GeoZS
Geološki zavod Slovenije

KONČNO POROČILO ZA PROJEKT »RAZVOJ OPOZORILNEGA SISTEMA ZA ZAZNAVANJE VPLIVOV VOJAŠKIH DEJAVNOSTI NA PODZEMNO VODO (OPSIPOVO)«

ARIS CRP projekt št. V1-2367: »Razvoj opozorilnega sistema za zaznavanje vplivov vojaških dejavnosti na podzemno vodo«

Ljubljana, november 2025

Sofinancer:	**Republika Slovenija** **Ministrstvo za obrambo (MORS)** **Vojkova cesta 55, 1000 Ljubljana**
Matična raziskovalna organizacija:	GEOLOŠKI ZAVOD SLOVENIJE Dimičeva ulica 14, 1000 Ljubljana
Raziskovalne organizacije – soizvajalke:	KEMIJSKI INŠTITUT, Hajdrihova ulica 19, 1000 Ljubljana NACIONALNI INŠTITUT ZA BIOLOGIJO, Večna pot 121, 1000 Ljubljana ZNANSTVENORAZISKOVALNI CENTER SLOVENSKE AKADEMIJE ZNANOSTI IN UMETNOSTI, Novi trg 2, 1000 Ljubljana MICROBIUM, NAPREDNE TEHNOLOGIJE, D.O.O., Savinjska cesta 34, 1420 Trbovlje
Spremljevalec MORS:	Anja Čibej Andlovec
Št. pogodbe:	631-9/2022-85 iz dne 24.11.2023
Evidenčna številka:	631-393_2025
Število izvodov:	2
Naloga:	**ARIS CRP projekt št. V1-2367: »Razvoj opozorilnega sistema za zaznavanje vplivov vojaških dejavnosti na podzemno vodo«**
Naslov poročila:	**KONČNO POROČILO ZA PROJEKT »RAZVOJ OPOZORILNEGA SISTEMA ZA ZAZNAVANJE VPLIVOV VOJAŠKIH DEJAVNOSTI NA PODZEMNO VODO (OPSIPOVO)«**
Datum izdelave:	28.11.2025
Avtorji:	dr. Anja Koroša, univ. dipl. inž. geol. dr. Sonja Cerar, univ. dipl. inž. geol. dr. Ela Šegina, univ. dipl. geogr. dr. Mateja Jemec Auflič, univ. dipl. inž. geol. Jernej Bavdek, univ. dipl. inž. geod. dr. Metka Petrič, univ. dipl. inž. geol. dr. Nataša Ravbar, univ. dipl. geogr. in sinol. dr. Alen Albreht, univ. dipl. kem dr. Kristijan Vidović, mag. ing. min. dr. Nina Prezelj, univ. dipl. biokem. dr. Ion Gutierrez-Aguirre, univ. dipl. biokem. doc. dr. Denis Kutnjak, univ. dipl. biol. Rok Poglajen, mag. mikrobiol. Darjan Gande, M.Sc.

Tehnična podpora:	Dragica Benčina, prom. tehn.
Vodja RRI-aktivnosti:	dr. Anja Koroša, univ. dipl. inž. geol.
Vodja organizacijske enote Podzemne vode - hidrogeologija:	dr. Sonja Cerar, univ. dipl. inž. geol.
Direktor:	dr. Miloš Bavec, univ. dipl. inž. geol.

GEOLOŠKI ZAVOD SLOVENIJE LJUBLJANA 1

Ključne besede:	podzemna voda, kraški vodonosnik, prenos onesnaževal, ranljivost, opozorilni sistem, vojaška dejavnost
Datum:	Ljubljana, november 2025

VSEBINA

1. UVOD 7

2. PROJEKTNI PODATKI 9

2.1. Znanstvena izhodišča 9

2.2. Predstavitev problema in cilji raziskave 9

2.3. Pregled in analiza dosedanjih raziskav in relevantne literature s področja predlaganega projekta 13

3. PREGLED GEOLOŠKIH IN HIDROGEOLOŠKIH RAZMER 16

3.1. Geološke in tektonske značilnosti 16

3.2. Hidrogeološke značilnosti 16

4. OBMOČJE IZVAJANJA MONITORINGA PODZEMNE VODE 20

4.1. Izbor merilnih (opazovalnih) mest 20

4.1.1. Izvir Malni (Malenščica) 20

4.1.2. Izvir Unice 21

4.1.3. Izvir Raka 22

4.1.4. Kotliči 23

4.1.5. Vrtina V-1 Žeje 24

4.1.6. Stržen 25

4.1.7. Izvir ob gradu Snežnik (Grajski izvir) 26

5. OPERATIVNI NAČRT IZVAJANJA MONITORINGA 28

5.1. Načrt za posamezne terenske opazovalne točke 28

5.2. Reprezentativno opazovalno mesto za zvezno spremljanje relevantnih parametrov kraške vode – opozorilni sistem 29

6. ANTROPOGENE OBREMENITVE IN VPLIVI 31

6.1. Identifikacija indikatorjev onesnaženja podzemnih in površinskih vod, ki so značilni za vojaške dejavnosti 31

6.2. Uporabljene merilne metode in merilna oprema 36

6.2.1. Merilna oprema za določanje terenskih parametrov 36

6.2.2. Merilna metoda za ionske in elementne kemijske analize podzemne vode 37

6.2.3. Razvoj GC-MS analizne metode za določanje onesnaževal v vodnih vzorcih 39

6.2.4. Razvoj analitike za določanje nitroaromatskih spojin (ostanki eksplozivov) v vodnem mediju 40

6.2.5. Mikrobiološki pregled vode (*E.coli*, koliformni organizmi in Enterococcus sp.) 41

6.2.6. Delovni postopek določanja in spremljanja prisotnosti mikrobnih indikatorjev fekalnega

onesnaženja v vodi - Metoda sledenja mikrobnemu izvoru (MST – Microbial Source Tracking) .. 42

6.3. Spremljanje ter interpretacija rezultatov meritev posameznih relevantnih parametrov za vojaške dejavnosti v okviru projekta ... 43

6.3.1. Terenske meritve parametrov v podzemni vodi ... 43

6.3.2. Osnovni kemijski parametri ... 45

6.3.3. Indikativni kemijski parametri ... 46

6.3.3.1. Kovine ... 48

6.3.3.2. BTX (benzen, toluen, etil benzen in ksilen (-o, -m, -p) ... 50

6.3.3.3. PAH - policiklični aromatski ogljikovodiki ... 51

6.3.3.4. Eksplozivi (nitroaromatske spojine) ... 53

6.3.4. Izotopska sestava podzemne vode ... 55

6.3.5. Parametri radioaktivnosti vode ... 55

6.4. Mikrobiološke značilnosti vode ... 56

6.4.1. Mikrobiološki pregled vode (*E. coli*, koliformni organizmi in Enterococcus sp.) ... 56

6.4.2. Opredelitev nabora mikrobioloških parametrov nadzora ter spremljanje onesnaženja ... 57

7. OPOZORILNI SISTEM ZA ZAZNAVANJE VPLIVOV VOJAŠKIH DEJAVNOSTI NA PODZEMNO VODO .. 60

7.1. Pregled strokovne literature ... 60

7.2. Izbira primernih rešitev za kontinuirno in občasno spremljanje parametrov ... 61

7.3. Vzpostavitev sistema za zvezne meritve relevantnih parametrov ... 61

7.3.1. Izbrana oprema za zvezne meritve ... 61

7.3.2. Namestitev opreme in vzpostavitev merilnega sistema na črpališču Malni ... 62

7.4. Povezava merilnega mesta s podatkovno bazo ter informacijskim sistemom eTeren ... 65

7.4.1. Opis sistema eTeren ... 65

7.4.2. Vzpostavitev informacijskega sistema za sprotno spremljanje rezultatov meritev ... 66

7.4.3. Zbiranje podatkov na zajetju Malni ... 67

7.4.4. Povezava merilnega sistema s podatkovno bazo ter javni prikazovalnik podatkov ... 68

7.5. Statistična obdelava podatkov meritev opozorilnega sistema ... 70

7.5.1. Opredelitev najprimernejših statističnih metod za obdelavo podatkov meritev ... 70

7.5.2. Določitev in statistična obdelava rezultatov spektralnega podpisa UV-VIS spektra ... 71

7.5.2.1. Meritev predhodno pripravljenih raztopin spojin ... 72

7.5.2.2. Študija izvedljivosti: evalvacija absorpcijskih spektrov ... 73

7.5.2.3. Generiranje 4 specifičnih spektralnih parametrov, ki so selektivni za preučevane spojine ... 74

7.5.2.4. Vzpostavitev sistema v programski opremi »ana::larm«: ugotavljanje občutljivosti sistema na zaznavo spojin glede na ozadje ... 75

7.5.2.5. Preverjanje zaznave spojin ter odziva sistema na prekoračenje alarmnih vrednosti za posamezne spojine 75
7.6. Rezultati testnega delovanja opozorilnega sistema 76
8. PRENOS ZNANJA IN NAČRT UKREPANJA 81
8.1. Prenos znanja o sistemu na uporabnika Opozorilnega sistema 81
8.1.1. Vzdrževanje 81
8.1.2. Preverba delovanja instrumentov ter prenos podatkov na strežnike 81
8.1.3. Izredni dogodki na merilni opremi 82
8.2. Načrt ukrepanja ob zaznanih izrednih dogodkih onesnaženja 83
9. KOORDINACIJA PROJEKTA 87
9.1. Notranja organizacija projekta 87
9.1.1. Srečanja vseh raziskovalnih partnerjev in sofinancerja 87
9.2. Organizacija projekta navzven 87
9.2.1. Vmesna poročila izvajanja projekta 88
9.2.2. Komunikacijski načrt diseminacije projekta 88
9.2.3. Znanstvene objave 89
10. RAZPRAVA IN SKLEPI 91
11. LITERATURA 95
12. PRILOGE 99

1. UVOD

Glavni cilj ciljno raziskovalnega projekta V1-2367 z naslovom *»Razvoj opozorilnega sistema za zaznavanje vplivov vojaških dejavnosti na podzemno vodo«* je vzpostavitev opozorilnega sistema za spremljanje oziroma nadzor potencialnih vplivov vojaških vadišč na podzemne vode. V sklopu opozorilnega sistema poteka monitoring relevantnih kemijskih, bakterioloških in izotopskih parametrov, ki omogoča sprotno ocenjevanje možnih vplivov vojaških vadišč na vodonosni sistem v zaledju virov pitne vode. Monitoring je sestavljen iz dveh komponent: kontinuiranega oziroma zveznega monitoringa izbranih fizikalno kemijskih parametrov ter podrobnega, bolj poglobljenega monitoringa parametrov, na katere lahko vpliva vojaška dejavnost na območju vodonosnika. Kontinuirane meritve izbranih fizikalno kemijskih parametrov nas lahko v primeru določenih sprememb opozorijo, da se v vodonosniku nekaj dogaja, kar je potrebno s podrobnejšimi kemijskimi ter mikrobiološkimi analizami podrobneje opredeliti. Poleg fizikalno kemijskih parametrov podzemne vode, kot so nivo, temperatura, električna prevodnost, pH, nasičenost s kisikom, motnost, nitrati, celokupni organski ogljik (TOC), organska onesnaževala, smo zvezno spremljali tudi meteorološke parametre, ki lahko neposredno ali posredno v precejšnji meri pogojujejo značilnosti pretoka podzemne kraške vode: količina padavin, temperatura zraka, zračna vlaga, itd. Podrobni monitoring je v okviru projekta potekal v obliki občasnih odvzemov vzorcev vod, ki so bili analizirani za relevantne kemijske in mikrobiološke parametre. V sklopu podrobnega monitoringa je bil nadzorovan širši spekter parametrov, ki bi lahko bili značilni za emisije iz vojaških aktivnosti oziroma objektov, t.i. indikatorski parametri, ki so značilni za vojaške dejavnosti.

V začetni fazi priprave podrobnega monitoringa so bili proučeni rezultati dosedanjih raziskav na vplivnem območju vojaških vadišč. Ti rezultati so bili osnova za načrtovanje nabora parametrov ter načina izvajanja podrobnega monitoringa. V naslednji fazi je bil izdelan podrobni načrt izvajanja monitoringa. Poleg opazovanih parametrov so bila opredeljena tudi opazovalna mesta, kjer je potekal odvzem vzorcev za kemijske, mikrobiološke in izotopske analize obravnavanih vod. Načrt monitoringa obsega tudi definicijo merilne opreme ter metod za analizo posameznih parametrov. Opredeljen je bil tudi terminski načrt posameznih vzorčenj ter hidrološko stanje podzemnih vod ob odvzemu vzorcev. Zelo pomembna faza projekta je tudi izdelava načrta obdelave podatkov. Podatki merilnega sistema so bili z uporabo statističnih metod obdelani tako, da je možno v vsakem trenutku opredeliti, ali so razmere v vodonosniku normalne oziroma, ali imamo opraviti z dogodki, ki zahtevajo določeno ukrepanje s ciljem, da se zaščiti dobro kemijsko, mikrobiološko in ekološko stanje podzemne vode ter vodnih virov v prispevnem vodnem območju vojaških vadišč. V drugem letu projekta smo se posvetili operativnemu delovanju opozorilnega sistema za zaznavanje vplivov vojaških dejavnosti na podzemno vodo. Na osnovi pridobljenih izkušenj je bila izvedena optimizacija opozorilnega sistema.

Financiranje ciljnega raziskovalnega projekta V1-2367 "*Razvoj opozorilnega sistema za zaznavanje vplivov vojaških dejavnosti na podzemno vodo*" se je pričelo 1.10.2023, zaključi se 30.11.2025.

Financerji:

1. Ministrstvo za obrambo, Vojkova cesta 55, 1000 Ljubljana (50%)
2. Javna agencija za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije, Bleiweisova cesta 30, 1000 Ljubljana (50%)

Nosilna raziskovalna organizacija:
Geološki zavod Slovenije, Dimičeva ulica 14, 1000 Ljubljana

Sodelujoče raziskovalne organizacije:
Kemijski inštitut, Hajdrihova ulica 19, 1000 Ljubljana
Nacionalni inštitut za biologijo, Večna pot 121, 1000 Ljubljana
Znanstvenoraziskovalni center slovenske akademije znanosti in umetnosti, Novi trg 2, 1000 Ljubljana
Microbium, napredne tehnologije, d.o.o., Savinjska cesta 34, 1420 Trbovlje

Vodja raziskovalnega projekta:
dr. Anja Koroša

Raziskovalci v projektni skupini (po abecednem vrstnem redu):
dr. Alen Albreht
dr. Sonja Cerar
Elvira Colmenarejo Calero
Franjo Drole
Maja Ferle
dr. Ion Gutierrez Aguirre
dr. Samo Hočevar
dr. Mateja Jemec Auflič
dr. Denis Kutnjak
Živa Lengar
dr. Nina Mali
Miroslav Medić
dr. Cyril Mayaud
dr. Janez Mulec
Ivana Perović
dr. Metka Petrič
dr. Nina Prezelj
Rok Poglajen
dr. Maja Ravnikar
dr. Luka Serianz
Sara Skok
dr. Ela Šegina
Iris Štucin
dr. Kristijan Vidović
dr. Nataša Viršek Ravbar

2. PROJEKTNI PODATKI

2.1. Znanstvena izhodišča

Zagotavljanje oskrbe s kakovostno vodo je ena izmed glavnih nalog in resen izziv za celotno družbo. Analize stanja in različni dogodki onesnaženja v zadnjih letih so pokazali, da so številni vodni viri zelo ogroženi in izpostavljeni različnim tveganjem. Še posebej to velja za vire na krasu, ki napajajo približno četrtino svetovne populacije in več kot 50 % prebivalstva v Sloveniji, zaradi svojih značilnosti pa so izjemno ranljivi na škodljive vplive. Kraške vodonosnike gradijo kamnine (predvsem apnenci in dolomiti), ki so zaradi razpokanosti in pretrtosti dobro prepustne za vodo. Padavine s kraškega površja hitro in v velikem deležu poniknejo v podzemlje, kjer skozi različno velike in neenakomerno razporejene pore, razpoke in kraške kanale odtekajo proti izvirom, ki so pogosto zajeti za oskrbo s pitno vodo. Značilnosti pretakanja vode skozi kraške kamnine so zelo odvisne od padavinskih in hidroloških razmer. Ob dobri predhodni namočenosti prsti in kamnine padavine s površja odtekajo hitro in po celotni hierarhiji različno prepustnih razpok. V sušnih obdobjih pa je tok vode skozi kraški sistem počasen, voda zastaja v podzemlju in skozi izvire iztekajo le zelo majhne količine vode.

Padavine s površja spirajo tudi onesnaženje. Zaradi raznolike razpokanosti in zakraselosti kraške kamnine ter pomembnega vpliva padavinskih in hidroloških razmer so zelo raznovrstni tudi načini in trajanje prenosa onesnaženja skozi podzemlje. Na izvirih lahko tako onesnaženje s površja zaznamo že v nekaj urah ali dneh, ali pa šele po izdatnih padavinah, ki sledijo po daljšem času. Z dolgotrajnim spremljanjem je bilo ugotovljeno, da lahko spiranje do vzpostavitve prvotnega stanja kakovosti izvira pred onesnaženjem traja več let ali celo desetletij.

Značilnosti prenosa so odvisne tudi od tipa onesnaževala in načina njegovega vnosa v vodonosnik. Velike so razlike v širjenju v vodi topnih in netopnih onesnaževal ali pa onesnaževal, ki se prenašajo vezana na delce. Drugačen je njihov prenos pri vnosu v ponikalnico ali če so razpršena na kraškem površju. Razumevanje značilnosti onesnaževal ter njihovega vnosa in prenosa v kraških vodonosnikih je zato predpogoj za ustrezno varovanje in ohranjanje kakovosti kraških vodnih virov. Z varovanjem vodnih virov pa ohranjamo tudi od podzemne vode odvisne ekosisteme, med katerimi se zlasti kraški ponašajo z bogato in edinstveno biodiverziteto.

2.2. Predstavitev problema in cilji raziskave

Cilj projekta *»Razvoj opozorilnega sistema za zaznavanje vplivov vojaških dejavnosti na podzemno vodo«* je vzpostavitev sistema za spremljanje oziroma nadzor potencialnih vplivov vojaških vadišč na podzemne vode oziroma vire pitne vode. Ker je v podlagi vadišč kraški vodonosnik z zelo dobro prepustnostjo za pretakanje vode in snovi, ki jih ta nosi, je potrebno pri načrtovanju monitoringa upoštevati posebne značilnosti in veliko ranljivost krasa. Značilnosti prenosa snovi so zelo spremenljive ter odvisne od padavinskih in hidroloških razmer. Rezultati dosedanjih raziskav in dobro poznavanje kraškega sistema so osnova, na kateri lahko določimo najbolj primerne točke monitoringa ter časovno razporeditev in pogostnost meritev in vzorčenja. Kamninsko podlago Osrednjega vadišča Slovenske vojske Postojna gradijo karbonatne kamnine, ki so zaradi razpokanosti in zakraselosti zelo dobro prepustne za vodo. Padavine s kraškega površja hitro in v velikem deležu poniknejo v podzemlje, kjer

skozi različno velike in neenakomerno razporejene pore, razpoke in kraške kanale odtekajo proti izvirom, med katerimi sta največja Unica in Malenščica na južnem robu Planinskega polja. Malenščica je v črpališču Malni zajeta za oskrbo s pitno vodo v občinah Postojna in Pivka.

Za razumevanje procesov širjenja onesnaženja je potreben multidisciplinarni pristop. Na eni strani je nujno dobro poznavanje hidravličnih značilnosti kraškega vodonosnika, na drugi pa značilnosti onesnaženja ter predvsem mobilizacije in prenosa onesnaževal skozi kraško podzemlje. V preteklih projektih pridobljeno znanje o kraškem vodonosniku v vplivnem območju vadišča bomo dopolnili z raziskavami usmerjenimi v razumevanje pojava in prenosa onesnaževal, ki so posledica vojaške dejavnosti.

V sklopu naloge bodo pripravljena znanstvena izhodišča za spremljanje ter interpretacijo posameznih relevantnih parametrov, ki bi lahko bili značilni za emisije iz vojaških aktivnosti oziroma objektov. Potrebno je identificirati indikatorske parametre, ki so prvenstveno značilni za vojaške dejavnosti.

V tem sklopu bo še posebna pozornost dana nekaterim skupinam parametrov, za katere pričakujemo, da bodo lahko podali pomembne informacije glede vpliva vojaških dejavnosti na podzemne in površinske vode:

Ostanki eksplozivov v podzemni vodi

Ocenjujemo, da so ostanki eksplozivov v vodi parameter, ki ga lahko povezujemo primarno z vojaško aktivnostjo. V sklopu projekta bodo obdelana znanstvena izhodišča za spremljanje vsebnosti eksplozivov v podzemnih vodah: kemijske značilnosti eksplozivov, njihove transformacije po eksploziji, topnost posameznih kemijskih komponent, značilnosti transporta kemijskih komponent eksplozivov, analizne metode za identifikacijo ostankov eksplozivov v vodah.

Kovine v podzemni vodi

Pri uporabi strelnega orožja, streliva ter eksplozivov se lahko sproščajo različne kovine, ki se izpirajo v tla ter naprej v podzemne in površinske vode. Pomembno je ugotoviti, katere kovine se ob tem sproščajo v tla ter naprej v vode, topnost in značilnosti transporta v hidrogeološkem sistemu ter analizne metode za detekcijo vsebnosti kovin v podzemnih in površinskih vodah.

Novodobna organska onesnaževala

V podzemnih vodah, katerih zaledja so obremenjena z antropogenimi vplivi, običajno opazujemo širok nabor novodobnih organskih onesnaževal. V tem sklopu smo identificirati tista organska onesnaževala, ki so posebej značilna za vojaške dejavnosti in bi jih lahko v bodoče uporabljali kot indikator onesnaženja vod iz vojaških dejavnosti. Potrebno je bilo opredeliti tudi najbolj primerne analizne metode za posamezne skupine novodobnih onesnaževal.

Mikrobiološke značilnosti podzemne vode

Večje število vojaškega osebja v zaledju ranljivih kraških vodonosnikov v primeru nezadostnih zaščitnih ukrepov lahko povzroči poslabšanje mikrobiološkega stanja podzemnih in površinskih vod, ter s tem posledično tudi poslabšanje mikrobiološkega stanja vodnih virov, ki zajemajo vodo iz teh vodonosnikov. V okviru projekta bodo predlagane analitske metode, ki bodo omogočale optimalni nadzor

mikrobioloških značilnosti obravnavanih podzemnih vod.

Sistem nadzora vpliva vojaških objektov na podzemne vode

Sistem nadzora vpliva vojaških objektov na podzemne vode je sestavljen iz dveh sklopov: zvezne oziroma kontinuirane meritve ter podrobnejše občasne meritve.

V sklopu kontinuiranih meritev smo obravnavali parametre, ki jih lahko spremljamo kontinuirano. S kontinuiranim spremljanjem meritev izbranih parametrov lahko zaznamo, da se v sistemu dogaja nekaj nenavadnega oz. je prišlo do spremembe, kar je potrebno podrobneje raziskati z dopolnilnimi ciljnimi meritvami.

Kontinuirano spremljanje sledečih parametrov podzemne vode:

- Nivo podzemne vode,
- Temperatura podzemne vode,
- Električna prevodnost,
- pH,
- Nasičenost vode s kisikom,
- Motnost,
- Koncentracija nitratov,
- Koncentracija skupnega organskega ogljika (TOC),
- Ogljikovodiki,
- Analiza UV-VIS spektra za detekcijo širokega spektra možnih onesnaževal.

Meteorološki parametri, ki služijo kot pomoč pri interpretaciji rezultatov meritev podzemnih vod:

- Količina padavin,
- Temperatura zraka,
- Zračna vlaga,
- Sončno obsevanje,
- Vsebnost vode v tleh.

Sistem za nadzor ob prekoračitvi kritičnih vrednosti za posamezne parametre avtomatsko sproži opozorilo, da je v sistemu prišlo do spremembe, kar je potrebno podrobneje opredeliti z občasnimi meritvami.

Z občasnimi ciljnimi meritvami dobimo podrobnejše podatke o stanju morebitnega onesnaženja podzemne vode. Za občasno merjenje onesnaževal v vodi bodo uporabljene različne analizne metode. Poleg uporabe kvantitativnih metod bodo uporabljene tudi kvalitativne presejalne analize. Takšne tehnike omogočajo identifikacijo zelo širokega spektra spojin v enem samem vzorcu. Zaradi možnosti zaznavanja širokega spektra spojin so te tehnike še posebej primerne kot osnova za nadaljnje ciljne analize.

Zelo pomemben sklop projekta je opredelitev povezav oziroma odvisnosti med parametri kontinuiranih ter občasnih meritev v časovnih nizih. Poznavanje značilnosti pojavljanja onesnaževal v posameznih delih hidrograma bo omogočalo vzpostavitev sistema za zgodnje opozarjanje, in sicer na osnovi

kontinuiranih meritev na posameznih opazovalnih mestih. Testirane in uporabljene bodo različne statistične metode (osnovna statistika, multivariantne analize, nevronske mreže ipd.) za opredelitev povezav med posameznimi izmerjenimi parametri kemijskega stanja vodonosnika.

Pridobljeni izsledki bodo osnova za izdelavo protokola za monitoring kakovosti kraške vode v vplivnem območju vadišča, ki bo vključeval navodila o primernosti različnih tipov opazovalnih objektov, časovni razporeditvi in pogostnosti vzorčenja, o primernih oblikah vzorcev in vrstah analiz.

Splošne cilje načrtovanega projekta lahko strnemo v naslednje točke:

- izboljšanje razumevanja prenosa onesnaževal v kraških vodonosnikih,
- analiza mobilnosti težkih kovin,
- ugotavljanje razlik v značilnostih prenosa onesnaževal glede na tip onesnaževala, način vnosa in način prenosa skozi kraški vodonosnik,
- določitev splošnih smernic za načrtovanje monitoringa kakovosti kraških vodnih virov,
- vzpostavitev opozorilnega sistema za zaznavanje vplivov vojaških dejavnosti na podzemno vodo.

Specifični cilji projekta pa bodo pripomogli tudi k bolj učinkovitemu upravljanju z vodnimi viri na obravnavanem območju:

- opredelitev glavnih virov onesnaženja kot posledica vojaških dejavnosti in njihovih indikatorjev,
- dopolnitev znanja o smereh in značilnostih toka vode,
- kvantitativna opredelitev obremenitev vodonosnika s potencialnimi viri onesnaženja iz vojaških dejavnosti,
- postavitev izhodišč za program monitoringa v obravnavanem kraškem vodonosniku,
- dopolnitev analize tveganja za vojaški vadišči Poček in Bač, ki je bila narejena v preteklosti.

Ob koncu projekta, torej po enem letu delovanja sistema opozorilnega sistema za zaznavanje vplivov vojaških dejavnosti na podzemno vodo, bo pripravljeno poročilo s povzetkom izkušenj z delovanjem sistema. V tem sklopu bodo pripravljene tudi usmeritve oziroma priporočila za nadaljevanje delovanja sistema, v kolikor se bo investitor za to odločil.

Pričakujemo, da bo imel sistem za spremljanje potencialnih vplivov vojaških dejavnosti na podzemne vode pozitivni učinek tudi na sprejemljivost vojaških objektov oziroma aktivnosti pri lokalnem prebivalstvu. Lahko domnevamo, da bodo prebivalci z večjo naklonjenostjo sprejemali dejavnosti na njihovem območju, če bodo vojaške aktivnosti nadzorovane tudi z gledišča možnih vplivov na podzemno vodo oziroma vire pitne vode, t.j. monitoring.

2.3. Pregled in analiza dosedanjih raziskav in relevantne literature s področja predlaganega projekta

Raziskovalno območje obsega vadišče Poček in strelišče Bač, ki zajemata prostor, namenjen izključno izvajanju dejavnosti obrambe ter varnostna območja, ki so potrebna za varno uporabo navedenih dveh območij. Površina območja OSVAD Postojna (Območje Osrednjega vadišča Slovenske vojske Postojna) je 124 km^2. Od tega je 25 km^2 namenjenih izključno izvajanju dejavnosti obrambe (vadišče Poček in strelišče Bač), 99 km^2 pa obsega varnostno območje. Na obravnavanem območju se je vojaška dejavnost začela izvajati že v času Avstro-Ogrske monarhije in je bila prisotna v času Italije ter bivše Jugoslavije, ko je bila tudi najbolj obsežna. Današnje stanje okolja je torej posledica več kot sto let trajajočih aktivnosti v preteklosti, ki so imele na okolje delno negativne vplive (delna degradacija posameznih segmentov okolja, kot npr. onesnaženje tal z ostanki eksplozivnih sredstev), a v veliki meri tudi pozitivne vplive (ohranitev gozdnih in travnatih površin brez poselitve in infrastrukture).

Poleg osrednjega vadišča Slovenske vojske Postojna se znotraj zaledja vodnega vira Malenščica prepletajo različne rabe prostora kot so aktivnosti v sklopu vojske, kmetijske, urbane in turistične rabe ter industrijske dejavnosti na območju notranjskih kraških polj in Zgornje Pivke. Čeprav analize kakovosti vode izvira večinoma še potrjujejo ustreznost in po opravljenih predpisanih postopkih čiščenja primernost vode za rabo v vodovodnem sistemu, pa so pojavi povišanih koncentracij nekaterih onesnaževal vedno bolj pogosti. Še največkrat na neustreznost vode kažejo bakteriološki parametri, v zadnjem času so vedno pogosteje povišane koncentracije indikatorjev fekalnega onesnaženja. Merjene koncentracije težkih kovin v vodi so znotraj dopustnih vrednosti za pitno vodo, so pa že bile zaznane povišane koncentracije nekaterih težkih kovin v sedimentu na izviru (Bole in sod., 2011). Če k temu dodamo še ugotovitve o zelo visokih koncentracijah kovin in nekaterih organskih onesnaževal v prsti na območju vojaškega vadišča Postojna (Al Sayegh Petkovšek in sod., 2009; Vrbič Kugonič in sod., 2016; Pepelnik in sod., 2019), je jasno, da je potrebno vprašanjem pojavljanja in prenosa onesnaževal v obravnavanem kraškem vodonosniku posvetiti posebno pozornost.

Ker je kraški izvir Malenščica regionalno pomemben vir za oskrbo s pitno vodo, so bile v njegovem zaledju že opravljene številne hidrogeološke raziskave (npr. Kogovšek 1999; Gabrovšek in sod., 2010; Kovačič, 2010, 2011; Petrič 2010; Petrič in sod., 2018; Rusjan in sod., 2019, Kogovšek in sod., 2023). V novejših projektih je bila vzpostavljena tudi obsežna mreža samodejnih meritev fizikalno-kemijskih parametrov v izvirih, vodnih jamah in ponikalnicah v zaledju izvira, občasno so bile izvedene še kemijske in mikrobiološke analize vzorcev, ki so bili zajeti v času izbranih vodnih valov (Kogovšek 2001; Ćuk Đurović in sod., 2022). Izdelane so bile teoretske osnove za vzpostavitev zgodnjega opozarjanja na onesnaženje vodnih virov (Ravbar in sod., 2023, 2024). Vse te predhodne raziskave omogočajo dobro poznavanje dinamike toka vode v obravnavanem sistemu, kar odpira možnosti poglobljenega proučevanja značilnosti prenosa snovi v krasu. Razumevanje teh procesov je predpogoj za ustrezno načrtovanje monitoring kakovosti vode in ukrepov za njeno varovanje.

V času izvajanja vojaških aktivnosti se lahko pojavi več možnih virov obremenitev: parkirišča (onesnaženje s pogonskimi gorivi in drugimi naftnimi derivati), pralne in dekontaminacijske ploščadi (onesnaženja s pogonskimi gorivi, drugimi naftnimi derivati, površinsko aktivnimi snovmi, dekontaminacijskimi sredstvi), pretakališče goriva z možnimi onesnaženji s pogonskimi gorivi in drugimi naftnimi derivati, čistilne naprave komunalnih odpadnih voda, odpadki. Na območjih, na katerih se

uporabljajo eksplozivna in strelna sredstva so možne migracije snovi, akumuliranih v tleh v preteklih obdobjih, ali ob novih vojaških aktivnosti.

Najpomembnejša onesnaževala v odpadnih vodah z utrjenih površin izhajajo iz ostankov pogonskih goriv ter hidravličnih in mazalnih olj, vse navedeno iz obsežne skupine snovi »nafta in njeni derivati«. Značilni analitski parametri, s katerimi v analitiki vod zaznavamo in merimo snovi po izvoru iz nafte in njenih derivatov, so alkani (ravnoverižni in razvejani), cikloalkani in aromatski ogljikovodiki. Med aromatskimi ogljikovodiki izstopajo lahkohlapni aromatski ogljikovodiki (BTX – benzen in derivati) in policiklični aromatski ogljikovodiki (PAO). Te odpadne vode so po sestavi zelo podobne odpadnim vodam s cestnih in parkirnih površin. Značilne sestavine odpadnih voda s prometnih površin so tudi posamezne težke kovine, na primer kadmij, svinec, cink, baker, vanadij, molibden in drugi…, ki pa lahko na območju vadišč izvirajo tudi z vojaških aktivnosti (ostanki kovinskih delov ohišij eksplozivnih in strelnih teles).

Na območju vadišča Poček in strelišča Bač se uporabljajo oziroma je predvidena uporaba streliv in minsko eksplozivnih sredstev naslednjih kategorij: vadbeno strelivo, ostro strelivo, bombometi, raketometi, eksplozivna sredstva mobilnih enot (tankov, …), eksplozivna sredstva havbic, ročne bombe, eksplozivna sredstva Spike sistemov, različne dimne ročne bombe in letalske inertne bombe. Njihove glavne sestavine so eksplozivne snovi oziroma njihove kombinacije v pomenu osnovnega in zagonskega eksploziva (RDX, črni smodnik, TNT, PBX, HMX).

Fekalna kontaminacija vode predstavlja resno tveganje za zdravje ljudi, okolja in ekosisteme, saj fekalni material vsebuje različne enteropatogene, ki lahko preko fekalnega onesnaženja vstopijo in krožijo v vodnih telesih. Hitra identifikacija vira(-ov) onesnaževanja je zato ključnega pomena za izvajanje ustreznih sanacijskih ukrepov (Paruch in Paruch 2022). Tradicionalno se za določevanje mikrobiološke ustreznosti vode ugotavlja prisotnost indikatorskih bakterij fekalnega onesnaževanja kot so *Escherichia coli (E.coli)*, in entrokoki. Vendar pa se te bakterije nahajajo tako v človeškem kot živalskem blatu. Za ugotavljanje vira onesnaženja se lahko uporablja tako imenovana metoda sledenja mikrobnemu izvoru (MST – Microbial Source Tracking), kjer se s pomočjo zaznavanja prisotnost mikrobov, specifičnih za posamezno vrsto, določi gostitelja oziroma vir fekalne okoljske DNA (eDNA). Nabor označevalcev, specifičnih za mikrobe posameznih gostiteljev, se nenehno dopolnjuje in širi ter uporablja za kvalitativne in kvantitativne analize MST v različnih vodnih okoljih po svetu. Za razvoj označevalcev se uporabljajo različne bakterijske vrste (npr. 16S rRNA Bifidobacterium spp., Enterococus esp gen, Lachnospiraceae) in humani enterični virusi kot so adenovirus, norovirus, polyomavirus in tudi virus blage lisavosti paprike (PMMoV)(Paruch in Paruch 2022). PMMoV je prisoten v različnih vodnih virih v velikem številu, brez sezonskih nihanj, zato je predlagan kot stabilen fekalni indikator (Rosario in sod., 2009, Haramoto in sod., 2013).

Na območju povečane vojaške aktivnosti je smiselna občasna analiza potencialne kontaminacije voda z vključitvijo določitve izvora onesnaženja. Kraška območja so posebej občutljiva za onesnaženje in študije MST na več kraških območjih ZDA (Illinois, Wisconsin, Kentucky in Misuri) so pokazale prisotnost markerjev za humano in živalsko fekalno kontaminacijo lokalnih podzemnih voda krasa (izvirov in vodnjakov) (Zhang in sod., 2014). Študija kraških voda v Švici je pokazala prisotnost MST markerjev za človeško kontaminacijo kot tudi za fekalno kontaminacijo, ki izvira od prežvekovalcev (Diston in sod.,

2018). V Izraelu so v kraških vodnih izvirih zaznali MST markerje za fekalno kontaminacijo človeka, goveda in svinjino (Ohad in sod., 2015). MST markerje specifične za človeško fekalno kontaminacijo so zaznali tudi v vodah kraškega območja Nemčije (Stange in Tiehm, 2020).

Uporaba MST markerjev zelo dobro deluje na vzorcih odpadnih voda, pri vzorcih naravnih voda pa je njihova občutljivost zaradi redčenja, mešanja z drugimi viri onesnaženja in maskiranja z avtohtonimi bakterijami lahko nižja (Carrey in sod., 2021). Dodaten izziv pri uporabi MST markerjev je lahko njihova regionalna specifičnost, zato je potrebno markerje preveriti z uporabo fekalnih virov iz geografske regije. (Browning in sod., 2023).

V predhodnih projektih na območju OSVAD Postojna pridobljena zbirka podatkov omogoča dobro razumevanje glavnih značilnosti pretakanja vode v obravnavanem kraškem vodonosniku, smeri podzemnega odtekanja so bile dokazane tudi s sledilnimi poskusi. Eden izmed njih je bil izveden z injiciranjem sledila v osrednjem delu vadišča na Počku in je v razmerah nizkega vodostaja potrdil glavno smer toka proti izviru Malenščica z navidezno hitrostjo 25 m/h (Kogovšek in sod., 1999). Glede na poznavanje značilnosti pretakanja skozi vadozno cono lahko predpostavimo, da je ob višjih vodostajih ta hitrost še znatno večja. Analiza rezultatov sledilnih poskusov na širšem območju zaledja Unice je omogočila oceno ranljivosti kraških vodnih virov in njene spremenljivosti glede na spremenljive okoljske razmere (Leins in sod., 2025). Dinamika pretakanja vode po različno prepustnih porah, razpokah in kraških kanalih je namreč odvisna od padavinskih in hidroloških razmer, na pretakanje vode je vezan tudi prenos snovi. Najmanjši prenos v vodi topnih snovi je v sušnih obdobjih (shranjevanje v vadozni coni), najintenzivnejši pa po izdatnih padavinah, ko se predhodno namoči prst in zapolni vadozna cona. Pojav onesnaževal v kraških izvirih je še posebej izrazit ob močnejših padavinah po daljšem sušnem obdobju, ko padavinska voda izpere onesnaženje, ki se je v tem času akumuliralo v podzemlju.

3. PREGLED GEOLOŠKIH IN HIDROGEOLOŠKIH RAZMER

3.1. Geološke in tektonske značilnosti

Litostratigrafske značilnosti raziskovalnega območja so povzete po Osnovni geološki karti 1:100.000, listih Postojna (Buser s sod., 1967) in Ilirska Bistrica (Šikić s sod., 1967). Najstarejše kamnine območja so norijsko–retijski dolomiti oz. glavni dolomit, ki se pojavljajo med Planinskim in Cerkniškim poljem. Dolomit je plastnat, pogosto stromatoliten in v prelomnih conah zdrobljen v milonit, zato deluje kot hidrogeološka pregrada. Na obrobju Planinskega polja, pri izvirih Malenščice in Unice, je zgornjetriasni dolomit v prelomnem stiku s krednimi kamninami, ki gradijo območje Javornikov. Kredne plasti ležijo v normalni legi, njihov vpad pa je med Planino in Postojno usmerjen proti vzhodu in jugu, na območju Javornikov pa proti severovzhodu. Najstarejše kredne kamnine izdanjajo pri izvirih Malenščice in Unice ter gradijo severovzhodno pobočje Javornikov, visoki kras proti Snežniku in območje med Zagorjem, Juršičem, Knežakom in Bačem. Gre za rjave do temno sive apnence z občasnimi vložki dolomita. Proti zahodu prehajajo v spodnje turonijske plasti, sestavljene iz svetlih apnencev in apnenih breč. Zahodne Javornike in območje Počka gradijo zgornjekredni rudistni apnenci. Kredne kamnine prehajajo v terciarne apnence (kozinske, miliolidne, numulitne in alveolinske), ki se pojavljajo zahodno od Knežaka in Zagorja. Najmlajše kamnine predstavlja eocenski fliš, ki prekriva večino Pivške kotline in se nadaljuje v Vipavsko dolino. V njem se menjavajo apneni in kremenovi peščenjaki, glinovci ter laporji, ponekod se pojavljajo apnene breče in konglomerati. Kvartarne naplavine rek in potokov prekrivajo doline in kraška polja. V Pivški kotlini ni jasne meje med flišem in rečnimi sedimenti.

Zgradbo območja določa narivna tektonika (Placer, 1981). Hrušiški pokrov (Nanos, Hrušica, Cerkniško in Planinsko polje) je narinjen na Snežniško narivno grudo, ki zajema Pivško kotlino, Postojnski ravnik, Javornike in Snežniško pogorje, ta pa je narinjena na Komensko grudo. Ponekod je viden stik med zgornjekrednim apnencem in eocenskim flišem. V Pivški kotlini sta dve tektonski okni — večje pri Knežaku in manjše zahodno od Zagorja (Pleničar, 1959). Območje presekajo tudi neotektonski prelomi, med katerimi je najpomembnejši Predjamski prelom, ki poteka severno od Počka in ima značaj desnega zmika (Šebela, 2005). Hidrogeološko pomembna je cona Idrijskega preloma, ki poteka prek Planinskega in Cerkniškega polja ter deluje kot hidrogeološka pregrada. Dno obeh polj sestavlja dolomit z manjšo prepustnostjo, zato vode izvirajo na južnem obrobju. Pomemben je tudi Selški prelom (Gospodarič, 1989; Poljak, 2000), ki poteka od Prestranka proti Koritnicam in zahodnemu pobočju Snežnika. V njegovi coni, široki približno 1,5 km, ležijo številna presihajoča Pivška jezera.

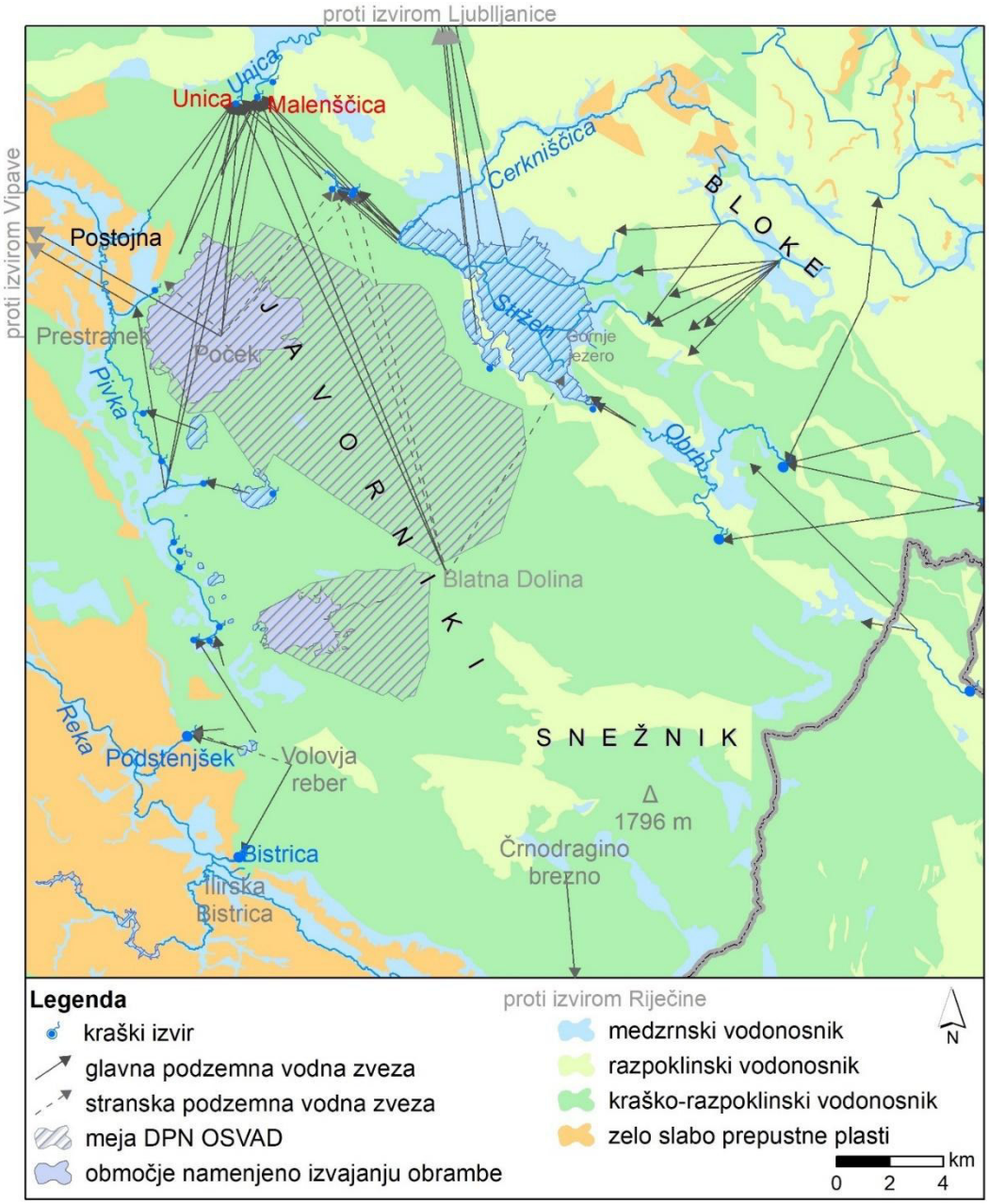
3.2. Hidrogeološke značilnosti

Raziskovalno območje (Slika 1) je del kraškega vodonosnika Javornikov, ki ga omejujejo dolina reke Pivke s pritoki na zahodni, Loška dolina in Cerkniško polje na vzhodni in severovzhodni ter Rakov Škocjan in Planinsko polje na severni strani. Vode se pretakajo večinoma podzemno proti izvirom na južnem robu Planinskega polja, največja med njimi sta izvira Malni (Malenščica) in Unica. Območje Javornikov gradijo pretežno kredni apnenci, ki so dobro zakraseli. V njih so razvite površinske in podzemne kraške oblike. Veliko je škrapelj in vrtač, številne so tudi kraške jame, ki imajo večinoma obliko brezna. Padavine, ki padejo na kraško površje, neposredno prenikajo v bolj ali manj vertikalni smeri skozi razpokane karbonatne kamnine vadozne cone globlje v kras, kjer se pretakajo podzemni

kraški tokovi. Kako globoko so podzemni vodni tokovi in kako se pretaka voda skozi vadozno cono krasa, je odvisno predvsem od hidroloških pogojev, ki jih narekujejo padavine, njihova količina in razporeditev. Gladina podzemne vode je ob nizkem vodostaju dosegljiva le v štirih kraških jamah v zahodnem delu Javornikov (Fužina pri Stari vasi, Brezno v Kobiljih Grižah, Matijeva jama, Jama v Ždinku) ter v stalnih izvirih na obrobju. Ob visokem vodostaju pa se nivo dvigne in delovati začnejo tudi občasni izviri. Na obrobju kraškega masiva Javornikov so na stiku s slabše prepustnimi kamninami številni kraški izviri, skozi katere se kraški vodonosnik prazni. Po apnencih zahodnega roba Javornikov se deloma površinsko in deloma podzemno pretaka tudi Pivka v svojem zgornjem toku do stika s flišem pod Prestrankom. Skupni pretok Pivke v zgornjem toku je merjen na hidrološki postaji pri Prestranku in se giblje med 0 in 43,3 m^3/s.

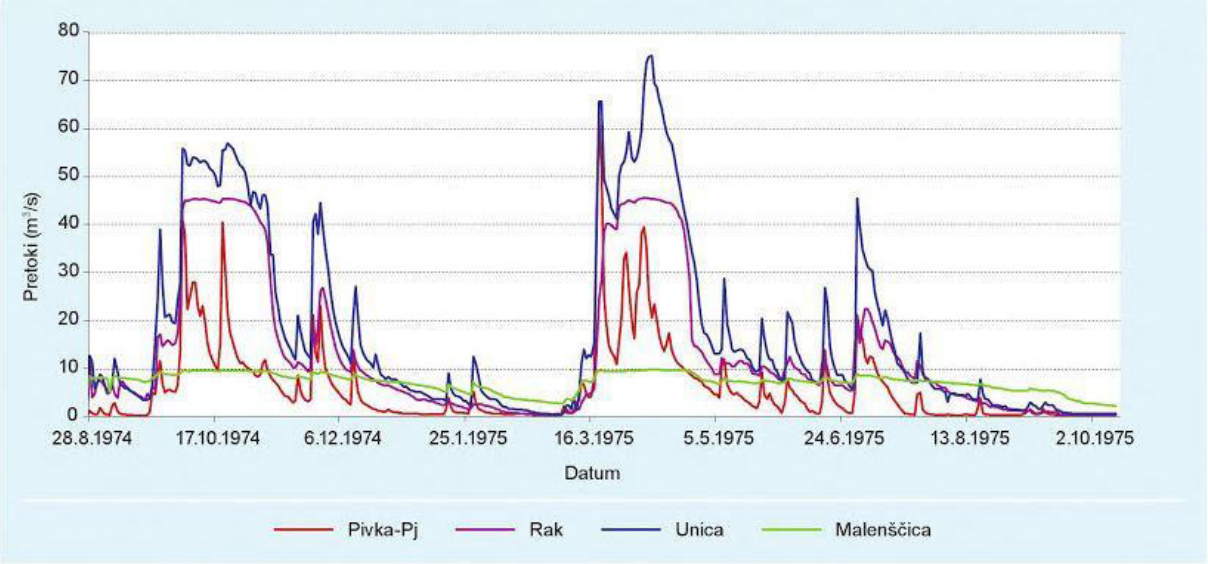
S sledilnimi poskusi potrjene podzemne vodne zveze (Petrič in sod., 2018 in reference v tem članku) so prikazane na karti (Slika 1). Najpomembnejša sta sledilna poskusa na Počku in v Blatni Dolini. Na Počku je bil leta 1997 ob nizkem vodostaju injiciran uranin; približno polovica vode odteka v Malenščico, četrtina v izvire Rakovega Škocjana in četrtina v Vipavo. Sledilo se je pojavilo v Malenščici po 15 dneh, v Vipavi po 41 dneh, s hitrostjo 25 m/h. Leta 2014 je bil v Blatni Dolini ob visokem vodostaju izveden podoben poskus. Sledilo se je pojavilo predvsem v Malenščici in Unici po približno enem mesecu, z navidezno hitrostjo toka okoli 22 m/h.

Za območje je značilna kraška bifurkacija oz. smer vodnega toka v različne smeri glede na vodostaj. Ob nizkem vodostaju Pivka ponika in napaja kraški vodonosnik, ob visokem pa se aktivirajo kraški izviri, ki napajajo njen površinski tok in presihajoča jezera. Heterogenost raziskovalnega kraškega ozemlja se v prvi vrsti kaže v obliki kompleksnega odtoka podzemne vode, ki ni enodimenzionalen temveč se s časom in prostorom lahko zelo spreminja. Najbolj pomemben kazalnik kompleksnega odtoka so zagotovo kraški izviri, ki neposredno odražajo fizikalne in kemijske značilnosti kraške podzemne vode. Poleg izvirov pa je spremljanje naravnih značilnosti kraške podzemne vode možno tudi v vrtinah in dostopnih kraških jamah. Kraške jame zahtevajo še posebej podrobno obravnavo, saj se v njih vzpostavijo posebni pogoji, ki so pomembni predvsem za obstoj občutljivih jamskih ekosistemov. Zato jih uvrščamo med naravne vrednote.



Slika 1: Pregledna hidrogeološka karta širšega območja z rezultati sledenj

Pomemben del vode v izvirih Unice in Malenščice prispeva tudi alogeno napajanje s ponikalnicami (Slika 2). S sledilnimi poskusi (Gabrovšek in sod., 2010 in viri v tem članku) je bilo dokazano, da se v izvire Unice stekajo tako vode iz Pivke, ki ponika v Postojnsko jamo, kot tudi vode z območja notranjskih kraških polj, ki se stekajo proti Rakovem Škocjanu, tam ponikajo in skozi Planinsko jamo pritečejo v Unico. Drugačne so razmere v zaledju izvira Malenščica, v katerega prav tako pritekajo vode iz Rakovega Škocjana, ne pa tudi iz ponora Pivke v Postojnsko jamo. Proti Malenščici odtekajo le vode iz zgornjega toka, ko Pivka teče še po apnencih in se skozi številne ponore izgublja v kraško podzemlje Javornikov.



Slika 2: Primerjava pretokov kraških izvirov Unice in Malenščice s pretoki ponikalnic v njunem zaledju (Kogovšek s sod., 2007)

4. OBMOČJE IZVAJANJA MONITORINGA PODZEMNE VODE

4.1. Izbor merilnih (opazovalnih) mest

V okviru drugega delovnega sklopa projektne naloge so bila na podlagi zbiranja, obdelave, klasificiranja in pregleda podatkov ter stanja podzemne vode določena merilna mesta za namen vzpostavitve ter določitev pilotnega območja za oceno kemijskega stanja podzemne vode na območju Počka. Izbrali smo 6 merilnih mest, ki predstavljajo različna hidrogeološka območja in potencialne poti onesnaženja. Osrednja točka monitoringa je izvir Malni (Malenščica), ki je regionalno pomemben vir pitne vode, zajet za oskrbo 22.000 prebivalcev. Poleg njega smo v vplivnem območju v monitoring vključili še izvira Unica na Planinskem polju in Kotliči v Rakovem Škocjanu ter vrtino V-1 pri Žejskem izviru v dolini Pivke. V zgornjem toku Pivke voda ni stalno na površju, še približno mesec po tem, ko se v obdobju brez padavin umakne v podzemlje, pa je možno vzorčenje v tej vrtini. Ob višjih vodostajih je vzorčenje potekalo na Žejskem izviru. Ker se v izvire Malni, Unica in Kotliči ne stekajo samo vode iz Javornikov, ampak tudi iz obsežnega območja notranjskih kraških polj, smo v monitoring vključili še dve točki izven značilnega vpliva OSVAD in sicer izvir Rak v Rakovem Škocjanu ter ponikalnico Stržen na Cerkniškem polju. Na ta način bo možno oceniti morebitni vpliva onesnaženja iz tega dela zaledja, v katerem so že bile ugotovljene obremenitve zaradi poseljenosti, kmetijskih in industrijskih dejavnosti. Izbira lokacij merilnih mest v okviru projekta je bila odvisna od dejavnikov, kot so značilnosti vodonosnika in možnih virov onesnaženja. Število merilnih mest je bilo omejeno glede na stroške analitičnih analiz ter nabave potrebne opreme.

4.1.1. Izvir Malni (Malenščica)

Izvir Malni (Slika 3) je zajet za vodooskrbo občin Postojna in Pivka. Prvotno je bil izvir zajet za oskrbo bližnje vasi Planine, kasneje pa je začela Postojna graditi zajetje za svoj vodovod. Podrobne raziskave značilnosti izvira je opravil Inštitut za raziskovanje krasa ZRC SAZU v okviru študije za izdelavo predloga sanacije obstoječega zajetja in strokovnih podlag za zaščito izvira (Habič in sod., 1987). Malenščico napaja več izvirov, ki so razporejeni v izraziti, skoraj 1 km dolgi in 200 m široki zatrepni dolini ob jugozahodnem robu Planinskega polja. Ločimo 4 skupine glavnih izvirov. Stalno aktiven je samo spodnji izvir. Gladino vode v njem lahko delno uravnavajo z zapornico, sicer pa je odvisna od dotoka in niha na višini med 448 in 449,5 m. Ostali izviri so aktivni le občasno, najvišji aktivni izvir pa je ob visokih vodah na koti 470 m. Precejšnje višinske razlike med sosednjimi izviri kažejo, da so dotoki zaradi kompleksnih hidravličnih razmer v zaledju omejeni in je zato dotok vode ob visokem vodostaju relativno manjši. Pretoki izvira se po podatkih za obdobje 1991-2020 gibljejo med 1,12 m^3/s in 11,24 m^3/s, srednji pretok pa znaša 6,22 m^3/s (ARSO, 2024). Izvir je pomemben predvsem zaradi relativno visokih pretokov ob nizkem vodostaju.

Slika 3: Izvir (zajetje) Malni (*foto: M. Medić*)

4.1.2. Izvir Unice

Izvir Unice (Slika 4) iz Planinske jame doseže ob visokih vodah pretok prek 90 m^3/s, precej manjši pa je pretok ob nizkem vodnem stanju z le nekaj 100 l/s (Kogovšek in sod., 2023). V Planinski jami se združita vodotoka iz Rakovega in Pivškega rokava, ki drenirata podzemno vodo iz smeri Rakovega Škocjana in Cerkniškega jezera, oziroma iz Pivške kotline. Poleg tega Unico tudi neposredno napajajo podzemne vode iz Javornikov. Pod sotočjem Malenščice in Unice je pri Hasbergu še občasni izvir Škratovka, ki ob visokem vodostaju doseže pretok do 7 m^3/s.

Slika 4: Izvir Unice (*foto: M. Petrič*)

4.1.3. Izvir Raka

Na območju Rakovega Škocjana je površinski tok Raka, ki kot izvir Rak (Slika 5) pride na površje iz Zelških jam, po približno 2 km pa ponika v Tkalca jamo in teče podzemno proti izvirom na Planinskem polju. Njegov najpomembnejši pritok je izvir Kotliči, večji trajnejši izvir je še izvir Prunkovec. Glede na hidrokemijske značilnosti vode v izviru Raka prevladuje voda iz Cerkniščice, ki zbira vode predvsem v dolomitnem območju severno od Cerkniškega polja (Kogovšek, 2004).

Slika 5: Izvir Raka (*foto: C. Mayaud*)

4.1.4. Kotliči

V izvir Kotliči (Slika 6) priteka voda pod makadamsko cesto iz udornice Kotel, kjer v globoki kotanji izvira voda iz več špranj in se ob srednjih in nizkih vodah preliva skozi neprehodne votline. Ob zelo visoki vodi pa teče površinsko po suhi dolini proti Raku (Gams, 2003). V Kotličih se pojavlja voda iz Javornikov kakor tudi voda z območja Cerkniškega polja, predvsem iz ponikalnice Stržen (Kogovšek, 2004; Gabrovšek in sod., 2010). Za oceno vpliva bolj obremenjenega dotoka iz smeri Cerkniškega polja, ki ga je potrebno upoštevati pri ovrednotenju vpliva vojaškega vadišča Poček na kakovost vode izvira Kotliči, smo v monitoring vključili tudi spremljanje izvira Rak in ponikalnice Stržen.

Slika 6: Izvir Kotliči (*foto: M. Medić*)

4.1.5. Vrtina V-1 Žeje

Žejski izviri so najmočnejši in najtrajnejši izviri ob reki Pivki (maksimalen pretok znaša okrog 6 m^3/s; povprečno so aktivni vsaj pol leta). S sledenjem je bilo dokazano, da jih napajajo vode iz Petelinjskega jezera. Ob pretoku izvira 3,5 m^3/s naj bi odtok iz jezera prispeval le 0,5 m^3/s vode, ostala voda pa priteka ali pod jezerom ali ob njem iz obsežnejšega kraškega zaledja (Habič, 1975). Zanimivo je, da se Žejski izviri posušijo nekoliko prej, preden odteče vsa voda iz Petelinjskega jezera, po deževju pa se najprej pojavi v jezeru in šele nato tudi na izviru. Pri raziskavah za vodooskrbo so leta 1969 nad izvirom izvrtali okrog 50 m globoko vrtino V-1 (Slika 7), ki pa je bila kasneje zasuta s kamenjem in je voda v njej sedaj dostopna le do globine 22 m. Vseeno je bila vključena v monitoring v okviru projekta, saj omogoča dostop do podzemne vode še po tem, ko vsi kraški izviri ob Pivki presahnejo.

Slika 7: Vrtina V-1 (*foto: B. Kogovšek*)

4.1.6. Stržen

Največja izvira na južnem robu Cerkniškega polja sta Cemun in Obrh, ki dobivata vodo iz višje ležečega Loškega polja in se združita v potok Stržen. Vanj med površinskim tokom po Cerkniškem polju priteka še voda iz občasnih izvirov in estavel na zahodnem robu polja in iz izvirov, ki zbirajo vodo iz Bloške planote na severovzhodu. Stržen ponika v podzemlje na območju Jamskega zaliva na skrajnem severozahodnem robu polja v več požiralnikih in kraških jamah, med katerimi je najpomembnejši 10 km dolg jamski sistem Karlovice, in napaja izvire v Rakovem Škocjanu. Podzemne vodne povezave med poljem in izviri se spreminjajo glede na hidrološke razmere. Tako je bilo s sledilnim poskusom v letu 2008, ko je bilo v Stržen na ponoru v Malo Karlovico injicirano fluorescenčno sledilo uranin, ugotovljena zelo dobra povezava z izvirom Kotliči, v izviru Rak pa se je sledilo pojavilo le v zelo majhnem deležu (Gabrovšek in sod., 2010). Sklepamo lahko, da ob določenih hidroloških razmerah z vzorčenjem izvira Rak ne bi zaznali vpliva Stržena in njegovega prispevnega zaledja, zato smo v monitoring vključili tudi ponikalnico Stržen (Slika 8).

Slika 8: Izvir potoka Stržen (*foto: M. Petrič*)

4.1.7. Izvir ob gradu Snežnik (Grajski izvir)

Zaledje izvira ob gradu Snežnik se nahaja na SV delu Snežniškega pogorja. Območje Snežnika je večinoma zgrajeno iz zakraselih krednih karbonatnih kamnin, ožje območje izvira pa gradi jurski dolomit v menjavi z apnencem. V neposredni bližini izvira poteka Idrijski prelom. Kraška podzemna voda prihaja na dan v ozkem zatrepu, nad katerim je strmo ostenje, visoko približno 10 m. V dnu plitve, do 15 m široke struge se nahaja grušč, ki v izteku prehaja v ilovnato naplavino. Praktično vse območje zaledja je poraščeno z gozdom. Zaradi tega lahko privzamemo, da predstavlja izvir ob gradu Snežnik naravno hidro geokemijsko ozadje vod iz kraškega vodonosnika območja Snežnika, kjer ni pomembnejših onesnaževal podzemne vode. Merilno mesto je bilo v mrežo monitoringa vključeno, kot »nulta« točka oz. točka zaledja (Slika 9).

Slika 9: Grajski izvir (*foto: A. Koroša*)

5. OPERATIVNI NAČRT IZVAJANJA MONITORINGA

Sistem nadzora vplivov vojaških objektov na podzemne vode je bil zasnovan v dveh sklopih. Prvi sklop predstavljajo zvezne oziroma kontinuirane meritve, ki omogočajo stalno spremljanje osnovnih fizikalno-kemijskih parametrov in pravočasno zaznavanje morebitnih sprememb v vodnem okolju. Drugi sklop pa obsegajo podrobnejše občasne meritve, namenjene poglobljeni analizi posameznih onesnaževal in indikatorskih parametrov. Takšna kombinacija zagotavlja celovit pregled nad stanjem podzemne vode ter omogoča pravočasno ukrepanje ob zaznanih obremenitvah.

5.1. Načrt za posamezne terenske opazovalne točke

Časovni načrt podrobnejših občasnih meritev je bil razdeljen na tri obdobja. V sklopu izvedbenega načrta je bilo opredeljenih šest merilnih mest, na katerih je potekalo vzorčenje podzemnih kraških vod za kemijske, bakteriološke ter izotopske analize v različnih hidrogeoloških obdobjih:

1. Srednji vodostaj podzemne vode: julija 2024 (2. in 3.7.2024) (Slika 10)
2. Visok vodostaj podzemne vode: november 2024 - Vzorčenje v novembru smo izvedli v času padavinskega dogodka po daljšem suhem obdobju. V začetni fazi takega dogodka na izvirih izteka voda, ki je bila dalj časa uskladiščena v podzemlju in se je v njej nakopičilo morebitno onesnaženje.
3. Nizek vodostaj podzemne vode: julij 2025 (7.7. in 8.7.2025)

Slika 10: Vzorčenje podzemnih vod za kemijske, bakteriološke ter izotopske analize (merilno mesto Stržen - levo in merilno mesto Unica – desno)

5.2. Reprezentativno opazovalno mesto za zvezno spremljanje relevantnih parametrov kraške vode – opozorilni sistem

Kraški izvir Malni (Malenščica) je regionalno pomemben vodni vir, iz katerega se s pitno vodo oskrbuje 21.000 prebivalcev postojnske in pivške občine, za oskrbo iz tega vira se zanimajo tudi primorske občine, ki oskrbujejo dodatnih 100.000 – 120.000 ljudi. Njegova velika prednost je več kot zadostna količina vode tudi ob najnižjih vodostajih (minimalni pretok 1 m^3/s), slabost pa velik obseg prispevnega zaledja v pretežno kraških kamninah, ki so zelo ranljive na posledice različnih človekovih aktivnosti. Proti izviru se stekajo vode iz Zgornje Pivke, kraškega masiva Javornikov in notranjskih kraških polj, celotno prispevno zaledje obsega okrog 740 km^2. V tem kompleksnem kraškem hidrogeološkem sistemu se prepletajo površinski in podzemni vodni tokovi, zanj je značilna izrazita časovna spremenljivostjo pretakanja voda in prenosa snovi. Zaradi izjemnega pomena kot vira pitne vode ter potreb po boljšem razumevanju delovanja kraškega vodonosnika v zaledju, ki je osnova za načrtovanje zaščite pred onesnaženjem, je bil izvir Malni opredeljen kot najbolj reprezentativno opazovalno mesto in je bila vanj nameščena raziskovalna oprema za zvezno spremljanje relevantnih parametrov podzemne vode.

Zaradi hitre spremenljivosti količin in kakovosti vode v izvirih je za razumevanje značilnosti pretakanja vode in prenosa snovi v krasu zelo koristno zvezno spremljanje izbranih parametrov. Zaradi omejenega nabora parametrov, ki jih je možno meriti zvezno, je potrebno te meritve kombinirati z občasnim vzorčenjem za laboratorijske analize relevantnih parametrov. Primerjava rezultatov obeh načinov merjenja omogoča izboljšanje razumevanje delovanja obravnavanega sistema in optimizacijo načrtovanega monitoringa kakovosti vode. Za izvir Malni je bilo na ta način v preteklih raziskavah ugotovljeno, da je najslabša kakovost vode v času padavinskih dogodkov po daljšem sušnem obdobju. Analiza je tudi pokazala, da je morebitni negativni vpliv onesnaženja z območja Javornikov najbolj verjeten v začetnem delu naraščanja pretoka, ko je vpliv razredčenja še majhen (Ćuk Đurović in sod., 2022). Rezultati zveznega merjenja v sklopu projekta omogočajo preverjanje in dopolnjevanje teh ugotovitev, hkrati pa bodo povišane vrednosti izbranih merjenih parametrov v sklopu načrta ukrepanja indikator morebitnega pojava onesnaženja. Sledilo bo vzorčenje vode za laboratorijske analize izbranih parametrov, s katerimi bo možno dodatno preveriti kakovost vode.

Kakovost vode in sedimenta v izviru Malni že spremljajo v sklopu različnih monitoringov (Agencija Republike Slovenije za okolje (ARSO), Javno podjetje Kovod Postojna, vodovod, kanalizacija, d.o.o. (KOVOD), Ministrstvo za obrambo (MORS), rezultati so javno objavljeni in dostopni na njihovih spletnih straneh (https://www.arso.gov.si/vode/podatki/, https://www.kovod.si/vodovod/zagotavljanje-kakovosti-pitne-vode/vzpostavitev-sistema-kakovosti/, https://www.slovenskavojska.si/o-vojski/infrastruktura/skrb-za-okolje/). Vendar pa gre le za občasne analize nekajkrat na leto, izbira termina vzorčenja pa tudi ni vezana na značilne padavinske dogodke. Glede na objavljene rezultate (zgodaj) so bile v sedimentu v Malnih v primerjavi z drugimi izviri in vodotoki v zaledju zaznane nekoliko povišane vsebnosti svinca (v Malnih vsebnosti med 22 in 100 $mg/kg_{s.s}$, v drugih med 19 in 80 $mg/kg_{s.s}$) in bakra (v Malnih vsebnosti med 19 in 126 $mg/kg_{s.s}$, v drugih med 1 in 69 $mg/kg_{s.s}$). V analiziranih vzorcih vode so bile vsebnosti teh kovin vedno pod mejnimi vrednostmi za pitno vodo, svinec največ 0,4 µg/l (mejna vrednost 5 µg/l) in baker največ 1,1 µg/l (mejna vrednost 2 mg/l). Od ostalih kovin, ki so prisotne v visokih koncentracijah v tleh na območju OSVAD, je bil v vodi Malnov izmerjen nikelj v

koncentraciji do 1 µg/l (mejna vrednost 20 µg/l) in cink v koncentraciji do 1,4 µg/l, kadmij pa je bil vedno pod mejo določljivosti 0,024 µg/l. Pri meritvah vsebnosti organskih snovi so bile izmerjene vrednosti TOC do 2,4 mg/l, benzen je bil vedno pod mejo določljivosti 0,5 µg/l. Drugi parametri, ki bi lahko bili odraz onesnaženja na območju vojaškega vadišča, niso analizirani.

6. ANTROPOGENE OBREMENITVE IN VPLIVI

Vojaške dejavnosti na območju vadišča Poček lahko predstavljajo pomemben vir obremenitev tal in podzemne vode. Območje leži na občutljivem kraško–razpoklinskem vodonosniku, za katerega veljajo poostreni varstveni kriteriji. Poleg izvajanja vojaških aktivnosti, pri katerih se uporabljajo eksplozivna in strelna sredstva, so potencialni viri onesnaženja tudi različni infrastrukturni objekti, med drugim parkirišča, pralne in dekontaminacijske ploščadi, pretakališča goriva, čistilne naprave ter mesta nastajanja različnih vrst odpadkov, ki lahko izhajajo iz samega vojaškega vadišča. Onesnaženja lahko nastanejo tudi zaradi uporabe gradbene mehanizacije, zlasti zaradi pogonskih goriv ter mazalnih in hidravličnih olj. Dodatno tveganje predstavljajo nepredvidljivi dogodki, kot so okvare vojaških vozil in strojev, pri čemer je vpliv odvisen od obsega in narave posameznega dogodka. Med izvajanjem vojaških aktivnosti so infrastrukturni objekti lahko neposreden vir obremenitev. Parkirišča lahko povzročijo onesnaženja s pogonskimi gorivi in naftnimi derivati, pralne in dekontaminacijske ploščadi pa poleg goriv in derivatov tudi s površinsko aktivnimi snovmi ter dekontaminacijskimi sredstvi. Pri pretakališčih goriva obstaja dodatno tveganje nenadzorovanih izpustov goriv in naftnih derivatov. Viri potencialnih obremenitev so lahko tudi mobilne in stacionarne čistilne naprave za komunalne odpadne vode.

6.1. Identifikacija indikatorjev onesnaženja podzemnih in površinskih vod, ki so značilni za vojaške dejavnosti

Vojaške dejavnosti na območjih vadišča lahko povzročajo obremenitve tal in posledično tudi podzemne vode, saj sta ti med seboj neločljivo povezani. Celotno območje vadišča Poček se nahaja na kraško-razpoklinskem vodonosniku, katerega hidrogeološke značilnosti zahtevajo strožje kriterije za obvladovanje negativnih vplivov. Na območjih uporabe eksplozivnih in strelnih sredstev so možne migracije snovi, ki so se v tleh akumulirale v preteklosti (I in II svetovna vojna), ali pa nastajajo ob novih aktivnostih vojske. Najpogostejša onesnaževala v odpadnih vodah z utrjenih površin so ostanki goriv, hidravličnih in mazalnih olj, ki sodijo v skupino naftnih derivatov. Analitsko jih zaznavamo kot alkane, cikloalkane ter aromatske ogljikovodike, med katerimi izstopajo t.i. BTX (benzen, toluen, ksilen) in policiklični aromatski ogljikovodiki – PAH (naftalen, atracen, fenentren, itd.). Odpadne vode so po sestavi podobne prometnim, saj vsebujejo tudi težke kovine, kot so kadmij, svinec, cink in baker, ki lahko izvirajo iz vojaških aktivnosti. Komunalne odpadne vode se prepoznajo po obarvanosti, vonju ter vsebnosti neraztopljenih snovi, dušikovih, fosforjevih in žveplovih spojin, sulfatov, kloridov, površinsko aktivnih snovi, težkih kovin ter mikroorganizmov, vključno z ostanki farmacevtskih učinkovin. Na vadišču Poček se dandanes uporabljajo različne vrste streliva in eksplozivnih sredstev, med drugim vadbeno in ostro strelivo, bombometi, raketometi, havbice, ročne in dimne bombe ter inertne letalske bombe. Njihove glavne sestavine so eksplozivi, kot so RDX, TNT, itd. Uporaba teh sredstev lahko dodatno vpliva na tla in podzemno vodo, saj razrahljana struktura omogoča migracijo snovi. Prav tako so vir onesnaženja lahko tudi različni gradbeni posegi, ki vključujejo odstranjevanje talnih plasti in posege v geološko podlago, se poveča dostop padavinskih voda do razrahljane strukture tal, kar omogoča prenos snovi v podzemno vodo. Onesnaženja lahko nastanejo zaradi uporabe gradbene mehanizacije ali nepredvidljivih okvar. V nadaljevanju so predstavljeni posamezni viri tako kemijskega, kot tudi mikrobiološkega potencialnega onesnaženja podzemne vode ter parametri, ki smo jih vključili v spremljanje v okviru raziskovalnega projekta, s katerimi je mogoče spremljati stopnjo onesnaženja.

Terenski parametri podzemne vode (Preglednica 1) vključujejo pH, električno prevodnost, temperaturo, koncentracijo raztopljenega kisika. Ti parametri dajejo splošno sliko o kakovosti podzemne vode že na terenu in hkrati omogočajo oceno vpliva antropogenih dejavnosti.

Preglednica 1: Terenski parametri podzemne vode

Parameter	Odgovorni partner	kratica	CAS št.
Terenski parametri			
Temperatura vode (°C)	Geološki zavod Slovenije	T	/
pH vrednost	Geološki zavod Slovenije	pH	/
Električna prevodnost, 20 °C (µS/cm)	Geološki zavod Slovenije	EC	/
Redoks potencial (mV)	Geološki zavod Slovenije	ORP	/
Raztopljeni kisik (mg/l)	Geološki zavod Slovenije	OXI	/

Osnovni kemijski parametri v podzemni vodi zajemajo nabor temeljnih snovi, ki odražajo naravno geokemično sestavo vodonosnika in morebitne vplive iz okolja. Med najpomembnejše sodijo glavni ioni (kalcij, magnezij, natrij, kalij, kloridi, sulfati in nitrati). S spremljanjem teh parametrov (Preglednica 2) je mogoče oceniti mineralno ravnovesje, izvor vode, stopnjo naravnega raztapljanja mineralov ter prisotnost antropogenih obremenitev, kot so kmetijska raba, komunalni vplivi ali industrijski viri. Osnovni kemijski parametri tako predstavljajo temelj za razumevanje kakovosti podzemne vode in njene dolgoročne stabilnosti ter so ključni del vsake celovite hidrogeokemijske ocene.

Preglednica 2: Osnovni kemijski parametri za kemijske analize podzemne vode

Parameter	Odgovorni partner	kratica	CAS št.
Osnovni kemijski parametri			
Amonijev kation (mg/l)	Kemijski inštitut	NH_4^+	14798-03-9
Natrij (mg/l)	Kemijski inštitut	Na^+	7440-23-5
Kalij (mg/l)	Kemijski inštitut	K^+	7440-90-7
Kalcij (mg/l)	Kemijski inštitut	Ca^{2+}	7440-70-2
Magnezij (mg/l)	Kemijski inštitut	Mg^{2+}	7439-95-4
Nitrat (mg/l)	Kemijski inštitut	NO^{3-}	14797-55-8
Sulfat (mg/l)	Kemijski inštitut	SO_4^{2-}	14808-79-8
Klorid (mg/l)	Kemijski inštitut	Cl^-	16887-00-6

Indikatorski kemijski parametri (Preglednica 3) so specifični kazalci onesnaženja, vezani na posamezne vire, nekateri lahko odražajo tudi naravno geokemično sestavo v vodonosniku. Mednje sodijo BTX spojine kot indikator razlitij goriva, PAH kot indikator zgorevanja goriv in eksplozivov, nitroaromatske spojine kot indikator vojaških ostankov eksplozivov ter težke kovine (npr. svinec, baker, cink), ki kažejo na vpliv vojaške infrastrukture. BTX spojine so značilne sestavine naftnih derivatov in goriv. V okolje vstopajo predvsem zaradi razlitij pogonskih goriv, puščanja rezervoarjev ter uporabe vojaške mehanizacije. Zaradi dobre topnosti v vodi hitro migrirajo v kraško-razpoklinski vodonosnik. Benzen je posebej problematičen, saj je rakotvoren, medtem ko lahko toluen in ksilen povzročata nevrološke

motnje. BTX spojine sodijo med prioritetne onesnaževalce, ki zahtevajo stalno spremljanje. Policiklični aromatski ogljikovodiki (PAH) nastajajo pri nepopolnem zgorevanju goriv, eksplozivov in drugih organskih snovi. V podzemno vodo prehajajo predvsem z vojaškimi eksplozijami, kurjenjem ter razlitji naftnih derivatov. Čeprav so slabo topni v vodi, se vežejo na delce tal in sedimentov, kjer ostajajo dolgotrajno prisotni. Zaradi svoje obstojnosti, bioakumulativnosti in kancerogenosti predstavljajo pomembno tveganje za okolje. Eksplozivne snovi (npr. TNT, RDX) se pojavljajo kot posledica uporabe streliva in eksplozivnih teles na vadiščih. V večini primerov gre za nitroaromatske spojine, ki so obstojne v okolju in lahko migrirajo v podzemno vodo. Njihova toksičnost je visoka, nekateri produkti razgradnje pa imajo kancerogene lastnosti. Vpliv eksplozivov na podzemno vodo je težko natančno napovedati, saj je njihov pojav v podzemni vodi odvisen tudi od vremenskih razmer, hidrogeoloških značilnosti ter fizikalno-kemijskih lastnosti snovi kot so npr. afiniteta do adsorbcije na sedimente, topnost v vodi, hitrost razgradnje, itd.

Preglednica 3: Inidkativni kemijski parametri izbrani za kemijske analize podzemne vode

Parameter	Odgovorni partner	kratica	CAS št.
Indikativni kemijski parametri			
Fluorid (mg/l)	Kemijski inštitut	F^-	6984-48-8
Acetat (mg/l)	Kemijski inštitut	CH_3COO^-	71-50-1
Format (mg/l)	Kemijski inštitut	$HCOO^-$	71-47-6
metansulfonska kislina - MSA (mg/l)	Kemijski inštitut	CH_3SO_3H	75-75-2
Bromat (mg/l)	Kemijski inštitut	$BrO3^-$	15541-45-4
Klorid (mg/l)	Kemijski inštitut	Cl^-	16887-00-6
Nitrit (mg/l)	Kemijski inštitut	NO_2^-	14797-65-0
Bromid (mg/l)	Kemijski inštitut	Br-	24959-67-9
Oksalat (mg/l)	Kemijski inštitut	$C_2O_4^{2-}$	14691-97-1
Fosfat (mg/l)	Kemijski inštitut	PO_4^3	14265-44-2
Kovine			
Aluminij (µg/l)	Kemijski inštitut	Al	7429-90-5
Antimon (µg/l)	Kemijski inštitut	Sb	7440-36-0
Baker (µg/l)	Kemijski inštitut	Cu	7440-50-8
Barij (µg/l)	Kemijski inštitut	Ba	7440-39-3
Berilij (µg/l)	Kemijski inštitut	Be	7440-41-7
Bor (µg/l)	Kemijski inštitut	B	7440-42-8
Cink (µg/l)	Kemijski inštitut	Zn	7440-66-6
Kadmij (µg/l)	Kemijski inštitut	Cd	7440-43-9
Kobalt (µg/l)	Kemijski inštitut	Co	7440-48-4
Kositer (µg/l)	Kemijski inštitut	Sn	7440-31-5
Mangan (µg/l)	Kemijski inštitut	Mn	7439-96-5
Molibden (µg/l)	Kemijski inštitut	Mo	7439-98-7
Nikelj (µg/l)	Kemijski inštitut	Ni	7440-02-0
Selen (µg/l)	Kemijski inštitut	Se	7782-49-2
Srebro (µg/l)	Kemijski inštitut	Ag	7440-22-4

Parameter	Odgovorni partner	kratica	CAS št.
Svinec (µg/l)	Kemijski inštitut	Pb	7439-92-1
Talij (µg/l)	Kemijski inštitut	Tl	7440-28-0
Telur (µg/l)	Kemijski inštitut	Te	13494-80-9
Vanadij (µg/l)	Kemijski inštitut	V	7440-62-2
Živo srebro (µg/l)	Kemijski inštitut	Hg	7439-97-6
Železo (µg/l)	Kemijski inštitut	Fe	7439-89-6
Lahkohlapni aromatski ogljikovodiki (BTX)			
benzen (µg/l)	Kemijski inštitut	BEN	71-43-2
toluen (µg/l)	Kemijski inštitut	TOL	108-88-3
etilbenzen (µg/l)	Kemijski inštitut	ETB	100-41-4
ksilen (-m, -p) (µg/l)	Kemijski inštitut	MPX	108-38-3; 106-42-3
ksilen (-o) (µg/l)	Kemijski inštitut	OX	95-47-6
Policiklični aromatski ogljikovodiki (PAH)			
naftalen (µg/l)	Kemijski inštitut	NAP	91-20-3
bifenil (µg/l)	Kemijski inštitut	BIPH	92-52-4
acenaftilen (µg/l)	Kemijski inštitut	ACY	208-96-8
acenaftelen (µg/l)	Kemijski inštitut	ACE	83-32-9
flouren (µg/l)	Kemijski inštitut	FLU	86-73-7
dibenzotiofen (µg/l)	Kemijski inštitut	DBT	132-65-0
fenantren (µg/l)	Kemijski inštitut	PHE	85-01-8
antracen (µg/l)	Kemijski inštitut	ANT	120-12-7
4-H-ciklopenta[def]fenantren (µg/l)	Kemijski inštitut	CPP	203-64-5
fluoranten (µg/l)	Kemijski inštitut	FLT	206-44-0
piren (µg/l)	Kemijski inštitut	PYR	129-00-0
benzo[c]fenantren (µg/l)	Kemijski inštitut	BcPHE	195-19-7
benzo[a]piren (µg/l)	Kemijski inštitut	BaP	50-32-8
Eksplozivi (nitroaromatske spojine)			
pentaeritritol tetranitrat (µg/l)	Kemijski inštitut	PETN	78-11-5
pikrinska kislina (µg/l)	Kemijski inštitut	PA	88-89-1
1,3,5-trinitrobenzen (µg/l)	Kemijski inštitut	TNB	99-35-4
2-nitrotoluen (µg/l)	Kemijski inštitut	2-NT	88-72-2
3-nitrotoluen (µg/l)	Kemijski inštitut	3-NT	99-08-1
nitrobenzen (µg/l)	Kemijski inštitut	NB	98-95-3
tetryl (µg/l)	Kemijski inštitut	TETRYL	479-45-8
2,6-dinitrotoluen (µg/l)	Kemijski inštitut	2,6-DNT	606-20-2
2,4-dinitrotoluen (µg/l)	Kemijski inštitut	2,4-DNT	121-14-2
2-amino-4,6-dinitrotoluen (µg/l)	Kemijski inštitut	2A-DNT	35572-78-2
4-amino-2,6-dinitrotoluen (µg/l)	Kemijski inštitut	4A-DNT	19406-51-0
hexahidro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazin (µg/l)	Kemijski inštitut	RDX	121-82-4

Parameter	Odgovorni partner	kratica	CAS št.
2,4,6-trinitrotoluen (µg/l)	Kemijski inštitut	TNT	118-96-7
nitroguanidin (µg/l)	Kemijski inštitut	NQ	556-88-7
nitroglicerin (µg/l)	Kemijski inštitut	NG	55-63-0
1,3 - dinitrobenzen (µg/l)	Kemijski inštitut	1,3-DNB	99-65-0

Izotopska analiza stabilnih izotopov vodika (δ^2H – devterij) in kisika (^{18}O) (Preglednica 4) predstavlja pomembno orodje za določanje izvora, starosti in dinamike podzemne vode. Razmerja med izotopi se spreminjajo zaradi procesov v hidrološkem ciklu, kot so izhlapevanje, kondenzacija, mešanje vodnih mas ter vpliv temperature in nadmorske višine na območju napajanja. Meritve se izražajo v δ-vrednostih (δ^2H in δ^{18}O) glede na mednarodni standard VSMOW. Na podlagi izotopskih podatkov je mogoče opredeliti območje napajanja, sezonske in podnebne vplive, mešanje različnih vodnih virov ter potrditi hidrogeološke povezave med vodonosniki. Ker izotopi niso podvrženi kemijskim reakcijam v vodonosniku, predstavljajo zanesljiv naravni sledilnik, ki je ključen za oceno ranljivosti vodonosnikov, potrjevanje modelov toka, analizo vpliva črpanja ter celostno upravljanje vodnih virov.

Preglednica 4: Izotopske analize izbrane za analize podzemne vode

Parameter	Odgovorni partner	kratica	CAS št.
Izotopska sestava podzemne vode			
izotop vodika – devetrij (‰)	Geološki zavod Slovenije	^{2}H	7782-39-0
izotop kisika (‰)	Geološki zavod Slovenije	^{18}O	14314-42-2

Analize radioaktivnosti v podzemnih vodah (Preglednica 5) vključujejo spremljanje naravnih radionuklidov, kot so U-238, Ra-226, Ra-228, Th-228, Pb-210 in K-40, ter kozmogenih in antropogenih radionuklidov, kot sta Be-7, Cs-137 in H-3 (tritij). Spremljanje radionuklidov je pomembno za oceno naravne radioaktivne obremenitve vodonosnika, prepoznavanje antropogenih vplivov ter določanje starosti in dinamike podzemne vode. V bližini vojaških vadišč so takšne analize še posebej pomembne, saj se tam uporabljajo eksplozivna sredstva in strelivo, ki lahko prispevajo k dodatnim obremenitvam okolja. Sistematično spremljanje radioaktivnosti tako omogoča pravočasno zaznavanje tveganj, potrjevanje hidrogeoloških modelov in zagotavljanje varnega upravljanja vodnih virov.

Preglednica 5: Parametri analize radioaktivnosti v podzemnih vodah

Parameter	Podizvajalec	kratica	CAS št.
Analize radioaktivnosti v podzemni vodi			
Uran-238 (Bq/m^3)	Institut Jožef Stefan	U-238	7440-61-1
Radij-226 (Bq/m^3)	Institut Jožef Stefan	Ra-226	13982-63-3
Svinec-210 (Bq/m^3)	Institut Jožef Stefan	Pb-210	14255-04-0
Radij-228 (Bq/m^3)	Institut Jožef Stefan	Ra-228	15262-20-1
Torij-228 (Bq/m^3)	Institut Jožef Stefan	Th-228	15065-10-8
Kalij-40 (Bq/m^3)	Institut Jožef Stefan	K-40	13966-00-2
Berilij-7 (Bq/m^3)	Institut Jožef Stefan	Be-7	13966-01-3
Cezij-137 (Bq/m^3)	Institut Jožef Stefan	Cs-137	10045-97-3

Tritij (vodik-3) (Bq/m^3)	Institut Jožef Stefan	H-3	10028-17-8

Poleg osnovnih in indikativnih kemijskih parametrov lahko prisotnost vojaških aktivnosti in večjega števila vojaškega osebja na območju kraškega vodonosnika negativno vpliva na mikrobiološko kakovost podzemnih in površinskih vod. Posledično lahko pride tudi do poslabšanja mikrobiološkega stanja vodnih virov, ki zajemajo vodo iz teh vodonosnikov. V okviru projekta smo zato uporabili mikrobiološke analitske metode, ki omogočajo optimalen nadzor in zanesljivo spremljanje mikrobioloških značilnosti obravnavanih podzemnih vod (Preglednica 6).

Preglednica 6: Nabor merjenih mikrobioloških parametrov v podzemni vodi

Parameter	Odgovorni partner	kratica
Mikrobiološki pregled vode		
Escherichia coli (E. coli)	Microbium d.o.o.	EC
Ostali koliformi	Microbium d.o.o.	COL
Entercoccuss sp.	Microbium d.o.o.	ETC
Mikrobni izvor - MST		
Univerzalni bakterijski označevalec fekalnega onesnaženja	Nacionalni inštitut za biologijo	AllBac
Bakterijski označevalec humanega fekalnega onesnaženja	Nacionalni inštitut za biologijo	BacHuman
Virus mile lisavosti paprike (označevalec prispevka zlasti, a ne izključno, humanega fekalnega onesnaženja)	Nacionalni inštitut za biologijo	PMMoV
Humani adenovirus – označevalec za humano fekalno onesnaženje	Nacionalni inštitut za biologijo	HAdV
Bakterijski označevalec fekalnega onesnaženja s strani prežvekovalcev	Nacionalni inštitut za biologijo	BacCow
Bakterijski označevalec fekalnega onesnaženja s strani prašičev	Nacionalni inštitut za biologijo	Pig2Bac
Bakterijski označevalec fekalnega onesnaženja s strani ovc	Nacionalni inštitut za biologijo	SheepCyt
Bakterijski označevalec fekalnega onesnaženja s strani konjev	Nacionalni inštitut za biologijo	HorseCyt
Bakterijski označevalec fekalnega onesnaženja s strani perutnine	Nacionalni inštitut za biologijo	PLBif

6.2. Uporabljene merilne metode in merilna oprema

6.2.1. Merilna oprema za določanje terenskih parametrov

Meritve terenskih parametrov predstavljajo ključni del spremljanja stanja podzemne vode, saj omogočajo takojšnje vrednotenje osnovnih fizikalno-kemijskih značilnosti vodnega vzorca na lokaciji.

Uporabljene metode meritev terenskih parametrov, ki smo jih merili v podzemni vodi so podrobneje predstavljene v Preglednici 7.

Preglednica 7: Nabor merjenih terenskih parametrov v podzemni vodi

Parameter	Merilna oprema	LOD	LOQ
Terenski parametri			
Temperatura vode (°C)	Multiline 3430, WTW	/	/
pH vrednost	Multiline 3430, WTW	/	/
Električna prevodnost, 20 °C (µS/cm)	Multiline 3430, WTW	/	/
Redoks potencial (mV)	Multiline 3430, WTW	/	/
Raztopljeni kisik (mg/l)	Multiline 3430, WTW	/	/

**LOD – meja zaznavnosti; LOQ – meja določljivosti*

6.2.2. Merilna metoda za ionske in elementne kemijske analize podzemne vode

Kvantifikacija petih kationov (NH_4^+, Na^+, K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}) ter dvanajstih organskih in anorganskih anionov je bila izvedena z ionsko kromatografskim sistemom Dionex ICS-3000, opremljenim z generatorjem eluenta, elektrokemičnim supresijskim sistemom in prevodnostnim detektorjem. Določevanje kationov je potekalo na analitski koloni Dionex IonPac CS16 (4 µm, 4 × 250 mm) pri pretoku 0,6 ml min^{-1} z izokratsko elucijo 30 mM metansulfonske kisline, medtem ko je bila temperatura kolone vzdrževana pri 40 °C. Ločevanje anionov je bilo izvedeno na analitski koloni Dionex IonPac AS11-HC (4 × 250 mm) z zaščitno kolono AG11-HC (4 × 50 mm) pri pretoku 1,0 ml min^{-1}. Elucijski program je vključeval izokratsko elucijo z 1 mM KOH od 0 do 15 min, nato gradient: 15–29 min do 15 mM KOH, 29–42 min do 30 mM KOH, 42–50 min do 60 mM KOH, ter zaključno izokratsko elucijo od 50 do 55 min z 60 mM KOH. Volumen injiciranja je znašal 50 µl. V teh pogojih je bilo kvantificiranih 12 anionov: fluorid (F^-), laktat ($C_3H_5O_3^-$), acetat ($C_2H_3O_2^-$), format (CHO_2^-), metansulfonat ($CH_3SO_3^-$, MS^-), klorid (Cl^-), nitrat (NO_3^-), maleat ($C_4H_2O_4^{2-}$), sulfat (SO_4^{2-}), oksalat ($C_2O_4^{2-}$) in fosfat (PO_4^{3-}).

Analiza elementne sestave je bila izvedena z ICP-MS sistemom Agilent 7500ce Series, opremljenim z oktopolno kolizijsko celico (Agilent, ZDA). Uporabljeni plazemski pogoji so bili: RF moč 1559 W, globina vzorčenja 10 mm, pretok nosilnega plina 0,90 l min^{-1}, pretok dodanega plina 0,15 l min^{-1}, hitrost črpalke razpršilnika 0,1 rps in hitrost črpalke za dovod vzorca 0,1 rps. Vzorci za določanje Hg in Sn so bili zakisani z zlatotopko (mešanico HCl in HNO_3), medtem ko so bili za analizo drugih elementov vzorci zakisani samo z HNO_3.

Preglednica 8: Nabor merjenih osnovnih in indikativnih parametrov v podzemni vodi

Parameter	Merilna metoda	LOD	LOQ
Osnovni kemijski parametri			
Amonijev ion (mg/l)	Ionska kromatografija s prevodnostno detekcijo	0,05	0,1
Natrij (mg/l)	Ionska kromatografija s prevodnostno detekcijo	0,05	0,1

Parameter	Merilna metoda	LOD	LOQ
Kalij (mg/l)	Ionska kromatografija s prevodnostno detekcijo	0,3	0,9
Kalcij (mg/l)	Ionska kromatografija s prevodnostno detekcijo	0,05	0,1
Magnezij (mg/l)	Ionska kromatografija s prevodnostno detekcijo	0,3	0,8
Nitrati (mg/l)	Ionska kromatografija s prevodnostno detekcijo	0,08	0,2
Sulfati (mg/l)	Ionska kromatografija s prevodnostno detekcijo	0,1	0,3
Kloridi (mg/l)	Ionska kromatografija s prevodnostno detekcijo	0,3	0,9
Indikativni kemijski parametri			
Fluorid (mg/l)	Ionska kromatografija s prevodnostno detekcijo	0,07	0,2
Acetat (mg/l)	Ionska kromatografija s prevodnostno detekcijo	0,04	0,1
Format (mg/l)	Ionska kromatografija s prevodnostno detekcijo	0,05	0,1
metansulfonska kislina - MSA (mg/l)	Ionska kromatografija s prevodnostno detekcijo	0,05	0,1
Bromat (mg/l)	Ionska kromatografija s prevodnostno detekcijo	0,05	0,1
Klorid (mg/l)	Ionska kromatografija s prevodnostno detekcijo	0,05	0,1
Nitrit (mg/l)	Ionska kromatografija s prevodnostno detekcijo	0,05	0,1
Bromid (mg/l)	Ionska kromatografija s prevodnostno detekcijo	0,07	0,2
Oksalat (mg/l)	Ionska kromatografija s prevodnostno detekcijo	0,1	0,4
Fosfat (mg/l)	Ionska kromatografija s prevodnostno detekcijo	0,1	0,3
Kovine			
Aluminij (µg/l)	ICP-MS	0,01	0,05
Antimon (µg/l)	ICP-MS	0,01	0,05
Baker (µg/l)	ICP-MS	0,01	0,05
Barij (µg/l)	ICP-MS	0,01	0,05
Berilij (µg/l)	ICP-MS	0,01	0,05
Bor (µg/l)	ICP-MS	0,01	0,05
Cink (µg/l)	ICP-MS	0,01	0,05
Kadmij (µg/l)	ICP-MS	0,01	0,05
Kobalt (µg/l)	ICP-MS	0,01	0,05
Kositer (µg/l)	ICP-MS	0,01	0,05
Mangan (µg/l)	ICP-MS	0,01	0,05
Molibden (µg/l)	ICP-MS	0,01	0,05

Parameter	Merilna metoda	LOD	LOQ
Nikelj (µg/l)	ICP-MS	0,01	0,05
Selen (µg/l)	ICP-MS	0,01	0,05
Srebro (µg/l)	ICP-MS	0,01	0,05
Svinec (µg/l)	ICP-MS	0,01	0,05
Talij (µg/l)	ICP-MS	0,01	0,05
Telur (µg/l)	ICP-MS	0,01	0,05
Vanadij (µg/l)	ICP-MS	0,01	0,05
Živo srebro (µg/l)	ICP-MS	0,01	0,05
Železo (µg/l)	ICP-MS	0,01	0,05

**LOD – meja zaznavnosti; LOQ – meja določljivosti*

6.2.3. Razvoj GC-MS analizne metode za določanje onesnaževal v vodnih vzorcih

Za namene določanja koncentracij policikličnih aromatskih ogljikovodikov (PAH) ter lahko hlapnih aromatskih ogljikovodikov (BTX) v podzemni vodi (Preglednica 9) smo v okviru projekta razvili metodo, ki omogoča njihovo zanesljivo določanje z uporabo GC-MS sistema in kapilarne kolone HP-5ms. Poleg analitske metode smo optimizirali tudi postopek ekstrakcije teh spojin iz vodnih vzorcev. Metoda ekstrakcije in analize PAH in BTX je prilagojena ter delno modificirana glede na zahteve EU Direktive 2020/2184. Pri analizi uporabljamo ustrezne analitične in interne standarde, za postopek ekstrakcije pa standarde za obnovitev (t. i. recovery standarde), kar zagotavlja sledljivost in natančnost meritev.

Za določanje **BTX spojin** v vodnih vzorcih smo najprej razvili in optimizirali separacijsko metodo z uporabo plinske kromatografije in masnega detektorja. Čeprav je v literaturi veliko napisanega na to temo, je bilo praktično uporabnih informacij relativno malo. Optimizirali smo parametre, kot so temperatura inleta, temperaturni gradient kolone, temperatura prenosa (transfer temperature), način pretoka (split ali splitless), kolono (PDMS) in pretok v koloni. Po optimizaciji same kromatografske metode je bilo potrebno razviti tudi ekstrakcijsko metodo za BTX iz vodnih vzorcev. V skladu z literaturo smo preizkusili klasične metode tekoče-tekoče ekstrakcije, SPE (trdno-fazno ekstrakcijo), ter kombinacijo obeh. Nobena od teh metod ni bila ustrezna, saj je zadnji korak vedno vključeval izhlapevanje presežka topila z rotavaporjem, pri čemer so se BTX spojine bodisi razgradile ali skupaj s topilom uparile. BTX namreč imajo podobne vreliščne temperature kot topila, uporabljena za plinsko kromatografijo (GC). Zaradi tega smo se odločili za ekstrakcijo iz "headspace" (plinske faze nad vzorcem), pri čemer smo uporabili pristop Solid Phase Micro Extraction (SPME), ki v bistvu predstavlja statični "headspace". Za ta namen smo uporabili vlakna Carboxen/PDMS, ki so se izkazala za precej bolj učinkovita kot navadna PDMS (dimetilpolisiloksan) vlakna. Z uporabo Carboxen/PDMS vlaken smo dosegli skoraj 100-odstotni "recovery", kar pomeni, da je bila učinkovitost ekstrakcije iz vodnega medija skoraj popolna.

Ekstrakcija **PAH spojin** je potekala tudi z SPME-vlakni drugačne kemijske sestave, in sicer s PDMS/DVB, ki so bolj polarna in primerna za adsorpcijo PAH iz nad plinske faze vzorca. Tarčne PAH spojine so bile nato ločene na kapilarni GC-koloni HP-5ms in detektirane z masnim spektrometrom.

Preglednica 9: Nabor parametrov policikličnih aromatskih ogljikovodikov (PAH) in lahko hlapnih aromatskih ogljikovodikov (BTX)

Parameter	Merilna metoda	LOD	LOQ
Lahkohlapni aromatski ogljikovodiki (BTX)			
benzen (µg/l)	HS-SPME-GC-MS	0,09	0,3
toluen (µg/l)	HS-SPME-GC-MS	0,09	0,3
etilbenzen (µg/l)	HS-SPME-GC-MS	0,1	0,3
ksilen (-m, -p) (µg/l)	HS-SPME-GC-MS	0,1	0,3
ksilen (-o) (µg/l)	HS-SPME-GC-MS	0,09	0,3
Policiklični aromatski ogljikovodiki (PAH)			
naftalen (µg/l)	HS-SPME-GC-MS	41,5	125,8
bifenil (µg/l)	HS-SPME-GC-MS	9,8	29,7
acenaftilen (µg/l)	HS-SPME-GC-MS	6,8	20,6
acenaftelen (µg/l)	HS-SPME-GC-MS	245,1	742,6
flouren (µg/l)	HS-SPME-GC-MS	6,8	20,6
dibenzotiofen (µg/l)	HS-SPME-GC-MS	9,3	28,1
fenantren (µg/l)	HS-SPME-GC-MS	30,9	93,8
antracen (µg/l)	HS-SPME-GC-MS	6	18,1
4-H-ciklopenta[def]fenantren (µg/l)	HS-SPME-GC-MS	4,4	13,3
fluoranten (µg/l)	HS-SPME-GC-MS	27,7	83,8
piren (µg/l)	HS-SPME-GC-MS	38,1	115,4
benzo[c]fenantren (µg/l)	HS-SPME-GC-MS	58,7	178
benzo[a]piren (µg/l)	HS-SPME-GC-MS	73,2	221,7

**Head Space- Solid Phase Micro Extraction- Gass Chromatography- Mass spectrometry (HS-SPME-GC-MS).*
***LOD – meja zaznavnosti; LOQ – meja določljivosti*

6.2.4. Razvoj analitike za določanje nitroaromatskih spojin (ostanki eksplozivov) v vodnem mediju

Na podlagi pregleda literature smo za razvoj analitske metode opredelili nabor 16 spojin (t. i. markerjev za eksploziva), ki smo jih v okviru projekta spremljali v vzorcih podzemne vode (Preglednica 10). Spojine, kot so oktahidro-1,3,5,7-tetranitro-1,3,5,7-tetrazocin (HMX), dinitrozo-heksahidro-1,3,5-triazin (DNX), nitrozo-dinitro-heksahidro-1,3,5-triazin (MNX) in trinitrozo-heksahidro-1,3,5-triazin (TNX), se sicer pogosto pojavljajo kot onesnaževala, povezana z razgradnjo eksplozivov, vendar jih zaradi njihove ne dobavljivosti na trgu v razvoj metode nismo mogli vključiti. V okviru projekta je bila razvita metoda na osnovi tekočinske kromatografije visoke ločljivosti (HPLC) z UV-detekcijo, ki omogoča ločevanje in kvantitativno določanje analitov iz Preglednice 10. Izjema je nitroguanidin, ki se iz kromatografske kolone eluira v mrtvem času, zaradi česar njegova določitev z razvito metodo ni mogoča.

Preglednica 10: Nabor parametrov (markerjev) za eksploziva

Parameter	Merilna metoda*	LOD	LOQ
Eksplozivi (nitroaromatske spojine)			
pentaeritritol tetranitrat (µg/l)	HPLC-UV	0,2	0,5

Parameter	Merilna metoda*	LOD	LOQ
pikrinska kislina (µg/l)	HPLC-UV	0,1	0,4
1,3,5-trinitrobenzen (µg/l)	HPLC-UV	0,1	0,4
2-nitrotoluen (µg/l)	HPLC-UV	0,2	0,8
3-nitrotoluen (µg/l)	HPLC-UV	0,2	0,7
Nitrobenzen (µg/l)	HPLC-UV	0,3	0,9
Tetryl (µg/l)	HPLC-UV	0,1	0,5
2,6-dinitrotoluen (µg/l)	HPLC-UV	0,2	0,7
2,4-dinitrotoluen (µg/l)	HPLC-UV	0,2	0,7
2-amino-4,6-dinitrotoluen (µg/l)	HPLC-UV	0,1	0,3
4-amino-2,6-dinitrotoluen (µg/l)	HPLC-UV	0,1	0,5
hexahidro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazin (µg/l)	HPLC-UV	0,1	0,4
2,4,6-trinitrotoluen (µg/l)	HPLC-UV	0,2	0,7
Nitroguanidin (µg/l)	HPLC-UV	n.d.	n.d.
Nitroglicerin (µg/l)	HPLC-UV	0,3	1
1,3 – dinitrobenzen (µg/l)	HPLC-UV	0,2	0,6

**LOD – meja zaznavnosti; LOQ – meja določljivosti*

*** metoda je bila v sklopu projekta razvita in validirana ter objavljena v znanstveni reviji (ALBREHT, Alen, KOROŠA, Anja. Environmental chemistry and ecotoxicology.* ***2025****, vol. 7, 753-761.)*

n.d. – metoda ne omogoča določevanja

6.2.5. Mikrobiološki pregled vode (*E.coli*, koliformni organizmi in Enterococcus sp.)

Za določanje števila indikatorskih bakterij smo uporabili metodi najverjetnejšega števila (MPN) - ISO9308-1:2012 ter klasično filtracijsko metodo z direktnim štetjem kolonij (CFU) - ISO9308-1:2014 in ISO7899-2:2000 za *E.coli*/koliforme ter Enterokoke (Preglednica 11). Kljub različnim principom delovanja sta metodi primerljivi in zagotavljata zanesljivo oceno prisotnosti fekalnih indikatorjev v podzemni vodi. Detekcija indikatorskih bakterij predstavlja prvi korak pri oceni tveganja, medtem ko za natančnejšo identifikacijo izvora onesnaženja pogosto uporabljamo naprednejše genske metode, ki pa so običajno povezane z višjimi stroški. Metoda najverjetnejšega števila (MPN) je bila izvedena z napravo Microbium® MPN Pro Analyser v skladu s standardom ISO 9308-2:2012. Vzorce podzemne vode smo serijsko redčili do 10^{-3}, nato dodali Microbium reagent ter po raztapljanju reagenta vzorce prenesli v napravo in izvedli inkubacijo pri 36 ± 2 °C v trajanju 24 ur.

Klasične mikrobiološke analize smo izvedli po standardih ISO 9308-1:2014 in ISO 7899-2:2000, kjer smo 100 mL vzorca filtrirali skozi membranski filter s porami 0,45 µm ter filtre prenesli na selektivni gojišči CCA-ISO (za koliforme in *E. coli*) in SBA (za enterokoke). Inkubacija je potekala pri 35 ± 2 °C, v trajanju 21 ± 3 ur. Za vse uporabljene metode smo pripravili ustrezne negativne kontrole za preverjanje sterilnosti medijev in gojišč, kar zagotavlja zanesljivost in sledljivost rezultatov.

Preglednica 11: Nabor merjenih parametrov mikrobiološkega pregleda podzemne vode

Parameter	Merilna metoda	LOD	LOQ
Mikrobiološki pregled vode			
E. coli	MPN (ISO 9308-2)	1	70*
Koliformni organizmi	MPN (ISO 9308-2)	1	70*
E. coli	Membranska filtracija (ISO 9308-1)	1	300*
Koliformni organizmi	Membranska filtracija (ISO 9308-1	1	300*
Enterokoki	Membranska filtracija (ISO 7899-2:2000)	1	300*

** V primeru, da koncentracija mikroorganizmov v preiskovanem vzorcu vode presega vrednost LOQ, je potrebno pripraviti redčitev vzorca. **LOD – meja zaznavnosti; LOQ – meja določljivosti*

6.2.6. Delovni postopek določanja in spremljanja prisotnosti mikrobnih indikatorjev fekalnega onesnaženja v vodi - Metoda sledenja mikrobnemu izvoru (MST – Microbial Source Tracking)

Za izbrane indikatorje fekalnega onesnaženja (Preglednica 12) smo v okviru projekta vzpostavili detekcijsko metodo za določanje njihove prisotnosti z uporabo kvantitativne verižne reakcije s polimerazo (qPCR). Za vsak qPCR test smo ovrednotili učinkovitost pomnoževanja ter določili mejo zaznavnosti, obenem pa smo na osnovi vzorcev blata posameznega tarčnega gostitelja preverili specifičnost testov in njihovo morebitno navzkrižno reaktivnost. Določili smo tri pristope za koncentriranje večjih volumnov vodnih vzorcev, ki smo jih preizkusili pri vzpostavitvi celotnega postopka za zaznavanje in spremljanje prisotnosti oziroma odsotnosti izbranih indikatorjev v vodi. Prva metoda temelji na uporabi sistema Innovaprep (kombinacija LVC in CP), druga na aktivnem filtriranju preko filtrirnega papirja, tretja pa na pasivnem vzorčenju z uporabo filtrirnih papirjev v t.i. pasivnih vzorčevalnikih »torpedo«. Za metodo koncentriranja z uporabo filtrirnega papirja smo predhodno ovrednotili učinkovitost dveh različnih filtrov (0,45 µm EZ-Pak Millipore in 0,22 µm MF-Millipore) pri zadrževanju tarčnih indikatorjev ter uspešnost treh postopkov izolacije nukleinskih kislin (QiAmp Viral RNA Kit, QiAmp Blood and Tissue Kit ter Maxwell Pure Food and GMO Authentication Kit). Obe filtrni membrani sta se izkazali kot ustrezni za določanje izbranih indikatorjev, pri filtru z manjšimi porami (0,22 µm) pa lahko pri večjih vzorcih pride do mašenja. Vse tri testirane metode izolacije nukleinskih kislin so dale ustrezne rezultate.

Na podlagi preliminarnih rezultatov se je kot najučinkovitejša in najhitrejša izkazala metoda koncentriranja z uporabo sistema Innovaprep (LVC v kombinaciji s CP), ki je bila posledično izbrana in uporabljena v okviru monitoringa na terenu. Druga najprimernejša metoda je aktivno filtriranje, pri katerem pa nas omejuje količina vode, ki jo je mogoče prefiltrirati (v testu smo uspeli prefiltrirati 16 l vode iz pipe, obogatene s 300 ml iztoka odpadne vode). Najmanj učinkovita se je izkazala metoda pasivnega vzorčenja, pri čemer je treba upoštevati, da je bila v testu izpostavljenost omejena na 24 ur, medtem ko bi bila v naravnih pogojih lahko bistveno daljša.

Preglednica 12: Seznam uporabljenih označevalcev mikrobnega izvora

Parameter	Merilna metoda	LOD* Cq (število kopij/ml)	LOQ* Cq (število kopij/ml)
Mikrobni izvor - MST			
AllBac	qPCR	35,08 (8,95)	35,08 (8,95)
BacHuman	qPCR	30,29 (121,88)	27,61 (1218,77)
PMMoV	RT-qPCR	36,7	34,13
HAdV	qPCR	34,45 (12,56)	25,12 (1256,2)
BacCow	qPCR	37,99 (6,45)	33,88 (64,5)
Pig2Bac	qPCR	37,57 (0,47)	34,45 (4,68)
SheepCyt	qPCR	35,88 (7,94)	30,38 (79,43)
HorseCyt	qPCR	37,40 (0,78)	26,16 (778,88)
PLBif	qPCR	37,99 (0,51)	34,05 (5,13)

qPCR – kvantitativna verižna reakcija s polimerazo; RT-qPCR - kvantitativna verižna reakcija s polimerazo z obratnim prepisovanjem

**Vrednosti LOD (meja zaznavnosti) in LOQ (meja določljivosti) sta prikazani kot cikel pri katerem fluorescenca pri pomnoževanju nukleinskih kislin v reakciji qPCR preseže pražno vrednost (Cq: quantification cycle), ter v oklepajih ujemajoče preračunano število kopij na µl reakcije, razen v PMMoV pri katerem je prikazana samo Cq vrednost.*

6.3. Spremljanje ter interpretacija rezultatov meritev posameznih relevantnih parametrov za vojaške dejavnosti v okviru projekta

6.3.1. Terenske meritve parametrov v podzemni vodi

Terenske meritve podzemne vode so ključne za oceno hidrogeoloških razmer in kakovosti vodnega vira. Med standardne meritve spadajo osnovni fizikalno-kemijski parametri, kot so temperatura, pH, električna prevodnost (EC), redoks potencial (ORP) in koncentracija raztopljenega kisika (OXI). Temperatura vpliva na topnost plinov, viskoznost in hitrost kemijskih reakcij ter je pomembna za pravilno interpretacijo ostalih parametrov. pH določa kislost ali bazičnost vode in vpliva na topnost kovin, korozivnost ter geokemične procese. Električna prevodnost odraža vsebnost raztopljenih ionov in omogoča prepoznavanje sprememb v mineralizaciji ali morebitnih antropogenih vplivov. Koncentracija raztopljenega kisika in ORP prikazujeta oksidacijsko-redukcijske razmere, ki so pomembne za mikrobno aktivnost, mobilnost težkih kovin in prisotnost redoks-aktivnih snovi. Terenske meritve tako zagotavljajo takojšen vpogled v stanje vodonosnika, omogočajo pravilno interpretacijo laboratorijskih analiz ter pravočasno zaznavanje sprememb ali vplivov na podzemno vodo.

Terenske analize kraških voda (Preglednica 13) potrjujejo že dosedanje raziskave toka podzemne vode kraškega vodonosnika Javornikov. Temperatura vode se giblje med 7,5 in 21,7 °C, pri čemer so najvišje vrednosti izmerjene v poletnih mesecih, predvsem na merilnih mestih Kotliči in Stržen, kar nakazuje vpliv sezonskih sprememb in možen prispevek površinske vode. V zimskem obdobju so temperature nižje (7,5–9,3 °C), kar je skladno s tipičnimi podzemnimi vodami, kjer prevladujejo letna povprečja in omejen stik z atmosfero. Električna prevodnost (EC) se giblje med 307 in 416 µS/cm, pri čemer so vrednosti med vzorčnimi mesti večinoma izenačene, kar kaže na stabilno hidrološko stanje in odsotnost

večjih virov oz. vnosa onesnaževal v vodonosnik. pH vode je rahlo baličen, med 7,2 in 8,11, z najvišjimi vrednostmi na Izviru Rak in Strženu, kar odraža naravno karbonatno sestavo vodonosnika. ORP se giblje med 198,9 in 386,9 mV, kar kaže na prevladujoče oksidativne razmere; višje vrednosti ORP so zaznane na dobro prezračenih in hidravlično aktivnih mestih, kot sta Kotliči in Izvir Malni. Vsebnost raztopljenega kisika (OXI) je razmeroma visoka (5,8–12,43 mg/l), kar nakazuje delni stik z atmosfero ali prisotnost reaktivnih hidroloških tokov, medtem ko so najnižje vrednosti prisotne v vrtini V-1 (Žeje) in na Strženu, kar odraža daljši zadržek vode ali lokalno zmanjšano prezračevanje. Nasičenost s kisikom (OXI) se giblje med 76 % in 111 %, najnižje pa so vrednosti 57–78 % na Strženu, Kotličih in V-1, kar je skladno z rahlo nižjo koncentracijo kisika in ORP.

Celotno območje kaže stabilno geokemično stanje, prevladujoče oksidativne razmere, ki so značilne za karbonatni sistem. Sezonske spremembe, predvsem v temperaturi in EC, so pričakovane in odražajo vpliv padavin, sezonskih sprememb površinske vode ter lokalne hidrogeološke značilnosti. Meritve potrjujejo heterogenost vodonosnika: izvira Unica in Rak sta dobro prezračena in hidravlično aktivna, vrtina V-1 predstavlja globlji, počasnejši del sistema z nižjo temperaturo, višjo mineralizacijo in nižjo vsebnostjo kisika, medtem ko so izvira Kotliči in Stržen bolj površinsko aktivna z višjo temperaturo in nekoliko nižjo koncentracijo kisika. Vse vrednosti pH in električne prevodnosti so v mejah naravnega ozadja, podzemna voda pa je nasičena s kisikom, kar potrjuje odprti tip vodonosnika.

Preglednica 13: Rezultati terenskih meritev v podzemni vodi v vseh treh serijah vzorčenj

	Datum vzorčenja	Izvir Malni	Unica	Kotliči	Izvir Rak	Stržen	V-1 (Žeje)
T (°C)	julij 2024	16,10	13,00	21,70	18,90	21,60	11,60
	november 2024	8,50	8,40	8,10	8,50	7,50	9,30
	julij 2025	10,30	10,00	16,80	15,00	16,50	/
EC (µS/cm)	julij 2024	365,00	324,00	344,00	380,00	344,00	385,00
	november 2024	416,00	307,00	346,00	377,00	361,00	372,00
	julij 2025	355,00	392,00	346,00	317,00	375,00	/
pH	julij 2024	7,43	7,65	7,39	7,89	7,50	7,20
	november 2024	7,74	7,75	7,83	8,11	7,68	7,37
	julij 2025	7,53	7,61	7,42	7,95	7,96	/
ORP (mV)	julij 2024	253,50	323,50	221,90	255,50	236,00	210,30
	november 2024	224,40	249,30	248,50	226,40	219,20	198,90
	julij 2025	381,10	314,70	386,90	336,90	343,70	/
OXI (mg/l)	julij 2024	8,50	10,94	6,79	9,59	6,39	5,80
	november 2024	11,29	12,43	11,75	12,43	10,40	10,59
	julij 2025	9,49	11,12	7,13	9,60	7,97	/
OXI (%)	julij 2024	91,00	109,00	76,90	109,40	76,90	57,30
	november 2024	100,20	111,30	104,30	111,50	92,50	96,40
	julij 2025	88,80	103,30	78,10	101,70	84,30	/

6.3.2. Osnovni kemijski parametri

Osnovni kemijski parametri podzemne vode so ključni za razumevanje njenega izvora, kakovosti in geokemijskih procesov v vodonosniku. Med najpomembnejšimi so koncentracije glavnih ionov in hranil, ki omogočajo določitev hidrogeokemijskega tipa vode, oceno antropogenih vplivov ter spremljanje dolgoročnih sprememb v okolju. Kemijska sestava odraža interakcije med vodo, geološko podlago in morebitnimi lokalnimi viri onesnaženja, zato je redno spremljanje nujno za trajnostno upravljanje vodnih virov. Ionska analiza, ki vključuje glavne katione in anione, predstavlja osnovo za razumevanje mineralnega raztapljanja, mešanja vodnih mas ter prepoznavanje morebitnih obremenitev, s čimer omogoča celovito interpretacijo kemijskega ravnovesja in kakovosti podzemne vode.

Rezultati osnovnih kemijskih parametrov (Preglednica 14) kažejo, da imamo na tem območju opraviti s kraškimi podzemnimi vodami tipa Ca – Mg – HCO_3, kar je pričakovano. Zelo nizke vsebnosti Ca^{2+} v vzorcu izvira Malni iz junija 2024 so najverjetneje posledica analitske napake, saj so netipične za kraške vode. Vsebnosti Na^+ in K^+ ter SO_4^{2-} in Cl^- so na vseh preiskovanih merilnih mestih v mejah normale (naravno ozadje). V vodonosniku se med letoma 2024 in 2025 kaže jasna sezonska dinamika ter prepoznaven vpliv kmetijske rabe prostora. Vrednosti amonijevega kationa so bile v juliju 2024 povišane, kar kaže na vpliv svežih organskih virov, nato pa so se v novembru 2024 skoraj povsod znižale pod mejo zaznavnosti zaradi razredčevanja ob jesenskih pretokih. Julija 2025 so se vrednosti ponovno rahlo zvišale, vendar bistveno manj kot leto prej, kar nakazuje zmanjšanje obremenitve ali boljše razprševanje virov. Natrij in kloridi so v vseh obdobjih ostali nizki, z rahlimi jesenskimi povišanji, kar je značilno za vpliv padavin in deloma antropogenih parametrov. Kalij, ki je dober pokazatelj kmetijske rabe, ostaja relativno visok predvsem na Malnih, Strženu in Izviru Rak, kar potrjuje stalno prisotnost kmetijskih virov. Stabilne koncentracije kalcija in magnezija odražajo geološko sestavo vodonosnika, medtem ko nitrati kažejo postopno naraščanje od julija 2024 do julija 2025, kar pomeni okrepljen vpliv spiranja iz kmetijskih površin, čeprav vrednosti ostajajo daleč pod mejnimi. Sulfati so nizki in stabilni, brez pomembnih antropogenih vplivov. Skupni rezultati kažejo, da je sistem najbolj ranljiv na območju Malnov, Izvira Rak in Stržena, kjer se pojavljajo največja sezonska nihanja in znaki obremenitev.

Preglednica 14: Rezultati osnovnih kemijskih parametrov v podzemni vodi v vseh treh serijah vzorčenj

	Datum vzorčenja	Izvir Malni	Unica	Kotliči	Izvir Rak	Stržen	V-1 (Žeje)
Amonijev ion (mg/l)	julij 2024	1,08	0,41	0,53	0,61	0,67	0,4
	november 2024	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
	julij 2025	0,12	0,1	0,1	0,27	0,1	/
Natrij (mg/l)	julij 2024	<LOD	1,78	1,46	3,97	1,35	1,47
	november 2024	1,91	3,89	1,3	3,15	1,78	1,1
	julij 2025	2,1	1,42	1,42	3,14	4,55	/
Kalij (mg/l)	julij 2024	23,33	0,77	0,72	1,42	0,62	0,7
	november 2024	<LOD	1133	0,008	0,451	<LOD	0,55
	julij 2025	16,11	12,51	12,51	14,73	14,73	/
Kalcij (mg/l)	julij 2024	<LOD	65,3	55,54	49,73	55,7	63,7
	november 2024	69,56	52,7	62,17	52,69	59,63	71,21

	Datum vzorčenja	Izvir Malni	Unica	Kotliči	Izvir Rak	Stržen	V-1 (Žeje)
	julij 2025	52,86	46,98	46,98	40,2	38,04	/
Magnezij (mg/l)	julij 2024	37,21	6,6	9,46	19,04	9,88	8,32
	november 2024	9,11	4,68	7214	18,29	10,86	5554
	julij 2025	5,39	7,2	7,2	14,44	17,84	/
Nitrati (mg/l)	julij 2024	<LOD	1,94	<LOD	4,51	<LOD	1,84
	november 2024	4,81	5,2	4,95	3,69	3,45	5,1
	julij 2025	5,83	6,03	3,98	6,1	4,41	/
Sulfati (mg/l)	julij 2024	<LOD	1,77	<LOD	6,16	<LOD	1,7
	november 2024	2,8	4,19	2,5	3	3,02	2,3
	julij 2025	2,57	3,8	2,25	5,57	5,74	/
Kloridi (mg/l)	julij 2024	<LOD	2,25	<LOD	7,56	<LOD	1,59
	november 2024	3,21	5,7	2,19	5,52	3	1,7
	julij 2025	3,2	5,35	2,06	5,48	7,02	/

**LOD – meja zaznavnosti; LOQ – meja določljivosti*

6.3.3. Indikativni kemijski parametri

Indikativni kemijski parametri predstavljajo skupino osnovnih meritev, ki omogočajo hitro oceno splošnega kemijskega stanja podzemne vode. Med analiziranimi parametri se fluorid, klorid, bromid, nitrit, bromat in fosfat uvrščajo med anorganske ione, ki odražajo geološko sestavo okolja, atmosferske vnose ter vplive rabe tal. Fluorid je predvsem naravnega izvora in je povezan z minerali v vodonosniku, kloridi in bromidi pa lahko izhajajo tako iz naravnih kot antropogenih virov, vključno s kmetijstvom in poselitvijo. Nitrit in fosfat, skupaj z nitratom, sta ključna indikatorja hranilnih obremenitev in sta pogosto povezana z biološkimi procesi ali vnosom odpadnih voda, medtem ko se bromat lahko pojavi v sledovih kot posledica specifičnih oksidacijskih procesov. Organske spojine, kot so acetat, format, oksalat ter metansulfonska kislina (MSA), odražajo predvsem mikrobne procese, razgradnjo organske snovi in občasno tudi vpliv atmosferskih depozitov. Njihovi pojavi in koncentracije omogočajo vpogled v dinamiko pretakanja vode, stopnjo prezračevanja ter morebitne dotoke površinskih voda v kraški sistem. Ker so te spojine izjemno občutljive na spremembe v hidroloških in okoljskih razmerah, njihovo spremljanje predstavlja pomembno dopolnitev klasičnim parametrom kakovosti vode. Skupno spremljanje navedenih ionov in organskih kislin omogoča celovito oceno kemičnega stanja podzemne vode, identifikacijo naravnih in antropogenih vplivov ter zgodnje zaznavanje sprememb v kakovosti vodnega okolja, kar je ključnega pomena za zaščito in trajnostno upravljanje vodnih virov.

Analiza izbranih organskih in anorganskih spojin v podzemni vodi (Preglednica 15) kaže, da so bile vrednosti v letih 2024 in 2025 večinoma nizke ali pod mejo zaznavnosti, kar je značilno za dobro ohranjene kraške vodonosnike. Fluorid, bromid, nitrit, oksalat in bromat so bili tako v juliju kot novembru 2024 povsod pod mejo zaznavnosti, kar kaže na odsotnost pomembnih naravnih ali antropogenih virov teh ionov. V juliju 2025 se pojavi rahel dvig fluorida na vseh lokacijah, z najvišjo vrednostjo na Izviru Rak (0,08 mg/l) in Strženu (0,07 mg/l), kar pa je še vedno nizko in v okviru naravnih geokemičnih procesov. Najbolj izrazite spremembe so bile zabeležene pri organskih kislinah, predvsem acetatu in formatu. Medtem ko sta bila v letu 2024 povsod pod mejo zaznavnosti, se v juliju 2025 pojavi

izrazito povišanje, predvsem na Malnih, kjer je koncentracija acetata dosegla 4,46 mg/l, formata pa 4,40 mg/l. Podoben dvig formata je bil zabeležen tudi na Unici (5,94 mg/l), medtem ko so Kotliči, Izvir Rak in Stržen pokazali zmernejše ali minimalne odzive. Ti parametri lahko nakazujejo povečano razgradnjo organske snovi, vpliv mikrobioloških procesov ali dotok površinskega voda v poletnem času, kar je značilno za bolj dinamične dele kraškega sistema. Kloridi so pokazali največ prostorske in sezonske variabilnosti. Julija 2024 so bile vrednosti najvišje na Izviru Rak (7,56 mg/l), medtem ko so bili ostali izvori nizki. Novembra 2024 so se kloridi na več mestih povečali, kar odraža jesensko spiranje in mešanje voda. Julija 2025 so vrednosti znova nekoliko narasle, z najvišjimi koncentracijami na Strženu (7,02 mg/l) in Unici (5,35 mg/l), kar lahko kaže na kombinacijo naravnega mineralnega ozadja in delno antropogenih vplivov. Fosfati so bili večinoma pod mejo zaznavnosti, z izjemo Unice (0,30 mg/l v 2024) ter rahlega povišanja na Izviru Rak (0,16 mg/l) in Strženu (0,19 mg/l) v juliju 2025. Ker se fosfati lahko hitro absorbirajo na mineralne površine, lahko zaznani dvigi izvirajo iz lokalnih kmetijskih vplivov ali mikrobiološke razgradnje organske snovi v toplejšem delu leta. Skupno gledano rezultati kažejo, da je sistem v letu 2024 stabilen in nizko obremenjen, medtem ko se v poletnem obdobju 2025 pojavijo posamezni dvigi organskih anionov (acetat, format) ter rahlo povečanje fluorida in fosfatov. Prostorsko so največje spremembe zaznane na Malnih, Unici in Strženu, kar nakazuje večjo ranljivost teh delov kraškega sistema. Vrednosti ostajajo nizke in v večini primerov skladne z naravno geokemijsko dinamiko, z lokalnimi odstopanji, povezanimi predvsem s sezonskimi hidrološkimi razmerami in biogeokemijskimi procesi.

Preglednica 15: Rezultati indikativnih kemijskih parametrov v podzemni vodi v vseh treh serijah vzorčenj

	Datum vzorčenja	Izvir Malni	Unica	Kotliči	Izvir Rak	Stržen	V-1 (Žeje)
Fluorid (mg/l)	julij 2024	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
	november 2024	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
	julij 2025	0,03	0,04	0,04	0,08	0,07	/
Acetat (mg/l)	julij 2024	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
	november 2024	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
	julij 2025	4,46	0,42	<LOD	0,76	0,7	/
Format (mg/l)	julij 2024	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
	november 2024	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
	julij 2025	4,4	5,94	<LOD	<LOD	1,23	/
Metansulfonska kislina - MSA (mg/l)	julij 2024	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
	november 2024	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
	julij 2025	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	/
Bromat (mg/l)	julij 2024	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
	november 2024	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
	julij 2025	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	/
Klorid (mg/l)	julij 2024	<LOQ	2,25	<LOQ	7,56	<LOQ	1,59
	november 2024	3,13	3,21	5,7	2,19	5,52	3
	julij 2025	3,2	5,35	2,06	5,48	7,02	/
Nitrit (mg/l)	julij 2024	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
	november 2024	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
	julij 2025	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	/

	Datum vzorčenja	Izvir Malni	Unica	Kotliči	Izvir Rak	Stržen	V-1 (Žeje)
Bromid (mg/l)	julij 2024	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
	november 2024	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
	julij 2025		<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	/
Oksalat (mg/l)	julij 2024	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
	november 2024	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
	julij 2025	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	/
Fosfat (mg/l)	julij 2024	<LOD	0,3	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
	november 2024	<LOD	0,3	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
	julij 2025	<LOD	<LOD	<LOD	0,16	0,19	/

**LOD – meja zaznavnosti; LOQ – meja določljivosti*

6.3.3.1. Kovine

Spremljanje kovin v podzemni vodi je ključno za oceno njenega kemijskega stanja, identifikacijo naravnih geokemičnih procesov ter prepoznavanje morebitnih antropogenih vplivov. Elementi, kot so aluminij, železo, mangan in barij, so pogosto naravnega izvora in odražajo mineralno sestavo ter redoks razmere v vodonosniku. Težke kovine, med njimi svinec, kadmij, nikelj, kobalt, baker, cink, molibden, vanadij in živo srebro, se lahko pojavljajo v sledovih, njihova prisotnost pa je lahko posledica naravnega izluževanja ali vplivov človekove dejavnosti, kot so industrija, promet in raba tal. Elementi, kot so antimon, selen, talij, kositer, berilij, bor, srebro in telur, se praviloma pojavljajo v zelo nizkih koncentracijah, njihovo spremljanje pa omogoča zgodnje zaznavanje posebnih geokemičnih pogojev ali specifičnih točkovnih virov onesnaženja.

Analiza kovin v podzemni vodi (Preglednica 16) med julijem 2024 in julijem 2025 je pokazala izrazite prostorske in sezonske razlike. Večina elementov je bila v letu 2024 stabilna in nizka, medtem ko so se v poletju 2025 pojavili izrazni porasti, zlasti na merilnih mestih Izvir Rak in Stržen. Najbolj opazni so bili aluminij, bor, vanadij, železo in mangan, kar lahko nakazuje na povečano izpiranje mineralov, prisotnost suspendiranih delcev ter spremembe redoks razmer v vodonosniku. Večina težkih kovin, kot so kadmij, svinec, nikelj, baker in cink, je ostala na nizkih koncentracijah ali pod mejo zaznavnosti, pri čemer so nekatera mesta, npr. Izvir Malni, pokazala lokalno nekoliko višje vrednosti svinca, bakra in aluminija, kar kaže na vpliv lokalnega zaledja, vključno z območjem Cerkniškega polja in Javorniškega prispevnega zaledja. Vse izmerjene koncentracije so značilno nižje od dovoljenih mejnih vrednosti po Pravilniku o pitni vodi, razen meritve svinca na izviru Malni v juliju 2025, kjer je mejna vrednost presežena (Preglednica 16). Povišane vsebnosti na Izviru Rak, ki se nahaja gorvodno od Malnov, potrjujejo vpliv naravnega zaledja in geokemičnih procesov. Če povzamemo, zaradi nizkih koncentracij kovin, ki so večinoma na ravni naravnega ozadja, rezultati ne kažejo vpliva vojaških ali drugih specifičnih antropogenih dejavnosti.

Preglednica 16: Rezultati elementne kemijske analize parametrov v podzemni vodi v vseh treh serijah vzorčenj

	Datum vzorčenja	Izvir Malni	Unica	Kotliči	Izvir Rak	Stržen	V-1 (Žeje)
Aluminij (µg/l)	julij 2024	34,47	2,85	2,92	29,52	3,21	3,24
	november 2024	3,64	11,55	1,93	18,43	3,70	0,96
	julij 2025	29,38	17,76	1,44	1366,63	461,88	/
Antimon (µg/l)	julij 2024	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
	november 2024	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
	julij 2025	0,07	0,09	0,10	0,32	0,30	/
Baker (µg/l)	julij 2024	1,50	0,71	0,73	1,36	0,65	0,61
	november 2024	0,38	1,22	0,41	0,80	0,60	0,32
	julij 2025	0,57	0,43	0,34	1,80	1,52	/
Barij (µg/l)	julij 2024	6,03	5,87	5,66	6,43	5,01	4,62
	november 2024	2,69	6,19	2,52	3,26	3,01	2,84
	julij 2025	18,48	19,61	10,76	11,77	17,08	/
Berilij (µg/l)	julij 2024	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
	november 2024	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
	julij 2025	<LOD	<LOD	<LOD	0,07	<LOQ	/
Bor (µg/l)	julij 2024	5,73	7,41	2,80	5,05	2,32	3,86
	november 2024	2,31	5,13	1,90	3,61	2,34	2,01
	julij 2025	82,77	87,22	68,29	155,58	145,27	/
Cink (µg/l)	julij 2024	2,42	3,16	<LOD	13,00	<LOD	2,17
	november 2024	0,21	0,29	0,28	0,45	0,73	0,05
	julij 2025	1,33	1,02	0,46	2,28	3,07	/
Kadmij (µg/l)	julij 2024	<LOD	<LOD	<LOD	<LOQ	<LOD	0,02
	november 2024	<LOD	<LOD	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOD
	julij 2025	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	/
Kobalt (µg/l)	julij 2024	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ
	november 2024	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ
	julij 2025	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	/
Kositer (µg/l)	julij 2024	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
	november 2024	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
	julij 2025	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	/
Mangan (µg/l)	julij 2024	0,11	<LOQ	0,06	0,64	0,08	0,08
	november 2024	<LOQ	0,22	<LOQ	0,18	0,07	0,09
	julij 2025	0,16	0,07	0,17	3,46	1,10	/
Molibden (µg/l)	julij 2024	0,28	0,21	0,27	0,27	0,31	0,10
	november 2024	0,27	0,22	0,31	0,20	0,38	0,25
	julij 2025	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	/
Nikelj (µg/l)	julij 2024	0,29	0,14	0,20	0,40	0,20	0,14
	november 2024	0,12	0,41	0,12	0,14	0,13	0,05
	julij 2025	1,19	1,02	0,84	0,88	0,89	/
Selen (µg/l)	julij 2024	0,10	<LOQ	0,05	<LOD	0,15	<LOD
	november 2024	<LOQ	<LOQ	0,06	0,07	<LOQ	<LOQ

	Datum vzorčenja	Izvir Malni	Unica	Kotliči	Izvir Rak	Stržen	V-1 (Žeje)
	julij 2025	0,26	0,29	0,55	0,45	0,30	/
Srebro (µg/l)	julij 2024	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
	november 2024	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
	julij 2025	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	/
Svinec (µg/l)	julij 2024	0,56	0,20	0,20	1,30	0,20	0,20
	november 2024	0,08	<LOQ	0,10	0,12	0,09	<LOD
	julij 2025	14,13	0,50	1,00	1,73	1,28	/
Talij (µg/l)	julij 2024	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
	november 2024	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
	julij 2025	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	/
Telur (µg/l)	julij 2024	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
	november 2024	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
	julij 2025	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	/
Vanadij (µg/l)	julij 2024	0,53	0,55	0,35	0,73	0,15	0,55
	november 2024	0,32	0,31	0,29	0,39	0,31	0,40
	julij 2025	1,43	1,85	1,58	2,52	2,44	/
Živo srebro (µg/l)	julij 2024	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
	november 2024	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
	julij 2025	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	/
Železo	julij 2024	4,25	2,41	7,13	6,54	11,87	1,20
	november 2024	3,97	26,63	1,97	23,19	5,04	0,51
	julij 2025	40,28	42,69	35,74	162,50	84,77	/

**LOD – meja zaznavnosti; LOQ – meja določljivosti*

6.3.3.2. BTX (benzen, toluen, etil benzen in ksilen (-o, -m, -p)

Lahkohlapni aromatski ogljikovodiki (BTX), kamor sodijo benzen in njegovi derivati (toluen, etilbenzen ter izomeri ksilena), predstavljajo pomembne indikativne parametre za spremljanje vpliva goriv, maziv in drugih industrijskih dejavnosti na stanje podzemne vode. Med njihove najpogostejše vire sodijo izpusti motornih vozil, industrijskih objektov, uporaba topil, transport in skladiščenje bencina ter morebitna puščanja med prevozom surove nafte. Benzen je med njimi najbolj toksičen in kancerogen, zato so zanj mejne vrednosti najstrožje. Prisotnost BTX v podzemni vodi nakazuje sveže ali potekajoče onesnaženje, njihova porazdelitev pa odraža procese razprševanja, izhlapevanja ter mikrobne biodegradacije. Redno spremljanje BTX je nujno za oceno vpliva na okolje in za načrtovanje ustreznih sanacijskih ukrepov.

V Preglednici 17 so povzeti rezultati vseh treh serij vzorčenj. V prvi seriji so bili vsi parametri pod mejo zaznavnosti, razen benzena in toluena v Kotličih ter Strženu. Ker Stržen ponika na Cerkniškem polju in napaja izvir Kotliči, zaznava BTX spojin na obeh mestih nakazuje verjeten urbani vpliv (npr. odpadne vode). Višje koncentracije v Kotličih lahko izvirajo iz lokalnih virov onesnaženja (cesta, objekti v Rakovem Škocjanu), možen pa je tudi vpliv širšega območja kraškega vodonosnika Javornikov, kjer so potencialni viri tudi vojaške dejavnosti. V drugi in tretji seriji so bile vse koncentracije BTX spojin pod

mejo določljivosti. V Sloveniji sicer ni specifičnih zakonskih mejnih vrednosti za BTX v podzemni vodi, zato se upoštevajo splošne smernice za zaščito zdravja ljudi in ekosistemov. V prvi seriji vzorčenja so bile koncentracije benzena izrazito nad mejno vrednostjo za pitno vodo (1 µg/l), kar bi v primeru neposredne pitne rabe na teh dveh izvirih predstavljalo pomembno tveganje za zdravje ljudi. Ker pa analizirana podzemna voda ni namenjena oskrbi s pitno vodo, neposredno tveganje ni prisotno. Dejstvo, da v drugi in tretji seriji benzena nismo več zaznali nad mejo določljivosti oziroma zaznavnosti, nakazuje, da je šlo verjetno za kratkotrajen, izoliran dogodek onesnaženja. Vzorec iz julija 2024 najverjetneje odraža kratkotrajni dogodek (npr. lokalno razlitje goriva ali dotok onesnaženih voda).

Preglednica 17: BTX izmerjeni v vzorcih podzemne vode v vseh treh serijah vzorčenj

	Datum vzorčenja	Izvir Malni	Unica	Kotliči	Izvir Rak	Stržen	V-1 (Žeje)
Benzen (µg/l)	julij 2024	<LOQ	<LOQ	42,16	<LOQ	18,38	<LOQ
	november 2024	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ
	julij 2025	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ
Toluen (µg/l)	julij 2024	<LOD	<LOD	3,33	<LOD	0,85	<LOD
	november 2024	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
	julij 2025	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
Etilbenzen (µg/l)	julij 2024	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ
	november 2024	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ
	julij 2025	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ
ksilen (-m, -p) (µg/l)	julij 2024	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ
	november 2024	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ
	julij 2025	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ
ksilen (-o) (µg/l)	julij 2024	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
	november 2024	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
	julij 2025	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD

**LOD – meja zaznavnosti; LOQ – meja določljivosti*

6.3.3.3. PAH - policiklični aromatski ogljikovodiki

PAH (policiklični aromatski ogljikovodiki) predstavljajo skupino obstojnih organskih onesnaževal, ki nastajajo predvsem pri nepopolnem zgorevanju organskih snovi ter so prisotni tudi v proizvodih naftnega izvora. V podzemni vodi se pojavljajo redkeje kot BTX spojine, saj so slabo topne v vodi in se močno vežejo na organske delce ter delce tal, zato njihova prisotnost pogosto kaže na dolgotrajnejše ali zgodovinsko onesnaženje. Med njimi je benzo(a)piren najbolj toksičen in kancerogen ter zato tudi najstrožje reguliran, medtem ko je naftalen bolj mobilen in je njegov transport v vodonosniku lažji. Spremljanje PAH spojin v podzemni vodi je pomembno za oceno vpliva prometnih in industrijskih dejavnosti ter morebitnih izpustov goriv. V Preglednici 18 so prikazane izmerjene vrednosti vseh treh serij vzorčenj. Pri vseh treh serijah vzorčenj so bile koncentracije PAH spojin pretežno pod mejo zaznavnosti, kar kaže na zelo nizke koncentracije ali odsotnost teh spojin v vodonosniku. V prvi (julij 2024) in drugi seriji vzorčenja (november 2024) so bile vse analizirane PAH spojine pod mejo zaznavnosti na vseh merilnih mestih. V tretji seriji (julij 2025) se pojavi rahla sprememba, saj so bili

naftalen, fenantren in antracen zaznani na določenih lokacijah, vendar v koncentracijah pod mejo določljivosti, kar pomeni, da je bila njihova prisotnost verjetna, vendar ne v meri, ki bi omogočala zanesljivo kvantitativno ovrednotenje. Vse ostale PAH spojine so tudi v tretjem vzorčenju ostale pod mejo zaznavnosti. Takšen vzorec rezultatov kaže na zelo nizko obremenjenost obravnavanega vodonosnika s PAH-i ter na odsotnost pomembnih virov tovrstnega onesnaženja v neposrednem ali širšem zaledju merilnih mest.

Preglednica 18: PAH spojine izmerjene v vzorcih podzemne vode v vseh treh serijah vzorčenj

	Datum vzorčenja	Izvir Malni	Unica	Kotliči	Izvir Rak	Stržen	V-1 (Žeje)
Naftalen (µg/l)	julij 2024	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
	november 2024	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
	julij 2025	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	/
Bifenil (µg/l)	julij 2024	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
	november 2024	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
	julij 2025	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	/
Acenaftilen (µg/l)	julij 2024	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
	november 2024	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
	julij 2025	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	/
Acenaftelen (µg/l)	julij 2024	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
	november 2024	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
	julij 2025	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	/
Flouren (µg/l)	julij 2024	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
	november 2024	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
	julij 2025	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	/
Dibenzotiofen (µg/l)	julij 2024	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
	november 2024	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
	julij 2025	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	/
Fenantren (µg/l)	julij 2024	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
	november 2024	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
	julij 2025	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	/
Antracen (µg/l)	julij 2024	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
	november 2024	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
	julij 2025	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	/
4-H-ciklopenta[def]fenantren (µg/l)	julij 2024	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
	november 2024	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
	julij 2025	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	/
Fluoranten (µg/l)	julij 2024	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
	november 2024	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
	julij 2025	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	/
Piren (µg/l)	julij 2024	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
	november 2024	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
	julij 2025	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	/

	Datum vzorčenja	Izvir Malni	Unica	Kotliči	Izvir Rak	Stržen	V-1 (Žeje)
Benzo[c]fenantren (µg/l)	julij 2024	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
	november 2024	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
	julij 2025	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	/
Benzo[a]piren (µg/l)	julij 2024	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
	november 2024	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
	julij 2025	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	/

**LOD – meja zaznavnosti; LOQ – meja določljivosti*

6.3.3.4. Eksplozivi (nitroaromatske spojine)

Eksplozivi, katere v veliki meri predstavljajo nitroaromatske spojine, predstavljajo skupino specifičnih organskih onesnaževal, ki v okolje najpogosteje vstopajo zaradi vojaških dejavnosti, ki so se izvajale v preteklosti ali pa se izvajajo še danes, skladiščenja streliva ali industrijske proizvodnje eksplozivov. Gre za kemijsko obstojne spojine, ki se lahko v tleh in podzemni vodi zadržujejo daljši čas, njihova prisotnost pa je posebej zaskrbljujoča zaradi njihove toksičnosti in potencialnih kancerogenih učinkov. Veliko nitroaromatskih spojin je slabo biorazgradljivih in se lahko zaradi hidrogeoloških razmer širi na večje razdalje. Analiza teh spojin je ključna za oceno obremenjenosti okolja na območjih nekdanje vojaške ali industrijske rabe ter za načrtovanje ustreznih sanacijskih ukrepov.

Pri spremljanju nitroaromatskih spojin v podzemni vodi v okviru našega projekta (Preglednica 19), so bile v večini vzorčenj koncentracije pod mejo zaznavnosti, kar kaže na zelo nizko obremenjenost vodonosnika s temi spojinami. V posameznih primerih so bile nekatere spojine zaznane pod mejo določljivosti, kar pomeni, da je bila njihova prisotnost sicer zaznana, vendar v koncentracijah, ki ne omogočajo zanesljive kvantifikacije. LOQ se je v posameznem primeru gibala med 0,3 – 1 µg/l, odvisno od analita (Preglednica 10). Tako je bil RDX v juliju 2024 zaznan le na lokaciji Stržen pod LOQ, PETN pa je bil določen na merilnem mestu Unica v novembru 2024 (1,1 ± 0,1 µg/l) in zaznan v juliju 2025 na Strženu (0,72 ± 0,05 µg/l). Na merilnih mestih Kotliči in Stržen sta bila pod mejo določljivosti zaznana še 2,6-DNT in RDX. Vsi ostali analizirani parametri nitroaromatskih spojin so bili v vseh vzorčenjih pod mejo zaznavnosti (0,1 – 0,3 µg/l, odvisno od analita). Rezultati kažejo, da v obravnavanih vodnih telesih ni prisotnih značilnih virov onesnaženja s temi spojinami, prisotnost posameznih spojin pa je verjetno posledica majhnih, lokalnih ali preteklih vplivov. Skupno ocenjena koncentracija nitroaromatskih spojin v vzorčenih vodah nakazuje nizko tveganje onesnaženja podzemne vode s temi snovmi v obdobju vzorčenja.

Preglednica 19: Prisotnost nitroaromatskih spojin (eksplozivov) v preiskovanih vzorcih podzemne v vseh treh serijah vzorčenj

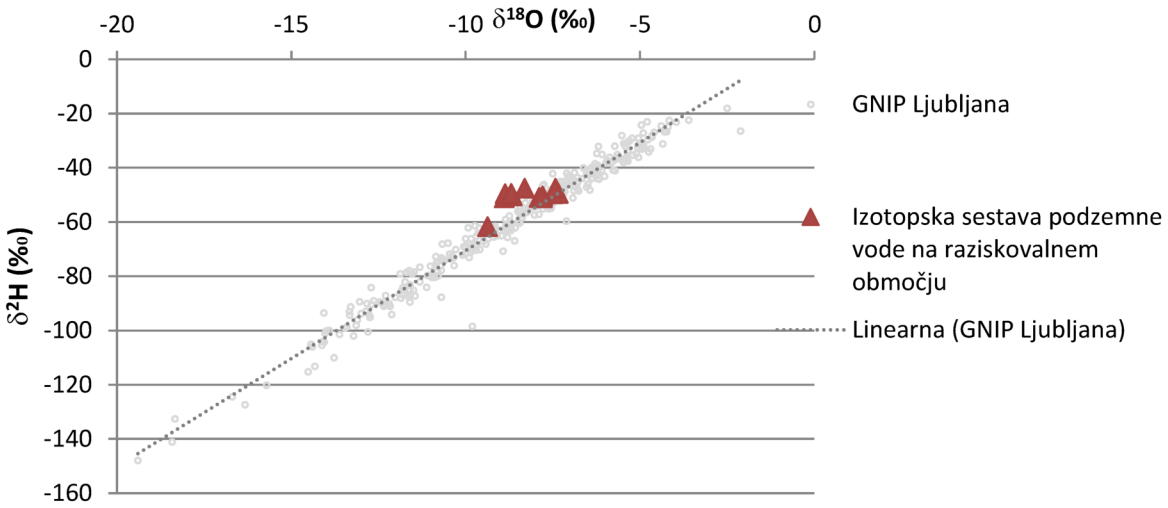
	Datum vzorčenja	Izvir Malni	Unica	Kotliči	Izvir Rak	Stržen	V-1 (Žeje)
PA (µg/l)	julij 2024	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
	november 2024	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
	julij 2025	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	/
RDX (µg/l)	julij 2024	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOQ	<LOD

	Datum vzorčenja	Izvir Malni	Unica	Kotliči	Izvir Rak	Stržen	V-1 (Žeje)
	november 2024	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
	julij 2025	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	/
NB (µg/l)	julij 2024	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
	november 2024	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
	julij 2025	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	/
1,3-DNB (µg/l)	julij 2024	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
	november 2024	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
	julij 2025	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	/
2A-DNT (µg/l)	julij 2024	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
	november 2024	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
	julij 2025	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	/
4A-DNT (µg/l)	julij 2024	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
	november 2024	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
	julij 2025	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	/
2-NT (µg/l)	julij 2024	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
	november 2024	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
	julij 2025	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	/
1,3,5-TNB (µg/l)	julij 2024	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
	november 2024	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
	julij 2025	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	/
3-NT (µg/l)	julij 2024	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
	november 2024	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
	julij 2025	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	/
NG (µg/l)	julij 2024	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
	november 2024	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
	julij 2025	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	/
2,6-DNT (µg/l)	julij 2024	<LOD	<LOD	<LOQ	<LOD	<LOD	<LOD
	november 2024	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
	julij 2025	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	/
2,4-DNT (µg/l)	julij 2024	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
	november 2024	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
	julij 2025	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	/
TNT (µg/l)	julij 2024	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
	november 2024	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
	julij 2025	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	/
TETRYL (µg/l)	julij 2024	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
	november 2024	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
	julij 2025	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	/
PETN (µg/l)	julij 2024	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
	november 2024	<LOD	1.1 ± 0.1	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
	julij 2025	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	0.72 ± 0.05	/

**LOD – meja zaznavnosti; LOQ – meja določljivosti*

6.3.4. Izotopska sestava podzemne vode

Izotopska sestava vode $\delta^{18}O$ in $\delta^{2}H$ se uporablja kot konservativno sledilo za sledenje izvora vode in pri določanju mešanja podzemne vode iz različnih virov (padavine, meteorna voda, itd.). Rezultati (Slika 11) kažejo, da so prostorsko razlike med merilnimi mesti manj izrazite, kar kaže na homogeno izotopsko sestavo podzemne vode v območju vzorčenja.



Slika 11: Rezultati izotopske sestave podzemne vode iz vseh treh serijah vzorčenj

Vse lokacije imajo v novembru izrazito bolj negativne vrednosti $\delta^{18}O$ in $\delta^{2}H$, kar odraža hladnejše obdobje, višje padavine in večji delež globlje infiltrirane vode. Ob tem so vrednosti d-excess (razmerje med vrednostmi $\delta^{18}O$ in $\delta^{2}H$) jeseni višje, kar nakazuje na spremenjene razmere izhlapevanja in izvor padavin (bolj celinski oz. manj evaporiran signal). Nekoliko manj negativne vrednosti $\delta^{18}O$ in $\delta^{2}H$ na Strženu in V-1 (Žeje) poleti 2024 nakazujejo krajše poti infiltracije ali vpliv plitvih vodnih virov. Rezultati analiz stabilnih izotopov kažejo, da podzemna voda izvira predvsem iz lokalnih padavin, sezonske spremembe pa so povezane z razlikami v infiltraciji, izhlapevanju in hidrodinamskih razmerah v vodonosniku.

6.3.5. Parametri radioaktivnosti vode

Analize radioaktivnosti v podzemnih vodah so bile izvedene z odvzemom vzorcev, ki so bili preučeni na Institutu Jožef Stefan v Ljubljani. Rezultati vseh analiz izvedenih v okviru projekta se nahajajo v poročilih v Prilogi 1. Pri tem so bile spremljane tako naravne radionuklide, kot so U-238, Ra-226, Ra-228, Th-228, Pb-210 in K-40, kot tudi kozmogene in antropogene radionuklide, kot sta Be-7, Cs-137 in H-3 (tritij). Izmerjene koncentracije radionuklidov v vseh vzorcih so bile najmanj za red velikosti nižje od izračunanih koncentracij vojaških aktivnosti, kar je skladno z ugotovitvami prejšnjih vzorčenj. V vzorcih izvira Rak in V-1 (Žeje) je bil detektiran Cs-137, kar nakazuje stik podzemne vode z atmosfero po černobilski nesreči, medtem ko na drugih lokacijah detekcij ni bilo. Koncentracije tritija so se gibale med 0,49 in 0,72 kBq/m^3, pri čemer noben vzorec ni presegel priporočene meje za skupno specifično aktivnost alfa in beta sevalcev v pitni vodi (0,1 Bq/l). Sistematično spremljanje radionuklidov je

pomembno za oceno naravne radioaktivne obremenitve vodonosnika, prepoznavanje morebitnih antropogenih vplivov, določanje starosti in dinamike podzemne vode ter potrjevanje hidrogeoloških modelov. V bližini vojaških vadišč je takšno spremljanje še posebej pomembno, saj se tam uporabljajo eksplozivna sredstva in strelivo, ki lahko prispevajo k dodatnim obremenitvam okolja. Rezultati potrjujejo, da radioaktivno onesnaženje podzemne vode v vzorčenih območjih ostaja na nizkem nivoju, tveganja za varno upravljanje vodnih virov pa niso zaznana.

6.4. Mikrobiološke značilnosti vode

6.4.1. Mikrobiološki pregled vode (*E. coli*, koliformni organizmi in Enterococcus sp.)

Fekalno onesnaženje podzemne vode predstavlja pomembno tveganje za zdravje, saj lahko prenaša patogene mikroorganizme iz človeških odpadnih voda in iztrebkov toplokrvnih živali. Kompleksna kraška hidrologija z obsežnimi prispevnimi območji in možnostjo zadrževanja onesnaževal v podzemnih vodah otežuje določanje izvora vplivov, zlasti ob nizkih pretokih. V okviru projekta smo izvedli preliminarno spremljanje indikatorskih bakterij – koliformov, *E. coli* in enterokokov na izbranih kraških izvirih (Stržen, Izvir Rak, Kotliči, Unica, Malni) v letih 2024 in 2025. Analize so bile v prvem merjenju opravljene z metodo MPN (ISO 9308-2:2012), za namen ugotavljanja števila *E. coli* in koliformnih organizmov v sklopu zmogljivosti naprave MPN Analyser, nato pa smo jih v naslednjih meritvah razširili še na zaznavanje Enterokokov za kar smo v nadaljevanju uporabili metodo membransko filtracije in direktnim štetjem za vse mikroorganizme (ISO 7899-2:2000 oz. ISO9308-1:2014). Analize so potrdile občasno prisotnost *E. coli* in koliformov na vseh lokacijah, kar kaže na epizodne fekalne vplive. Enterokoki so bili zaznani manj pogosto, predvsem na Izviru Rak in Unici, kar nakazuje morebitne lokalizirane vire onesnaženja ali različne pogoje transporta v kraškem sistemu (Preglednica 20).

Zaznane sezonske in medkrajevne razlike, zlasti izrazito povišane vrednosti koliformov in *E. coli* na Strženu in Izviru Rak v posameznih obdobjih poudarjajo dinamičnost kraškega pretakanja podzemne vode ter pomen rednega monitoringa za oceno tveganja in načrtovanje ukrepov za varovanje vodnih virov.

Preglednica 20: Rezultati pregleda vzorcev z uporabo metode MPN oz. metodo membranske filtracije v vseh treh serijah vzorčenj podzemne vode

	Datum vzorčenja	Izvir Malni	Unica	Kotliči	Izvir Rak	Stržen	V-1 (Žeje)
E. coli	julij 2024	0	0	100	16380	320	0
	november 2024	33	2600	100	1100	38	108
	julij 2025	120	160	90	370	180002	/
Koliformi	julij 2024	450	720	6040	830	5160	600
	november 2024	77	8100	700	600	2300	300
	julij 2025	950	970	290	9700	25000	/
Enterococ.	julij 2024	/	/	/	/	/	/
	november 2024	0	1900	0	1000	0	0
	julij 2025	90	240	50	150	11500	/

6.4.2. Opredelitev nabora mikrobioloških parametrov nadzora ter spremljanje onesnaženja

V okviru projekta so bili določeni potencialni mikrobni indikatorji fekalnega onesnaženja, ki smo jih uporabili za spremljanje fekalnega onesnaženja in za določitev vira onesnaženja v vodnih vzorcih. Fekalni indikatorji so lahko bakterije ali virusi, ki so generalni ali specifični za posamezno vrsto, lahko pa so indikatorji del genoma posamezne vrste. V ožji izbor smo uvrstili 12 fekalnih indikatorjev, ki:

- nakazujejo splošno mikrobno onesnaženje: indikator AllBac (Layton in sod., 2006), indikator GenBac3 (Dick in Field, 2004); ali
- kažejo specifičnost za fekalno onesnaženje od posameznih vrst kot so:
    - človek: BacH (Reischer in sod., 2007), HAdV (Hernroth in sod., 2002), PMMoV (Maksimovic Carvalho Ferreira in sod., 2022; Kitajima in sod., 2018), HMBif (Gómez-Doñate in sod., 2012)
    - prežvekovalci: BacCow (Kildare in sod., 2007), CowBif (Gómez-Doñate in sod., 2012)
    - prašiči: Pig2Bac (Mieszkin in sod., 2009)
    - perutnina: PLBif (Gómez-Doñate in sod., 2012)
    - konji: HorseCytB (Schill in Mathes, 2008)
    - ovce: SheepCytB (Schill in Mathes, 2008)

Izbor indikatorjev, ki so bili uporabljeni za analizo vodnih vzorcev, ter izmerjene meje zaznavnosti (LOD) in meje določljivosti (LOQ) za vsak posamezni indikator so prikazani v Preglednici 6. Analiza mikrobioloških označevalcev fekalnega onesnaženja v podzemni vodi na izbranih merilnih mestih (Preglednica 21) je pokazala stalno prisotnost različnih indikatorjev v vseh treh serijah vzorčenj (julij 2024, november 2024 in julij 2025). V vseh vzorcih so bili zaznani splošni označevalci fekalnega onesnaženja (AllBac), medtem ko so bili specifični označevalci za človeški izvor (BacH), prežvekovalce (BacCow), prašiče (Pig2Bac) in druge živalske vire prisotni v različnih kombinacijah in s spremenljivo stopnjo gotovosti (verjetno ali negotovo). Skupna interpretacija kaže, da je podzemna voda na testnem območju občasno izpostavljena fekalnim vplivom, s prisotnostjo tako človeških kot živalskih virov onesnaženja. Razlike med serijami kažejo na sezonske in lokalne razlike v razporeditvi onesnaževalcev, pri čemer so nekatera območja (npr. Izvir Rak in Stržen) bolj ranljiva. Rezultati poudarjajo potrebo po rednem mikrobiološkem spremljanju in identifikaciji virov onesnaženja za zagotavljanje varne kakovosti podzemne vode

Preglednica 21: Povzetek vzorčenj v vseh treh serijah po posameznem vzorčenem mestu. Poz (temno oranžna barva) – pozitivno na prisotnost označevalca; Neg (bela barva) – negativno na prisotnost označevalca; Poz? (svetlo oranžna barva) – sum na prisotnost označevalca (zelo nizke količine zaznanih označevalcev pri meji zaznavanja)

		MALNI								
		ALLBac	**BacH**	**PMMoV**	**HAdV**	**BacCow**	**Pig2Bac**	**SheepCyt**	**HorseCyt**	**PLBif**
1	**jul.24**	poz	poz?	poz	/	poz	neg	neg	neg	neg
2	**nov.24**	poz	poz?	poz	poz?	poz	poz?	neg	neg	neg
3	**jul.25**	poz	poz?	poz	neg	poz	poz?	neg	neg	neg

		UNICA

		ALLBac	BacH	PMMoV	HAdV	BacCow	Pig2Bac	SheepCyt	HorseCyt	PLBif
1	jul.24	poz	poz?	poz	/	poz	poz?	neg	neg	neg
2	nov.24	poz	poz	poz	poz?	poz	poz	poz?	neg	neg
3	jul.25	poz	poz?	poz	neg	poz	poz	neg	neg	neg

		RAK								
		ALLBac	BacH	PMMoV	HAdV	BacCow	Pig2Bac	SheepCyt	HorseCyt	PLBif
1	jul.24	poz	poz	poz	poz?	poz	neg	neg	neg	neg
2	nov.24	poz	poz?	poz	poz?	poz	poz	neg	neg	neg
3	jul.25	poz	poz?	poz	neg	neg	poz?	neg	neg	neg

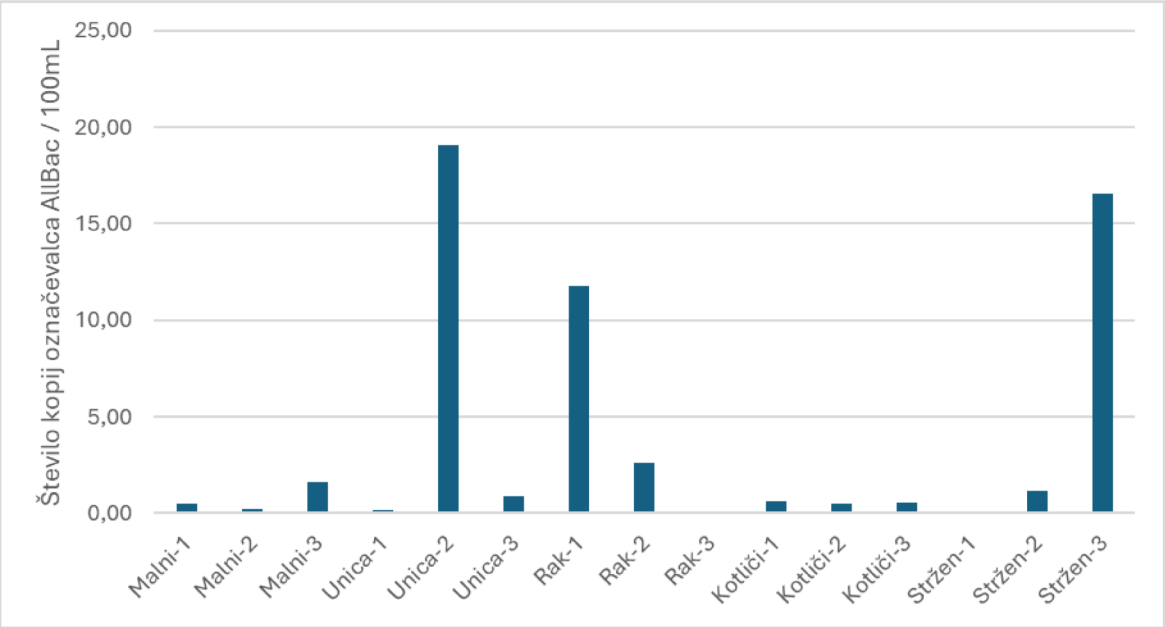
		KOTLIČI								
		ALLBac	BacH	PMMoV	HAdV	BacCow	Pig2Bac	SheepCyt	HorseCyt	PLBif
1	jul.24	poz	poz?	poz	neg	poz	neg	neg	neg	neg
2	nov.24	poz	poz?	poz	poz?	poz	poz?	neg	neg	neg
3	jul.25	poz	neg	poz	neg	neg	neg	neg	neg	neg

		STRŽEN								
		ALLBac	BacH	PMMoV	HAdV	BacCow	Pig2Bac	SheepCyt	HorseCyt	PLBif
1	jul.24	poz	poz?	poz	neg	neg	neg	neg	neg	neg
2	nov.24	poz	poz?	poz	poz	poz	poz	neg	neg	neg
3	jul.25	poz	poz	poz	poz?	poz	poz?	neg	neg	neg

Glede na količino zaznanega pomnoževanja splošnega označevalca fekalnega onesnaženja AllBac iz Slike 12 je videti, da:

- se v Malnih in Kotličih količina AllBac glede na vodostaj ni spreminjala bistveno,
- je bila v Unici najvišja količina AllBac v obdobju vzorčenja visokih vod (Unica 2),
- je bila v Raku najvišja količina AllBac v obdobju vzorčenja srednjih vod (Rak 1),
- je bila v Strženu najviška količina AllBac v obdobju vzorčenja nizkih vod (Stržen 3).

Na Sliki 12 so prikazani vzorci posamezne lokacije vzorčeni v treh različnih obdobjih (1 – srednje vode vzorčene julija 2024, 2 – visoke vode vzorčene novembra 2024 in 3 – nizke vode vzorčene julija 2025). Število kopij dobljenih po celotnem postopku koncentriranja je preračunano glede na začetni volumen posameznega vzorca, volumni med posameznimi koraki in ob predpostavki, da so izkoristki vsakega koraka celotnega procesa 100 odstotni. Vrednosti so namenjene relativni primerjavi med posameznimi vzorci.



Slika 12: Ocenjeno število kopij splošnega označevalca fekalnega onesnaženja AllBac na 100 ml vzorca

7. OPOZORILNI SISTEM ZA ZAZNAVANJE VPLIVOV VOJAŠKIH DEJAVNOSTI NA PODZEMNO VODO

7.1. Pregled strokovne literature

V luči vse večjih pritiskov na vodonosnike, bodisi zaradi intenzivnega črpanja, infiltracije onesnaževal, sprememb v rabi tal ali vplivov podnebnih sprememb, je vzpostavitev sistema za kontinuirano spremljanje in zgodnje opozarjanje stanja podzemne vode ključna. Naraščajoča pogostost suš, poplav ter onesnaženja poudarja potrebo po proaktivnem, podatkovno podprtem upravljanju vodnih virov (UNESCO, 2022; EEA, 2023). Tak sistem mora vključevati ustrezno tehnično infrastrukturo (senzorje, podatkovne zbirke, telemetrijo, terenske komunikacijske module), analitične zmogljivosti za identifikacijo anomalij ter učinkovite komunikacijske in operativne mehanizme za sprožitev ukrepov – od zgodnjih opozoril do aktivnega upravljanja črpanja in zaščitnih režimov.

Sodobni sistemi za kontinuirano spremljanje kakovosti vode, ki temeljijo na UV/Vis spektrometriji, so se v zadnjih letih izkazali kot posebej primerni za terenske vgradnje v zahtevnih okoljih, kot so kanalizacijski sistemi, rečne merilne postaje, vodarne, akumulacije in oddaljene monitoring postaje. Številne neodvisne raziskave in tehnična poročila ugotavljajo, da UV/Vis tehnologije omogočajo zanesljivo merjenje parametrov, kot so KPK/TOC, nitrati, motnost in absorbanca, brez potrebe po uporabi reagentov, kar zmanjšuje stroške vzdrževanja (Rieger in sod., 2008; Langergraber in Weingartner, 2021).

Študije podjetja s::can, izvedene v kanalizacijskem sistemu Aten (EYDAP), na čistilnih napravah na Portugalskem ter na številnih rekah in akumulacijah (npr. Ganges, Amazonka, rečni sistemi v Maleziji, Koreji in na Kitajskem), dosledno poročajo o stabilnem delovanju UV/Vis sond brez izpadov meritev, in to v razmerah visoke vlažnosti, prisotnosti agresivnih plinov, velikih temperaturnih nihanj in visoke obremenitve z delci ter organskimi snovmi (s::can Messtechnik GmbH, 2016; s::can Messtechnik GmbH, n.d.). Takšne ugotovitve potrjujejo primernost optičnih tehnologij za dolgoročno spremljanje v ekstremnih terenskih pogojih, kjer klasični elektrokemični ali reagentski sistemi pogosto odpovejo.

V poročilu podjetja EYDAP (s::can Messtechnik GmbH, 2016) je posebej poudarjeno 100-odstotno delovanje sistema spectro::lyser, brez zabeleženih odpovedi v večmesečnem obdobju. Avtomatsko čiščenje z zrakom se je izkazalo kot učinkovita rešitev za preprečevanje nalaganja oblog na optičnih površinah, kar je kritičen dejavnik zanesljivosti v okoljih z visoko koncentracijo suspendiranih delcev. Sonde so v izpostavljenih primerih uspešno delovale tudi v ekstremnih klimatskih pogojih brez potrebe po klimatiziranih ohišjih ali posebni mehanski zaščiti na rečnih postajah v Aziji in Južni Ameriki ter na terenskih postajah CB Romagna occidentale (s::can Messtechnik GmbH, n.d.).

Učinkovita implementacija takšnih sistemov omogoča ne le izboljšano zaznavo nenadnih onesnaženj in napak v procesih, temveč tudi dolgoročno spremljanje trendov, napovedovanje tveganj in optimizacijo upravljanja vodnih virov. Integracija kontinuiranih meritev z modeli podzemne vode, algoritmi za strojno učenje ter avtomatiziranimi alarmnimi protokoli predstavlja pomemben korak k digitalizaciji vodnega sektorja in dvigu njegove odpornosti.

7.2. Izbira primernih rešitev za kontinuirno in občasno spremljanje parametrov

UV/Vis spektrometrični sistemi so za jaške in druge terenske objekte bistveno primernejši od klasičnih analizatorjev, ki temeljijo na t.i. mokri kemiji in reagentih (npr. tipični namizni ali kabinetni analizatorji za COD, fosfor ipd.), saj za delovanje ne potrebujejo reagentov, pretočnih celic in kompleksnih hidravličnih vezav. Spectro::lyser in drugi s::can optični senzorji merijo neposredno v vodi, brez starajočih se delov in brez potrebe po ponovni kalibraciji oziroma nadomeščanju potrošnega materiala, kar je v praksi tudi potrjeno (s::can Messtechnik GmbH, 2016). Ključna prednost sistemov zveznih meritev so tako odsotnost potrebe po logistiki in skladiščenju ter menjave reagentov, varnostna tveganja zaradi rokovanja s kemikalijami v utesnjenem prostoru jaška ter potreba po klimatiziranem, suhem okolju, ki ga na terenu pogosto ni mogoče zagotoviti. V primeru EYDAP podjetja S::CAN so obratovalni stroški opisani kot praktično zanemarljivi, ker sistem ne uporablja potrošnega materiala (s::can Messtechnik GmbH, 2016). Poročilo CTGA podjetja S::CAN pa v primeru portugalske čistilne naprave poudarja, da več kot 20 senzorjev, povezanih na con::cube terminale, 24/7 izvaja meritev več kot 70 parametrov brez klasične reagenčne analitike, pri čemer se podatki uporabljajo tako za opozorilni sistem kot za optimizacijo procesa in energetske učinkovitosti (s::can GmbH, 2023). Za jaške je ključno, da so UV/Vis sonde kompaktne, potopne in z eno samo kabelsko povezavo, kar omogoča neposredno vgradnjo v tok vode brez velikih kabinetov in dodatne infrastrukture (s::can Messtechnik GmbH, n.d.). Posebna prednost spektrometričnih sistemov v kontekstu opozorilnih sistemov je možnost istočasnega spremljanja več parametrov in uporaba spektralnih ter vzorčnih (pattern) alarmov. Iz celotnega UV/Vis spektralnega podpisa (t. i. »fingerprint«) je mogoče izračunati vrsto parametrov (COD, BOD, TSS, nitrati, barva, UV254) ter hkrati prepoznati anomalije v sestavi vode, ki ne ustrezajo običajnim procesnim nihanjem.

V poročilu EYDAP so na primer na tej osnovi opredelili več ponavljajočih se tipov dogodkov (npr. »Dromedary«, »Camel«, »Color«), ki jih z običajnimi enoparametrskimi analizatorji ne bi bilo mogoče zaznati, saj ti merijo le vnaprej določen nabor parametrov (s::can Messtechnik GmbH, 2016). Podobno CTGA opisuje uporabo spektralnih in vzorčnih alarmov za samodejno proženje vzorčenja in identifikacijo nezakonitih izpustov v dotoku čistilne naprave, pri čemer enoten sistem hkrati skrbi za opozarjanje in za avtomatizirano krmiljenje procesa (s::can GmbH, 2023). Takšen pristop je za terenske jaške, kjer so možni kratkotrajni, prostorsko omejeni izpusti (npr. zaradi vojaških aktivnosti ali drugih epizodnih virov onesnaženja), bistven, saj omogoča visoko frekvenco meritev (tipično na 1–2 minute), zaznavo tudi kratkih dogodkov in sprotno arhiviranje spektralnih »prstnih odtisov« za nadaljnjo forenzično analizo.

7.3. Vzpostavitev sistema za zvezne meritve relevantnih parametrov

7.3.1. Izbrana oprema za zvezne meritve

Za izvedbo meritev posameznih parametrov smo izbrali merilna sistema proizvajalcev S::CAN (Avstrija) in Eltratec (Slovenija). Na izbranem merilnem mestu s pomočjo teh sistemov izvajamo zvezni nadzor fizikalno-kemijskih lastnosti podzemne vode.

V okviru sistema kontinuiranega nadzora so bile nameščene naslednje sonde:

- Eltratec – merjenje nivoja podzemne vode, temperature in električne prevodnosti;
- S::CAN pH::lyser – merjenje pH vrednosti;
- S::CAN oxy::lyser – merjenje koncentracije raztopljenega kisika;
- S::CAN Spectro::lyser – merjenje motnosti, raztopljenega in celotnega organskega ogljika, suspendiranih trdnih snovi, aromatskih spojin, koncentracije nitratov ter zajem celotnega UV-VIS spektralnega podpisa vzorca.

V sklopu postavitve smo dodatno namestili zunanjo vremensko postajo za merjenje padavin, relativne zračne vlage in osončenosti. Vzpostavljeni sistem omogoča kontinuirano spremljanje enajstih fizikalno-kemijskih parametrov podzemne vode, kar bistveno prispeva k večji natančnosti in zanesljivosti samega sistema.

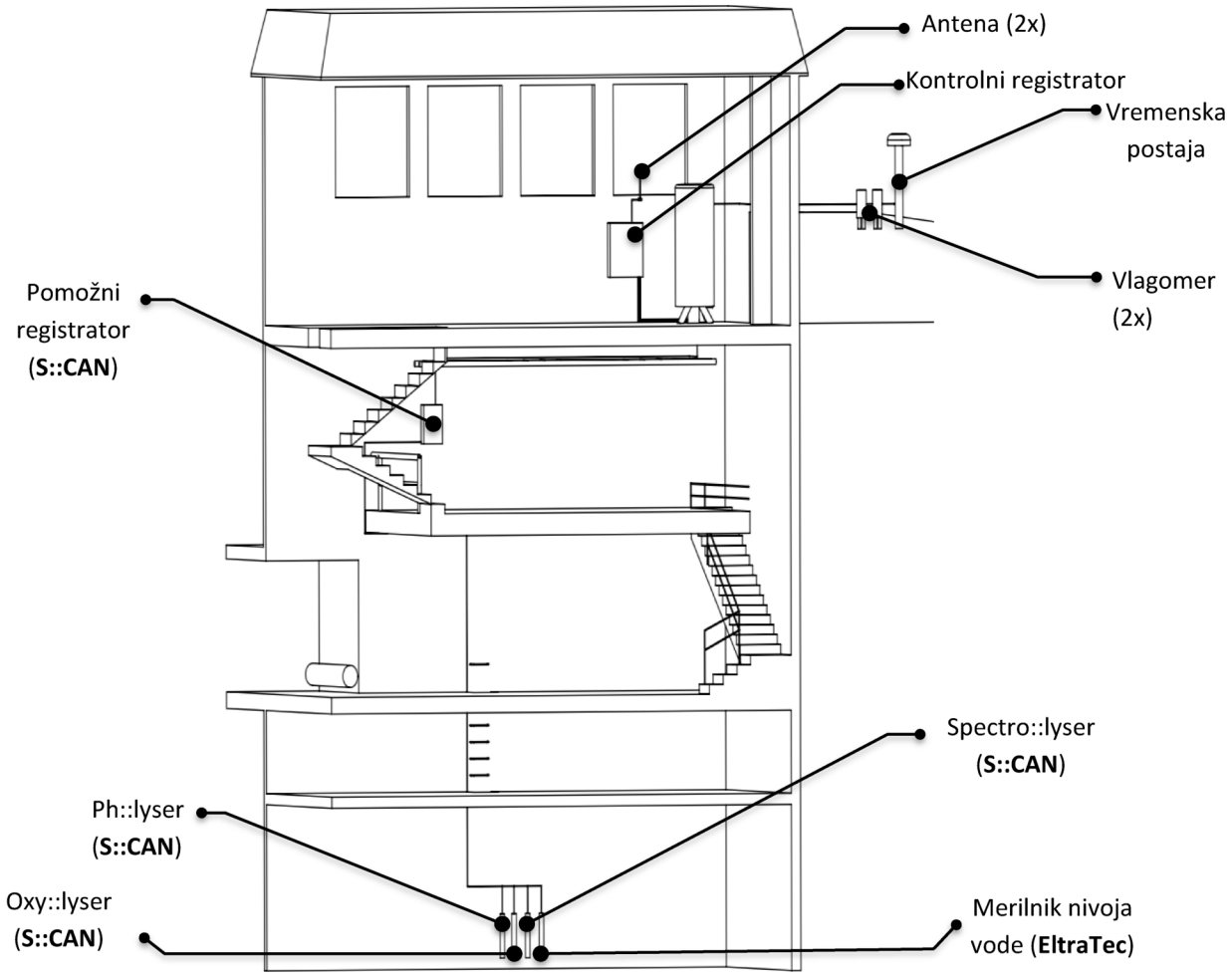
7.3.2. Namestitev opreme in vzpostavitev merilnega sistema na črpališču Malni

Za najbolj reprezentativno opazovalno mesto je bil opredeljen izvir Malenščice – zajetje Malni, kjer je bila nameščena raziskovalna oprema za zvezno spremljanje relevantnih parametrov podzemne vode. Za namen vzpostavitve opozorilnega sistema smo na črpališču Malni (Slika 13) izvedli montažo sistema skupaj s sondami in vremensko postajo. Montaža ter prilagoditev merilnega sistema je bila izvedena v dveh fazah:

1. 12. in 13. septembra 2024 je bila opravljena fizična montaža sond in registratorjev.
2. Novembra 2024 je bila zaključena namestitev zračnega kompresorja za avtomatsko čiščenje leč in posodobitev algoritma za merjenje nitratov.

Prav tako smo z vidika dostopnosti, delovne globine in konstantnega vira vode v sklopu projekta opredelili metodologijo vzorčenja ter izvajanja posameznih meritev ter izvedli aktivnosti vzpostavljanja opozorilnega sistema. Meritve se beležijo v časovnih intervalih določenih na 15 minut in se preko registratorjev zbirajo ter pošiljajo v oblačno hrambo za oddaljen dostop in obdelavo podatkov.

Kot je prikazano na shemi črpališča Malni (Slika 13), je sistem vgrajen in povezan skozi celoten objekt črpališča, ki je vgrajen v hrib. V kletnem, najglobljem delu, kjer se nahaja jašek, so skozenj sonde potopljene direktno v vodo (Slika 14a). Nameščene so na ustrezni globini, v omočeni coni vodonosnika, kar omogoča njihovo neprekinjeno potopljenost v vodo ne glede na hidrogeološke razmere in nihanje gladine podzemne vode.

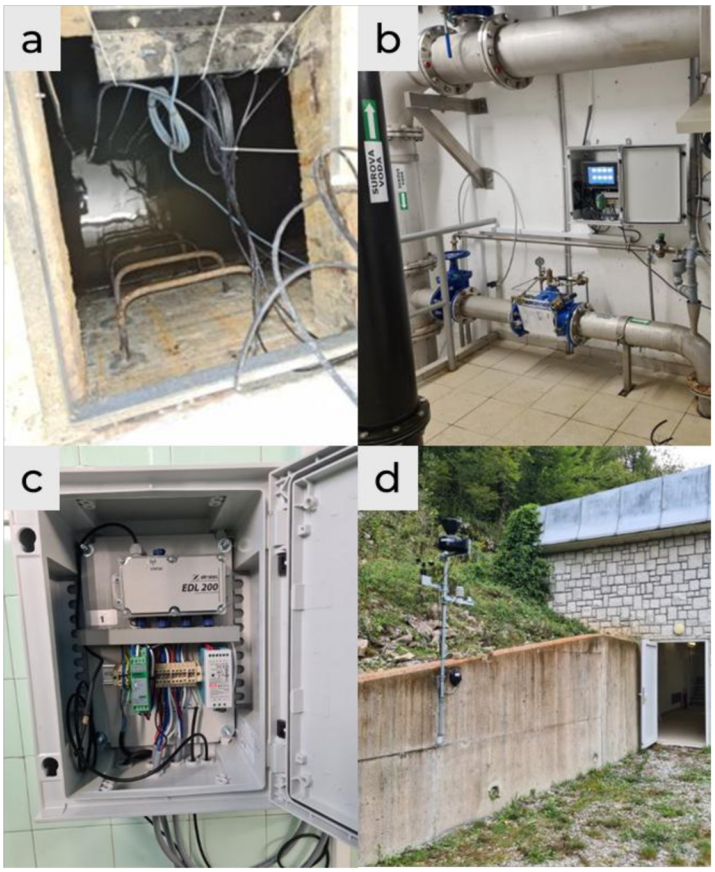


Slika 13: Shema strukture črpališča Malni in vgrajenih komponent opozorilnega sistema

Vse sonde razen sonde za merjenje nivoja vode (povezana na Eltratec kontrolni registrator) so preko kabelske napeljave neposredno povezane na S::CAN con::cube IOT terminal (pomožni registrator) z vgrajenim LED zaslonom za prikaz podatkov meritev po posameznih parametrih, ki je lociran v 1. nadstropju stavbe. Le to je manj izpostavljeno tveganju za vdor vode pri nepričakovanih dvigih nivoja gladine vode v spodnjem delu črpališča (Slika 14b). Pomožni registrator poleg zbiranja in posredovanja podatkov deluje tudi kot centralni modul za kalibracijo sond proizvajalca S::CAN, ki so potopljene v jašek ter posodabljanje protokolov za spremljanje posameznih parametrov, ki jih vsaka sonda meri.

Pomožni registrator zbrane podatke pošilja do Eltratec kontrolnega registratorja nameščenega v 2. nadstropju stavbe (Slika 14c), ki skupaj z meritvami iz vremenske postaje, ki se nahaja na zunanjem delu stavbe (Slika 14d), pošilja podatke ob zahtevi podjetju Eltratec v obliki mobilnih paketnih podatkov. Eltratec nato shranjuje te podatke na infrastrukturi končnega uporabnika (GeoZS) ter nudi standardizirano spletno storitev poizvedovanja po teh podatkih v obliki spletnega SOAP servisa. GeoZS nato s periodičnimi klici na ta spletni servis pridobiva podatke o meritvah na senzorjih v standardizirani XML obliki ter jih shranjuje v ločeno podatkovno bazo, ki je del GeoZS skupne infrastrukturne rešitve za branje in prikazovanje meritev ter urejanje metapodatkov senzorjev in naprav, z imenom eTeren. Izjema so podatki meritev polnega UV-VIS spektralnega podpisa, ki jih zaradi velikosti pomožni

registrator pošilja ločeno preko FTP protokola do končnega uporabnika (GeoZS) za obdelavo. Nadaljnja rešitev prikaza sledi zgornjemu opisu, razlikuje se samo branje in zapisovanje podatkov v podatkovno bazo, saj obstaja ločena programska skripta, ki tokrat bere in razvršča vsebino teh prenesenih CSV datotek.



Slika 14: Fotografije točk črpališča Malni, kjer smo vgradili senzorje za različne namene meritev opozorilnega sistema. a) Jašek z vodo v katero so potopljene sonde; b) Pomožni registrator S::CAN con::cube vgrajen v 1. nadstropju objekta; c) Kontrolni registrator EltraTec vgrajen v 2. nadstropju objekta; d) Zunanja vremenska postaja

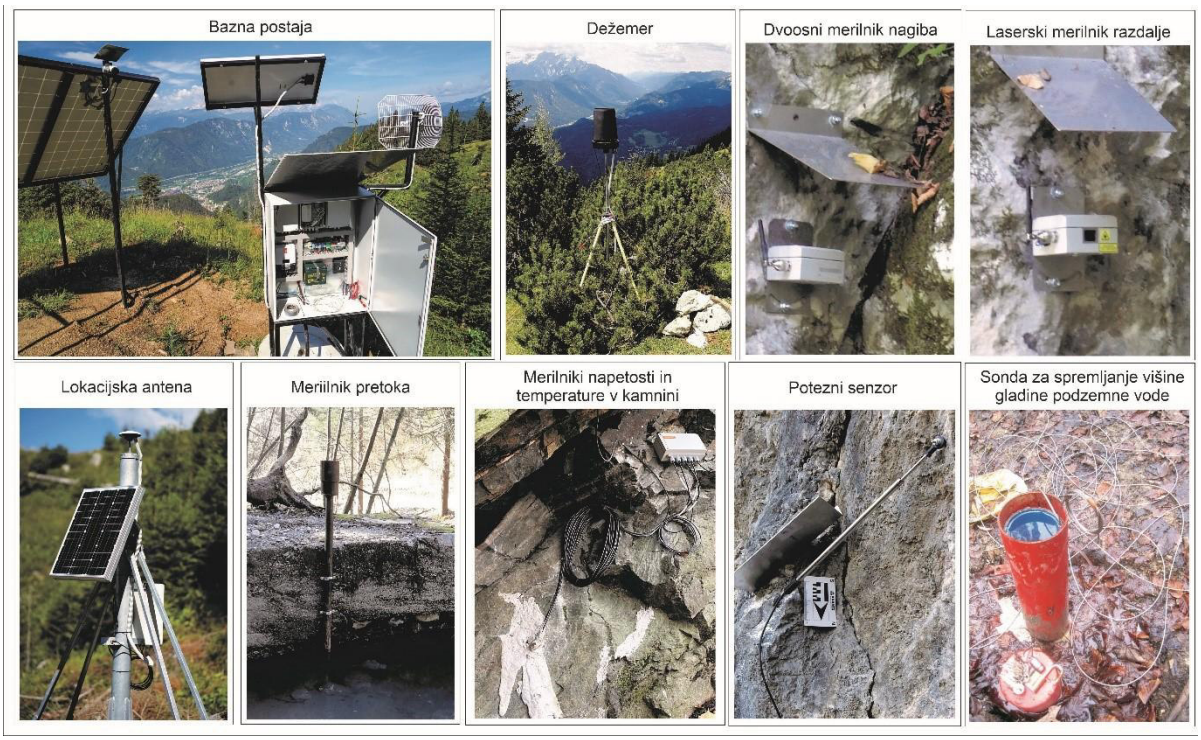
Sistem vključuje pomožni registrator S::CAN con::cube, ki pošilja podatke do glavnega registratorja Eltratec, nameščenega v zgornjih nadstropjih objekta. Poleg tega smo postavili zunanjo vremensko postajo za merjenje padavin, vlage in osončenosti ter namestili dodatno anteno za prenos podatkov. Kot je prikazano na shemi črpališča Malni (Slika 13), je sistem vgrajen in povezan skozi celoten objekt črpališča, ki je vgrajen v hrib. V kletnem, najglobljem delu, kjer se nahaja jašek, so skozenj sonde potopljene direktno v vodo (Slika 14a). Nameščene so na ustrezni globini, v omočeni coni vodonosnika, kar omogoča njihovo neprekinjen stik z vodo ne glede na hidrogeološke razmere in nihanje gladine podzemne vode.

7.4. Povezava merilnega mesta s podatkovno bazo ter informacijskim sistemom eTeren

7.4.1. Opis sistema eTeren

Sistem eTeren je centralizirana senzorska mreža, ki omogoča shranjevanje, obdelovanje in prikazovanje geoloških podatkov, ki se z merilnimi instrumenti različnih tipov pridobivajo na terenu. Dnevno posodobljeni podatki s terena so preko spletne aplikacije neposredno na voljo različnim končnim uporabnikom: raziskovalcem pri njihovem znanstvenem delu, skrbnikom za nadzor nad delovanjem naprav in zunanjim naročnikom za spremljanje parametrov, pomembnih za njihovo dejavnost.

Geološki zavod Slovenije se ob velikem številu različnih tipov senzorjev različnih proizvajalcev posledično srečujemo z veliko razdrobljenostjo senzorskega omrežja (ti. *sensor network*) in velikimi stroški vzdrževanja sistemov (Slika 15). Sistem eTeren rešuje te izzive s centralizacijo senzorskega omrežja, ki je uporabljen tudi v okviru tega projekta. Uvaja celosten pristop k upravljanju s podatki. Podatki naprav različnih tipov in različnih proizvajalcev ter z različnim načinom prenosa podatkov se zbirajo v skupnem, centralnem arhivu in so uporabnikom (pod različnimi dostopnimi pogoji) dosegljivi na enem mestu. Podatki se osvežujejo in prenašajo v podatkovno bazo v realnem času in so uporabnikom dostopni takoj po vnosu. Ker se podatki sistematično arhivirajo, ostajajo dostopni tudi po zaključku projekta ali meritev, s čimer se zaključi celoten življenjski krog podatkov.



Slika 15: Primer merilnih naprav na terenu, ki so vključeni v mrežo senzorjev eTeren

Platforma eTeren je zagotovila ustrezno strukturiranje, shranjevanje in obdelavo podatkov, pridobljenih z merilnih mest. Za dostop do merilnih podatkov smo vzpostavili spletno nadzorno ploščo, kjer so podatki uporabnikom opozorilnega sistema na voljo v uporabniku prijazni obliki, prilagojeni njihovim potrebam. V primeru preseženih vrednosti posameznih parametrov se samodejno aktivira sistem

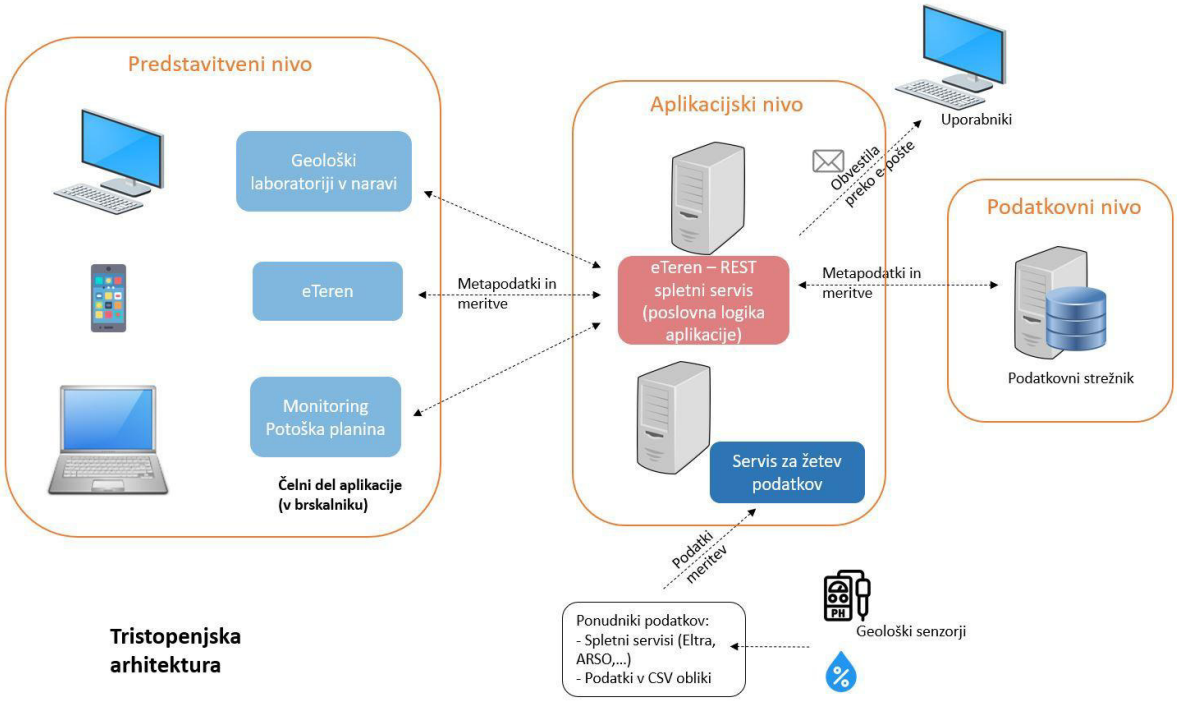
opozorilnega obveščanja ciljnih uporabnikov prek elektronske pošte (Slika 16). Opozorilni sistem obveščanja se bo aktiviral tudi v primeru prekinitve delovanja senzorjev, kar bo omogočilo hitro odpravo morebitnih okvar ali drugih težav pri izvajanju meritev in s tem čim bolj neprekinjen niz podatkov za spremljanje onesnaževal, ki izvirajo iz vojaško-vadbene dejavnosti.

Senzor	Datum in čas	Vrednost
Presezena motnosti in hkrati TOC	2025-10-06 08:00:00 2025-10-06 08:30:00 2025-10-06 10:45:00	2.05,1.972 2.09,1.96 2.18,1.948
Presezena vrednost BTX	2025-10-01 04:15:00 2025-10-06 09:15:00 2025-10-06 11:45:00 2025-10-06 21:30:00 2025-10-07 02:15:00	0.29 0.34 0.29 0.31 0.31
Avtomatsko generirano poročilo eTeren aplikacije.		

Slika 16: Primer alarmnega sporočila ob preseženih sprožilnih vrednostih meritev Opozorilnega sistema za zaznavanje vplivov vojaških dejavnosti na podzemno vodo

7.4.2. Vzpostavitev informacijskega sistema za sprotno spremljanje rezultatov meritev

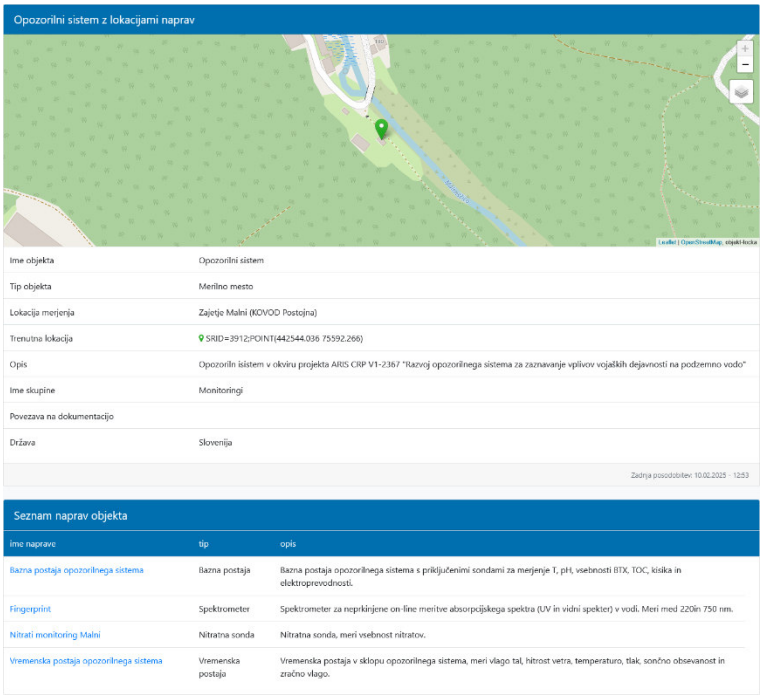
Izbrani podatki so v obliki namenskih nadzornih plošč v več jezikih na voljo tudi mednarodnim naročnikom in širši javnosti preko spletne strani Geološki laboratoriji v naravi (https://glvn.geo-zs.si/index.html). Sistem eTeren je z informacijskega vidika zasnovan po ideji tri nivojske arhitekture (Slika 17), ki vključuje podatkovni, aplikacijski in predstavitveni nivo. Predstavitveni nivo sestavljajo različne spletne strani in nadzorne plošče, ki se izvajajo oziroma zaganjajo v brskalniku končnega uporabnika. Aplikacijski nivo predstavlja aplikacija v obliki spletnega servisa s povezavo do podatkovne baze, ki odgovarja na zahteve sprožene iz brskalnikov. Obdeluje in predeluje podatke pridobljene iz podatkovne baze ter jih vrača uporabnikovemu brskalniku. Podatkovni nivo predstavlja relacijska podatkovna baza v kateri so podatki kategorizirani glede na uporabo v dve shemi. Ena shema vsebuje tabele z meta podatkovnimi opisi naprav, senzorjev, objektov in uporabnikov. Ti podatki se v sistem vnašajo prek obrazcev interne nadzorne plošče eTeren ali neposredno prek podatkovne baze, v primerih, ko niso vnaprej določeni obrazci. Druga shema vsebuje tabele meritev terenskih senzorjev.



Slika 17: Informacijska arhitektura sistema eTeren

7.4.3. Zbiranje podatkov na zajetju Malni

V nadaljevanju je prikazanih nekaj zajemov zaslona iz eTeren nadzorne plošče, ki predstavljajo meritve na zajetju Malni (Slika 18, Slika 19).



Opozorilni sistem z lokacijami naprav

Ime objekta	Opozorilni sistem
Tip objekta	Merilno mesto
Lokacija merjenja	Zajetje Malni (KOVOD Postojna)
Trenutna lokacija	SRID=3912;POINT(442544.036 75592.266)
Opis	Opozorilni sistem v okviru projekta ARIS CRP V1-2367 "Razvoj opozorilnega sistema za zaznavanje vplivov vojaških dejavnosti na podzemno vodo"
Ime skupine	Monitoringi
Povezava na dokumentacijo	
Država	Slovenija

Zadnja posodobitev: 10.02.2025 - 12:53

Seznam naprav objekta

ime naprave	tip	opis
Bazna postaja opozorilnega sistema	Bazna postaja	Bazna postaja opozorilnega sistema s priključenimi sondami za merjenje T, pH, vsebnosti BTX, TOC, kisika in elektroprevodnosti.
Fingerprint	Spektrometer	Spektrometer za neprkinjene on-line meritve absorpcijskega spektra (UV in vidni spekter) v vodi. Meri med 220in 750 nm.
Nitrati monitoring Malni	Nitratna sonda	Nitratna sonda, meri vsebnost nitratov.
Vremenska postaja opozorilnega sistema	Vremenska postaja	Vremenska postaja v sklopu opozorilnega sistema, meri vlago tal, hitrost vetra, temperaturo, tlak, sončno obsevanost in zračno vlago.

Slika 18: Zajem zaslona iz sistema eTeren - Opozorilni sistem (objekt) s štirimi napravami na objektu na zajetju Malni

Slika 19: Zajem zaslona iz sistema eTeren - prikaz meritev posameznega senzorja

7.4.4. Povezava merilnega sistema s podatkovno bazo ter javni prikazovalnik podatkov

Podatki opozorilnega sistema in senzorjev so shranjeni v podatkovni bazi. Natančneje, ti podatki so shranjeni v ločeni shemi iste podatkovne baze kot so metapodatki. Podatki se zapisujejo v tabele meritev prek samodejnega obdobnega zaganjanja aplikacije, ki bere podatke meritev iz CSV datotek zunanjih ponudnikov podatkov in spletnih servisov zunanjih ponudnikov podatkov (Eltratec). Zunanji ponudniki podatkov pridobivajo podatke s svojih senzorjev na različne načine, običajno na daljavo prek telekomunikacijskih povezav z napravami na katerih so nameščeni senzorji. Vsi podatki meritev so shranjeni v tabelah meritev podatkovne baze in se nahajajo v dveh stolpcih tabele: čas izmerjenega podatka in izmerjena vrednost. Zasnova spletne aplikacije »Monitoring potencialnega vpliva vojaškega vadbišča Poček na onesnaženje podzemnih voda« je prikazana na Sliki 20.

Slika 20: Monitoring potencialnega vpliva vojaškega vadišča Poček na onesnaženje vodnega vira Malni

Spletna aplikacija (https://ki-pilot.geo-zs.si/crp/home (testni naslov); monitoring-izvir-malni.si (javno dostopno na spletu) (Slika 20) ima različne načine prikaza oziroma dostopa do podatkov meritev glede na to ali do podatkov dostopa vpisani ali nevpisani uporabnik:

- Javni del;
- Zasebni del, namenjen vpisanim uporabnikom.

Osnovni nivo dostopa je javni, na njem so vidni podatki meritev šestih senzorjev (kot je razvidno iz slike 20) v slikovni obliki. Ko uporabnik oziroma obiskovalec spletnega naslova izbere posamezni senzor, tudi na pregledni strani podatkov posameznega senzorja vidi podatke meritev senzorja samo v obliki slike,

s katero ne more imeti interakcije.

V primeru, da se uporabnik vpiše v sistem, se mu odpre pregled podatkov še ostalih senzorjev, ki so v javnem načinu skriti, tudi tokrat v slikovnem načinu. Ob izboru posameznega senzorja pa uporabnik dobi pogled na podatke senzorja v obliki linijskega grafa, ki je interaktiven. Lahko približa, oddalji pogled, graf premika in, kar je bistveno, prebira odčitke podatkov meritev ob določenem času, odvisno od časovne ločljivosti zapisovanja podatkov posameznega senzorja. Omeniti velja še, da je ta interaktivni način na voljo vpisanemu uporabniku samo v primeru, da ima v centralnem sistemu eTeren, od koder prihajajo ti podatki, ta uporabnik bralne pravice za podatke senzorjev določene naprave. Pravice se namreč v sistemu eTeren dodeljujejo uporabnikom na nivoju posamezne naprave.

Oba načina, javni in zasebni, imata tudi omogočeno primerjavo kombinacije podatkov dveh senzorjev na enem grafu v slikovni obliki. Razlikuje se le nabor primerljivih senzorjev, ki je za vpisanega uporabnika razširjen za senzorje, ki so v javnem načinu nedostopni.

Po dogovoru lahko določeni posamezniki prejemajo tudi alarme o presežnih vrednostih odčitkov, ki se pošljejo preko e-pošte. Na to storitev so lahko naročeni določeni uporabniki po dogovoru, potreben pa je vnos teh uporabnikov in alarmov za senzorje, do katerih bodo dostopali v sistem eTeren. Ta funkcionalnost deluje ločeno in ni vezana na zgoraj opisano spletno aplikacijo Monitoring potencialnega vpliva vojaškega vadbišča Poček na onesnaženje voda.

7.5. Statistična obdelava podatkov meritev opozorilnega sistema

Zelo pomembna faza projekta je tudi obdelava izmerjenih podatkov. Podatki merilnega sistema so bili z uporabo statističnih metod obdelani tako, da je možno v vsakem trenutku opredeliti, ali so razmere v vodonosniku normalne oziroma, ali imamo opraviti z dogodki, ki zahtevajo določeno ukrepanje s ciljem, da se zaščiti dobro kemijsko, mikrobiološko in ekološko stanje podzemne vode ter vodnih virov v prispevnem vodnem območju vojaških vadišč.

7.5.1. Opredelitev najprimernejših statističnih metod za obdelavo podatkov meritev

V okviru projekta so bile testirane in uporabljene različne statistične metode (osnovna statistika, korelacijske analize in multivariantne analize, ipd.) za opredelitev povezav med posameznimi zvezno merjenimi parametri kemijskega stanja vodonosnika v okviru opozorilnega sistema.

V statistično analizo podatkov smo vključili naslednje merljive spremenljivke:

- Nivo podzemne vode,
- Temperatura podzemne vode,
- Električna prevodnost,
- pH,
- Nasičenost vode s kisikom,
- Motnost,
- Koncentracija nitratov,
- Koncentracija skupnega organskega ogljika (TOC),

- BTX Ogljikovodiki,
- UV/Vis spektralni podpis.

V prvi fazi smo izvedli osnovne statistične metode (povp., min, max, razpon, standardna deviacija) ter testirali normalnost porazdelitve posamezne spremenljivke z namenom ugotoviti statistične značilnosti podatkov, ki so služili kot osnova za izbiro nadaljnjih metod. V nadaljevanju smo uporabili oz. testirali tudi statistične korelacijske analize z namenom ugotavljanja povezanosti/odvisnosti med spremenljivkami, saj se je izkazalo, da so na posameznem vzorčnem mestu prisotna onesnaževala, ki imajo značilnost antropogenega vpliva.

Glavni cilj obdelave podatkov s statističnimi metodami je določitev mejnih vrednosti posameznih spremenljivk v podzemni vodi (električna prevodnost, pH, nitrat, BTX, onesnaževala detektirana s pomočjo UV-VIS spektra) na območju zajetja Malni za namen vzpostavitve opozorilnega sistema. Dne 13.9.2024 smo vzpostavili zvezne meritve za vse zgoraj navedene spremenljivke na območju vodarne Malni. Interval meritev je na 15 min. Glede na časovne nize podatkov in njihovo porazdelitev smo za določitev mejnih vrednosti testirali več statističnih metod, ki so bile že uporabljene v več študijah (npr. kvartilne vrednosti (5/95%), dvojna standardna deviacija, itd.) Kot najbolj uporabna metoda se je izkazala osnovna statistična metoda 95 % percentila, ki podaja vrednost pri kateri je 95 % meritev posamezne spremenljivke pod to vrednostjo, 5 % vseh meritev spremenljivke pa nad to vrednostjo.

V nadaljnjo statistično obdelavo podatkov so bile vključene zvezne meritve fizikalno-kemijskih parametrov in izbranih onesnaževal za obdobje od 25.6.2025 do 19.11.2025. Pred tem obdobjem je prišlo do več izpadov zveznih meritev zaradi različnih dogodkov in nujnih servisnih posegov (udar strele, ekstremni vremenski pojavi, menjava kompresorja, kalibracije sond, itd.). Posledično smo zabeležili obsežnejše izgube podatkov, kar je vplivalo na reprezentativnost sistema.

Prikazi zveznih meritev fizikalno-kemijskih parametrov in izbranih onesnaževal ter meritev vremenske postaje za obdobje od 25.6.2025 do 19.11.2025 so podani v Prilogi 2.

7.5.2. Določitev in statistična obdelava rezultatov spektralnega podpisa UV-VIS spektra

Po uspešni namestitvi merilnega sistema se je pričelo kvantitativno spremljanje izbranih parametrov z namenom določitve območij nizke, srednje in visoke obremenitve vodnega vira. Parametri, ki jih nameščene UV/Vis sonde neposredno ne merijo – na primer ostanki eksplozivov ali druge specifične kemijske spojine – so bili integrirani v sistem preko kalibracije celotnega UV/Vis spektralnega podpisa z uporabo standardnih raztopin. Za določitev merilnih območij in nastavitev alarmnih pragov smo pripravili nabor standardnih raztopin ciljnih spojin v koncentraciji 0,5 mg/l, pripravljenih v vodi iz zajetja Malni. Namen tega postopka je bil ovrednotiti odziv senzorja v realni vodi ter določiti prepoznavne značilnosti absorpcijskih spektrov.
Vzpostavitev razširjenega zaznavnega sistema je potekala postopno in je vključevala:

1. Meritev standardnih raztopin ciljnih kemijskih spojin in zajem referenčnih absorpcijskih spektrov.
2. Izvedbo študije izvedljivosti, v kateri so bili ocenjeni spektralni odzivi posameznih spojin ter njihova ločljivost znotraj UV/Vis območja.

3. Razvoj štirih specifičnih spektralnih parametrov, selektivnih za skupine spojin, identificiranih na osnovi njihovega UV/Vis spektralnega podpisa.
4. Vzpostavitev merilnega in alarmnega sistema v programski opremi ana::larm, kjer so bili glede na ozadje meritev določeni pogoji in pragovi za sprožanje opozoril.
5. Preverjanje delovanja sistema, vključno s testiranjem odziva na prisotnost ciljnih spojin ter validacijo alarmnih pragov v realnih razmerah.

Tako oblikovan pristop omogoča ponovljivo razširitev UV/Vis merilnega sistema na dodatne snovi, ki sicer niso neposredno merljive, a imajo značilen UV/Vis spektralni podpis. S tem se bistveno poveča uporabnost in natančnost opozorilnega sistema za spremljanje potencialno nevarnih ali nenadnih vnosov v vodni vir.

7.5.2.1. Meritev predhodno pripravljenih raztopin spojin

V okviru vzpostavitve sistema za zaznavo eksplozivov je bil prvi korak izvedba meritev standardnih raztopin izbranih spojin v znanih koncentracijah z uporabo sonde spectro::lyser. Za vsako spojino je bil najprej zajet spektralni odziv pri koncentraciji 0,5 mg/l, nato pa še pri nižjih koncentracijah 0,25 mg/l in 0,125 mg/l. UV/Vis spektralni podpis posamezne spojine je bil določen na podlagi meritev pri različnih koncentracijah in valovnih dolžinah (λ), pri čemer je izhodna vrednost predstavljala izmerjeno absorbanco (ABS) (Slika 21). Za zagotovitev ponovljivosti je bila sonda med posameznimi meritvami vsakič očiščena z destilirano vodo, časovni razmik med meritvami pa je bil nastavljen na 900 sekund, kar je omogočilo ustrezno stabilizacijo sistema ter varno ravnanje z odpadnimi raztopinami.

Pred vsako serijo meritev je bil dodatno izmerjen spektralni odziv ozadja, pripravljen iz vzorca vode, odvzetega na zajetju in uporabljenega pri pripravi standardnih raztopin. Ta postopek je zagotovil ustrezno referenčno bazo za interpretacijo meritev in nadaljnjo kalibracijo sistema.

23130206_50.00_0x3.0_spectro::lyser_GEN_VIS_FINGERPRINT_ABS-M_SCAN_020,spec 23130206,spec 23130206,spec 23130206,spec 23130206,spec 23130206,spec 23130206,spec 23130206,spec 23130206,spec 23130206,spec 23130206,spec 23130206,spec 23130206,spec 23
Measurement interval=900[sec] (Export-Aggregation disabled),200 nm,202.5 nm,205 nm,207.5 nm,210 nm,212.5 nm,215 nm,217.5 nm,220 nm,222.5 nm,225 nm,227.5 nm,230 nm,232.5 nm,235 nm,237.5 nm,240 nm,242.5 nm,245 nm,247.5 nm,250 nm,252.5 nm,255 nm,257.5 nm,26
2024-09-10 10:45:00,152.5482,141.1462,132.1055,123.8374,114.1826,103.1276,90.1695,75.1448,60.1328,46.7293,35.4168,28.2767,25.1972,21.9693,18.2871,15.7167,13.9357,13.0063,12.5784,12.4143,12.2685,11.9613,11.4374,11.0906,11.2767,11.4079,11.1494,10.9406,10.8

Slika 21: Primer zapisa UV/Vis spektralnega podpisa za eno izmerjeno spojino

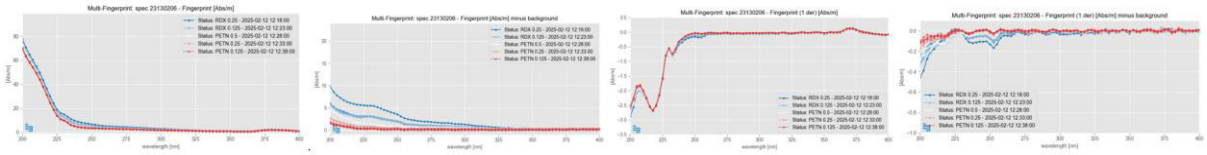
Z naborom podatkov meritev (Slika 22) smo nato postavili primarni, okvirni algoritem za zaznavo posamezne spojine ter razločitev različnih spojin.

testing_spec 23130206_Fingerprint - Abs-m (8)_2024-09-10_10-45-00_fp	10. 09. 2024 11:45	Microsoft Excelov...	7 KB
testing_spec 23130206_Fingerprint - Abs-m (8)_2024-09-10_11-00-00_fp	10. 09. 2024 15:30	Microsoft Excelov...	25 KB
testing_spec 23130206_Fingerprint - Abs-m (8)_2024-09-13_10-30-00_fp	13. 09. 2024 15:45	Microsoft Excelov...	34 KB
testing_spec 23130206_Fingerprint - Abs-m (8)_2024-09-13_15-00-00_fp	26. 09. 2024 08:30	Microsoft Excelov...	1.996 KB
testing_spec 23130206_Fingerprint - Abs-m (8)_2024-09-26_09-00-00_fp	11. 11. 2024 09:45	Microsoft Excelov...	7.551 KB
testing_spec 23130206_Fingerprint - Abs-m (8)_2024-11-11_10-00-00_fp	22. 11. 2024 12:30	Microsoft Excelov...	2.065 KB
testing_spec 23130206_Fingerprint - Abs-m (8)_2024-11-22_13-30-00_fp	12. 12. 2024 15:15	Microsoft Excelov...	2.958 KB
testing_spec 23130206_Fingerprint - Abs-m (8)_2024-12-12_15-30-00_fp	22. 01. 2025 09:30	Microsoft Excelov...	5.986 KB
testing_spec 23130206_Fingerprint - Abs-m (8)_2025-01-22_09-32-00_fp	22. 01. 2025 10:23	Microsoft Excelov...	52 KB
testing_spec 23130206_Fingerprint - Abs-m (8)_2025-01-22_10-30-00_fp	12. 02. 2025 11:30	Microsoft Excelov...	3.147 KB
testing_spec 23130206_Fingerprint - Abs-m (8)_2025-02-12_11-48-00_fp	12. 02. 2025 16:33	Microsoft Excelov...	460 KB
testing_spec 23130206_Fingerprint - Abs-m (8)_2025-02-12_17-15-00_fp	12. 02. 2025 17:30	Microsoft Excelov...	9 KB
testing_spec 23130206_Fingerprint - Abs-m (36)_2024-09-10_10-45-00_...	10. 09. 2024 11:45	Microsoft Excelov...	7 KB
testing_spec 23130206_Fingerprint - Abs-m (36)_2024-09-10_11-00-00_...	10. 09. 2024 15:30	Microsoft Excelov...	25 KB
testing_spec 23130206_Fingerprint - Abs-m (36)_2024-09-13_10-30-00_...	13. 09. 2024 15:45	Microsoft Excelov...	34 KB
testing_spec 23130206_Fingerprint - Abs-m (36)_2024-09-13_15-00-00_...	26. 09. 2024 08:30	Microsoft Excelov...	1.996 KB
testing_spec 23130206_Fingerprint - Abs-m (36)_2024-09-26_09-00-00_...	11. 11. 2024 09:45	Microsoft Excelov...	7.551 KB
testing_spec 23130206_Fingerprint - Abs-m (36)_2024-11-11_10-00-00_...	22. 11. 2024 12:30	Microsoft Excelov...	2.065 KB
testing_spec 23130206_Fingerprint - Abs-m (36)_2024-11-22_13-30-00_...	12. 12. 2024 15:15	Microsoft Excelov...	2.958 KB
testing_spec 23130206_Fingerprint - Abs-m (36)_2024-12-12_15-30-00_...	22. 01. 2025 09:30	Microsoft Excelov...	5.986 KB
testing_spec 23130206_Fingerprint - Abs-m (36)_2025-01-22_09-32-00_...	22. 01. 2025 10:23	Microsoft Excelov...	52 KB
testing_spec 23130206_Fingerprint - Abs-m (36)_2025-01-22_10-30-00_...	12. 02. 2025 11:30	Microsoft Excelov...	3.147 KB
testing_spec 23130206_Fingerprint - Abs-m (36)_2025-02-12_11-48-00_...	12. 02. 2025 16:33	Microsoft Excelov...	460 KB

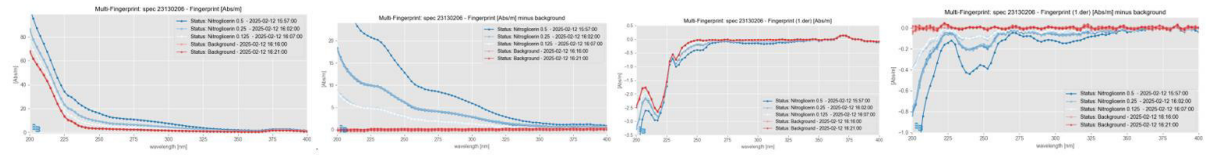
Slika 22: Primer nabora datotek s UV/Vis spektralnimi podpisi za posamezne izmerjene spojine

7.5.2.2. Študija izvedljivosti: evalvacija absorpcijskih spektrov

Vse datoteke s UV/Vis spektralnimi podpisi so bile posredovane proizvajalcu opreme, podjetju S::CAN (AT), kjer so bile najprej pregledane z interno programsko opremo. Postopek je vključeval preverjanje pravilnosti strukture UV/Vis spektralnega podpisa, veljavnosti izmerjenih vrednosti ter oceno odziva senzorskega sistema na prisotnost posamezne spojine v različnih koncentracijah (Slika 23 in 24). Po teh preverjanjih je sledila še analiza razlikovanja spektra posamezne spojine od spektra ozadja, kar je omogočilo oceno selektivnosti in uporabnosti meritev za nadaljnjo konfiguracijo alarmnega sistema.



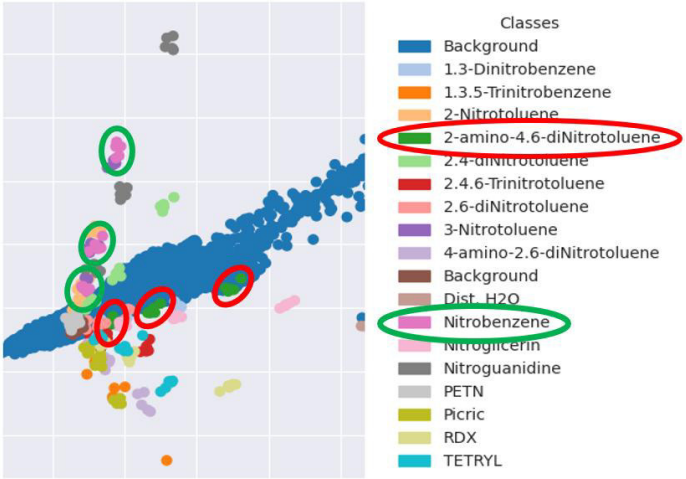
Slika 23: PETN je izmed primerov spojin pri katerem je UV/Vis spektralni podpis spojine težje ločiti od ozadja



Slika 24: Nitroglicerin je izmed primerov spojin pri katerem je UV/Vis spektralni podpis spojine mogoče že v osnovi uspešno ločiti od ozadja

7.5.2.3. Generiranje 4 specifičnih spektralnih parametrov, ki so selektivni za preučevane spojine

Po preverjanju datotek je sledila ekstrakcija podatkov, namenjena določitvi posameznih spektrov. Izvedena je bila statistična analiza absorbančnih spektrov s pristopom PCA (principal component analysis), pri čemer sta bila vključena tako spektralni odziv ozadja kot rezultati meritev spojin streliva (Slika 25). Razlike v razdalji in naklonu barvnih točk v primerjavi z modrimi kažejo na verjetnost ločevanja signalov posameznih parametrov alarma od absorbančnih signalov ozadja. V prikazanem primeru je zaznavanje spojine nitrobenzen (zeleno) ocenjeno kot izvedljivo, medtem ko je ločevanje signalov spojine 2-amino-4,6-dinitrotoluen (rdeče) neizvedljivo, saj so njene vrednosti preblizu spektru ozadja matrike (Slika 25).

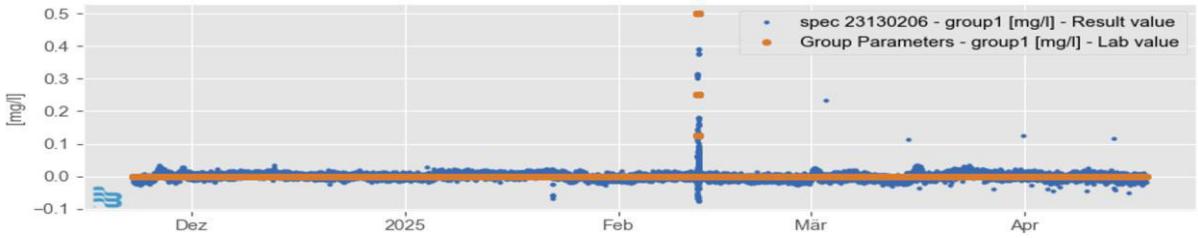


Slika 25: Primer analize PCA absorbančnih spektrov izbranih spojin

Na podlagi rezultatov več PCA analiz smo UV/Vis spektralne podpise merjenih spojin razvrstili v štiri skupine, pri čemer so bile v posamezno skupino vključene spojine s primerljivimi spektralnimi značilnostmi:

- **Skupina 1:** nitroglicerin, RDX, 2-amino-4,6-dinitrotoluen
- **Skupina 2:** 1,3,5-trinitrobenzen, 4-amino-2,6-dinitrotoluen, TETRYL, 2,4,6-trinitrotoluen
- **Skupina 3:** nitroguanidin, nitrobenzen, 2-nitrotoluen, 3-nitrotoluen, 2,4-dinitrotoluen
- **Skupina 4:** 1,3-dinitrobenzen, 2,4-dinitrotoluen, 2,6-dinitrotoluen, RDX, pikrinska kislina

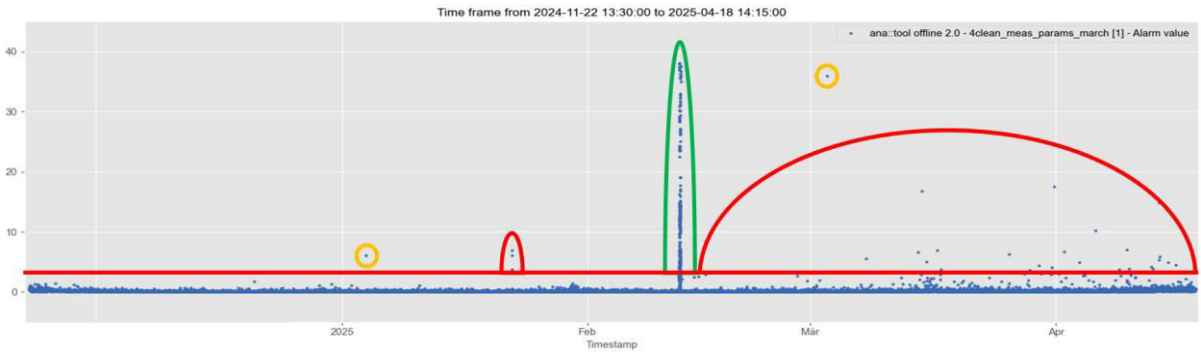
Spojine PETN zaradi izrazito drugačnega spektralnega odziva ni bilo mogoče uvrstiti v nobeno od skupin. Na Sliki 26 je prikazan primer za skupino 1, v katerem so izbrane valovne dolžine, ki omogočajo selektivno razlikovanje med spojinami te skupine. Na podlagi teh valovnih dolžin je bilo mogoče oblikovati štiri spektralne parametre (po enega za vsako skupino), pri čemer je vsak parameter temeljil na osmih posebej izbranih valovnih dolžinah. Spektralni algoritem je bil zasnovan na razlikah med izmerjenimi signali in ozadjem matrike, prilagoditev posameznega parametra koncentracijam pa je bila izvedena z uporabo metode delnih najmanjših kvadratov (PLS).



Slika 26: Primer izbire specifičnih valovih dolžin za namen generiranja »skupine 1« spojin streliv

7.5.2.4. Vzpostavitev sistema v programski opremi »ana::larm«: ugotavljanje občutljivosti sistema na zaznavo spojin glede na ozadje

Ob zaznavi spojin v vzorcu vode s sondo spectro::lyser posamezna spojina absorbira svetlobo pri več valovnih dolžinah, pri čemer se absorbance lahko med seboj razlikujejo. Zato se v programski opremi ana::tool za vsako spojino izvede postopek normalizacije, s katerim se iz več izmerjenih vrednosti oblikuje enoten nabor absorpcijskega vrha pri eni reprezentativni valovni dolžini. V ta nabor so vključene le tiste vrednosti absorbance, ki najbolje korelirajo z razliko med signalom spojine in ozadjem matrike, medtem ko je druge vrednosti, ki se sicer pojavijo pri dodatnih valovnih dolžinah potrebno dodatno oceniti glede njihove uporabnosti ali morebitnega vpliva šuma. Slika 27 spodaj prikazuje primer grafa absorbanc izbrane spojine pri različnih valovnih dolžinah. Z rdečo črto je označena predlagana zgornja meja zaznavnosti v sistemu, katere numerična vrednost znaša 3; ker sistem omogoča hkratno zaznavo več spojin, ta parameter nima klasične merske enote. Z zeleno so označene dejanske alarmne vrednosti, pri katerih izmerjene absorbance presegajo mejno vrednost 3. Z rdečo so prikazane lažne presežne vrednosti, ki izvirajo iz vpliva ozadja ali prisotnosti zračnih mehurčkov, medtem ko oranžno označene vrednosti zahtevajo dodatno preverjanje z obstoječimi ali dopolnjenimi algoritmi za nadaljnjo validacijo.

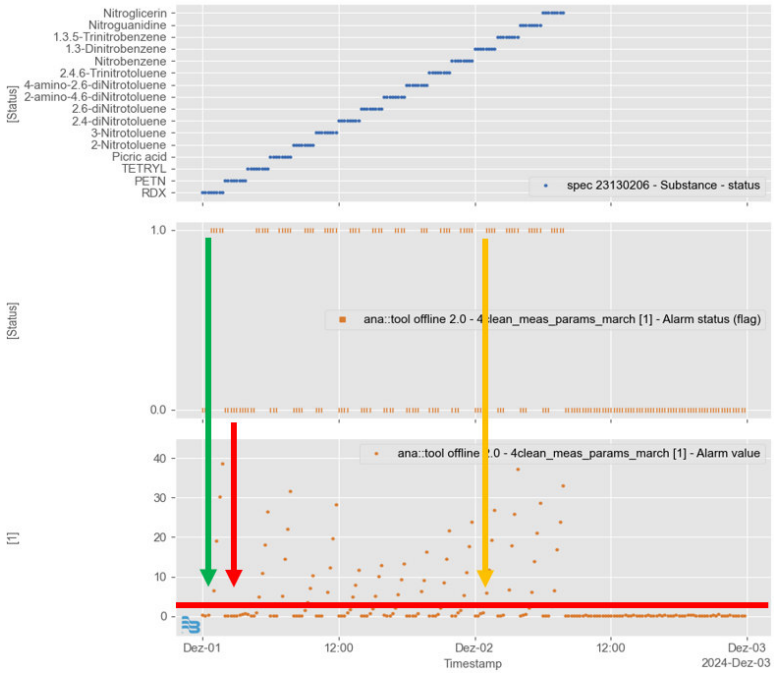


Slika 27: Primer analize določene spojine z uporabo programske opreme “ana::tool” ter ustreznih algoritmov

7.5.2.5. Preverjanje zaznave spojin ter odziva sistema na prekoračenje alarmnih vrednosti za posamezne spojine

Po končni vzpostavitvi sistema za detekcijo posameznih skupin spojin je bila izvedena simulacija detekcije z vrednostmi prvotno izmerjenih vzorcev spojin. Odziv Sistema na prisotnost specifičnih spojin je prikazan spodaj (Slika 28). Za sprožitev alarma je bila izbrana vrednost “3”. Spojina PETN (rdeča

puščica) (Slika 28) ni bila vključena v nobeno skupino, saj v merilnem sistemu ni izkazovala zaznavnega spektralnega odziva. Pri spojini 1,3-dinitrobenzen (oranžna puščica) je bil alarmni prag prav tako nastavljen na približno 3, kar ustreza koncentraciji nižji od 0,125 mg/l; zato je bila pri izmerjeni koncentraciji 0,125 mg/l tudi ta spojina jasno nad alarmnim pragom.



Slika 28: Primer končne simulacije prikazuje odziv posameznih skupin spojin glede na vnaprej določen alarmni prag standardov, je bil prag že izrazito presežen

7.6. Rezultati testnega delovanja opozorilnega sistema

V osnovno statistično analizo smo vključili vse prametre podzemne vode, ki se na vodnem viru Malni spremljajo zvezno s pogostostjo 1-krat na 15 minut. Rezultati osnovne statistične analize so prikazani v preglednici (Preglednica 22). Rezultati kažejo, da so izmerjene vrednosti gladine podzemne vode, temperature, pH, električne prevodnosti, kisika in nitratov v okviru naravnih nihanj (ozadja) vodonosnika. Parametri, ki so značilni za spremljanje potencialnih človekovih dejavnosti na stanje podzemne vode (TOC, motnost, BTX) se pojavljajo v nizkih koncentracijah v sledovih.

Preglednica 22: Rezultati osnovne statistične analize zveznih meritev parametrov v podzemni vodi v obdobju med 25.6.2025 in 19.11.2025

Parameter	N	Srednja vrednost	Mediana	Minimum	Maximum	Razpon	Std.Dev.
Gladina podzemne vode	14146	1,15	1,11	0,49	2,11	1,62	0,39
Temperatura	14146	9,71	9,50	8,10	12,60	4,50	1,15
Električna prevodnost	14146	453,23	451,00	408,00	577,00	169,00	23,19
raztopljeni kisik	14144	10,10	10,18	8,64	11,13	2,49	0,50

pH	14141	7,13	7,10	6,99	7,40	0,40	0,08
motnost	13536	2,30	1,22	0,00	49,27	49,27	4,70
nitrati	14141	5,55	5,34	0,00	11,66	11,66	3,68
TOC	13522	1,56	1,54	0,75	5,34	4,59	0,57
BTX	14142	0,17	0,16	0,00	0,72	0,72	0,08
UV/Vis spektralni podpis (1 skupina)	14008	0,00	0,00	0,00	0,13	0,13	0,01
UV/Vis spektralni podpis (2 skupina)	14008	0,01	0,00	0,00	0,22	0,22	0,03
UV/Vis spektralni podpis (3 skupina)	14007	0,00	0,00	0,00	0,02	0,02	0,00
UV/Vis spektralni podpis (4 skupina)	14007	0,00	0,00	0,00	0,03	0,03	0,00

V naslednji fazi smo izdelali osnovno korelacijsko analizo z namenom ugotavljanja ali obstaja statistično značilna povezava med spremenljivkami. Rezultati korelacijske analize so prikazani v spodnji preglednici (Preglednica 23). Statistično značilna visoka povezanost med spremenljivkama je označena z odebeljeno rdečo (> 0,70), medtem ko je statistično značilna zmerna povezanost med spremenljivkama označena z oranžno barvo (0,50 > x < 0,70). Statistično značilna visoka povezanost se kaže med BTX in temperaturo vode, nitrati in TOC ter UV/Vis spektralni podpis (1 skupina) in UV/Vis spektralni podpis (4 skupina).

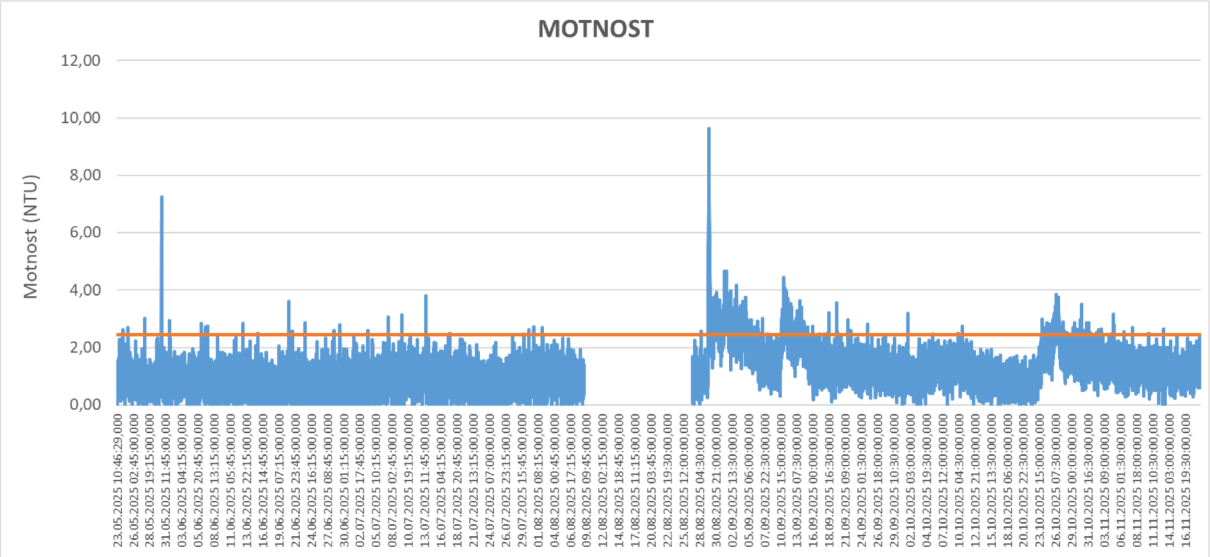
Zmerna povezanost je značilna med temperaturo in kisikom, gladino podzemne vode in električno prevodnostjo, BTX in kisikom, pH in nivojem podzemne vode, pH in UV/Vis spektralni podpis (3 skupina), motnostjo in TOC, nitrati in nivojem podzemne vode, UV/Vis spektralni podpis (2 skupina) in UV/Vis spektralni podpis (4 skupina),
UV/Vis spektralni podpis (3 skupina) in nivojem podzemne vode ter UV/Vis spektralni podpis (3 skupina) in pH.

Preglednica 23: Rezultati korelacijske analize izbranih spremenljivk za obdobje od 25.6.2025 do 25.9.2025

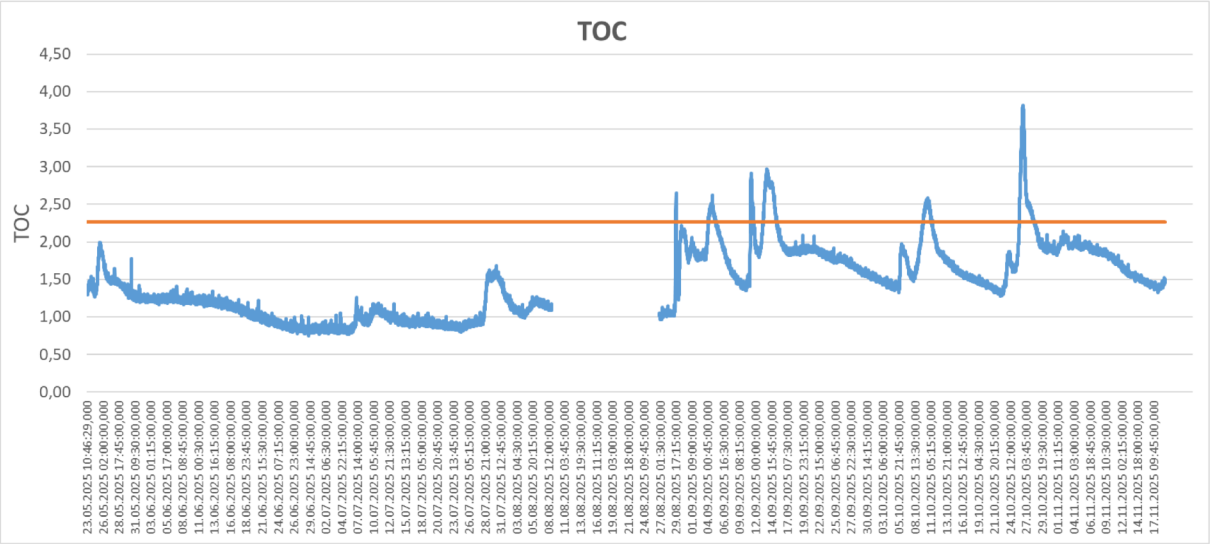
Parameter	Srednja vrednost	Std.Dev.	Nivo PV	T	EC	OXI	pH	motnost	nitrati	TOC	BTX	UV/Vis spektralni podpis (1 skupina)	UV/Vis spektralni podpis (2 skupina)	UV/Vis spektralni podpis (3 skupina)	UV/Vis spektralni podpis (4 skupina)
Nivo PV	1,18	0,38	1,00	0,34	0,58	0,24	0,58	-0,22	-0,69	0,50	-0,01	0,38	0,02	0,53	0,24
T	9,76	1,16	0,34	1,00	0,27	-0,69	0,04	-0,19	-0,30	0,24	0,73	0,08	-0,03	0,20	0,04
EC	454,22	23,14	0,58	0,27	1,00	0,18	0,24	-0,13	-0,41	0,28	-0,01	0,00	0,03	0,21	0,01
OXI	10,09	0,51	0,24	-0,69	0,18	1,00	0,47	0,08	-0,15	0,08	-0,67	0,11	0,04	0,20	0,09
pH	7,13	0,08	0,58	0,04	0,24	0,47	1,00	-0,10	-0,39	0,23	-0,10	0,17	-0,02	0,60	0,11
motnost	2,28	4,52	-0,22	-0,19	-0,13	0,08	-0,10	1,00	-0,37	0,60	-0,04	-0,02	0,42	-0,09	-0,01
nitrati	5,76	3,55	-0,69	-0,30	-0,41	-0,15	-0,39	-0,37	1,00	-0,92	-0,04	-0,45	-0,24	-0,43	-0,26
TOC	1,57	0,57	0,50	0,24	0,28	0,08	0,23	0,60	-0,92	1,00	0,08	0,49	0,41	0,31	0,30
BTX	0,17	0,07	-0,01	0,73	-0,01	-0,67	-0,10	-0,04	-0,04	0,08	1,00	-0,05	0,06	0,02	-0,03
UV/Vis spektralni podpis (1 skupina)	0,00	0,00	0,38	0,08	0,00	0,11	0,17	-0,02	-0,45	0,49	-0,05	1,00	0,38	0,22	0,76
UV/Vis spektralni podpis (2 skupina)	0,00	0,00	0,02	-0,03	0,03	0,04	-0,02	0,42	-0,24	0,41	0,06	0,38	1,00	-0,05	0,59
UV/Vis spektralni podpis (3 skupina)	0,00	0,00	0,53	0,20	0,21	0,20	0,60	-0,09	-0,43	0,31	0,02	0,22	-0,05	1,00	0,09
UV/Vis spektralni podpis (4 skupina)	0,00	0,00	0,24	0,04	0,01	0,09	0,11	-0,01	-0,26	0,30	-0,03	0,76	0,59	0,09	1,00

Za določitev sprožilnih vrednosti posameznih spremenljivk v podzemni vodi smo v statistično analizo izračuna 95 % percentila vključili spremenljivke, ki so značilne za spremljanje potencialnih vplivov vojaške dejavnosti na stanje podzemne vode (TOC, motnost, BTX). Ostale spremenljivke (nivo vode, temperatura in električna prevodnost vode, nitrat, pH vrednost, raztopljen kisik) niso bile vključene v statistično analizo izračuna 95 % percentila, saj so z izjemo električne prevodnosti vode in nitrata, pokazatelj predvsem naravnih nihanj v vodonosniku. Prav tako niso vključeni UV/Vis spektralni podpisi, saj so to parametri, ki so združeni v skupine parametrov glede na njihove lastnosti in ne predstavljajo dejanskih koncentracij parametrov.

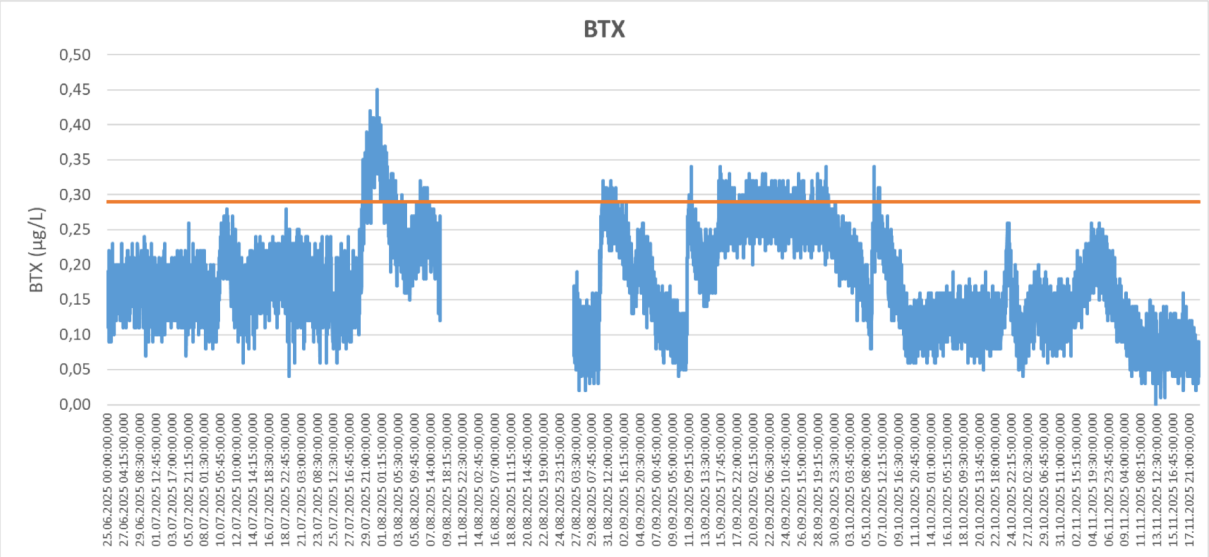
Grafično so rezultati meritev in izračuni 95 % percentila prikazani na spodnjih slikah (Slika 29, Slika 30, Slika 31). Vrednost 95 % percentila znaša za motnost 2,45 NTU, za TOC 2,26 mg C/l in za BTX 0,29 µg/l.



Slika 29: Prikaz časovnega niza meritev motnosti v NTU od 25. 6. 2025 do 19. 11. 2025 ter vrednost 95 % percentila – oranžna črta



Slika 30: Prikaz časovnega niza meritev celotnega organskega ogljika – TOC v mg/l od 25. 6. 2025 do 19. 11. 2025 ter vrednost 95 % percentila – oranžna črta



Slika 31: Prikaz časovnega niza meritev BTX v µg/l od 25. 6. 2025 do 19. 11. 2025 ter vrednost 95 % percentila – oranžna črta

8. PRENOS ZNANJA IN NAČRT UKREPANJA

8.1. Prenos znanja o sistemu na uporabnika Opozorilnega sistema

Prenos znanja o sistemu na uporabnika je bil izveden na podjetju KOVOD, 3.11.2025, z namenom zagotoviti učinkovito, varno in samostojno uporabo rešitve. Uporabniku so bile predstavljene ključne funkcionalnosti sistema, standardni postopki dela ter najboljše prakse za zmanjševanje napak in optimizacijo le teh. Usposabljanje je potekalo kombinirano, preko predstavitve sistema, praktičnih primerov in demonstracij v sami aplikaciji, kar je omogočilo boljše razumevanje delovanja sistema v realnih situacijah. Uporabnik je prejel tudi načrt ukrepanja, ki mu omogoča nadaljnje samostojno delo ter hitrejše reševanje morebitnih težav ob samem zaznanem dogodku. Namen celotnega procesa je bil dosežen, saj lahko uporabnik sistem uporablja preko aplikacije samozavestno in skladno z določenimi smernicami.
Podrobnejši opis komponent, modulov in načrta Opozorilnega sistema je na voljo v prejšnjem poglavju (Poglavje 7).

8.1.1. Vzdrževanje

Vzdrževanje in delovanje Opozorilnega sistema zajema tako redno vzdrževanje naprej po zaključku projekta ter preverbo delovanja opreme (sonde, registratorji, itd.), ki je skladno z navodili proizvajalca opreme. Vključuje pa tudi delovanje sistema ter aplikacije same. Meritve v okviru Opozorilnega sistema je mogoče pobirati 24/7, napake pa se odpravljajo v okviru delovnega časa. Za pravilno delovanje sistema je potrebno pravilno delovanje opreme in senzorjev sistema (oblika formatov, ki jih posredujejo naprave) ter njihova kalibracija, nadgradnja licenc za napravo Spectro::lyser, preverjanje povezave merilnih naprav na registrator, delovanje in vzdrževanje strežnikov, kar vključuje tudi delo sistemskega administratorja, nadgradnje, elektriko, klimatizacijo in UPS.

Vzdrževanje sistema obsega tudi izvajanje statističnih analiz ter posodabljanje sprožilnih in alarmnih vrednosti, ki so povezane z novo zbranimi podatki v prihodnosti v okviru Opozorilnega sistema. Ta del vzdrževanja vključuje obdelavo in optimizacijo sveže zajetih podatkov, kar omogoča natančnejše spremljanje in interpretacijo informacij. Poleg tega se v okviru vzdrževanja redno posodabljajo nastavitve alarmnih sistemov, da se zagotovi njihova ustrezna odzivnost in zanesljivost pri opozarjanju na morebitne kritične dogodke ali odstopanja. S tem se ohranja visoka učinkovitost sistema ter zagotavlja pravočasna in informirana podpora pri odločanju.

8.1.2. Preverba delovanja instrumentov ter prenos podatkov na strežnike

Za preverbo delovanja instrumentov in prenos podatkov na strežnike je potrebno zagotoviti celovit pregled delovanja senzorjev in instrumentov, vključno z vizualnim pregledom, funkcionalnimi testi in kalibracijo, ter preveriti napajanje in električne povezave. Pomembno je tudi testiranje prenosa podatkov iz naprav, kot so Spectro::lyser, pri čemer je lahko vključeno nadgrajevanje licenc za zagotavljanje optimalnega delovanja. Hkrati je treba testirati komunikacijo med instrumenti in lokalnimi registratorji, vključno s kabli, priključki in protokoli, ter zagotoviti zanesljiv prenos podatkov na centralni strežnik ali oblačno rešitev. Pri tem je pomembna varnost in integriteta podatkov, kot npr. prenašanje podatkov v ASCII formatu na daljavo preko protokolov HTTP/HTTPS. Vse rezultate testov je

treba dokumentirati in primerjati z referenčnimi vrednostmi, po potrebi pa izvesti vzdrževalne ukrepe, kot so kalibracija, popravilo ali zamenjava senzorjev, ter nastaviti avtomatske alarme za opozarjanje na motnje ali prekinjene prenose.

8.1.3. Izredni dogodki na merilni opremi

Med izvajanjem projekta smo se soočali z več nepredvidenimi dogodki, ki so vplivali na potek meritev in delovanje merilne opreme in jih je možno pričakovati tudi v prihodnje. Ti izredni dogodki so zajemali tehnične motnje, prekinitve meritev ter poškodbe opreme, ki so zahtevale dodatne intervencije, prilagoditve ali popravila. Proučevanje in dokumentiranje teh dogodkov je bilo ključno za razumevanje vzrokov motenj, zagotavljanje zanesljivosti meritev ter načrtovanje ukrepov za zmanjšanje podobnih težav v prihodnje.

Izredni dogodki, ki so se zgodili med izvajanjem projekta:

- Prekinitve meritev: Med izvajanjem kontinuiranih meritev parametrov po montaži sond smo zaznali več prekinitev meritev, predvsem pri določanju vrednosti nitratov ter nerealnimi vrednostmi drugih parametrov (motnost, TOC, itd.). Po pregledu na terenu smo ugotovili, da so te prekinitve povzročale nečistoče na lečah sond, ki so sicer naravno prisotne v vodi in motijo pravilno delovanje merilne opreme. Težavo smo uspešno odpravili z namestitvijo podpornega kompresorja, ki omogoča razpihovanje in čiščenje leč direktno na sondi s stisnjenim zrakom. Poleg tega je bila sonda za nitrate re-kalibrirana na podlagi laboratorijskih vrednosti nitratov, s čimer smo zagotovili natančnost nadaljnjih meritev.

- Motnje meritev parametra električne prevodnosti podzemne vode: Med izvajanjem meritev smo poiskali tudi korelacije med delovanjem naprav v objektu, kjer je nameščena merilna oprema, in pojavom motenj meritev. Motnje so zabeležene predvsem pri tistih meritvah, kjer so bili senzorji neposredno povezani z električnim potencialom vode, na primer nivo vode, prevodnost vode in vlaga v zemlji. Pri ostalih meritvah, kjer senzorji niso galvansko povezani s potencialom zemlje ali vode (temperatura vode, temperatura zraka, zračna vlaga, zračni tlak, padavine, veter, sončno sevanje itd.), motenj ni, kar nakazuje, da je vzrok električne narave. Ugotovili smo, da potencialne motnje lahko povzročajo elektromagnetni vplivi naprav, frekvenčni pretvorniki ali veliki električni porabniki, ki ob vklopu ustvarijo razlike med napajalno napetostjo (GND) in potencialom zemlje. Možno je tudi, da po zemlji tečejo blodeči tokovi zaradi teh potencialnih razlik. Ko smo identificirali vzrok, ki povzroča motnje, bomo pristopili k njihovemu odpravljanju z vgradnjo filtrov v napajalne vode senzorjev, odmikanje povezovalnih kablov senzorjev od napajalnih kablov močnostnih porabnikov, izenačitev potenciala GND z zemljo (ozemljitev) ter dodatno galvansko izolacijo komunikacije in/ali napajanja.

- Udar strele: Med izvajanjem projekta je prišlo do udara strele, ki je povzročil poškodbe opreme Opozorilnega sistema. Strela je potovala po komunikacijski liniji do vseh zunanjih merilnikov (veter, sončno sevanje, tlak, vlaga in temperature zraka) ter do komunikacijskega vhoda registratorja, kar je povzročilo uničenje napajalnika, poškodbo registratorja ED200, uničenje merilnikov vlage v zemlji in prenapetostne poškodbe merilnikov zunanje vlage, zračnega tlaka,

temperature, sončnega sevanja ter jakosti vetra. Poškodbe so bile prijavljene zavarovalnici, oprema je bila po odobritvi zamenjana in popravljena, vendar je bila približno dva meseca nedelujoča, kar je povzročilo izgubo podatkov in vplivalo na reprezentativnost meritev.

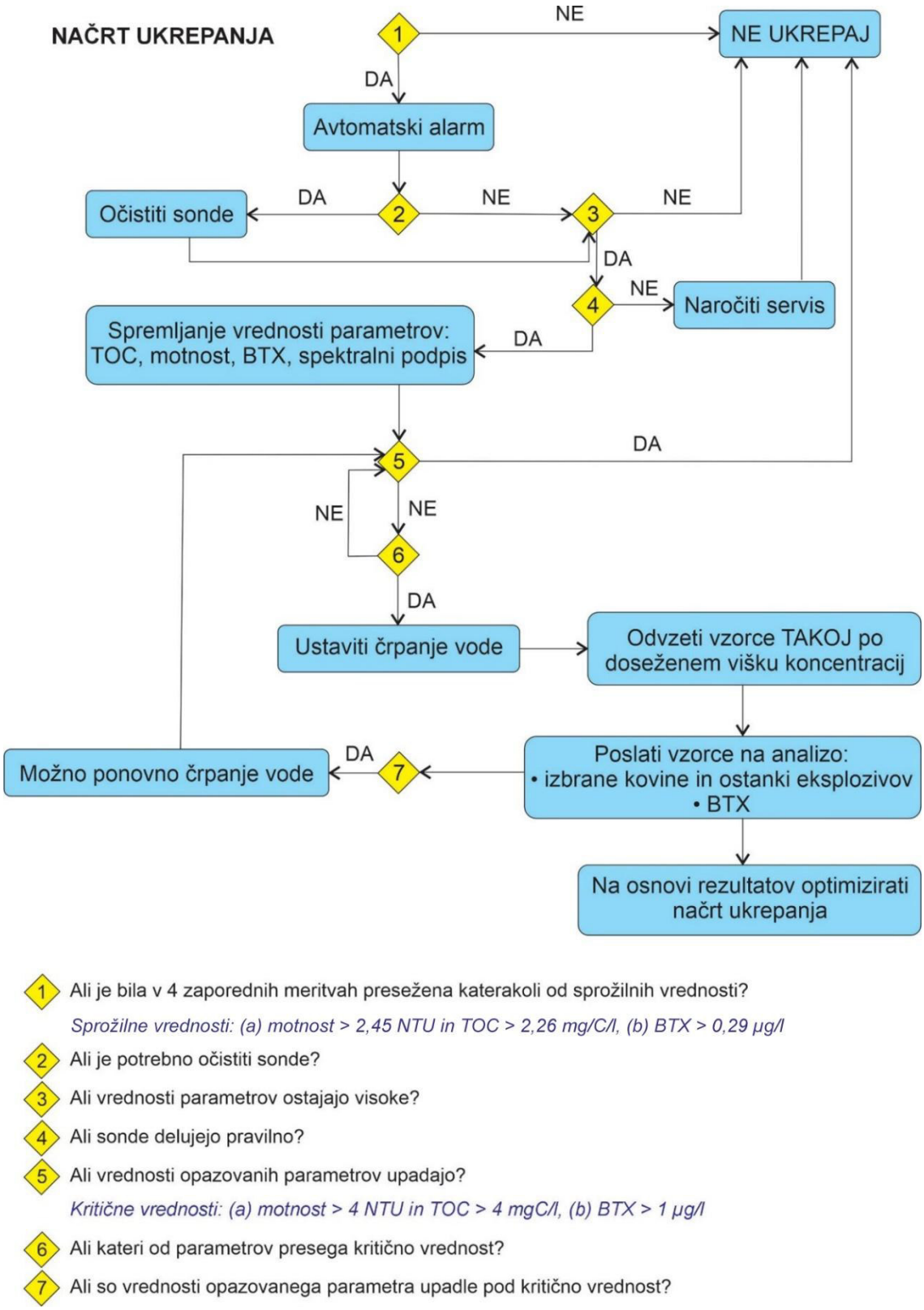
8.2. Načrt ukrepanja ob zaznanih izrednih dogodkih onesnaženja

Z načrtom ukrepanja so predhodno določene aktivnosti, ki jih je potrebno izvesti v primeru zaznanih izrednih dogodkov. V sklopu priprave načrta za projektno območje smo najprej izdelali pregled splošnih priporočil za zgodnje zaznavanje morebitnega onesnaženja v kraških vodonosnikih. Zelo pomembno je dobro predhodno poznavanje značilnosti in delovanja vodnega vira ter njegovega prispevnega zaledja. Vsak kraški sistem je namreč edinstven, zato se odzivi posameznih vodnih virov na padavinske dogodke medsebojno razlikujejo in zahtevajo prilagojen načrt ukrepanja. Zelo uporabne v ta namen so zvezne meritve različnih fizikalno-kemijskih parametrov, ki lahko hitro zaznajo spremembo v lastnostih vode in možno spremembo v kakovosti vode. Prejšnje študije so tudi pokazale, da poslabšanje kakovosti vode najbolj verjetno zaznamo s pogostim vzorčenjem ter kemijskimi in mikrobiološkimi analizami kraške vode v času vodnega vala, ki sledi daljšim sušnim obdobjem.

Z analizo obstoječih tovrstnih podatkov za izvir Malni in njegovo zaledje je bila ugotovljena značilna dinamika napajanja izvira. Pomemben delež ima v začetnem obdobju po padavinah napajanje iz kraškega vodonosnika Javornikov, vpliv napajanja iz cerkniškega dela zaledja pa se pojavi z določenim časovnim zaostankom. Zato bi morebitno onesnaženje na območju vojaškega vadišča najbolj ogrozilo kakovost vode v vodnem viru Malenščica v začetni fazi vodnega vala, ko prevladuje napajanje iz tega dela kraškega vodonosnika in so učinki razredčitve zaradi napajanja iz ostalih delov zaledja še majhni. Podobno velja za stabilne hidrološke razmere v obdobjih, ko je dotok iz Cerkniškega dela zaledja majhen, na prevladujoč vpliv napajanja iz Javornikov pa kažejo stabilne temperature vode na izviru okrog 8,5 °C. Z omejenim naborom parametrov, ki jih je bilo v sklopu predhodnih raziskav možno meriti zvezno, so se kot najbolj primerni za spremljanje dinamike dotoka vode k izviru pokazali temperatura, specifična električna prevodnosti in motnost, pri občasnih kemijskih in mikrobioloških analizah v času vodnega vala še glavni ioni, kot so Ca, Mg in Cl, ter ATP in bakterije. V okviru projekta *Razvoj opozorilnega sistema za zaznavanje vplivov vojaških dejavnosti na podzemno vodo* pa je bilo možno z vzpostavitvijo sistema za zvezne meritve pomembno razširiti nabor teh parametrov.

Z načrtom ukrepanja (Slika 32) so predhodno določene aktivnosti, ki jih je potrebno izvesti v primeru zaznanih izrednih dogodkov. Opisuje ukrepe, ki jih je treba sprejeti v primeru, ko so dosežene sprožilne in kritične vrednosti izbranih parametrov, zvezno merjenih v merilnem sistemu na črpališču Malni. Na osnovi analize testnega delovanja merilnega sistema so bili določeni parametri, ki so relevantni za zaznavanje onesnaženja vode: motnost, TOC in BTX. Na osnovi statistične analize rezultatov meritev opravljenih v obdobju od 25.6. do 19.11.2025 (zaradi neustreznega delovanja sond niso bili uporabljeni podatki za motnost in TOC med 9. in 26.8.2025), ko so sonde za merjenje omenjenih parametrov ustrezno delovale, so bile določene t.i. sprožilne vrednosti izbranih parametrov, pri katerih se sproži alarm, ko sočasno motnost preseže 2,45 NTU in TOC 2,26 mg/l in/ali koncentracije BTX presežejo vrednost 0,29 µg/l. Čeprav so bili uporabljeni podatki za relativno kratko obdobje, pa to obdobje pokrije celoten razpon hidroloških razmer od najnižjih do najvišjih pretokov Malenščice v času hidrološkega leta 2024/25. Ker pa glede na dolgoletne meritve niso bili doseženi zelo nizki vodostaji, je smiselno

nadaljnje spremljanje in analiza podatkov, pridobljenih v vzpostavljenem merilnem sistemu. V nadaljevanju sta prikazana opisni del in shematski prikaz načrta ukrepanja. Na sestanku 3. novembra 2025 smo ta načrt predstavili sodelavcem KOVOD, ki je upravljavec vodovoda in ima že izdelan načrt oskrbe prebivalcev s pitno vodo v primeru izrednih dogodkov ter vzpostavljen notranji nadzor kakovosti vode na podlagi Pravilnika o pitni vodi. Namen je bil povezati in uskladiti omenjena načrta in nadzor ter se dogovoriti o tem, kdo in na kakšen način izvaja posamezne aktivnosti.



Slika 32: Načrt ukrepanja – shematski del

Načrt ukrepanja – opisni del:

1. V merilnem sistemu Malni se alarm pri skrbniku sistema in upravljavcu vodovoda samodejno sproži, če je v 4 zaporednih meritvah (meritve v intervalu 15 minut, torej v trajanju 1 ure) presežena sprožilna vrednost ali za motnost in TOC hkrati in/ali za BTX.
2. Skrbnik sistema v sodelovanju z upravljavcem vodovoda preveri, ali je potrebno sonde očistiti in po potrebi to stori.
3. Če kljub temu vrednosti ostanejo visoke, skrbnik preveri ali sonde glede na razpon in zaporedje izmerjenih vrednosti delujejo pravilno.
4. Če sonde ne delujejo pravilno, skrbnik in upravljavec vodovoda naroči servis.
5. Če sonde delujejo pravilno, skrbnik v nadaljevanju pozorno spremlja vrednosti sprožilnih parametrov (motnost, TOC, BTX), hkrati pa še odziv vrednosti UV/Vis spektralnega podpisa.
6. Če vrednosti omenjenih parametrov začnejo upadati in ohranjajo ta trend, ukrepanje ni potrebno.
7. Če vrednosti ne upadajo oz. se še vedno povečujejo, s spremljanjem nadaljujeta. Če kateri od parametrov doseže kritično vrednost (hkrati motnost 4 NTU in TOC 4 mg/l ali BTX 1 µg/l), je potrebno prenehati s črpanjem vode v vodovodni sistem.
8. Skrbnik v sodelovanju z upravljavcem vodovoda odvzame vzorce vode skladno s protokolom laboratorija, pri katerem se bodo izvajale kemijske analize in načrtom vzorčenja (ob preseženih kritičnih vrednostih za motnost in TOC se analiza prisotnosti ostankov streliv in izbranih kovin, ob preseženih kritičnih vrednostih BTX pa prisotnosti BTX) takoj po doseženem višku koncentracije (takrat, ko pri 4 zaporednih meritvah tega parametra vrednosti stalno upadajo).
9. Vzorce je potrebno čim prej dostaviti v izbrani laboratorij (skladno z navodili izbranega izvajalca kemijskih analiz).
10. Nadaljevanje spremljanja vrednosti parametrov; ko padejo pod kritično vrednost, je možno ponovno vzpostaviti črpanje vode v vodovodni sistem.
11. Po pridobitvi rezultatov opravljenih kemijskih analiz skrbnik sistema analizira ustreznost ukrepov, predvidenih v načrtu ukrepanja. Z rezultati seznani upravljavca vodovoda. V dogovoru in po potrebi se izvede optimizacija načrta ukrepanja.

Načrt ukrepanja je bil usklajen z uporabnikom, KOVOD Postojna, na sestanku dne 3.11.2025 v Postojni.

9. KOORDINACIJA PROJEKTA

9.1. Notranja organizacija projekta

V času trajanja projekta je potekalo redno komuniciranje z vsemi partnerji z namenom, da je projekt potekal nemoteno in da so bili učinki dela optimalni. Ker je partnerstvo zelo raznoliko po stroki in delovnih področjih je bila namenjena še posebna koordinacija ter medsebojna komunikacija. V okviru projekta so bili določene vodje posameznih delovnih sklopov, ki so koordinirale delo znotraj teh sklopov, medsebojno pa smo sproti usklajevali izmenjavo podatkov in izsledkov. O vsebinah dela na projektu smo poročali v vmesnih poročilih sofinancerjema Javna agencija za raziskovalno dejavnost RS (ARIS) in Ministrstvu za obrambo (MORS).

9.1.1. Srečanja vseh raziskovalnih partnerjev in sofinancerja

Vsakih šest mesecev smo organizirali srečanja z vsemi raziskovalnimi partnerji ter predstavniki sofinancerja MORS, na katerih smo poročali o poteku dela in usklajevali prihodnje projektne aktivnosti. Poleg teh rednih srečanj so potekali tudi tematski sestanki v manjših skupinah, namenjeni koordinaciji dela znotraj posameznih delovnih sklopov.

Uvodno srečanje raziskovalnih partnerjev in sofinancerja je bilo izvedeno 29.11.2023 na Geološkem zavodu Slovenije, kjer se je celotna projektna ekipa seznanila z vsemi partnerji, cilji ter terminskim načrtom projekta. Dogovorjen je bil tudi obisk območja vojaškega vadbišča Poček ter vodarne in črpališča Malni, z namenom predstavitve problematike neposredno na terenu. Drugo srečanje je potekalo 24.4.2024 na Nacionalnem inštitutu za biologijo v Ljubljani, kjer smo pregledali vmesne rezultate delovnih sklopov ter uskladili aktivnosti za leto 2024; ob zaključku so nam gostitelji predstavili laboratorije in opremo. Tretje srečanje je bilo organizirano 22.10.2024 na Geološkem zavodu Slovenije, četrto pa 1.4.2025 na Kemijskem inštitutu v Ljubljani; na obeh smo pregledali napredek dela, obravnavali rezultate ter načrtovali nadaljnje faze projekta, pri četrtem srečanju pa smo si ogledali tudi laboratorijske prostore. Zaključno, peto srečanje projektnih partnerjev je potekalo 14.10.2025 na Inštitutu za raziskovanje krasa – ZRC SAZU v Postojni, kjer smo obravnavali dosežene rezultate, uskladili zaključne obveznosti ter pripravili načrt zaključnega poročanja.

Poleg načrtovanih so bili v tem času izvedene tudi dodatne nepredvidene aktivnosti v okviru projekta. Ker jih je bilo precej, ne navajamo vseh, eni bolj pomembnih izmed njih so: Koordinacijski sestanek vseh partnerjev projekta na ZRC SAZU, ogled vadbišča Poček ter vodarne Malni, Postojna, 12.1.2024.; Sestanek glede opozorilnega sistema in prikaza oz. platforme zbiranja podatkov glede na zahteve MORS. Geološki zavod Slovenije, Ljubljana, 14.11.2024; Več koordinacijskih sestankov s proizvajalcem opreme Eltratec d.o.o. in SCAN, glede vzpostavitve Opozorilnega sistema, idr.

9.2. Organizacija projekta navzven

Organizacija projekta navzven vključuje redno komunikacijo s partnerji, naročniki in drugimi sodelujočimi ter posredovanje informacij o napredku projekta. Zajema tudi predstavitve, promocijske aktivnosti in sodelovanje **s širšo javnostjo,** bodisi preko strokovnih ali znanstvenih člankov ali

prispevkov na znanstvenih ter strokovnih srečanjih.

9.2.1. Vmesna poročila izvajanja projekta

Sofinancerjema, ARIS in MORS, smo redno poročali o rezultatih raziskav in dosežkih. Javna agencija za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije (ARIS) smo poročali dvakrat. Leta 2024 je bilo oddano „Letno poročilo o rezultatih ciljnega raziskovalnega projekta za leto 2023" – ARIS, 8.4.2024. Prav tako je bilo v začetku leta 2025 oddano »Letno poročilo o rezultatih ciljnega raziskovalnega projekta za leto 2024«.

Sofinancerju Ministrstvu za obrambo (MORS) smo skladno s pogodbo št. 631-9/2022-85 z dne 24.11.2023 ter Programom dela (NRRIA r.1), ki je Priloga 1 tej pogodbi oddali naslednja poročila:

- MEJNIK 1: FAZA 1 - OPREDELITEV OBMOČIJ IZVAJANJA MONITORINGA PODZEMNE VODE ZA PROJEKT »RAZVOJ OPOZORILNEGA SISTEMA ZA ZAZNAVANJE VPLIVOV VOJAŠKIH DEJAVNOSTI NA PODZEMNO VODO (OPSIPOVO)« (št. poročila 631-124/2024 z dne 15.5.2024).
- MEJNIK 2: FAZA 2 - OPREDELITEV NABORA KEMIJSKIH IN BIOLOŠKIH PARAMETROV NADZORA ZA PROJEKT »RAZVOJ OPOZORILNEGA SISTEMA ZA ZAZNAVANJE VPLIVOV VOJAŠKIH DEJAVNOSTI NA PODZEMNO VODO (OPSIPOVO)« (št. poročila 631-344/2024 z dne 15.11.2024).
- MEJNIK 3: FAZA 3 - VZPOSTAVITEV OPOZORILNEGA SISTEMA ZA PROJEKT »RAZVOJ OPOZORILNEGA SISTEMA ZA ZAZNAVANJE VPLIVOV VOJAŠKIH DEJAVNOSTI NA PODZEMNO VODO (OPSIPOVO)« (št. poročila 631-136/2025 z dne 16.04.2025).
- MEJNIK 4: FAZA 4 - TESTNO DELOVANJE OPOZORILNEGA SISTEMA ZA PROJEKT »RAZVOJ OPOZORILNEGA SISTEMA ZA ZAZNAVANJE VPLIVOV VOJAŠKIH DEJAVNOSTI NA PODZEMNO VODO (OPSIPOVO)« (št. poročila 631-333/2025 z dne 30.10.2025).

9.2.2. Komunikacijski načrt diseminacije projekta

Komunikacijski načrt je eden pomembnih delov projektnih aktivnosti saj zagotavlja učinkovito, dosledno in pregledno izmenjavo informacij med vsemi partnerji in deležniki projekta. Njegov glavni namen je vzpostaviti jasne smernice o tem, kdo, kdaj, kako in katere informacije prejema. Glavni cilj komunikacije in diseminacije v okviru CRP projekta je ozaveščanje o vplivih vojaških dejavnosti na podzemno vodo in povečanje prepoznavnosti opozorilnega sistema. S premišljeno zasnovanim komunikacijskim načrtom bomo zagotovili, da projekt poteka usklajeno, da so vsi deležniki ustrezno obveščeni in vključeni ter da informacije podpirajo doseganje ciljev projekta.

V okviru projekta smo identificirani deležnike, ki sodelujejo pri projektu ali jih projekt neposredno zadeva. To so:

- Strokovna javnost: raziskovalci na področju hidrogeologije, varstva okolja in vojaške ekologije.
- Odločevalci: MORS, itd.
- Industrija / tehnološki partnerji: podjetja, ki razvijajo monitoring ali nadzorne sisteme.
- Širša javnost: lokalne skupnosti v bližini vojaškega vadbišča.

Pomemben del načrta predstavljajo komunikacijski kanali in orodja, preko katerih bo potekala izmenjava informacij:

- Spletna stran projekta (https://www.geo-zs.si/projekt/razvoj-opozorilnega-sistema-za-zaznavanje-vplivov-vojaskih-dejavnosti-na-podzemno-vodo/): vsi, objave o projektu, rezultati, dogodki.
- Znanstveni članki / konferenčni prispevki: Strokovna javnost; Objava raziskav in rezultatov
- Delavnica: KOVOD; Predstavitev sistema, uporaba v praksi. (Izvedeno: 3.11.2025)
- Odločevalci: MORS, itd..
- Širša javnost: lokalne skupnosti v bližini vojaških območij, župani okoliških občin – Javna predstavitev rezultatov projekta dogovorjena s financerjem v januarju 2026.

9.2.3. Znanstvene objave

V okviru projekta so bile pripravljene znanstvene objave, ki predstavljajo preliminarne ugotovitve in rezultate raziskave. Objave, ki bodo zajemale končne rezultate projekta, načrtujemo predstaviti v obliki znanstvenih objav v času enega leta po njegovem zaključku.

1.01 Izvirni znanstveni članek

- ALBREHT, Alen, KOROŠA, Anja. Simultaneous analysis of sixteen energetic nitro compounds and their degradation products in groundwaters and surface waters by ultra-high-performance liquid chromatography. Environmental chemistry and ecotoxicology. 2025, vol. 7, str. 753-761, ilustr. ISSN 2590-1826. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590182625000384, DiRROS - Digitalni repozitorij raziskovalnih organizacij Slovenije, DOI: 10.1016/j.enceco.2025.04.002. [COBISS.SI-ID 234541571]

1.12 Objavljeni povzetek znanstvenega prispevka na konferenci

- KOROŠA, Anja, ALBREHT, Alen, CERAR, Sonja, GUTIÉRREZ-AGUIRRE, Ion, KUTNJAK, Denis, PETRIČ, Metka, POGLAJEN, Rok, PREZELJ, Nina, ŠEGINA, Ela, URBANC, Janko, VIDOVIĆ, Kristijan, RAVBAR, Nataša. Impact of military activities on groundwater (Slovenia, Europe). V: The 52nd Congress of the International Association of Hydrogeologists : Groundwater now and for the future : 15-19 September 2025 : Melbourne, Australia. [S. l.: org. odb., 2025]. Str. [216]. [COBISS.SI-ID 251681795]

- PREZELJ, Nina, LENGAR, Živa, FERLE, Maja, KUTNJAK, Denis, GUTIÉRREZ-AGUIRRE, Ion. Establishing robust and efficient system for surveillance of microorganisms in environmental waters. V: International Conference Pandemic preparedness: achievements, current challenges, and new frontiers : 11-13 November 2024, Trieste, Savoia Excelsior Palace Hotel : abstract book. International Conference Pandemic preparedness: achievements, current challenges, and new frontiers, 11-13 November 2024, Trieste. [S .l.: s. n., 2024]. Str. [10]. https://www.pathogen-ri.eu/uploads/conference_abstract_book.pdf?_cldee=4CNsp2DrX3bLJQmPw7PjlQViFAQC2MPxyeN8f4vnSEXar_3hc6E8BthzyobIj6vF&recipientid=contact-e6fc80aac95bef11bfe30022489c81c5-24904a64aec44e08b14768b42214f7e3&esid=cc631265-dbb3-ef11-b8e9-0022489f8d55. [COBISS.SI-ID 219274755]

1.12 Objavljeni povzetek znanstvenega prispevka na konferenci

- MAYAUD, Cyril, KOGOVŠEK, Blaž, PETRIČ, Metka, RAVBAR, Nataša, BLATNIK, Matej, GABROVŠEK, Franci. Investigating the hydrological behaviour of a shallow karst aquifer flooding intermittently: the Pivka karst aquifer (Slovenia). V: EGU General Assembly 2024 : Vienna, Austria & online, 14-19 April 2024. Göttingen: EGU - European Geosciences Union. 2024, 1 spletni vir. https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU24/EGU24-6096.html, DOI: 10.5194/egusphere-egu24-6096. [COBISS.SI-ID 194537475]

1.17 Samostojni strokovni sestavek ali poglavje v monografski publikaciji

- GABROVŠEK, Franci, MAYAUD, Cyril, KOGOVŠEK, Blaž, BLATNIK, Matej, RAVBAR, Nataša, PETRIČ, Metka. Groundwater flow in the Ljubljanica recharge area : afternoon field trip (B). V: KOGOVŠEK, Blaž (ur.), et al. Data acquisition and analysis in Karst systems = Pridobivanje in analiza podatkov v kraških sistemih : 31st International Karstological School "Classical Karst" = 31. mednarodna krasoslovna šola "Klasični kras" : abstracts & guide book = povzetki & vodnik : Postojna 2024. 1st ed. [Ljubljana]: Založba ZRC, 2024. Str. 23-40, ilustr., graf. prikazi, zvd. ISBN 978-961-05-0871-7. [COBISS.SI-ID 199299331]

3.14 Predavanje na tuji univerzi

- ŠEGINA, Ela. Managing big data: centralization of the sensor network : guest lecture at the University of Applied Sciences FH Campus Wien, Bachelor program Computer Science and Digital Communications, Vienna, 16 May 2023. [COBISS.SI-ID 153123843]

3.15 Prispevek na konferenci brez natisa

- ŠEGINA, Ela, ŠINIGOJ, Jasna. Upravljanje z velikimi podatki: centralizacija senzorske mreže : predavanje na Dnevu odprte znanosti 2023, 14.-15. november 2023, Ljubljana. [COBISS.SI-ID 173818883]

10. RAZPRAVA IN SKLEPI

Značilnosti obravnavanega območja in cilji raziskovalnega projekta

Kamninsko podlago Osrednjega vadišča Slovenske vojske Postojna gradijo karbonatne kamnine, ki so zaradi razpokanosti in zakraselosti zelo dobro prepustne za vodo. Padavine s kraškega površja hitro in v velikem deležu poniknejo v podzemlje, se tam pretakajo različno hitro po celotni hierarhiji različno prepustnih por, razpok in kraških kanalov proti izvirom. Dinamika pretakanja je odvisna od padavinskih in hidroloških razmer, nanjo pa je vezan tudi prenos morebitnega onesnaženja. Med izviri je najpomembnejši vodni vir Malni (Malenščica), ki je zajet za oskrbo s pitno vodo v občinah Postojna in Pivka.

Glavni cilj ciljno raziskovalnega projekta V1-2367 z naslovom *»Razvoj opozorilnega sistema za zaznavanje vplivov vojaških dejavnosti na podzemno vodo«* je vzpostavitev opozorilnega sistema za spremljanje oziroma nadzor potencialnih vplivov vojaških vadišč na podzemne vode. Pri načrtovanju monitoringa kakovosti vode in vzpostavitvi sistema smo upoštevali posebne značilnosti in veliko ranljivost krasa. Na osnovi poznavanja značilnosti obravnavanega vodonosnika smo določili opazovalna mesta za občasna vzorčenja in analize kakovosti vode, izvir Malni pa je bil kot izjemno pomemben vodni vir izbran kot reprezentativno opazovalno mesto in je bil v njem vzpostavljen opozorilni sistem.

Monitoring je bil sestavljen iz dveh komponent: kontinuiranega oziroma zveznega monitoringa izbranih fizikalno kemijskih parametrov ter podrobnega, bolj poglobljenega monitoringa parametrov, na katere lahko vpliva vojaška dejavnost na območju vodonosnika. S kontinuiranim spremljanjem meritev izbranih parametrov lahko zaznamo, da se v sistemu dogaja nekaj nenavadnega oz. je prišlo do sprememb, ki jih je potrebno podrobneje raziskati z dopolnilnimi ciljnimi meritvami.

Razvoj novih analitskih metod in izbira opreme za vzpostavitev opozorilnega sistema

Standardne analitske metode za določevanje specifičnih onesnaževal, ki so lahko povezana z vojaškimi dejavnostmi, so pogosto premalo občutljive za zaznavanje nizkih koncentracij. Zato smo za namene določanja koncentracij policikličnih aromatskih ogljikovodikov (PAH) ter lahko hlapnih aromatskih ogljikovodikov (BTX) v podzemni vodi v okviru projekta razvili metodo, ki omogoča njihovo zanesljivo določanje z uporabo GC-MS sistema in kapilarne kolone HP-5ms. Poleg analitske metode smo optimizirali tudi postopek ekstrakcije teh spojin iz vodnih vzorcev.

Za ločevanje in kvantitativno določanje nitroaromatskih spojin (ostanki eksplozivov) v vodnem mediju smo razvili metodo na osnovi tekočinske kromatografije visoke ločljivosti (HPLC) z UV-detekcijo.

Opozorilni sistem za zaznavanje škodljivih vplivov na podzemne vode mora vključevati ustrezno tehnično infrastrukturo (senzorje, podatkovne zbirke, telemetrijo, terenske komunikacijske module), analitične zmogljivosti za identifikacijo anomalij ter učinkovite komunikacijske in operativne mehanizme za sprožitev ukrepov – od zgodnjih opozoril do aktivnega upravljanja črpanja in zaščitnih režimov. Po pregledu razpoložljive in dostopne opreme smo za izvedbo meritev posameznih parametrov izbrali merilna sistema proizvajalcev S::CAN (Avstrija) in EltraTec (Slovenija), ki sta se pokazala kot najbolj primerna za naše razmere.

Splošne ugotovitve o hidrogeokemičnih in mikrobioloških značilnostih

V okviru projekta je bilo na podlagi analize hidrogeokemičnih, mikrobioloških, izotopskih in radioaktivnih parametrov ter podatkov kontinuiranega monitoringa ugotovljeno, da je kraški vodonosnik med letoma 2024 in 2025 ohranil stabilno geokemično stanje, značilno za karbonatna okolja z oksidativnimi razmerami. Vodonosnik izkazuje stabilne vrednosti osnovnih fizikalno-kemijskih parametrov, skladne z naravnim ozadjem. Rezultati potrjujejo heterogenost sistema: Unica in Izvir Rak odražata dobro prezračen, hidravlično aktiven plitvi del, medtem ko vrtina V-1 kaže na globlji, počasnejši tok z višjo mineralizacijo in manj kisika. Kotliči in Stržen predstavljata bolj dinamične, površinsko bolj izpostavljene segmente z izrazitejšimi sezonskimi nihanji. Izotopske analize ($\delta^{18}O$, $\delta^{2}H$) potrjujejo, da podzemna voda izvira iz lokalnih padavin, sezonske spremembe pa odražajo različne poti infiltracije, razmerje med plitvimi in globljimi vodnimi prispevki ter spremenjene procese izhlapevanja. Stabilna izotopska sestava med lokacijami nakazuje dobro premešan sistem z zmerno sezonsko variabilnostjo.

Največ sezonskih sprememb se pojavlja pri hranilnih snoveh (amonijev kation, kalij, nitrati), ki se odzivajo na hidrološke razmere in lokalne kmetijske vplive; poleti 2025 so bile obremenitve nižje kot leto prej, parametri pa ostajajo nizki in v okviru naravnih vrednosti. Malni, Unica in Stržen so pri tem najranljivejši deli sistema, kar se kaže tudi v občasnih vplivih organskih in anorganskih snovi. Večina analiziranih organskih in anorganskih spojin je bila med letoma 2024 in 2025 pod mejo določljivosti, kar potrjuje odsotnost pomembnih antropogenih virov; poletni porast acetata in formata, zlasti na Malnih, pa nakazuje naravne procese razgradnje organske snovi in okrepljeno infiltracijo. Kloridi, fosfati in fluoridi ostajajo nizki, z manjšimi poletnimi nihanji, skladnimi z naravnimi hidrogeokemičnimi procesi. Koncentracije kovin so prav tako nizke in v mejah naravnega ozadja, poletni porasti aluminija, bora, vanadija, železa in mangana na Izviru Rak in Strženu pa odražajo spremenjene hidrodinamske razmere ter prisotnost delcev; izjema je enkratno odstopanje železa na Kotličih, ki zahteva ponovni pregled. Pri BTX je bil zaznan le izoliran epizodni dogodek na Kotličih in Strženu, saj kasnejše meritve prisotnosti niso potrdile. PAH in nitroaromati so bili večinoma pod mejo zaznavnosti, kar potrjuje zelo nizko obremenjenost in odsotnost aktivnih vojaških virov onesnaženja. Radioaktivnost podzemnih voda je nizka; naravni radionuklidi in antropogeni izotopi so prisotni v koncentracijah, ki so več velikostnih redov nižje od pričakovanega vpliva vojaških dejavnosti ali drugih potencialnih virov. Občasna detekcija Cs-137 na Izviru Rak in V-1 kaže na regionalni atmosferski signal iz preteklih obdobij (npr. Černobil), tritij pa potrjuje prisotnost sodobne meteorne vode. Mikrobiološke analize so potrdile epizodno fekalno onesnaženje, zlasti na Unici, Izviru Rak in Strženu, kjer so bile občasno zaznane vrednosti koliformov, *E. coli* in enterokokov. Molekularno sledenje izvora (MST) je pokazalo pretežno prisotnost govejega izvora onesnaženja, deloma pa tudi človeškega, kar odraža kompleksno kraško hidrologijo in široka prispevna območja. Ker se onesnaženja pojavljajo epizodno in iz različnih virov, je izotopno-molekularni pristop ključen za razumevanje dinamike vplivov in oceno tveganj.

Rezultati analize kakovosti vodnega vira Malni

Bolj podrobno povzemamo rezultate vsebnosti izbranih parametrov v izviru Malni, ki so pomemben vir za oskrbo s pitno vodo. Najbolj neposredno povezani z vojaškimi dejavnostmi so ostanki eksplozivov, ki jih v veliki meri predstavljajo nitroaromatske spojine. V vseh vzorcih iz izvira Malni so bile vsebnosti teh spojin pod mejo zaznavnosti (LOD).

Pri analizi kovin so naši rezultati v primerjavi z rezultati monitoringov, ki redno potekajo v izviru Malni, pri vzorčenju julija 2024 pokazali na višjo vsebnost bakra z 1,5 µg/l (prejšnji monitoringi do 1,1 µg/l, mejna vrednost za pitno vodo 2 µg/l) in cinka z 2,42 µg/l (prejšnji monitoringi do 1,4 µg/l), v juliju 2025 ob nizkem vodostaju pa niklja z 1,19 µg/l (prejšnji monitoringi do 1 µg/l, mejna vrednost za pitno vodo 20 µg/l). Pri obeh vzorčenjih so bile izmerjene višje vsebnosti svinca z 0,56 µg/l v juliju 2024 in kar 14,13 µg/l v juliju 2025. Obe vrednosti presegata vsebnosti, ki so bile izmerjene v prejšnjih monitoringih (do 0,4 µg/l), druga pa tudi mejno vrednost za pitno vodo (5 µg/l). Ker smo opravili samo tri serije vzorčenj in je razpon vrednosti za posamezna vzorčna mesta velik in odvisen tudi od hidroloških razmer, na osnovi teh primerjav še ne moremo trditi, da obstaja trend naraščanja vsebnosti omenjenih kovin v izviru Malni. So pa pomembno opozorilo, da je potrebno vsebnost kovin spremljati bolj pogosto.

Vrednosti BTX so bili v vseh vzorcih izvira Malni pod mejo določljivosti (LOQ; zaznana prisotnost, a v tako majhnih koncentracijah, da zanesljiva kvantifikacija ni možna), s tem pa tudi precej pod mejno vrednostjo za pitno vodo. Vsebnosti PAH spojin so bile v vseh vzorcih pod mejo določljivosti (LOQ), pri večini pa celo pod mejo zaznavnosti (LOD).

Izmerjene koncentracije radionuklidov so bile v vseh vzorcih vode iz izvira Malni najmanj za red velikosti nižje od izračunanih koncentracij vojaških aktivnosti.

<u>Opozorilni sistem in načrt ukrepanja</u>

Zagon in optimizacija opozorilnega sistema za kontinuirano spremljanje parametrov podzemne vode s sondami s::can sta pokazala, da je te tehnologije mogoče učinkovito implementirati tudi v zahtevna kraška okolja. Po uvedbi samodejnega čiščenja, dodatnih prilagoditvah nosilcev sond in dvakratni rekalibraciji sistem deluje stabilno in zanesljivo, pri čemer v 15-minutnih intervalih zagotavlja podatke o BTX, TOC, nitratih, pH in kisiku. Prenos podatkov v portal eTeren omogoča sprotno spremljanje in takojšnje odkrivanje anomalij. V času spremljanja ni bilo zaznanih epizodnih vnosov eksplozivnih spojin, kar potrjuje stabilne razmere in dobro delovanje alarmnega spektralnega sistema.

Pri obdelavi podatkov, ki so bili pridobljeni v sistemu, so bile uporabljene različne statistične analize za določitev značilnih in mejnih vrednosti posameznih spremenljivk v podzemni vodi (električna prevodnost, pH, nitrat, BTX in onesnaževala, določena s pomočjo UV-VIS spektra). Kot najbolj primerni za zaznavanje potencialnih vplivov vojaške dejavnosti na kakovost vode so bili izbrani parametri motnost, TOC in BTX, na osnovi rezultatov statistične analize pa so bile določene sprožilne in kritične vrednosti teh parametrov.

V načrtu ukrepanja so opisane aktivnosti, ki jih je potrebno izvesti v primeru, ko so dosežene sprožilne in kritične vrednosti teh parametrov. Ob prekoračitvi prvih se v opozorilnem sistemu sproži alarm, ob katerem skrbnik sistema in upravljavec vodovoda skrbno spremljata meritve in preverjata ustrezno delovanje sond. Če pa sta hkrati preseženi kritični vrednosti za motnost in TOC in/ali je presežena kritična vrednost za BTX, je potrebno ustaviti črpanje vode v vodovodni sistem in odvzeti vzorce za laboratorijsko analizo prisotnosti ostankov streliv in izbranih kovin in/ali prisotnosti BTX. Skladno z rezultati nadaljnjega delovanja sistema in rezultatov opravljenih analiz je predvidena optimizacija načrta ukrepanja.

Sklep

Skupno rezultati potrjujejo, da je obravnavani kraški vodonosnik relativno dobro ohranjen, stabilen in nizko obremenjen, pri čemer sezonske spremembe ter lokalni vplivi odražajo značilno dinamiko kraškega okolja. Občutljivejši deli sistema, predvsem Malni, Unica in Stržen, so zaradi večjih sezonskih nihanj in potencialnih antropogenih vplivov primerni kandidati za nadaljnje ciljno spremljanje. Vzpostavljen sistem zveznega monitoringa predstavlja ključen korak k zgodnjemu zaznavanju sprememb in upravljanju vodonosnika, saj omogoča takojšen vpogled v stanje podzemne vode in pravočasno ukrepanje ob morebitnih anomalijah. Rezultati tako podpirajo razvoj nadgrajenega opozorilnega sistema, ki temelji na podatkih v realnem času in predstavlja pomembno orodje za trajnostno upravljanje kraških vodnih virov.

11. LITERATURA

Al Sayegh Petkovšek, S. et al,, 2009: Pehotna strelišča kot dejavnik tveganja za okolje s poudarkom na ekološki sanaciji pehotnega strelišča na vojaškem poligonu Poček, končno poročilo DP 12/02/09.- Velenje ERICo, 311 pp.

ARSO, 2024: Hidrološki arhiv, MOP ARSO. https://vode.arso.gov.si/hidarhiv/pov_arhiv_tab.php

Bole, M., Al Sayegh-Petkovšek, S., Druks Gajšek, P., Kogovšek, J., Petrič, M., Pokorny, B., 2011: Ocena vpliva vojaškega vadišča Poček na kraške vode.- V: Knez, M. et al. (ur.), Krasoslovje v razvojnih izzivih na krasu. 1, Voda. Ljubljana, Založba ZRC, 100-123.

Browning in sod., 2023. Validating Microbial Source Tracking Markers and Assessing the Efficacy of Culturable E. coli and Enterococcus Assays in Ozark Streams, USA | SpringerLink

Carrey in sod., 2021. Combining multi-isotopic and molecular source tracking methods to identify nitrate pollution sources in surface and groundwater - ScienceDirect

Ćuk Đurović M, Petrič M, Jemcov I, Mulec J, Mazej Grudnik Z, Mayaud C, Blatnik M, Kogovšek B, Ravbar N (2022) Multivariate Statistical Analysis of Hydrochemical and Microbiological Natural Tracers as a tool for Understanding Karst Hydrodynamics (the Unica Springs, SW Slovenia). Water Resources Research, 58, e2021WR031831.

Dick L. K. and K. G. Field, 'Rapid estimation of numbers of fecal Bacteroidetes by use of a quantitative PCR assay for 16S rRNA genes', Appl Environ Microbiol, vol. 70, no. 9, pp. 5695–5697, Sep. 2004, doi: 10.1128/AEM.70.9.5695-5697.2004.

Diston in sod., 2018. Microbial source tracking in highly vulnerable karst drinking water resources

Gams, I., 2003: Kras v Sloveniji v prostoru in času. Založba ZRC, Ljubljana, 516 str.

Gabrovšek, F., Kogovšek, J., Kovačič, G., Petrič, M., Ravbar, N. & J. Turk, 2010: Recent results of tracer tests in the catchment of the Unica River (SW Slovenia). Acta Carsologica, 39/1, 27-37. https://doi.org/10.3986/ac.v39i1.110

Gómez-Doñate, M., E. Ballesté, M. Muniesa, and A. R. Blanch, 'New molecular quantitative pcr assay for detection of host-specific bifidobacteriaceae suitable for microbial source tracking', Appl Environ Microbiol, vol. 78, no. 16, pp. 5788–5795, Aug. 2012, doi: 10.1128/AEM.00895-12.

Habič, P., 1975: Pivka in njena kraška jezera. Ljudje in kraji ob Pivki, str. 41-50. Ljubljana.

Habič, P., 1987: Raziskave kraskih izvirov v Malnih pri Planini in zaledja vodnih virov v obcini Postojna. Poročilo, IZRK Postojna.

Habič, P., Gospodarič, R., Kogovšek, J., Hajna, J., Drame, L., Luzar, M., Tomšič, S. in Morel, S., 1987: Speleohidrološke raziskave zaledja Malnov. Inštitut za raziskovanje Krasa ZRC SAZU Postojna.

Haramoto in sod., 2013: Occurrence of Pepper Mild Mottle Virus in Drinking Water Sources in Japan | Applied and Environmental Microbiology (asm.org)

Hernroth, B. E., A. C. Conden-Hansson, A. S. Rehnstam-Holm, R. Girones, and A. K. Allard, 'Environmental factors influencing human viral pathogens and their potential indicator organisms in the blue mussel, Mytilus edulis: The first Scandinavian report', Appl Environ Microbiol, vol. 68, no. 9, pp. 4523–4533, Sep. 2002, doi: 10.1128/AEM.68.9.4523-4533.2002.

Kildare, B. J., C. M. Leutenegger, B. S. McSwain, D. G. Bambic, V. B. Rajal, and S. Wuertz, '16S rRNA-based assays for quantitative detection of universal, human-, cow-, and dog-specific fecal Bacteroidales: A Bayesian approach', Water Res, vol. 41, no. 16, pp. 3701–3715, 2007, doi: 10.1016/j.watres.2007.06.037.

Kitajima, M, H. P. Sassi, and J. R. Torrey, 'Pepper mild mottle virus as a water quality indicator', npj Clean Water, vol. 1, no. 1. Nature Research, Dec. 01, 2018. doi: 10.1038/s41545-018-0019-5.

Kogovšek, J., 1999: Nova spoznanja o podzemnem pretakanju vode v severnem delu Javornikov (Visoki kras).- Acta carsologica, 28/1, 161-200.

Kogovšek, J. 2004: Fizikalno-kemične značilnosti voda v zaledju Malenščice (Slovenija). Acta carsologica 33/1, str. 143-158. Ljubljana.

Kogovšek, B., Jemcov, I., Petrič, M., 2023: Advanced application of time series analysis in complex karst aquifers: A case study of the Unica springs (SW Slovenia). Journal of Hydrology, vol. 626, part a, no. 130147. doi: 10.1016/j.jhydrol.2023.130147

Kovačič, G., 2010: Hydrogeological study of the Malenščica karst spring (SW Slovenia) by means ofa time series analysis. Acta carsologica, 39/2, 201-215.

Kovačič, G., 2011: Kraški izvir Malenščica in njegovo zaledje: hidrološka študija s poudarkom na analizi časovnih vrst. Koper: Univerza na Primorskem, Znanstveno-raziskovalno središče, Univerzitetna založba Annales. 408 str.

Layton, A., L. McKay, D. Williams, V. Garrett, R. Gentry, and G. Sayler, 'Development of Bacteroides 16S rRNA gene taqman-based real-time PCR assays for estimation of total, human, and bovine fecal pollution in water', Appl Environ Microbiol, vol. 72, no. 6, pp. 4214–4224, Jun. 2006, doi: 10.1128/AEM.01036-05.

Leins, T., Scheller, M., Çalli, K. O., Ravbar, N., Mayaud, C., Petrič, M., Liu, Y., Hartmann, A., 2025: A new process-based approach for defining karst aquifer vulnerability to contamination risks under global changes. Science of the total environment, vol. 966, 178561, p. 1-28. doi: 10.1016/j.scitotenv.2025.178561

Maksimovic Carvalho Ferreira O et al., 'Evaluation of Methods and Processes for Robust Monitoring of SARS-CoV-2 in Wastewater', Food Environ Virol, vol. 14, no. 4, pp. 384–400, Dec. 2022, doi: 10.1007/s12560-022-09533-0.

Mieszkin, S., J. P. Furet, G. Corthier, and M. Gourmelon, 'Estimation of pig fecal contamination in a river catchment by real-time PCR using two Pig-Specific Bacteroidales 16S rRNA genetic markers', Appl Environ Microbiol, vol. 75, no. 10, pp. 3045–3054, May 2009, doi: 10.1128/AEM.02343-08.

Ohad in sod., 2015. Microbial Source Tracking in Adjacent Karst Springs

Paruch in Paruch 2023. Water | Free Full-Text | An Overview of Microbial Source Tracking Using Host-Specific Genetic Markers to Identify Origins of Fecal Contamination in Different Water Environments (mdpi.com)

Pepelnik, T., Janež, J., Serianz, L., Cerar, S., Lapajne, V., Mlakar, B., Urbanc, J., Mali, N., Koroša, A., Krivic, J., 2019: Dopolnitev strokovnih podlag za DPN OSVAD Postojna, segment podzemne vode.- Poročilo, 145 str.+priloge, Geološki zavod Slovenije, Ljubljana.

Petrič, M., 2010: Characterization, exploitation, and protection of the Malenščica karst spring, Slovenia: case study.- In: Krešić, N, Stevanović, Z. (eds.) Groundwater hydrology of springs: engineering, theory, management, and sustainability. Butterworth-Heinemann, pp. 428-441, Burlington.

Petrič, M., Kogovšek, J., Ravbar, N., 2018: Vplivi nezasičene cone na značilnosti toka podzemne vode in prenosa topnih snovi v gorskih kraških vodonosnikih – primer Javorniško-Snežniškega masiva (JZ Slovenija).- Acta carsologica, 47/1, 35-51. https://doi.org/10.3986/ac.v47i1.5144

Ravbar, N., Mulec, J., Mayaud, C., Blatnik, M., Kogovšek, B., Petrič, M., 2023: A comprehensive early warning system for karst water sources contamination risk, case study of the Unica springs, SW Slovenia. Science of the Total Environment. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163958

Ravbar, N., Mulec, J., Mayaud, C., Blatnik, M., Kogovšek, B., Petrič, M., 2024: Priporočila za zgodnje zaznavanje onesnaženja v primeru kraških izvirov Unice. V: Cerkvenik, S. (ur.). Vodni dnevi 2024: 30 let : simpozij z mednarodno udeležbo : zbornik referatov : 29.-30. maj 2024, Rimske Toplice, Kongresni center Rimske terme. Elektronska izd. Ljubljana: Slovensko društvo za zaščito voda, p. 24-35. https://sdzv-drustvo.si/wp-content/uploads/2024/07/zbornik-referatov-vodni-dnevi-2024.pdf.

Reischer, G. H. , D. C. Kasper, R. Steinborn, A. H. Farnleitner, and R. L. Mach, 'A quantitative real-time PCR assay for the highly sensitive and specific detection of human faecal influence in spring water from a large alpine catchment area', Lett Appl Microbiol, vol. 44, no. 4, pp. 351–356, 2007, doi: 10.1111/j.1472-765X.2006.02094.x.

Rosario in sod., 2009: Pepper Mild Mottle Virus as an Indicator of Fecal Pollution | Applied and Environmental Microbiology (asm.org)

Rusjan, S., Sapač, K., Petrič, M., Lojen, S., Bezak, N., 2019: Identifying the hydrological behavior of a complex karst system using stable isotopes.- Journal of Hydrology, 577. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.123956.

s::can Messtechnik GmbH (2016). Report EYDAP Trial for ScientAct SA (Ref. Nr. SPT-1582, V1.2).

s::can GmbH (2023). 24/7 event detection and fully automatized process optimization – Municipal Wastewater Treatment, Portugal (CTGA case study).

s::can Messtechnik GmbH (n.d.). Online WQ monitoring and UV/Vis spectrometry – Irrigation water / CB Romagna Occidentale project.

Schill, W. B. and Mathes, M. V., 'Real-time PCR detection and quantification of nine potential sources of fecal contamination by analysis of mitochondrial Cytochrome b targets', Environ Sci Technol, vol. 42, no. 14, pp. 5229–5234, Jul. 2008, doi: 10.1021/es800051z.

Stange in Tiehm, 2020. Occurrence of antibiotic resistance genes and microbial source tracking markers in the water of a karst spring in Germany

Vrbič Kugonič, N., Šešerko, M., Al Sayegh Petkovšek, S., 2016: Monitoring tal na osrednjem vadišču Slovenske vojske (OSVAD), Postojna, poročilo DP 6/02/16.- ERICo, 7 p., Velenje.

Zhang in sod., 2014. Tracing fecal pollution sources in karst groundwater by Bacteroidales genetic biomarkers, bacterial indicators, and environmental variables

12. PRILOGE

- Priloga 1:
    a) Poročilo o izvedbi analiz radioaktivnosti v podzemnih vodah (Institut »Jožef Stefan«, Ljubljana, 5.9.2024)
    b) Poročilo o izvedbi analiz radioaktivnosti v podzemnih vodah (Institut »Jožef Stefan«, Ljubljana, 3.2.2025)
    c) Poročilo o izvedbi analiz radioaktivnosti v podzemnih vodah (Institut »Jožef Stefan«, Ljubljana, 10.10.2025)

- Priloga 2: Opozorilni sistem - Prikazi zveznih meritev fizikalno-kemijskih parametrov in izbranih onesnaževal za obdobje od 25.6.2025 do 19.11.2025

PRILOGA 1:

a) Poročilo o izvedbi analiz radioaktivnosti v podzemnih vodah (Institut »Jožef Stefan«, Ljubljana, 5.9.2024)
b) Poročilo o izvedbi analiz radioaktivnosti v podzemnih vodah (Institut »Jožef Stefan«, Ljubljana, 3.2.2025)
c) Poročilo o izvedbi analiz radioaktivnosti v podzemnih vodah (Institut »Jožef Stefan«, Ljubljana, 10.10.2025)

Institut "Jožef Stefan", Ljubljana, Slovenija
1001 Ljubljana, Jamova 39, p. p. 3000 / Tel.: 01 477 3900/ Fax: 01 477 3151 / www.ijs.si

Vaš znak: Naš znak: QA – 108 / 24 datum: 5. september 2024

dr. Anja KOROŠA, univ.dipl.inž.geol.
GEOLOŠKI ZAVOD SLOVENIJE
Oddelek za podzemne vode - hidrogeologija
Dimičeva ulica 14,
1000 Ljubljana

Zadeva: ***Izvedba analiz radioaktivnosti v podzemnih vodah***

Spoštovani,

v prilogi vam pošiljamo poročilo o analizah šestih vzorcev podzemnih vod, po naročilnici št. 828.2024 ter pojasnilo k rezultatom meritev.

Opravljene so bile analize:

1. Ugotavljanje koncentracije aktivnosti sevalcev gama z visokoločljivostno spektrometrijo gama po postopku LMR-DN-10, akreditacijska listina LP-022;

2. Analiza in izračun vsebnosti sevalcev α in β po postopku LSC-DN-10 izdaja 02, akreditacijska listina LP-022;

3. Ugotavljanje koncentracije tritija v podzemni vodi LSC-DN-07, izdaja 8 , akreditacijska listina LP-022;

Če potrebujete dodatne informacije, nas prosim pokličite ali pišite na spodnji elektronski naslov.

S spoštovanjem,

dr. Benjamin Zorko
telefon: 01 4773 416
telefaks: 01 4773 151
email: benjamin.zorko@ijs.si

Pojasnila k rezultatom meritev

Z VLG smo ugotavljali koncentracije aktivnosti sevalcev gama, z LSC pa smo izmerili koncentracije aktivnosti tritija (H-3) in skupne specifične aktivnosti sevalcev alfa in beta raztopljenih v podzemni vodi v okolici vojaškega vadišča Poček (izvir Rak, izvir Kotliči, bruhalnik Stržen, izvir Unice, zajetje pitne vode Malni in vrtina V-1 v Žejah). Rezultati meritev z različnimi spektroskopskimi metodami so prikazane v tabeli 1. Za primerjavo so prikazane izpeljane koncentracije aktivnosti radionuklidov in priporočene ravni za skupne aktivnosti sevalcev alfa in beta v pitni vodi. Izpeljane koncentracije aktivnosti smo izračunali ob predpostavki, da je letna indikativna doza 0,1 mSv ob porabi 0,73 m^3 pitne vode za odraslega prebivalca, ki se oskrbuje z vodo z določenega vodnega vira.

Iz tabele 1 je razvidno, da so izmerjene koncentracije aktivnosti zaznanih radionuklidov v vseh vzorcih najmanj red velikosti nižje od njihovih izpeljanih koncentracij aktivnosti.

Med naravnimi radionuklidi so bili v vzorcih podzemnih vod zaznani radionuklidi uranove in torijeve razpadne verige, radioaktivni kalij K-40 ter kozmogeni Be-7, ki nastaja v zemeljski atmosferi in se spira v tla z deževnico. Naravne in umetne radionuklide lahko uporabimo tudi kot sledilce za študije transportnih procesov v naravi. Na podlagi prisotnosti K-40 lahko ocenimo na primer obremenjenost okolja zaradi kmetijstva. Kalij je namreč sestavni del umetnih gnojil. Prisotnost kozmogenega Be-7 v vzorcih podzemne vode lahko kaže na mešanje med padavinami in podtalnico oziroma vodo v vodonosniku. Tudi umetni radionuklid Cs-137 se lahko uporablja kot sledilec za študij transportnih procesov.

Izotop berilija Be-7 je kozmogeni radionuklid z razpolovnim časom 53,3 dni, ki nastaja v zgornjih plasteh ozračja zaradi vpliva kozmičnih žarkov, ki se nato izpira z dežjem na površino Zemlje in z vodo pronica v podtalnico. Izmerjene koncentracije aktivnosti Be-7 so bile nad mejo detekcije v vseh vzorcih podzemnih vod, razen v vrtini V-1. Iz izmerjenih koncentracij aktivnosti Be-7, ki so nizke, lahko njegovo prisotnost interpretiramo kot posledico sekundarnih pojavov - adsorpciji atomov Be-7 na druge suspendirane delce večjih mas v vodi.

Prisotnost K-40 v vodi je posledica splošne razširjenosti kalija v vrhnji plasti zemlje. Kalijeve spojine so v vodi topne, zato prisotnost kalija v vodi kaže na prisotnost kalija v snoveh, ki so bile v stiku z vodo. Njegova vsebnost je odvisna od geološke strukture, ki je v Sloveniji zelo raznolika. Izmerjene koncentracije aktivnosti K-40 v vseh vzorcih so primerljive s koncentracijami aktivnosti, izmerjenimi pri rednih radioloških monitoringih, ki se izvajajo v Republiki Sloveniji.

Koncentracije aktivnosti Ra-226 smo določili iz koncentracij radonovih potomcev, kjer smo upoštevali ekshalacijo radona iz vzorca. Koncentracije aktivnosti U-238 smo določili iz koncentracije aktivnosti potomca Th-234 in iz koncentracije aktivnosti U-235 pri predpostavki naravnega razmerja koncentracij med U-238 in U-235. Za informativno primerjavo lahko navedemo, da so v okviru nacionalnega nadzora radioaktivnosti v pitni vodi koncentracije aktivnosti U-238 v povprečju 3,3 Bq/m^3 z najvišjo vsebnostjo 36 Bq/m^3, Ra-226 4,6 Bq/m^3 z najvišjo vsebnostjo 44 Bq/m^3, Ra-228 1,6 Bq/m^3 z najvišjo vsebnostjo 24 Bq/m^3 in K-40 26 Bq/m^3 z najvišjo vsebnostjo 228 Bq/m^3. Ugotavljamo, da se vsebnosti naravnih radionuklidov v podzemni vodi iz šestih vzorcev ne odmikajo od slovenskega povprečja, posamezne anomalije pa poudarjajo raznolikost in pestrost geološke sestave in vpliv drugih dejavnikov na prisotnost naravnih radionuklidov v podtalnici.

V vzorcih podzemnih vod iz bruhalnika Stržen in izvira Malni je bil detektiran Cs-137, kar bi lahko pomenilo, da je bila podzemna voda na teh vzorčnih mestih v stiku z atmosfero po černobilski nesreči. Cs-137 z razpolovnim časom približno 30 let je namreč v življenjskem okolju prisoten kot posledica splošne radioaktivne onesnaženosti okolja zaradi nadzemskih jedrskih poskusov v letih 1945–1975 in zaradi černobilske nesreče leta 1986. Na preostalih lokacijah radioaktivnega cezija nismo detektirali.

Tritij (H-3) je naraven kozmogeni in antropogen radionuklid. Ker nastaja v zgornjih plasteh atmosfere, je prisoten v deževnici in vodotokih, zato je uporaben kot sledilec vodnega kroga in datiranje podzemnih vod. Naravna koncentracija aktivnosti tritija v deževnici je od 0,2 kBq/m^3 do 1,5 kBq/m^3. Koncentracije aktivnosti tritija v vseh šestih vzorcih so bile od 0,49 do 0,72 kBq/m^3.

Institut "Jožef Stefan", Ljubljana, Slovenija
1001 Ljubljana, Jamova 39, p. p. 3000 / Tel.: 01 477 3900/ Fax: 01 477 3151 / www.ijs.si

Prav tako noben vzorec podzemne vode ne presega priporočenih ravni, 0,1 Bq/L, za skupno specifično aktivnost sevalcev alfa in 1 Bq/L za skupno specifično aktivnost sevalcev beta v pitni (podzemni) vodi.

Če je izpolnjena enačba (1)

$$\sum_{i=1}^{N} \frac{a_{i,izm}}{a_{i,IK}} \leq 1, \qquad (1)$$

kjer so: $a_{i,izm}$ ugotovljena koncentracija aktivnosti radionuklida *i* v vodi, $a_{i,IK}$ izpeljana koncentracija aktivnosti radionuklida *i* in N število zaznanih radionuklidov, potem se lahko domneva, da je indikativna doza za izbrani vzorec vode nižja od 0,1 mSv.

Tabela 1: Koncentracije aktivnosti radionuklidov v vzorcih podzemnih vod iz izvira Rak, izvira Kotliči, bruhalnika Stržen, izvira Unice, zajetja pitne vode Malni in vrtine V-1 v Žejah. V tabeli so tudi izmerjene skupne specifične aktivnosti sevalcev alfa in beta za vzorce vode iz posamezne lokacije.

Vzorč. mesto	Izvir Rak	Kotliči	Bruhalnik Stržen	Unica (Planinska jama)	izvir Malni	Žeje, vrtina V-1	Izpeljana koncentracija aktivnosti
Datum vzor.	2. 7. 2024	3. 7. 2024	3. 7. 2024	2. 7. 2024	2. 7. 2024	3. 7. 2024	
Kol. vzorca (L)	53,21	52,11	52,39	52,02	51,71	52,64	
Koda vzorca	N24SN1380A71	N24SN1380B71	N24SN1380C71	N24SN623071	N24VD623271	N24VR625771	
Radionuklid	Koncentracija aktivnosti (Bq/m³)						(Bq/m³)
U-238	2,9E-00 ± 1E-00	6,6E-00 ± 2E-00	3,9E-00 ± 1E-00	2,3E-00 ± 5E-01	2,1E-00 ± 6E-01	2,9E-00 ± 2E-00	3,04E-03
Ra-226	1,9E-00 ± 4E-01	4,8E-01 ± 4E-01 ‡	1,5E-00 ± 5E-01	4,9E-00 ± 1E-00	1,7E-00 ± 3E-01		4,9E-02
Pb-210	9,7E-01 ± 5E-01	1,4E-01 ± 2E-00	2,1E-01 ± 2E-00	3,7E-00 ± 5E-01	6,5E-00 ± 5E-01	3,6E-00 ± 2E-00	2,0E-02
Ra-228	2,8E-01 ± 2E-01 ‡	6,7E-01 ± 5E-01	7,4E-01 ± 5E-01	3,7E-01 ± 2E-01	5,8E-01 ± 2E-01	3,7E-01 ± 5E-01 ‡	2,0E-02
Th-228	2,3E-01 ± 5E-01 ‡	7,8E-01 ± 4E-01	5,9E-01 ± 3E-01	3,7E-01 ± 1E-01	1,8E-01 ± 5E-02	2,9E-01 ± 4E-01 ‡	1,9E-03
Th-230					3,2E-00 ± 2E-00		6,5E-02
K-40	3,0E-01 ± 2E-00	1,2E-01 ± 4E-00	1,2E-01 ± 4E-00	1,1E-01 ± 1E-00	1,0E-01 ± 1E-00	9,6E-00 ± 4E-00	2,2E-04
Be-7	1,9E-00 ± 7E-01	6,9E-00 ± 2E-00	2,7E-01 ± 2E-00	5,5E-00 ± 8E-01	2,1E-00 ± 5E-01		4,9E-06
Cs-137			5,7E-01 ± 2E-01		9,2E-02 ± 5E-02		1,1E-04
H-3	7,2E-02 ± 3E-01	6,8E-02 ± 3E-01	6,9E-02 ± 4E-01	4,9E-02 ± 3E-01	5,6E-02 ± 3E-01	6,2E-02 ± 3E-01	1,0E-05
Skupna vsebnost sevalcev alfa in beta	Skupna specifična aktivnost alfa (Bq/kg)						Priporočena raven za preverjanje skupne aktivnosti alfa (Bq/kg) **
	1,4E-02 ± 2E-03	7,2E-03 ± 1E-03	8,9E-03 ± 2E-03	1,7E-02 ± 2E-03	1,2E-02 ± 2E-03	6,0E-03 ± 1E-03	1,0E-01
	Skupna specifična aktivnost beta (Bq/kg)						Priporočena raven za preverjanje skupne aktivnosti beta (Bq/kg) **
	9,3E-02 ± 1E-02	5,4E-02 ± 8E-03	3,6E-02 ± 9E-03	4,0E-02 ± 9E-03	4,2E-02 ± 9E-03	7,0E-02 ± 9E-03	1,0E-00

(†) Rezultat meritve je pod mejo detekcije

(‡) Rezultat meritve je pod mejo kvantifikacije

(**) Predpostavili smo, da je 1kg ≈ 1l

V tabeli 2 prikazujemo vsote kvocientov $\frac{a_{i,izm}}{a_{i,IK}}$ iz enačbe (1) za vseh šest vzorcev. Ugotovimo lahko, da je enačba 1 za vseh pet primerov izpolnjena, torej je tudi indikativna doza za izbrani vzorec vode nižja od 0,1 mSv.

Tabela 2: Izračunane vsote kvocientov $\frac{a_{i,izm}}{a_{i,lK}}$ za vzorce podzemne vodo iz izvira Rak, izvira Kotliči, bruhalnika Stržen, izvira Unice, zajetja pitne vode Malni in vrtine V-1 v Žejah.

Vzorčevalno mesto	Izvir Rak	Kotliči	Bruhalnik Stržen	Unica (Planinska jama)	izvir Malni	Žeje, vrtina V-1
Vsota kvocientov po enačbi 1	0,02	0,09	0,12	0,04	0,05	0,03

Iz izmerjenih vrednosti, ki so prikazane v tabeli 1, smo izračunali indikativno dozo za vsak vzorec posebej skladno s z navodili drugega odstavka *»Izračun indikativne doze«* priloge 3 *Pravilnika o monitoringu radioaktivnosti v pitni vodi.* Izračunane vrednosti so prikazane v tabeli 3. Ugotavljamo, da so izračunane indikativne doze za podzemno (pitno) vodo iz izvira Rak, izvira Kotliči, bruhalnika Stržen, izvira Unice, zajetja pitne vode Malni in vrtine V-1 v Žejah do dva reda velikosti nižje od predvidene indikativne doze 0,1 mSv.

Tabela 3: Izračunane indikativne doze za podzemno vodo iz izvira Rak, izvira Kotliči, bruhalnika Stržen, izvira Unice, zajetja pitne vode Malni in vrtine V-1 v Žejah

Vzorčevalno mesto	Izvir Rak	Kotliči	Bruhalnik Stržen	Unica (Planinska jama)	izvir Malni	Žeje, vrtina V-1
Indikativna doza (mSv)	0,001	0,008	0,012	0,003	0,005	0,002

¶

Institut "Jožef Stefan", Ljubljana, Slovenija
1001 Ljubljana, Jamova 39, p. p. 3000 / Tel.: 01 477 3900/ Fax: 01 477 3151 / www.ijs.si

Vaš znak: Naš znak: QA – 7 / 25 datum: 3. februar 2025

dr. Anja KOROŠA, univ.dipl.inž.geol.
GEOLOŠKI ZAVOD SLOVENIJE
Oddelek za podzemne vode - hidrogeologija
Dimičeva ulica 14,
1000 Ljubljana

Zadeva: ***Izvedba analiz radioaktivnosti v podzemnih vodah***

Spoštovani,

v prilogi vam pošiljamo poročilo o analizah šestih vzorcev podzemnih vod, po naročilnici št. 828.2024 ter pojasnilo k rezultatom meritev.

Opravljene so bile analize:

1. Ugotavljanje koncentracije aktivnosti sevalcev gama z visokoločljivostno spektrometrijo gama po postopku LMR-DN-10, izdaja 14, akreditacijska listina LP-022;

2. Analiza in izračun vsebnosti sevalcev α in β po postopku LSC-DN-10, izdaja 3, akreditacijska listina LP-022;

3. Ugotavljanje koncentracije tritija v podzemni vodi LSC-DN-07, izdaja 8, akreditacijska listina LP-022;

Če potrebujete dodatne informacije, nas prosim pokličite ali pišite na spodnji elektronski naslov.

S spoštovanjem,

B. Zorko

dr. Benjamin Zorko
telefon: 01 4773 416
telefaks: 01 4773 151
email: benjamin.zorko@ijs.si

Pojasnila k rezultatom meritev

Z analizno metodo VLG smo ugotavljali koncentracije aktivnosti sevalcev gama, z LSC pa smo izmerili koncentracije aktivnosti tritija (H-3) in skupne specifične aktivnosti sevalcev alfa in beta raztopljenih v podzemni vodi v okolici vojaškega vadišča Poček (izvir Rak, izvir Kotliči, bruhalnik Stržen, izvir Unice, zajetje pitne vode Malni in vrtina V-1 v Žejah). Rezultati meritev z različnimi spektroskopskimi metodami so prikazane v tabeli 1. Za primerjavo so prikazane izpeljane koncentracije aktivnosti radionuklidov in priporočene ravni za skupne aktivnosti sevalcev alfa in beta v pitni vodi. Izpeljane koncentracije aktivnosti smo izračunali ob predpostavki, da je letna indikativna doza 0,1 mSv ob zaužitju 0,73 m^3 pitne vode za odraslega prebivalca (referenčna oseba[1]), ki se oskrbuje z vodo z določenega vodnega vira.

Iz tabele 1 je razvidno, da so izmerjene koncentracije aktivnosti zaznanih radionuklidov v vseh vzorcih najmanj red velikosti nižje od njihovih izpeljanih koncentracij aktivnosti.

Med naravnimi radionuklidi so bili v vzorcih podzemnih vod zaznani radionuklidi uranove in torijeve razpadne verige, radioaktivni kalij K-40 ter kozmogeni Be-7, ki nastaja v zemeljski atmosferi in se spira v tla z deževnico. Naravne in umetne radionuklide lahko uporabimo tudi kot sledilce za študije transportnih procesov v naravi. Na podlagi prisotnosti K-40 lahko ocenimo na primer obremenjenost okolja zaradi kmetijstva. Kalij je namreč sestavni del umetnih gnojil. Prisotnost kozmogenega Be-7 v vzorcih podzemne vode lahko kaže na mešanje med padavinami in podtalnico oziroma vodo v vodonosniku. Tudi umetni radionuklid Cs-137 se lahko uporablja kot sledilec za študij transportnih procesov.

Izotop berilija Be-7 je kozmogeni radionuklid z razpolovnim časom 53,3 dni, ki nastaja v zgornjih plasteh ozračja zaradi vpliva kozmičnih žarkov, ki se nato izpira z dežjem na površino Zemlje in z vodo pronica v podtalnico. Izmerjene koncentracije aktivnosti Be-7 so bile nad mejo detekcije v vseh vzorcih podzemnih vod, razen v vrtini V-1. Iz izmerjenih koncentracij aktivnosti Be-7, ki so nizke, lahko njegovo prisotnost interpretiramo kot posledico sekundarnih pojavov - adsorpciji atomov Be-7 na druge suspendirane delce večjih mas v vodi.

Prisotnost K-40 v vodi je posledica splošne razširjenosti kalija v vrhnji plasti zemlje. Kalijeve spojine so v vodi topne, zato prisotnost kalija v vodi kaže na prisotnost kalija v snoveh, ki so bile v stiku z vodo. Njegova vsebnost je odvisna od geološke strukture, ki je v Sloveniji zelo raznolika. Izmerjene koncentracije aktivnosti K-40 v vseh vzorcih so primerljive s koncentracijami aktivnosti, izmerjenimi pri rednih radioloških monitoringih, ki se izvajajo v Republiki Sloveniji.

Koncentracije aktivnosti Ra-226 smo določili iz koncentracij radonovih potomcev, kjer smo upoštevali ekshalacijo radona iz vzorca. Koncentracije aktivnosti U-238 smo določili iz koncentracije aktivnosti potomca Th-234 in iz koncentracije aktivnosti U-235 pri predpostavki naravnega razmerja koncentracij med U-238 in U-235. Za informativno primerjavo lahko navedemo, da so v okviru nacionalnega nadzora radioaktivnosti v pitni vodi koncentracije aktivnosti U-238 v povprečju 3,3 Bq/m^3 z najvišjo vsebnostjo 36 Bq/m^3, Ra-226 4,6 Bq/m^3 z najvišjo vsebnostjo 44 Bq/m^3, Ra-228 1,6 Bq/m^3 z najvišjo vsebnostjo 24 Bq/m^3 in K-40 26 Bq/m^3 z najvišjo vsebnostjo 228 Bq/m^3. Ugotavljamo, da se vsebnosti naravnih radionuklidov v podzemni vodi iz šestih vzorcev ne odmikajo od slovenskega povprečja, posamezne anomalije pa poudarjajo raznolikost in pestrost geološke sestave in vpliv drugih dejavnikov na prisotnost naravnih radionuklidov v podtalnici.

V vzorcih podzemnih vod iz izvira Rak in vrtine Žeje, je bil detektiran Cs-137, kar bi lahko pomenilo, da je bila podzemna voda na teh vzorčnih mestih v stiku z atmosfero po černobilski nesreči. Cs-137 z razpolovnim časom približno 30 let je namreč v življenjskem okolju prisoten kot posledica splošne radioaktivne onesnaženosti okolja zaradi nadzemskih jedrskih poskusov v letih 1945–1975 in zaradi černobilske nesreče leta 1986. Na preostalih lokacijah radioaktivnega cezija nismo detektirali, ali pa je koncentracija aktivnosti Cs-137 pod mejo kvantifikacije.

---

[1] Za oceno obremenitve prebivalstva zaradi izpustov iz jedrskega objekta se uporablja referenčna oseba, ki predstavlja posameznike iz prebivalstva, ki prejemajo ali bi lahko prejeli najvišje doze.

Institut "Jožef Stefan", Ljubljana, Slovenija
1001 Ljubljana, Jamova 39, p. p. 3000 / Tel.: 01 477 3900/ Fax: 01 477 3151 / www.ijs.si

Tritij (H-3) je naraven kozmogeni in antropogen radionuklid. Ker nastaja v zgornjih plasteh atmosfere, je prisoten v deževnici in vodotokih, zato je uporaben kot sledilec vodnega kroga in datiranje podzemnih vod. Naravna koncentracija aktivnosti tritija v deževnici je od 0,2 kBq/m^3 do 1,5 kBq/m^3. Koncentracije aktivnosti tritija v vseh šestih vzorcih so bile od 0,47 do 0,54 kBq/m^3.

Tabela 1: Koncentracije aktivnosti radionuklidov v vzorcih podzemnih vod iz izvira Rak, izvira Kotliči, bruhalnika Stržen, izvira Unice, zajetja pitne vode Malni in vrtine V-1 v Žejah. V tabeli so tudi izmerjene skupne specifične aktivnosti sevalcev alfa in beta za vzorce vode iz posamezne lokacije.

Vzorč. mesto	Izvir Rak	Kotliči	Bruhalnik Stržen	Unica (Planinska jama)	izvir Malni	Žeje, vrtina V-1	Izpeljana koncentracija aktivnosti
Datum vzor.	28. 11. 2024	28. 11. 2024	28. 11. 2024	28. 11. 2024	29. 11. 2024	29. 11. 2024	
Kol. vzorca (L)	44,07	51,57	61,84	54,29	44,71	57,77	
Koda vzorca	N24SN1380AB1	N24SN1380BB1	N24SN1380CB1	N24SN6230B1	N24VD6232B1	N24VR6257B1	
Radionuklid	Koncentracija aktivnosti (Bq/m^3)						(Bq/m^3)
U-238	3,6E+00 ± 6E-01	6,7E+00 ± 4E+00	6,0E+00 ± 1E+00	4,1E+00 ± 1E+00		2,3E+00 ± 7E-01	3,04E+03
Ra-226	2,5E+00 ± 4E-01	8,2E-01 ± 5E-01	1,5E+00 ± 4E-01	7,3E-01 ± 3E-01	7,9E+00 ± 1E+00	2,5E+00 ± 5E-01	4,9E+02
Pb-210	4,9E+00 ± 7E-01	3,9E+00 ± 2E+00	9,6E-01 ± 2E+00 ‡	9,3E-01 ± 3E+00 ‡	7,6E+00 ± 2E+00	2,3E+00 ± 4E-01	2,0E+02
Ra-228	3,0E-01 ± 3E-01 ‡	3,4E-01 ± 4E-01 ‡	5,1E-01 ± 4E-01	8,3E-01 ± 5E-01	2,7E-01 ± 3E-01 ‡	5,3E-01 ± 2E-01	2,0E+02
Th-228	4,2E-01 ± 9E-02	5,3E-02 ± 2E-01 ‡	3,8E-01 ± 2E-01	5,1E-01 ± 2E-01	1,5E-01 ± 2E-01 ‡	1,4E-01 ± 9E-02	1,9E+03
K-40	2,2E+01 ± 2E+00	7,3E+00 ± 2E+00	1,2E+01 ± 2E+00	3,4E+01 ± 2E+00	1,3E+01 ± 2E+00	7,2E+00 ± 7E-01	2,2E+04
Be-7	6,1E+00 ± 1E+00	2,5E+00 ± 2E+00	1,3E+01 ± 1E+00	1,9E+00 ± 6E+00 ‡	2,3E+00 ± 1E+00		4,9E+06
Cs-137	2,6E-01 ± 1E-01			1,3E-01 ± 2E-01 ‡		1,2E-01 ± 6E-02	1,1E+04
H-3	4,8E+02 ± 5E+01	4,7E+02 ± 5E+01	4,9E+02 ± 5E+01	4,9E+02 ± 5E+01	4,9E+02 ± 5E+01	5,4E+02 ± 5E+01	1,0E+05
Skupna vsebnost sevalcev alfa in beta	Skupna specifična aktivnost alfa (Bq/kg)						Priporočena raven za preverjanje skupne aktivnosti alfa (Bq/kg) **
	5,5E-03 ± 2E-03	1,7E-02 ± 3E-03	1,2E-02 ± 2E-03	2,3E-03 †	1,5E-02 ± 2E-03	7,2E-03 ± 2E-03	0,1
	Skupna specifična aktivnost beta (Bq/kg)						Priporočena raven za preverjanje skupne aktivnosti beta (Bq/kg) **
	8,8E-02 ± 5E-02	1,6E-01 ± 7E-02	1,4E-01 ± 5E-02	1,4E-01 ± 5E-02	1,5E-01 ± 5E-02	1,8E-01 ± 5E-02	1,0

(†) Rezultat meritve je pod mejo detekcije ali mejo odločitve
(‡) Rezultat meritve je pod mejo kvantifikacije
(**) Predpostavili smo, da je 1kg ≈ 1l

Prav tako noben vzorec podzemne vode ne presega priporočenih ravni, 0,1 Bq/L, za skupno specifično aktivnost sevalcev alfa in 1 Bq/L za skupno specifično aktivnost sevalcev beta v pitni (podzemni) vodi.

Če je izpolnjena enačba (1)

$$\sum_{i=1}^{N} \frac{a_{i,izm}}{a_{i,IK}} \leq 1, \qquad (1)$$

kjer so: $a_{i,izm}$ ugotovljena koncentracija aktivnosti radionuklida i v vodi, $a_{i,\,IK}$ izpeljana koncentracija aktivnosti radionuklida i in N število zaznanih radionuklidov, potem se lahko domneva, da je indikativna doza za izbrani vzorec vode nižja od 0,1 mSv.

V tabeli 2 prikazujemo vsote kvocientov $\frac{a_{i,izm}}{a_{i,IK}}$ iz enačbe (1) za vseh šest vzorcev. Ugotovimo lahko, da je enačba 1 za vseh pet primerov izpolnjena, torej je tudi indikativna doza za izbrani vzorec vode nižja od 0,1 mSv.

Tabela 2: Izračunane vsote kvocientov $\frac{a_{i,izm}}{a_{i,IK}}$ za vzorce podzemne vodo iz izvira Rak, izvira Kotliči, bruhalnika Stržen, izvira Unice, zajetja pitne vode Malni in vrtine V-1 v Žejah.

Vzorčevalno mesto	Izvir Rak	Kotliči	Bruhalnik Stržen	Unica (Planinska jama)	izvir Malni	Žeje, vrtina V-1
Vsota kvocientov po enačbi 1	0,04	0,03	0,02	4,91	0,06	0,03

Iz izmerjenih vrednosti, ki so prikazane v tabeli 1, smo izračunali indikativno dozo za vsak vzorec posebej skladno s z navodili drugega odstavka »*Izračun indikativne doze*« priloge 3 *Pravilnika o monitoringu radioaktivnosti v pitni vodi.* Izračunane vrednosti so prikazane v tabeli 3. Ugotavljamo, da so izračunane indikativne doze za podzemno (pitno) vodo iz izvira Rak, izvira Kotliči, bruhalnika Stržen, izvira Unice, zajetja pitne vode Malni in vrtine V-1 v Žejah do dva reda velikosti nižje od predvidene indikativne doze 0,1 mSv.

Tabela 3: Izračunane indikativne doze za podzemno vodo iz izvira Rak, izvira Kotliči, bruhalnika Stržen, izvira Unice, zajetja pitne vode Malni in vrtine V-1 v Žejah

Vzorčevalno mesto	Izvir Rak	Kotliči	Bruhalnik Stržen	Unica (Planinska jama)	izvir Malni	Žeje, vrtina V-1
Indikativna doza (mSv)	0,003	0,003	0,001	0,001	0,006	0,002

¶

Institut "Jožef Stefan", Ljubljana, Slovenija
1001 Ljubljana, Jamova 39, p. p. 3000 / Tel.: 01 477 3900/ Fax: 01 477 3151 / www.ijs.si

Vaš znak: Naš znak: QA – 58 / 25 datum: 10. oktober 2025

F2 QA
DELOVODNIK: QA
Poslano dne: 10.10.2025
Štev: 58125

dr. Anja KOROŠA, univ.dipl.inž.geol.
GEOLOŠKI ZAVOD SLOVENIJE
Oddelek za podzemne vode - hidrogeologija
Dimičeva ulica 14,
1000 Ljubljana

Zadeva: ***Izvedba analiz radioaktivnosti v podzemnih vodah***

Spoštovani,

v prilogi vam pošiljamo poročilo o analizah petih vzorcev podzemnih vod, po naročilnici št. 828.2024 ter pojasnilo k rezultatom meritev.

Opravljene so bile analize:

1. Ugotavljanje koncentracije aktivnosti sevalcev gama z visokoločljivostno spektrometrijo gama po postopku LMR-DN-10, izdaja 14, akreditacijska listina LP-022;

2. Analiza in izračun vsebnosti sevalcev α in β po postopku LSC-DN-10, izdaja 3, akreditacijska listina LP-022;

3. Ugotavljanje koncentracije tritija v podzemni vodi LSC-DN-07, izdaja 8, akreditacijska listina LP-022;

Če potrebujete dodatne informacije, nas prosim pokličite ali pišite na spodnji elektronski naslov.

S spoštovanjem,

B. Zorko

dr. Benjamin Zorko
telefon: 01 4773 416
telefaks: 01 4773 151
email: benjamin.zorko@ijs.si

Pojasnila k rezultatom meritev

Z analizno metodo VLG smo ugotavljali koncentracije aktivnosti sevalcev gama, z LSC pa smo izmerili koncentracije aktivnosti tritija (H-3) in skupne specifične aktivnosti sevalcev alfa in beta raztopljenih v podzemni vodi v okolici vojaškega vadišča Poček (izvir Rak, izvir Kotliči, bruhalnik Stržen, izvir Unice in zajetje pitne vode Malni). Podzemno vodo so sodelavcci GEOZS vzorčili na 5 mestih. Ker je bilo eno merilno mesto (vrtina V-1 v Žejah) suho, smo v laboratorijih na IJS analizirali le 5 vzorcev v tej seriji.

Rezultati meritev z različnimi spektroskopskimi metodami so prikazane v tabeli 1. Za primerjavo so prikazane izpeljane koncentracije aktivnosti radionuklidov in priporočene ravni za skupne aktivnosti sevalcev alfa in beta v pitni vodi. Izpeljane koncentracije aktivnosti smo izračunali ob predpostavki, da je letna indikativna doza 0,1 mSv ob zaužitju 0,73 m^3 pitne vode za odraslega prebivalca (referenčna oseba[1]), ki se oskrbuje z vodo z določenega vodnega vira.

Iz tabele 1 je razvidno, da so izmerjene koncentracije aktivnosti zaznanih radionuklidov v vseh vzorcih najmanj red velikosti nižje od njihovih izpeljanih koncentracij aktivnosti. Ugotovitev je enaka kot pri prejšnjih dveh serijah.

Med naravnimi radionuklidi so bili v vzorcih podzemnih vod zaznani radionuklidi uranove in torijeve razpadne verige, radioaktivni kalij K-40 ter kozmogeni Be-7, ki nastaja v zemeljski atmosferi in se spira v tla z deževnico. Naravne in umetne radionuklide lahko uporabimo tudi kot sledilce za študije transportnih procesov v naravi. Na podlagi prisotnosti K-40 lahko ocenimo na primer obremenjenost okolja zaradi kmetijstva. Kalij je namreč sestavni del umetnih gnojil. Prisotnost kozmogenega Be-7 v vzorcih podzemne vode lahko kaže na mešanje med padavinami in podtalnico oziroma vodo v vodonosniku. Tudi umetni radionuklid Cs-137 se lahko uporablja kot sledilec za študij transportnih procesov.

Izotop berilija Be-7 je kozmogeni radionuklid z razpolovnim časom 53,3 dni, ki nastaja v zgornjih plasteh ozračja zaradi vpliva kozmičnih žarkov, ki se nato izpira z dežjem na površino Zemlje in z vodo pronica v podtalnico. Izmerjene koncentracije aktivnosti Be-7 so bile nad mejo detekcije v treh vzorcih podzemnih vod (izvir Rak, izvir Kotliči in bruhalnik Stržen), medtem vizviru Unice in zajetje Malni Be-7 nismo detektirali. Iz izmerjenih koncentracij aktivnosti Be-7, ki so nizke, lahko njegovo prisotnost interpretiramo kot posledico sekundarnih pojavov - adsorpciji atomov Be-7 na druge suspendirane delce večjih mas v vodi.

Prisotnost K-40 v vodi je posledica splošne razširjenosti kalija v vrhnji plasti zemlje. Kalijeve spojine so v vodi topne, zato prisotnost kalija v vodi kaže na prisotnost kalija v snoveh, ki so bile v stiku z vodo. Njegova vsebnost je odvisna od geološke strukture, ki je v Sloveniji zelo raznolika. Izmerjene koncentracije aktivnosti K-40 v vseh vzorcih so primerljive s koncentracijami aktivnosti, izmerjenimi pri rednih radioloških monitoringih, ki se izvajajo v Republiki Sloveniji.

Koncentracije aktivnosti Ra-226 smo določili iz koncentracij radonovih potomcev, kjer smo upoštevali ekshalacijo radona iz vzorca. Koncentracije aktivnosti U-238 smo določili iz koncentracije aktivnosti potomca Th-234 in iz koncentracije aktivnosti U-235 pri predpostavki naravnega razmerja koncentracij med U-238 in U-235. Za informativno primerjavo lahko navedemo, da so v okviru nacionalnega nadzora radioaktivnosti v pitni vodi koncentracije aktivnosti U-238 v povprečju 3,3 Bq/m^3 z najvišjo vsebnostjo 36 Bq/m^3, Ra-226 4,6 Bq/m^3 z najvišjo vsebnostjo 44 Bq/m^3, Ra-228 1,6 Bq/m^3 z najvišjo vsebnostjo 24 Bq/m^3 in K-40 26 Bq/m^3 z najvišjo vsebnostjo 228 Bq/m^3. Ugotavljamo, da se vsebnosti naravnih radionuklidov v podzemni vodi iz šestih vzorcev ne odmikajo od slovenskega povprečja, posamezne anomalije pa poudarjajo raznolikost in pestrost geološke sestave in vpliv drugih dejavnikov na prisotnost naravnih radionuklidov v podtalnici.

V vzorcih podzemnih vod iz izvira Rak, izvira Kotliči in bruhalnika Stržen, je bil detektiran Cs-137, kar bi lahko pomenilo, da je bila podzemna voda na teh vzorčnih mestih v stiku z atmosfero po černobilski nesreči. Cs-137 z razpolovnim časom približno 30 let je namreč v življenjskem okolju prisoten kot posledica splošne radioaktivne onesnaženosti okolja zaradi nadzemskih jedrskih poskusov v letih 1945–1975 in zaradi

[1] Za oceno obremenitve prebivalstva zaradi izpustov iz jedrskega objekta se uporablja referenčna oseba, ki predstavlja posameznike iz prebivalstva, ki prejemajo ali bi lahko prejeli najvišje doze.

černobilske nesreče leta 1986. Na preostalih lokacijah radioaktivnega cezija nismo detektirali, ali pa je koncentracija aktivnosti Cs-137 pod mejo detekcije ali kvantifikacije.

Tritij (H-3) je naraven kozmogeni in antropogen radionuklid. Ker nastaja v zgornjih plasteh atmosfere, je prisoten v deževnici in vodotokih, zato je uporaben kot sledilec vodnega kroga in datiranje podzemnih vod. Naravna koncentracija aktivnosti tritija v deževnici je od 0,2 kBq/m^3 do 1,5 kBq/m^3. Koncentracije aktivnosti tritija v vseh šestih vzorcih so bile od 0,47 do 0,87 kBq/m^3.

Tabela 1: Koncentracije aktivnosti radionuklidov v vzorcih podzemnih vod iz izvira Rak, izvira Kotliči, bruhalnika Stržen, izvira Unice in zajetja pitne vode Malni. V tabeli so tudi izmerjene skupne specifične aktivnosti sevalcev alfa in beta za vzorce vode iz posamezne lokacije.

Vzorč. mesto	Izvir Rak	Kotliči	Bruhalnik Stržen	Unica (Planinska jama)	izvir Malni	Izpeljana koncentracija aktivnosti
Datum vzor.	8. 7. 2025	8. 7. 2025	8. 7. 2025	9. 7. 2025	9. 7. 2025	
Kol. vzorca (L)	59,40	60,01	53,71	59,50	63,06	
Koda vzorca	N25SN1380A71	N25SN1380B71	N25SN1380C71	N25SN623071	N25VD623271	
Radionuklid	Koncentracija aktivnosti (Bq/m^3)					(Bq/m^3)
U-238	3,4E+00 ± 1E+00	4,3E+00 ± 1E+00	7,8E+00 ± 2E+00	2,4E+00 ± 1E+00	4,0E+00 ± 2E+00	3,04E+03
Ra-226	5,3E-01 ± 3E-01	3,6E+00 ± 5E-01	3,5E+00 ± 5E-01	1,1E+00 ± 4E-01	1,4E+00 ± 6E-01	4,9E+02
Pb-210	3,0E+00 ± 1E+00	1,5E+01 ± 3E+00	1,2E+01 ± 2E+00	2,8E+00 ± 2E+00	4,2E-01 ± 1E+00 ‡	2,0E+02
Ra-228	7,5E-01 ± 3E-01	9,0E-01 ± 3E-01	2,3E+00 ± 5E-01	1,6E-01 ± 1E-01 ‡	5,6E-01 ± 6E-01 ‡	2,0E+02
Th-228	7,4E-01 ± 3E-01	6,8E-01 ± 2E-01	1,3E+00 ± 3E-01	2,5E-01 ± 2E-01 ‡	9,8E-02 ± 2E-01 ‡	1,9E+03
K-40	3,7E+01 ± 3E+00	1,4E+01 ± 2E+00	5,0E+01 ± 4E+00	1,7E+01 ± 2E+00	1,1E+01 ± 3E+00	2,2E+04
Be-7	8,0E+00 ± 2E+00	6,3E+00 ± 1E+00	4,7E+01 ± 3E+00			4,9E+06
Cs-137	1,9E-01 ± 8E-02	9,2E-01 ± 1E-01	1,3E+00 ± 2E-01			1,1E+04
H-3	8,7E+02 ± 4E+01	5,2E+02 ± 3E+01	6,7E+02 ± 3E+01	4,7E+02 ± 3E+01	4,8E+02 ± 3E+01	1,0E+05
Skupna vsebnost sevalcev alfa in beta	Skupna specifična aktivnost alfa (Bq/kg)					Priporočena raven za preverjanje skupne aktivnosti alfa (Bq/kg) **
	7,8E-03 †	2,6E-02 ± 5E-03	7,6E-03 †	1,9E-02 ± 6E-03	2,0E-02 ± 4E-03	0,1
	Skupna specifična aktivnost beta (Bq/kg)					Priporočena raven za preverjanje skupne aktivnosti beta (Bq/kg) **
	1,0E-01 ± 2E-02	7,9E-02 ± 2E-02	1,0E-01 ± 2E-02	1,1E-01 ± 2E-02	6,6E-02 ± 2E-02	1,0

(†) Rezultat meritve je pod mejo detekcije ali mejo odločitve
(‡) Rezultat meritve je pod mejo kvantifikacije
(**) Predpostavili smo, da je 1kg ≈ 1l

Prav tako noben vzorec podzemne vode ne presega priporočenih ravni, 0,1 Bq/L, za skupno specifično aktivnost sevalcev alfa in 1 Bq/L za skupno specifično aktivnost sevalcev beta v pitni (podzemni) vodi.

Če je izpolnjena enačba (1)

$$\sum_{i=1}^{N} \frac{a_{i,izm}}{a_{i,IK}} \leq 1, \qquad (1)$$

kjer so: $a_{i,izm}$ ugotovljena koncentracija aktivnosti radionuklida i v vodi, $a_{i,IK}$ izpeljana koncentracija aktivnosti radionuklida i in N število zaznanih radionuklidov, potem se lahko domneva, da je indikativna doza za izbrani vzorec vode nižja od 0,1 mSv.

V tabeli 2 prikazujemo vsote kvocientov $\frac{a_{i,izm}}{a_{i,IK}}$ iz enačbe (1) za vseh šest vzorcev. Ugotovimo lahko, da je enačba 1 za vseh pet primerov izpolnjena, torej je tudi indikativna doza za izbrani vzorec vode nižja od 0,1 mSv.

Tabela 2: Izračunane vsote kvocientov $\frac{a_{i,izm}}{a_{i,IK}}$ za vzorce podzemne vodo iz izvira Rak, izvira Kotliči, bruhalnika Stržen, izvira Unice in zajetja pitne vode Malni.

Vzorčevalno mesto	Izvir Rak	Kotliči	Bruhalnik Stržen	Unica (Planinska jama)	izvir Malni
Vsota kvocientov po enačbi 1	0,03	0,09	0,09	0,02	0,01

Iz izmerjenih vrednosti, ki so prikazane v tabeli 1, smo izračunali indikativno dozo za vsak vzorec posebej skladno s z navodili drugega odstavka »*Izračun indikativne doze*« priloge 3 *Pravilnika o monitoringu radioaktivnosti v pitni vodi*. Izračunane vrednosti so prikazane v tabeli 3. Ugotavljamo, da so izračunane indikativne doze za podzemno (pitno) vodo iz izvira Rak, izvira Kotliči, bruhalnika Stržen, izvira Unice, in zajetja pitne vode Malni do dva reda velikosti nižje od predvidene indikativne doze 0,1 mSv.

Tabela 3: Izračunane indikativne doze za podzemno vodo iz izvira Rak, izvira Kotliči, bruhalnika Stržen, izvira Unice in zajetja pitne vode Malni.

Vzorčevalno mesto	Izvir Rak	Kotliči	Bruhalnik Stržen	Unica (Planinska jama)	izvir Malni
Indikativna doza (mSv)	0,002	0,009	0,009	0,002	0,001

¶

PRILOGA 2: Opozorilni sistem - Prikazi zveznih meritev fizikalno-kemijskih parametrov in izbranih onesnaževal za obdobje od 25. 6. 2025 do 19. 11. 2025

Slika 1: Prikaz časovnega niza meritev nihanja gladine od 25.6.2025 do 19.11.2025

Slika 2: Prikaz časovnega niza meritev temperature podzemne vode od 25.6.2025 do 19.11.2025 ter vrednost 95 % percentila – oranžna črta

Slika 3: Prikaz časovnega niza meritev električne prevodnosti podzemne vode (µS/cm) od 25.6.2025 do 19.11.2025 ter vrednost 95 % percentila – oranžna črta

Slika 4: Prikaz časovnega niza meritev raztopljenega kisika v podzemni vodi (mg/l) od 25.6.2025 do 19.11.2025 ter vrednost 95 % percentila – oranžna črta

Slika 5: Prikaz časovnega niza meritev pH v podzemni vodi od 25.6.2025 do 19.11.2025 ter vrednost 95 % percentila – oranžna črta

Slika 6: Prikaz časovnega niza meritev motnosti podzemne vode (NTU) od 25.6.2025 do 19.11.2025 ter vrednost 95 % percentila – oranžna črta

Slika 7: Prikaz časovnega niza meritev vsebnosti nitrata v podzemni vodi (mg/l) od 25.6.2025 do 19.11.2025 ter vrednost 95 % percentila – oranžna črta

Slika 8: Prikaz časovnega niza meritev vsebnosti TOC (skupni organski ogljik) v podzemni vodi (mg/l) od 25.6.2025 do 19.11.2025 ter vrednost 95 % percentila – oranžna črta

Slika 9: Prikaz časovnega niza meritev vsebnosti BTX (skupni organski ogljik) v podzemni vodi (µg/l) od 25.6.2025 do 19.11.2025 ter vrednost 95 % percentila – oranžna črta

Slika 10: Prikaz časovnega niza meritev UV/Vis spektralnega podpisa spojin iz prve skupine v podzemni vodi od 25.6.2025 do 19.11.2025 ter vrednost 95 % percentila – oranžna črta

Slika 11: Prikaz časovnega niza meritev UV/Vis spektralnega podpisa spojin iz druge skupine v podzemni vodi od 25.6.2025 do 19.11.2025 ter vrednost 95 % percentila – oranžna črta

Slika 12: Prikaz časovnega niza meritev UV/Vis spektralnega podpisa spojin iz tretje skupine v podzemni vodi od 25.6.2025 do 19.11.2025 ter vrednost 95 % percentila – oranžna črta

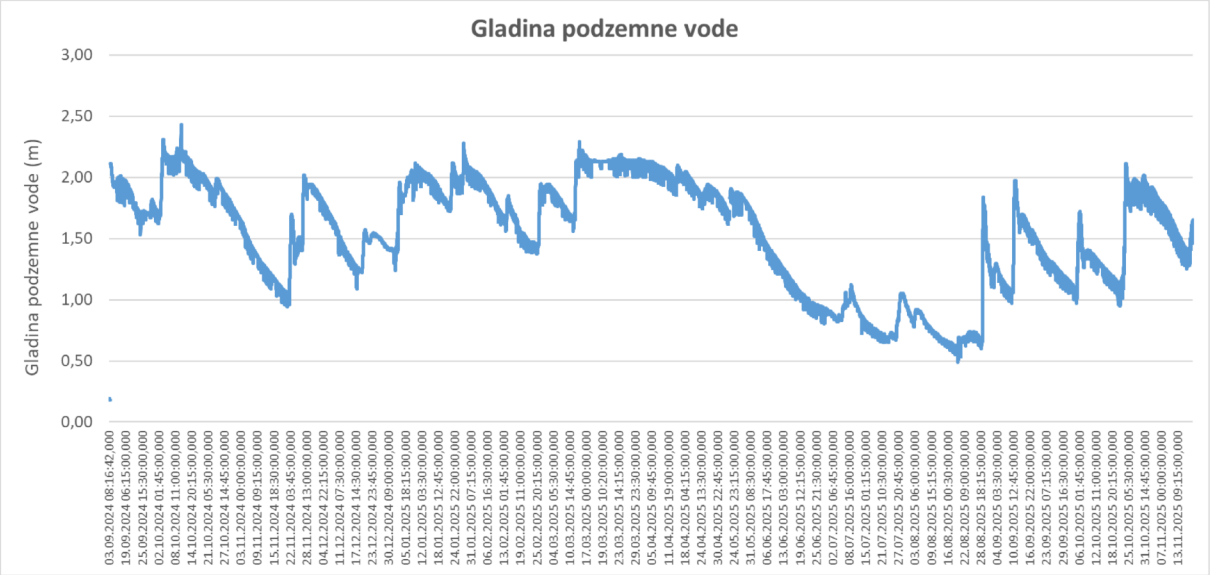
Slika 13: Prikaz časovnega niza meritev UV/Vis spektralnega podpisa spojin iz četrte skupine v podzemni vodi od 25.6.2025 do 19.11.2025 ter vrednost 95 % percentila – oranžna črta

Slika 14: Prikaz časovnega niza meritev količine padavin (mm) od 25.6.2025 do 19.11.2025 (vremenska postaja)

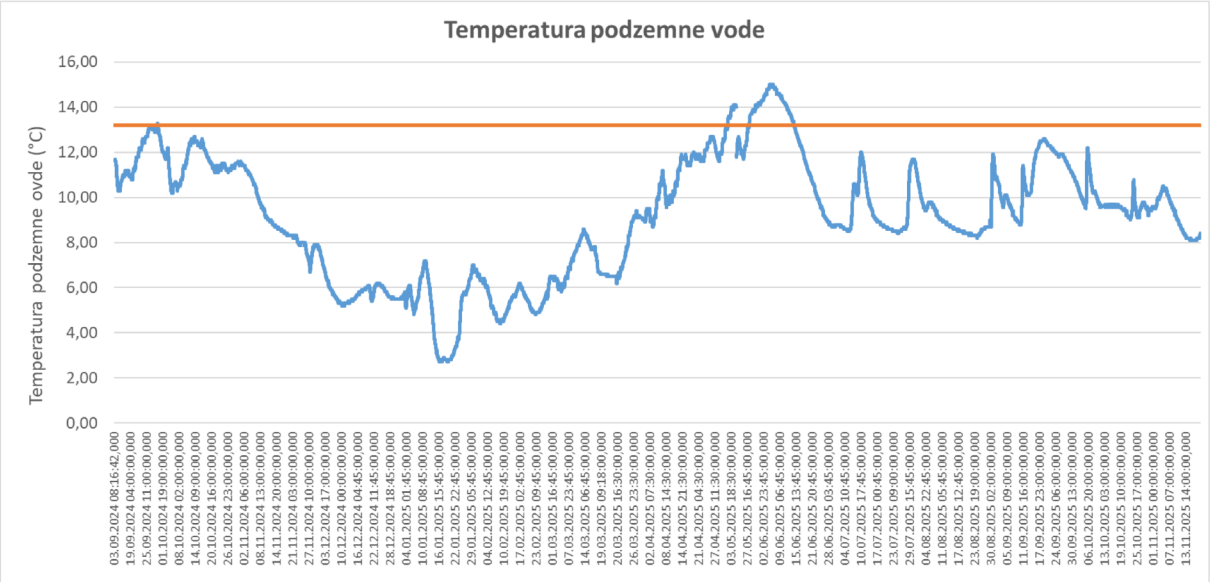
Slika 15: Prikaz časovnega niza meritev hitrosti vetra (m/s) od 25.6.2025 do 19.11.2025 (vremenska postaja)

Slika 16: Prikaz časovnega niza meritev temperature zraka (°C) od 25.6.2025 do 19.11.2025 (vremenska postaja)

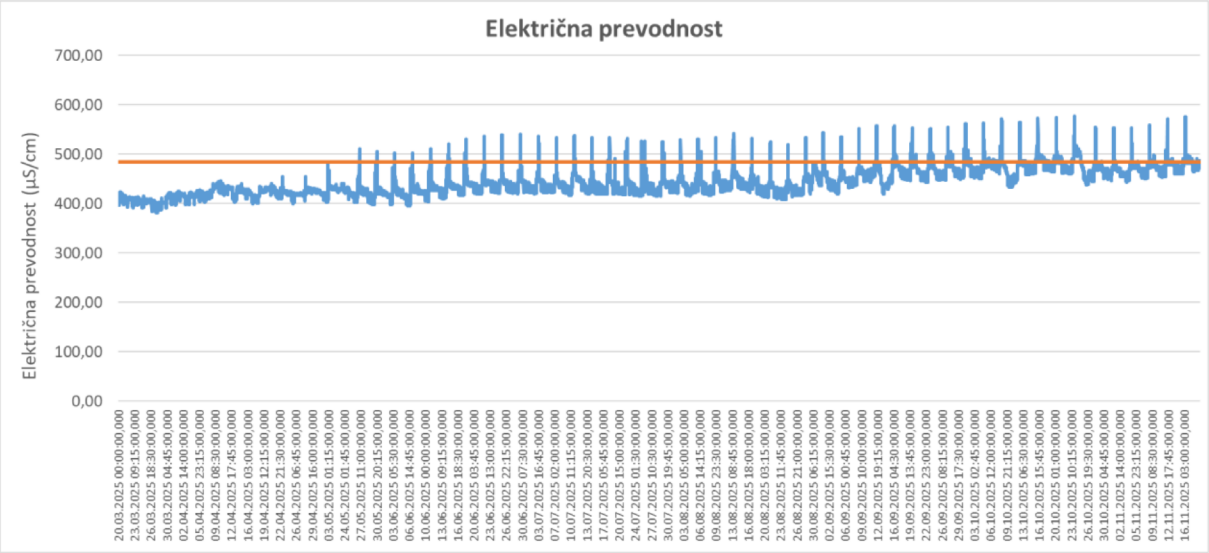
Slika 17: Prikaz časovnega niza meritev zračne vlage (%) od 25.6.2025 do 19.11.2025 (vremenska postaja)



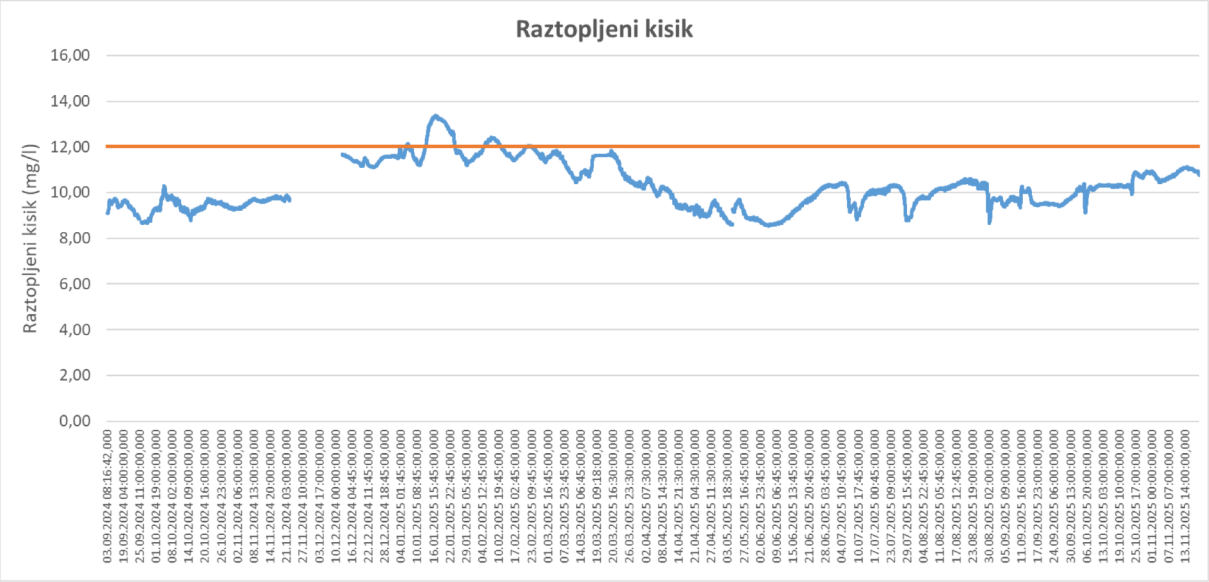
Slika 1: Prikaz časovnega niza meritev nihanja nivoja vode od 25.6.2025 do 19.11.2025



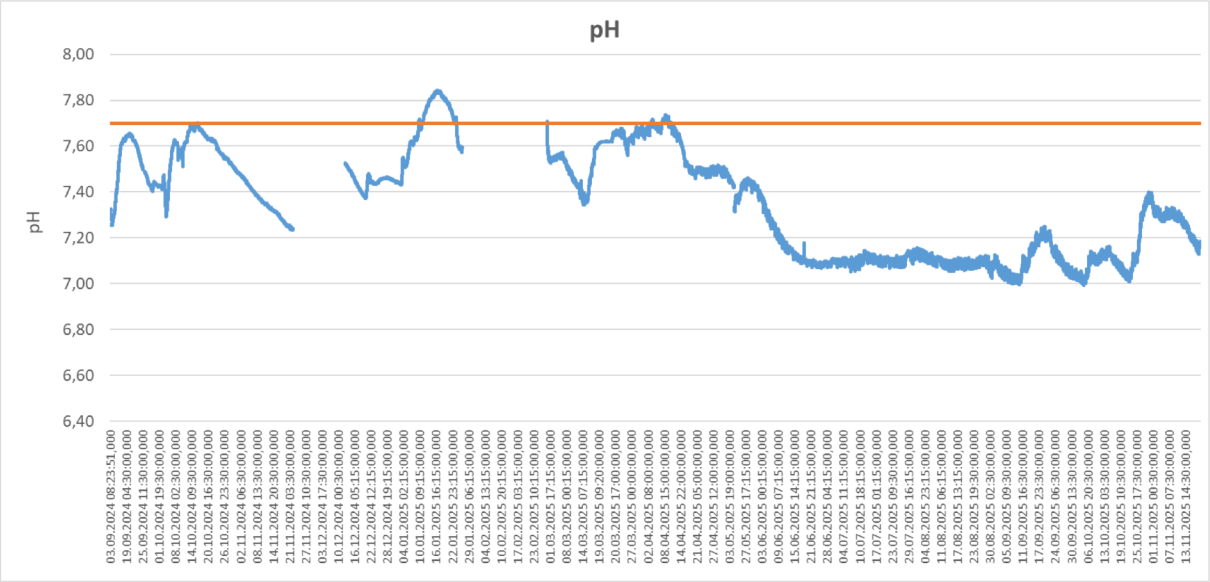
Slika 2: Prikaz časovnega niza meritev temperature podzemne vode od 25.6.2025 do 19.11.2025 ter vrednost 95 % percentila – oranžna črta



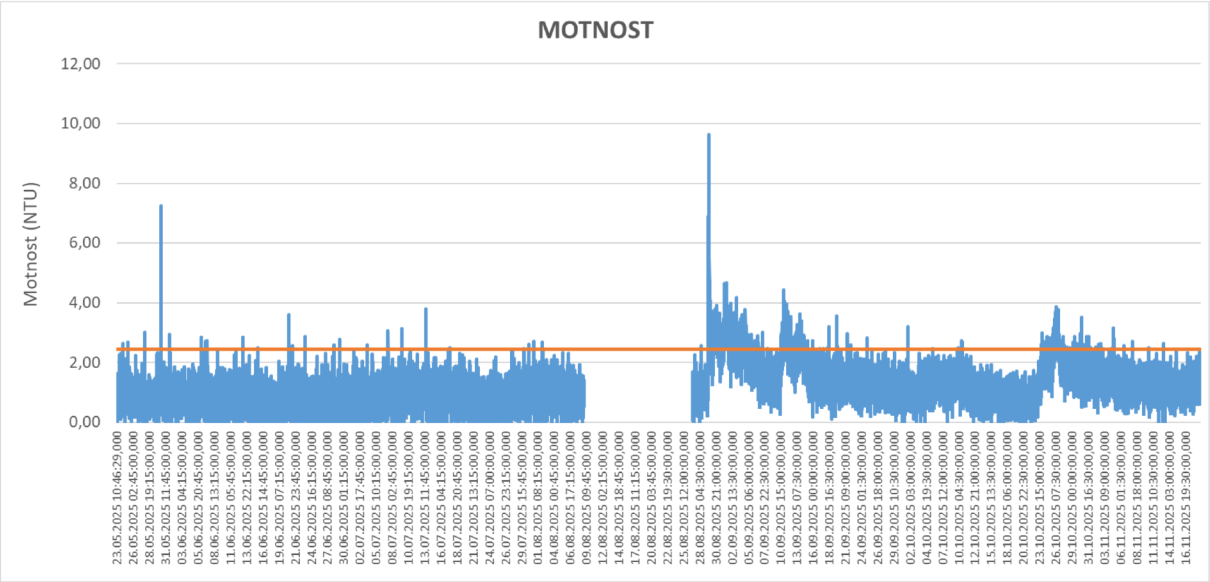
Slika 3: Prikaz časovnega niza meritev električne prevodnosti podzemne vode (µS/cm) od 25.6.2025 do 19.11.2025 ter vrednost 95 % percentila – oranžna črta



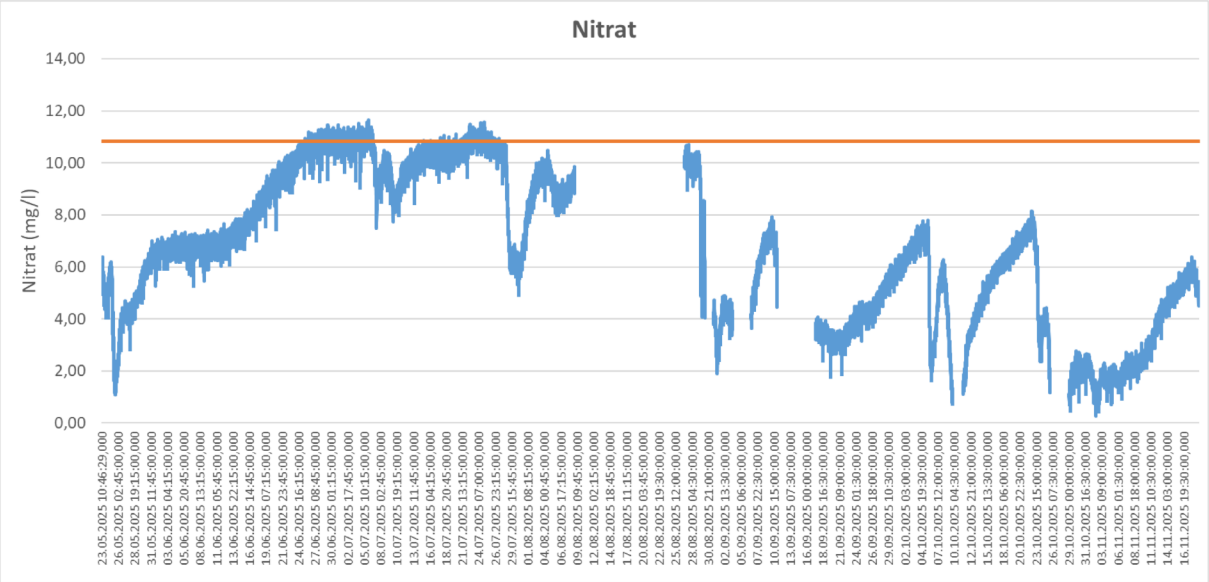
Slika 4: Prikaz časovnega niza meritev raztopljenega kisika v podzemni vodi (mg/l) od 25.6.2025 do 19.11.2025 ter vrednost 95 % percentila – oranžna črta



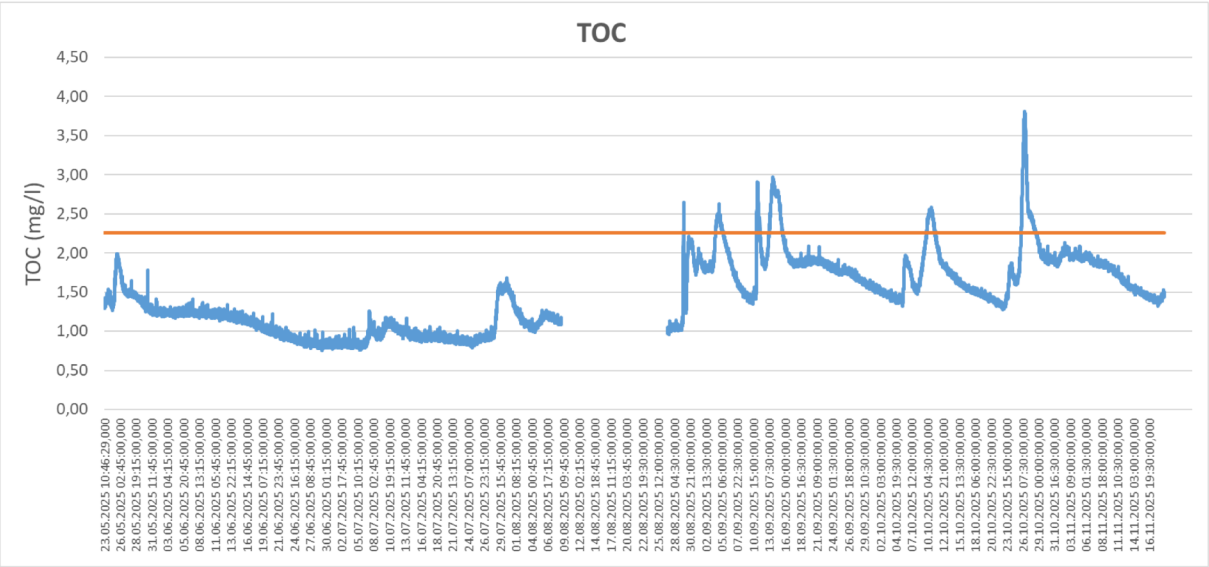
Slika 5: Prikaz časovnega niza meritev pH v podzemni vodi od 25.6.2025 do 19.11.2025ter vrednost 95 % percentila – oranžna črta



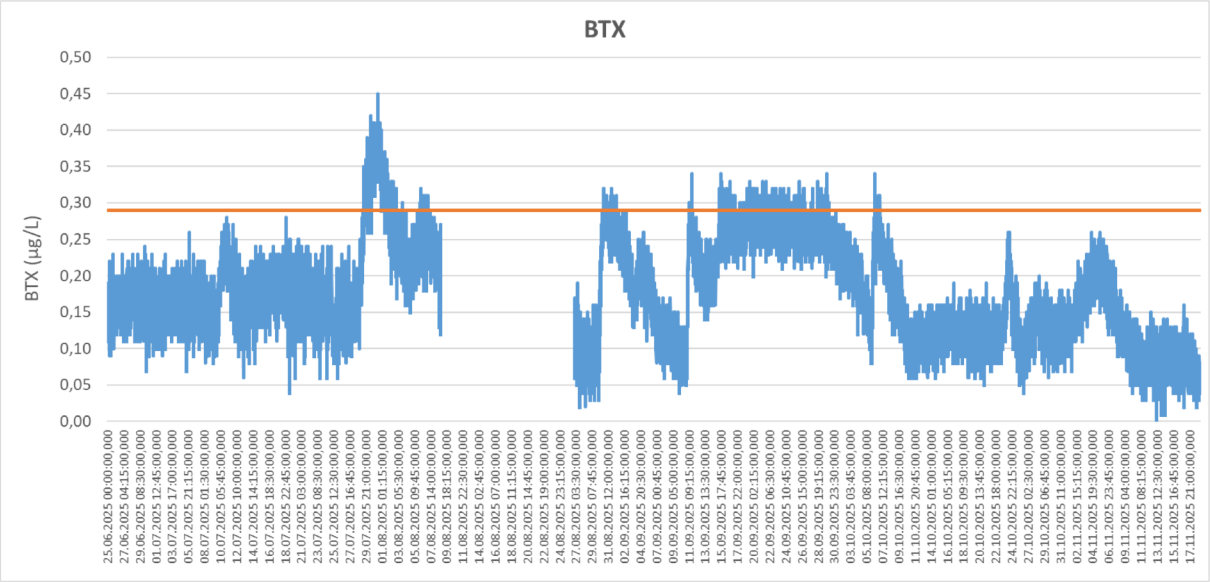
Slika 6: Prikaz časovnega niza meritev motnosti podzemne vode (NTU) od 25.6.2025 do 19.11.2025 ter vrednost 95 % percentila – oranžna črta



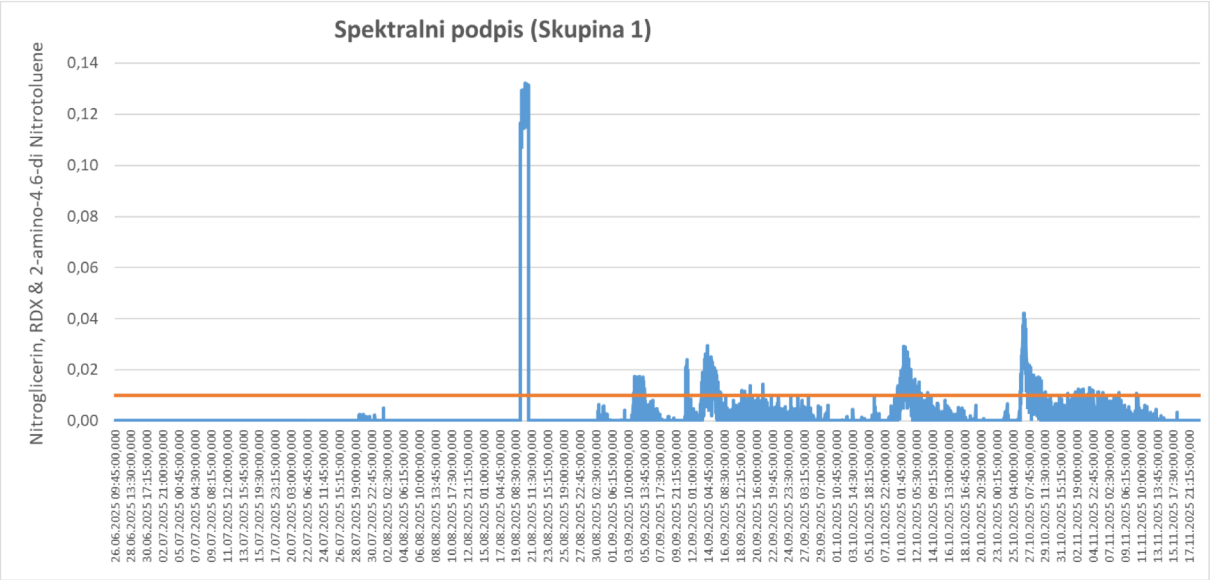
Slika 7: Prikaz časovnega niza meritev vsebnosti nitrata v podzemni vodi (mg/l) od 25.6.2025 do 19.11.2025ter vrednost 95 % percentila – oranžna črta



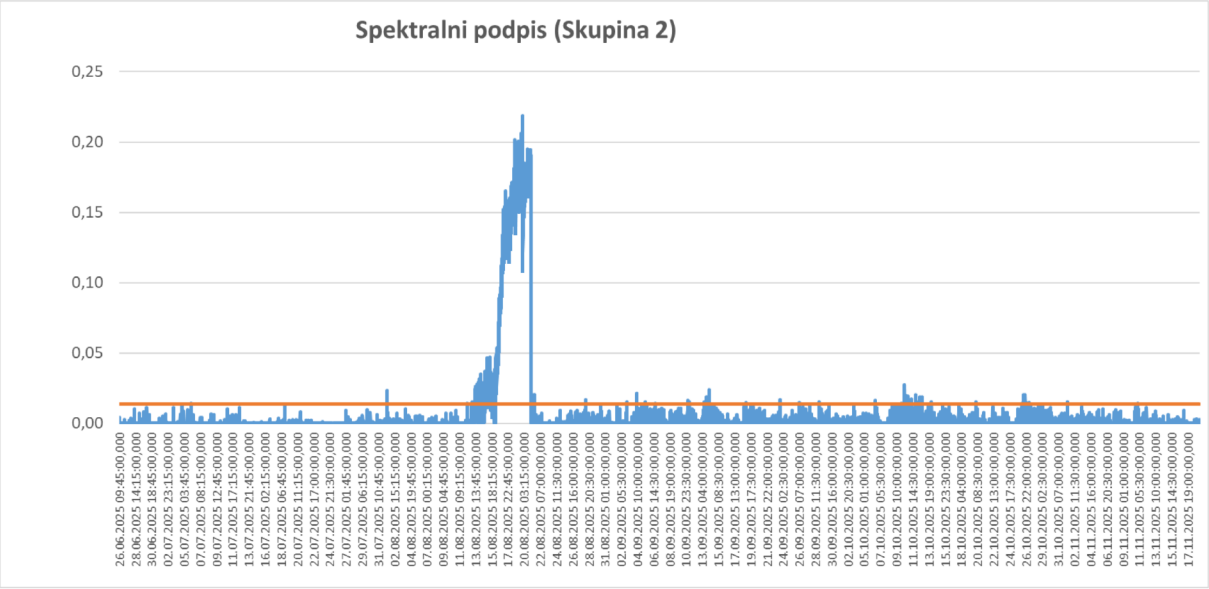
Slika 8: Prikaz časovnega niza meritev vsebnosti TOC (skupni organski ogljik) v podzemni vodi (mg/l) od 25.6.2025 do 19.11.2025 ter vrednost 95 % percentila – oranžna črta



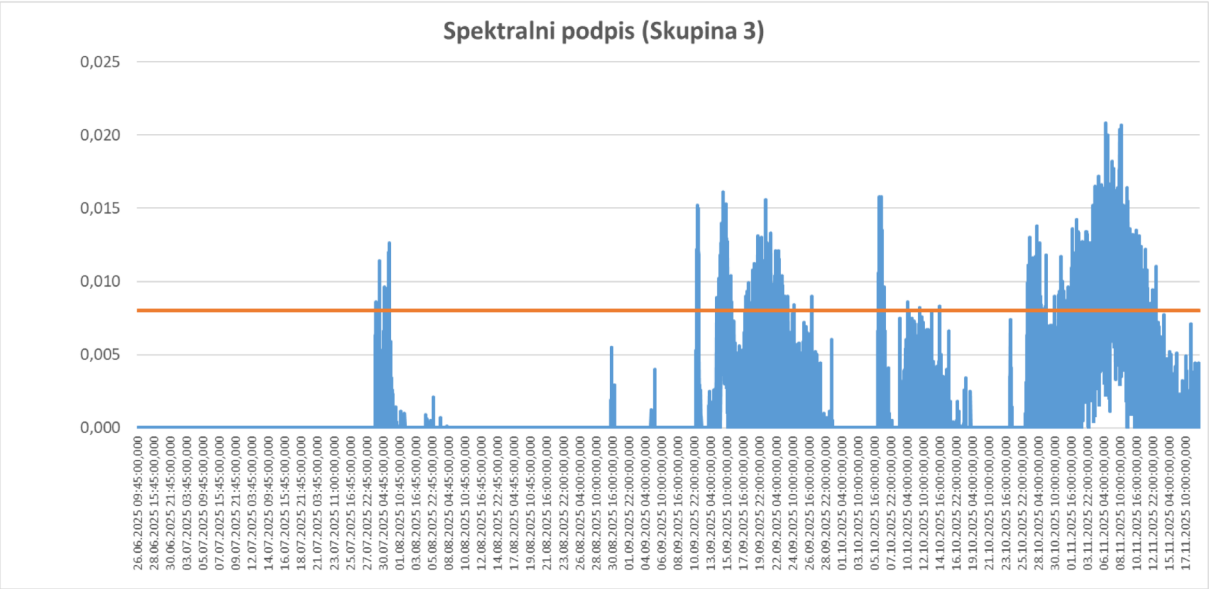
Slika 9: Prikaz časovnega niza meritev vsebnosti BTX (skupni organski ogljik) v podzemni vodi (µg/l) od 25.6.2025 do 19.11.2025ter vrednost 95 % percentila – oranžna črta



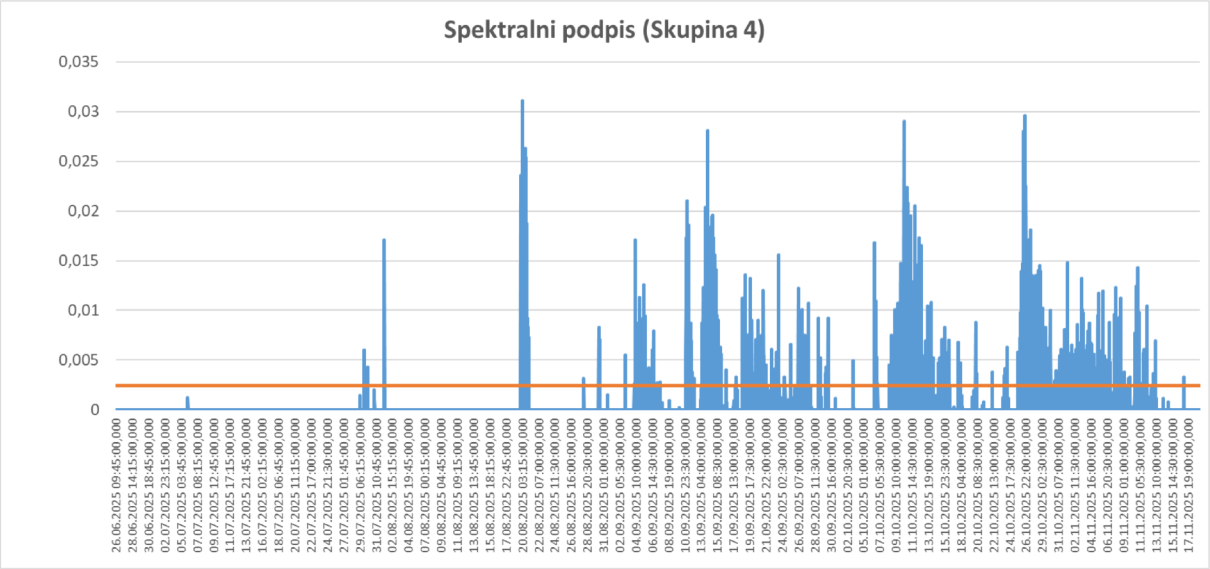
Slika 10: Prikaz časovnega niza meritev UV/Vis spektralnega podpisa spojin iz prve skupine v podzemni vodi od 25.6.2025 do 19.11.2025 ter vrednost 95 % percentila – oranžna črta



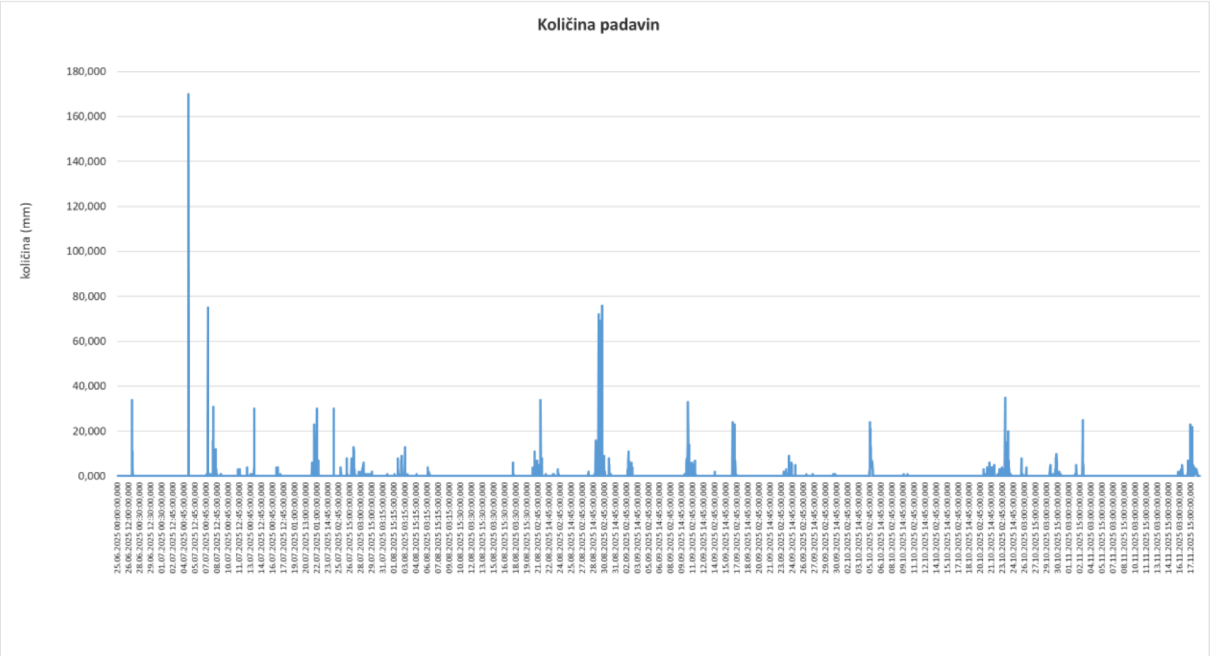
Slika 11: Prikaz časovnega niza meritev UV/Vis spektralnega podpisa spojin iz druge skupine v podzemni vodi od 25.6.2025 do 19.11.2025 ter vrednost 95 % percentila – oranžna črta



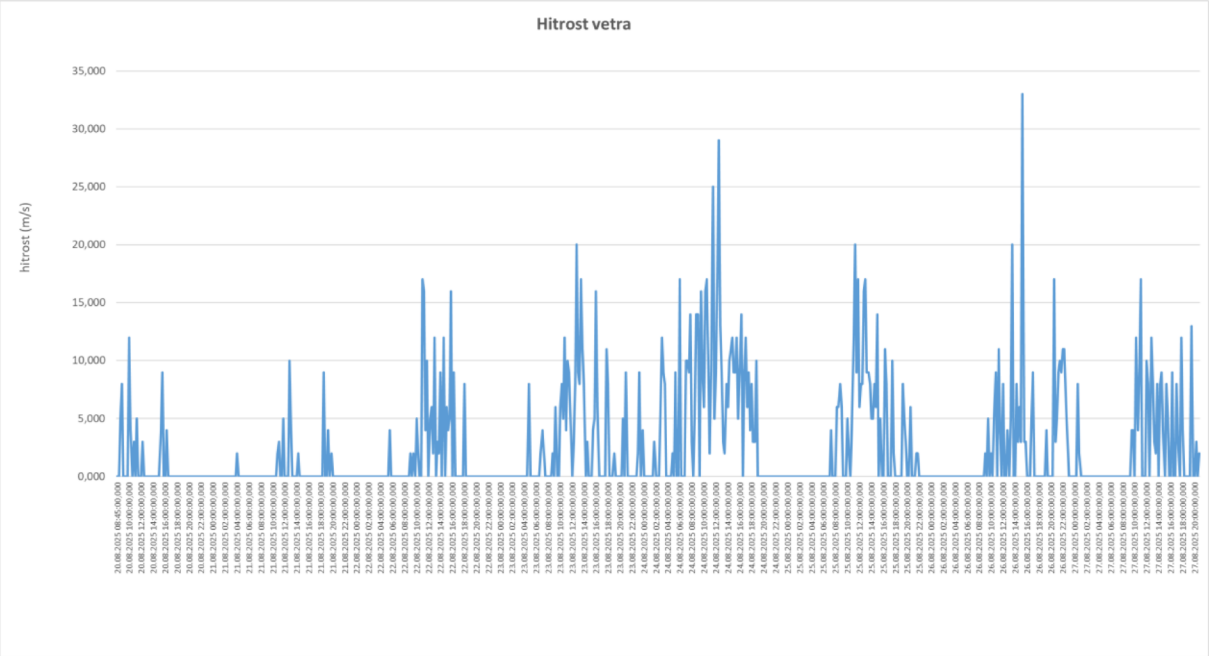
Slika 12: Prikaz časovnega niza meritev UV/Vis spektralnega podpisa spojin iz tretje skupine v podzemni vodi od 25.6.2025 do 19.11.2025 ter vrednost 95 % percentila – oranžna črta



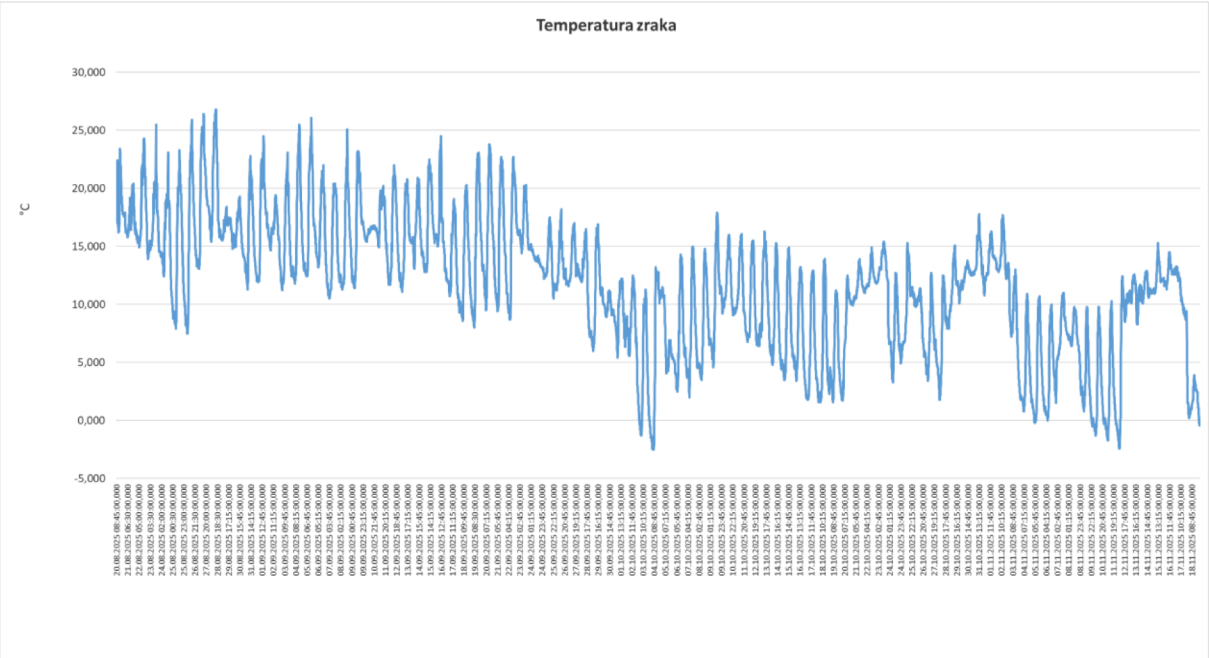
Slika 13: Prikaz časovnega niza meritev UV/Vis spektralnega podpisa spojin iz četrte skupine v podzemni vodi od 25.6.2025 do 19.11.2025 ter vrednost 95 % percentila – oranžna črta



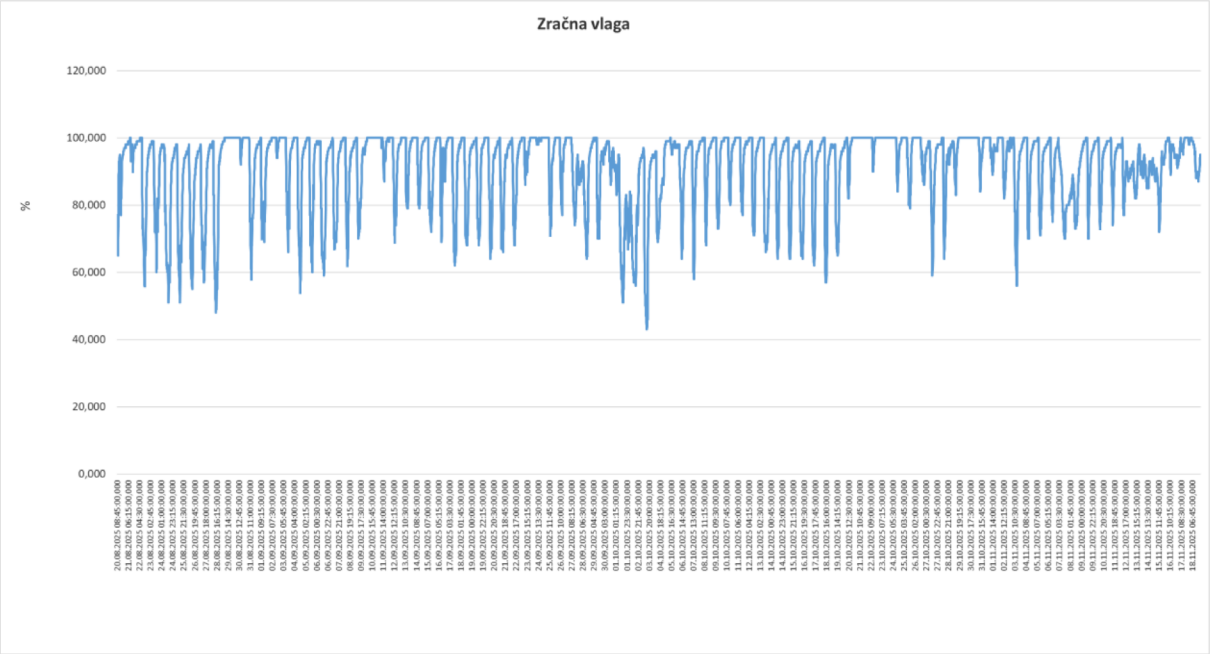
Slika 14: Prikaz časovnega niza meritev količine padavin (mm) od 25.6.2025 do 19.11.2025 (vremenska postaja)



Slika 15: Prikaz časovnega niza meritev hitrosti vetra (m/s) od 25.6.2025 do 19.11.2025 (vremenska postaja)



Slika 16: Prikaz časovnega niza meritev temperature zraka (°C) od 25.6.2025 do 19.11.2025 (vremenska postaja)



Slika 17: Prikaz časovnega niza meritev zračne vlage (%) od 25.6.2025 do 19.11.2025 (vremenska postaja)