dissolved oxygen in ground water: Some basic considerations. *Groundwater Monitoring & Remediation*, 8,1, pp. 94–97.
- Statistični urad Republike Slovenije, 2016. Portal STAGE. Gostota prebivalstva. URL: <https://gis.stat.si/> (accessed 15.08.2021).
- Špes, M., Cigale, D., Lampič, B., Natek, K., Plut, D., Smrekar, A., 2002. Študija ranljivosti okolja (metodologija in aplikacija). *Geographica Slovenica* 35, 1-2. Ljubljana: Založba ZRC.
- Uhan, J., Kranjc, M., 2003. Podzemne vode. V: Uhan, J., Bat, M., (ed.). *Vodno bogastvo Slovenije*. Ljubljana: Ministrstvo za okolje, prostor in energijo, Agencija Republike Slovenije za okolje, pp. 55–67. URL: https://www.arso.gov.si/vode/publikacije%20in%20porocila/Vodno_bogastvo_5podzemne_vode.pdf (accessed 15.08.2021).
- Welch, H. L., Kingsbury, J. A., Coupe, R. H., 2010. Occurrence of phosphorus in groundwater and surface water of northwestern Mississippi. 2010 Mississippi Water Resources Conference, pp. 142–155. URL: <http://www.wrri.msstate.edu/pdf/welch10.pdf> (accessed 11.04.2017).
- WHO [World Health Organization], 1996. Ammonia in Drinking-water. URL: http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/ammonia.pdf (accessed 31.03.2017).
- WHO [World Health Organization], 2004. Sulphate in Drinking-water. URL: http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/chemicals/sulfate.pdf (accessed 01.04.2017).