



European Union

**Interreg**  
CENTRAL EUROPE

**boDEREC-CE**

# NOVODOBNA ONESNAŽEVALA V VODAH LJUBLJANSKE KOTLINE

Izzivi za bodoče upravljanje z vodnimi viri



**Izdajatelj:**

Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta  
Javno podjetje VODOVOD KANALIZACIJA SNAGA, d.o.o., Ljubljana

**Založnik:**

Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta  
Javno podjetje VODOVOD KANALIZACIJA SNAGA, d.o.o., Ljubljana

**Avtorji:**

Mihael Brenčič, Ines Vidmar, Mateja Jelovčan, Anja Torkar, Branka Bračič Železnik,  
Jurij Trontelj, Robert Roškar, Primož Auersperger

**Recenzija:**

Anja Koroša

**Lektoriranje:**

Rok Janežič

**Ilustracije:**

Marijan Pečar

**Oblikovanje in prelom:**

Maša Kokalj

**Tisk:**

SIMPRO d.o.o.

**Naklada:**

300 izvodov

**Kraj in leto izdaje:**

Ljubljana, 2022

CIP - Kataložni zapis o publikaciji  
Narodna in univerzitetna knjižnica, Ljubljana

502.51:504.5(497.451.1)

NOVODOBNA onesnaževala v vodah Ljubljanske kotline / Mihael Brenčič ... [et al.] ;  
[ilustracije Marijan Pečar]. - Ljubljana : Naravoslovnotehniška fakulteta : Javno podjetje  
Vodovod, kanalizacija, snaga, 2022

ISBN 978-961-95766-8-7 (Naravoslovnotehniška fakulteta)  
COBISS.SI-ID 112240899

Mihael Brenčič, Ines Vidmar, Mateja Jelovčan, Anja Torkar,  
Branka Bračič Železnik, Jurij Trontelj, Robert Roškar, Primož Auersperger

# NOVODOBNA ONESNAŽEVALA V VODAH LJUBLJANSKE KOTLINE

Izzivi za bodoče upravljanje z vodnimi viri

Ljubljana, 2022





# KAZALO

|                                                                |           |                                                                                                          |            |
|----------------------------------------------------------------|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>POVZETEK</b>                                                | <b>6</b>  | <b>5 POJAVLJANJE NOVODOBNIH ONESNAŽEVAL V POVRŠINSKI IN PODZEMNI VODI NA OBMOČJU LJUBLJANSKE KOTLINE</b> | <b>53</b>  |
| <b>ABSTRACT</b>                                                | <b>6</b>  | 5.1 Izhodišča za obravnavo novodobnih onesnaževal                                                        | 53         |
| <b>1 UVOD</b>                                                  | <b>7</b>  | 5.2 Vzorčna mesta                                                                                        | 53         |
| <b>2 ONESNAŽEVALA V PODZEMNI VODI</b>                          | <b>9</b>  | 5.3 Potek vzorčenja                                                                                      | 55         |
| 2.1 Pojavljanje podzemne vode                                  | 9         | 5.4 Rezultati vzorčenja                                                                                  | 57         |
| 2.2 Onesnaževala in onesnaževanje                              | 13        | 5.5 Sklepne ugotovitve                                                                                   | 82         |
| 2.3 Usoda onesnaževal v podzemni vodi                          | 15        | <b>6 HIDROGEOLOGIJA NOVODOBNIH ONESNAŽEVAL</b>                                                           | <b>83</b>  |
| 2.4 Kroženje onesnaževal                                       | 20        | 6.1 Izhodišča                                                                                            | 83         |
| <b>3 NOVODOBNA ONESNAŽEVALA</b>                                | <b>25</b> | 6.2 Rezultati modeliranja                                                                                | 85         |
| 3.1 Izhodiščne definicije                                      | 25        | <b>7 UPRAVLJANJE S TVEGANJI ZARADI PRISOTNOSTI NOVODOBNIH ONESNAŽEVAL V VODNIH VIRIH</b>                 | <b>95</b>  |
| 3.2 Skupine novodobnih onesnaževal                             | 28        | 7.1 Izhodišča                                                                                            | 95         |
| 3.3 Mehanizmi sproščanja novodobnih onesnaževal                | 33        | 7.2 Ocena tveganj                                                                                        | 98         |
| 3.4 Zakonodaja in politike                                     | 34        | 7.3 Pasivni ukrepi                                                                                       | 99         |
| <b>4 ZNAČILNOSTI LJUBLJANSKE KOTLINE</b>                       | <b>37</b> | 7.4 Aktivni ukrepi                                                                                       | 102        |
| 4.1 Izhodišča                                                  | 37        | 7.5 Sklep                                                                                                | 106        |
| 4.2 Naravne danosti                                            | 37        | <b>8 SKLEP</b>                                                                                           | <b>107</b> |
| 4.3 Raba prostora                                              | 44        | <b>VIRI IN LITERATURA</b>                                                                                | <b>108</b> |
| 4.4 Oskrba s pitno vodo ter odvajanje in čiščenje odpadnih vod | 46        | <b>ZAHVALA</b>                                                                                           | <b>109</b> |
| 4.5 Varovana območja s pravnim statusom                        | 51        | <b>OSEBNA IZKAZNICA PROJEKTA BODEREC-CE</b>                                                              | <b>110</b> |
| 4.6 Industrijske in druge obremenitve okolja                   | 52        |                                                                                                          |            |

## POVZETEK

Novodobna onesnaževala, ki se pojavljajo v vodnem okolju, vključujejo zelo širok nabor snovi; od sredstev za osebno nego, humanih in veterinarskih zdravilnih učinkovin, industrijskih kemikalij in fitofarmaceutskih sredstev do zaščitnih sredstev. Mednje pogosto uvrščamo mikroorganizme ter mikro- in nanoplastiko. Novodobna onesnaževala se v vodah praviloma pojavljajo v zelo nizkih koncentracijah, ki ne presegajo 1 µg/l. Ta onesnaževala pred nas postavljajo številne izzive, od ugotavljanja njihove prisotnosti do preprečevanja njihovega pojavljanja. Monografija predstavlja rezultate projekta boDEREC-CE na območju Ljubljanske kotline, katerega namen je bil ugotoviti porazdelitev novodobnih onesnaževal v različnih komponentah vodnega kroga na tem območju. Hkrati se je projekt usmeril v širše razumevanje pojava in narave teh onesnaževal. Ugotovili smo, da je največ novodobnih onesnaževal v površinskih vodah, njihovo število in koncentracije naraščajo vzdolž toka in so najvišje na iztoku reke Save iz Ljubljanske kotline. Manj onesnaževal je bilo zaznanih v plitvih podzemnih vodah, najčistejše pa so globoke podzemne vode. Ugotovili smo, da zaznana novodobna onesnaževala izvirajo iz urbanih, kmetijskih in industrijskih virov, ponekod pa imajo pomemben delež tudi zdravilne učinkovine. Z numeričnim modeliranjem toka podzemne vode in transporta onesnaževal je bilo kot najpomembnejši vzrok za prisotnost večine novodobnih onesnaževal v podzemni vodi na Ljubljanskem polju ugotovljeno puščanje kanalizacije na območju mesta Ljubljana. Ustrezno upravljanje z novodobnimi onesnaževali na viru in v vodnem okolju je nujno za preprečevanje naraščanja njihovih koncentracij ter s tem morebitnih kratkoročnih in dolgoročnih posledic.

**Ključne besede:** novodobna onesnaževala, površinska voda, podzemna voda, Ljubljansko polje, Ljubljanska kotlina, Slovenija.

## ABSTRACT

Emerging contaminants in the aquatic environment include a very wide range of substances, from personal care products, human and veterinary pharmaceuticals, industrial chemicals, pesticides, and many others. Microorganisms and micro- and nanoplastics are also frequently among them. Generally, these new contaminants occur in water at very low concentrations, below 1 µg/l. They present a number of challenges, from detecting their presence to preventing their occurrence. This monograph presents the results of the boDEREC-CE project in the Ljubljana Basin-Slovenia, the aim of which was to determine the distribution of emerging contaminants in various components of the water cycle in this area. At the same time, the project aimed at a more comprehensive understanding of the occurrence and nature of these contaminants. It was found that most emerging contaminants are found in surface waters, with their number and concentration increasing along the course of the river and being highest at the outflow of the Sava River from the Ljubljana Basin. Fewer contaminants were detected in shallow groundwater, with deep groundwater being the cleanest. The detected contaminants originate from urban, agricultural and industrial sources, and in some places, there is also a significant number of pharmaceuticals. Numerical modelling of groundwater flow and contaminant transport revealed that leaking sewers in the Ljubljana region are the most important cause of the occurrence of most emerging contaminants in the groundwater of Ljubljansko polje. Appropriate management of emerging contaminants at the source and in the aquatic environment is essential to prevent an increase in their concentrations and thus possible short- and long-term consequences.

**Key words:** emerging contaminants, surface water, groundwater, Ljubljana Basin, Ljubljansko polje, Slovenia.

Sodobni razvoj pred nas neprestano postavlja številne izzive. Na eni strani imamo opraviti z intenzivnim napredkom tehnologije in znanosti, ki nam v veliki meri olajšuje vsakdanje življenje in izboljšuje življenjski standard, na drugi strani pa to povzroča intenzivno potrošništvo in premik iz kulture raznolikih tradicionalnih družb v globalizirano potrošniško družbo. Vse to ima številne in raznovrstne vplive na okolje ter v njem živeče ekosisteme. Vode, vodno okolje in vodni ekosistemi pri tem niso izjema. Ker je voda skoraj univerzalno topilo, se lahko v vodnem okolju znajdejo tako rekoč vse kemijske snovi, ki jih proizvaja človek. Človek s posegi v vodno okolje spreminja tudi porazdelitev naravnih snovi, zaradi česar ponekod pride do njihovega pomanjkanja, drugod pa do presežka, kar prav tako povzroča različne vplive na ekosisteme in človekovo dejavnost.

Človekov razvoj in kemizacija okolja kot njegova posledica povzročata tudi pritiske in tveganja za vodne vire, ki so vir pitne vode. Pri tem se neprestano soočamo z novimi in novimi onesnaževali, hkrati pa se spreminja usoda onesnaževal, ki so nekoč že predstavljala pomemben delež obremenitev voda. Nekatera med njimi so v vodnem okolju še vedno prisotna, druga pa so se zaradi različnih procesov razgradila in iz njega izginila. V zahodnem svetu, kamor sodi tudi Slovenija, se s temi izzivi soočamo na zelo raznolike načine, tudi z zavedanjem o nujnem varovanju okolja. Pomemben vpliv na ravnanje z onesnaževali v vodnem okolju ima evropska in nacionalna zakonodaja, ki pa na področju varovanja vodnih virov kljub vsem naporom ne more povsem slediti razvoju, proizvodnji in uporabi raznovrstnih kemikalij. Kljub prizadevanjem, da bi spremenili doktrino zakonodaje, ki varuje okolje in vodne vire, ta zaostaja za vedno novimi kemikalijami, ki jih znanost odkriva v naravi in živih bitjih. Vsa ta onesnaževala, ki še niso pravno regulirana ali pa o njih še ne vemo dovolj, da bi jih zakonodaja ustrezno regulirala, zajamemo s pojmom novodobna onesnaževala.

Z izzivi novodobnih onesnaževal v navezavi na vire pitne vode in neposredno na pitno vodo, ki je namenjena oskrbi prebivalstva, smo se soočili

v projektu boDEREC-CE. Projekt je v letih 2019-2022 potekal v okviru programa Evropskega teritorialnega sodelovanja Interreg - Srednja Evropa. V njem je sodelovalo 12 partnerjev iz 6 držav članic Evropske unije (Avstrija, Hrvaška, Italija, Nemčija, Slovenija in Poljska). Partnersko skupino so sestavljali javni vodovodni sistemi, agencije za vodo in raziskovalne ustanove. Angleški naziv projekta »Board for Detection and Assessment of Pharmaceutical Drug Residues in Drinking Water - Capacity Building for Water Management in CE«, iz katerega izhaja kratica projekta bo-DEREC-CE, smo smiselno prevedli v nekoliko krajši slovenski naziv »Odkrivanje in ocena prisotnosti novodobnih onesnaževal v vodnem okolju«.

Rezultate projektne delo predstavljamo v monografiji, ki je pred vami. Njena vsebina temelji na delu celotnega projekta. Avtorji smo bili močno vključeni v pregled in pripravo izhodišč projekta, pri čemer smo podrobneje analizirali stanje trenutnega razumevanja novodobnih onesnaževal. Zato smo temu pregledu v monografiji namenili več pozornosti. Monografija se podrobneje ukvarja tudi z rezultati meritev in kemijskih analiz novodobnih onesnaževal na slovenskem pilotnem območju Ljubljanska kotlina, kjer smo se osredotočili predvsem na podzemno vodo. Te rezultate smo povezali z naravnimi danostmi na tem območju ter fizikalno-kemijskimi lastnostmi novodobnih onesnaževal. Pomemben vidik obravnave novodobnih onesnaževal je tudi upravljanje z vodnimi viri, in sicer tako, da do onesnaževanja ne prihaja ali da se tam, kjer je do vnosa onesnaževal že prišlo, njihova prisotnost zmanjša ali povsem odstrani. V monografiji, ki je pred vami, smo se posvetili tudi tem problemom.

Pričujoča monografija je namenjena predvsem širši javnosti. Zato smo izpustili številne podrobnosti, ki jih sicer najdemo v znanstvenih monografijah. Z našo monografijo smo želeli na splošen in poljuden način prikazati zapleteno problematiko pojavljanja novodobnih onesnaževal in onesnaženj v vodnem okolju, hkrati pa na korekten način prikazati strokovne podatke meritev o pojavljanju različnih novodobnih onesnaževal v vodnem okolju Ljubljanske kotline. Večjo težo

smo dali podzemni vodi, ker je ta skoraj edini vir pitne vode v Sloveniji. Rezultati in razlage, ki jih podajamo v našem delu, niso dokončni. Da bi pojavljanje novodobnih onesnaževal v vodnem okolju bolje razumeli, nas čaka še veliko dela. Verjamemo, da smo skupaj s številnimi drugimi strokovnjaki, ki se prav tako ukvarjajo s podob-

no tematiko, prispevali k boljšemu razumevanju teh problemov. Predvsem pa se moramo zavedati, da je okolje, zlasti vode, zelo občutljivo na vnos onesnaževal in da moramo to v največji meri preprečiti. Na tem področju nas v prihodnje čaka še veliko izzivov.

## 2 ONESNAŽEVALA V PODZEMNI VODI

### 2.1 Pojavljanje podzemne vode

Čista voda je tekočina brez barve, vonja in okusa, hkrati pa brez prisotnosti kakršnihkoli drugih snovi. Vendar takšne vode v naravi ne bomo našli. Čisto vodo je mogoče pripraviti le v laboratoriju pod strogo nadzorovanimi pogoji. Voda je najučinkovitejše topilo, kar jih poznamo na Zemlji, in skorajda je ni snovi, ki se v stiku z njo ne bi raztopila vsaj v zelo nizkih koncentracijah. Zato voda, ki jo najdemo v naravi in okolju, v naravnem stanju vedno vsebuje tudi druge snovi. O vodi strokovno govorimo kot o topilu, o topljencih pa kot o tistih snoveh, ki se raztopijo v vodi. Toplence, ki jih zasledimo v naravi, v grobem razdelimo na anorganske in organske. Med anorganske toplence sodijo kationi in anioni ter različni kompleksi, v nekaterih primerih pa imamo opraviti tudi z elementi v elementarni neionski obliki. V naravi zasledimo številne organske snovi, mnoge med njimi se lahko znajdejo raztopljene v vodi, vendar je za prisotnost organskih topljencev v naravnih vodah značilno, da so te koncentracije razmeroma nizke.

Voda v naravi neprestano kroži. Njeno kroženje opišemo s konceptom vodnega kroga, ki mu pogosto rečemo vodni cikel ali vodni sistem. Razdelimo ga na tri glavne komponente ali podsisteme: atmosfersko vodo, površinsko vodo in podzemno vodo. Vse tri komponente so med seboj povezane in vplivajo druga na drugo.

Ker je voda tako učinkovito topilo, so v njej v naravi vedno raztopljene snovi, ne glede na to, ali imamo opraviti z atmosfersko, površinsko ali podzemno vodo. Raztopljene snovi v teh komponentah pa se med seboj razlikujejo. V atmosferski vodi je le malo raztopljenih snovi, mnogo več jih je v površinskih, še več pa v podzemnih vodah. Vzrok za to je v hitrosti kroženja vode v posamezni komponenti vodnega kroga. V zraku je le malo snovi, voda v ozračju pa se hitro izmenjuje; v površinski komponenti vodnega kroga se voda že zadržuje daljši čas, zato so koncentracije višje. Voda ima na razpolago več časa, da raztaplja minerale in organske snovi, s katerimi prihaja v stik. Največ snovi pa je raztopljenih v podzemni vodi. Ta teče mnogo počasneje, njena hitrost je le nekaj metrov na dan, pogosto pa še mnogo nižja, včasih le

en milimeter na leto. Zaradi tega ima podzemna voda na razpolago veliko časa, da raztopi minerale kamnin in sedimentov, s katerimi prihaja v stik.

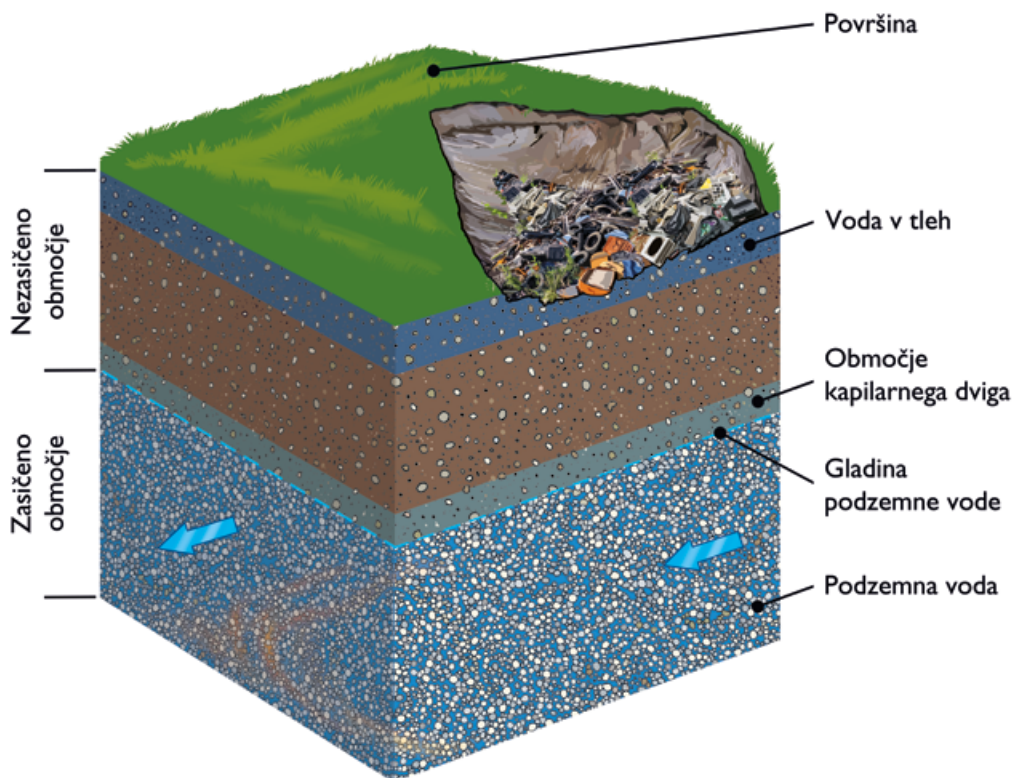
Ker je lahko v vodi v naravi in prostoru raztopljenih veliko topljencev, ki jih lahko izmerimo na različne načine, se moramo seznaniti z orodjem, s katerim bomo opisali vso to množico raztopljenih snovi. V stroki in zakonodaji o vodi se je tako uveljavilo načelo, pri katerem govorimo o stanju vode, ki bi ga lahko opredelili z zelo preprosto in široko definicijo. Stanje vode je zbir vseh njenih lastnosti. Zaradi številnih lastnosti vode v naravi, prostoru in času pa moramo stanje vode na določenem območju razdeliti še v nadaljnje podkategorije. Iz naših izvajanj sledi, da imamo opraviti s kemijskim stanjem vode. Definicija tega stanja je, da gre za zbir vseh njenih kemijskih lastnosti. To so na primer njene fizikalne značilnosti, kot so gostota, viskoznost, temperatura, predvsem pa množina v njej raztopljenih snovi. Primer izrazitega in neposrednega vpliva na kemijsko stanje podzemne vode je izcejanje voda iz telesa odlagališča odpadkov. Poleg kemijskega stanja podzemne vode poznamo še dve drugi, prav tako pomembni stanji. Prvo je količinsko stanje podzemne vode; to je količina vode na določenem območju in v določenem času. Primer vpliva na količinsko stanje podzemne vode je njeno črpanje za potrebe oskrbe prebivalstva s pitno vodo. In ne nazadnje poznamo še tretje stanje vode, to je njeno ekološko stanje. Voda je bistvenega pomena za vsa živa bitja in brez nje ni življenja. Življenje pa je odvisno od vseh komponent vodnega kroga in je prisotno v njih.

V nadaljevanju se bomo osredotočili na podzemno vodo, eno od treh komponent vodnega kroga. Kaj je podzemna voda? To je morda nekoliko neumestno vprašanje, a hiter sprehod po slovenski strokovni in laični terminologiji nam pokaže, da to ni tako samoumeven pojem. Odgovor na to vprašanje ni enoznačen. Podzemna voda je nevidni del vodnega kroga na Zemlji. Za pojave vode pod površjem tal v slovenskem jeziku uporabljamo celo vrsto izrazov. V vsakdanjem laičnem jeziku, pa tudi v nekaterih strokah, najpogosteje uporabljamo izraz podtalnica, ker gre za vodo pod tlemi.

Toda to ni edini izraz, ki ga zasledimo. Naštejmo še nekatere druge: talnica, talna voda, podzemna voda, podzemnica, podzemeljska voda, podtalna voda, pa tudi studenčnica, precejna voda in plastovna voda. Vsi ti izrazi so tako ali drugače zaznamovani in jih razumemo zelo različno. Da bi se tej zmedi izognili, se je stroka že pred časom odločila, da bo uporabljala enotno poimenovanje podzemna voda. Termin podzemna voda se uporablja tudi v slovenski zakonodaji o vodah. S podzemno vodo se ukvarja hidrogeologija, geološka veda, ki preučuje njeno pojavljanje in dinamiko v kamninah in sedimentih.

Da bi razumeli, kaj je podzemna voda in kako se pojavlja, kasneje pa tudi to, kakšne so značilnosti njenega onesnaževanja, si najprej oglejmo nekaj osnovnih hidrogeoloških izhodišč. Pomagali si bomo s shemo, ki je prikazana na sliki 1. Takšni shemi pravimo tudi osnovni hidrogeološki profil.

Podzemna voda se giblje v porah kamnin in sedimentov, zato je pomembno poznati dejavnike, ki vplivajo na njihovo velikost in razporeditev por; le tako lahko razumemo, opišemo in predvidimo poti, ki jih pod površjem ubira podzemna voda. Pora je kakršnakoli praznina znotraj kamnine ali sedimenta. Volumen por glede na celoten volumen geološkega medija je lastnost, ki jo imenujemo poroznost, z njo pa je povezana druga pomembna hidrogeološka lastnost kamnine ali sedimenta - prepustnost, ki je poleg značilnosti, ki izhajajo iz geološke sestave, odvisna od lastnosti tekočine, ki jo pore vsebujejo, ta pa je največkrat voda. Za pojavljanje podzemne vode v kamninah in sedimentih je pomembna tudi oblika praznin ali por, v katerih je voda. V naših raziskavah nastopa medzrnska poroznost, ki je posledica stika med zrni v sedimentu (na primer praznine, ki nastanejo kot posledica stika med zrni proda). Poleg por, njihove velikosti in oblike so za tok podzemne vode in obnašanje onesnaževal v njih



Slika 1: Osnovni hidrogeološki profil.



pomembni številni drugi fizikalni ali hidrogeološki parametri (na primer prepustnost, prevodnost, uskladiščenje ...). Večina hidrogeoloških parametrov je medsebojno odvisnih.

Območje pod površjem tal razdelimo na dva dela, ki ju med seboj loči gladina podzemne vode. Pod gladino podzemne vode je zasičeno območje. Tako se imenuje zaradi tega, ker so vse pore zasičene z vodo. S tujko to območje imenujemo freatično območje. Nad gladino podzemne vode je nezasičeno območje, kjer so pore zasičene le deloma, v nekaterih predelih pa so lahko povsem suhe. Nezasičeno območje v odprtih vodonosnikih sega od površja do gladine podzemne vode, zasičeno pa od gladine podzemne vode do talnine vodonosnika. Nekoliko poenostavljeno, obe območji med seboj loči gladina podzemne vode. To je ploskev, ki se razteza znotraj vodonosnika in lahko ima zelo razgibano geometrijo, katere naklon kaže, v katero smer teče voda. Njen položaj in oblika sta odvisna od napajanja s strani infiltracije padavin, lahko pa tudi od drugih virov napajanja, kot je prenikanje površinske vode iz strug rek in potokov.

V nezasičenem območju voda pod vplivom gravitacije teče le v vertikalni smeri. Kot pove že ime, to območje ni v celoti nasičeno z vodo, stopnja nasičenja ali zapolnitve por z vodo je odvisna od količine vode, ki je na voljo za infiltracijo s površine, kar pa se lahko od enega časovnega obdobja do drugega tudi spreminja. Ob suhem vremenu je na primer morda na voljo le površinska voda, ki v nezasičeno območje vodonosnika prehaja iz potoka ali reke, ob deževju pa se količina infiltrirane vode poveča, in sicer v odvisnosti od trajanja, količin in intenzivnosti padavinskih dogodkov na napajalnem območju vodonosnika. V skladu s tem je lahko v

določenem trenutku nezasičeno območje le minimalno zasičeno, pore so zapolnjene pretežno le z zrakom, spet v drugem pa se vsebnost vode v njem poveča in je nekoliko bolj nasičeno, kar pomeni, da je več por zapolnjenih z vodo.

Smer toka vode v zasičenem območju se razlikuje od toka v nezasičenem območju; poenostavljeno rečeno bi lahko zapisali, da teče pravokotno na smer toka v nezasičenem območju. Takoj nad gladino podzemne vode je še območje kapilarnega dviga, kjer delujejo tako imenovane kapilarne ali vlečne sile. Te učinke si najlažje predstavljamo s poizkusom, pri katerem drobno cevko (kapilaro) pomočimo v vodo. Voda v cevki se bo dvignila, višina dviga pa je med drugim odvisna od premera cevke. Debelina tega območja se v naravi med posameznimi sedimenti zelo razlikuje; pri glinah je lahko visoka nekaj metrov, medtem ko je v debelo-zrnatih prodih njena višina zanemarljivo majhna. Iz hidrogeološkega profila je razvidno, da kot posebno območje ločimo območje tal (prsti), imenovano tudi pedološki horizont. Fizikalne lastnosti tega območja so praviloma nekoliko drugačne od spodaj ležečega predela, zato ima v tleh tudi voda nekoliko drugačno porazdelitev.

Če bi si ogledali v Sloveniji veljavno zakonodajo s področja voda (na primer Zakon o vodah), bi videli, da je kot podzemna voda opredeljena le voda v zasičenem delu hidrogeološkega profila. Za naše potrebe pa bomo to definicijo nekoliko razširili. V nadaljevanju bomo kot podzemno vodo obravnavali katerokoli vodo pod površjem tal.

Pri obravnavanju osnovnih izhodišč za razumevanje pojavljanja in toka podzemne vode ne moremo mimo pojma vodonosnika. Gre za kamnine ali sedi-

| ODPRTI VODONOSNIKI                                                                                             | ZAPRTI VODONOSNIKI                                                                                          |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"><li>• neprepustna talnina</li><li>• zasičeno in nezasičeno območje</li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>• neprepustna talnina in krovina</li><li>• zasičeno območje</li></ul> |

Slika 2: Osnovne značilnosti odprtih in zaprtih vodonosnikov.



mente, ki imajo višjo prepustnost in večji prostorski obseg ter omogočajo, da voda vanje vstopa, se v njih skladišči in skozi njih prehaja v količinah, tako da so pogosto pomemben vir pitne vode. Tudi pri vodonosniku bomo v praksi in literaturi naleteli na zelo različne definicije, a ta razprava presega naš namen. Mednarodno uveljavljena (operativna) definicija vodonosnika, ki ji pravimo tudi definicija Mednarodnega združenja hidrogeologov, pravi, da je to plast kamnine ali sedimenta, iz katere lahko z ekonomskimi učinki izkoriščamo podzemno vodo. Poznamo več različnih vodonosnikov, za nas sta pomembna le odprti in zaprti vodonosnik, obstajajo pa tudi prehodi med tema tipoma, a jih na tem mestu ne obravnavamo, ker za razumevanje razširjenosti novodobnih onesnaževal na območju Ljubljanske kotline njihovo poznavanje ni pomembno (slika 2). Pri prvem gladina podzemne vode niha prosto, odvisno od napajanja, pri slednjem pa je podzemna voda ujeta med dve zelo slabo prepustni plasti (krovnino in talnino), zaradi česar je pod povišanim tlakom. Na raziskovanem območju Ljubljanskega polja, Kranjsko-Sorškega polja in na območju od Naklega proti severozahodu, vse do Lesc, so prisotni odprti vodonosniki. Zaprti vodonosniki pa so na območju Ljubljanskega barja.

V vodonosnike lahko podzemna voda vstopa iz različnih drugih sistemov: iz sosednjih vodonosnikov, iz plasti z manjšimi količinami podzemne vode ali iz površja, od koder se v vodonosnike infiltrira deževnica ali površinska voda iz rek, potokov in

jezer. Infiltracija je proces prehajanja vode iz površine v podzemlje, z izrazom napajalno območje pa opredelimo celotno območje, ki prispeva k napajanju vodonosnika ali njegovega poljubno izbranega dela. Pri vodnjakih, iz katerih črpamo vodo za vodooskrbo, pogosto govorimo o napajalnih območjih, zato nas zanima, od kod prihaja voda, ki jo črpamo in pijemo, z namenom, da bi ugotovili, kje lahko prihaja do morebitnih vplivov nanjo.

Pri obravnavanju podzemne vode ne smemo pozabiti na njeno povezanost s površinsko vodo v rekah, potokih in jezerih. Na območju Ljubljanske kotline na vodonosnike v veliki meri vpliva zlasti reka Sava. Na območju severozahodnega in severnega dela Ljubljanskega polja se voda iz struge reke infiltrira v vodonosnik, hkrati pa se voda iz njega izteka nazaj v reko, preden ta pri Dolskem zapusti Ljubljansko kotlino. Iz povedanega je razvidno, kako tesno sta med seboj povezana ta dva osnovna podsistema vodnega kroga. Z vplivanjem na enega vplivamo na drugega in obratno. To dokazuje, da je treba vodni krog obravnavati integralno in kot celoto.

Da lahko določimo, kako je gladina podzemne vode v naravi porazdeljena, njene meritve izvajamo v posameznih točkovnih presekih vodonosnika, kar nam omogočajo posebne opazovalne vrtine. Imajo obliko podolgovatega valja in jih izdelamo z vrtnjem, zacevimo in opremimo pa s posebnim filterskim odsekom cevi, ki vanje omogoča vstopanje podzemne vode iz vodonosnika. Tako nudijo neposreden vpogled v višino gladine podzemne vode na določeni točki. Na podlagi tako pridobljenih meritev gladine podzemne vode hkrati v različnih vrtinah izdelamo interpolacijo ali model za določanje razporeditve višine podzemne vode na celotnem območju vodonosnika, ki velja le za določeno količinsko stanje, lahko pa na podlagi daljših serij zveznih meritev izdelamo tudi dinamične modele vodonosnikov (slika 3). Interpretacije rezultatov meritev glavin nas privedejo tudi do ugotovitve smeri toka podzemne vode ter njenega gradienta, kar je stopnja nagnjenosti gladine na določeni razdalji; to nam posredno pove, kako hitro podzemna voda teče.



Slika 3: Prikaz odnosa med različnimi bilančnimi komponentami v vodonosniku.

Podzemna voda ima v Sloveniji in v globalnem merilu izredno pomembno vlogo. Tako kot v drugih evropskih državah, ki segajo na območje alpskega loka, je glavni vir pitne vode. Statistike o rabi podzemne vode na območju Slovenije se med seboj nekoliko razlikujejo, vendar pa ta delež presega 90 %. Poleg tega ima podzemna voda pomembno vlogo pri zagotavljanju ustreznih pogojev za številne ekosisteme. Lep primer tega je napajanje mokrišč s strani podzemne vode, ne smemo pa pozabiti tudi na to, da so podzemna voda in vodonosniki pomemben biotop. V takšnih primerih govorimo tudi o organizmih, odvisnih od podzemne vode. Spomnimo se samo na kraške vodonosnike, v katerih živi verjetno najprepoznavnejši prebivalec Slovenije - človeška ribica. Prav zaradi naštetega je zaščita podzemne vode pred onesnaženji in onesnaževanjem izredno pomembna. Da pa bi zaščito ustrezno izvedli, moramo poznati zakonitosti procesov, ki vodijo do onesnaženja podzemne vode.

## 2.2 Onesnaževala in onesnaževanje

Človek je v celotnem obdobju svojega razvoja intenzivno posegal v naravno okolje in ga dodobra preoblikoval ter s tem spremenil pomemben del vodnega kroga; vplival je predvsem na površinske vode in posredno na podzemne vode. Poleg fizičnega preoblikovanja naravnega okolja pa človek proizvaja številne snovi, s katerimi voda kot univerzalno topilo prihaja v stik in jih v večji ali manjši meri raztaplja. Človeštvo iz dneva v dan proizvaja nove kemijske spojine. Danes je v bazi Ameriškega kemijskega društva (ang. American Chemical Society), ki skrbi za registracijo novih spojin, s CAS številko (ang. Chemical Abstract Services Registry Number ali skrajšano CAS), ki je univerzalni številčni identifikator kemijskih spojin, registriranih skoraj 69,5 milijona različnih spojin. Vse te spojine so potencialno vodotopne in se lahko v različnih koncentracijah pojavijo tudi v vodnem okolju. Tako je bilo do leta 2018 na podlagi različnih študij v podzemnih vodah registriranih 333 kemikalij (Rüdel in sodelavci, 2020).

Število kemikalij, ki jih zaznamo v vodnem okolju, se neprestano spreminja. To je povezano s številnimi dejavniki. Mednje sodijo načini rabe kemi-

kalij in njihove proizvodnje. Nekatere kemikalije so zaradi ekonomskih ali okoljevarstvenih zahtev v rabi le določen čas, nato pa jih sčasoma umaknejo iz proizvodnje in uporabe. Lep primer tega so nekateri pesticidi, ki so nekoč pomenili veliko obremenitev za okolje, danes pa so prepovedani, tako da v vodnem okolju zasledimo le še nizke koncentracije ali pa le njihove transformacijske produkte (na primer pesticid atrazin in njegov metabolit desetilatrazin). Nekatere kemikalije v okolju zasledimo šele daljši čas po začetku njihove proizvodnje, zopet druge pa kmalu po začetku njihove uporabe. Različno obnašanje kemikalij je povezano z njihovo usodo v okolju. Preden pa se podrobneje seznanimo z usodo onesnaževal v podzemni vodi, si oglejmo nekaj temeljnih definicij o onesnaževanju podzemne vode.

Podzemna voda je, kadar v njej ne zasledimo vpliva človekovih dejavnosti, v naravnem stanju. Do onesnaženja podzemne vode pride takrat, ko se zaradi vpliva človekove dejavnosti spremeni njeno kemijsko stanje. Sprememba kemijskega stanja podzemne vode je lahko neškodljiva ali škodljiva. Kadar je neškodljiva, to ne pomeni tveganja za zajem podzemne vode za potrebe oskrbe prebivalstva s pitno vodo ali za življenje od podzemne vode odvisnih organizmov. Sprememba naravnega kemijskega stanja podzemne vode pa je lahko tudi škodljiva. To povzroči povečano tveganje za zdravje prebivalstva ter negativne vplive na organizme, odvisne od podzemne vode.

Kadar zaradi vpliva človekove dejavnosti pride do spremembe kemijskega stanja podzemne vode, govorimo o njenem onesnaženju. Snovi, ki spremenijo naravno kemijsko stanje podzemne vode, imenujemo onesnaževala, proces, pri katerem poteka vnos onesnaževal v podzemno vodo, pa imenujemo onesnaževanje.

V mednarodni strokovni in znanstveni literaturi ter deloma v slovenski literaturi bomo zasledili različne poglede na ta vprašanja. Lahko bi celo govorili o različnih terminoloških šolah. Najpogostejše razlike v teh pojmovanjih so povezane z različnimi strokami, ki se ukvarjajo s temi vprašanji. Nekatere šole kakršnokoli spremembo naravnega kemijskega stanja obravnavajo kot onesnaženje, druge pa ločijo

med neškodljivim in škodljivim vplivom antropogeno vnesenih snovi. Škodljivost obravnavajo predvsem z vidika vpliva na določene vodne organizme. V angleščini in nekaterih drugih jezikih takšna onesnaženja poimenujejo drugače, v slovenščini teh razlik v poimenovanju žal še nismo ustrezno opredelili. V angleškem jeziku govorijo o kontaminaciji (ang. contamination) in o snovi, ki jo povzroča, tj. kontaminantu (ang. contaminant), takrat ko ta ni škodljiva. Kadar pride do škodljivega vpliva, govorijo o poluciji (ang. pollution) in o snoveh, ki jo povzročajo, tj. polutantih (ang. pollutant). Pri nas to razlikovanje terminološko ni dovolj jasno opredeljeno in sprejeto. Za prvi primer bi lahko uporabljali izraz kontaminacija, za drugi primer pa polucija, vendar so to tujke, ki so pogosto obravnavane kot neustrezne. V nekaterih primerih se uporablja razlikovanje med onesnaževalom in onesnažilom, vendar zaidemo v težave, ko skušamo poimenovati s tem povezane procese. Iz onesnaževala lahko izvedemo poimenovanje za proces in stanje, to je onesnaževanje in onesnaženost, medtem ko nam narava slovenskega jezika takšne izvedbe iz besede onesnažilo ne omogoča. Kot potencialno ustreznico za tujko polucija bi morda lahko uporabili izraz onečiščenje, vendar tudi to ni splošno uveljavljen in sprejet strokovni izraz.

Tudi pri razlikovanju neškodljivega in škodljivega kemijskega stanja podzemne vode zaidemo v težave. Kaj je škodljivo? Ko presojamo, ali je določeno onesnaženje škodljivo, moramo natančneje opredeliti škodljivost. Ali je to škodljivost, ki povzroči akutne ali kronične učinke, ali mogoče oboje? Ali je to škodljivost za vodne organizme in za katere? Za kateri del populacije so lahko koncentracije onesnaževala škodljive? Takšnih in podobnih dilem bi lahko našteali še veliko. Definicije škodljivosti onesnaženja so pogosto opredeljene v mednarodnih standardih in zakonodaji, ki povzema te standarde, vendar ne glede na to, zlasti za podzemno vodo, ta vprašanja še niso zadovoljivo rešena. Zato v nadaljevanju, podobno kot v drugi hidrogeološki literaturi, ne bomo ločevali med kontaminacijo in polucijo, ampak bomo uporabljali izraz onesnaženje, tako kot smo ga opredelili zgoraj. Takšno pojmovanje zasledimo v večini hidrogeološke znanstvene in strokovne literature. Ne glede na to pa na nekaterih mestih, kjer po-

dajamo pregled literature, opozorimo na možno razlikovanje med tema pojmovoma.

Leta 2021 smo v Evropski uniji sprejeli zeleni dogovor, na podlagi katerega se bomo v prihodnjih letih spopadli s podnebnimi in okoljskimi izzivi. Dogovor in dokumenti, ki izhajajo iz njega, predvidevajo vrsto ukrepov, med drugim uvajajo doktrino »zero pollution«, kar je bilo v slovenske strateške dokumente prevedeno kot doktrina »ničelnega onesnaževanja«. Ali je ničelno onesnaževanje v vodnem okolju in podzemnih vodah, kar je predmet našega zanimanja, mogoče doseči? Vsekakor moramo stremeti k preprečevanju vnašanja onesnaževal v vodonosnike. Vendar ali lahko preprečimo kakršnokoli onesnaženje, tako kot napeljuje slovenski prevod doktrine? Pri stanju današnjega razvoja onesnaževanja vodonosnikov ne moremo povsem preprečiti, ne nazadnje že zaradi tega, ker s številnimi dejavnostmi posegamo neposredno vanje. Težimo lahko le k temu, da škodljive učinke zmanjšamo na minimum ali jih celo v celoti preprečimo. S tem pa ponovno pridemo do vprašanja, ali je poimenovanje doktrine »ničelnega onesnaževanja« s stališča prevoda angleškega termina ustrezno.

Dotaknimo se še enega termina, ki ga srečujemo v literaturi in razpravah o onesnaževanju podzemne vode. To je pojem naravnega onesnaženja. Ali je to poimenovanje ustrezno? Izhaja iz povsem antropocentričnega pojmovanja vodnega kroga in vodnih sistemov ter z njimi podzemne vode v vodonosnikih. Pojem naravnega onesnaženja v povezavi s podzemno vodo uporabljamo takrat, ko ta zaradi naravnih procesov ni primerna za oskrbo prebivalstva s podzemno vodo. Najbolj znani primeri v svetovnem merilu so visoke naravne koncentracije raztopljenega arzena in fluora. V Sloveniji se s podobnimi primeri, vendar v manj škodljivih razsežnostih, srečujemo takrat, ko naletimo na podzemno vodo v zaprtih vodonosnikih, kjer so prisotne povišane koncentracije raztopljenega železa in mangana, v nekaterih zelo redkih primerih tudi arzena. Če je voda v takšnih primerih posledica naravnih procesov, ne moremo govoriti o onesnaženju, temveč le o tem, da podzemna voda v svojem naravnem kemijskem stanju ni primerna za pitje. Prav zato je neprimerno določanje enakih

standardov za zagotavljanje kemijskega stanja za podzemno in pitno vodo, saj bi v nekaterih primerih morali podzemno vodo v njenem naravnem stanju čistiti že na mestu samem, kar pa je nesmisel. Zaradi tega termina naravno onesnaženje podzemne vode ni primeren izraz.

### 2.3 Usoda onesnaževal v podzemni vodi

Ko pride do vnosa onesnaževala, najpogosteje je to v tekočem agregatnem stanju, pod površino tal, se to zaradi prisotnosti podzemne vode in nekaterih (transportnih) fizikalnih procesov prične v tleh, sedimentih ali kamninah premikati. Onesnaževalo potuje in njegova hitrost je zelo raznolika. Nekatera onesnaževala na mestih, kjer so bila razlita, skorajda obstanejo, druga skozi vodonosnike potujejo zelo hitro in se pri tem močno razpršijo. Večina onesnaževal, predvsem organskih spojin, se na svoji poti spremeni. Nekatera onesnaževala se sorbirajo na zrna mineralov, druga razpadejo, tretja reagirajo z minerali v vodonosniku, tako da nastanejo novi minerali in spojine, četrta pa razpadejo zaradi vpliva mikroorganizmov. Verjetno bi lahko našteali še kak proces, ki vpliva na to, kako se posamezno onesnaževalo obnaša v vodonosniku. Vse procese in spremembe, ki vplivajo na naravo in porazdelitev onesnaževala v vodonosniku, imenujemo usoda onesnaževal (ang. contaminant fate).

Preden onesnaževalo prične pot skozi vodonosnik, se mora tam, kjer je, sprostiti. Govorimo o virih onesnaževal in onesnaževanja. Glede na prostorsko dimenzijo in njihovo obliko ločimo tri vrste virov (slika 4). Razlikovanje med različnimi prostorskimi razsežnostmi virov je pomembno predvsem takrat, ko želimo razumeti, kako se je onesnaževalo razširilo skozi vodonosnik, in takrat, ko želimo izvesti izračune, s katerimi želimo napovedati koncentracije in smer širjenja onesnaževal. Točkovni viri so tisti, pri katerih se onesnaževalo v vodonosnik sprosti v eni točki. Lep primer tega je sproščanje onesnaževal iz podzemnih rezervoarjev nevarnih snovi, pa tudi različna razlitja. Drugi vir so ploskovni ali razpršeni viri. Sem sodijo onesnaževala, ki izvirajo iz kmetijstva. Zaradi narave kmetijske proizvodnje se onesnaževala razpršijo na velikih njivskih površinah. Tretji vir onesnaže-

val in onesnaževanja so linijski viri. Primer takšnega vira je različna transportna infrastruktura, kot so ceste, železnice in različni cevovodi. V nekaterih primerih narave prostorskega vira onesnaženja ni mogoče natančno opredeliti. Takšni viri so odlagališča odpadkov. Če imamo opraviti z velikimi in praviloma starejšimi odlagališči, kjer stik med odpadki in tlemi ni zatesnjen, gre za ploskovni vir, če pa je odlagališče ustrezno opremljeno in izvedeno, lahko gre le za potencialni točkovni vir onesnaževal. S podobno dilemo imamo opraviti tudi pri kanalizaciji. V urbanih okoljih, kjer je kanalizacijska mreža na območju mestnih ulic gosta, bi to lahko obravnavali kot ploskovni vir, tam, kjer imamo opraviti z daljšimi transportnimi cevovodi, na primer do čistilnih naprav, pa je to potencialni linijski vir onesnaževal.



Slika 4: Prikaz porazdelitve onesnaževal in njihovih poti v prostoru.

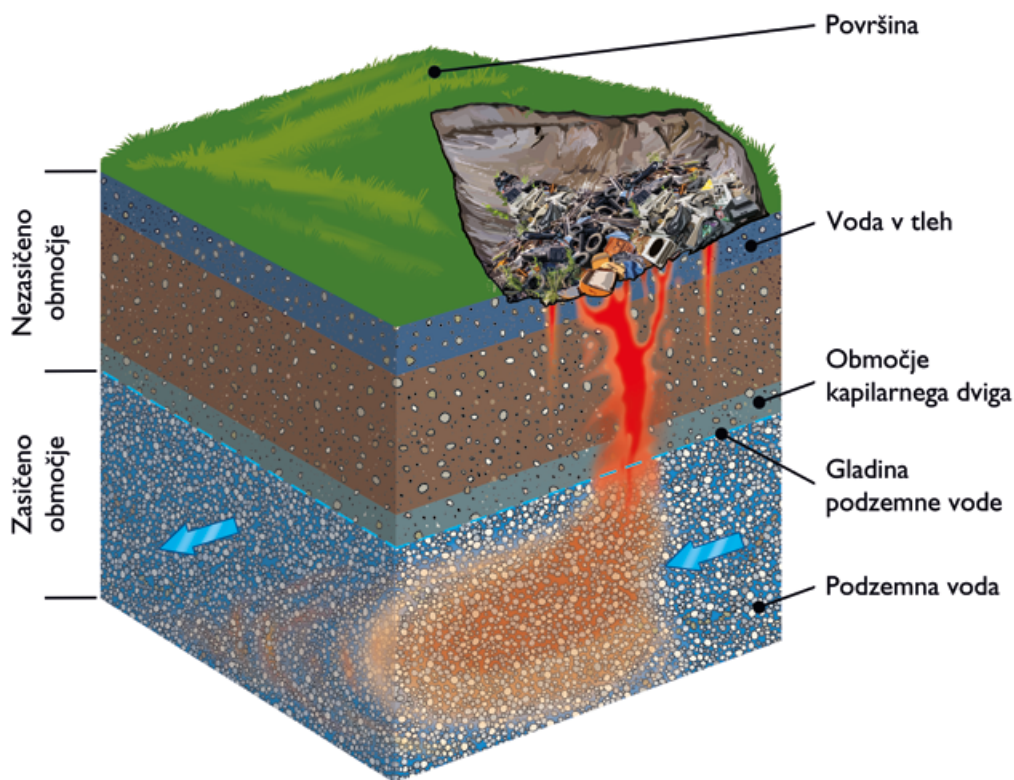


Pomembna je tudi časovna komponenta sprostitve onesnaževala v vodonosnik. Sprostitev onesnaževal je lahko trenutna, časovno omejena ali trajna. S trenutno sprostitvijo onesnaževala imamo opraviti takrat, ko pride do nenadnega razlitja omejene količine nevarne snovi. Za časovno omejeno sprostitve gre takrat, ko do sprostitve onesnaževala pride le v določenem časovnem obdobju. Takšen primer je puščanje podzemnih rezervoarjev. Iz rezervoarja začne iztekati nevarna snov, upravljavec rezervoarja pa praviloma potrebuje nekaj časa, da zazna in popravi takšno puščanje. Trajno sproščanje onesnaževal je prisotno takrat, ko imamo opraviti z velikimi viri, kot so velika nesanirana stara odlagališča odpadkov, kjer se onesnaževala sproščajo neprekinjeno. Prav tako so lahko takšen vir skrita bremena, katerih lokacije ne poznamo. Kot primer bi lahko navedli stare zakopane odpadke ali ostanke starejših industrijskih obratov.

Na dopolnjeni sliki osnovnega hidrogeološkega profila si oglejmo, kako se onesnaževalo s površi-

ne širi v vodonosnik (slika 5). Proces širjenja onesnaževal se razlikujejo glede na to, ali potekajo v nezasičenem ali zasičenem območju vodonosnika. V zasičenem območju vodonosnika se onesnaževalo širi v vertikalni smeri predvsem pod vplivom gravitacijske sile. Širjenje tega onesnaževala praviloma ni premočrtno v ravni črti, saj nezasičeno območje vodonosnika ni nikoli homogeno; v njem se pojavljajo plasti z različnimi lastnostmi, ki tok onesnaževala bolj ali manj odklanjajo od vertikalne smeri. V nezasičenem območju, zlasti če ima večjo debelino, ima onesnaževalo pri ploskovnih virih tok podoben drevesu. Posamezne manjše poti se združujejo v večje, nekatere pa so samostojne.

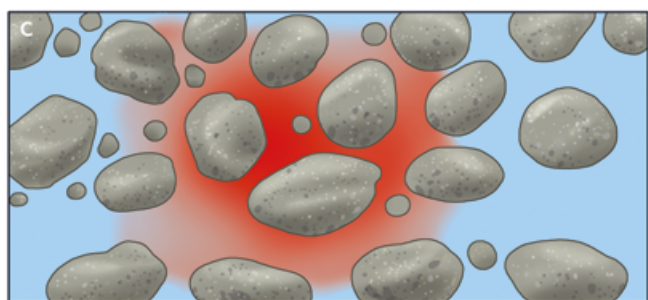
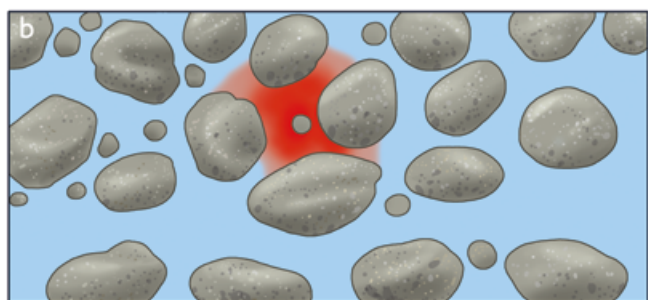
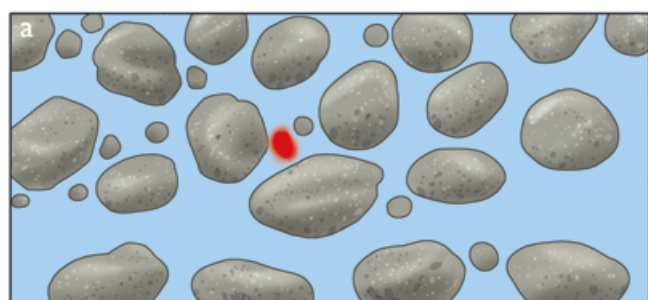
Pri vertikalnem toku v nezasičenem območju onesnaževalo najprej doseže območje kapilarnega dviga, ki vpliva na to, kako vstopi v zasičeno območje. V zasičenem območju se smer toka onesnaževala spremeni, saj ima podzemna voda drugačno smer toka. Poenostavljeno in figurativno rečeno, v podzemni vodi onesnaževalo teče v horizontalni



Slika 5: Posplošeni prikaz širjenja onesnaževal v osnovnem hidrogeološkem profilu.



Slika 6: Prikaz procesa difuzije.



Slika 7: Širjenje onesnaževala s procesom difuzije v porah znotraj vodonosnika.

smeri. Če je bil tok onesnaževala v nezasičenem območju bolj ali manj koncentriran, se v zasičenem območju onesnaževalo prične razprševati. Nastane oblak onesnaževala (ang. contaminant plume), ki ima tridimenzionalno obliko, razteza se v vseh treh smereh prostora znotraj vodonosnika.

Širjenje onesnaževala v vodonosniku moramo obravnavati v dveh merilih, v mikromerilu na ravni posameznih por in v makromerilu na ravni celotnega vodonosnika. Najprej si oglejmo procese na mikroravni. Vsak izmed nas je že kdaj v stoječo vodo kanil barvilo, na primer črnilo ali obarvan tuš, tako kot prikazuje slika 6.

Preden kapljico barvila kanemo v vodo, je voda čista in neobarvana. Ob stiku kapljice barvila z vodo se ta zaradi padca v vodo nekoliko potopi, hkrati pa se že prične razprševati. Če opazovanje izvajamo dovolj dolgo, se bo voda v kozarcu v celoti enakomerno obarvala. Po tem času med posameznimi območji v kozarcu ne bomo več opazili nobenih razlik v barvi. Tako voda kot barvilo sta sestavljena iz nepreštevne števila molekul, ki se neenakomerno gibljejo sem in tja ter pri tem trkaajo druga ob drugo. To povzroči, da se barvilo s časom enakomerno porazdeli po celotnem kozarcu. Temu procesu pravimo difuzija. Hitrost širjenja barvila, pri čemer gre za model širjenja onesnaževala, je odvisna od temperature vode in vrste snovi. V splošnem velja, da se manjše molekule širijo počasneje kot velike. Način širjenja snovi z difuzijo opisujeta Fickova fizikalna zakona, ki določata odvisnost difuzije od razlik v koncentraciji in spremembo koncentracije, ki zaradi difuzije poteka v odvisnosti od časa, naravo difuzije pa opredeljuje difuzijski koeficient.

Če proces difuzije poteka v čaši vode, bo potekal tudi v vodonosniku. Na podoben način, kot smo kanili barvilo v kozarec vode, ga sedaj kanimo v poljubno točko v eni od por vodonosnika. V povečanem merilu (slika 7) si oglejmo, kako ta proces poteka v porah v sedimentu. Za začetek predpostavimo, da voda med porami stoji. V kozarcu je bilo barvilo brez ovir, neovirano in prosto se je razširilo po celotnem volumnu vode. V vodonosniku pa mora onesnaževalo premagati ovire, ki mu jih na poti postavljajo posamezna zrna sedimenta.



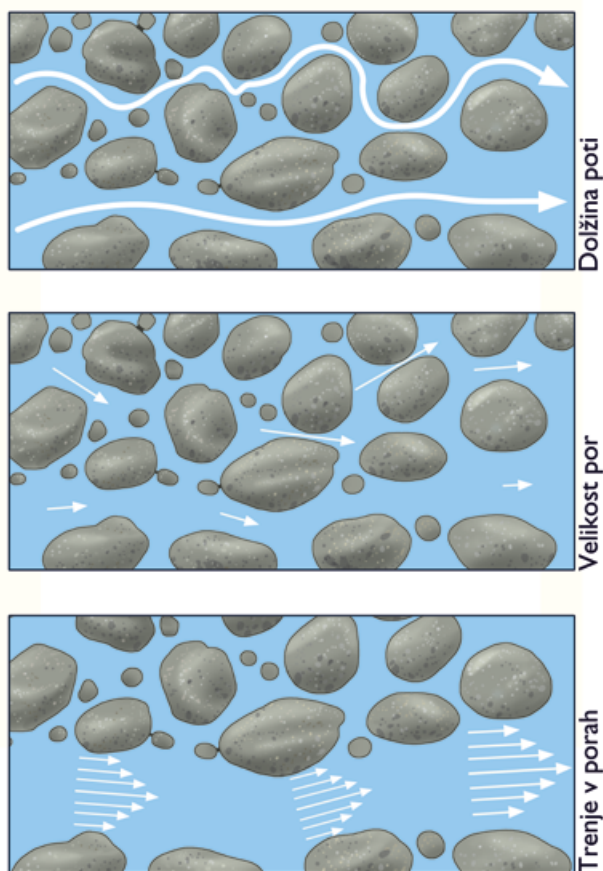
Onesnaževalo mora okoli posameznih zrn, zaradi česar ima mnogo daljšo pot kot v kozarcu. V primerjavi z njim je prostorsko raztezanje vodonosnika neskončno, širjenje onesnaževala pa v nobeni smeri ni omejeno z mejami. Barvilo, ki ponazarja naše onesnaževalo, se bo razširilo v vse smeri. Ker pa širjenje v nobeni smeri ni omejeno, se bo hkrati s širjenjem koncentracija onesnaževala zmanjševala. V idealnem primeru bo prišlo do popolnega razredčenja. Zaradi opisanih procesov se difuzijski koeficient v sedimentu in kamninah razlikuje od difuzijskega koeficienta v prosti tekočini.

Pri zgornjem opisu (slika 7) smo predpostavili, da voda med porami stoji, vendar je to pojav, ki je v pravih naravnih vodonosnikih prej izjema kot pravilo. V vodonosnikih podzemna voda teče. Način in narava tega toka pomembno vplivata na to, kako

se bo onesnaževalo razširilo. Od česa je to širjenje odvisno, si najprej oglejmo na ravni por. Pore med zrni sedimenta si ponovno povečajmo in si procese oglejmo nekoliko поближе (slika 8). Pore se med seboj zelo razlikujejo, ker so nepravilnih oblik. Nekatere so ozke, nekatere široke, zopet druge razpotegnjene in tretje razmeroma široko odprte. Zaradi tega je raznolika tudi pot vode. V nekaterih primerih voda teče skorajda naravnost, v drugih primerih je njena pot skozi pore vijugava in nepravilna. Pot vode opišemo z vijugavostjo ali turtoznostjo, v prvem prej opisanem primeru je vijugavost manjša kot v drugem. Ker je prečni presek por zelo različen, to vpliva na hitrost toka vode; tam, kjer je pora ozka, bo voda tekla razmeroma hitro, pri široki pori pa bo hitrost vode počasnejša. Tok znotraj posameznih por poteka pri zelo različnih hitrostih. Dodatno pestrost porazdelitve hitrosti vode povzroča tudi porazdelitev toka prečno na smer toka vode v posamezni pori. To je učinek, podoben tistemu, ki ga opazujemo v ceveh in koritih rek ali potokov na površini. Na sredini je hitrost najvišja, proti stenam pore pa se zaradi trenja zmanjšuje in je ob steni pore enaka nič.

Vsi trije procesi, ki smo jih pravkar opisali - razlika v dolžini poti, razlika v velikosti por ter prisotnost trenja med vodo in stenami por (slika 8), močno vplivajo na to, kako se bo onesnaževalo porazdelilo v vodonosniku ter kako se bo oblikoval oblak onesnaženja. Vsi našeti procesi, vezani na tok podzemne vode, v porah povzročajo mehansko disperzijo ali mehansko razpršitev. Opišemo jih s fizikalnim parametrom, ki ga imenujemo disperzivnost.

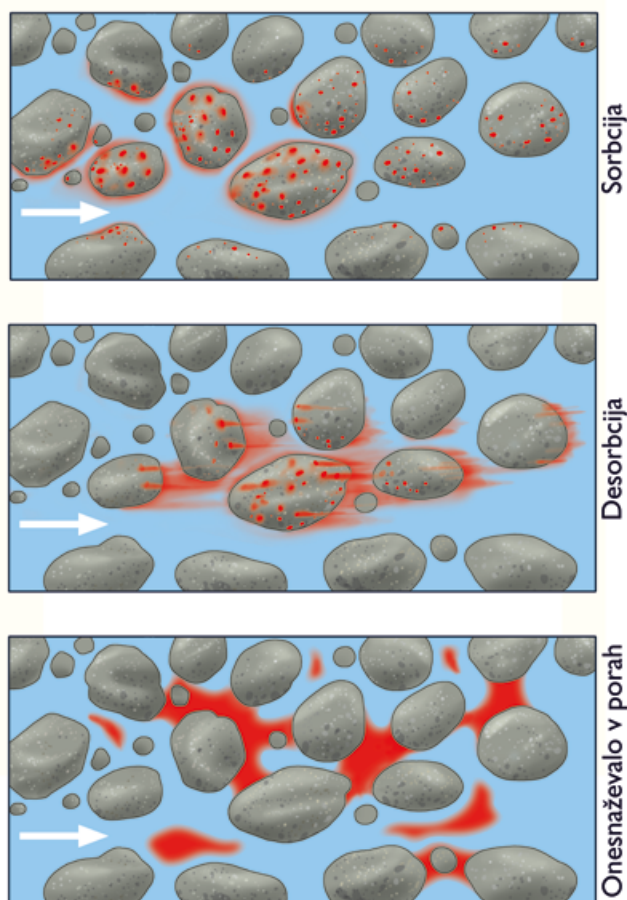
Do sedaj smo spoznali difuzijo in mehansko disperzijo; če oba procesa združimo, dobimo proces, ki ga imenujemo hidrodinamska disperzija ali hidrodinamska razpršitev. Tudi hidrodinamsko disperzijo opisujemo s koeficienti, ki jih imenujemo koeficienti hidrodinamske disperzije. Praviloma poznamo tri koeficiente, vsak od njih opisuje širjenje onesnaževala v eni od smeri prostora. Tako poznamo vzdolžni ali longitudinalni koeficient disperzije, prečni ali transversalni koeficient disperzije ter vertikalni koeficient disperzije. Od teh koeficientov je odvisno, ali bo oblak onesnaženja bolj ali manj razpršen, pa tudi koliko časa in na kakšen način bo onesnaževalo potovalo skozi vodonosnik.



Slika 8: Prikaz različnih poti podzemne vode in različnih hitrosti znotraj por v sedimentu.

Pri opisovanju razpršitve onesnaževal v vodonosniku ne smemo pozabiti še na en, prav tako pomemben proces. Spomnimo se na reko, ki na površini s seboj nosi leseno deblo, ali kako, ne le na površini, reka s seboj nosi plavlje. Takšnemu transportu, ko voda deluje le kot transportni medij, ko snov ali maso prenaša s točke na točko, pravimo advekcija ali prenos. Tako kot za površinsko vodo ta zakonitost velja tudi za podzemno vodo. In ponovno smo na točki, ko moramo opisane procese med seboj združiti. Tako pri prenosu onesnaževal skozi vodonosnike govorimo o advekcijsko-disperzijskih procesih.

Procesi transporta in širjenja onesnaževal skozi vodonosnike so zelo kompleksni, zato si moramo na kratko ogledati še vsaj procese sorpcije. Najbolje si jih predstavljamo, če se spomnimo na aktivno oglje, ki ga pogosto uporabljamo za čiščenje, pa tudi takrat, ko smo pojedli kaj pokvarjenega.

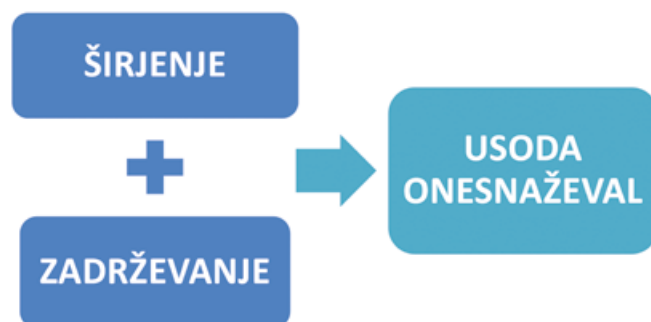


Slika 9: Sorpcijski procesi v porah vodonosnika.

Oglje nase veže ali sorbira te snovi in jim prepreči nadaljnjo pot. Podobno je tudi z minerali, ki tvorijo sedimente ali kamnine v vodonosnikih.

Ponovno si oglejmo povečan presek skozi pore (slika 9). Onesnaževalo, ki pride v stik z zrnji, se lahko nanje sorbira. Na zrnih lahko tvori zelo tanek film, v tem primeru govorimo o adsorpciji. Če se sorbira v notranjosti, pa govorimo o absorpciji. Poleg teh dveh poznamo še nekatere druge sorpcijske procese. Sorpcija je skupen izraz za adsorpcijo, absorpcijo, kemisorpcijo in ionsko izmenjavo. Nekateri izmed teh procesov zajemajo celo družino različnih, spet drugi lahko potekajo v več stopnjah. Tako kot se onesnaževalo sorbira, se lahko v določenih pogojih tudi sprosti ali desorbira. Zaradi tega se dogaja, da se ob nekaterih spremembah razmer v vodonosniku onesnaževalo, ki je bilo pred tem imobilizirano, ponovno sprosti. Ob procesih sorpcije in desorpcije se moramo zavedati, da se onesnaževalo včasih med porami »zatakne«; to je posledica oblike por in je odvisno tudi od vrste onesnaževala. Tako imobilizirana onesnaževala se nato počasi sproščajo in premikajo v mobilnejše dele por. Onesnaževala lahko tudi razpadejo ali degradirajo. Ta proces je radioaktivni ali biološki ter lahko poteka v več stopnjah, kjer iz prvotnih starševskih molekul nastane eden ali več hčerinskih produktov.

Mehanizmi usode onesnaževal se med seboj razlikujejo, pri tem pa je pomembno upoštevanje dejstva, da vsi procesi ne delujejo enako pri vseh onesnaževalih in v vseh okoljih (na primer v različnih vrstah vodonosnikov se usoda onesnaževal razlikuje).



Slika 10: Shematski prikaz glavnih skupin procesov, ki vplivajo na usodo onesnaževal.



Slika 11: Shematski prikaz procesov, ki vplivajo na usodo onesnaževal.

je), prav tako pa niso vsi medsebojno primerljivi, temveč nekateri delujejo počasneje, drugi hitreje. Zaradi vseh teh značilnosti pogosto izberemo le manjši nabor mehanizmov, ki jih obravnavamo s praktičnega vidika, preostale pa zanemarimo, ker na usodo onesnaževal nimajo pomembnejšega vpliva (slika 10 in 11).

Vse zgoraj opisane procese lahko opišemo z bolj ali manj zapletenimi matematičnimi modeli, ki jih praviloma obravnavamo s pomočjo specializiranih računalniških programov. Rezultate takšnega modeliranja za področje Ljubljanskega polja bomo predstavili v nadaljevanju. Zainteresirani bralec, ki bi se želel seznaniti s teoretičnimi osnovami teh modelov, podrobnosti najde v specializirani literaturi.

## 2.4 Kroženje onesnaževal

Sedaj ko smo se seznanili s transportom onesnaževal na mikroravni, si oglejmo širjenje onesnaževal na makroravni, to je v celotnem vodonosniku.

Kroženje snovi v naravi pogosto opisujemo s konceptom kroga. Lep primer takšnega koncepta je vodni krog ali vodni cikel. Na podoben način opisujemo kroženje onesnaževal v vodonosnikih, pa tudi v povezavi z drugimi deli vodnega kroga in z rabo vode za različne namene. Na viru onesnaženja, na primer na območju divjega odlagališča odpadkov, se onesnaževala sprostijo, nato potujejo skozi nezasičeno območje, kjer kmalu dosežejo zasičeno območje. Od tod odpotujejo s tokom podzemne vode. Če je v nizvodni smeri črpaljšče pitne vode, bo vodnjak to onesnaženo vodo zajel in transportiral do končnega uporabnika, ki jo bo zaužil (slika 12). To onesnaževalo lahko vpliva na zdravje človeka, v večji ali manjši meri pa ga ta izloči. Preide v odpadne vode, te pa v bolj ali manj spremenjeni obliki ponovno v vodno okolje - in krog



Slika 12: Krog onesnaževala v vodonosniku in pri rabi vode.



je sklenjen. Seveda v sodobnih sistemih oskrbe s pitno vodo ter pri ravnanju z odpadnimi vodami, s katerimi imamo opraviti v Sloveniji, skrbimo za to, da do uporabnika prihaja zdrava pitna voda, vodo pa očiščeno vračamo v okolje. Ne glede na to je tak opis kroga onesnaževala pomemben za razumevanje procesov onesnaževanja.

Koncept kroženja onesnaževal v vodonosnikih lahko opišemo še nekoliko drugače, kar je zelo pomembno pri obravnavanju pojavljanja onesnaževal in sanacije ter upravljanja s tem povezanih problemov. Odlagališče odpadkov je vir onesnaženja (slika 12), ki ima določene značilnosti ali inventar. Onesnaževalo skozi vodonosnik teče po poti; v našem primeru skozi nezasičeno in zasičeno območje. Zaradi svojega gibanja onesnaževalo prispe v točko, ki ji pravimo cilj. V našem primeru je cilj vodnjak ali končni uporabnik načrpane vode. Pri strokovni obravnavi onesnaževal opazujemo procese v viru, na poti in na cilju. Pogosto govorimo tudi o VCP modelu (slika 13) obravnave onesnaževal - vir - cilj - pot (ang. model SPT; source - path - target). Glavna značilnost tovrstne obravnave je, da nam omogoča praktičen pristop k preučevanju posameznih primerov transporta onesnaževal v okolju, ki jih lahko z lastnim izborom omejimo na ciljna območja. Če nas torej zanima le, od kod in kako lahko onesnaževala potujejo do vodnjaka, si bomo v okviru obravnave s konceptom vir - pot - cilj za cilj izbrali naš vodnjak, za vir napajalno območje, za pot pa podzemno vodo v vodonosniku od napajalnega območja do vodnjaka.

Pri viru onesnaževal prihaja do vnosa onesnaževala v okolje. Pri obravnavanju usode onesnaževala v vodnem okolju je pomembna določitev vira, kar je v veliki meri odvisno od tega, kje pričnemo onesnaževalo opazovati. Zato vire včasih delimo na primarne in sekundarne. Kot primarne vire najpogosteje opredeljujemo tiste, kjer onesnaževalo nastane, na primer proizvodnja v kemijski tovarni. Sekundarni viri pa so lahko že del poti, po kateri



Slika 13: Model kroženja onesnaževal vir - cilj - pot - VPC.

onesnaževalo potuje. Za obravnavo onesnaževal v vodnem okolju pogosto ni pomembno, ali je onesnaževalo že pred tem prepotovalo del območja.

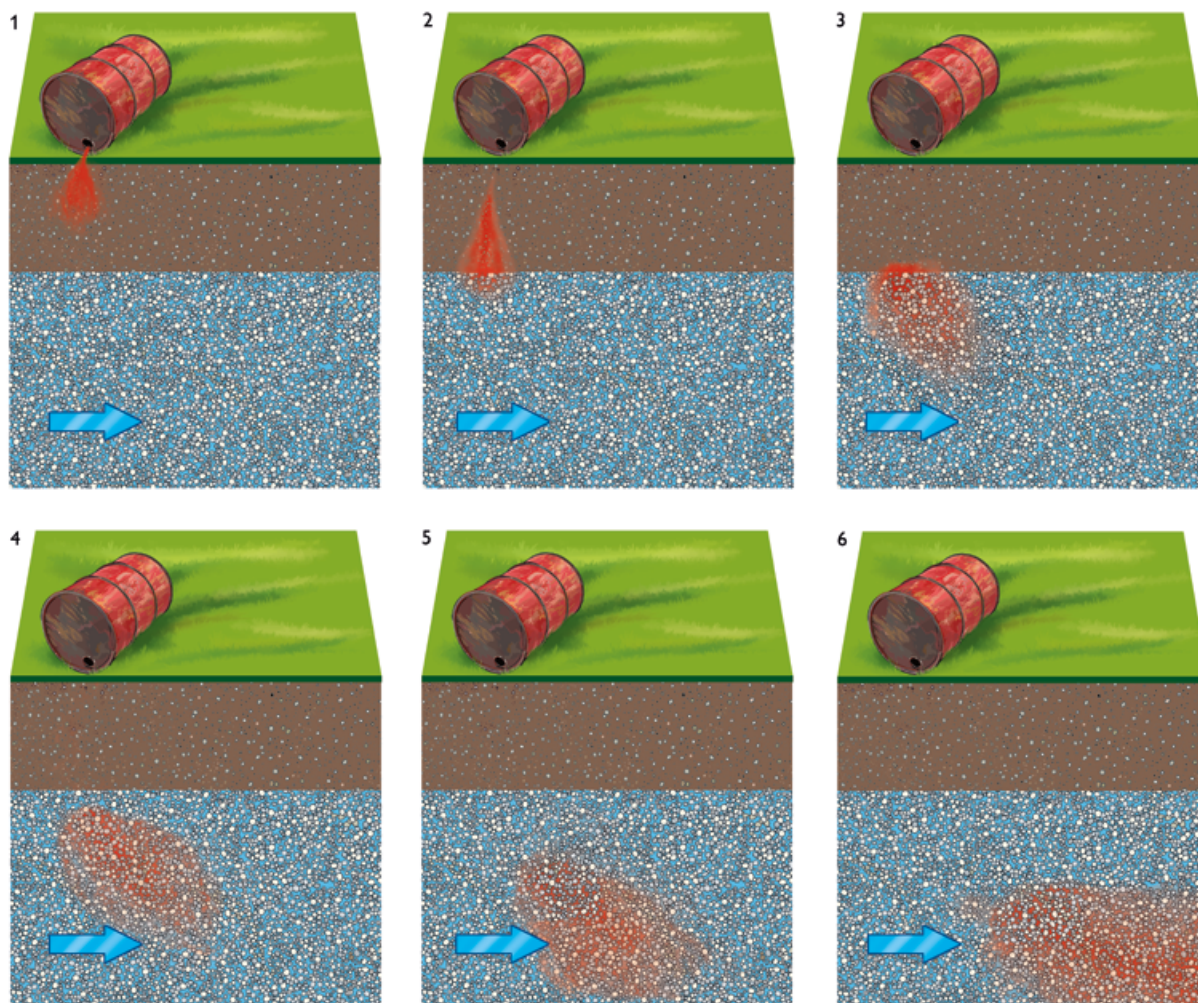
Če opazujemo pot zdravilne učinkovine, lahko z opazovanjem začnemo že pri njeni izdelavi v obratu, sledi njen transport do prodajnih mest in bolnikov, nato zaužitje s strani človeka ali živali ter po presnovi njeno izločanje iz telesa. Zdravilna učinkovina vstopi v kanalizacijski sistem in nato po kanalizacijskem omrežju teče do čistilne naprave. Če se v sistemu čistilne naprave ne razgradi s pomočjo prečiščene odpadne vode, odteče v naravno okolje. Če je iztok izveden v vodotok, nadaljuje pot s površinsko vodo, če pa je izveden s ponikanjem, vstopa pod površje in, če gre za vodonosno območje, v podzemno vodo v vodonosniku. Za kanalizacijsko omrežje je značilno, da zaradi poškodb, ki so posledica lomov ali razgradnje materialov cevi, pušča, tako da lahko zdravilna učinkovina iz še neprečiščene odpadne vode vstopa v naravno okolje že pred čistilno napravo (slika 14).

Pri obravnavanju novodobnih onesnaževal kot vire najpogosteje obravnavamo naslednje sisteme:

- kanalizacijsko omrežje,
- greznice,
- iztoki iz čistilnih naprav,
- površinske vode, ki so v povezavi s sistemom podzemne vode.



Slika 14: Konceptualni model glede na naravo vira onesnaževal.



Slika 15: Širjenje onesnaževala s trenutnim sproščanjem.

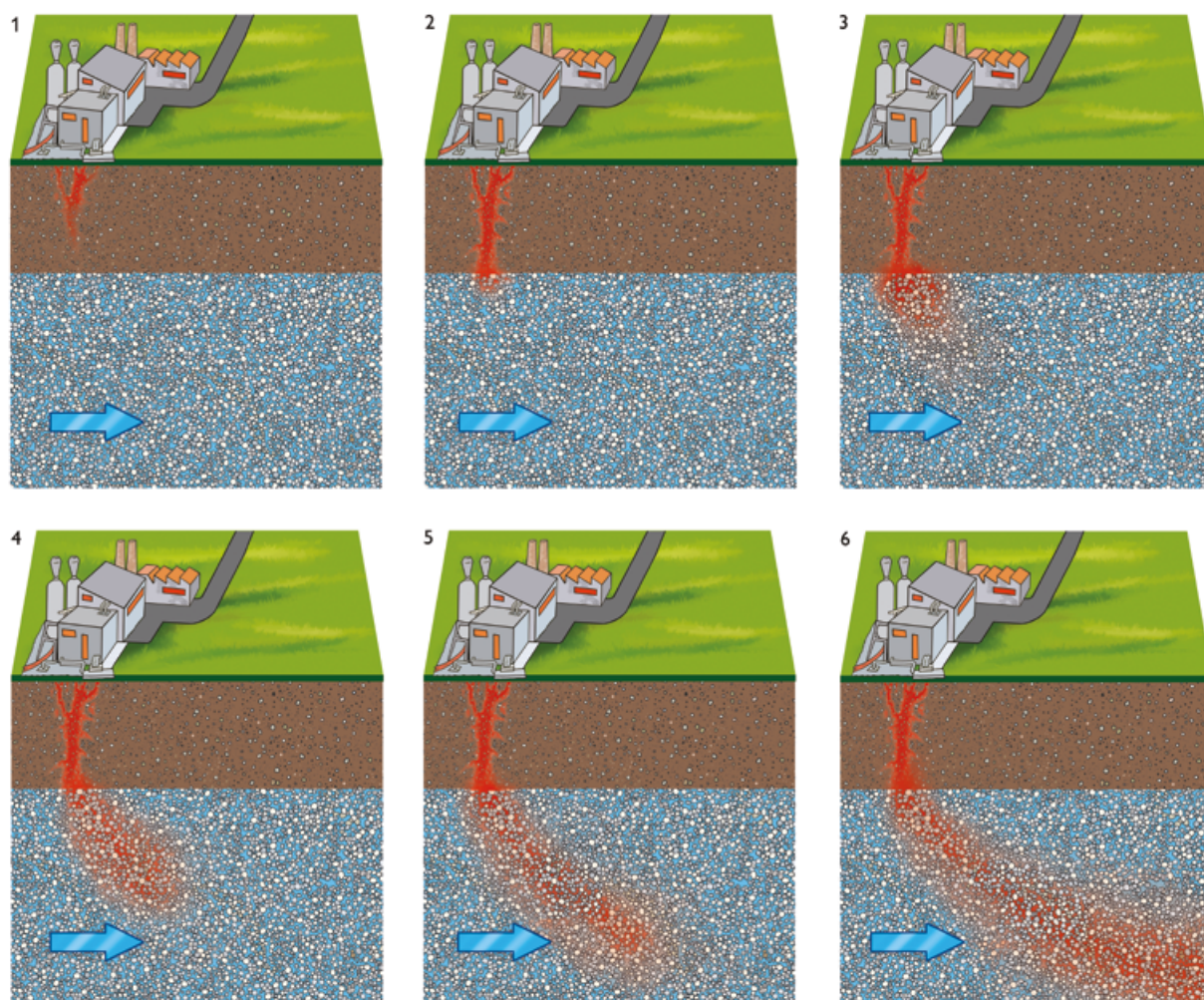
Pot onesnaževala lahko določimo le ob upoštevanju zakonitosti, ki veljajo za transport onesnaževal v površinski in podzemni vodi, ter mehanizmov in procesov, ki lahko nanj vplivajo. V vodonosnikih v grobem ločimo pot onesnaževala v nezasičenem območju od tiste v zasičenem. Takšna razdelitev toka se uporablja, ker se značilnosti toka v obeh območjih med seboj razlikujejo.

Katera lokacija v opazovani komponenti vodnega kroga bo cilj ali prejemnik, v katerem bomo analizirali onesnaževala, je odvisno od več dejavnikov. Prvi je zagotovo pomembnost lokacije, zato pogosto izbiramo prejemnike, kot so vodnjaki za oskrbo s pitno vodo ali drugo rabo podzemne vode. Pri tem lahko z izračuni analiziramo lokacije, ki

so šele predvidene za potencialno rabo, oziroma lokacije, v katerih je onesnaženje že bilo ugotovljeno. Drugi dejavnik izbire opazovalnega cilja je narava rezultatov meritev. Pri tem stremimo k temu, da razpolagamo z zanesljivimi in preverljivimi rezultati, ki so dostopni, zajemajo čim daljše obdobje meritev in so bili pridobljeni s čim višjo frekvenco vzorčenja. Še posebej pri novodobnih onesnaževalih je izpolnjevanje vseh naštetih kriterijev težavno.

Pri obravnavanju onesnaževal na mikroravni smo spoznali, da se onesnaževalo razprši. Kako pa je takšna razpršitev videti na ravni celotnega vodonosnika? Pot onesnaževala in oblika njegovega oblaka sta v veliki meri odvisni od načina sprostitve





Slika 16: Širjenje onesnaženja s trajnim sproščanjem.

onesnaževala. To je odvisno od tega, ali imamo opraviti s trenutno sprostitevjo ali trajnim, časovno neomejenim izpustom onesnaževala. Oba procesa si oglejmo nekoliko podrobneje.

Pri trenutnem razlitju se praviloma sprosti omejena količina onesnaževala (slika 15). Ta se najprej infiltrira skozi tla v nezasičeno območje in potuje navzdol proti gladini podzemne vode. Ko izteče vsa količina, se stik z virom postopoma prekine. Oblak onesnaženja je sprva ozek, vendar se med potjo nekoliko razširi, predvsem pa razpotegne. Ko doseže gladino podzemne vode, se smer širjenja zasuka od vertikalne proti smeri, vzporedni s tokom podzemne vode. Oblak onesnaženja je deloma v nezasičenem in deloma v zasičenem obmo-

čju, nato pa postopoma v celoti preide pod gladino podzemne vode. Od tod nadaljuje pot le še skozi zasičeno območje vodonosnika, pri čemer prihaja do razprševanja v vseh treh smereh prostora. Daljša kot je njegova pot skozi vodonosnik, bolj razpršen je oblak, s tem pa so v njem koncentracije nižje, onesnaženje v oblaku se redči.

Drugače poteka transport takrat, ko imamo opraviti s stalnim virom onesnaževala (slika 16). Takšni viri so praviloma industrijski obrati, stara odlagališča odpadkov in druga zakrita bremena. Ko se onesnaževalo sprosti iz vira, začne napredovati vertikalno navzdol skozi nezasičeno območje. Postopoma se širi navzdol in oblikuje trajni steber onesnaževala. Sčasoma se vzpostavi stik med onesnaževalom v ne-

zasičenem in zasičenem območju. Tudi v zasičenem območju se začne onesnaževalo razširjati vzporedno s tokom podzemne vode. Oblak napreduje vzdolž toka, pri čemer se širi v vseh treh smereh prostora. Ker pa je prisoten stalni vir onesnaževanja, onesnaževalo torej iz vira izhaja neprekinjeno, se v vodonosniku vzpostavi trajen oblak, katerega fronta s časom napreduje. V jedru oblaka, praviloma na stiku nezasičenega in zasičenega območja, so koncentracije najvišje, nato pa se postopoma, vzdolž toka podzemne vode, zmanjšujejo. Pri onesnaženjih, ki trajajo zelo dolgo, se vzpostavijo stabilni oblaki onesnaženja, v katerih opazujemo posamezna območja koncentracij. V takšnem oblaku onesnaženja se neredko pojavijo geokemijska območja z različnimi lastnostmi (na primer kadar so vir onesnaženja odlagališča odpadkov).

Opazujemo pot onesnaževala od vira do prejemnika z upoštevanjem vseh možnih mehanizmov, ki na tej poti privedejo do širjenja in zadrževanja tega onesnaževala. Vzemimo eno izmed skupin novodobnih onesnaževal - izdelke za osebno nego.

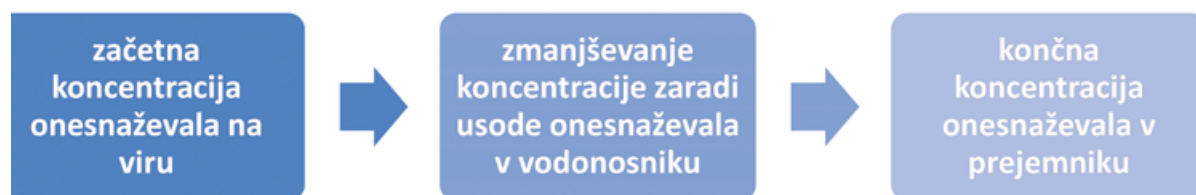
Vsakodnevna raba izdelkov za osebno nego, kot so higienski in kozmetični izdelki, s strani velikega dela populacije se odraža v njihovem pojavljanju v okolju, tudi v podzemni vodi. Izdelki za osebno nego tako v podzemno vodo vstopijo v določeni koncentraciji, ki jo poimenujemo začetna koncentracija. Ta koncentracija je na točki vstopa novodobnega onesnaževala v podzemno vodo najvišja.

Delci mase izdelkov za osebno nego se po vstopu v vodonosnik začnejo širiti primarno v smeri, določeni s tokom podzemne vode, zaradi mehanizma advekcije, delno pa se širijo tudi v druge smeri zaradi mehanizmov disperzije in difuzije. Če koncentracijo novodobnega onesnaževala opazujemo

vzdolž njegove glavne komponente poti v vodonosniku, ki se ujema s prevladujočo komponento gibanja podzemne vode, bomo opazili, da je njegova koncentracija vse nižja, kar je prvič posledica mehanizmov disperzijsko-difuzijskega transporta, drugič pa vseh zadrževalnih procesov, ki prispevajo k dodatnemu zniževanju koncentracije (slika 17).

Tudi če koncentracijo novodobnega onesnaževala opazujemo prečno na njegovo pot adveksijskega transporta, bomo opazili, da je ta vse nižja in stran od centralnega dela, kjer je glavnina mase. Če imamo opravka z novodobnimi onesnaževali, ki pod vplivom spremenjenih fizikalno-kemijskih pogojev razpadajo, bomo po določenem času zaznali le še hčerinske produkte razpada in ne več prvotnih, starševskih snovi. Iz opisanega je razvidno, da hitrost širjenja in končno koncentracijo na lokaciji prejemnika določajo odnosi med različnimi mehanizmi transporta, ki so lahko tudi dinamični in se s časom spreminjajo.

Bralec se je gotovo prepričal, da so procesi, ki vplivajo na usodo onesnaževal v vodonosnikih, zelo zapleteni. Zato smo še daleč od tega, da bi te procese v celoti razumeli; za nekatere bi lahko ugotovili, da je znanost šele na začetku njihovega spoznavanja in da nas v prihodnosti čaka še veliko dela. Po eni strani je to posledica kompleksnosti sveta pod našimi nogami, po drugi strani pa naše uporabe izredno velikega števila kemikalij, za katere ne vemo, kako se obnašajo pod površjem tal. Ne glede na to smo na prejšnjih straneh spoznali nekaj osnovnih značilnosti širjenja onesnaževal v podzemni vodi, ki nam bodo pomagale razumeti rezultate našega projekta. Z njim smo odškrnili vrata v poznavanje usode nekaterih novodobnih onesnaževal v podzemni vodi in vodnem krogu kot celoti.



Slika 17: Procesi širjenja onesnaževala v vodonosniku.

## 3 NOVODOBNA ONESNAŽEVALA

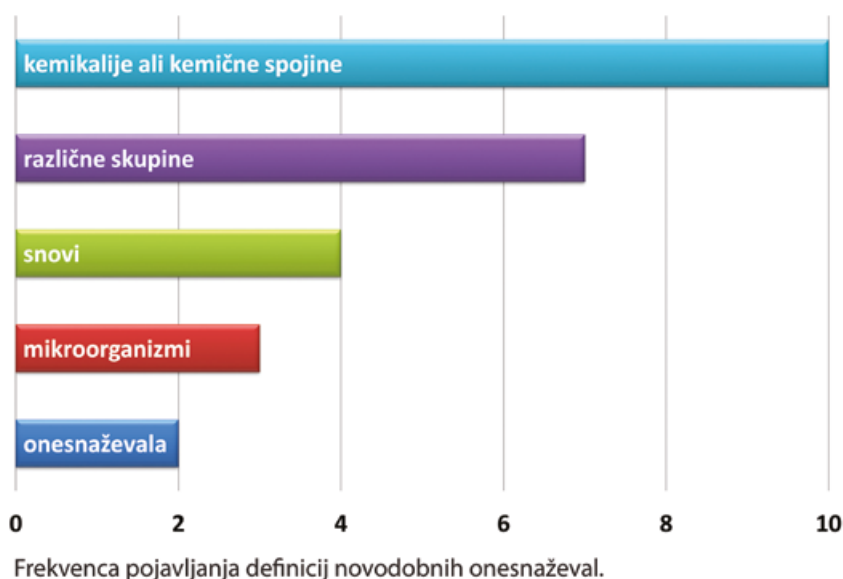
### 3.1 Izhodiščne definicije

Prisotnost onesnaževal v vodnem okolju sama po sebi pomeni izziv. Kako ustrezno opazovati in meriti njihove koncentracije in porazdelitev? In kako ravnati, da do onesnaževanja ne bo prihajalo, če pa do onesnaževanja že pride, kako očistiti in sanirati vodno telo? To najlažje storimo pri »klasičnih« onesnaževalih, ki jih že dolgo poznamo in so z dostopnimi kemijskimi analitskimi metodami razmeroma lahko merljiva. Ta onesnaževala so praviloma regulirana z zakonodajo, kar pomeni, da ta natančno določa, kako merimo koncentracije teh onesnaževal, posredno pa tudi, kako je treba ravnati v primeru, da so vrednosti koncentracij višje od vnaprej določenih mejnih vrednosti, ki jih določijo tako, da njihovo preseganje opredeljuje potencialne škodljive učinke. Mnogo večji izziv pomenijo onesnaževala, ki so v vodno okolje vstopila šele pred kratkim ali pa jih do sedaj zaradi omejitev kemijskih analitskih metod ni bilo mogoče meriti. Kako pristopati k onesnaževalom, s katerimi nimamo veliko izkušenj in ki niso regulirana v zakonodaji?

Takšnim onesnaževalom pravimo novodobna onesnaževala. To je nekoliko ponesrečen slovenski prevod za onesnaževala, ki jih angleška strokovna

in znanstvena literatura imenuje »emerging contaminants« ali »contaminants of emerging concern«. Hkrati je treba priznati, da je zaradi narave slovenskega jezika te termine težko smiselno in ekonomično prevesti. Pri tem je treba poudariti, da angleška literatura v nekaterih primerih razlikuje pomen teh dveh izrazov. Angleški izrazi nakazujejo, da gre za onesnaževala, ki se pojavljajo na novo, in onesnaževala, ki so bila že znana, a jim do sedaj niso posvečali ustrezne pozornosti. Čeprav se je termin novodobna onesnaževala že dodobra uveljavil, bi bilo pravilneje, če bi onesnaževala, opredeljena kot »emerging contaminants«, imenovali porajajoča se onesnaževala, onesnaževala, ki so v angleščini opredeljena kot »contaminants of emerging concern«, pa skrb vzbujajoča onesnaževala. V nadaljevanju besedila bomo ne glede na to, da bi potrebovali podrobnejše ločevanje, zaradi uveljavljenosti uporabljali predvsem izraz novodobna onesnaževala, kot sopomenko pa občasno termin porajajoča se onesnaževala.

Ker je pojem novodobnih ali porajajočih se onesnaževal tako pogosto in vsestransko uporabljen, je prav, da nekoliko podrobneje raziščemo, kakšen je njegov pomen, kako ga navaja literatura ter

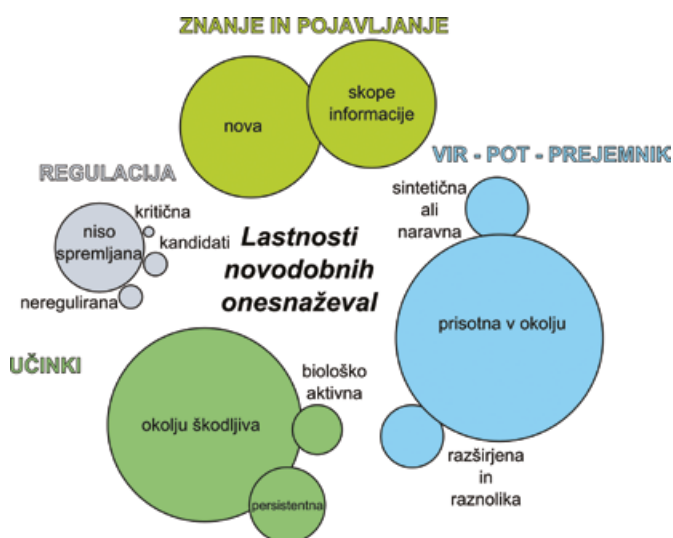


Slika 18: Prikaz pojavljanja definicijskih izhodišč pri obravnavanju novodobnih onesnaževal (vir: nacionalna poročila projektnih partnerjev).



kako ga uporabljamo v vsakdanji praksi. Splošno sprejete definicije novodobnih onesnaževal v literaturi ne bomo zasledili. Obstajajo številne definicije, kar nakazuje, da gre za aktivno znanstveno področje raziskav, ki je v marsičem še na začetku, prav tako pa dokazuje, da se za to vrsto onesnaževal zanima tudi širša izvenznanstvena skupnost. Definicije novodobnih onesnaževal bomo našli v znanstveni in strokovni literaturi, strokovnih poročilih ter na številnih spletnih straneh. Avtorji posameznih besedil ne tako redko oblikujejo lastno definicijo, odvisno od svojih potreb. Podrobna analiza definicij, ki jih uporabljajo v državah, ki so sodelovale v našem projektu, je prikazana na paličnem diagramu (slika 18). Ta diagram nam pomaga razumeti razmerja med glavnimi izhodišči za definicijo novodobnih onesnaževal.

Podrobna analiza širokega nabora definicij pokaže, da se pojem novodobnega onesnaževala ne nanaša le na eno skupino, temveč vključuje zelo veliko različnih skupin onesnaževal, ki najpogosteje vključujejo kemijske snovi, v nekaterih primerih pa tudi delce (na primer mikroplastiko) in celo mikroorganizme. V nekaterih primerih definicije ne obravnavajo le umetnih snovi, temveč tudi snovi, ki jih zasledimo v naravi.



Slika 19: Relacijski diagram, ki podaja razmerja med posameznimi pojmi, ki opredeljujejo novodobna onesnaževala.

Nekatere uveljavljene opredelitve novodobnih onesnaževal temeljijo prav na ločevanju med kontaminanti in polutanti ter jih opredeljujejo kot posebno skupino slednjih. Takšna je dvodelna definicija, ki je leta 2005 nastala v okviru evropskega projekta NORMAN<sup>1</sup> in so jo uporabljali tudi kasneje v številnih drugih opredelitvah:

- Porajajoče se snovi opredelimo kot snovi, ki so bile zaznane v okolju, vendar trenutno niso vključene v programe monitoringov na ravni Evropske unije, in katerih usoda, obnašanje in (eko)toksikološki učinki niso dobro znani.
- Porajajoča se onesnaževala (polutante) opredelimo kot onesnaževala (polutante), ki trenutno niso vključena v tekoče programe monitoringov na ravni Evropske unije in so potencialni kandidati za bodočo vključitev v zakonodajo; odvisno od rezultatov prihodnjih raziskav o njihovi (eko)toksikologiji in potencialnih zdravstvenih vplivih, njihovega javnega dojemanja ter pojavljanja v različnih delih okolja glede na rezultate monitoringa.

Definicija NORMAN je zelo široka in obsega širok razpon možnih interpretacij ter razumevanj novodobnih onesnaževal. Druge definicije pogosto vključujejo značilnosti njihovih virov, koncentracij, obnašanja in medsebojnega učinkovanja v okolju ter ne nazadnje stopnjo njihovega poznavanja. Pomemben vidik njihovega razumevanja je tudi okoljska zakonodaja ter zakonodaja, ki regulira ravnanje s kemikalijami. Kompleksnost razumevanja novodobnih onesnaževal prikazuje tudi relacijski diagram (slika 19), sestavljen na podlagi virov informacij, ki so jih za matične države posredovali partnerji projekta. Velikost posameznih krogov na diagramu je prikazana v odvisnosti od pojavljanja posameznih označevalcev.

V nadaljevanju si oglejmo posamezne vidike in značilnosti, ki izhajajo iz njihovih virov, koncentracij, obnašanja in interakcij, njihovega poznavanja in pojavljanja ter njihove regulacije v zakonodaji.

<sup>1</sup> Network of reference laboratories, research centres and related organisations for monitoring of emerging environmental substances.



Novodobna onesnaževala so praviloma antropogene izvora, zasledimo pa tudi naravne substance. Kot primer antropogenih substanc navedimo zdravilne učinkovine in pesticide, primer naravnih substanc pa so hormoni in mikroorganizmi. Viri novodobnih onesnaževal so lahko stalni ali spremenljivi, časovno odvisni ali neodvisni, predvsem pa gre za kompleksne vire, v katerih najdemo več vrst raznolikih onesnaževal. Po večini pojmovanj so viri vezani predvsem na industrijo in kmetijstvo.

Pomemben vidik razumevanja novodobnih onesnaževal je opredelitev koncentracij, pri katerih se pojavljajo v vodnem okolju. V različnih delih okolja se pojavljajo v zelo različnih koncentracijah, ki se med seboj razlikujejo tudi za nekaj velikostnih razredov. Tako bomo njihove razmeroma visoke koncentracije našli v odpadni vodi in iztokih iz čistilnih naprav, v površinskih vodah pa bodo koncentracije razmeroma nizke ali celo nezaznavne. Še večje razlike bomo zasledili v podzemni vodi, zlasti glede na globino njenega toka. To smo potrdili tudi z meritvami na Ljubljanskem polju, kjer se število in koncentracije onesnaževal močno zmanjšujejo od površinskih vod do globokih podzemnih vod.

Nekatera novodobna onesnaževala so prisotna globalno in jih najdemo skorajda povsod (na primer kofein in njegovi transformacijski produkti), medtem ko nekatera druga novodobna onesnaževala najdemo le v posameznih delih okolja. Vse to je odvisno od njihove mobilnosti in odpornosti. Hkrati pa nekatera novodobna onesnaževala prav zaradi teh lastnosti postajajo pomembna sledila antropogenih in urbanih vplivov. Tak primer je zdravilna učinkovina karbamazepin, ki je povezana s puščanjem kanalizacijskih sistemov.

Številne definicije novodobnih onesnaževal so povezane z njihovimi učinki; mnoga so bioaktivna in imajo različne vplive na organizme. Številne spojine so bioakumulativne, zaradi česar se njihovi vplivi na organizme s časom povečujejo. Če so to odporne - persistentne - spojine, lahko skozi vodno okolje potujejo na dolge razdalje, nekatere lahko v vodnem okolju celo krožijo in prehajajo skozi

različne komponente vodnega kroga. Za slednje je značilno, da se pod vplivom mikroorganizmov ne transformirajo. V nasprotju s tem imajo nekatere spojine številne transformacijske produkte, ki imajo nato drugačne transportne značilnosti.

Kakor izhaja iz NORMAN definicije ter drugih definicij, so novodobna onesnaževala v zakonodaji praviloma neopredeljena in neregulirana. Vendar ta ugotovitev ne drži v celoti. Nekatere vrste substanc, katerih lastnosti, učinki in škodljivost so dobro znani, zlasti tiste, za katere to velja že pri zelo nizkih koncentracijah, so z evropsko okoljsko in kemijsko zakonodajo že regulirane. Znana primera takšnih spojin sta atrazin in njegov metabolit desetilatrazin. Ker na tržišče vedno znova prihajajo nove substance, bo razumevanje njihovega obnašanja v okolju vedno v zaostanku za njihovo produkcijo in uporabo. Prav tako bo v zaostanku zakonodaja, ki regulira njihove različne vidike.

Pri obravnavanju novodobnih onesnaževal igra pomembno vlogo njihovo poznavanje. Z vsako spojino je od trenutka, ko je bila odkrita in sintetizirana, povezan spoznavni proces, pri katerem se korak za korakom izboljšuje vedenje o njenih značilnostih. Če je fizikalno-kemijske lastnosti substance mogoče razmeroma enostavno izmeriti, je spoznavanje njenih interakcij z okoljem in živimi bitji dolgotrajen proces, ki lahko realne lastnosti in odzive posreduje šele po zelo dolgem času. Prav zaradi tega se znanstveno razumevanje posameznih spojin s časom spreminja.

Iz dosedanje razprave lahko vidimo, da je pojmovanje novodobnih ali porajajočih se onesnaževal zelo kompleksno. Po eni strani je povezano z razumevanjem njihovih fizikalno-kemijskih lastnosti, po drugi strani pa je odvisno od njihovih (eko)toksikoloških in zdravstvenih učinkov; hkrati je njihovo pojavljanje vezano na socioekonomski razvoj družbe, saj se določene spojine uporabljajo le na določeni razvojni stopnji, tako znanosti kot industrije v najširšem pomenu besede. Tako bi lahko pojavljanje teh spojin v vodnem okolju opredelili tudi kot sociohidrološki pojav.

Na podlagi predstavljene analize smo oblikovali naslednjo (široko) definicijo novodobnih ali porajajočih se onesnaževal:

- Novodobna ali porajajoča se onesnaževala so skupina potencialnih onesnaževal, ki so bila na novo sintetizirana, identificirana, detektirana ali raziskana.

## 3.2 Skupine novodobnih onesnaževal

### 3.2.1 Izhodišča za klasifikacijo

Množica onesnaževal, ki se lahko pojavlja v vodnem okolju, pred nas postavlja številne izzive. Sodobne kemijske analize površinske in podzemne vode lahko podajo koncentracije zelo velikega števila spojin (analitov), do koncentracij katerih pa se moramo tako ali drugače opredeliti. Za začetek je to povezano s problemom, ki bi ga lahko ponazorili s slovenskim rekom, da »... zaradi dreves ne vidimo gozda«, ki nas na metaforični ravni

opozarja na to, da takrat, ko imamo pred seboj veliko množico različnih dejstev, iz njih ne znamo izluščiti bistva. Kako v zelo obsežni množici potencialnih onesnaževal vodnega okolja z zelo različnimi fizikalno-kemijskimi lastnostmi postaviti definicije in klasifikacije, ki nam bodo omogočale nadaljnje ravnanje, odločanje in ukrepanje?

Enotne in enoznačne razdelitve novodobnih onesnaževal v literaturi ne bomo zasledili. Klasifikacije so raznolike, tako kot pri drugih pestrih in širokih pojavih (slika 20). To je v veliki meri povezano prav z zelo široko opredelitvijo novodobnih onesnaževal, ki jih ni mogoče definirati zgolj na podlagi fizikalno-kemijskih lastnosti.

Zaradi pestrosti novodobnih onesnaževal lahko govorimo celo o klasifikaciji klasifikacij novodobnih onesnaževal, te pa lahko razdelimo v nadaljnje podskupine in razrede (slika 20). Novodobna onesnaževala razdelimo glede na njihove vire, kemijske značilnosti, učinke, količine ter druge lastnosti.



Slika 20: Prikaz uporabe različnih klasifikacij novodobnih onesnaževal.

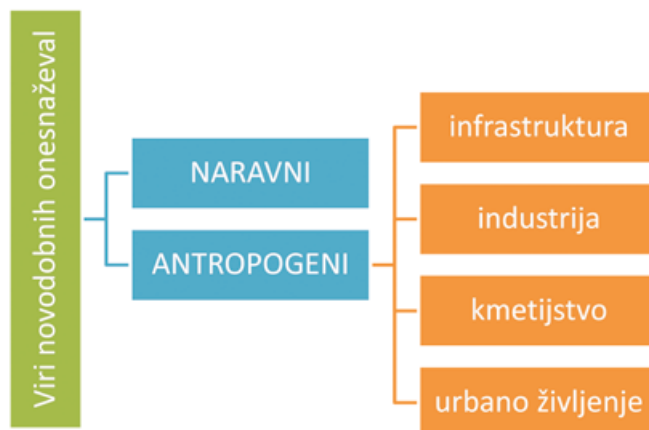
V značilnosti in naravo novodobnih onesnaževal dobimo zelo širok vpogled, če si ogledamo njihove vire, torej njihov izvor. Novodobna ali porajajoča se onesnaževala najpogosteje povezujemo s človekovimi aktivnostmi; njihovi viri so predvsem antropogene narave. Ne glede na to pa lahko ugotovimo, da nekatera novodobna onesnaževala ne nastajajo s človekovo dejavnostjo, čeprav so njena posledica. Primer takšnih novodobnih onesnaževal so različni transformacijski produkti izvornih spojin in njihovih metabolitov, oboji pa so odvisni od interakcij z okoljem, kar pomeni, da lahko drugačni hidrogeološki pogoji v podzemni vodi privedejo do drugačnih transformacijskih produktov.

### 3.2.2 Klasifikacija glede na izvor

Glede na uporabo in proizvodnjo se v znanstveni literaturi pojavljajo naslednje glavne skupine novodobnih onesnaževal: industrijske kemikalije, zdravilne učinkovine, sredstva za osebno nego, pesticidi in umetna sladila. Te skupine se delijo še na podskupine in razrede. Uporabljajo se pri vzdrževanju in obratovanju infrastrukture v najširšem pomenu besede, v urbanih okoljih in dejavnostih, kmetijstvu in pridelavi hrane ter nato ponovno v industriji (slika 21). Vendar pa veliko teh spojin ni vezanih le na eno samo uporabo, zato se lahko v vodnem okolju znajdejo posredno, prek različnih dejavnosti.

Glede na rabo in vire novodobnih onesnaževal so možne tudi drugačne opredelitve, vendar pa so prej našteje v literaturi najpogosteje zastopane. Kakor izhaja iz narave in opredelitve porajajočih se onesnaževal, bodo v prihodnje opredeljene dodatne in nove skupine. Tak primer so najnovejše raziskave vodnega okolja, ki se usmerjajo v analizo pojavljanja sredstev (spojin) za preprečevanje gorenja. Te spojine so za sedaj obravnavane le kot podskupina industrijskih kemikalij.

Industrijske kemikalije vključujejo: živo srebro, kromate, detergente, klorirana topila, plastifikatorje, dezinfekcijska sredstva, policiklične aromatske spojine, zaviralce korozije, dodatke gorivom, surfaktante sredstva za zmanjševanje površinske napetosti, perfluorirane kemikalije, zaviralce gorenja ter vmesne produkte pri sintezi



Slika 21: Shematski prikaz izvora novodobnih onesnaževal.

glavnih proizvodnih spojin v kemijski industriji. V to skupino lahko uvrstimo tudi nekatere lokalno pogojene industrijske kemikalije, odvisno od kemijske industrije, ki se pojavlja na določenem območju.

Pojavljanje zdravilnih učinkovin v vodnem okolju je vedno bolj pereča problematika, zavest o njihovi prisotnosti pa je razmeroma nova, saj se pojavljajo v zelo nizkih koncentracijah, ki jih še nedolgo tega kemijske analitske metode niso bile sposobne določiti. Med zdravilne učinkovine, ki se pojavljajo v vodnem okolju, sodijo tako humana kot veterinarska zdravila. Na slednje v vsakdanji praksi upravljanja in zaščite vodnih virov pogosto ne hote pozabljamo, v vodno okolje pa lahko pridejo preko gnojevke. Zdravilne učinkovine so velika in pestra skupina spojin, ki so v vodi dobro topne, vendar se zaradi narave uporabe pojavljajo v zelo nizkih koncentracijah. Razdelimo jih v naslednje podskupine: protimikrobne učinkovine (na primer antiseptiki, antibiotiki), analgetiki in nesteroidni antirevmatiki, sintezni in naravni hormoni, antihipertenzivi, kardiovaskularne učinkovine (diuretiki, angiotenzinski antagonisti, statini, beta blokatorji), zdravilne učinkovine za centralni živčni sistem (antidepresivi, stimulansi, antiepileptiki, močni analgetiki), učinkovine proti sladkorni bolezni, radiološka kontrastna sredstva in še mnoge druge. V to skupino lahko uvrstimo tudi pojavljanje nele-

galnih drog in drugih podobnih substanc (heroin, kokain, amfetamin, MDMA, kanabis).

Pogosto se ne zavedamo, koliko sredstev za osebno nego uporabljamo v vsakdanjem življenju (slika 22). Njihova uporaba je potencialni vir novodobnih onesnaževal. Ta sredstva vključujejo naslednje skupine: UV filtri - sredstva za sončenje, biocidi (na primer repelenti proti insektom, antimikrobne spojine), konzervansi (parabeni), dišave in različni detergenti. Pogosto jih skupaj z zdravilnimi učinkovinami obravnavamo kot posebno skupino novodobnih onesnaževal, ki jih označujemo z angleško kratico PPCPs (ang. Pharmaceuticals and Personal Care Products).

Tudi pesticidi so izredno obsežna skupina snovi, njihova raba pa se s časom zelo spreminja. Poleg kmetijske proizvodnje jih uporabljamo za številne druge namene. V nekaterih primerih jih dodajamo industrijskim proizvodom in proizvodom za široko proizvodnjo, zlasti tam, kjer je treba preprečevati prisotnost različnih mikroorganizmov in plesni. Pesticide smo pričeli intenzivno uporabljati

predvsem po drugi svetovni vojni. Z njihovo uporabo se je učinkovitost kmetijske pridelave močno izboljšala, tako da si danes brez njih množične in industrijske pridelave hrane ni mogoče več predstavljati. Pogosto govorimo kar o aplikacijah spojin v agrofarmaciji. Hkrati z njihovo naraščajočo uporabo pa smo pričeli zaznavati njihove škodljive posledice za okolje in zdravje ljudi. Zlasti od 60. let prejšnjega stoletja je zavest o njihovih škodljivih učinkih privedla do večje okoljske ozaveščenosti ter sistematičnega spremljanja njihovega pojavljanja v okolju, predvsem v različnih komponentah vodnega kroga. Med te spojine uvrščamo tako kemijske kot biološke substance, namenjene reguliranju in uničevanju škodljivcev. Razdelimo jih glede na škodljivca, ki ga želimo z njimi uničiti. Tako ločimo: akaricide, avicide, baktericide, nematocide, piskicide, predacide, fungicide, herbicide, insekticide, algicide, moluskcicide, miticide, rodenticide, slimicide ter druge. Zaradi široke rabe se nekateri pesticidi uvrščajo tudi v druge skupine, na primer v zdravilne učinkovine ali industrijske kemikalije. Kot vir zdravilnih učinkovin in drugih odpornih onesnaževal bi lahko navedli tudi uporabo aktivnega (sušenega) blata iz čistilnih naprav, ki ga uporabljamo za gnojenje njivskih površin.

Umetna sladila so nadomestila za sladkor v prehrani ljudi. Zelo redko vstopajo v metabolne procese in človeško telo jih izloča, ne da bi se njihova sestava spremenila; zaradi tega se znajdejo v odpadnih vodah, kjer pa jih obstoječe tehnologije čiščenja praviloma ne odstranijo. V humano prehrano so bile te snovi vključene šele pred kratkim, zato so podatki o njihovih zdravstvenih učinkih in vplivih na okolje slabo poznani. Dosedanje raziskave kažejo, da gre za zelo rezistentne snovi. V to skupino uvrščamo: saharin, ciklamat, acesulfam, aspartam, neotam, alitam, sukralozo in neohesperidin dihidrokalkon.

Zaradi pester verige uporabe novodobnih onesnaževal, od proizvodnje do končne uporabe, so zelo pogost vir, iz katerega se v okolje sprošča odpadna voda, sistemi za njen transport (kanalizacija in kanalizacijski sistemi) ter različne čistilne naprave. Odpadna voda ima zelo raznoliko sestavo, odvisno od tega, kakšne so dejavnosti v prostoru



Slika 22: Sredstva za osebno nego kot vir novodobnih onesnaževal.



in katere od njih so priključene na posamezne kanalizacijske sisteme. V odpadni vodi zasledimo novodobna onesnaževala zelo širokega spektra; od pesticidov in zdravilnih učinkovin do prepovedanih drog. V skladu z zakonodajnimi zahtevami ima večina industrijskih obratov samostojne industrijske čistilne naprave, ki so prilagojene na specifično odpadno vodo iz proizvodnje. Šele ko so doseženi ustrezni standardi čiščenja, se ta odpadna voda odvaja v javne kanalizacijske sisteme, v nekaterih primerih pa prečiščeno vodo izpuščajo neposredno v okolje. V javne kanalizacijske sisteme se odvaja odpadna voda iz gospodinjstev in nekaterih urbanih dejavnosti, del odpadnih vod pa pogosto izvira iz odtoka padavinskih voda iz urbanih površin, kot so ceste, urbane železnice in pokopališča.

### 3.2.3 Kemijska in fizikalno-kemijska klasifikacija

Novodobna onesnaževala so praviloma spojine, ki jih lahko razvrščamo v skladu z veljavnimi kemijskimi in fizikalno-kemijskimi klasifikacijami. Izjema od tega pristopa so mikroorganizmi, kadar jih uvrščamo med novodobna onesnaževala, ter trdne snovi, ki jih ne razvrščamo le po kemijskih lastnostih, temveč tudi po njihovih fizikalnih značilnostih. Tak primer je mikroplastika, katere pojavljanje in obnašanje v okolju je odvisno od velikosti in oblike delcev (na primer vlakna, zrna, lističi ...). Pri obravnavanju lastnosti in klasifikaciji novodobnih onesnaževal je še pomembno, ali se pojavljajo samostojno, kot monoonesnaževala, ali v skupini v obliki mešanic.

V primeru kemijskih klasifikacij novodobna onesnaževala ne tvorijo posebne specifične skupine, ki bi jo lahko razlikovali od drugih skupin, temveč se pojavljajo v vseh skupinah kemijskih spojin. Tako ločimo anorganska in organska novodobna onesnaževala, pri čemer slednja številčno močno prevladujejo. Pri organskih spojinah imamo opraviti z ogljikovodiki in spojinami, v katerih ogljik nastopa v kombinacijah z drugimi elementi (žveplo, dušik, klor, silicij, kovine ...).

Prav tako lahko novodobna onesnaževala opredelimo glede na njihove fizikalno-kemijske lastnosti, na primer glede na topnost v vodi, polarnost, re-

aktivnost, transportne značilnosti, kot so mobilnost, razgradnja in stabilnost, ter sorpcijo.

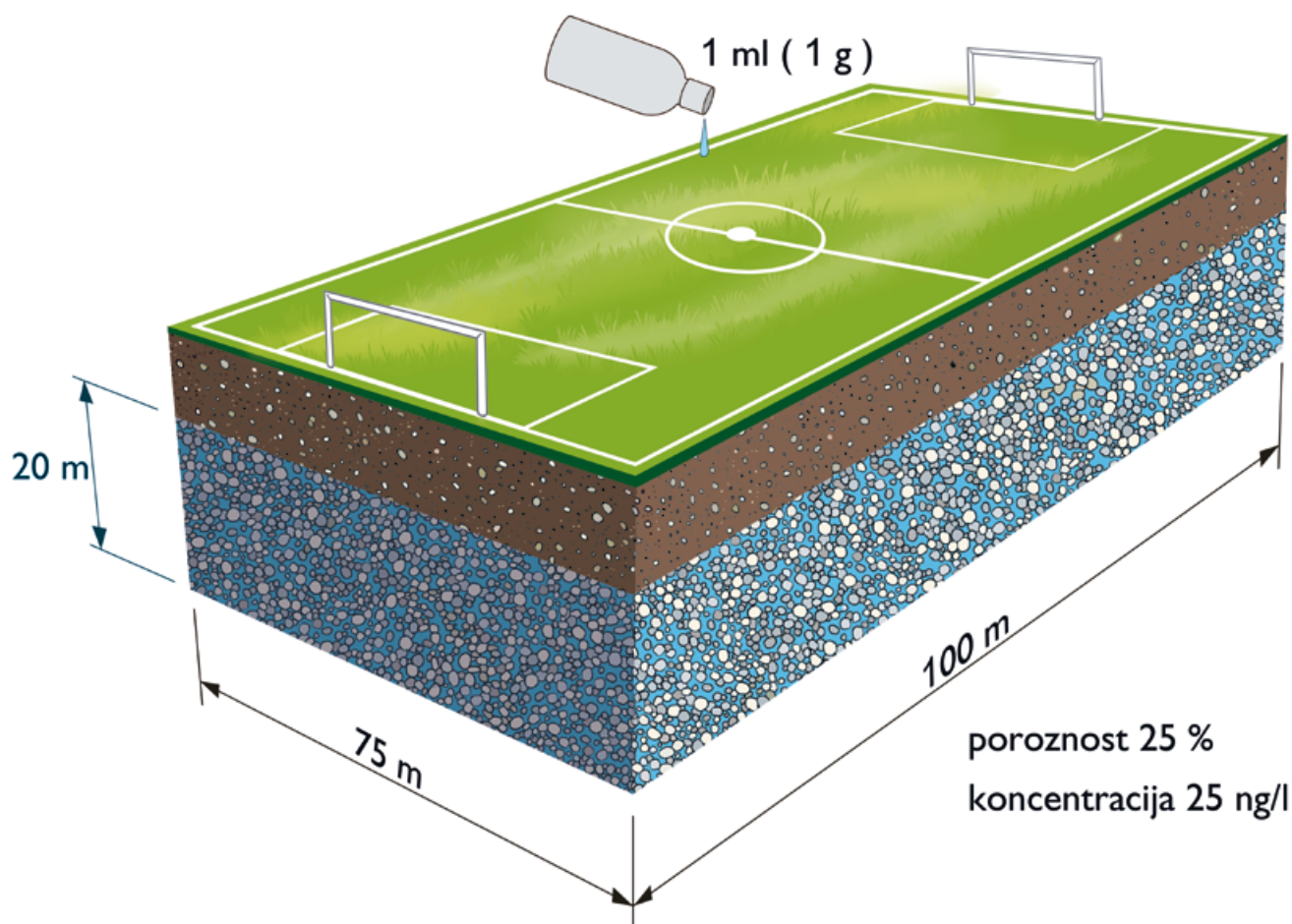
Iz tega sledi, da za razvrstitev novodobnih onesnaževal glede na njihove lastnosti uporabljamo obstoječe ter uveljavljene kemijske in fizikalno-kemijske klasifikacije, tako kot za druge snovi in spojine, ki niso uvrščene v skupino novodobnih onesnaževal. Odnos do novodobnih ali porajajočih se onesnaževal nam glede na obstoječe kemijske in fizikalno-kemijske značilnosti spojin in snovi ponovno dokazuje, da sta kategorija in obstoj novodobnih onesnaževal pogojena predvsem z njihovim socioekonomskim razumevanjem in glede na stanje razvoja družbe kot celote.

### 3.2.4 Klasifikacije na podlagi učinkov

Vplivi in posledice onesnaževal na okolje in v njem živeča bitja so lahko zelo raznovrstni. Opredeljujemo jih na zelo raznovrstne načine. Škodljive učinke bi lahko razdelili v naslednje skupine: ksenobiotiki, bioakumulativnost, biokoncentracija in ekotoksičnost. Kot ksenobiotike (ang. xenobiotics) opredelimo tiste snovi, ki se v naravnih pogojih ne pojavljajo v organizmih. Bioakumulativne so tiste snovi, ki se s prehrano in drugimi metabolnimi procesi nalagajo v tkivih živih organizmov. Kot snovi z biokoncentracijo (ang. biomagnification) opredelimo tiste, katerih koncentracija se s potjo skozi prehrano verigo povečuje. Slednje lahko povežemo z bioakumulacijo. Ekotoksičnost je dobro znan pojem, ki vključuje široke vplive snovi na ekološke funkcije živih organizmov.

H klasifikacijam novodobnih onesnaževal na podlagi učinkov lahko dodamo še posebno skupino. Zaradi zavedanja o nevarnosti kemikalij je v Evropski skupnosti v veljavi pravni dokument Uredba o registraciji, evalvaciji, avtorizaciji in omejevanju kemikalij, imenovana tudi s kratico REACH. Ta dokument uvaja pojem »veliko skrb vzbujajoče snovi«<sup>2</sup> (ang. SVHC - substances of very high concern). Te vrste snovi bi lahko opredelili kot posebno podskupino »skrb vzbujajočih onesnaževal« (ang. conta-

<sup>2</sup> Tudi pri tem pojmu ne bomo zasledili jasne in splošno dogovorjene opredelitve. V nekaterih primerih ta pojem prevajajo kot »sestavine, ki vzbujajo veliko zaskrbljenost«.



Slika 23: Shematski prikaz velikosti nanogramskih koncentracij.

minants of emerging concern). To so spojine, ki imajo znanstveno dokazane enega ali več od naslednjih učinkov: kancerogenost, mutagenost, vpliv na reprodukcijo, veliko odpornost in bioakumulativnost. Mednje lahko uvrstimo tudi druge spojine, za katere je znanstveno dokazana škodljivost za človekovo zdravje ali zdravje drugih organizmov.

### 3.2.5 Kvantitativne klasifikacije

Za novodobna onesnaževala je značilno, da se v vodnem okolju pojavljajo v nizkih koncentracijah. Razpon njihovih koncentracij je najpogostejše na intervalu od nekaj pg/l ( $10^{-12}$  g/l; p - piko) do  $\mu\text{g/l}$  ( $10^{-6}$  g/l;  $\mu$ - mikro). Te meje so občasno presežene. Sodobne analitske tehnike za nekatere spojine že omogočajo določitve do reda velikosti nekaj pg/l

( $10^{-12}$  g/l; p - piko), kar so izjemno nizke koncentracije. Ko gre za razmeroma visoka onesnaženja, lahko koncentracije posameznih spojin segajo tudi do velikostnega reda nekaj mg/L ( $10^{-3}$  g/l).

Zelo nizke koncentracije si je težko predstavljati, prav tako je njihovo razumevanje izredno pomembno pri odzivanju na prisotnost teh snovi v vodnem okolju. V ta namen smo izdelali shematsko ponazoritev (slika 23). Če kapljo novodobnega onesnaževala s prostornino 1 ml, kar ustreza teži 1 g, kanemo na površino, ki jo zavzema nogometno igrišče, pod katerim je odprt vodonosnik debeline 20 m in z učinkovito poroznostjo<sup>3</sup> 25 %, bo

<sup>3</sup> Učinkovita poroznost je parameter, ki pove, kakšen je delež med seboj povezanih praznin, po katerih lahko teče voda v kamnini ali sedimentu.

koncentracija 25 ng/l. Pri tem je treba poudariti, da vrednost koncentracije sama po sebi ne podaja lastnosti in ekotoksikoloških učinkov. Določena snov je lahko škodljiva in nevarna že v zelo nizkih koncentracijah, medtem ko druge nimajo posledic še pri višjih koncentracijah.

Zaradi njihovih razmeroma nizkih koncentracij jih pogosto opredeljujemo tudi kot mikrokontaminante ali mikroonesnaževala. Zasledimo tudi razdelitev na onesnaževala v sledovih (ang. trace) in onesnaževala v višjih koncentracijah (ang. non-trace). Ta delitev je bila praviloma opredeljena z mejno koncentracijo 1 µg/l, vendar sodobne analitske tehnike, ki omogočajo opredelitev zelo nizkih koncentracij, to mejo postavljajo pod vprašaj. S pojavom mikroplastike se postavlja tudi vprašanje opredelitve meje teh snovi. Praviloma velja, da so delci mikroplastike večji od 1 µm, kot nanoplastiko pa opredeljujemo delce, manjše od 1 µm. V nekaterih primerih so kot nanoplastika opredeljeni delci, manjši od 500 nm.

Tudi pri opredeljevanju koncentracij in velikosti delcev lahko vidimo, kako zmogljivost analitskih tehnik vpliva na razumevanje tega ter s kakšnim onesnaževalom imamo opraviti. Ker analitske tehnike niso omogočale določanja zelo nizkih koncentracij, smo še nedavno menili, da nekatera onesnaževala v okolju niso prisotna.

Za prikaz širjenja in pojavljanja onesnaževal včasih uporabljamo relativne koncentracije. Če na primer poznamo koncentracijo onesnaževala na viru, jo opredelimo kot začetno v nizvodni smeri, vzdolž toka, pa primerjamo z njo. Relativne koncentracije so opredeljene na intervalu od 0 do 1 in nam povedo, do kakšne spremembe koncentracije je prišlo glede na koncentracijo na viru. Uporaba relativnih koncentracij je smiselna zlasti takrat, ko so izmerjene koncentracije razmeroma nizke, in takrat, ko moramo med seboj primerjati pot različnih vrst onesnaževal.

### 3.2.6 Druge klasifikacije

V predhodnem besedilu smo že nakazali vso pestrost pojma novodobnih onesnaževal in različne možnosti njihovih klasifikacij. To nas napeljuje na

to, da obstajajo tudi druge vrste klasifikacij. Pregled literature pokaže, da preostale klasifikacije novodobnih onesnaževal v veliki meri temeljijo na kombinaciji prej omenjenih klasifikacij.

Naštejmo nekaj klasifikacij, pri katerih gre za kombinacijo prej naštetih:

- Organska onesnaževala v sledovih (ang. TorCS - trace organic contaminants) - to je klasifikacija, ki vključuje tako kvantitativne lastnosti, opredeljene s količino onesnaževala, kot vrsto onesnaževala (organska/neorganska onesnaževala).
- Antropogene snovi v sledovih (ang. ATC - anthropogenic trace compounds) - to je klasifikacija, ki vključuje tako kvantitativne lastnosti, opredeljene s količino onesnaževala, kot izvor onesnaževala.
- Persistentna organska onesnaževala (ang. POPs - persistent organic pollutants) - to je klasifikacija, ki vključuje tako vprašanje obstojnosti onesnaževal kot njihovo vrsto (organska/neorganska onesnaževala).

Pri klasifikaciji novodobnih onesnaževal lahko izhajamo tudi iz obsega znanja v najširšem pomenu, s katerim razpolagamo. Tako lahko novodobna onesnaževala delimo na tista, katerih raztopine lahko kvantificiramo, in tista, pri katerih tega še ne znamo. Podobno lahko onesnaževala razdelimo na tista, katerih učinke in posledice na žive organizme dobro poznamo, in tista, pri katerih teh učinkov ne poznamo. Slednjo skupino pa lahko razdelimo na onesnaževala, za katera sumimo, da imajo določene škodljive učinke, in tista, o katerih nimamo informacij o njihovih učinkih. Na razumevanje in klasifikacijo novodobnih onesnaževal pogosto vpliva tudi veljavna zakonodaja.

## 3.3 Mehanizmi sproščanja novodobnih onesnaževal

Glede na mehanizme sproščanja novodobnih onesnaževal v okolje so to lahko točkovni, ploskovni ali linijski viri, glede na časovno odvisno sproščanje v okolje pa trenutni ali stalni viri. V okolje sto-

pajo prek uporabe, iztokov, izcejanja (na primer iz transportnih cevovodov) ali kot emisije.

Novodobna onesnaževala se v vodnem okolju večinoma pojavljajo nenamenoma, kar je predvsem posledica nezmožnosti njihovega obvladovanja med rabo, zlasti ko ta onesnaževala vstopijo v odpadni krog (na primer odpadne vode, odlagališča odpadkov). V literaturi so zabeležena tudi namerna onesnaženja z novodobnimi onesnaževali, ki so povezana predvsem z neskrbnim ravnanjem tam, kjer so nevarnosti že prepoznane, ali z opuščanjem že vzpostavljenih varnostnih protokolov.

Ker so novodobna onesnaževala izredno velika skupina snovi z zelo različnimi lastnostmi, je v povezavi z njihovim obnašanjem in potmi v okolju še veliko neznank. Prav tako je še veliko neznanega pri gospodarjenju, ravnanju in upravljanju z njimi, kar prav tako vpliva na to, kako se ta onesnaževala sproščajo v vodno okolje.

V splošnem so mehanizmi sproščanja novodobnih onesnaževal primerljivi z usodo drugih onesnaževal v vodnem okolju. Mediji, ki novodobna onesnaževala prenašajo v vodno okolje, so zrak, voda (na primer površinska in podzemna voda) ter različni geološki mediji, kot so tla (prsti), sedimenti in kamnine. V posamezno komponento vodnega kroga

lahko vstopajo neposredno (na primer v podzemno ali površinsko vodo) ali posredno. Tako lahko daljši čas potujejo po zraku in se nato odložijo v vodno okolje. Na usodo novodobnih onesnaževal v vodnem okolju vplivajo pogoji v okolju in fizikalno-kemijske lastnosti onesnaževal. Pri slednjih lahko poleg koncentracij opredelimo njihovo stabilnost ter stopnjo hidrofobnosti, reaktivnosti in hlapnosti. Tako kot pri naravnem in nevplivanem vodnem krogu opazujemo vzajemnost in medsebojno povezanost posameznih komponent, je mogoče vzajemnost in povezanost opazovati tudi pri usodi onesnaževal. Obnašanje onesnaževala v eni od komponent vodnega kroga vpliva na obnašanje v drugi komponenti (slika 24). Pri tem opazujemo različne sinergijske učinke v najširšem pomenu, ki pa so praviloma negativni in dolgoročno škodljivi.

### 3.4 Zakonodaja in politike

Pomemben vidik razumevanja novodobnih onesnaževal je tudi zakonodaja. Pri tem se znajdemo v na videz paradoksalnem položaju, saj nekatere definicije te vrste onesnaževal opredeljujejo kot neregulirane, torej izven določb zakonodaje. Vendar si tako ozkega gledanja na novodobna onesnaževala ne moremo privoščiti, saj bi se na ta način cela vrsta onesnaževal znašla v sivem polju, zaradi česar jih ne bi ustrezno obravnavali.

Zakonodajno sivo polje lahko opredelimo za tista onesnaževala, ki so v zakonodaji tako ali drugače že regulirana, vendar njihova regulacija še ni dokončna; zanje lahko pričakujemo, da se bodo regulativna pravila v prihodnosti še spremenila. Te spremembe so lahko vezane na zaostrovanje ravnanja z njimi (na primer spreminjanje dopustnih mej koncentracij), v skrajnem primeru pa tudi prepoved njihove uporabe. Tak primer je prepoved uporabe nekaterih pesticidov, ki so jih sprva pogosto uporabljali, nato pa so se pravila za ravnanje z njimi postopoma zaostrovala, vse do njihove dokončne prepovedi (na primer DDT, atrazin). Zaradi tega v podzemnih vodah na območju Ljubljanske kotline ponekod še vedno merimo manjše koncentracije atrazina.



Slika 24: Prikaz povezanosti kroženja novodobnih onesnaževal v vodnem okolju.



Čeprav bi pričakovali, da je vprašanje novodobnih onesnaževal v vodnem okolju regulirano le v okoljski zakonodaji, je treba upoštevati tudi zakonodajo, ki regulira proizvodnjo, uporabo in varnost kemikalij ter drugih snovi, ki jih proizvaja industrija in druge človekove dejavnosti. Ugotovimo lahko, da gre za kompleksen sistem zakonodaje, ki se dopolnjuje in nadgrajuje, hkrati pa velikokrat odpira vprašanja, ki jih je zgolj z zakonodajo težko razrešiti, ker je prav pri obravnavanju novodobnih onesnaževal veliko negotovosti. Države članice Evropske unije imajo na tem področju primerljivo zakonodajo, saj izhajajo iz enakih direktiv, ki jih sprejema evropski parlament, in usmeritev, ki jih podaja Evropska komisija. V okviru evropske zakonodaje ločimo direktive, ki so za članice zavezujoče in jih morajo prevzeti v svoj pravni red, ter nezavezujoča mnenja in priporočila.

Poleg evropske zakonodaje na regulacijo novodobnih onesnaževal vplivajo mednarodne smernice (Združenih narodov, Organizacije za ekonomsko sodelovanje in razvoj - OECD) ter pobude različnih regionalnih in mednarodnih iniciativ ter tretjih držav (slika 25).

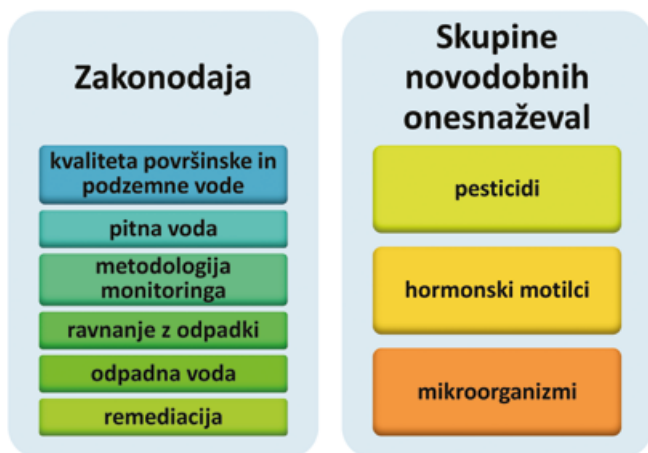
Vprašanje novodobnih onesnaževal se v veliki meri nanaša na tako imenovano uredbo REACH (ang. Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals), to je Uredbo o registraciji, evalvaciji, avtorizaciji in omejevanju kemikalij, ki obravnava kemijske snovi v širšem kontekstu. Z uporabo kemikalij v industrijski proizvodnji in

s tem povezanimi vplivi na okolje je povezana direktiva o industrijskih emisijah, ki se navezuje na celovito preprečevanje in nadzorovanje onesnaževanja. To je tako imenovana IED direktiva. Poleg tega je na ravni Evropske unije regulirana raba in proizvodnja zdravilnih učinkovin in produktov za osebno nego, vzpostavljajo pa se tudi strategije, ki se nanašajo na uporabo snovi, ki jih imenujemo endokrini motilci.

Krovni pravni dokument, ki ureja vprašanje politike do voda na ravni Evropske skupnosti, je Okvirna direktiva o vodah - WFD, ki je bila sprejeta leta 2000. Gre za prelomen dokument, ki je v veliki meri spremenil naš odnos do vode in vodnega okolja. Tej direktivi so sledile številne sestrške direktive (na primer Direktiva o podzemnih vodah, Nitrarna direktiva, Direktiva o odpadnih vodah ...), ki urejajo posamezna področja pravnega varstva in regulative v povezavi z vodnim okoljem. Osnovni mehanizem za gospodarjenje z vodami, ki ga je uvedla WFD, je načrt upravljanja z vodami, ki ga izdelujejo za posamezna povodja znotraj države, nato pa še za posamezna porečja ali dele povodij. Ti načrti so usmerjeni k zaščiti vodnih virov in varovanju ter izboljšanju stanja voda. V okviru teh mehanizmov obstajajo različni sezname kemikalij, ki jih je treba spremljati v vodnem okolju. In prav spremljanje teh snovi je v veliki meri povezano z razumevanjem pojavljanja novodobnih onesnaževal v vodnem okolju. Ti sezname so razdeljeni v dve skupini. Prva skupina so sezname prednostnih snovi in sezname prednostnih nevarnih snovi (ang. priority lists). Ti sezname določajo snovi, ki jih je treba spremljati, njihove koncentracije pa ne smejo presegati mej, določenih v okoljskih standardih. Če pride do preseganja, je treba izvesti ustrezne sanacijske ukrepe. Drugo skupino sestavljajo nadzorni sezname (ang. watch lists). Njihov namen je izvajanje monitoringov, da bi pridobili dovolj podatkov, na podlagi katerih bi lahko sprejeli odločitve o tem, ali je treba te snovi uvrstiti na sezname prednostnih list ter začeti z izvajanjem sanacijskih ukrepov. Posamezne države lahko same opazujejo posamezna onesnaževala, značilna za obravnavano območje, ki so lahko kasneje regulirana z zakonodajo.



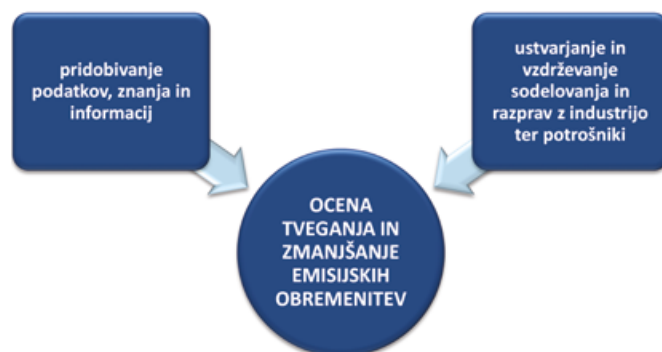
Slika 25: Različne ravni sprejemanja pobud zakonodaje, povezane z novodobnimi onesnaževali.



Slika 26: Povezava področne zakonodaje in novodobnih onesnaževal.

Pri obravnavanju novodobnih onesnaževal je treba poleg zakonodaje in seznamov, ki določajo snovi za opazovanje, izhajati iz področne zakonodaje, ki je praviloma opredeljena na nacionalni ravni in določa predvsem tehnična pravila; pravno gledano gre predvsem za pravilnike in različne uredbe. Sem uvrščamo zakonodajo o monitoringu voda, zakonodajo o pitni vodi ter zakonodajo, ki ureja okoljske standarde in standarde čiščenja voda (slika 26).

Kljub zavedanju o pomenu in vplivih, ki jih povzročajo novodobna onesnaževala, lahko za večino srednjeevropskih držav in s tem tudi za Slovenijo ugotovimo, da zakonodajne pobude prihajajo predvsem iz Evropske komisije, ki ima za to vse potrebne podporne službe in mehanizme. Nekatere države (na primer Italija in Avstrija) izvajajo projekte, namenjene pripravi strokovnih podlag, ki bodo služile predvsem implementaciji in nadgradnji evropske zakonodaje. V Sloveniji zaradi zahtevnosti problematike sledimo predvsem smernicam Evropske komisije, hkrati pa upoštevamo dognanja večjih in finančno močnejših držav.



Slika 27: Grafični prikaz politik na področju pridobivanja znanja o novodobnih onesnaževalih.

Zgolj rezultati različnih monitoringov prisotnosti porajajočih se onesnaževal v vodnem okolju ne morejo zadoščati, če iz njih ne sledijo ustrezne politike, ki bodo pripeljale k izboljšanju stanja na različnih ravneh. Poleg neposrednih meritev koncentracij v vodi je treba stremeti k pridobivanju fizikalno-kemijskih podatkov in informacij o usodi teh onesnaževal, kar omogoča, da zgradimo celostni nabor informacij o teh onesnaževalih. Te rezultate je treba ustrezno predstaviti različnim javnostim, ki morajo vključevati tako industrijo kot potrošnike in nevladne organizacije z različnimi cilji in interesi. To mora poleg ocene tveganj pripeljati k njihovemu zmanjševanju, predvsem pa k čim manjšim ali celo ničelnim emisijam (slika 27). Ne nazadnje je k temu usmerjena evropska strategija ničelnega onesnaževanja, ki je bila sprejeta v okviru Evropskega zelenega dogovora.

## 4 ZNAČILNOSTI LJUBLJANSKE KOTLINE

### 4.1 Izhodišča

Ljubljanska kotlina je osrednji del Republike Slovenije. Na njenem območju živi več kot četrtna prebivalstva države. Tu je njeno administrativno in upravno središče ter glavno mesto Ljubljana. Ljubljanska kotlina je pomembno industrijsko in kmetijsko območje, saj jo večidel prekrivajo prav obdelovalne površine.

Večji del kotline je ravnina, območja z nekoliko višjimi nakloni najdemo le ob vodotokih, na nekdanjih rečnih terasah in posameznih osamelcih, kot sta Šmarna gora in Grmada, ter posameznih gorica na Ljubljanskem barju, ki poleg hribovitega in goratega obrobja pomembno vplivajo na pokrajinsko sliko kotline. Po osrednjem delu teče reka Sava, najdaljša reka, ki izvira na ozemlju Slovenije. Vanjo se stekajo številne reke in potoki z visokogorskega in južnega kraškega obrobja. Zaradi tega je to območje zelo vodnato. Poleg površinskih vod je v vodnem krogu Ljubljanske kotline pomembna tudi podzemna voda. Na robovih kotline imamo opraviti s številnimi pomembnimi izviri, celotno prebivalstvo in velik del drugih dejavnosti pa se z vodo oskrbuje iz vodonosnikov.

Na območju Ljubljanske kotline imamo opraviti s celostnim vodnim krogom z zelo ugodno vodno bilanco; intenzivne padavine vplivajo na visok odtok površinskih vod in zaradi ugodnih naravnih danosti na obilno napajanje podzemnih vod. Hkrati imamo opraviti z vzajemno ter dobro medsebojno povezanostjo površinskih in podzemnih vod, kjer se voda obojestransko izmenjuje med obema podsistemoma. Zaradi mestoma intenzivne poselitve ter številnih kmetijskih in industrijskih dejavnosti v Ljubljanski kotlini prihaja do mnogih interakcij z vodnim krogom. Tako je samoumevno vprašanje, kakšni so vplivi človekovih dejavnosti na vodni krog Ljubljanske kotline. Ti vplivi so številni in jih ni mogoče razumeti zgolj z enim zamahom, z nekaj opravljenimi raziskavami in meritvami. Številne interakcije so nam dobro znane, na primer vplivi na rečni režim ter na dinamiko in bilanco podzemne vode. Veliko vemo tudi o vplivih klasičnih onesnaževal na kemijsko stanje površinskih in podzemnih vod, manj pa o prisotnosti novodobnih onesnaževal v vodnem okolju Ljubljanske kotline.

Da bi bolje razumeli njihovo pojavljanje, moramo poznati naravne danosti vodnega kroga in možne vplive človekovih dejavnosti, ki se odražajo kot raba prostora. Zaradi tega v nadaljevanju podajamo izhodiščni opis teh značilnosti na območju Ljubljanske kotline.

### 4.2 Naravne danosti

#### 4.2.1 Geomorfološke razmere

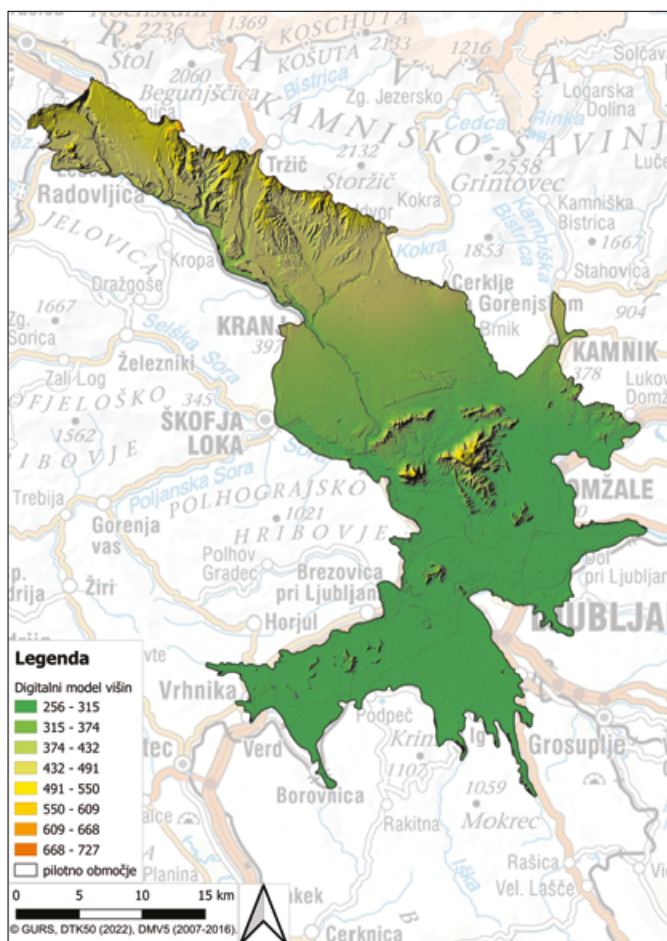
Ljubljanska kotlina je največja ravnina v Sloveniji, njena površina meri 814,7 km<sup>2</sup>. Na severu meji na Julijske Alpe, Kamniško-Savinjske Alpe in Karavanke, na zahodu na Škofjeloško in Polhograjsko hribovje, na vzhodu na Posavsko hribovje ter na jugu na Menišijo in Krmsko hribovje.

Območje Ljubljanske kotline delimo na 6 delov:

- Dežela in Blejski kot,
- Dobrave,
- Kranjsko-Sorško polje,
- Kamniško-Bistriška ravan,
- Ljubljansko polje,
- Ljubljansko barje.

Na celotnem območju Ljubljanske kotline imamo opraviti z razponom nadmorske višine od minimalne 256 m n. m. do maksimalne 727 m n. m. V južnem delu kotline je, gledano v celoti, nadmorska višina najnižja, do okoli 300 m n. m., proti severu pa se postopoma povišuje. Osrednji del kotline tako dosega višino do okoli 400 m n. m. z nekaj vmesnimi višjimi točkami, ki dosega višino do okoli 650 m n. m. Severni del kotline je večinoma na višini okoli 500 m n. m. Na nekaterih mestih je površje višje, vendar je delež teh površin v primerjavi s celoto zanemarljiv. Interval med nadmorsko višino od 287 m n. m. do 289 m n. m. zavzema največji delež površine in ustreza površini 66 km<sup>2</sup>

(slika 28). Ker gre za ravnino, močno prevladujejo nakloni do 1°, njihov delež je 46 %, kar pomeni površino 375 km<sup>2</sup>. Delež razmeroma visokih naklonov površja je zanemarljiv.



Slika 28: Relief Ljubljanske kotline.

#### 4.2.2 Geološke razmere

Ljubljanska kotlina je kvartarna tektonska udorina, zapolnjena z rečnimi sedimenti reke Save in njenih pritokov. Leži med dvema pasovima orogonov, Alpami na severu in severozahodu ter Dinaridi na jugu in jugovzhodu. V geotektonskem smislu leži na severovzhodnem delu Jadransko-Evropskega konvergentnega stika med Južnimi Alpami na severu in Zunanji Dinaridi na jugu. Vzhodno od Ljubljane so Posavske gube oligocenskih do miocenskih sedimentov z osmi v smeri vzhod-zahod.

Obrobje in podlago Ljubljanske kotline sestavljajo pretežno klastične (zrnaste) kamnine karbonsko-permske starosti, pretežno karbonatne kamnine mezozojske starosti in pretežno klastične kamnine oligocenske do miocenske starosti. Ponekod v kotlini so izdanki starejše podlage, ki jih večinoma najdemo v obliki posameznih vzpetin, kot je Šmarna gora.

Podroben pogled v značilnosti sedimentov, ki zapolnjujejo kotlino in tvorijo obsežen regionalni medzrnski vodonosnik, pokaže, da jih gradijo pleistocenski do holocenski prodi in peski rečnega nastanka, v severozahodnem delu kotline pa najdemo tudi ledeniške sedimente. Debelina sedimentov znaša tudi do več sto metrov. Morfološko je bilo območje kotline po sedimentaciji preoblikovano zaradi erozijskega delovanja vodotokov in vrezovanja njihovih strug, tako da danes tu najdemo več rečnih teras, v katerih se ti sedimenti pojavljajo. Starejši sedimenti so ponekod bolj sprijeti in se pojavljajo v obliki konglomeratov.

Ljubljansko barje je najjužnejši del Ljubljanske kotline, zapolnjen s sedimenti z izvorom na južnih obrobjih pretežno karbonatne sestave, kjer gre za kraško-razpoklinske vodonosnike. Najbolj znani so gotovo kraški izviri Ljubljanice, ki so iztok iz teh kraških kamnin. Za Ljubljansko barje je bila značilna sedimentacija z nižjo energijo, kar je v jezersko-barjanskih okoljih vodilo do odlaganja bolj drobnozrnatih sedimentov kot v preostalih delih kotline. Na južnih delih Ljubljanskega barja so reke nanesele sedimente v obliki vršajev, ki lahko segajo precej daleč v njegovo notranjost, v smeri proti severu. Tudi v preostalih delih kotline najdemo vršaje rek, katerih pojavljanje je značilno za vstop vodotoka iz ožjih dolin v širše ravninske predele, med njimi sta Kamniška Bistrica in Kokra.

Ljubljansko kotlino obdajajo prelomi pretežno dinarske smeri, to je v smeri severozahod-jugovzhod, ob katerih je tudi nastala. Na njenem severnem robu poteka Savski prelom, ki je del obsežnejše Periadriatske prelomne cone, na severozahodnem obrobju sta pomembnejša Zasipski in Dražgoški, na jugu pa jo obdajajo desnozmčni Žužemberški, Želimeljski, Mišjedolski in Borovniški prelom. V notranjosti kotline potekajo reverzni

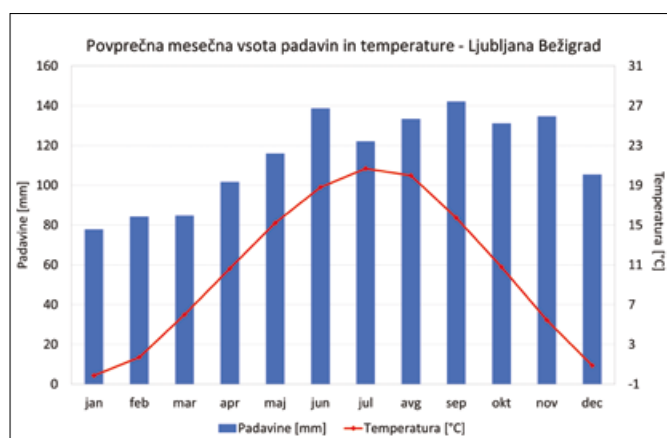


Vodiški, Utiški in Cerkeljski prelom ter Litijski nariv. Tudi še dandanes so za to območje značilni aktivni tektonski procesi, ki so prisotni tudi v obliki potresne aktivnosti širšega območja.

#### 4.2.3 Klima

Meteorološke razmere v Ljubljanski kotlini spremljamo z mrežo državnih postaj, ki je skozi zgodovino na tem območju obsegala meritve na več kot 100 mestih. Danes je za izvajanje teh meritev odgovorna Agencija RS za okolje. Povprečne značilnosti podnebja Ljubljanske kotline lahko podamo na podlagi dolgoletnih meritev meteoroloških spremenljivk na reprezentativni postaji Bežigrad v Ljubljani. Povprečna letna temperatura zraka na tej lokaciji znaša 10,9°C, povprečna letna višina padavin pa 1362 mm. Absolutne ekstremne temperature so v celotnem obdobju opazovanj na izbrani postaji segale od -23,3°C do 40,2°C. Najnižje povprečne mesečne temperature so značilne za zimske mesece in minimum dosežejo januarja, najvišje pa za poletne mesece z najvišjo povprečno julijsko temperaturo. Na letni ravni se višina padavin na postaji giblje med 954 mm in 1848 mm, najvišja zabeležena mesečna višina padavin pa je znašala 505 mm (slika 29).

Sezonskost meteoroloških razmer je izražena tudi v višini padavin, razporejenih skozi leto. Najmanj padavin je januarja, največ pa junija in septembra. V Sloveniji so najpogostejše orografske



Slika 29: Povprečne mesečne višine padavin in temperature zraka na vremenski postaji Ljubljana Bežigrad (vir: ARSO).

padavine, katerih prostorsko porazdelitev določata usmerjenost in tip reliefa ter nadmorska višina. V vzhodnem delu Ljubljanske kotline letna količina padavin znaša 1300–1400 mm, v smereh proti jugozahodu in severozahodu pa se zvišuje, tako da na skrajnem severozahodu kotline znaša 1600–1800 mm. Osrednji del Ljubljanske kotline (Ljubljansko barje in Ljubljansko polje) ima povprečno letno temperaturo na razponu 10–12°C, preostali deli kotline pa 8–10°C (slika 29).

Evapotranspiracija v večjem delu Ljubljanske kotline znaša 700–750 mm na leto, le v osrednjem delu je nekoliko višja (750–800 mm), na njenih obrobjih in v skrajno severozahodnem delu pa je nekoliko manjša (650–700 mm).

Snežna odeja v Ljubljanski kotlini povprečno traja 40–60 dni, skupna višina novozapadlega snega v sezoni pa je v povprečju 60–100 cm v njenem osrednjem nižinskem delu ter 100–140 cm na obrobju kotline.

Povratne dobe z različnim trajanjem nalirov in njihovimi količinami v mm podaja preglednica (preglednica 1). Iz nje lahko preberemo, da količina 30 minut trajajočega naliva s petletno povratno dobo znaša 30 mm, količina šesturnega naliva s petdesetletno povratno dobo pa 90 mm.

Zaradi podnebnih sprememb tudi v Sloveniji opazamo vse višje povprečne temperature zraka, večje izhlapevanje, bolj spremenljivo višino padavin in krajše trajanje snežne odeje.

#### 4.2.4 Površinske vode Ljubljanske kotline

Na območju Ljubljanske kotline tečeta dve večji reki. Iz severozahoda priteka Sava, iz jugozahoda pa Ljubljanica. Sava ima dva povirna kraka: Savo Dolinko in Savo Bohinjko. Sava Dolinka je levi povirni krak Save in izvira v Zelencih pri Ratečah, Sava Bohinjka pa desni povirni krak, ki se začne kot iztok iz Bohinjskega jezera. Sava Dolinka in Sava Bohinjka se pod Radovljico združita v enotno reko Savo. Sava do Kranja teče po zahodnem robu Ljubljanske kotline in nadaljuje pot na Kranjsko-Sorško polje. Pri Mednem vstopi na Ljubljansko polje in teče proti jugovzhodu po njegovem sever-

nem delu. V vzhodnem delu Ljubljanske kotline, pri kraju Dolsko, Sava zapusti kotlino. Sava ima na območju Ljubljanske kotline številne pritoke. Naštejmo le največje: Ljubljanica, Kamniška Bistrica, Sora, Kokra, Tržiška Bistrica in Lipnica.

Reka Ljubljanica izvira iz kraških izvirov v bližini Vrhnik, na jugozahodnem robu Ljubljanske kotline, nadaljuje pot čez celotno Ljubljansko barje, teče skozi mesto Ljubljana ter po južnem delu Ljubljanskega polja in se na njegovem vzhodnem robu, pri naselju Podgrad, izliva v Savo, kot njen desni pritok. Večji pritoki Ljubljanice na območju Ljubljanske kotline so: Gradaščica, Borovniščica, Iška, Ižica in Besnica.

Na podlagi analize Državnega topografskega modela (DTM) v merilu 1:5000 lahko ugotovimo, da je dolžina vseh vodotokov v Ljubljanski kotlini 5.106 km. Najdaljša reka na območju je Sava, katere dolžina skupaj z dolžinama strug Save Dolinke in Save Bohinjke znaša 80 km. Sledita ji Ljubljanica, ki po Ljubljanski kotlini teče na dolžini 40 km, in Pšata z dolžino 38 km.

Pomemben pokazatelj razvoja mreže vodotokov na določenem območju je njihova gostota, ki jo izrazimo z dolžino strug površinskih vodotokov glede na izbrano površino. Če gostoto vodotokov v Ljubljanski kotlini izračunamo s pomočjo DTM 5, ta znaša



Slika 30: Vodotoki 1. reda na območju Ljubljanske kotline.

Preglednica 1: Povratne dobe padavin in njihove višine na območju Ljubljane.

| Povratna doba [mm] | 2 leti | 5 let | 10 let | 50 let | 100 let |
|--------------------|--------|-------|--------|--------|---------|
| 10 min             | 13     | 18    | 21     | 27     | 30      |
| 30 min             | 22     | 30    | 36     | 48     | 53      |
| 60 min             | 27     | 38    | 44     | 59     | 66      |
| 120 min            | 34     | 47    | 55     | 73     | 81      |
| 180 min            | 38     | 51    | 60     | 79     | 87      |
| 240 min            | 42     | 55    | 64     | 84     | 92      |
| 300 min            | 45     | 59    | 68     | 88     | 96      |
| 360 min            | 48     | 61    | 70     | 90     | 99      |

6,27 km/km<sup>2</sup>. Največja gostota vodotokov je v južnem delu kotline na Ljubljanskem barju, in sicer 22,64 km/km<sup>2</sup>. Glede na dolžino je na tem območju kar 73 % vseh vodotokov v Ljubljanski kotlini. Gostota vodotokov je v površinsko največjem osrednjem delu manjša, znaša 1,90 km/km<sup>2</sup>, kar ustreza 17 % dolžine vseh vodotokov na območju. V severnem predelu kotline je gostota dolžin vodotokov 2,63 km/km<sup>2</sup>, kar ustreza 10 % vseh vodotokov.

V skladu z veljavnim Zakonom o vodah so na območju Ljubljanske kotline naslednji vodotoki 1. reda: reka Sava skupaj s Savo Dolinko in Savo Bohinjko, Ljubljanica, Tržiška Bistrica, Kokra in Kamniška Bistrica. Med vodotoke prvega reda je uvrščeno tudi Blejsko jezero (slika 30). Preostala rečna mreža je razdeljena v vodotoke višjega reda.

Na pretočni režim rek v Sloveniji najbolj vpliva podnebje, in sicer razporeditev padavin in temperatur skozi leto ter trajanje snežne odeje. Glede na pokrajino in vodni vir, ki najbolj vpliva na njihovo napajanje, rekam pripišemo vrsto pretočnega režima. V Ljubljanski kotlini so za posamezne reke ali njihove odseke značilni: alpski snežno-dežni režim, alpski dežno-snežni režim in dinarski dežno-snežni režim.

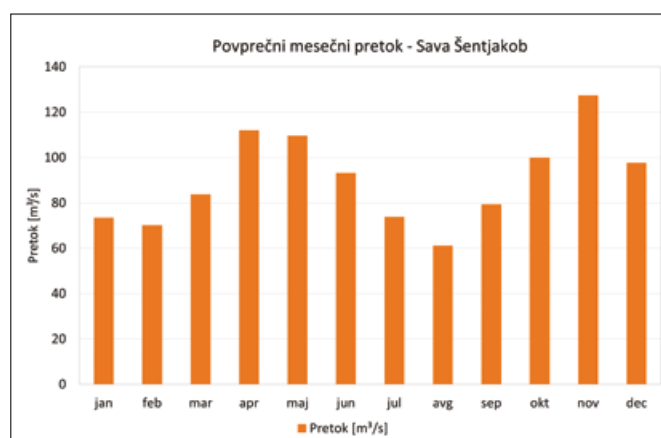
Alpski snežno-dežni režim imajo Kamniška Bistrica, Sava Bohinjka, Sava Dolinka in Sava v gorvodnem toku pri Radovljici. Zaradi napajalnega zaledja teh rek, ki ležijo v visokogorju, na njihove pretočne vrednosti močno vpliva taljenje snega. Viški pretokov se pojavljajo maja ali junija in manjši oktobra ali novembra, nižki pa februarja in manjši avgusta ali septembra. Alpski dežno-snežni režim imata Kokra in Sava v dolvodnem delu Ljubljanske kotline pri Šentjakobu. Pretočni režim teh rek je posledica zaledja v sredogorju in deloma v visokogorju s spomladanskim in jesenskim viškom, ki sta izenačena, izenačena pa sta tudi zimski in poletni nižek. Najpomembnejši pritok Save v dolvodnem delu Ljubljanske kotline z njenega levega brega je Ljubljanica, ki ima dinarski dežno-snežni režim z izenačenimi spomladanskimi in jesenskimi viški ter izrazitimi razlikami med zimskimi in poletnimi nižki, pri čemer so poletni nižji.

Pretok na Savi narašča skladno s potekom njene- ga toka v dolvodni smeri. Povprečni pretok je na Savi Dolinki v Podkorenu 0,9 m<sup>3</sup>/s, v Kranjski Gori 1,4 m<sup>3</sup>/s, na Jesenicah 11,1 m<sup>3</sup>/s, pri Blejskem mostu 23,1 m<sup>3</sup>/s, pri Radovljici 47,3 m<sup>3</sup>/s, na Okroglem 53,9 m<sup>3</sup>/s, v Prebačevem 64,8 m<sup>3</sup>/s, v Mednem 83,0 m<sup>3</sup>/s, v Črnučah 86,1 m<sup>3</sup>/s, v Šentjakobu 95,3 m<sup>3</sup>/s (slika 31), v Litiji, po izstopu iz Ljubljanske kotline, pa v povprečju 175,2 m<sup>3</sup>/s.

#### 4.2.5 Podzemne vode Ljubljanske kotline

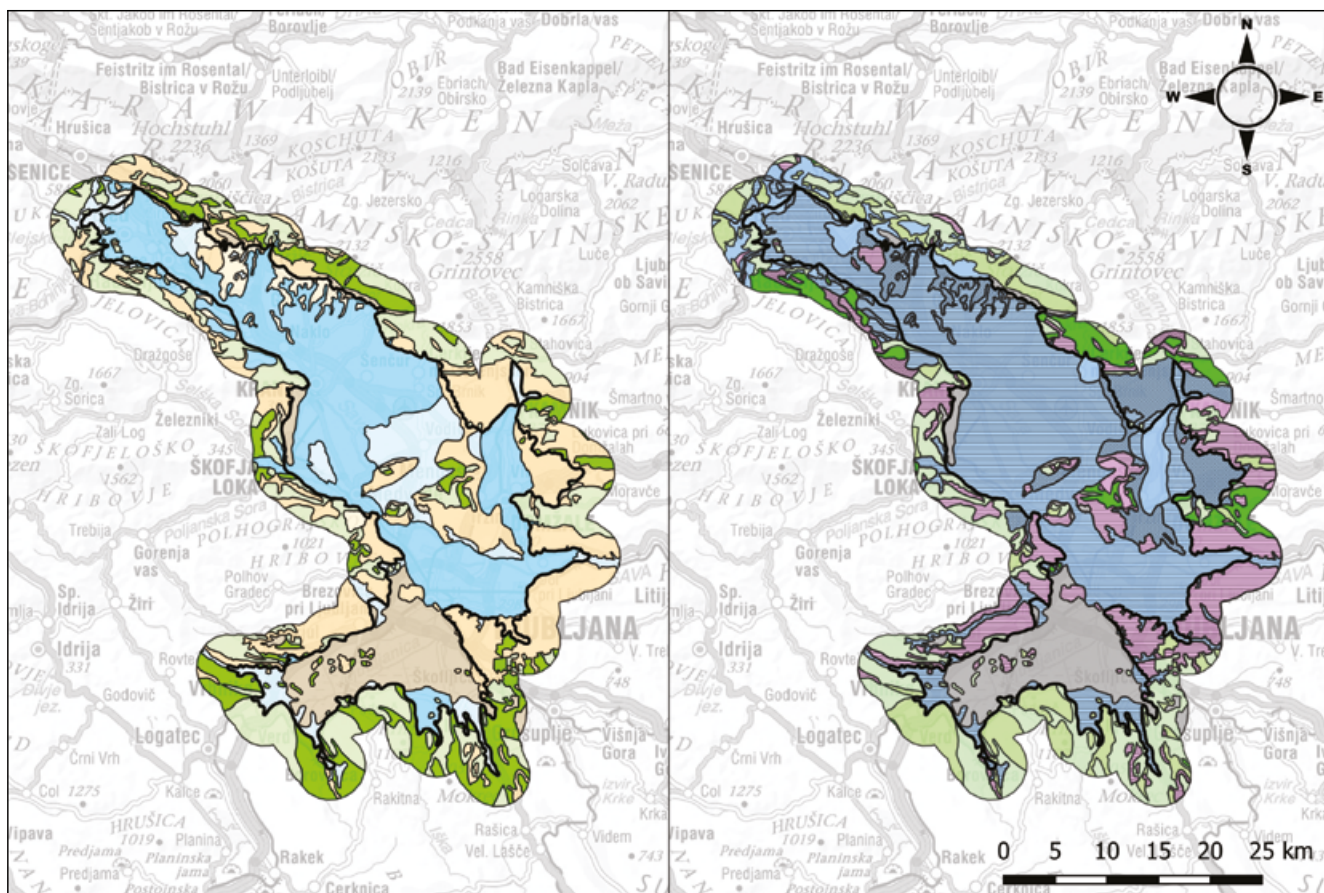
Pomemben del vodnega kroga Ljubljanske kotline je podzemna voda. Z vodnogospodarskega vidika je Ljubljanska kotlina na istem območju kot vodno telo podzemne vode, imenovano Savska kotlina in Ljubljansko barje. Na tem območju je največji vodovodni sistem v državi - centralni vodovodni sistem mesta Ljubljana in okolice, ki pitno vodo za oskrbo prebivalstva v celoti zajema iz vodonošnikov. Poleg njega se iz podzemne vode na tem območju napajajo še drugi vodovodni sistemi.

Pojavljanje podzemne vode opredelimo s pomočjo hidrogeoloških kart. Na sliki 32 sta prikazani dve hidrogeološki karti Ljubljanske kotline. Poleg samega območja je zaradi boljšega razumevanja prikazano tudi neposredno zaledje. Hidrogeološki karti sta izdelani na podlagi različnih metodologij. Karta na levi je izdelana v skladu z metodologijo



Slika 31: Mesečni pretoki na reki Savi pri Šentjakobu (vir: ARSO).





## IAH KARTA

### Medzrnski vodonosniki

- Obširni in visoko izdatni vodonosniki
- Lokalni vodonosniki ali vodonosniki s spremenljivo izdatnostjo ali obširni vendar največ srednje izdatni vodonosniki

### Kraško-razpoklinski vodonosniki

- Obširni in visoko izdatni vodonosniki
- Lokalni vodonosniki ali vodonosniki s spremenljivo izdatnostjo ali obširni vendar največ srednje izdatni vodonosniki

### Neznačilni vodonosniki

- Manjši vodonosniki z lokalnimi in omejenimi viri podzemne vode
- Geološke plasti brez pomembnih virov podzemne vode
- Slabo prepustne plasti, ki prekrivajo vodonosnik
- pilotno območje

## LAWA KARTA

### Medzrnski vodonosniki

- Silikatni
- Karbonatno/silikatni
- Karbonatni

### Razpoklinski vodonosniki

- Silikatni
- Silikatno/karbonatni
- Karbonatni

### Kraško-razpoklinski vodonosniki

- Zelo zakraseli - karbonatni
- Srednjezakraseli - karbonatni
- Malo zakraseli - karbonatni

### Posebni primeri

- Krovne ali nevodonosne plasti

© Geološki zavod Slovenije, Hidrogeološka karta Slovenije (IAH in LAWA), 2007-2008. Podlaga: GURS, DTK50, 2022.

Slika 32: Hidrogeološke karte Ljubljanske kotline (prirejeno po Geološki zavod Slovenije, 2022).



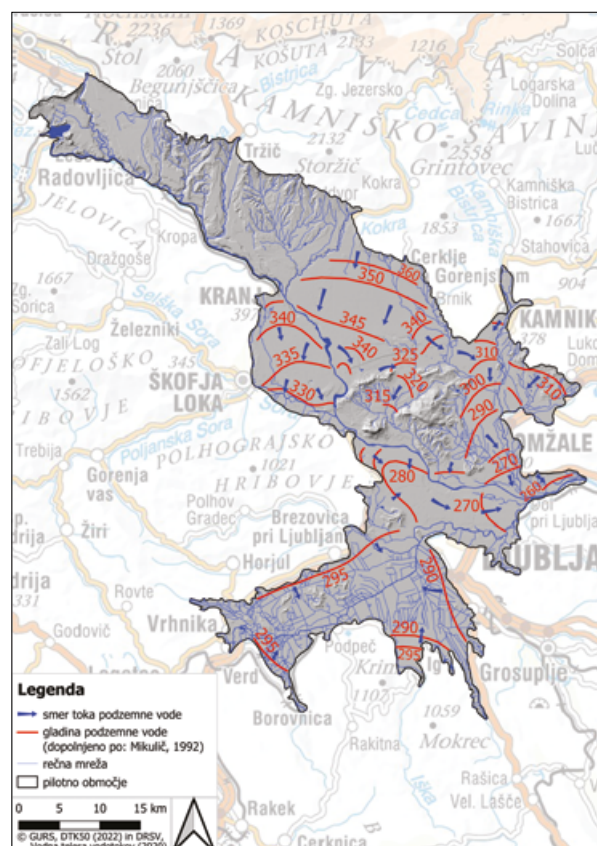
IAH Mednarodnega združenja hidrogeologov (ang. IAH - International Association of Hydrogeologists), desna karta pa na podlagi metodologije LAWA (nem. LAWA - Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser), ki jo je vpeljalo Deželno profesionalno združenje za vodo iz Berlina v Nemčiji. Čeprav karti temeljita na nekoliko drugačnih klasifikacijah hidrogeoloških lastnosti, je prostorska porazdelitev posameznih enot med seboj primerljiva.

Osrednji in največji del območja tvorijo obsežni medzrnski vodonosniki. Sestavljajo jih pretežno karbonatni prodniki s podrejeno peščeno frakcijo, ki so v severozahodnem delu fluvioglacialnega izvora, v osrednjem delu pa predvsem rečnega. V sedimentu podrejeno nastopajo tudi zrna silikatnih kamnin. Na severozahodnem delu imamo opraviti z velikim vodonosnim sistemom med Žirovnico in Radovljico, ki sega vse do reke Kokre. Ta predel je hidrogeološko slabše raziskan in prostorsko razmeroma slabo opredeljen. V osrednjem delu, med Kranjem, Škofjo Loko in Cerkljami na Gorenjskem, na območju Kranjsko-Sorškega polja ter tudi širše na obrobjih, je obsežen vodonosnik, ki je bilančno povezan z vodonosnikom Ljubljanskega polja, osrednjim vodonosnikom tega območja, in z vodonosnikom na Kamniško-Domžalskem polju. Ta vodonosnik imenujemo Osrednjegorenjski vodonosnik. Drug zelo pomemben vodonosni sistem je Ljubljansko barje južno in jugozahodno od Ljubljane. V tem primeru gre za sistem več vodonosnikov, ki si sledijo drug za drugim navzgor. Krovina tega vodonosnika so zelo slabo prepustni glineno meljni sedimenti. Na območju teh vodonosnikov zasledimo tudi nekaj osamelcev, različnih izdankov kamnin podlage na površju. Te kamnine so predvsem karbonsko-permske starosti. Ponekod so prisotni tudi zgornje triasni karbonati (na primer Grmada in Šmarna gora), ki jih opredelimo kot lokalne karbonatne vodonosnike. Pregled obrobja Ljubljanske kotline pokaže, da imamo opraviti z obsežnimi območji karbonatnih kamnin, ki so vse kraško razpoklinski vodonosniki, za katere sta značilni visoka izdatnost in prepustnost in ki pomembno vplivajo na napajanje podzemne vode osrednjega dela Ljubljanske kotline. V predelu, kjer nastopajo karbonsko-permske plasti (Polhograjski hribovi, Golovec, Posavsko hribovje), pa imamo opraviti le z občasnimi pojavi podzemne vode.

Glede na osrednjo lego Save ta igra pomembno vlogo pri napajanju podzemne vode. Tako na primer na Ljubljanskem polju na severu napaja vodonosnik, na vzhodni strani pa se podzemna voda izceja v Savo. Podoben medsebojni vpliv med Savo in podzemno vodo zasledimo na Sorškem polju.

Z izjemo Ljubljanskega barja vse vodonosnike opredelimo kot hidrodinamsko odprte vodonosnike, kjer gladina podzemne vode niha prosto od napajanja. Območje Ljubljanskega barja pa opredelimo kot sistem zaprtih vodonosnikov, kjer je na nekaterih mestih podzemna voda še pod arteškim pritiskom.

Porazdelitev podzemne vode od reke Kokre navzdol vidimo na karti (slika 33). Podzemna voda teče od Cerklj na Gorenjskem po Kranjskem polju proti



Slika 33: Porazdelitev gladin podzemne vode na območju Ljubljanske kotline (prirejeno po Mikulič, 1992).

jugozahodu in se izceja v Savo. Nekoliko kompleksnejše razmere imamo na zahodni strani Save, na Sorškem polju. Od izliva Kokre dalje Sava napaja podzemno vodo, nato ta teče vzporedno z rečno strugo in se v spodnjem delu, pri Mavčičah, izteče nazaj v Savo. Osrednjegorenjski vodonosnik je v bilančnem stiku z vodonosnikom v Ljubljanski kotlini in z vodonosnikom na Kamniško-Domžalskem polju. Iz kart gladin podzemne vode je vidno napajanje obeh vodonosnikov iz zahodne smeri. Vodonosnik Ljubljanske kotline je pod vplivom Save, prav tako pa je v stiku z Ljubljanskim barjem, od koder skozi tako imenovana Ljubljanska vrata med hriboma Rožnik in Grad doteka podzemna voda. Hidrogeološke razmere na Ljubljanskem barju so nekoliko specifične. Opraviti imamo s sistemom zaprtih vodonosnikov, v katerih se tlačne razmere po vertikali nekoliko spreminjajo. Del podzemne vode odteka skozi Ljubljanska vrata, del pa ima zaradi črpanja na območju črpališča Brest spremenjeno smer toka in teče proti jugu. Ob severnem robu Barja imamo opraviti še s številnimi visečimi vodonosniki, ki se drenirajo proti jugu. Vse to se odraža v obliki hidroizohips na tem območju. Na območju med Kamnikom in Domžalami podzemna voda odteka proti jugu. Lokalno porazdelitev tega toka podzemne vode nadzoruje Kamniška Bistrica, regionalno pa Sava, saj je reka v spodnjem delu vodonosnika lokalna erozijska baza.



Slika 34: Občine na območju Ljubljanske kotline.

## 4.3 Raba prostora

### 4.3.1 Prebivalstvo

Po statističnih podatkih Statističnega urada RS iz leta 2021 so največja mesta v Ljubljanski kotlini: Ljubljana (285.604 prebivalcev), Kranj (38.024 prebivalcev), Kamnik (13.902 prebivalcev), Domžale (13.102 prebivalcev), Škofja Loka (11.706 prebivalcev), Vrhnika (8.889 prebivalcev) in Bled (5.181 prebivalcev).

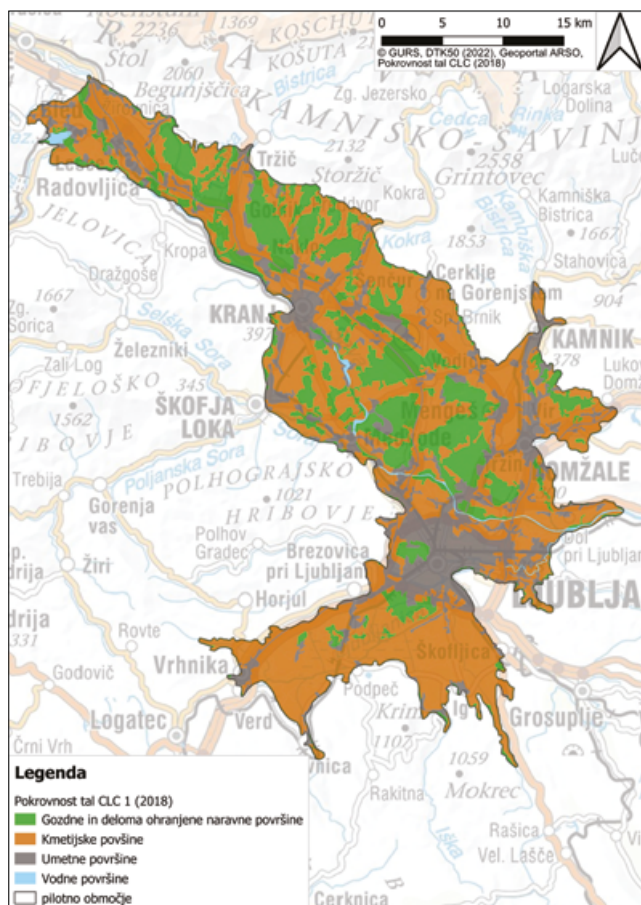
V Ljubljanski kotlini je 31 občin (slika 34), kar je glede na celotno število občin v Sloveniji (212) 15 % celotne površine države. Največjo površino, 163,5 km<sup>2</sup>, tj. 20 %, ima Mestna občina Ljubljana. Z manjšo površino ji sledita občini Kranj in Radovljica. Občina Kranj ima površino 91,5 km<sup>2</sup> oziroma

11 %, občina Radovljica pa 48,8 km<sup>2</sup> oziroma 6 %. Občine Jesenice, Gorje, Horjul, Dobrova-Polhov Gradec, Velike Lašče in Lukovica na območje kotline segajo le v manjši meri.

Natančna analiza števila prebivalstva, ki živi v Ljubljanski kotlini, presega namen naše raziskave. Na podlagi števila prebivalstva v občinah, ki v celoti ležijo na območju kotline, pa ocenjujemo, da tu živi približno 520.000 ljudi. Od tega v mestu Ljubljana živi 55 % prebivalstva Ljubljanske kotline.

### 4.3.2 Pokrovnost tal

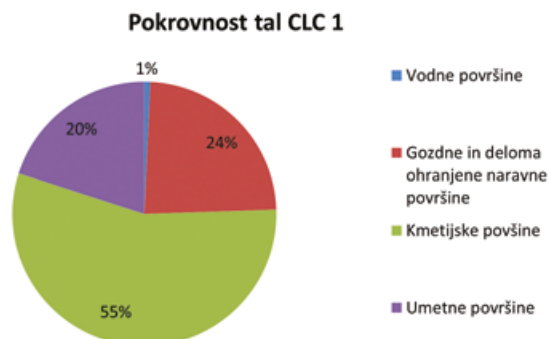
Pokrovnost in raba tal pomembno vplivata na stanje voda v prostoru, in sicer tako na naravno stanje vode, kjer ni vplivov človekovih dejavnosti,



Slika 35: Pokrovnost tal na podlagi Corine Land Cover za leto 2018 - prva kategorija CLC 1.

kot na porazdelitev onesnaževal. Za ocenjevanje pokrovnosti tal je danes na razpolago veliko virov podatkov, za splošno analizo in uporabo pa je še vedno najprimernejša in najpreprostejša uporaba vira podatkov Corine Land Cover (CLC). Ta vir podatkov omogoča razvrščanje tal na treh ravneh. Najvišja raven je najslošnejša in prikazuje večje sklenjene površine, z napredovanjem ravni pa postanejo podatki o pokrovnosti tal podrobnejši, razredi rabe in pokrovnosti tal pa številnejši. Za potrebe analize območja Ljubljanske kotline smo analizirali prvo in tretjo raven. Najprej je bila izvedena analiza rabe tal v letu 2018.

Na prvi ravni (CLC1) so bili na območju Ljubljanske kotline (slika 35) ugotovljeni štirje razredi: gozdne in deloma ohranjene naravne površine, kmetijske



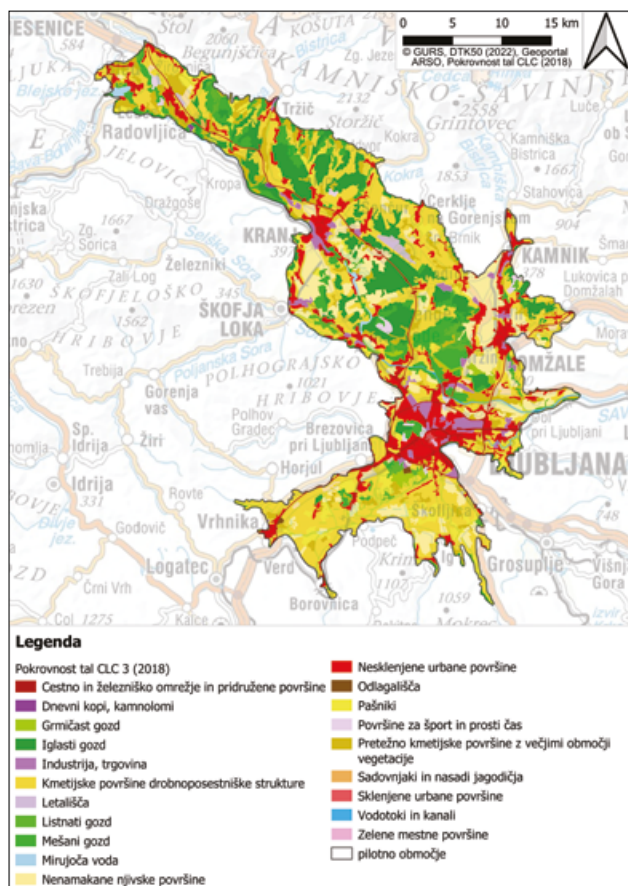
Slika 36. Razmerja pokrovnosti tal po Corine Land Cover - kategorija CLC 1 za območje Ljubljanske kotline.

površine, umetne površine in vodne površine. Največji delež, več kot polovico celotne Ljubljanske kotline, zavzemajo kmetijske površine (452,0 km<sup>2</sup> oziroma 55,5 %). Gozdne in deloma ohranjene naravne površine obsegajo 193,6 km<sup>2</sup> oziroma 24 %, umetne površine pa 163,3 km<sup>2</sup> oziroma 20 %. Najmanjši del Ljubljanske kotline pokrivajo vodne površine, le 5,8 km<sup>2</sup> oziroma 0,7 %. Razmerja med različnimi vrstami površine so prikazana na tortnem diagramu (slika 36).

V osrednjem in severnem delu Ljubljanske kotline, tj. severno od Ljubljane, se kmetijske površine prepletajo z gozdnimi in deloma ohranjenimi naravnimi površinami ter umetnimi površinami. Slednje na celotnem območju kotline najdemo v okolici mest in naselij. Na Ljubljanskem polju prevladujejo umetne in kmetijske površine, v južnem delu, na Ljubljanskem barju, pa kmetijske površine z nekaj vmesnimi območji gozdnih in deloma ohranjenih naravnih površin ter umetnih površin.

Analiza pokrovnosti tal je na tretji ravni (CLC 3) za območje Ljubljanske kotline pokazala prisotnost 20 podrazredov (slika 37): cestno in železniško omrežje ter pridružene površine, dnevni kopi s kamnolomom, grmičasti gozd, iglasti gozd, industrija in trgovina, kmetijske površine drobno-posedniške strukture, letališča, listnati gozd, mešani gozd, mirujoča voda, nenamakane njivske površine, nesklenjene urbane površine, odlagališča, pašniki, površine za šport in prosti čas, pretežno kmetijske površine z večjimi območji vegetacije,





Slika 37: Pokrovnost tal na podlagi Corine Land Cover za leto 2018 - tretja kategorija CLC 3.

sadovnjaki, sklenjene urbane površine, vodotoki in kanali ter zelene mestne površine.

Najvišji delež, 29 % oziroma 239,0 km<sup>2</sup>, Ljubljanske kotline pokrivajo kmetijske površine drobnoposestniške strukture, z deležem 14 % (116,1 km<sup>2</sup>) pa jim sledijo neskljenjene urbane površine. Preostali podrazredi, ki se uvrščajo v kategorijo kmetijskih površin, pokrivajo naslednje deleže Ljubljanske kotline: nenamakane njivske površine (13 %), pretežno kmetijske površine (8 %), pašniške površine (6 %) in sadovnjaki (0,1 %). Med gozdnimi površinami prevladuje iglasti gozd z 12 %, sledijo mešani gozd (9 %), listnati gozd (2 %) in grmičasti gozd (1 %). Gozd tako skupaj ustreza deležu 24 % ali površini 193,6 km<sup>2</sup>. 21,6 km<sup>2</sup> oziroma 3 % Ljubljanske kotline zavzemata industrija in trgovina, 13,4 km<sup>2</sup> (2 %) pa cestno in železniško omrežje.

Vsak od preostalih podrazredov zavzema manj kot 1 % površine Ljubljanske kotline. Razmerja med različnimi vrstami površine so prikazana na tortnem diagramu (slika 38).

#### 4.3.3 Spremembe pokrovnosti tal

Zaradi intenzivnega razvoja, zlasti na mestnih in primestnih območjih, se raba tal neprestano spreminja. Te spremembe vplivajo na stanje voda, zlasti dolgoročno. Razpoložljivi podatki Corine Land Cover nam omogočajo, da si ogledamo spremembe rabe tal v Ljubljanski kotlini v letih 1995–2018, tj. za obdobje 23 let.

Najprej si oglejmo spremembe na ravni parametra CLC 1. Leta 1995 so umetne površine pokrivalo 17 % Ljubljanske kotline, leta 2018 pa 20 %; njihov delež je v analiziranem obdobju narasel za 3 %, kar ustreza površini nekaj več kot 26 km<sup>2</sup>. Kmetijske površine so se v 23 letih zmanjšale. Leta 1995 so pokrivalo 58 % površine, leta 2018 pa 55,5 %, sprememba 2,2 % ustreza površini nekaj manj kot 19 km<sup>2</sup>. Sprememba deleža gozdnih in deloma ohranjenih naravnih površin je majhna, nekaj manj kot 1 %, vendar pa to ustreza površini nekaj manj kot 8 km<sup>2</sup>.

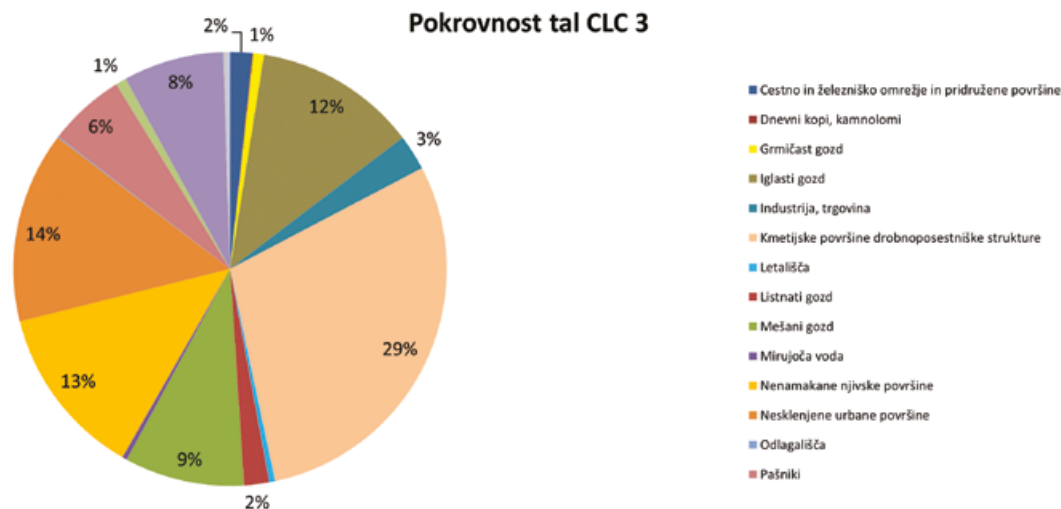
Na tretji ravni analize podatkov Corine Land Cover (CLC 3) je v obdobju 23 let prišlo do največjih razlik pri cestnem in železniškem omrežju ter pridruženih površinah, ki so se povečale, medtem ko so se kmetijske površine drobnoposestniške strukture, neskljenjenih urbanih površin in pašnikov zmanjšale. Podrobnejša analiza teh sprememb je otežena, ker so se klasifikacije kategorij s časom nekoliko spremenile.

### 4.4 Oskrba s pitno vodo ter odvajanje in čiščenje odpadnih vod

#### 4.4.1 Vodna dovoljenja

Na območju Ljubljanske kotline je 2.709 izdanih vodnih dovoljenj (stanje leta 2021). Vodna dovoljenja so izdana za odvzem za druge namene (924), pridobivanje toplote (771), male hidroelektrarne (154), lastno oskrbo s pitno vodo (138), oskrbo s



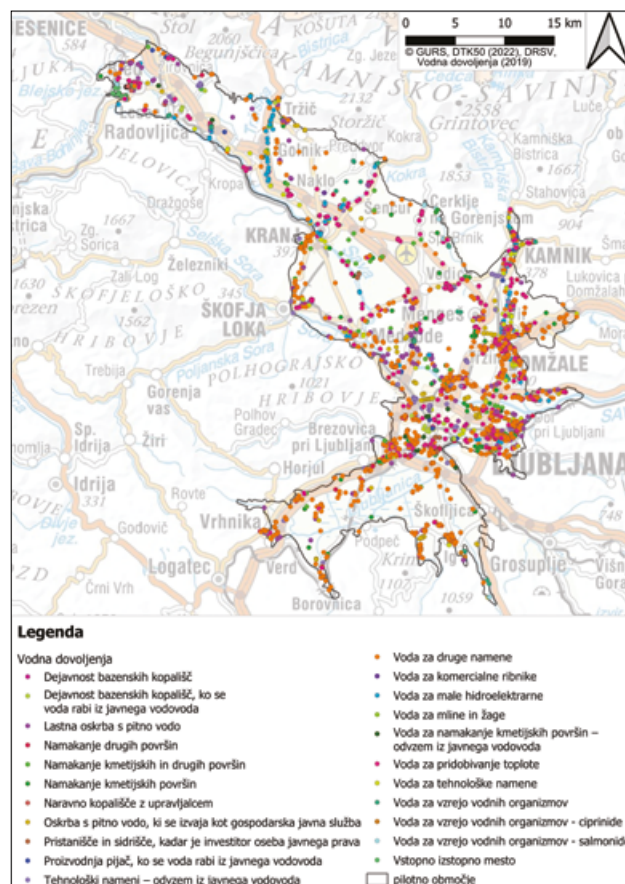


Slika 38: Razmerja pokrovnosti tal po Corine Land Cover - kategorija CLC 3 za območje Ljubljanske kotline.

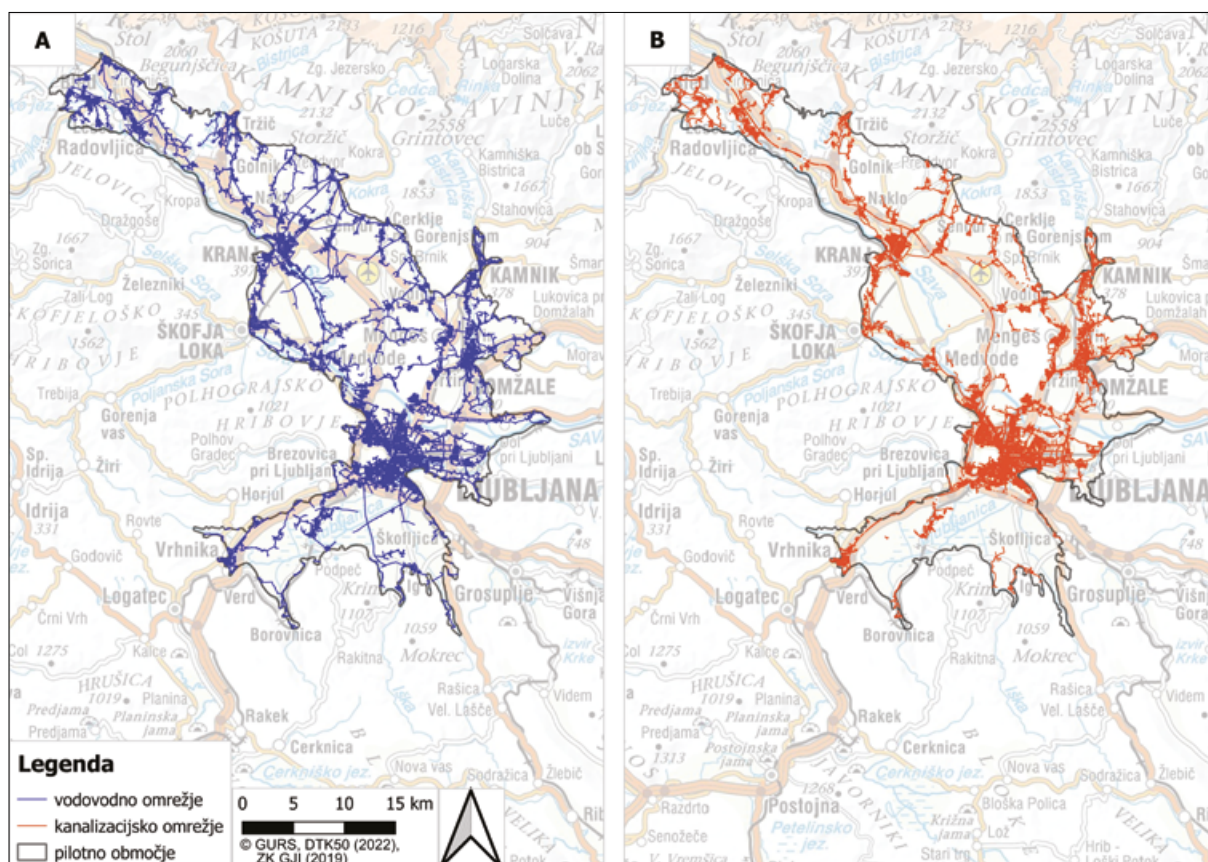
pitno vodo, ki se izvaja kot gospodarska javna služba (98), vstopno-izstopno mesto (87), tehnološke namene - odvzeme iz javnega vodovoda (75), namakanje kmetijskih površin (61), vzrejo vodnih organizmov (59) in naravno kopališče z upravljalcem (50). Poleg tega so bila vodna dovoljenja izdana za številne druge namene, kar je razvidno iz karte (slika 39). Register vodnih dovoljenj Agencije RS za okolje vsebuje vrednost predvidenega odvzema in vrednost maksimalnega odvzema, določeno za posamezno vodno dovoljenje. Predvideni odvzem za posamezna vodna dovoljenja v Ljubljanski kotlini znaša od 0,1 m<sup>3</sup>/leto do 80.000.000 m<sup>3</sup>/leto, predvideni trenutni maksimalni odvzem pa od 0,03 l/s do 23 m<sup>3</sup>/s. Izkoriščanje vodnih virov na območju Ljubljanske kotline najpogosteje poteka v obliki vrtin ali vodnjakov. V manjši meri izkoriščajo tudi vodo iz vodotokov, izvirov in jezer.

#### 4.4.2 Vodovodno omrežje

Na območju Ljubljanske kotline je 2.743 km vodovodnega omrežja (slika 40A) z gostoto 3,37 km/km<sup>2</sup>. Zgostitve vodovodnega omrežja je mogoče zaznati v okolici mest oziroma krajev. Med občinami ima v Ljubljanski kotlini največjo dolžino vodovodnega omrežja občina Ljubljana, in sicer 897,54 km z gostoto 5,49 km/km<sup>2</sup>; najmanjšo dolžino pa ima občina Log-Dragomer (4,70 km) z gostoto 1,22 km/km<sup>2</sup>.



Slika 39: Stanje izdanih vodnih dovoljenj po namenu v Ljubljanski kotlini.



Slika 40: Vodovodno (A) in kanalizacijsko (B) omrežje na območju Ljubljanske kotline.

#### 4.4.3 Kanalizacijsko omrežje

Kanalizacijsko omrežje je razvito predvsem na urbanih območjih. Severno in južno od Ljubljane so številni kraji brez infrastrukture, kar lahko vpliva na kvaliteto podzemne vode. Potencialni vir onesnaženja podzemne vode so tudi greznice, gnojne jame in območja, kjer kanalizacijsko omrežje ni razvito (slika 40B).

V Ljubljanski kotlini je razvitega 2361 km kanalizacijskega omrežja z gostoto 2,90 km/km<sup>2</sup>. Centralni kanalizacijski sistem v Ljubljani je največji v Sloveniji.

Najdaljše kanalizacijsko omrežje v Ljubljanski kotlini ima občina Ljubljana, in sicer 1012,52 km z gostoto 6,19 km/km<sup>2</sup>, najkrajše pa občina Dobrova-Polhov Gradec (2,34 km) z gostoto 1,28 km/km<sup>2</sup>.

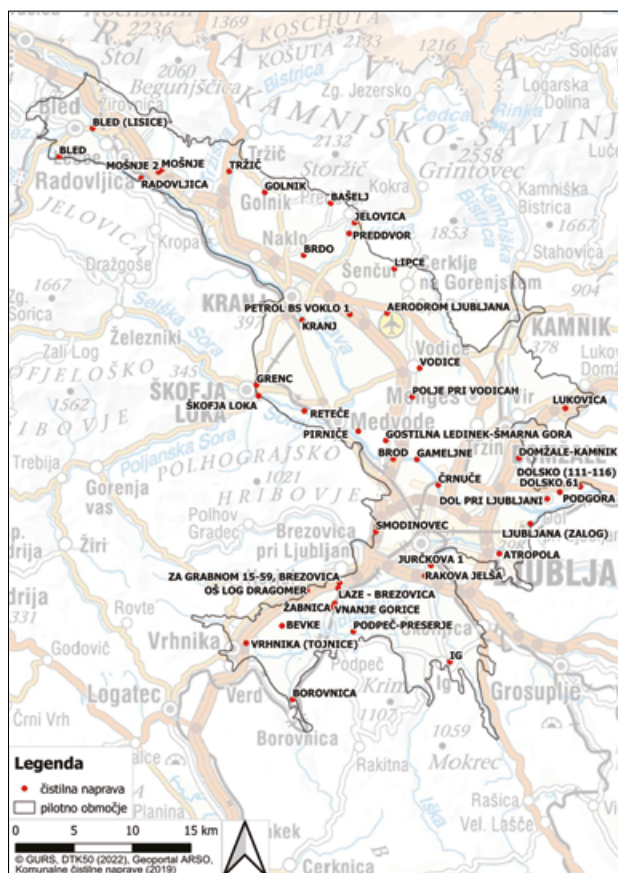
#### 4.4.4 Čistilne naprave

V Ljubljanski kotlini je 46 čistilnih naprav (slika 41). Od tega ima 18 naprav (39 %) zmogljivost večjo od 2.000 PE (PE - populacijske enote). Največja je Centralna čistilna naprava Ljubljana v Zalogu s 360.000 PE, s katero se zaključi kanalizacijski sistem mesta Ljubljana. Ta naprava očisti 85 % odpadne vode iz Ljubljane in njene okolice. Od vseh 46 naprav jih ima terciarno stopnjo čiščenja devet (20 %).

#### 4.4.5 Vodovarstvena območja

Ljubljanska kotlina je pomemben vir pitne vode za več mest in naselij. V Sloveniji imamo zaradi počasne implementacije veljavnega Zakona o vodah vodovarstvena območja, ki so sprejeta na državni ravni, ter takšna, ki so bila sprejeta pred letom 2002 na občinski ravni. Slednja bi morala biti z državnimi odloki nadomeščena že pred časom.

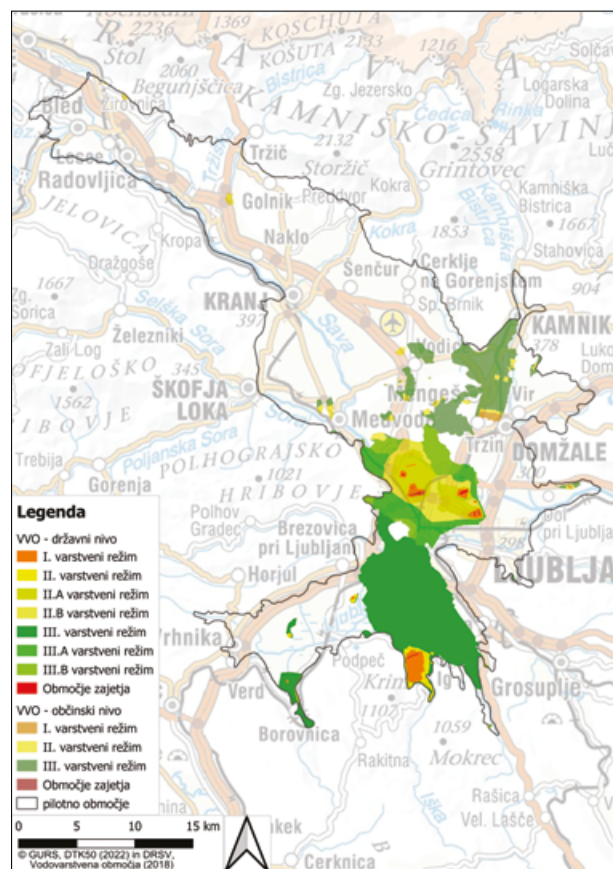




Slika 41: Čistilne naprave na območju Ljubljanske kotline.

Večina vodovarstvenih območij leži v osrednjem in južnem delu Ljubljanske kotline (slika 42). Na pilotnem območju so vodovarstvena območja - državna raven - severno in južno od Ljubljane, proti severovzhodu, med Ljubljano in Kamnikom, pa vodovarstvena območja - občinska raven. Številna manjša vodovarstvena območja najdemo tudi v drugih delih pilotnega območja. Vodovarstvena območja obsegajo skoraj četrtino (24,38 %) Ljubljanske kotline. Od tega občinska raven pokriva 5,64 % območja, državna raven pa 18,74 %. Na obeh ravneh največjo površino zavzame 3. vodovarstveni režim - na občinski ravni kar 4,76 %, na državni pa 13,78 %.

S stališča analize vplivov na vodne vire, zlasti na vire pitne vode, je pomembna pokrovnost tal na vodovarstvenih območjih. To analizo lahko, tako kot analizo za celotno območje Ljubljanske kotline, razdelimo na posamezne hierarhične ravni (od



Slika 42: Vodovarstvena območja v Ljubljanski kotlini.

CLC 1 do CLC 3). Prav tako lahko na vodovarstvenih območjih primerjamo časovno odvisno spreminjanje dejavnosti.

Leta 2018 so na prvi ravni (CLC 1) največ vodovarstvenih območij pokrivala kmetijske površine. Na Ljubljanskem polju so kmetijske površine na vodovarstvenih območjih, določenih z državno uredbo, pokrivali 55 %, po starih občinskih uredbah pa 52 % površine. Pri državnih uredbah se na drugo mesto s 32 % celotne površine vodovarstvenega območja uvrstijo umetne površine, najmanj (13 %) pa je gozdnih in deloma ohranjenih naravnih površin. Na ravni občinskih uredb umetne površine obsegajo manjši delež kot na državni ravni, 17 %, gozdne in deloma ohranjene naravne površine pa večji delež, in sicer 31 %.

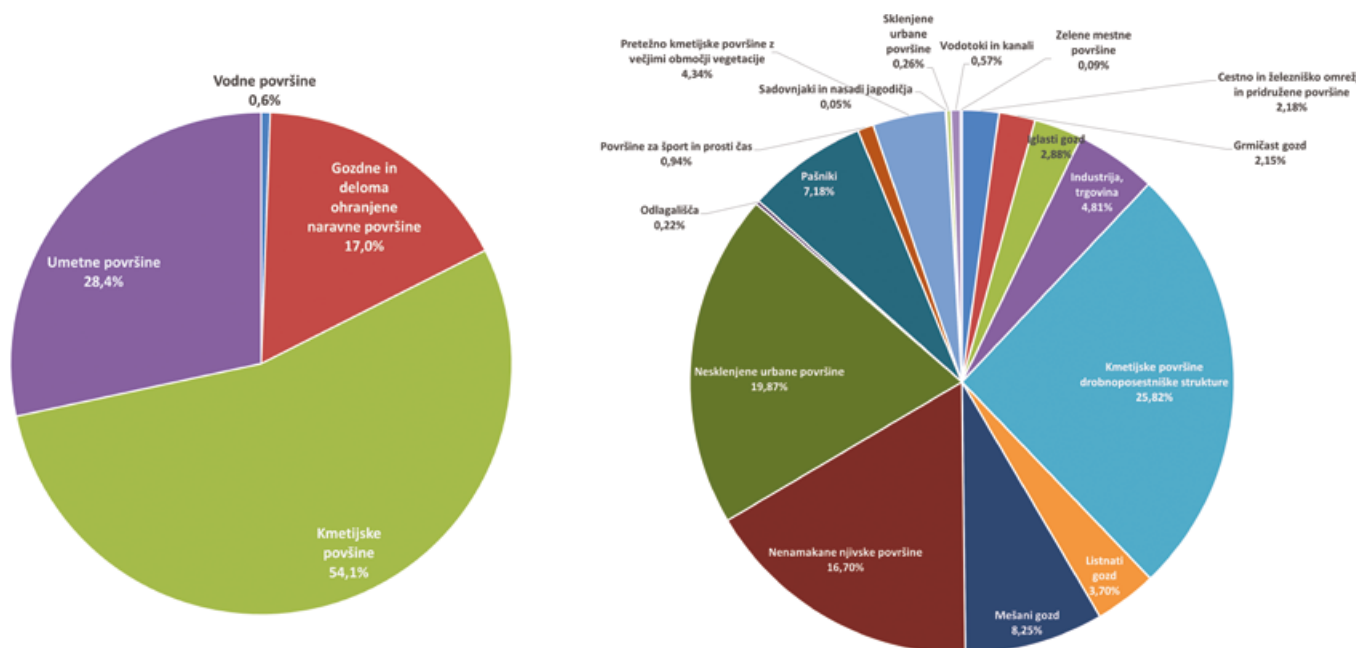
Leta 2018 so na tretji ravni (CLC 3) največji del vodovarstvenih območij prekrivali kmetijske po-

vršine. Na Ljubljanskem polju so kmetijske površine drobnoposestniške strukture na vodovarstvenih območjih, določenih z državno uredbo, prekrivale največjo površino (30 %), z 22 % jim sledijo neskle-njene urbane površine in z 12 % nenamakane njivske površine. Na ravni občinskih uredb največjo površino, 34 %, pokrivajo nenamakane njivske površine, sledi jim mešani gozd (14 %) in neskle-njene urbane površine (13 %). Največje razlike v deležu površine med državnimi in občinskimi ured-bami so pri nenamakanih njivskih površinah (22 %), kmetijskih površinah drobnoposestniške strukture (18 %), iglastem gozdu (9 %) in nesklenjenih urba-nih površinah (9 %).

Primerjava pokrovnosti tal med letoma 1995 in 2018 za vodovarstvena območja, določena z dr-žavnimi uredbami, pokaže, da razlik na prvi ravn-i (CLC 1) skorajda ni. Nekoliko večje so na tretji ravni (CLC 3), kjer pride do 3 % razlike pri nena-makanih njivskih površinah, 3 % razlike pri kme-tijskih površinah drobnoposestniške strukture in 2 % razlike pri cestnem in železniškem omrežju ter pridruženih površinah.

Če pa med letoma 1995 in 2018 primerjamo pokrov-nost tal na vodovarstvenih območjih na občinski ravni, ugotovimo, da so na prvi ravni (CLC 1) razlike ponovno majhne. Na tretji ravni (CLC 3) pa so priso-tne relativne razlike pri kmetijskih površinah drob-noposestniške strukture, ki so se zmanjšale za 12 %.

Če si vodovarstvena območja ogledamo kot celoto, ne glede na delitev na državno ali občinsko raven, ugotovimo, da so leta 2018 na prvi ravni pokrovnosti tal (CLC 1) največji del (54 % ali površino 107 km<sup>2</sup>) vodovarstvenih območij zavzemale kmetijske po-vršine. Sledijo umetne površine, ki pokrivajo 28 %, in gozdne površine, ki pokrivajo 17 % vodovarstve-nih območij. Na tretji ravni (CLC 3) največjo po-vršino (26 %), kar ustreza 51 km<sup>2</sup> vodovarstvenih območij, zavzemajo kmetijske površine drob-noposestniške strukture. Z 20 % površine sledijo nesklenjene urbane površine in s 17 % nenamakane njivske površine. Vsak od preostalih podrazredov pokriva manj kot 10 % površine vodovarstvenih ob-močij v Ljubljanski kotlini (slika 43).



Slika 43: Deleži pokrovnosti tal na vodovarstvenih območjih Ljubljanske kotline (levo CLC 1, desno CLC 3).



## 4.5 Varovana območja s pravnim statusom

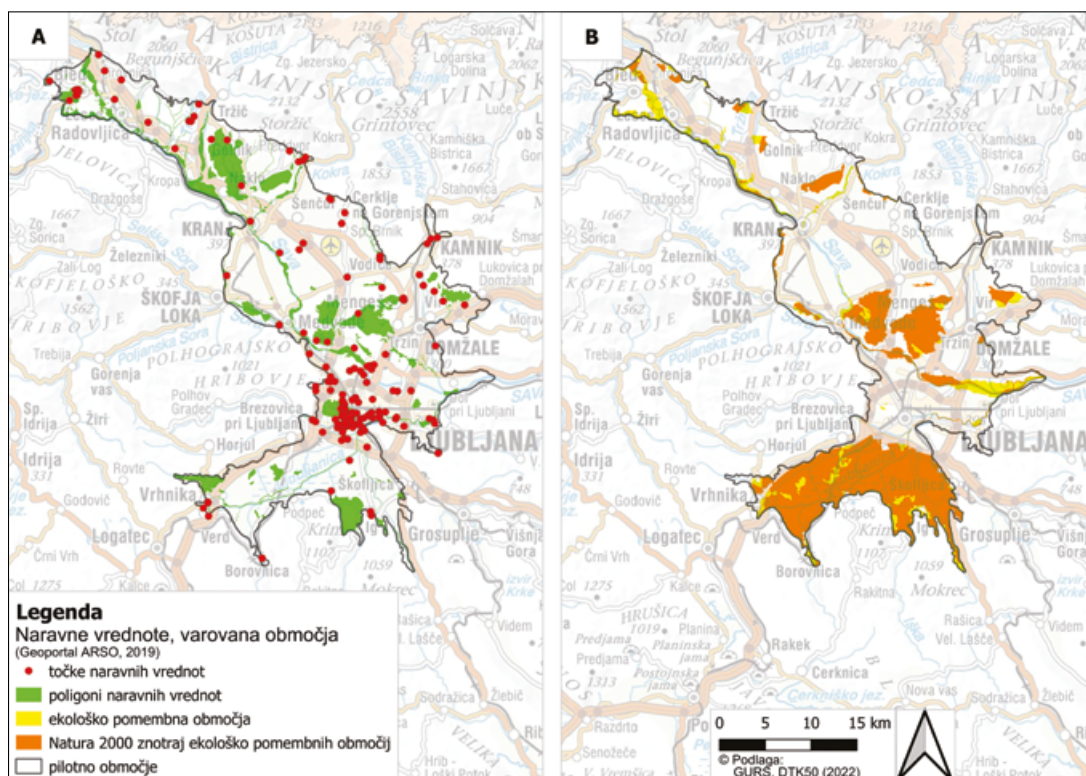
S stališča varovanja vodnih virov in vodnega okolja je pomembna tudi analiza drugih varovanih območij s pravnim statusom. Sem uvrščamo naravne vrednote, ekološko pomembna območja in Naturo 2000 (slika 44).

Naravne vrednote na pilotnem območju vključujejo vse naravne pojave, ki so v Sloveniji razumljeni kot naravna dediščina ter obsegajo redke, dragocene in znamenite naravne pojave. To so geološki pojavi, kraški pojavi, izviri, barja, mokrišča, reke, geomorfološki pojavi ter rastlinske in živalske vrste. Imajo lahko status državnega ali lokalnega pomena.

Ekološko pomembna območja so območja, ki pomembno prispevajo k ohranjanju biotske raznovrstnosti. Pomembna so pri urejanju prostora in rabi naravnih dobrin. Natura 2000 je evropsko omrežje posebnih varstvenih območij. Namenjena je ohranjanju živalskih in rastlinskih vrst ter habitatov, ki so redki ali ogroženi zaradi človekovih dejavnosti.

Naravne vrednote, ekološko pomembna območja in Natura 2000 skupaj pokrivajo 85,2 % Ljubljanske kotline. Največ, 38,2 %, zavzema Natura 2000, sledijo ji ekološko pomembna območja z 31,4 % in naravne vrednote s 15,5 % površine. Poligoni naravnih vrednot so dokaj enakomerno razporejeni po celotnem območju Ljubljanske kotline, prav tako točke naravnih vrednot. Njihovo večjo zgoštevost je mogoče opaziti le na območju Ljubljane.

Natura 2000 in ekološko pomembna območja se v veliki meri prekrivajo. Največja sklenjena območja Nature 2000 in ekološko pomembnih območij so v južnem delu Ljubljanske kotline, na Ljubljanskem barju, ter v osrednjem delu kotline, severno od Ljubljane, med Ljubljanskim poljem in Kranjsko-Sorškim poljem. Posamezna manjša območja pa najdemo tudi v severnem delu Ljubljanske kotline.

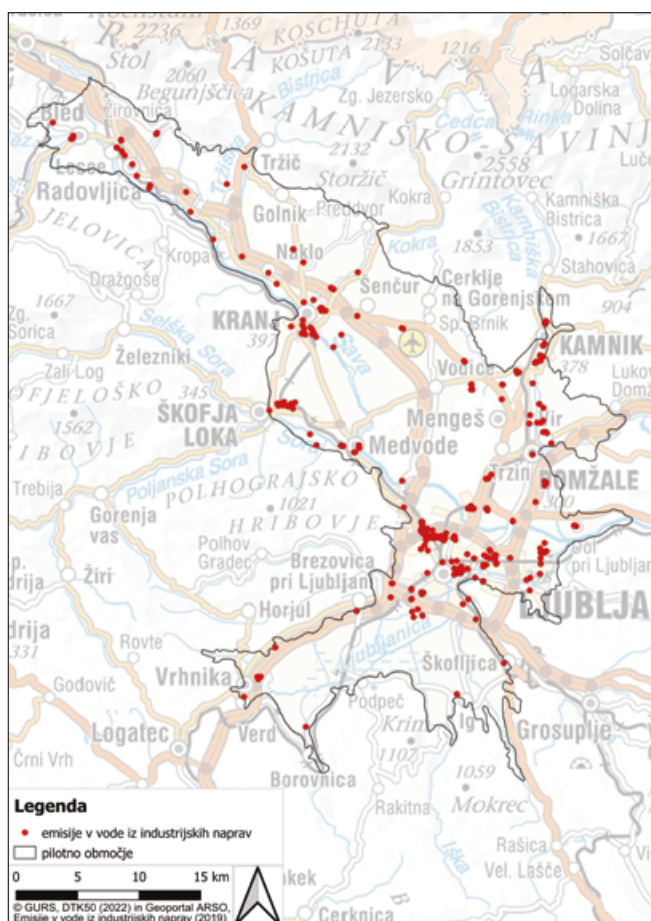


Slika 44: Naravne vrednote, ekološko pomembna območja in Natura 2000 na območju Ljubljanske kotline.

## 4.6 Industrijske in druge obremenitve okolja

### 4.6.1 Viri emisije iz industrije

V Ljubljanski kotlini je 456 točk (slika 45) emisij v vode iz industrijskih naprav, ki so možen vir onesnaženja zaradi dejavnosti, ki jo izvajajo: zdravstvo, farmacija, proizvodnja (motorjev, keramike, hladilnih in prezračevalnih naprav, parfumov, elektronskih komponent ...), turizem, vzdrževanje in popravila motornih vozil, trgovina z motornimi vozili, pralnice in kemične čistilnice ter druge dejavnosti. Večjo gostoto točk z izpusti opazimo v okolici večjih mest (Ljubljana, Kranj, Škofja Loka, Domžale, Kamnik in Radovljica). Na vodovarstvenih območjih bomo našli skupno 169 točk emisij v vode.

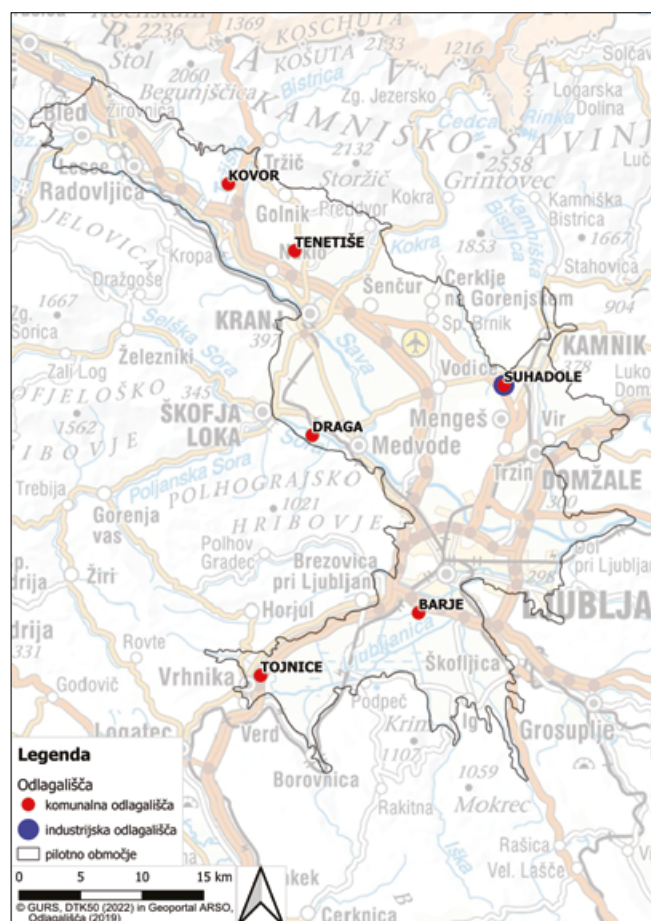


Slika 45: Točke emisij v vode na območju Ljubljanske kotline.

### 4.6.2 Odlagališča odpadkov

V Ljubljanski kotlini leži 6 odlagališč odpadkov (slika 46), ki so enakomerno razporejena po celotnem območju. Od severa proti jugu si tako sledijo Kovor, Tenetiše, Suhadole, Draga, Barje in Tojnice. Vsa odlagališča so opredeljena kot nenevarna komunalna odlagališča, odlagališče Suhadole pa je opredeljeno kot odlagališče inertnih odpadkov.

Odlagališči nenevarnih komunalnih odpadkov Barje in Suhadole ležita na vodovarstvenih območjih: odlagališče Barje na vodovarstvenem območju - državna raven - v III. vodovarstvenem režimu, odlagališče Suhadole pa na vodovarstvenem območju - občinska raven -, prav tako v III. vodovarstvenem režimu.



Slika 46: Odlagališča odpadkov na območju Ljubljanske kotline.

## 5 POJAVLJANJE NOVODOBNIH ONESNAŽEVAL V POVRŠINSKI IN PODZEMNI VODI NA OBMOČJU LJUBLJANSKE KOTLINE

### 5.1 Izhodišča za obravnavo novodobnih onesnaževal

Na območju Ljubljanske kotline smo izvedli pregledno vzorčenje, s katerim smo želeli dobiti splošno sliko pojavljanja novodobnih onesnaževal v celotnem vodnem krogu. Vključili smo vse njegove komponente z izjemo padavinskih vod. Vzorčna mesta lahko razdelimo na tista na površinski vodi in tista na podzemni vodi. Pri slednjih lahko opredelimo še podskupine: vzorčenje izvirov, vzorčenje plitvih podzemnih vod in vzorčenje globokih podzemnih vod.

Kako smo zasnovali vzorčenje na razmeroma velikem območju in glede na pojavljanje posameznih komponent vodnega kroga tudi pestro? Izhajali smo iz cilja, da enakomerno pokrijemo prostor in da pri tem upoštevamo naravne danosti, kot sta potek posameznih vodotokov v prostoru in narava vodonosnikov. Hkrati smo težili k temu, da bi bila naša mreža čim bolj objektivna, zato smo vzorčenje izvedli na vzorčnih točkah, ki so prosto dostopne ali v javni domeni. Na površinskih vodotokih smo do vode in strug dostopali na javno dostopnih mestih. Na podzemnih vodah smo vzorčenje izvajali na mreži opazovalnih vrtin za monitoring, s katero upravlja Agencija RS za okolje, ter na dopolnilni mreži za monitoring podzemne vode, s katero upravlja Javno podjetje VOKA SNAGA, d. o. o., iz Ljubljane. Vzorčenj na vzorčnih mestih, ki so v upravljanju drugih pravnih ali fizičnih oseb, nismo izvajali. Seveda bi si želeli, da bi vzorčenje izvedli na večjem številu vzorčnih mest, ker pa smo bili pri tem omejeni s človeškimi, materialnimi in finančnimi viri, smo vzorčno mrežo zasnovali tako, da smo glede na zmožnosti dobili kar najboljši pregled stanja.

Ker gre za obsežno območje, hkrati pa tudi za izjemno velik nabor potencialnih onesnaževal, smo se raziskav lotili v dveh korakih. Prvi korak, ki smo ga poimenovali seznanitveni korak, je bil usmerjen k ugotavljanju prisotnosti posameznih spojin novodobnih onesnaževal v vodi. Najprej smo želeli ugotoviti, katera novodobna onesnaževala oziroma spojine se pojavljajo v vodah Ljubljanske kotline. V prvem koraku smo uporabljali sistem pasivnega vzorčenja z uporabo aktivnega oglja kot

absorpcijskega sredstva. V drugem koraku, ki smo ga poimenovali določitveni korak, smo se usmerili h kvantitativnemu določanju zaznanih spojin. V določitvenem koraku smo uporabljali sistem aktivnega vzorčenja z zajemom vzorca. Tu nas je zanimalo, kakšne so koncentracije spojin, ki smo jih zaznali v prvem koraku. Takšna razdelitev vzorčenja in analiz je bila nujna, ker sodobne analitske tehnike zahtevajo ciljano določanje koncentracij posameznih raztopljenih snovi. Istočasno ugotavljanje prisotnosti posamezne spojine in določanje njenih koncentracij v posameznem vzorcu bi bilo mnogo zahtevnejše in dolgotrajnejše kot delo v dveh fazah.

Rezultati, ki smo jih pridobili med vzorčenjem in analizami, podajajo splošni pregled o prisotnosti novodobnih onesnaževal v vodah na območju Ljubljanske kotline. Hkrati nam omogočajo nadaljnje korake, s katerimi bomo lahko v prihodnosti bolj ciljano razrešili posamezna odprta vprašanja ter se s podrobnejšim vzorčenjem usmerili na posamezna območja in posamezne skupine spojin, ki sodijo med novodobna onesnaževala.

V nadaljevanju podajamo rezultate naših meritev in vzorčenj na območju Ljubljanske kotline.

### 5.2 Vzorčna mesta

Na območju Ljubljanske kotline je vzorčenje potekalo na sedmih lokacijah površinskih vod in petnajstih lokacijah podzemnih vod.

Pri površinskih vodah smo se osredotočili na reki Savo in Ljubljanico. Obe reki smo opredelili glede na njun dotok in odtok. Poleg rek smo opazovali tudi njune izvire, ki v določeni meri predstavljajo pogoje na robovih Ljubljanske kotline. Tako smo na Savi izvedli vzorčenje na Zelencih, tj. na izviru Save Dolinke, in na Savici, izviru Save Bohinjke. Izviri so hkrati točke vzorčenja podzemnih vod. Ker so nas zanimali vplivi na robovih Ljubljanske kotline in stanje v visokogorju, smo enkratno vzorčenje izvedli še na območju reke Radovne; opazovali smo

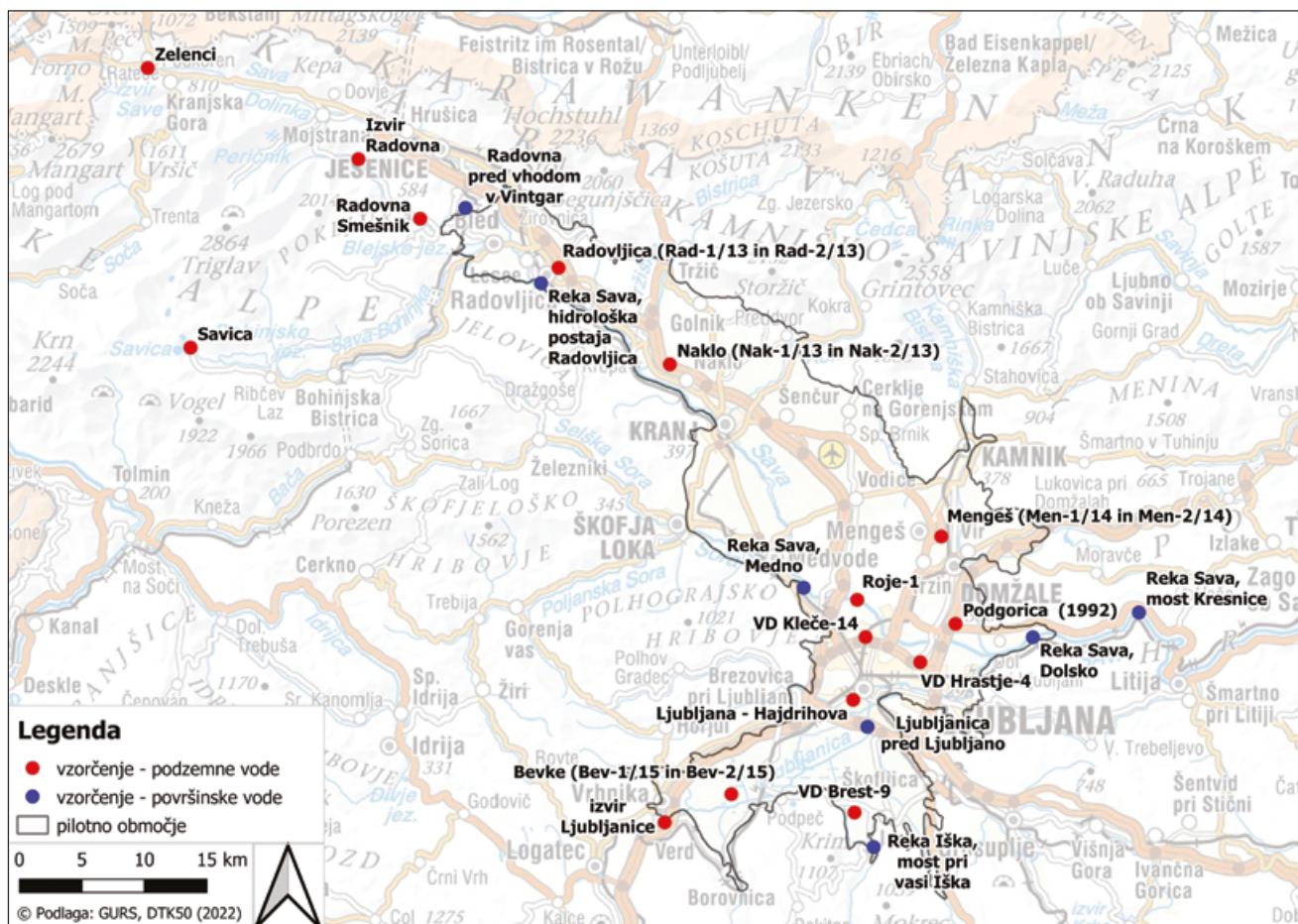


izvir Radovne v Zgornji Radovni, enega od številnih izvirov na bokih doline Radovne (izvir Smešnik) in Radovno pred njenim iztokom v Savo Dolinko.

Podobno smo zasnovali vzorčenje Ljubljance. Vzorčili smo vodo neposredno pod izviri v sistemu Velike Ljubljance ter vodo, ki doteka po strugi reke Iške iz Iškega vintgarja na južnem robu Ljubljanskega barja. Na Savi smo vzorčenje izvedli še na treh točkah vzdolž toka po Ljubljanski kotlini, na sotočju Save Bohinjke in Save Dolinke, na vzorčni točki pri Mednem in na iztoku Save iz Ljubljanske kotline (Sava pri Dolskem ali Sava pri mostu v Kresnicah). Točki v Mednem in na Dolskem sta bili določeni z namenom opazovati vpliv mesta Ljubljane. Točka v Mednem je gorvodna in leži nad Ljubljano, točka v Dolskem pa je dolvodna in leži pod Ljubljano. Podobno smo ravnali na Ljubljanci. Vzorčno točko smo postavili pred Ljubljano. Pri

opisovanju vzorčenja na površinskih vodotokih je treba opozoriti še na en problem. Pasivne vzorčevalnike je težko zavarovati; nekatere nam je odnesla visoka voda, pasivni vzorčevalnik na Savi pri Dolskem pa je bil večkrat namerno poškodovan s strani tretje osebe, zato smo morali vzorčno mesto na Savi pri Dolskem prestaviti na most pri Kresnicah.

Pri zasnovi vzorčenja podzemnih vod smo izhajali iz narave vodonosnikov in iz dejstva, da so ti vodonosniki razmeroma obsežni in z debelim omočenim (freatičnim) območjem. Tako smo tam, kjer je bilo mogoče, ločili plitvo in globoko podzemno vodo. Tako je zasnovana mreža Agencije RS za okolje (vzorčne točke Bevke, Radovljica, Naklo in Mengeš). V vzorčni mreži Javnega podjetja VOKA SNAGA, d. o. o., pa smo opazovali celoten vodni stolpec podzemne vode (vzorčna mesta Roje,



Slika 47: Vzorčne točke na površinskih in podzemnih vodah Ljubljanske kotline.



Podgorica, Kleče, Hajdrihova-mesto in Brest), v skladu s konstrukcijo posamezne opazovalne vrtine. Kot bomo videli pri prikazu rezultatov, je razlikovanje med plitvo in globoko podzemno vodo ter celotnim vodnim stolpcem zelo pomembno za razumevanje porazdelitve novodobnih onesnaževal v podzemni vodi. Vzorčna mesta so prikazana na karti (slika 47).

### 5.3 Potek vzorčenja

Vzorčenje površinskih in podzemnih vod je na celotnem območju Ljubljanske kotline potekalo s pasivnim in aktivnim vzorčenjem.

#### 5.3.1 Pasivno vzorčenje

Pasivno vzorčenje poteka s posebno vrsto vzorčevalnikov z aktivnim ogljem, ki je močno sorpcijsko sredstvo. Aktivno oglje je vstavljeno v ovoj iz nerjavečega jekla in z jekleno vrvjo pritrjeno na vzorčnem mestu (slika 48). Tako jeklena vrv kot vzorčevalni ovoj se pred izpostavitvijo na terenu prežarita v peči. Pasivni vzorčevalnik za daljši čas izpostavimo v površinsko ali podzemno vodo. V času izpostavljenosti pasivnega vzorčevalnika se na aktivno oglje sorbirajo spojine v vodi. Voda teče čez pasivni vzorčevalnik, zaradi česar je vzorčevalnik ves čas izpostavljenosti v stiku z velikimi količinami vode, v vodi raztopljene snovi pa se nanj postopoma akumulirajo. Akumulacija spojin traja ves čas izpostavljenosti vzorca. Po pre-



Slika 48: Pribor za pasivno vzorčenje.

teku vzorčevanja pasivni vzorčevalnik odstranimo, nato pa v laboratoriju aktivno oglje posušimo pri temperaturi do 100 °C. Adsorbirane spojine se v nadaljevanju eluirajo iz aktivnega oglja z diklorometanom v ultrazvočni kopeli. Sledi analiza eluata z analitsko metodo GC-MS (plinska kromatografija z masno spektrometrijo). S to analitsko metodo lahko zaznamo veliko zelo različnih spojin, ki imajo višjo hlapnost od diklorometana, vključno z benzenom in dikloroetenom. Zaznati je mogoče tudi manj hlapne spojine, kot je holesterol (Auer-sperger in sodelavci, 2011).

Pasivno vzorčenje nam omogoča kvalitativno določitev prisotnosti posameznih spojin. Takšno vzorčenje je seznanitveni korak pred nadaljnjo izvedbo aktivnega vzorčenja, ki je namenjeno kvantitativnemu določanju koncentracij raztopljenih snovi. Omogoča nam, da se v nadaljnji analizi ciljano usmerimo na posamezne spojine (analite). Zaradi visoke sorpcijske kapacitete aktivnega oglja so sorbirane spojine celota vseh spojin, ki so bile v času izpostavljenosti pasivnega vzorčevalnika v vodi. Posamezna spojina je lahko v vodi ves čas vzorčenja, lahko pa se pojavi le v omejenem časovnem obdobju. S tako zasnovanim vzorčenjem lahko ugotavljamo samo prisotnost spojine, ne pa tudi časovne komponente njenega pojavljanja.

Pasivne vzorčevalnike smo namestili na vzorčnih mestih v površinskih in podzemnih vodah. Z njimi smo izvedli dve vzorčenji. Prvo vzorčenje se je pričelo novembra in decembra 2019 ter se zaključilo maja 2020. Pasivni vzorčevalniki so bili v vodi skoraj pol leta. Drugo vzorčenje se je pričelo oktobra 2020 in se zaključilo februarja 2021. Pri drugem vzorčenju so bili pasivni vzorčevalniki izpostavljeni pet mesecev. Pasivne vzorčevalnike je pripravil in vgradilo Javno podjetje VOKA SNAGA, d. o. o. Prav tako je bila prisotnost spojin v eluatu določena v analitskem laboratoriju tega podjetja.

#### 5.3.2 Aktivno vzorčenje

Aktivno vzorčenje je vzorčenje trenutnega stanja na vzorčnem mestu. Gre za enkratni kvantitativni presek stanja analiziranih spojin (analitov). Vzorce za analize zajamemo v embalažo, ki jo za ta namen predhodno pripravimo v laboratoriju. La-

boratorij določi tudi način in obseg odvzema vzorcev. Ker vzorčimo za potrebe določanja spojin v zelo nizkih koncentracijah, je potrebna velika pazljivost (slika 49). Oseba, ki izvaja neposredno vzorčenje, ne sme jemati zdravil in kaditi, pred vzorčenjem pa ne sme použiti snovi, ki jih določamo z analizami (na primer kava in pravi čaj zaradi prisotnosti kofeina).

Tudi aktivno vzorčenje je potekalo na površinskih in podzemnih vodah. Pri vzorčenju so sodelovali sodelavci Naravoslovnotehniške fakultete in Javnega podjetja VOKA SNAGA, d. o. o., ki so vzorčenje vodili. Pri vzorčenju podzemne vode so bili prisotni tudi predstavniki Agencije RS za okolje in v nekaterih primerih predstavniki Fakultete za farmacijo (FFA) Univerze v Ljubljani.

Frekvenca aktivnega vzorčenja se je razlikovala od vzorčnega mesta do vzorčnega mesta. Največ vzorcev je bilo odvzetih na površinskih vodotokih (Ljublanica pred Ljubljano, Sava Medno in Sava Dolsko, slika 50). To vzorčenje je potekalo v okviru primerjalne analize na ravni celotnega projekta boDEREC-CE. Na ostalih vzorčnih mestih je bilo aktivno vzorčenje opravljeno dvakrat, oktobra 2020 in junija 2021; na nekaterih vzorčnih mestih izjemoma le enkrat, junija 2021.

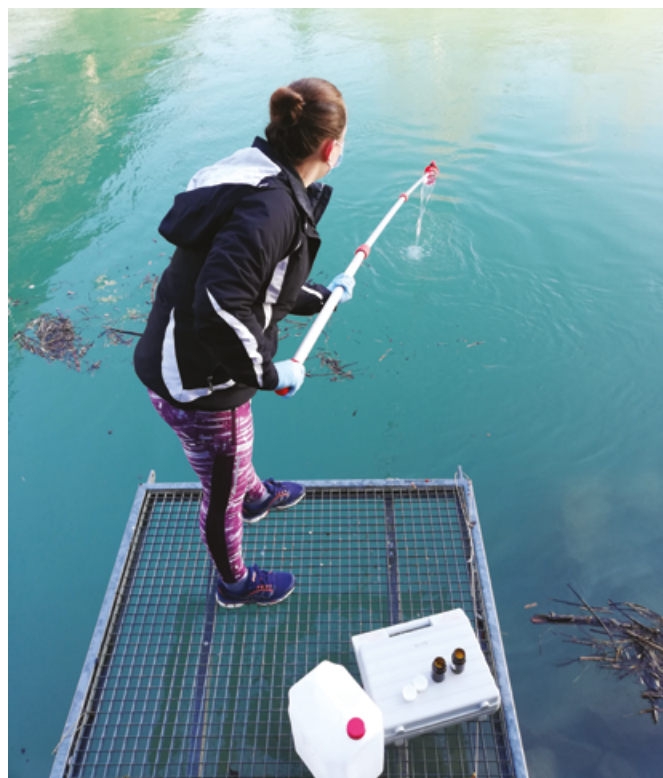


Slika 49: Aktivno vzorčenje pri Mengšu.

### 5.3.3 Analitika

Koncentracije novodobnih onesnaževal so bile določene v treh laboratorijih, prvi je laboratorij ustanove Povodí Vltavy v okviru Oddelka za organske analize v Plznu na Češkem. V tem laboratoriju so merili le spojine v površinskih vodah ter po en vzorec podzemne vode iz vzorčnih točk v Klečah, Hrastju in Brestu. Analize površinske in podzemne vode so bile izvedene v laboratoriju Javnega podjetja VOKA SNAGA, d. o. o., in laboratoriju Fakultete za farmacijo Univerze v Ljubljani.

Ker so pri analizah sodelovali trije laboratoriji, je bila izvedena delna medlaboratorijska primerjava, pa tudi analize podvojenih vzorcev in slepih laboratorijskih vzorcev. Ker pa so laboratoriji merili različne analite, je bila primerjava izvedena le zanje in ne za celoten niz določenih spojin. Podrobnosti primerjav presegajo namen tega besedila, pokazale pa so na dobro medsebojno ujemanje in visoko kakovost analiz.



Slika 50: Aktivno vzorčenje na vzorčni točki Sava Medno.

## 5.4 Rezultati vzorčenja

### 5.4.1 Izhodišča za interpretacijo

Izvedeno vzorčenje je podalo obsežen niz podatkov, ki jih je treba pregledno prikazati in interpretirati. Interpretacija rezultatov pasivnega vzorčenja temelji na skupnem prikazu opaženih spojin po posameznih vzorčenih medijih (površinska voda in podzemna voda) in glede na pogostost pojavljanja posameznih spojin prav tako glede na vzorčene medije. Pri prikazu rezultatov aktivnega vzorčenja smo rezultate prav tako podali po posameznih skupinah, pri čemer smo upoštevali še njihove koncentracije.

Vzorci, odvzete pri aktivnem vzorčenju, smo posredovali v tri analize laboratorije. V vseh treh je bila za meritve uporabljena tekočinska kromatografija, sklopljena z masno spektrometrijo, LC-MS/MS. Določitve nekaterih spojin so bile opravljene v vseh treh laboratorijih, nekatere spojine pa le v posameznem laboratoriju. V laboratorij v Plzen smo posredovali predvsem vzorce površinskih vod, za katere smo pričakovali nekoliko višje koncentracije novodobnih onesnaževal, ker ta laboratorij uporablja analize metode, ki imajo razmeroma visoke meje kvantifikacije spojin (LOQ). Ostala laboratorija sta se osredotočila predvsem na podzemne vode. Tudi ta laboratorija se med seboj razlikujeta. Laboratorij Fakultete za farmacijo je v veliki meri osredotočen na analize zdravilnih učinkovin, medtem ko je laboratorij Javnega podjetja VOKA SNAGA, d. o. o., pretežno usmerjen v določanje koncentracij različnih fitofarmaceutskih sredstev in onesnaževal urbanega izvora. Tudi to je v veliki meri povezano z uporabljenimi analiznimi metodami. Laboratoriji, ki so izvajali analize, se med seboj dopolnjujejo, saj uporabljene analize metode še vedno ne pomenijo vsakodnevne analize rutine. Prav tako nam dodaten vpogled v naravo pojavljanja novodobnih onesnaževal omogočajo rezultati pasivnega vzorčenja. Ti so podali širok nabor spojin, ki pa jih prav zaradi zahtevnosti analiznih metod kasneje nismo kvantitativno merili.

### 5.4.2 Pasivno vzorčenje

V preglednicah 2 in 3 je prikazano število zaznanih spojin na posameznem vzorčnem mestu podzemne in površinske vode. V podzemni vodi je bilo največ različnih spojin (66) zaznanih v plitvi vrtini MEN-2/14, najmanj (12) pa v vrtini VD Brest-9. S pasivnim vzorčenjem površinskih vod je bilo ugotovljeno, da se največ, kar 133, različnih spojin pojavlja na Savi pri mostu Kresnice, najmanj (32) pa na Savici pod njenim izvirom, v bližini mostu pri koči pri Savici.

Glede na naravo vodnega kroga ter glede na pričakovano pot in usodo novodobnih onesnaževal je pričakovano, da je njihovo število višje kot v podzemnih vodah. Prav tako ni nič presenetljivega, da se vzdolž toka povečuje. Na Savi je najnižje pod izvirom Savice, nato pa se vzdolž toka, od Radvljice in Medna do Save pri Kresnicah, postopoma povečuje. Od tega prostorskega trenda nekoliko odstopajo rezultati vzorčenja pod Zelenci, kar pa je razumljivo, saj je njihova okolica dokaj gosto poseljena, na območju pa potekajo številne dejavnosti. Drugačno sliko zasledimo na Ljubljani. Izviri Ljubljane imajo široko napajalno zaledje na kraških poljih Notranjske in Pivškega, kjer je poselitev prav tako razmeroma gosta, prisotnih pa je tudi veliko drugih dejavnosti. Zaradi tega je razlika med vzorcema razmeroma majhna. Glede na zaledje Iške pa je število zabeleženih spojin presenetljivo.

Prav tako je pričakovano, da bo zaradi naravnih danosti vodonosnikov število zabeleženih spojin manjše v podzemnih vodah. Poleg tega se je pokazala še dodatna značilnost, da so bolj onesnažene plitvejšše vode kot vode v globljih predelih vodonosnikov.

Razmerja v številu zaznanih spojin med površinsko in podzemno vodo so razvidna tudi iz grafa na sliki 51. Število spojin v površinski vodi močno prevladuje.

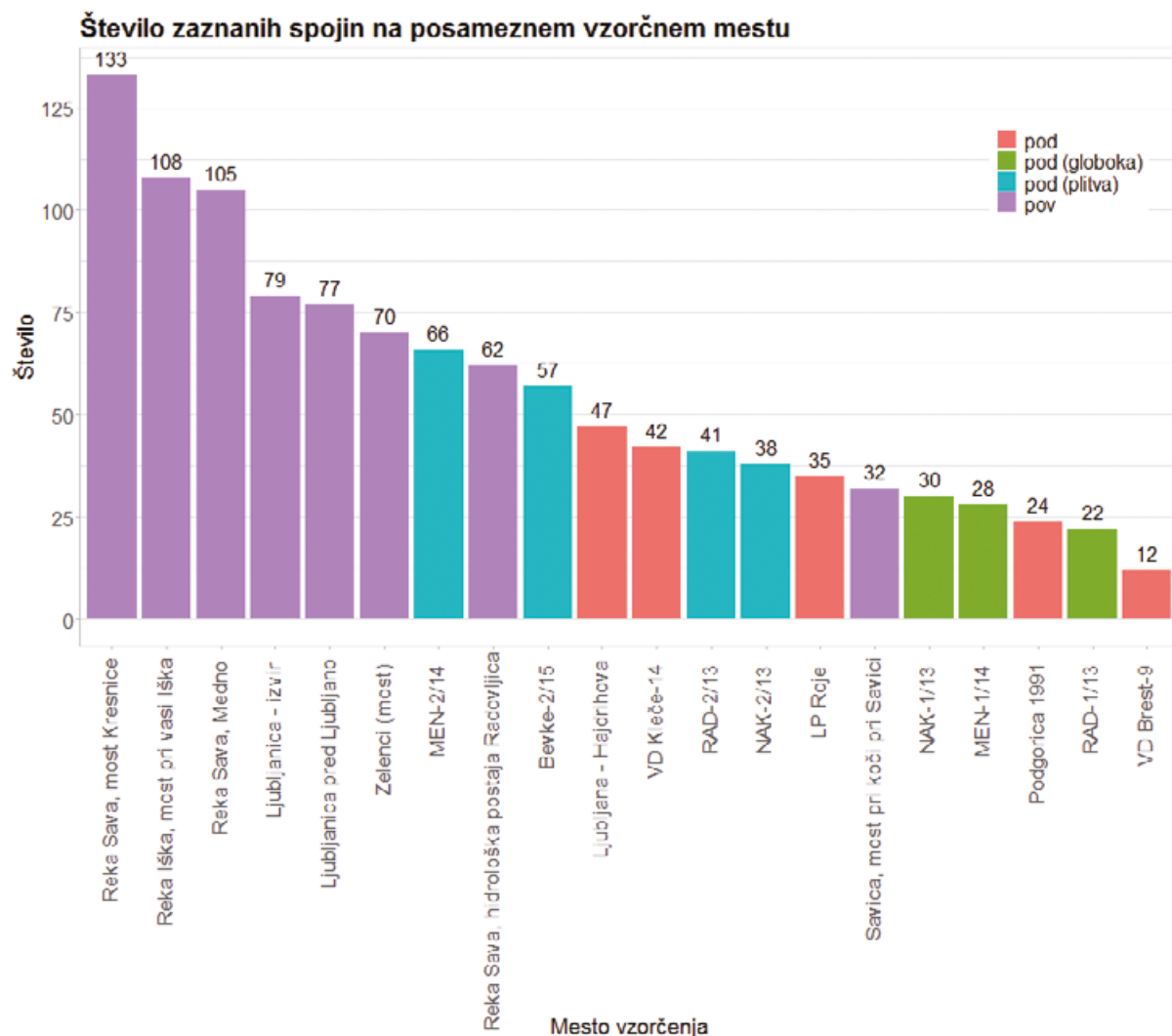
*Preglednica 2: Število zaznanih spojin na vzorčnih mestih površinske vode.*

| Mesto vzorčenja                     | Število spojin |
|-------------------------------------|----------------|
| Sava, most Kresnice                 | 133            |
| Iška, most pri vasi Iška            | 108            |
| Sava, Medno                         | 105            |
| Ljubljana - izvir                   | 79             |
| Ljubljana pred Ljubljano            | 77             |
| Zelenci, most                       | 70             |
| Sava, hidrološka postaja Radovljica | 62             |
| Savica, most pri koči pri Savici    | 32             |

*Preglednica 3: Število zaznanih spojin na vzorčnih mestih podzemne vode.*

| Mesto vzorčenja        | Globina         | Število spojin |
|------------------------|-----------------|----------------|
| MEN-2/14               | plitva          | 66             |
| Bev-2/15               | plitva          | 57             |
| Ljubljana - Hajdrihova | celoten stolpec | 47             |
| VD Kleče-14            | celoten stolpec | 42             |
| RAD-2/13               | plitva          | 41             |
| NAK-2/13               | plitva          | 38             |
| Roje (V-1)             | celoten stolpec | 35             |
| NAK-1/13               | globoka         | 30             |
| MEN-1/14               | globoka         | 28             |
| Podgorica 1992         | celoten stolpec | 24             |
| RAD-1/13               | globoka         | 22             |
| VD Brest-9             | celoten stolpec | 12             |





Slika 51: Število različnih zaznanih spojin na vzorčnih mestih površinske (pov) in podzemne vode (pod).

Pri analizi prisotnosti novodobnih onesnaževal se najprej zastavita vprašanji, katera novodobna onesnaževala se v vodnem krogu največkrat pojavljajo in kakšen je izvor teh spojin. Preglednica 4 prikazuje spojine, ki so bile zaznane več kot 10-krat, v podzemni in površinski vodi skupaj. Ta seštevek je podan glede na celoten nabor izvedenega pasivnega vzorčenja. Največkrat (26-krat) se je v vzorcih pojavila spojina 3-etil-4-metil-1H-pirol-2,5-dion. To je spojina, ki ji ne znamo natančno določiti izvora, lahko se pojavlja v naravi, bolj kot to pa je indikator odpadnih vod. Po pogostosti sledi desetilatrazin, ki je transformacijski produkt herbicida atrazina; v vzorcih se je pojavil 19-krat. Z 18 določitvami sledita spojinama N,N'-dimetilimidazolin-

trion in tetrakloroeten. Prva je metabolni produkt kofeina, ki ga vsebuje vsem tako priljubljena kava in pravi čaji, pogosto pa ga dodajamo v prehranska dopolnila in zdravila. Kofein je eno od zelo pogostih poživil, katerega raba je razširjena po vsem svetu. Prav zaradi široke uporabe se pogosto pojavlja v odpadnih in drugih urbanih vodah. Kofein in njegovi številni transformacijski produkti so indikator onesnaženja z odpadnimi vodami, predvsem prenikanja iz kanalizacijskih sistemov, pa tudi drugih vplivov na podzemne in površinske vode (Jamnik in sodelavci, 2009). Druga spojina je organsko topilo, ki ima zelo širok nabor uporabe, najpogosteje pa ga uporabljamo pri kemičnem čiščenju in kot industrijsko topilo.

Preglednica 4: Spojine, ki se v vseh vzorcih pojavijo vsaj 10-krat.

| Ime spojine                      | Izvor spojine                                                  | Število pojavitev |
|----------------------------------|----------------------------------------------------------------|-------------------|
| 3-etil-4-metil-1H-pirol-2,5-dion | naravna spojina, arome, sestavina odpadne vode                 | 26                |
| desetilatratin                   | transformacijski produkt herbicida atrazina                    | 19                |
| N,N'-dimetilimidazolin-trion     | metabolit kofeina                                              | 18                |
| tetrakloroeten                   | kemično čiščenje, razmaščevanje, industrijsko topilo           | 18                |
| atrazin                          | herbicid                                                       | 17                |
| etilbenzen                       | nafta, topilo                                                  | 17                |
| izomeri trimetilbenzena          | naftni derivati                                                | 17                |
| m- + p-ksilen                    | naftni derivati, kem. intermediat                              | 17                |
| trikloroeten                     | kemično čiščenje, razmaščevanje, industrijsko topilo           | 17                |
| o-ksilen                         | naftni derivati, kemični intermediat                           | 16                |
| 2,6-dimetoksikinon               | razpad lesa                                                    | 15                |
| holesterol                       | hormon, gnojevka, greznice, kanalizacija                       | 15                |
| žveplo S8                        | nafta, gume, redukcija sulfata                                 | 15                |
| desetilterbutilazin              | transformacijski produkt herbicida terbutilazina               | 14                |
| 2-metil-2H-benzotriazol          | protikorozijska sredstva, herbicidni in antimikrobni pripravki | 13                |
| benzen                           | naftni derivati                                                | 12                |
| kofein                           | urbane odpadne vode                                            | 12                |
| N-butylbensulfonamid             | plastifikator, kem. intermediat, metabolit klorobenzenov       | 11                |
| benzonitril                      | kozmetika, kemični intermediat                                 | 11                |
| fitol                            | naravna spojina                                                | 11                |
| p-benzokinon                     | produkt dezinfekcije                                           | 11                |

V podzemni vodi sta bila največkrat, 14-krat, zaznana herbicid atrazin in njegov transformacijski produkt desetilatratin (preglednica 5). Prav tako kot v celotnem nizu je pogost tudi 3-etil-4-metil-1H-pirol-2,5-dion.

V površinski vodi sta bila največkrat, prav tako 14-krat, zaznana 2,6-dimetoksikinon in 3-etil-4-metil-1H-pirol-2,5-dion (preglednica 6). Prva spojina je rezultat razpada lesa v vodnem okolju. Njeno pojavljanje v površinskih vodah je posledica plavljenja lesa, ki pada v vodotok, ter stika rečne vode z obrežnim rastjem.

Preglednica 5: Spojine, ki se v vzorcih podzemne vode pojavijo vsaj 10-krat.

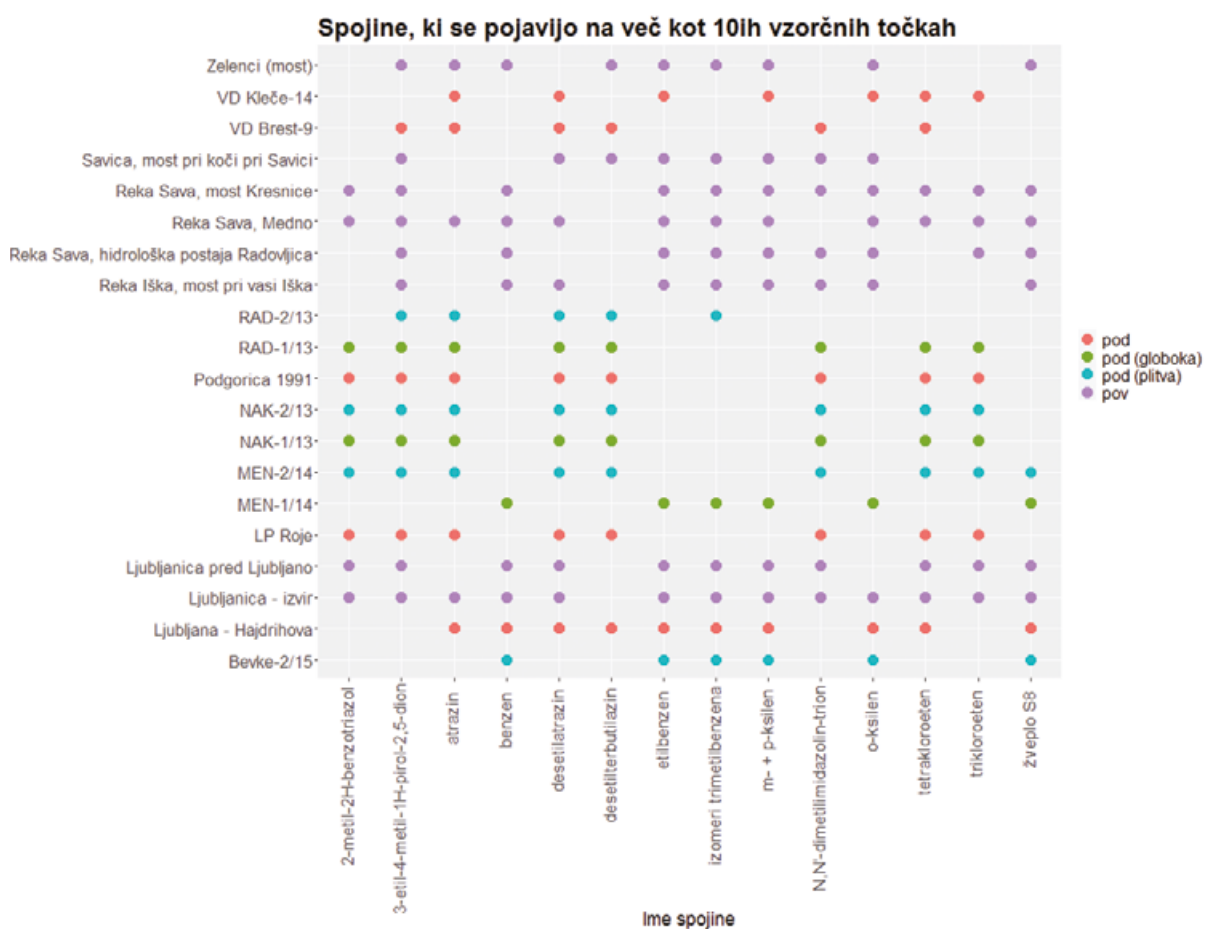
| Ime spojine                      | Izvor spojine                                        | Število pojavitev |
|----------------------------------|------------------------------------------------------|-------------------|
| atrazin                          | herbicide                                            | 14                |
| desetilatrazin                   | transformacijski produkt herbicida atrazina          | 14                |
| 3-etil-4-metil-1H-pirol-2,5-dion | naravna spojina, arome, sestavina odpadne vode       | 12                |
| desetilterbutilazin              | transformacijski produkt herbicida terbutilazina     | 12                |
| tetrakloroeten                   | kemično čiščenje, razmaščevanje, industrijsko topilo | 12                |
| N,N'-dimetilimidazolin-trion     | metabolit kofeina                                    | 10                |
| trikloroeten                     | kemično čiščenje, razmaščevanje, industrijsko topilo | 10                |

Preglednica 6: Spojine, ki se v vzorcih površinske vode pojavijo vsaj 10-krat.

| Ime spojine                      | Izvor spojine                                  | Število pojavitev |
|----------------------------------|------------------------------------------------|-------------------|
| 2,6-dimetoksikinon               | razpad lesa                                    | 14                |
| 3-etil-4-metil-1H-pirol-2,5-dion | naravna spojina, arome, sestavina odpadne vode | 14                |
| holesterol                       | hormon, gnojilka, greznice, kanalizacija       | 13                |
| etilbenzen                       | nafta, topilo                                  | 12                |
| m- + p-ksilen                    | naftni derivati, kem. intermediat              | 12                |
| fitol                            | naravna spojina                                | 11                |
| izomeri trimetilbenzena          | naftni derivati                                | 11                |
| kofein                           | urbane odpadne vode                            | 11                |
| o-ksilen                         | naftni derivati, kemični intermediat           | 11                |
| p-benzokinon                     | produkt dezinfekcije                           | 10                |
| žveplo S8                        | nafta, gume, redukcija sulfata                 | 10                |

Če smo si predhodno ogledali zbirno število vseh spojin, si sedaj oglejmo, kako je s porazdelitvijo novodobnih onesnaževal glede na vzorčne točke. Na največ, kar na 16 od skupno 20, vzorčnih točkah je bil zaznan 3-etil-4-metil-1H-pirol-2,5-dion. Sledi mu desetilatrazin, ki se je pojavil na petnajstih različnih vzorčnih točkah. Iz preglednice 7 so razvidne tudi preostale spojine, ki so se pojavile na več kot desetih vzorčnih točkah. Dodatno ponazoritev porazdelitve novodobnih onesnaževal v prostoru podaja graf na sliki 52, ki prikazuje, na katerih vzorčnih točkah se je posamezna spojina pojavila, različne barve točk pa prikazujejo, ali je bila zaznana v površinski ali podzemni vodi. Na vseh osmih vzorčnih točkah površinske vode so bili zaznani 2,6-dimetoksikinin, 3-etil-4-metil-1H-pi-

rol-2,5-dion, etilbenzen, izomeri trimetilbenzena in m- + p-ksilen. Etilbenzen najdemo v nafti, v industriji pa ga uporabljajo kot topilo. Podobno je z drugima dvema spojinama, ki izhajata predvsem iz naftnih derivatov. Na desetih od skupno dvanajstih vzorčnih točk podzemne vode pa sta bila zaznana herbicid atrazin in njegov transformacijski produkt desetilatrazin. Tako pogosto pojavljanje atrazina je nekoliko nenavadno, saj je to fitofarmacevtsko sredstvo v Sloveniji prepovedano že od leta 2002. To nakazuje na njegovo veliko odpornost in mobilnost, morda pa tudi na nedovoljeno uporabo. Čeprav v Sloveniji razpolagamo z veliko meritvami prisotnosti atrazina in desetilatrazina, bi bilo treba njegovo obnašanje v vodnem okolju še podrobneje raziskati.



Slika 52: Pojavljanje posameznih spojin na vzorčnih točkah podzemne (pod) in površinske (pov) vode.



Preglednica 7: Število vzorčnih točk, na katerih se pojavlja posamezna spojina.

| Ime spojine                      | Izvor spojine                                                  | Število vzorčnih točk |
|----------------------------------|----------------------------------------------------------------|-----------------------|
| 3-etil-4-metil-1H-pirol-2,5-dion | naravna spojina, arome, sestavina odpadne vode                 | 16                    |
| desetilatrazin                   | transformacijski produkt herbicida atrazina                    | 15                    |
| N,N'-dimetilimidazolin-trion     | metabolit kofeina                                              | 13                    |
| atrazin                          | herbicid                                                       | 13                    |
| tetrakloroeten                   | kemično čiščenje, razmaščevanje, industrijsko topilo           | 13                    |
| etilbenzen                       | nafta, topilo                                                  | 12                    |
| izomeri trimetilbenzena          | naftni derivati                                                | 12                    |
| m- + p-ksilen                    | naftni derivati, kem. intermediat                              | 12                    |
| trikloroeten                     | kemično čiščenje, razmaščevanje, industrijsko topilo           | 12                    |
| desetilterbutilazin              | transformacijski produkt herbicida terbutilazina               | 11                    |
| o-ksilen                         | naftni derivati, kemični intermediat                           | 11                    |
| žveplo S8                        | nafta, gume, redukcija sulfata                                 | 11                    |
| 2-metil-2H-benzotriazol          | protikorozijska sredstva, herbicidni in antimikrobni pripravki | 10                    |
| benzen                           | naftni derivati                                                | 10                    |
| 2-metil-2H-benzotriazol          | protikorozijska sredstva, herbicidni in antimikrobni pripravki | 13                    |
| benzen                           | naftni derivati                                                | 12                    |
| kofein                           | urbane odpadne vode                                            | 12                    |
| N-butylbensulfonamid             | plastifikator, kem. intermediat, metabolit klorobenzenov       | 11                    |
| benzonitril                      | kozmetika, kemični intermediat                                 | 11                    |
| fitol                            | naravna spojina                                                | 11                    |
| p-benzokinon                     | produkt dezinfekcije                                           | 11                    |

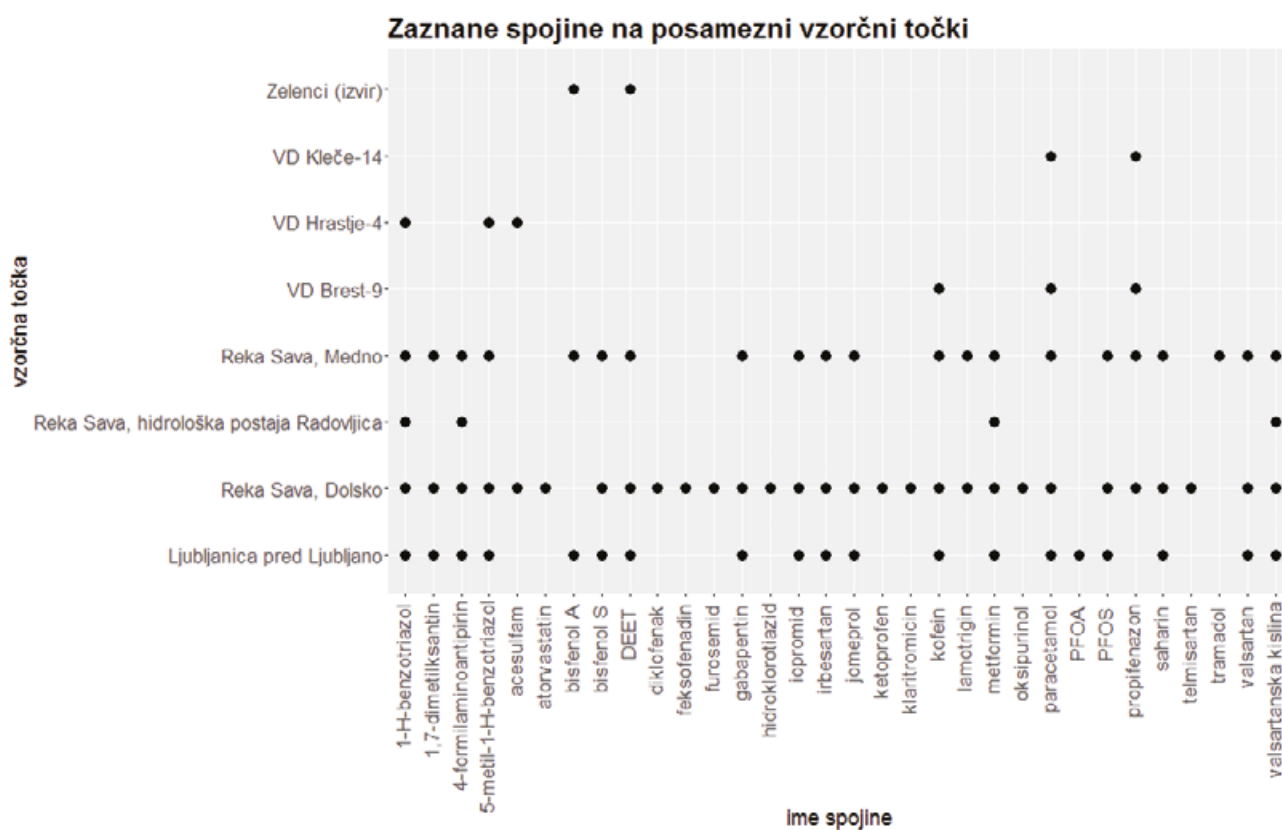
### 5.4.3 Aktivno vzorčenje

#### Določitve spojin v laboratoriju v Plznu na Češkem

V laboratoriju v Plznu na Češkem so določali 109 analitov. Posredovali smo jim vzorce z enajstih vzorčenj na točkah Sava Medno in Sava Dolsko. Na točki Ljubljana pred Ljubljano je bilo izvedenih deset vzorčenj. V tem laboratoriju so bili po enkrat analizirani še vzorci površinske vode na hidrološki postaji Radovljica na Savi ter na izvirih Zelencev in Savice ter vzorci podzemne vode na lokacijah VD Kleče-14, VD Hrastje-4 in VD Brest-9.

V dvakratnem vzorčenju je bilo največ različnih spojin (29) zaznanih na vzorčni točki Sava Dolsko. Sledita vzorčni točki Sava Medno z 21 različnimi zaznanimi spojinami in Ljubljana pred Ljubljano z 19 različnimi zaznanimi spojinami.

Pri enkratnem vzorčenju so bile na hidrološki postaji Radovljica na Savi zaznane štiri spojine, na vzorčnih točkah VD Hrastje-4 in VD Brest-9 tri, na vzorčnih točkah Zelenci in VD Kleče-4 pa dve spojinini. Na izviru Savice češki laboratorij ni zaznal



Slika 53: Prikaz pojavljanja spojin, zaznanih v laboratoriju v Plznu na Češkem.

spojin. Pojavljanje spojin, določenih v češkem laboratoriju, prikazuje slika 53.

V preglednici 8 so prikazane spojine, določene v laboratoriju na Češkem, ki se na vseh vzorčnih točkah pojavijo več kot 10-krat. Največkrat, 33-krat, se je v vzorcih pojavil metformin, sledi mu paracetamol, ki se je pojavil 28-krat. Obe spojini sta zdravilni učinkovini. Metformin je peroralno antihiperglike-

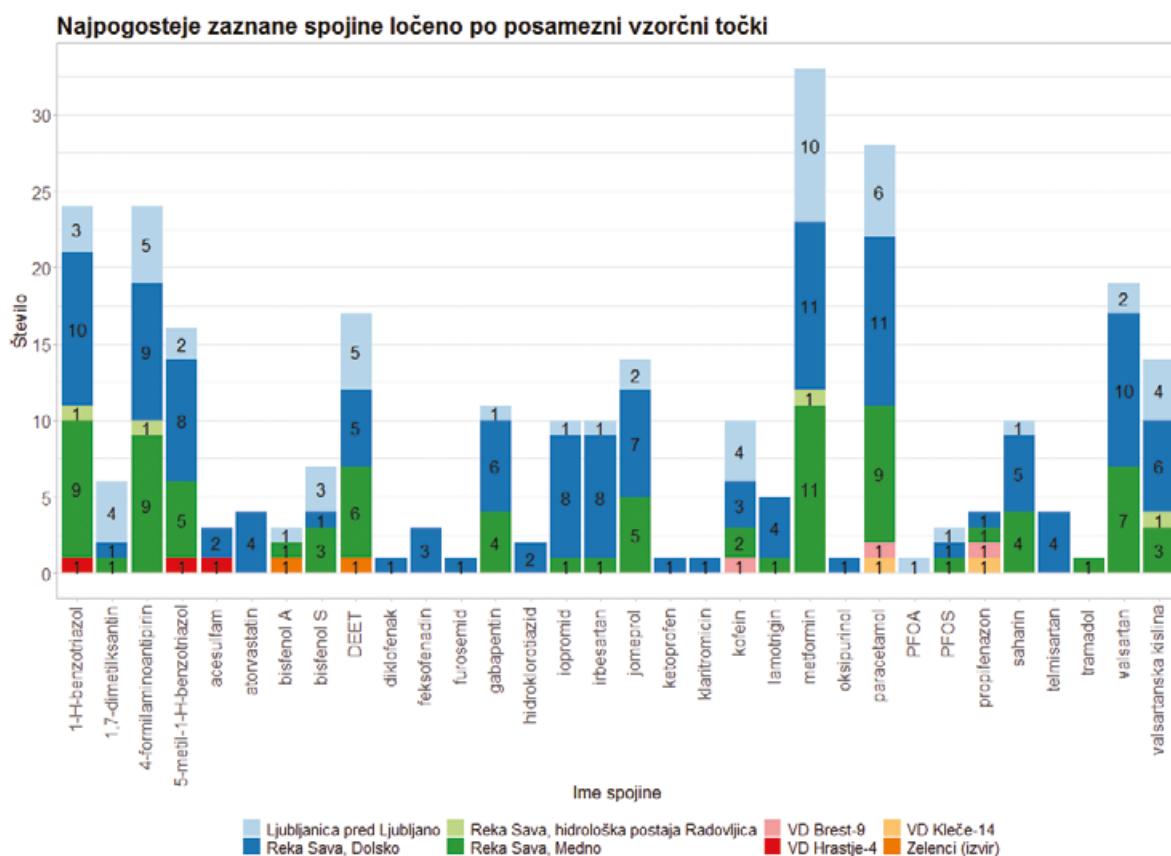
mično zdravilo, ki se uporablja za uravnavanje sladkorja v krvi pri sladkorni bolezni tipa 2. Je najpogostejše izbrano zdravilo za zdravljenje te bolezni. Paracetamol je eno najpogostejše uporabljenih zdravil za zdravljenje bolečin in zniževanje previsoke telesne temperature, ki je na voljo tudi brez recepta, pogosto pa ga uporabljamo skupaj s kofeinom. Je poceni in velja za varnega, kar je vzrok za njegovo široko uporabo.

*Preglednica 8: Najpogostejše zaznane spojine, določene v vzorcih, analiziranih v Plznu na Češkem.*

| Ime spojine              | Izvor spojine                  | Število pojavitev |
|--------------------------|--------------------------------|-------------------|
| metformin                | Zdravilna učinkovina           | 33                |
| paracetamol              | Zdravilna učinkovina           | 28                |
| 1-H-benzotriazol         | Industrija                     | 24                |
| 4-formilaminoantipirin   | Metabolit zdravilne učinkovine | 24                |
| valsartan                | Zdravilna učinkovina           | 19                |
| DEET                     | Urbano                         | 17                |
| 5-metil-1-H-benzotriazol | Industrija                     | 16                |
| jomeprol                 | Kontrastno sredstvo            | 14                |
| valsartanska kislina     | Metabolit zdravilne učinkovine | 14                |
| gabapentin               | Zdravilna učinkovina           | 11                |
| iopromid                 | Kontrastno sredstvo            | 10                |
| irbesartan               | Zdravilna učinkovina           | 10                |
| kofein                   | Urbano                         | 10                |
| saharin                  | Urbano                         | 10                |

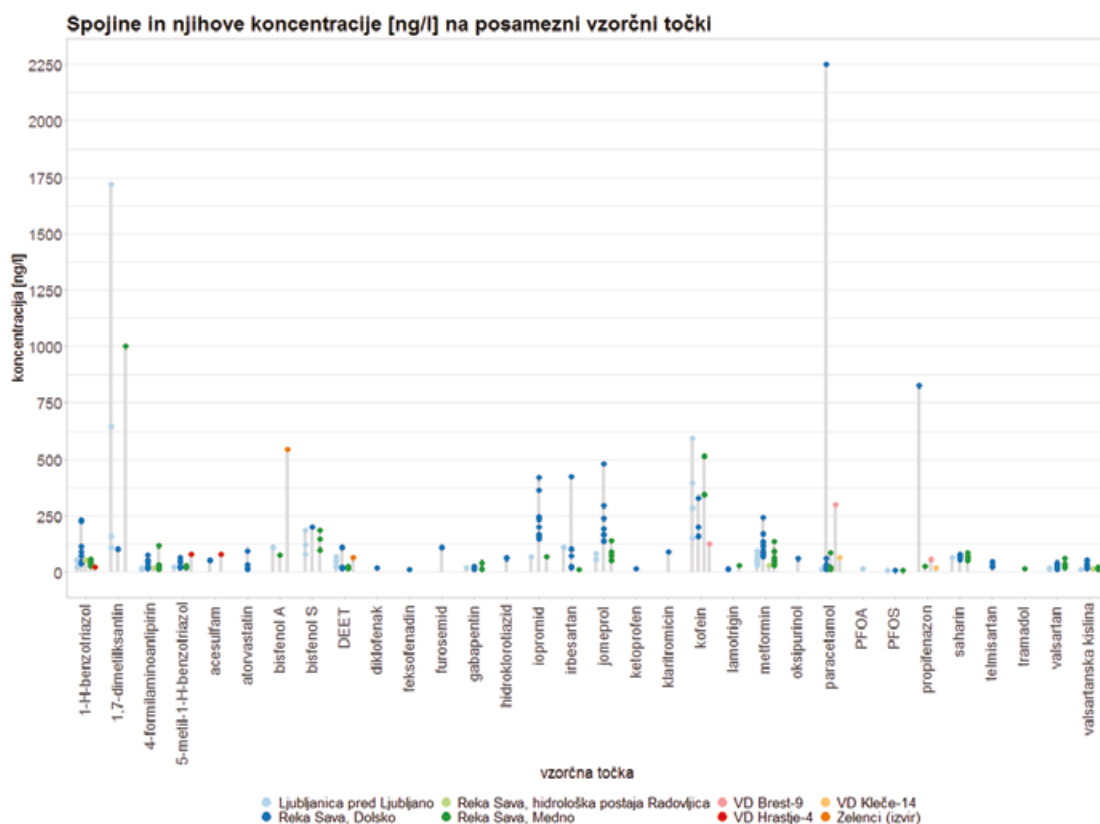
Pogostost pojavljanja spojin na posameznih točkah je podana na sliki 54. Tudi tu vidimo, da se najpogosteje pojavljata zdravilni učinkovini metformin in paracetamol. Izjema je vzorčna točka Sava Medno, kjer se enako pogosto kot paracetamol pojavita spojini 1-H-benzotriazol in 4-formilaminoantipirin. Iz grafičnega prikaza na sliki 54 lahko še razberemo, da se spojini 1-H-benzotriazol in paracetamol prav tako pogosto pojavljata na različnih vzorčnih točkah; najdemo ju na petih od osmih vzorčnih točk. Spojina 1-H-benzotriazol ima zelo širok spekter uporabe; uporabljajo jo v številnih industrijskih, komercialnih in potrošniških izdelkih. Spojina 4-formil-aminoantipirin je aktivni metabolit zdravilne učinkovine. Na štirih vzorčnih točkah se pojavi še sedem spojin. Le na eni vzorčni točki pa se pojavi kar 11 spojin. Od teh 11 je 9 takih, ki se pojavijo samo v vodi na vzorčnem mestu Sava Dolsko.

Iz grafa na sliki 55 so razvidne zaznane spojine in vse njihove koncentracije na vseh vzorčnih točkah. V najvišjih koncentracijah sta se na vzorčnih točkah Ljubljana pred Ljubljano in Sava Medno pojavila kofein in 1,7-dimetilksantin, ki je najpomembnejši metabolni produkt kofeina. Na točki Sava Dolsko sta se v najvišjih koncentracijah pojavila paracetamol in propifenazon. Propifenazon se tako kot paracetamol skupaj s kofeinom uporablja za zniževanje povišane telesne temperature in blaženje bolečin. V razmeroma visokih koncentracijah sta se na točki Sava Dolsko pojavili še kontrastni sredstvi iomeprol in iopromid ter zdravilni učinkovini irbesartan in kofein. Od preostalih točk se na Zelencih v razmeroma visokih koncentracijah pojavi spojina bisfenol A in v opazovalni vrtini VD Brest-9 paracetamol.



Slika 54: Prikaz spojin, določenih v češkem laboratoriju po vzorčnih točkah.





Slika 55: Zaznane spojine in njihove koncentracije, analizirane v laboratoriju na Češkem.

### Laboratorij Javnega podjetja VOKA SNAGA, d. o. o., v Ljubljani

V laboratoriju Javnega podjetja VOKA SNAGA, d. o. o., v Ljubljani, kjer so določali 20 analitov, so bile izvedene analize vzorcev na šestih vzorčnih točkah površinske vode. Na vzorčnih mestih hidrološka postaja Radovljica na Savi, Sava Medno, Sava Dolsko in Ljubljana pred Ljubljano so bili vzorci odvzeti dvakrat. Na vzorčnih mestih Savica - most pri koči pri Savici in Radovna pred vtokom v Vintgar pa je bil odvzet le en vzorec. Na podzemnih vodah je vzorčenje potekalo na enajstih vzorčnih točkah. Vzorci so bili dvakrat odvzeti na vzorčnih točkah izvira Zelencev in izvira Savica pod slapom ter v opazovalnih vrtinah MEN-2/14 in NAK-2/13. V opazovalnih vrtinah MEN-1/14, NAK-1/13, BEV-1/15 in BEV-2/15 je bilo vzorčenje opravljeno enkrat. Prav tako je bilo vzorčenje enkrat opravljeno na izviru Smešnik v dolini Radovne, na izviru Radovne ter na izviru Ljubljanice.

Laboratorij Javnega podjetja VOKA SNAGA, d. o. o., je največje število spojin določil v podzemni vodi na območju Mengša v opazovalnem paru vrtin MEN-1/14 in MEN-2/14 ter v površinski vodi na točki Sava Dolsko. Iz slike 56 je razvidno, katere spojine so bile zaznane na vzorčnih točkah, s katerih so bili vzorci predani v laboratorij Javnega podjetja VOKA SNAGA, d. o. o. V graf niso vključene točke, kjer ni bila zaznana nobena spojina. Teh točk je bilo 8 (izvir Zelenci, izvir Savice, Savica - most pri koči pri Savici, izvir Radovne, izvir Smešnik, Radovna pred vhodom v Vintgar ter vrtini BEV-2/15 in BEV-1/15).

Preglednica 9: Spojine, zaznane v vzorcih, ki jih je analiziral laboratorij Javnega podjetja VOKA SNAGA, d. o. o., in njihova frekvenca.

| Ime spojine             | Izvor spojine | Število pojavitev |
|-------------------------|---------------|-------------------|
| kofein                  | Urbano        | 9                 |
| desetilatrazin          | Kmetijstvo    | 5                 |
| atrazin                 | Kmetijstvo    | 3                 |
| desetilterbutilazin     | Kmetijstvo    | 3                 |
| 2-metil-2H-benzotriazol | Industrija    | 1                 |
| metolaklor              | Kmetijstvo    | 1                 |
| prometrin               | Kmetijstvo    | 1                 |

Preglednica 10: Število vzorčnih točk, na katerih so se pojavile spojine, določene v laboratoriju podjetja Javnega podjetja VOKA SNAGA, d. o. o.

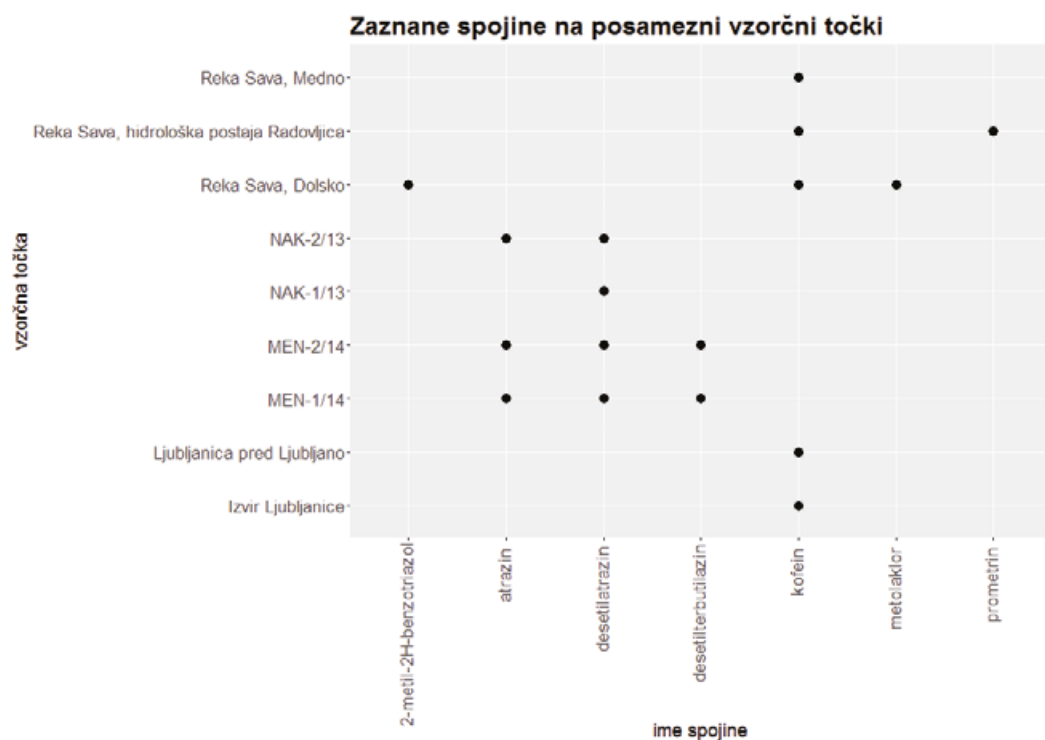
| Ime spojine             | Izvor spojine | Število vzorčnih točk |
|-------------------------|---------------|-----------------------|
| kofein                  | Urbano        | 5                     |
| desetilatrazin          | Kmetijstvo    | 4                     |
| atrazin                 | Kmetijstvo    | 3                     |
| desetilterbutilazin     | Kmetijstvo    | 2                     |
| 2-metil-2H-benzotriazol | Industrija    | 1                     |
| metolaklor              | Kmetijstvo    | 1                     |
| prometrin               | Kmetijstvo    | 1                     |

Največkrat zaznana spojina na vzorčnih točkah je bil kofein, ki se je pojavil 9-krat, sledi mu desetilatrazin, ki se je pojavil 5-krat. V preglednici 9 so prikazane še ostale spojine ter njihova frekvenca pojavljanja.

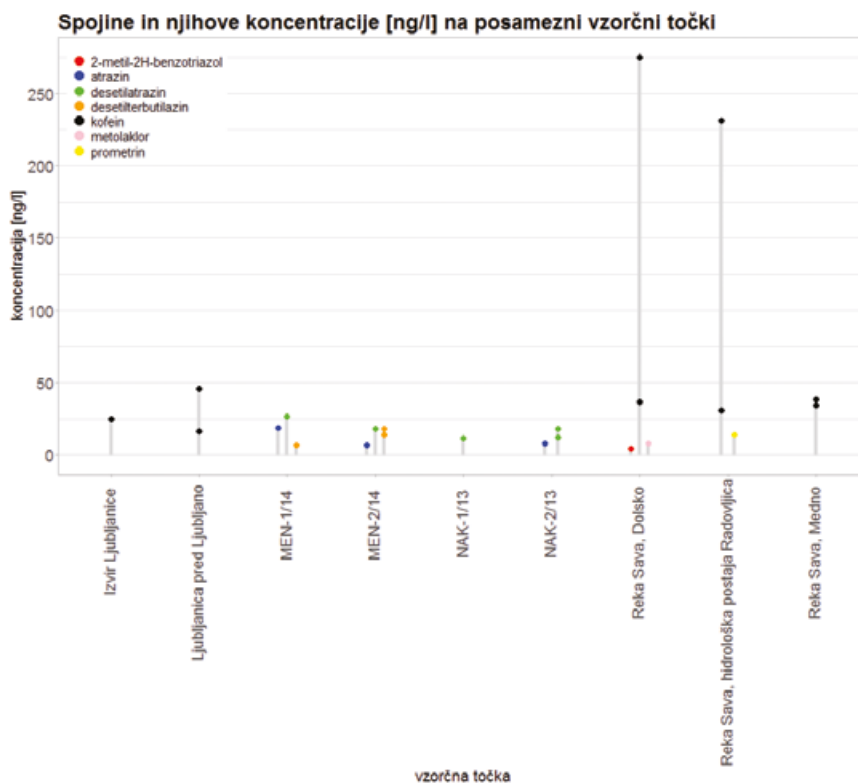
Od devetih vzorčnih točk, kjer so bile zaznane različne spojine, se je na petih pojavil kofein. Sledita mu desetilatrazin, ki se je pojavil na štirih, in

atrazin, ki se je pojavil na treh različnih vzorčnih točkah. V preglednici 10 je podano število točk, na katerih so se pojavile posamezne spojine.

Na grafu (slika 57) so prikazane vse koncentracije zaznanih spojin na vseh vzorčnih točkah. V najvišjih koncentracijah se je pojavil kofein na točkah Sava Dolsko in Sava na hidrološki postaji pri Radovljici.



Slika 56: Spojine, zaznane v vzorcih, ki jih je analiziral laboratorij podjetja Javnega podjetja VOKA SNAGA, d. o. o.



Slika 57: Zaznane spojine in njihove koncentracije, analizirane v laboratoriju Javnega podjetja VOKA SNAGA, d. o. o.

## Laboratorij Fakultete za farmacijo Univerze v Ljubljani

V laboratoriju Fakultete za farmacijo (FFA) so merili koncentracije enajstih analitov. Površinske vode so bile vzorčene na petih vzorčnih točkah. Dvakrat so bili odvzeti vzorci na vzorčnih točkah: hidrološka postaja Radovljica na Savi, Sava Medno, Sava Dolsko in Ljubljanica pred Ljubljano. Enkrat je bil vzorec odvzet na vzorčni točki Radovna pred vtokom v Blejski vintgar.

Koncentracije so bile določene tudi na osmih vzorčnih točkah podzemnih vod. Dvakrat so bili odvzeti vzorci na opazovalnih vrtinah MEN-2/14 in NAK-2/13 ter na izvirih Zelenci in Savica. Enkrat so bili odvzeti vzorci na vzorčnih točkah MEN-1/14, NAK-1/13, BEV-1/15 in BEV-2/15 ter na izvirih Ljubljanice, Radovne in Smešnika v dolini Radovne.

Posebnost vzorčenja za potrebe analiz v laboratoriju Fakultete za farmacijo je bilo vzorčenje na Centralni čistilni napravi Ljubljana v Zalogu (CČN); en vzorec je bil odvzet pred vtokom odpadne vode v čistilno napravo (vzorec CČN-vtok) in en vzorec na iztoku iz čistilne naprave, po opravljenem čiščenju (vzorec CČN - iztok).

Pričakovano je bilo največ spojin (10) zaznanih na vtoku in iztoku iz Centralne čistilne naprave v Zalogu ter v dolvodni smeri od naprave na točki Sava Dolsko. Laboratorij Fakultete za farmacijo je glede na nabor analitov najmanj spojin zaznal v izviru Radovne, izviru Smešnik, v Zelencih in opazovalni vrtini NAK-1/13 (preglednica 11). Na sliki 58 je razvidna porazdelitev spojin po vzorčnih točkah. V graf ni vključena vzorčna točka izvir Savica, ker v laboratoriju Fakultete za farmacijo na njej ni bila zaznana nobena spojina.

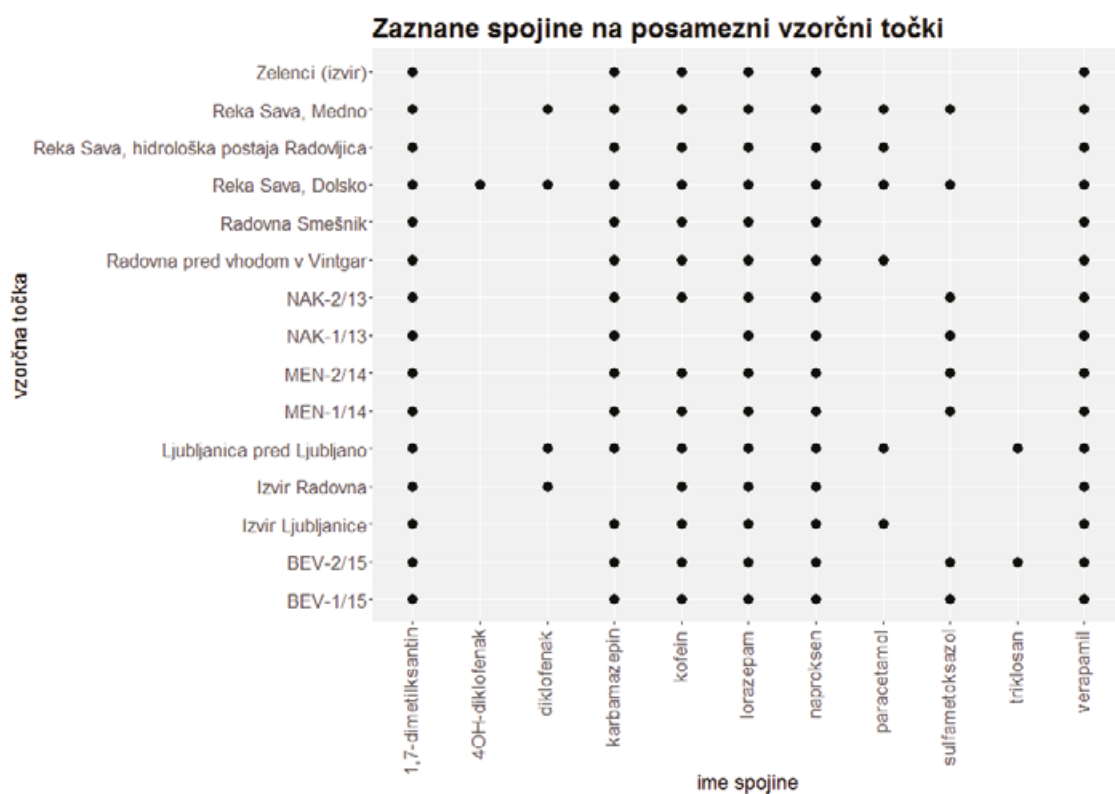
Najpogostejše zaznana spojina iz nabora spojin, merjenih v laboratoriju Fakultete za farmacijo, je bil karbamazepin, ki se je pojavil 23-krat. Sledita mu 1,7-dimetilksantin in naproksen, ki sta se pojavila 21-krat, ter kofein, ki se je pojavil 20-krat. V preglednici 12 so podane še ostale spojine in njihova frekvenca. Karbamazepin je zdravilna učinkovina, ki deluje na živčevje in sodi med anti-

*Preglednica 11: Število spojin, določenih v laboratoriju Fakultete za farmacijo, po posamezni vzorčni točki.*

| Vzorčna točka                              | Število spojin |
|--------------------------------------------|----------------|
| CČN - vtok                                 | 10             |
| CČN - iztok                                | 10             |
| Sava Dolsko                                | 10             |
| Ljubljanica pred Ljubljano                 | 9              |
| Sava Medno                                 | 9              |
| BEV-2/15                                   | 8              |
| BEV-1/15                                   | 7              |
| Izvir Ljubljanice                          | 7              |
| MEN-1/14                                   | 7              |
| MEN-2/14                                   | 7              |
| NAK-2/13                                   | 7              |
| Radovna pred Vintgarjem                    | 7              |
| Sava - hidrološka postaja Radovljica       | 7              |
| Radovna - izvir                            | 6              |
| NAK-1/13                                   | 6              |
| Smešnik - Radovna                          | 6              |
| Zelenci                                    | 6              |
| Savica<br>(izvir Savice nad slapom Savica) | 0              |

epileptike. Prav tako kot prisotnost kofeina je tudi prisotnost karbamazepina kazalec vpliva antropogenih dejavnosti. Naproksen je zdravilna učinkovina s protivnetnim, antipiretičnim in analgetičnim delovanjem. Uporablja se za lajšanje akutnih bolečin in povišane telesne temperature, za zdravljenje vnetij, bolečin, povezanih z revmatskimi boleznimi, in lajšanje menstrualnih bolečin.





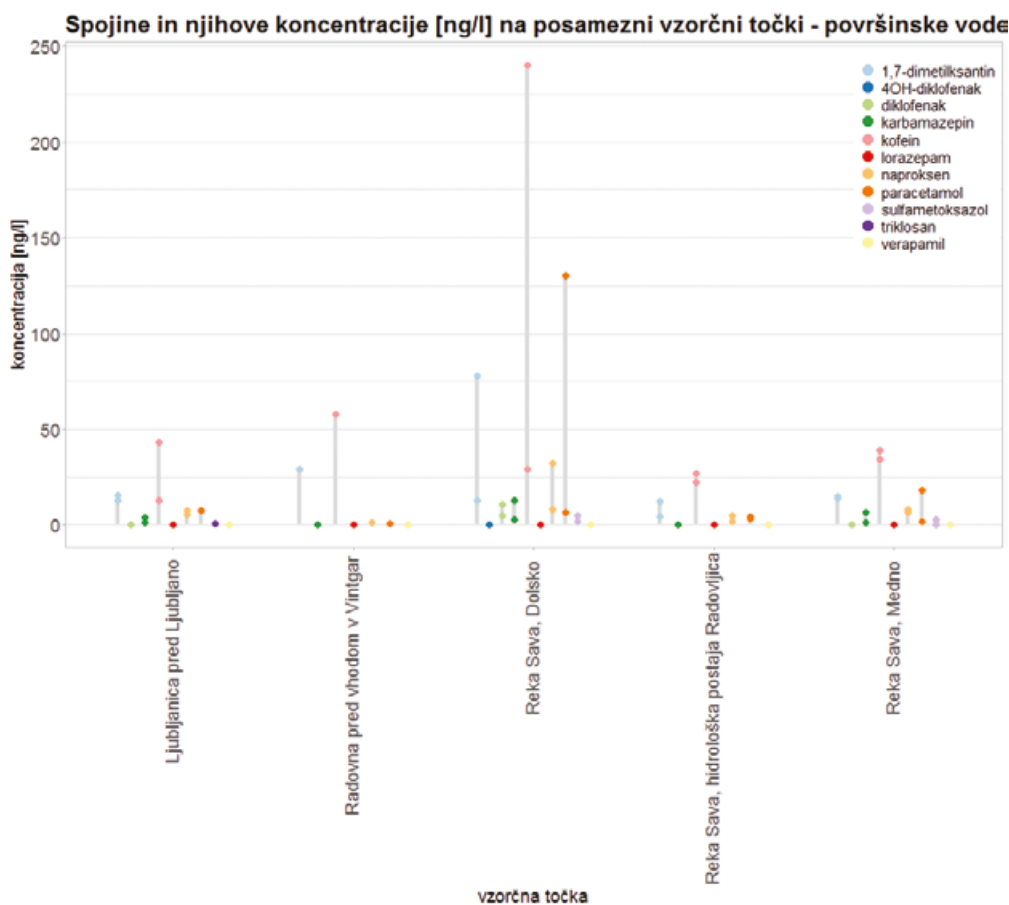
Slika 58: Zaznane spojine na posamezni vzorčni točki, ki so bile analizirane v laboratoriju Fakultete za farmacijo.

Preglednica 12: Najpogosteje zaznane spojine na vzorčnih točkah, ki so bile analizirane v laboratoriju Fakultete za farmacijo.

| Ime spojine        | Izvor spojine                  | Število pojavitev |
|--------------------|--------------------------------|-------------------|
| karbamazepin       | Zdravilne učinkovine           | 23                |
| 1,7-dimetilksantin | Urbano                         | 21                |
| naproksen          | Zdravilna učinkovina           | 21                |
| kofein             | Urbano                         | 20                |
| verapamil          | Zdravilna učinkovina           | 18                |
| lorazepam          | Zdravilna učinkovina           | 17                |
| sulfametoksazol    | Zdravilna učinkovina           | 14                |
| paracetamol        | Zdravilna učinkovina           | 11                |
| diklofenak         | Zdravilna učinkovina           | 7                 |
| 4OH-diklofenak     | Metabolit zdravilne učinkovine | 3                 |
| triklosan          | Urbano                         | 2                 |

Preglednica 13: Število vzorčnih točk, na katerih se pojavlja spojina, določena v laboratoriju Fakultete za farmacijo.

| Ime spojine        | Izvor spojine        | Število vzorčnih točk |
|--------------------|----------------------|-----------------------|
| 1,7-dimetilksantin | Urbano               | 17                    |
| lorazepam          | Zdravilna učinkovina | 17                    |
| naproksen          | Zdravilna učinkovina | 17                    |
| verapamil          | Zdravilna učinkovina | 17                    |
| karbamazepin       | Zdravilna učinkovina | 16                    |
| kofein             | Urbano               | 16                    |
| sulfametoksazol    | Zdravilna učinkovina | 10                    |
| paracetamol        | Zdravilna učinkovina | 8                     |
| diklofenak         | Zdravilna učinkovina | 6                     |
| 4OH-diklofenak     | Zdravilna učinkovina | 3                     |
| triklosan          | Urbano               | 2                     |



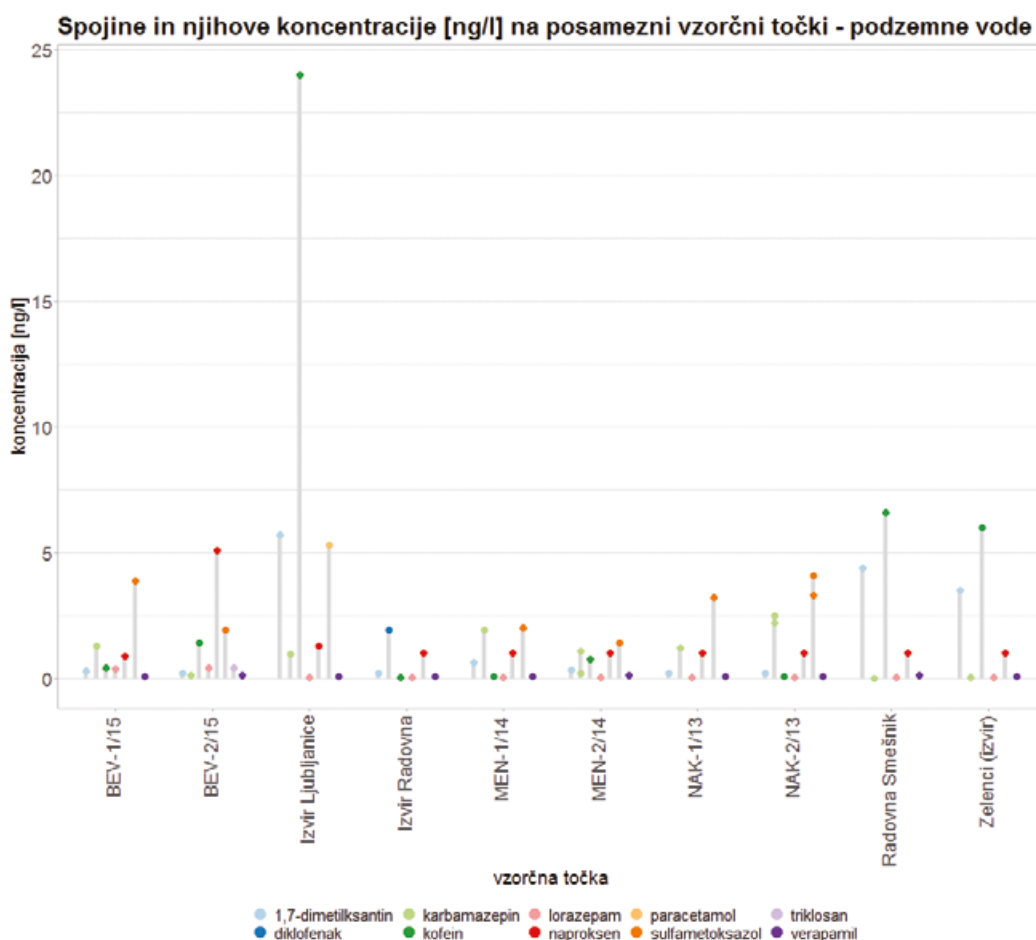
Slika 59: Koncentracije spojin, določenih v površinskih vodah, v laboratoriju Fakultete za farmacijo.

Spojine 1,7-dimetilksantin, lorazepam, naproksen in verapamil so bile zaznane na 17 točkah (preglednica 13). Sledita jim karbamazepin in kofein, ki sta se pojavila na 16 vzorčnih točkah. Na najmanj točkah, le dveh, se pojavi triklosan. Triklosan je protimikrobna učinkovina, ki se uporablja v izdelkih za osebno nego, kot so deodoranti, mila in zobne paste.

Na grafu na sliki 59 so prikazane spojine in vse njihove koncentracije, ki so bile zaznane na vzorčnih točkah površinske vode. Najvišje koncentracije kofeina, paracetamola in 1,7-dimetilksantina so se pojavile na točki Sava Dolsko. Tudi na ostalih vzorčnih točkah površinske vode se je v najvišjih koncentracijah pojavljal kofein.

Koncentracije spojin, določene v podzemni vodi, so prikazane na sliki 60. V podzemni vodi so bile

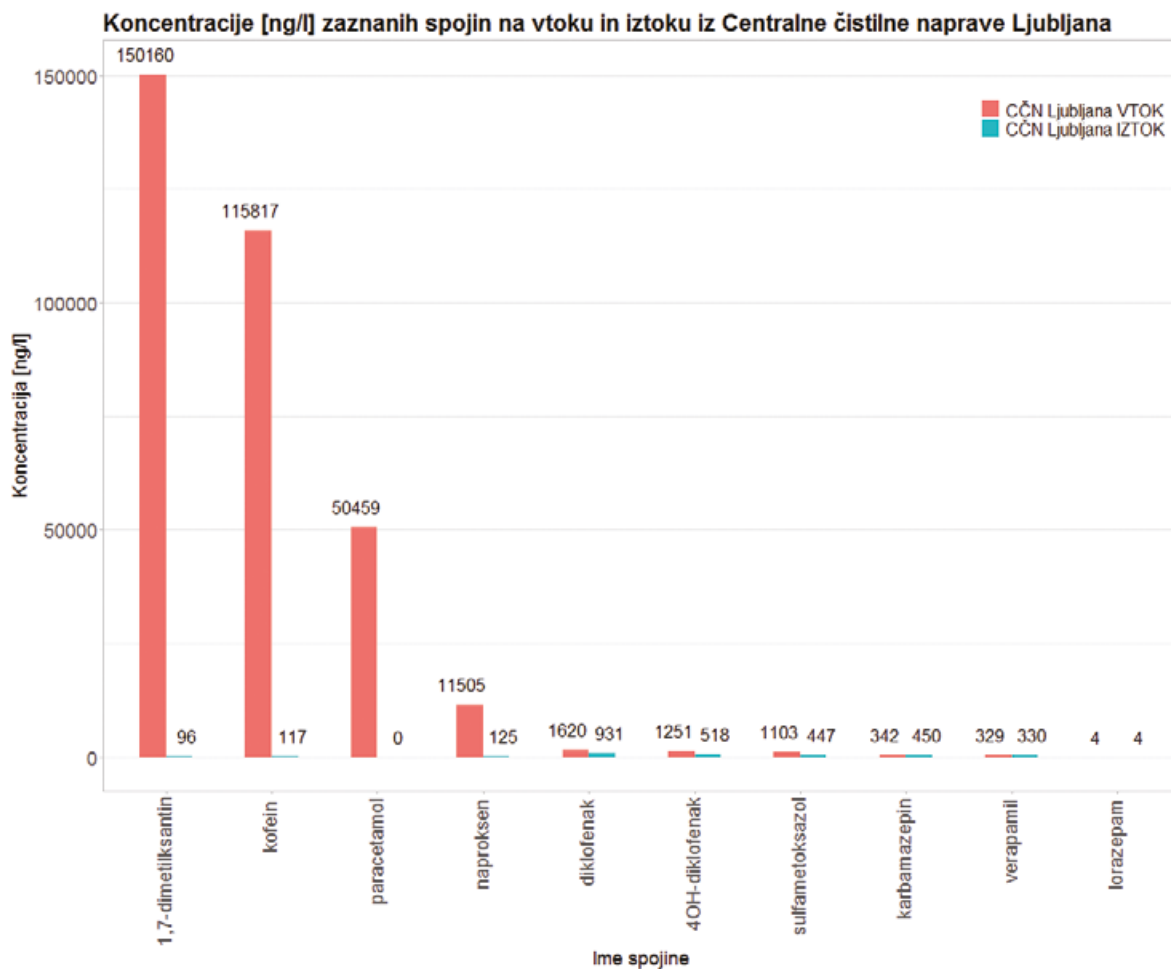
zaznane veliko nižje koncentracije kot v površinskih vodah. V opazovalnih vrtinah s parom plitve in globoke vrtine MEN-1/14, MEN-2/14, NAK-1/13, NAK-2/13, BEV-1/15 in BEV-2/15 se je na vzorčni točki BEV-2/15 v najvišjih koncentracijah pojavil naproksen, na ostalih vzorčnih točkah v vrtinah pa sulfametoksazol in karbamazepin. Sulfametoksazol je protimikrobna učinkovina, ki se uporablja za zdravljenje in preprečevanje številnih bakterijskih okužb dihal, prebavil in sečil. Prisotnost te spojine v vodnem okolju je problematična, ker vpliva na zmanjševanje protibakterijske odpornosti organizmov in ljudi. Kar se tiče izvirov, se v najvišjih koncentracijah pojavlja kofein na izviru Ljubljance, s precej nižjimi koncentracijami kofeina mu sledita izvir Smešnik in Zelenci. Na izviru Radovne se spojine pojavljajo v najnižjih koncentracijah.



Slika 60: Koncentracije spojin, določenih v podzemnih vodah, v laboratoriju Fakultete za farmacijo.

Rezultati analiz vzorcev, odvzetih na vtoku in iztoku iz Centralne čistilne naprave Ljubljana (slika 61), so pokazali, da se na vtoku v zelo visokih koncentracijah pojavijo 1,7-dimetilksantin, kofe-

in, paracetamol in naproksen. Na iztoku iz čistilne naprave so koncentracije teh spojin mnogo nižje, v nekaterih primerih za več velikostnih redov, kar kaže na njihovo učinkovito zmanjševanje.



Slika 61: Primerjava koncentracij zaznanih spojin na vtoku in iztoku iz Centralne čistilne naprave v Zalogu pri Ljubljani.



## Primerjalna analiza rezultatov aktivnega vzorčenja

Iz predhodnega prikaza rezultatov izhaja, da imamo med posameznimi laboratoriji opraviti le z delnim prekrivanjem analiziranih spojin. Tam, kjer so bile izmerjene iste spojine na vzorcu z istega vzorčnega mesta, se zastavlja vprašanje primerjave rezultatov. Primerjava med temi rezultati na posreden način pokaže, kakšna je kvaliteta opravljenih analiz in ali so laboratoriji med seboj primerljivi. Na podlagi primerjave med rezultati je bila za vsako vzorčno točko izračunana povprečna vrednost, ki jo obravnavamo kot reprezentativno vrednost. Rezultati te primerjave so prikazani v preglednici 14.

V vseh treh laboratorijih sta bili analizirani le dve spojini, ki ju je mogoče na ta način primerjati med seboj - kofein in paracetamol. V nekaterih primerih je med seboj mogoče primerjati le dva laboratorija. Za ostale spojine takšne primerjave ni mogoče podati. Iz preglednice 14 izhaja, da so rezultati analiz kofeina primerljivi, podobno velja za paracetamol, če izhajamo iz dejstva, da pri tako nizkih koncentracijah poleg negotovosti analitske metode na negotovost rezultata vpliva tudi samo vzorčenje.

Preglednica 14. Prikaz spojin, ki so bile zaznane v več laboratorijih hkrati.

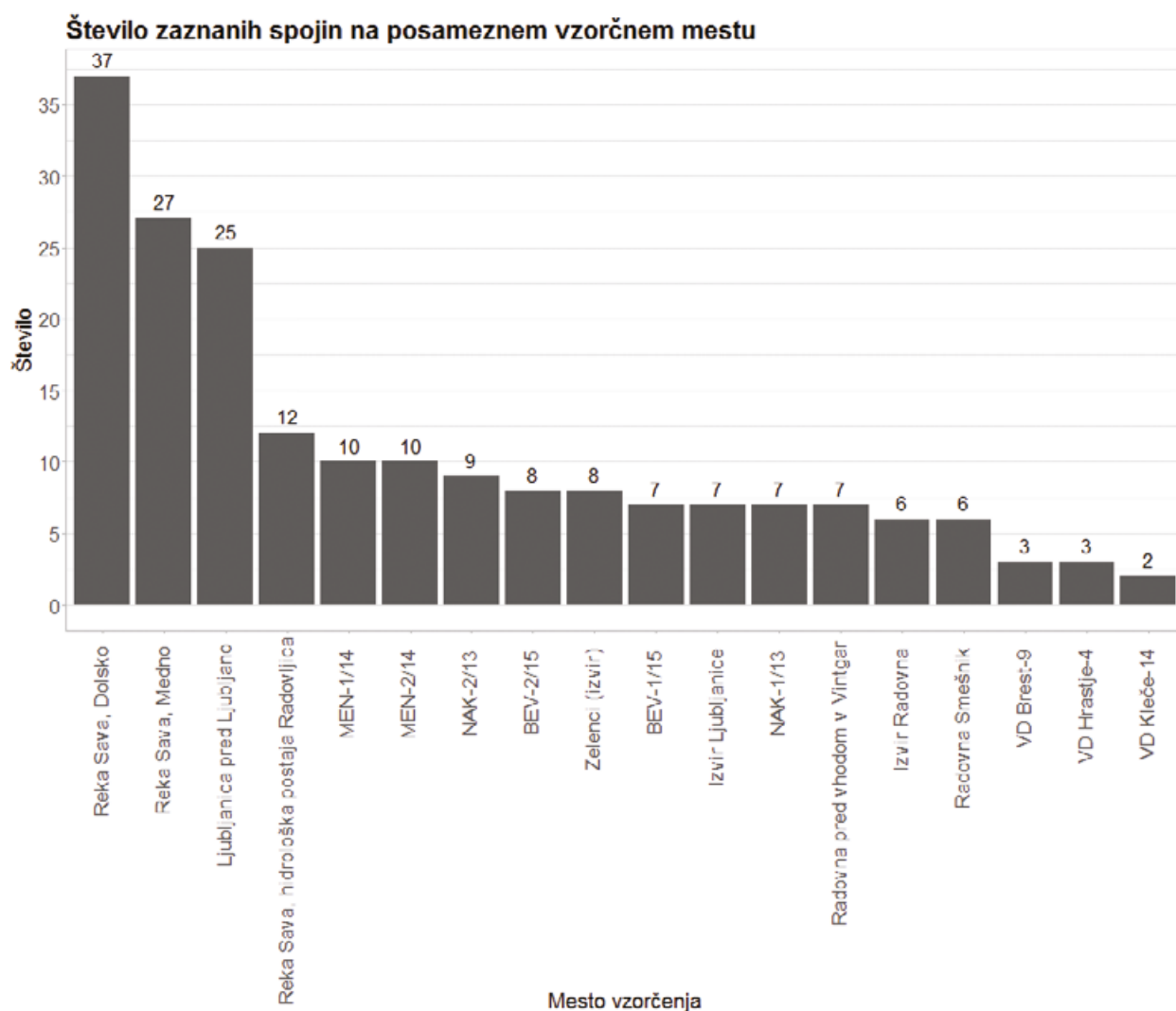
| Vzorčna točka                         | Datum       | Ime spojine | Češka | FFA | JP VOKA | Povprečje |
|---------------------------------------|-------------|-------------|-------|-----|---------|-----------|
|                                       |             |             |       |     | SNAGA   |           |
| Koncentracija izražena kot [ng/l]     |             |             |       |     |         |           |
| Izvir Ljubljanice                     | 24. 5. 2021 | kofein      | /     | 24  | 25      | 25        |
| Ljubljanica pred Ljubljano            | 22. 9. 2020 | kofein      | /     | 13  | 17      | 15        |
| Ljubljanica pred Ljubljano            | 24. 5. 2021 | kofein      | /     | 43  | 46      | 45        |
| Sava Dolsko                           | 22. 9. 2020 | kofein      | /     | 29  | 37      | 33        |
| Sava Dolsko                           | 24. 5. 2021 | kofein      | 159   | 240 | 275     | 225       |
| Sava - hidrološka postaja Radvljičica | 22. 9. 2020 | kofein      | /     | 27  | 31      | 29        |
| Sava - hidrološka postaja Radvljičica | 24. 5. 2021 | kofein      | /     | 22  | 231     | 126       |
| Sava Medno                            | 22. 9. 2020 | kofein      | /     | 34  | 38      | 36        |
| Sava Medno                            | 24. 5. 2021 | kofein      | /     | 39  | 34      | 37        |
| Sava Dolsko                           | 22. 9. 2020 | paracetamol | 33    | 6,6 | /       | 20        |
| Sava Dolsko                           | 24. 5. 2021 | paracetamol | 63    | 130 | /       | 96        |
| Sava Medno                            | 22. 9. 2020 | paracetamol | 17    | 1,8 | /       | 9,5       |
| Sava Medno                            | 24. 5. 2021 | paracetamol | 11    | 18  | /       | 14        |

Iz analitskih rezultatov izhaja, da so vsi trije laboratoriji, ki so bili vključeni v raziskavo, za potrebe regionalnega pregleda stanja, med seboj primerljivi. V predhodnih podpoglavjih smo predstavili rezultate za vsak laboratorij ločeno, sedaj pa si oglejmo, kakšna je celotna slika. Najprej združimo vse rezultate in si oglejmo, kakšni so skupni rezultati aktivnega vzorčenja. Tako kot pri pasivnem vzorčenju je bilo največ, 37, različnih spojin zaznanih na vzorčni točki Sava Dolsko. Sledita točki Sava Medno s 27 spojinami in Ljubljana pred

Ljubljano s 25 zaznanimi spojinami. Število spojin po vzorčnih mestih je prikazano na sliki 62.

Katere spojine so bile zaznane na posameznem mestu vzorčenja, prikazuje slika 63. Z modro so označene vzorčne točke podzemne vode, z rdečo pa površinske vode.

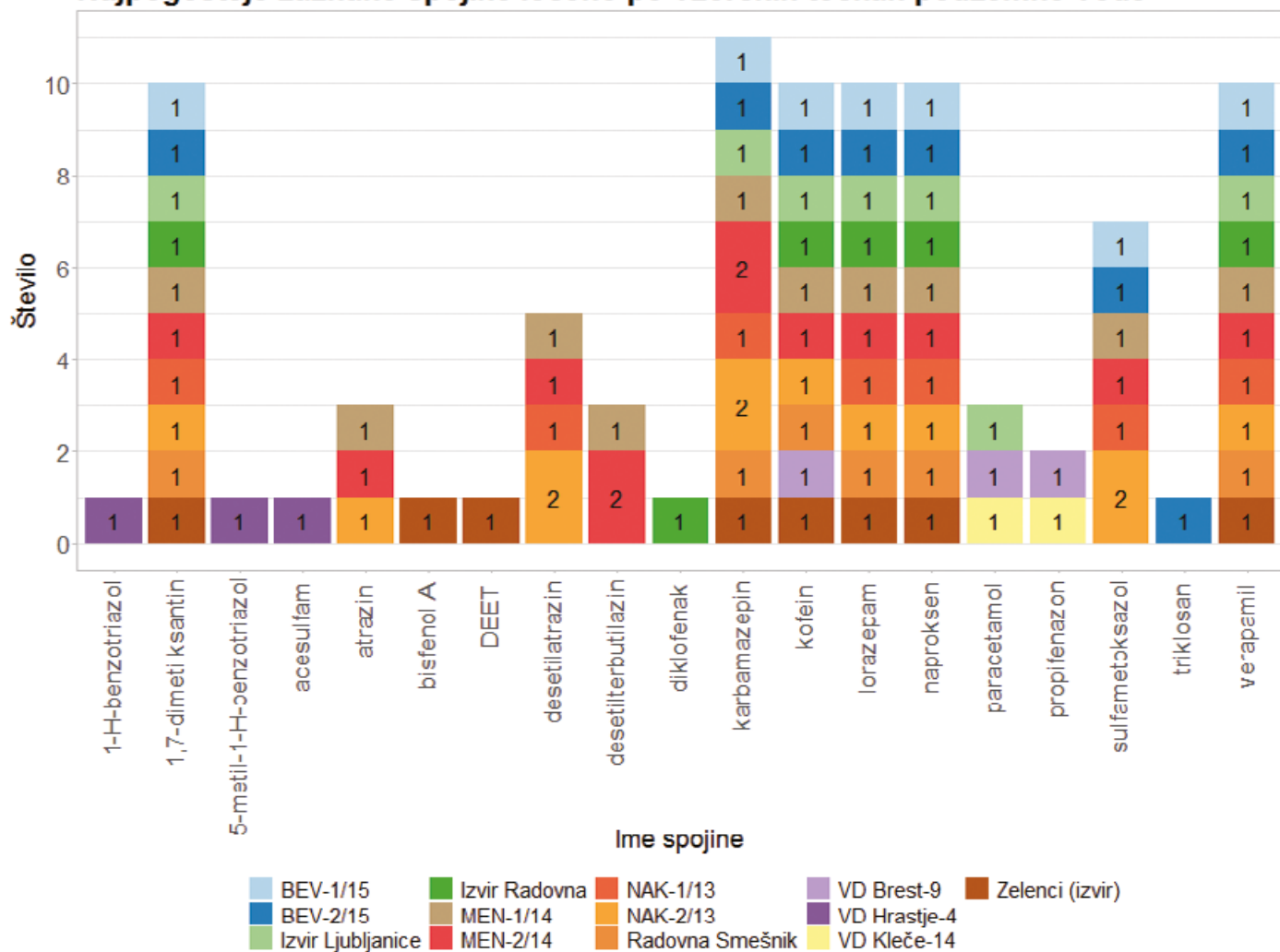
Oglejmo si, katere spojine so bile najpogostejše zaznane v podzemni vodi in katere v površinski vodi. V podzemni vodi (slika 64) je bil 11-krat, tj.



Slika 62: Skupno število spojin, zaznanih med aktivnim vzorčenjem.



### Najpogostejše zaznane spojine ločeno po vzorčnih točkah podzemne vode



Slika 64: Najpogostejše zaznane spojine na vzorčnih točkah podzemne vode.



najpogostejše, zaznan karbamazepin, sledijo kofein, zdravilne učinkovine lorazepam, naproksen, verapamil ter metabolit kofeina 1,7-metil ksantin, ki smo jih skupaj zaznali 10-krat.

V površinski vodi sta bila največkrat zaznana metformin (36-krat) in paracetamol (30-krat). Po pogostosti sledijo spojine 4-formilaminoatropin, 1-H-benzotriazol in valsartan (slika 65).

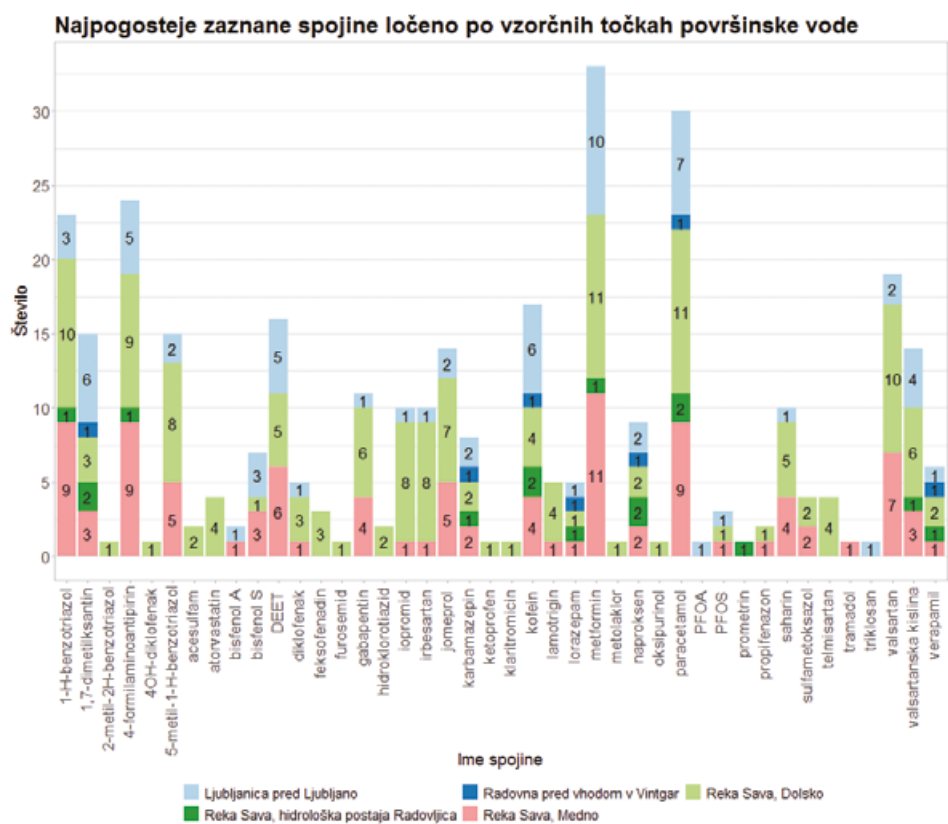
Sliki 66 in 67 prikazujeta spojine in vse njihove koncentracije, zaznane na vzorčnih točkah podzemne in površinske vode. Ker se posamezne spojine v vzorcih podzemne in površinske vode pojavljajo v zelo različnih koncentracijah, je za boljšo preglednost v obeh primerih na vertikalni osi za prikaz uporabljeno logaritmično merilo.

Na podlagi slik 66 in 67 lahko ugotovimo, da se v površinski vodi spojine pojavljajo v precej večjih koncentracijah kot v podzemni vodi. V podzemni vodi sta se v koncentraciji nad 100 ng/l pojavila le paracetamol in kofein na vzorčni točki VD-Brest-9, v površinski vodi pa koncentracije, višje od 100 ng/l, doseže kar 15 različnih spojin na štirih različnih vzorčnih točkah. Koncentracijo, višjo od 1000 ng/l, tj. 1 µg/l, dosežeta le 1,7-dimetilksantin na vzorčnih točkah Ljubljanica pred Ljubljano in Sava Medno ter paracetamol na vzorčni točki Sava Dolsko.

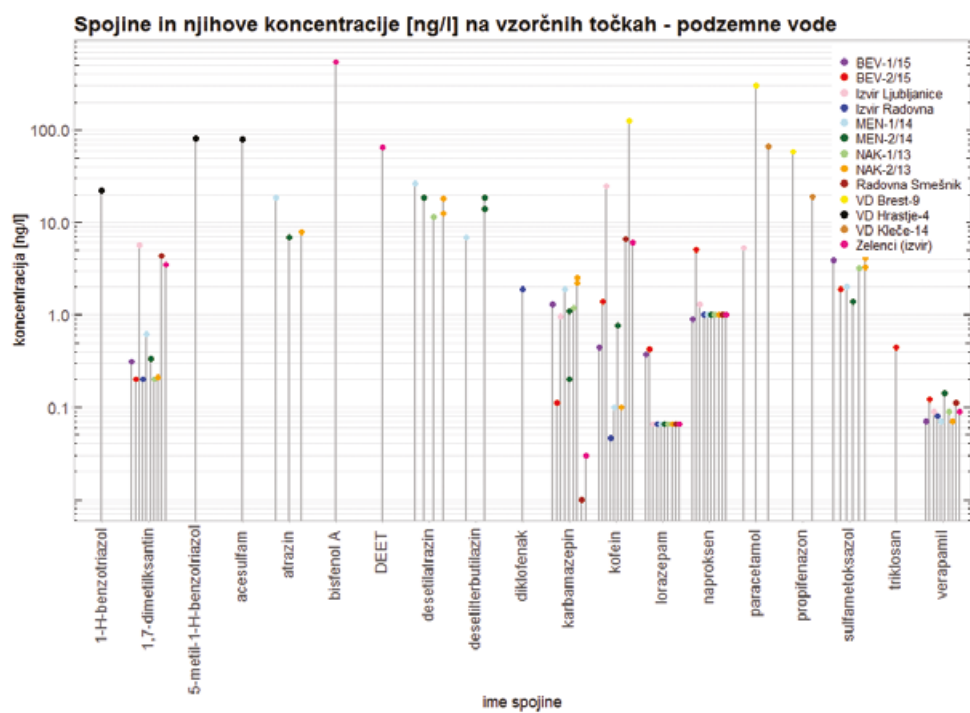
Pri obravnavanju pojavljanja novodobnih onesnaževal se zastavlja tudi vprašanje o njihovem izvo-

ru. Vsako od obravnavanih onesnaževal smo glede na izvor razporedili v štiri kategorije: industrija, zdravilne učinkovine, kmetijstvo in urbano. Za vsako vzorčno mesto smo določili delež spojin glede na izvor in medsebojna razmerja med deleži prikazali s tortnim diagramom. Prikazani deleži so relativni in ne absolutni, ne prikazujejo vrednosti koncentracij. Tortne diagrame je bilo mogoče določiti predvsem za vzorčne točke, na katerih sta bili opravljeni dve vzorčenji ali več. V naslednjem koraku smo jih vrisali v topografsko karto, ki je podana na sliki 68.

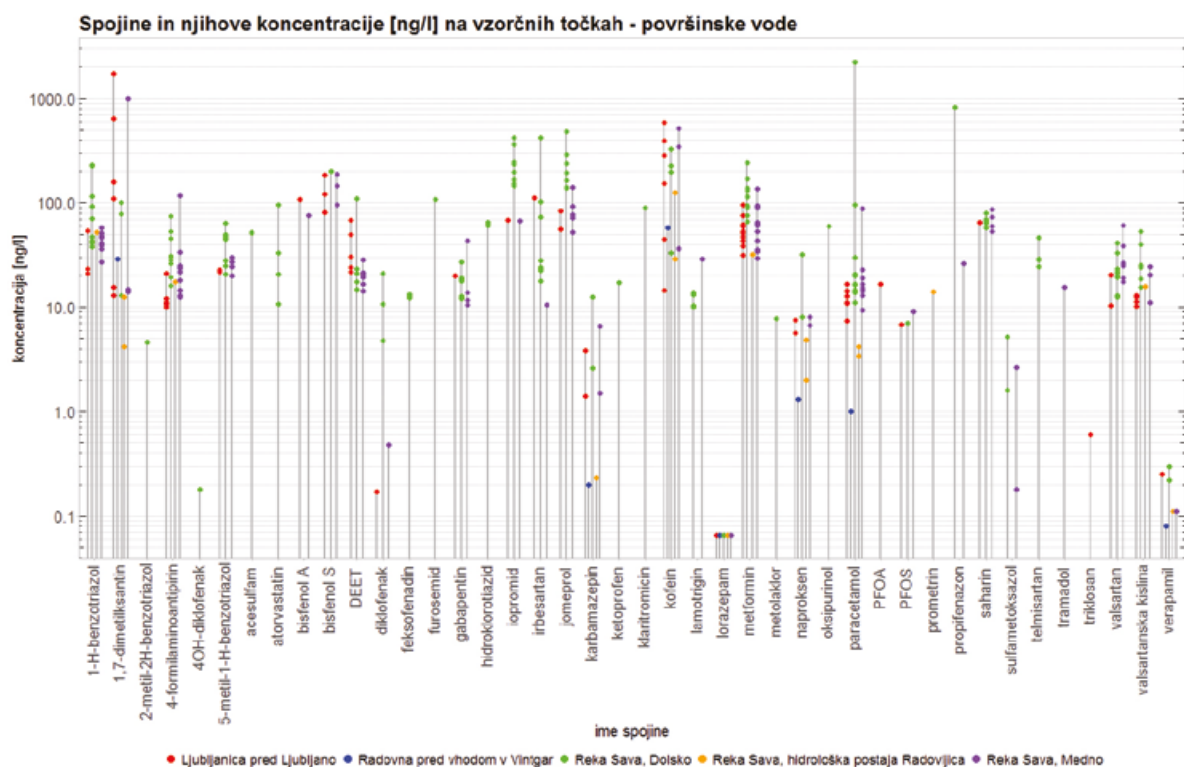
Zdravilne učinkovine so na vseh vzorčnih mestih pomemben delež obravnavanih spojin. Izjema je le vzorčno mesto VD Hrastje-4 na podzemni vodi, kjer zdravilnih učinkovin nismo zaznali. Drugačen primer je opazovalno mesto VD Kleče-14, prav tako na podzemni vodi, kjer so bile od novodobnih onesnaževal zaznane le zdravilne učinkovine. Vpliv kmetijstva je bil zaznan vzdolž Save in na območju Kamniško-Domžalskega polja. Te vplive bi lahko zaznali predvsem v povirnih delih, presenetljivo pa je, da jih ne zaznamo na vzorčnem mestu Sava Medno in v zelo majhnem deležu na iztoku Save iz Ljubljanske kotline v Dolskem. Pred dotokom Save in Ljubljanice na vplivno območje Ljubljane imata obe reki primerljiva razmerja spojin glede na njihov izvor, na iztoku iz Ljubljanske kotline pa ima Sava pestrejši izvor onesnaževal, saj so zastopane vse štiri kategorije. Prav tako so primerljive vode na zahodnem obrobju Ljubljanskega barja.



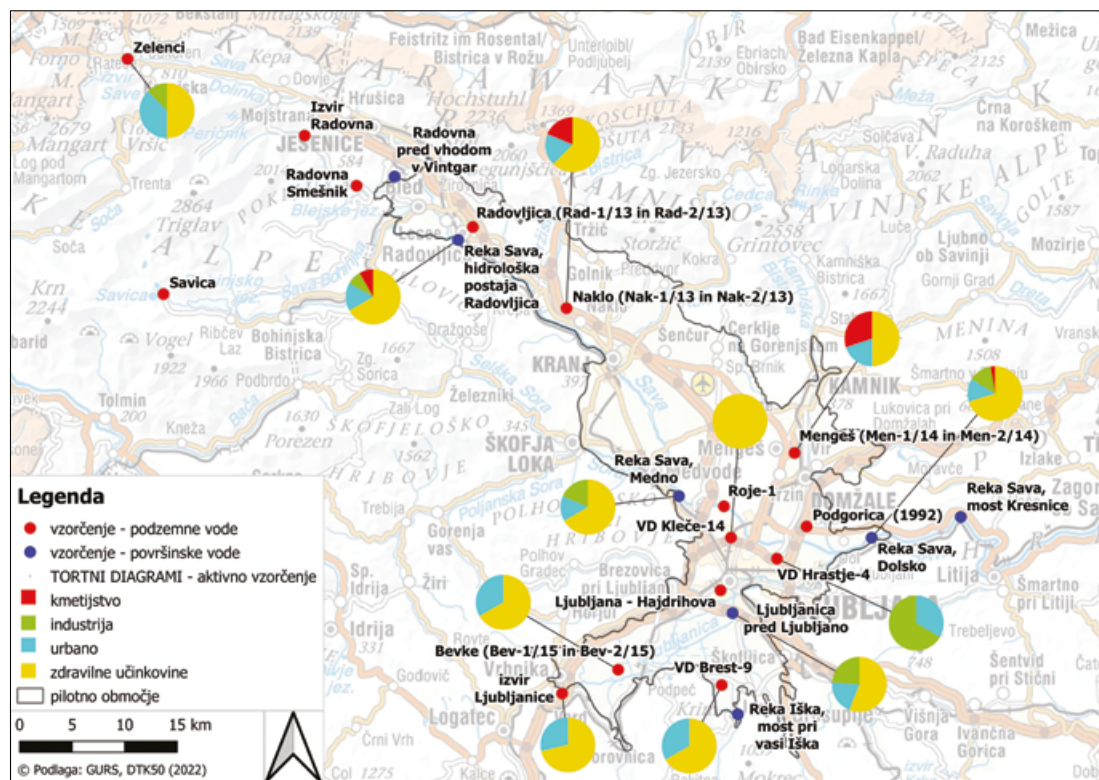
Slika 65: Najpogosteje zaznane spojine na vzorčnih točkah površinske vode.



Slika 66: Spojine in vse njihove koncentracije, zaznane na vzorčnih točkah podzemne vode.



Slika 67: Spojene in vse njihove koncentracije, zaznane na vzorčnih točkah površinske vode.



Slika 68: Prikaz izvora novodobnih onesnaževal, določenih z aktivnim vzorčenjem v površinskih in podzemnih vodah.

## 5.5 Sklepne ugotovitve

Iz opravljenih analiz izhaja, da so največje število in najvišje koncentracije novodobnih onesnaževal prisotni v površinskih vodah. Število in koncentracije teh onesnaževal so nižji v podzemnih vodah. Znotraj njih lahko ločimo dve podskupini; plitve podzemne vode vsebujejo večje število in višje koncentracije novodobnih onesnaževal kot globoke podzemne vode.

Pojavljanje posameznih novodobnih onesnaževal je odvisno od dejavnosti na posameznem območju in od naravnih danosti. Število in koncentracije novodobnih onesnaževal se vzdolž toka Save povečujejo. Sava je najbolj obremenjena na iztoku iz Ljubljanske kotline, najmanj pa na izviri Zelencev in Savice, čeprav smo nekatera novodobna onesnaževala zasledili tudi tam. Najvišje deleže ugotovljenih spojin po številu imajo zdravilne učinkovine, ki jih najdemo skoraj povsod. Med njimi se najpogosteje pojavljajo metformin, ki se uporablja pri zdravljenju bolezni, povezanih s presnovo sladkorja, protivnetna in protibolečinska učinkovina paracetamol in karbamazepin, ki je antiepileptično zdravilo in zdravilo za zdravljenje bolezni živčevja. Pomembno pa je omeniti poja-

vljanje kofeina in njegovih številnih transformacijskih produktov, ki jih najdemo skoraj povsod in so pokazatelj prisotnosti urbanih vplivov. Poleg teh spojin se pojavljajo še hormonski motilci, kot so bisfenoli, ter protimikrobne učinkovine, kot je sulfametoksazol, katerega prisotnost zelo vpliva na razvoj bakterijske odpornosti nanje. Poudariti velja, da je verjetno prisotna še cela vrsta drugih spojin in njihovih transformacijskih produktov, ki jih nismo spremljali, a utegnejo imeti pomemben vpliv na stanje površinskih in podzemnih vod, ekosisteme in ljudi.

Pri sledenju novodobnih onesnaževal v okolju, katerih število je potencialno zelo visoko, se je pomembno zavedati, da se pojavljajo v zelo nizkih koncentracijah in da sta zaradi tega vzorčenje in analitika podvržena velikim negotovostim. Zato je pri raziskavah, ki segajo v širši prostor, smiselno vključiti več analitskih laboratorijev, ki pokrivajo različne analitske metode in se med seboj dopolnjujejo. Zaznane spojine so odvisne tudi od tega, kako usmerimo vzorčenje in v nadaljevanju kemijsko analitiko.



## 6 HIDROGEOLOGIJA NOVODOBNIH ONESNAŽEVAL

### 6.1 Izhodišča

Z monitoringom površinskih in podzemnih vod določimo prisotnost posameznih spojin novodobnih onesnaževal. Vendar nam ti podatki povedo le, kakšna je bila koncentracija onesnaževala v točno določenem času in na točno določeni točki. Pri opazovanju novodobnih onesnaževal, kjer so analize tehnike in vzorčenje za njihovo določanje zahtevni, smo omejeni s številom analiz; njihov obseg je omejen tako časovno kot prostorsko. Zato se zastavljata vprašanji, kako se onesnaževala obnašajo v prostoru med opazovalnimi točkami in kako se njihove koncentracije s časom spreminjajo. Poleg časovne in prostorske porazdelitve nas pogosto zanima, kako se bodo onesnaževala obnašala v prihodnje, kakšen bo časovni razvoj koncentracij in v kateri smeri se bodo širila. Te probleme rešujemo s transportnim modeliranjem in transportnimi modeli. Ker gre za kompleksne procese, ki terjajo obsežne izračune in obsežen niz terenskih podatkov, smo se pri analizah transportnih značilnosti onesnaževal osredotočili le na podzemno vodo na območju Ljubljanskega polja, ki je na celotnem območju Ljubljanske kotline najbolj raziskano. Na podlagi primerjave z drugimi podobnimi vodonosniki na tem območju lažje ocenimo tudi transportne parametre, ki jih potrebujemo za modeliranje toka onesnaževal.

S pomočjo izračunov študijo transporta onesnaževal izvedemo na podlagi primerjave med razmerami v naravi in teoretičnih zakonitosti, s katerimi opišemo njihovo obnašanje v vodonosnikih. To vzporejanje poteka tako, da naravne razmere poenostavimo v obliki modela, kar imenujemo modeliranje. Ker je za naravne razmere značilna velika spremenljivost, je model le približek naravnega stanja. Model vedno odstopa od dejanskih razmer, saj vedno odraža le naše razumevanje. Pri modeliranju stremimo k uporabi takih pristopov, ki ta odstopanja v čim večji meri zmanjšajo. K temu stremimo zato, da negotovost rezultatov modela zmanjšamo na minimum. Včasih kljub poznavanju naravnih heterogenosti v naravi v modelu razmere namerno poenostavimo, da bi izboljšali učinkovitost procesa modeliranja ali zaradi omejitev, ki jih pred nas postavlja programska ali strojna oprema, ki jo uporabljamo za ta namen.

Če imamo opravka z več različnimi možnostmi razvoja dogodkov, rezultate modela podamo v obliki scenarijev. V tem primeru so rezultati vezani na vnaprej določene razmere, ki privedejo do teh scenarijev. Pri tem velja omeniti, da lahko isti razvoj dogodkov privede do različnih možnih rezultatov, pa tudi več različnih razvojev dogodkov lahko na koncu privede do istega rezultata. Analiza občutljivosti, kjer s spreminjanjem vrednosti različnih parametrov v modelu primerjamo rezultate, do katerih te spremenjene vrednosti vodijo, nam pomaga pri identifikaciji najobčutljivejših parametrov pri modeliranju.

Pomemben dejavnik, ki vpliva na razmeroma visoko negotovost modelov širjenja onesnaževal v vodonosnikih, je prisotnost več različnih onesnaževal hkrati. Izračuni, ki jih praviloma izvajamo, se nanašajo na širjenje enega samega onesnaževala, vplive morebitnih interakcij, do katerih prihaja zaradi prisotnosti drugih onesnaževal v vodonosniku, pa zanemarimo, pravzaprav jih pogosto sploh ne razumemo. V takšnih primerih govorimo o »koktejlih« onesnaževal, njihove medsebojne učinke pa imenujemo sinergija.

Transportni model širjenja onesnaževal za območje Ljubljanskega polja smo razdelili v dva sistema. Prvi sistem je bil tok podzemne vode v nezasičenem območju. Drugi sistem je bil tok podzemne vode v zasičenem območju vodonosnika. Prvi sistem smo modelirali s prosto dostopnim programskim paketom Hydrus1D (Šimůnek in sodelavci, 2013), drugega pa s komercialnim programskim paketom Visual ModFlow, ki uporablja prosto dostopno kodo MODFLOW (Harbaugh, 2005). Ker programska paketa nista integrirana, smo rezultate prvega uporabili kot robne pogoje za drugega.

Teoretična izhodišča, ki so podlaga za numerično modeliranje, so preobsežna in prezapletena, da bi jih lahko navedli na tem mestu. Omenimo le, da smo pri modeliranju toka vode v nezasičenem območju uporabili van Genuchtenovo teorijo toka vode v nezasičenem območju (van Genuchten, 1980), ki temelji na obsežnem naboru parametrov, katerih medsebojna povezanost je nelinear-

na. Pri modeliranju toka vode v zasičenem območju smo izhajali iz klasične teorije toka podzemne vode, ki temelji na osnovni (difuzijski - parabolični) enačbi toka podzemne vode. Za izračun transporta onesnaževal smo uporabljali adveksijsko disperzijsko enačbo ob upoštevanju sorpcije in razpada prvega reda.

Čeprav se v podzemni vodi na območju Ljubljanskega polja pojavlja omejeno število novodobnih onesnaževal, ni bilo mogoče izvesti modeliranja vseh onesnaževal, ki smo jih zaznali med monitoringom. V procesu modeliranja je bilo treba izbrati reprezentativna onesnaževala ter z njihovo pomočjo modelirati in simulirati razmere, ki bi lahko nastopale tudi pri drugih onesnaževalih. Za modeliranje smo izbrali spojine, katerih pojavljanje je značilno za komunalno odpadno vodo v urbanih kanalizacijskih sistemih. Urbani kanalizacijski sistemi niso nikoli v celoti tesni, zato vedno prihaja do izcejanja odpadne vode in s tem v njej raztopljenih snovi. Dodaten dejavnik pri izboru spojin za modeliranje je bila razpoložljivost informacij o njihovih fizikalno-kemijskih značilnostih, predvsem pa razpoložljivost parametrov, ki kažejo, kako se te snovi obnašajo v okolju. Za ta namen smo izbrali zdravilne učinkovine kofein, karbamazepin in propifenazon. V kanalizacijskem omrežju lahko prisotnost kofeina pričakujemo tako v mešanih kot fekalnih in meteornih sistemih. Kofein je zelo razširjena snov. Najdemo jo v napitkih, prehranskih dodatkih in zdravilih. Po presnovi v človekovem telesu se odvaža v kanalizacijsko omrež-

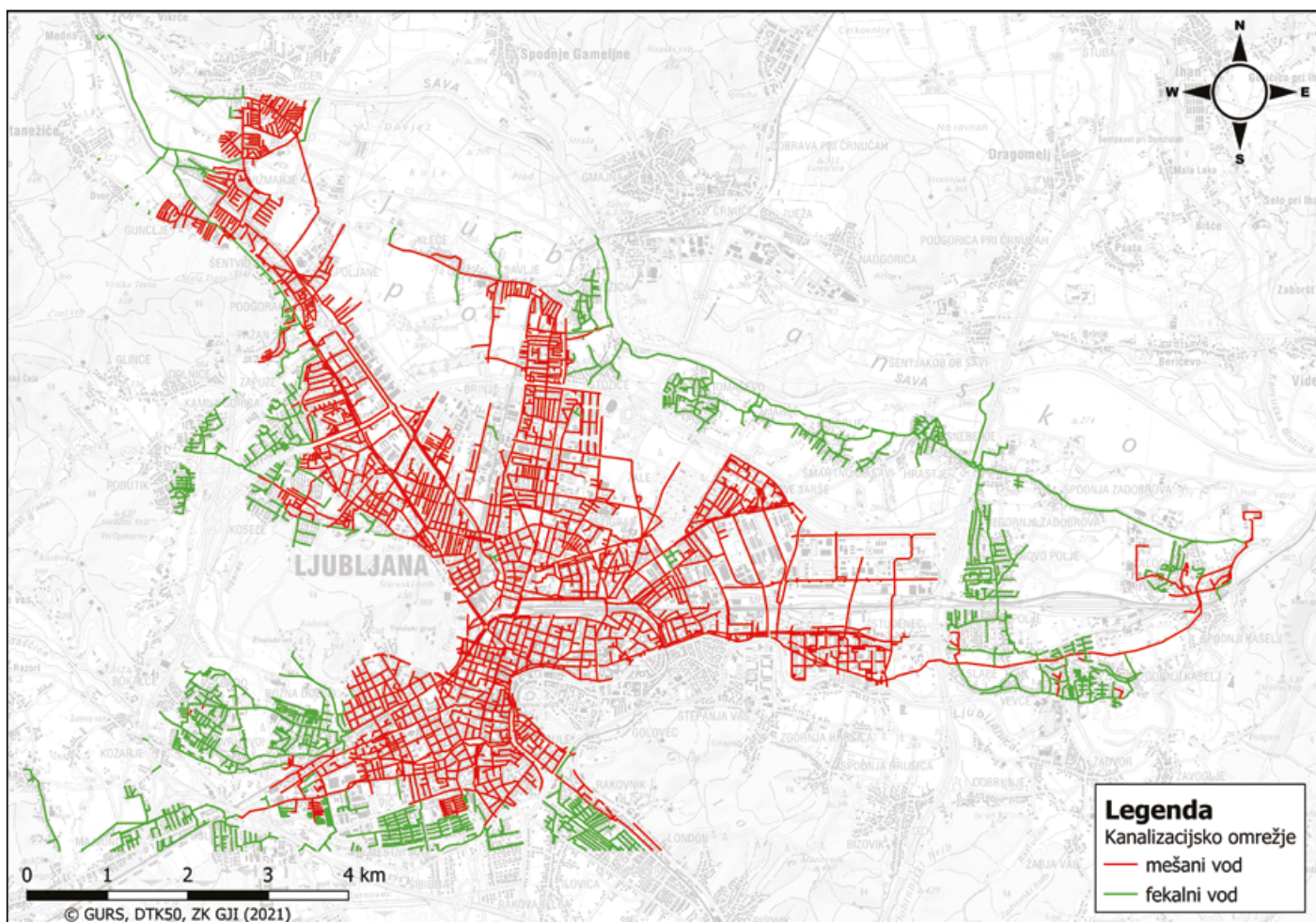
je, tam pa pogosto končajo tudi ostanki priprave različnih napitkov, ki bi jih morali odlagati v komunalne odpadke. Podobno je s prisotnostjo dveh drugih snovi, obe sta zdravilni učinkovini v razširjeni uporabi; v mislih imamo propifenazon kot analgetik in antipiretik ter karbamazepin kot antiepileptik in analgetik za nevralgične bolečine.

Za določitev transportnih lastnosti teh spojin je bil na območju Selniške dobrane pri Mariboru izveden sledilni poizkus, ki je določil njihove dejanske transportne značilnosti v nezasičenem območju vodonosnika (Koroša, 2019; Koroša in sodelavci, 2020). Vodonosnik Selniške dobrane je po značilnostih nezasičenega območja povsem primerljiv z območjem Ljubljanskega polja, zato smo uporabili tam določene transportne značilnosti onesnaževal. V preglednici 15 so prikazane osnovne statistične značilnosti pojavljanja izbranih novodobnih onesnaževal v podzemni vodi na območju Ljubljanskega polja. Zaradi zanesljivejšega modeliranja in statistično podprtih rezultatov smo vključili tudi podatke rednega državnega monitoringa stanja podzemne vode na območju Ljubljanskega polja.

Vnos onesnaževal smo modelirali s pomočjo orodja GIS, pri katerem smo uporabili podatke o raztezanju in vrsti kanalizacijskega sistema na območju Ljubljanskega polja (slika 69). S pomočjo podatkov iz literature (Nguyen, 2021) smo ocenili puščanje kanalizacijskega omrežja; ocenili smo ga na interval 0,01-0,2 l/s na kilometer kanalizacijskega omrežja.

*Preglednica: 15. Osnovne značilnosti koncentracij izbranih novodobnih onesnaževal v vodonosniku Ljubljanskega polja v letih 2018-2022.*

| Onesnaževalo | Minimum [ng/l] | Maksimum [ng/l] | Povprečje [ng/l] | Število vzorcev nad LOQ | Število vzorcev pod LOQ |
|--------------|----------------|-----------------|------------------|-------------------------|-------------------------|
| Propifenazon | 4,5            | 18,9            | 5,0              | 37                      | 1                       |
| Kofein       | 8,5            | 89,0            | 18,1             | 48                      | 13                      |
| Karbamazepin | 3,0            | 94,0            | 8,2              | 47                      | 14                      |



Slika 69: Prostorska porazdelitev kanalizacije in njenih tipov na območju Ljubljanskega polja.

Med modeliranjem smo prostor razdelili na več elementov, čemur pravimo tudi diskretizacija prostora. Za modeliranje nezasičenega območja smo vertikalni profil razdelili na 100 elementov za vsak modelirani profil nezasičenega območja, ki je segal od 1 m do 30 m, torej so bili uporabljeni posamezni elementi dolžine 1 cm do 30 cm. V zasičenem območju je bila diskretizacija opravljena z razdelitvijo na elemente z dolžino stranic 50 m. Z iterativnim procesom numeričnega reševanja osnovnih diferencialnih enačb v posameznem (modelnem) računalniškem programu smo reševali časovno neodvisne in časovno odvisne scenarije.

## 6.2 Rezultati modeliranja

### 6.2.1 Modeliranje v nezasičenem območju

Transport onesnaževal v nezasičenem območju poteka vertikalno, od površja proti gladini podzemne vode. Kako hitro bo onesnaževalo potovalo skozi profil nezasičenega območja, je odvisno od fizikalnih lastnosti nezasičenega dela vodonosnika, kot sta prepustnost in celotna poroznost, ter deleža por, ki je zapolnjen z vodo, seveda pa tudi od globine do podzemne vode, ki določa končno dolžino poti onesnaževala v nezasičenem območju. Parametri, s katerimi smo prikazali povprečne lastnos-



ti nezasičenega območja Ljubljanskega polja in ki smo jih uporabili pri izračunih, so podani v spodnji preglednici (preglednica 16). Naši izračuni so bili izvedeni na podlagi van Genuchtenove teorije toka vode (van Genuchten, 1980) v nezasičenem območju, zato smo se naslonili na parametre vodonosnika, ki izhajajo iz te teorije. Parametre smo ocenili s pomočjo literature (McGrath et al., 2015).

Tam, kjer je debelina nezasičenega območja majhna, onesnaževala potrebujejo manj časa, da dospejo do podzemne vode. Nasprotno pa je pri velikih debelinah nezasičenega območja, kjer onesnaževala do podzemne vode potujejo dlje. Pri tem je pomembna tudi zaščitna funkcija nezasičenega območja, za katero je v primerjavi z zasičenim območjem značilno večje zadrževanje onesnaževal. Izkušnje kažejo, da se največje spremembe organskih onesnaževal (biodegradacija, kemijski razpad ...) dogajajo prav v nezasičenem območju. Zato se bo pri večjih debelinah nezasičenega območja poleg tega, da bo čas potovanja onesnaževala do gladine podzemne vode daljši, zmanjšala tudi njegova koncentracija.

Porazdelitev debeline nezasičenega območja v vodonosniku Ljubljanskega polja je bila analizirana s pomočjo dveh prostorskih parametrov. Prvi parameter je nadmorska višina površja (tal), drugi pa podatki o kotah gladine podzemne vode. Nadmorska gladina površja je bila pridobljena iz lidarskih podatkov,<sup>1</sup> gladina podzemne vode pa je bila ocenjena s pomočjo podatkov ob visokovodnem in

nizkovodnem stanju. Tudi v tem primeru smo si pomagali s hidravličnim modeliranjem, saj razpolagamo le s točkovnimi podatki o meritvah gladin podzemne vode. Na podlagi tega smo izdelali dve karti debeline nezasičenega območja (slika 70), ki pa ne prikazujeta stanja v določenem časovnem obdobju, ampak sta rezultat modeliranja, ki je podalo najverjetnejša ekstremna količinska stanja podzemne vode na Ljubljanskem polju.

Med nizkim stanjem gladine podzemne vode je sredina vrednosti debeline nezasičenega območja Ljubljanskega polja 18 m s standardno deviacijo 10 m, med visokim pa 14 m s standardno deviacijo 8 m. Na obeh kartah (slika 70) lahko razločimo območje z relativno višjo debelino nezasičenega območja, ki nastopa v osrednjem delu vodonosnika, zelo jasno pa so razvidne tudi nekatere geomorfološke oblike, med njimi terase reke Save, ki stopenjsko ločujejo območja z višjimi debelinami na višjih terasah od območij z nižjimi debelinami na nižjih terasah, ki so bližje Savi.

Predstavljajmo si, da se določeno onesnaževalo nenadoma sprosti, na primer, da se razlije po površini tal. Točka razlitja je v tem primeru vir. Na njej bo koncentracija onesnaževala zelo visoka in bo ustrezala koncentraciji onesnaževala v razliti tekočini. Takoj na začetku onesnaževalo še ne bo prodrlo navzdol, sčasoma pa se bo pričelo širiti v vertikalni smeri. Po določenem času bo koncentracija začela naraščati v globljih predelih pod tlemi, najhitreje v območju neposredno pod razlitjem,

Preglednica 16: Povprečne lastnosti nezasičenega območja na Ljubljanskem polju.

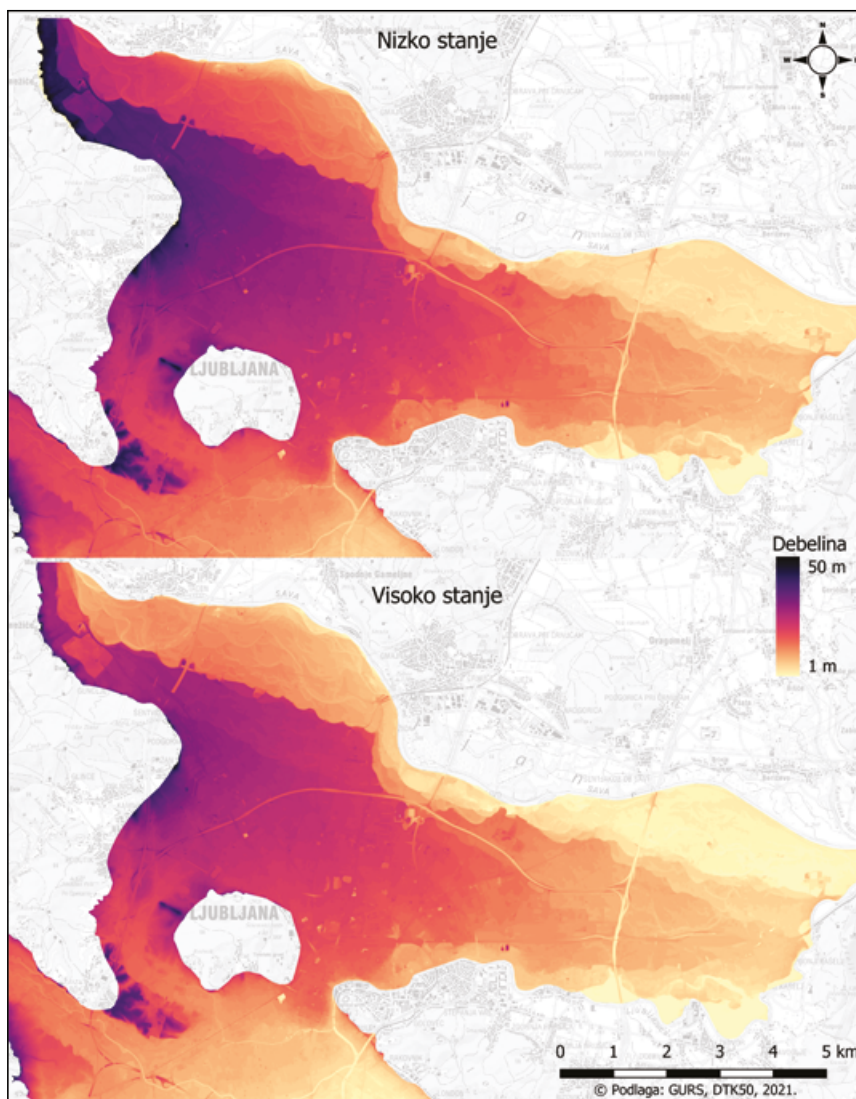
| Parameter                                 | Vrednost/razpon | Enota  |
|-------------------------------------------|-----------------|--------|
| $\theta_r$ (rezidualna vsebnost vode)     | 0               | /      |
| $\theta_s$ (nasičena vsebnost vode)       | 0,2–0,3         | /      |
| $K_s$ (nasičena prepustnost)              | 8337,6          | cm/dan |
| $\alpha$ (inverzna vrednost vstopa zraka) | 0,034           | 1/cm   |
| $n$ (indeks porazdelitve por)             | 1,35            | /      |
| $l$ (koeficient povezanosti por)          | 0,5             | /      |

<sup>1</sup> To so podatki nadmorskih višin, ki so pridobljeni s pomočjo laserskega snemanja površja iz letala. Ti podatki so zelo natančni in podani v gosti mreži.



nekoliko kasneje pa tudi v globljih predelih. Če je vir onesnaževanja trenuten, se bo koncentracija onesnaževala po izteku celotne omejene količine na viru vrnila na koncentracijo, ki je enaka nič, v preostalih delih profila nezasičenega območja pod površjem tal pa bo pričela upadati po istem vrstnem redu, kot je prej naraščala. Če je vir stalen, bo koncentracija po določenem času v vseh točkah pod površjem dosegla koncentracijo, ki je tudi v viru, vendar le, če na onesnaževalo ne delujejo drugi procesi zadrževanja.

Potovanje onesnaževal v nezasičenem območju obravnavamo kot podsystem celotnega širjenja onesnaževala v vodonosniku, kjer je po konceptualnem modelu »vir-pot-cilj« vir vnosa onesnaževal na površini ali blizu površja, pri vrhu nezasičenega območja, pot je celoten profil nezasičenega območja pod površjem tal, cilj ali prejemnik pa je končna globina, opredeljena z debelino nezasičenega območja, kjer je gladina podzemne vode in se začne zasičeno območje vodonosnika (slika 71).



Slika 70: Karti debelin nezasičenega območja na Ljubljanskem polju; nizkovodno in visokovodno stanje.



Slika 71: Konceptualni model širjenja onesnaževala v nezasičenem območju Ljubljanskega polja.

Preglednica 17: Preglednica transportnih značilnosti modeliranih onesnaževal na Ljubljanskem polju (povzeto po Koroša et al., 2020).

| Parameter                                       | Vrednost/razpon | Enota             |
|-------------------------------------------------|-----------------|-------------------|
| $\rho_b$ (prostorninska gostota)                | 1,85            | g/cm <sup>3</sup> |
| Disperzivnost                                   | 10 % razdalje   | m                 |
| Konstanta prenosa prvega reda za propifenazon   | 0,016           | dan <sup>-1</sup> |
| Porazdelitveni koeficient $K_d$ za propifenazon | 0,070           | l/kg              |
| Konstanta prenosa prvega reda za kofein         | 0,185           | dan <sup>-1</sup> |
| Porazdelitveni koeficient $K_d$ za kofein       | 0,027           | l/kg              |
| Konstanta prenosa prvega reda za karbamazepin   | 0,001           | dan <sup>-1</sup> |
| Porazdelitveni koeficient $K_d$ za karbamazepin | 0,131           | l/kg              |

Na proces širjenja onesnaževala v nezasičenem območju vplivajo tudi transportne lastnosti onesnaževal. Nekatera med njimi imajo visoko sposobnost sorpcije, zato se vzdolž toka njihova koncentracija zmanjšuje že zaradi tega, ker se velik del celotne mase veže na ali vgradi v mineralne delce v vodonosniku. Poleg tega so številna onesnaževala podvržena degradaciji, kar pomeni, da se njihova koncentracija dodatno zmanjšuje zaradi razpada in transformacije v druge snovi. Transportne lastnosti novodobnih onesnaževal, ki smo jih uporabili pri modeliranju, so podane v preglednici (preglednica 17).

Za območja vodonosnika pod kanalizacijskim omrežjem smo izdvojili debeline nezasičenega območja ter glede na različne sorpcijske in degradacijske lastnosti vseh treh izbranih novodobnih onesnaževal simulirali njihov transport v primeru trenutnega ali stalnega vira onesnaževanja.

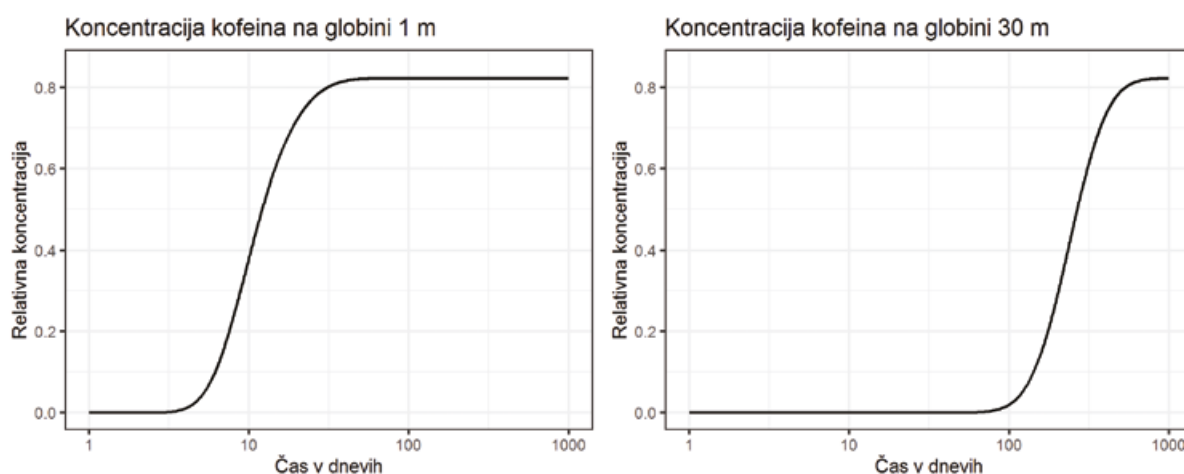
V nadaljevanju prikazujemo nekaj rezultatov modeliranja transporta kofeina v nezasičenem območju. Najprej si oglejmo prenikanje pri konstantnem vnosu, tj. takrat, ko imamo opraviti s stalnim puščanjem kanalizacijskega omrežja. Pri tem upoštevamo še padavinske razmere in njihovo infiltracijo. Modeliranje prikazuje razvoj relativnih koncentracij. Te so določene glede na maksimalno koncentracijo kofeina 116 µg/l, za kar smo privzeli koncentracije, izmerjene na vtoku v čistilno napravo. Iz diagramov na sliki 72 vidimo, da imamo ne glede na dolžino poti opraviti z enako stopnjo razredčenja, čas dospelja, torej čas potovalja onesnaževala, pa se močno razlikuje.

Oglejmo si še prikaz razvoja onesnaženja v primeru enkratnega vnosa, tj. razlitja snovi, ki vsebuje kofein (slika 73). Oblika oblaka, ki se širi, je povsem drugačna kot v prejšnjem primeru (slika 70). Diagrama ponazarjata, kako se oblak razširi

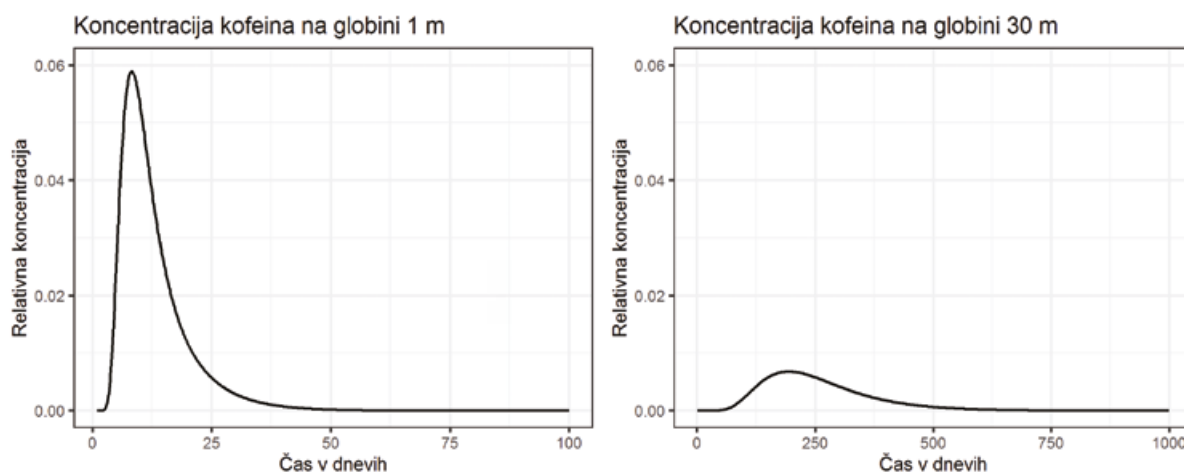
navzdol. Na vsaki točki koncentracija sprva narašča in nato s časom upade. Na višji točki, blizu površja, so koncentracije višje kot v spodnjem delu, hkrati pa je v spodnjem delu trajanje oblača koncentracije daljše kot zgoraj. Razlike med modeloma so pričakovane, saj je v prvem primeru na voljo tako rekoč neskončen vir onesnaževala, v drugem primeru pa je vnos časovno in količinsko omejen.

Na podlagi modeliranja transporta onesnaževal lahko te rezultate prenesemo v prostor in jih s pomočjo kart prostorskega raztezanja prikažemo v

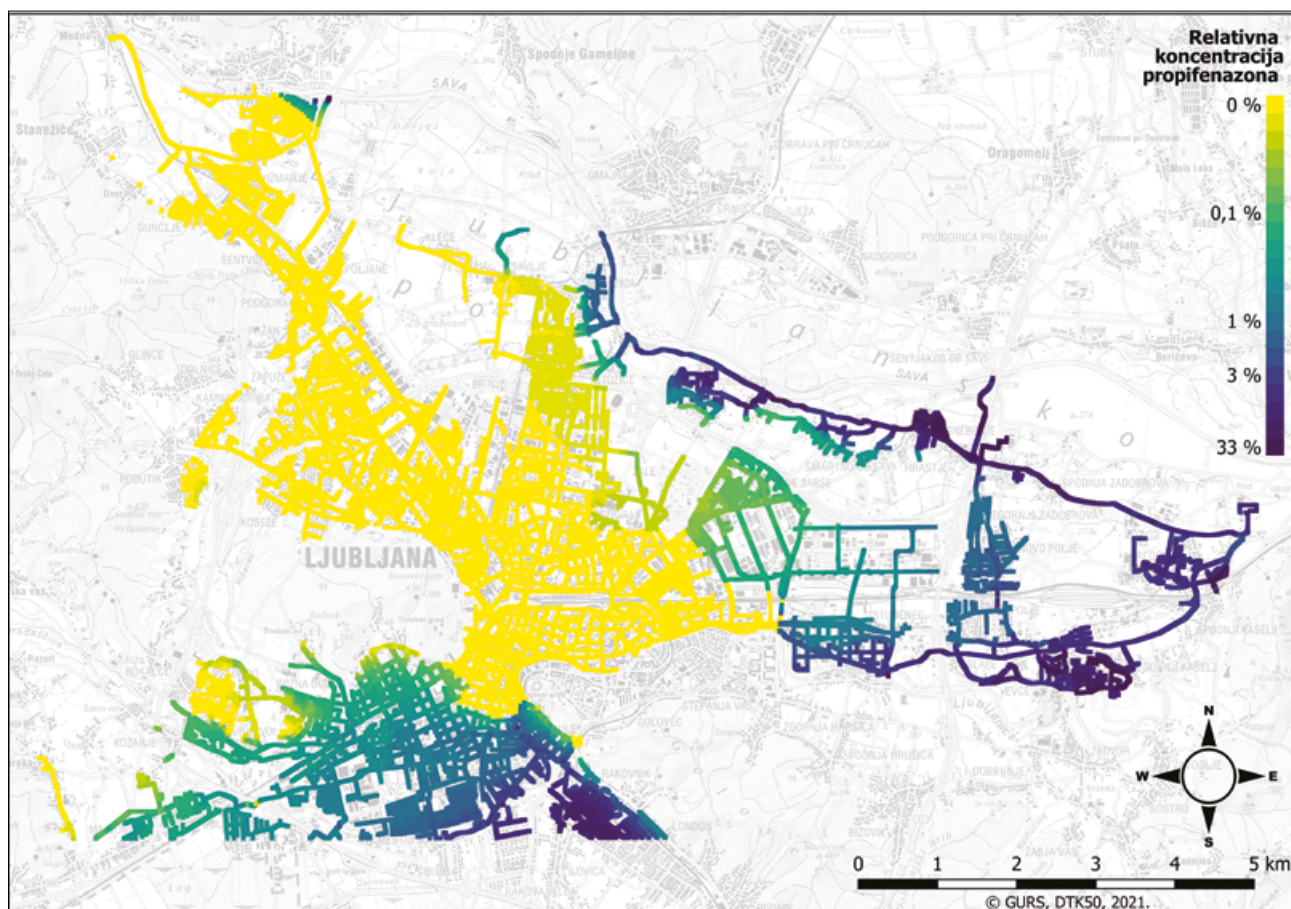
prostoru. Na karti (slika 74) so kot primer prikazane ocenjene koncentracije propifenazona pod kanalizacijskim omrežjem na stiku nezasičenega in zasičenega območja 200 dni po začetku manjšega puščanja kanalizacije. Koncentracije so najvišje na lokacijah pod kanalizacijskim omrežjem; imajo najmanjšo debelino nezasičenega območja in so praviloma na bregovih Save. V osrednjem delu polja so koncentracije najmanjše, delno zaradi največjih globlin do gladine podzemne vode, pa tudi zaradi prisotnosti glinastih plasti v vodonosniku, ki dodatno upočasnjujejo širjenje onesnaževal.



Slika 72: Prikaz modela transporta kofeina v nezasičenem območju pri stalnem vnosu iz kanalizacijskega omrežja.



Slika 73: Prikaz razvoja koncentracij kofeina v nezasičenem območju pri trenutnem vnosu.



Slika 74: Karta prostorskega raztezanja koncentracij propifenazona pod kanalizacijskim omrežjem Ljubljane na stiku nezasičenega območja z gladino podzemne vode v primeru, da se onesnaževalo sprosti 200 dni po začetku manjšega puščanja kanalizacije.

### 6.2.2 Modeliranje v zasičenem območju

Transport onesnaževal v zasičenem območju poteka v smeri, ki je povprečno gledano vzporedna gladini podzemne vode. Pogosto govorimo kar o horizontalnem toku, čeprav je pravi tok vode nekoliko nagnjen. Parametri, ki vplivajo na hitrost prenosa onesnaževala, so v zasičenem območju podobni kot v nezasičenem območju in obsegajo poroznost, prepustnost vodonosnika ter transportne značilnosti onesnaževal. Transport v zasičenem območju se od nezasičenega razlikuje tudi zaradi tega, ker se vsebnost vode v slednjem neprestano spreminja, v zasičenem območju pa so pore ves čas zasičene z vodo.

Ko onesnaževalo preko nezasičenega območja prispe do gladine podzemne vode, je njegova koncentracija že zmanjšana zaradi transporta v nezasičenem območju, tudi če je vir onesnaževala stalen in je že dolgo prisotno v okolju. Pri prehodu na drugi podsistem širjenja onesnaževal v vodonosnikih, tj. na širjenje v zasičenem območju, moramo torej upoštevati rezultate modeliranja v nezasičenem območju. Ti sedaj postanejo vir novega podsistema na njegovih robovih, medtem ko za cilj ali prejemnike opredelimo vodnjake pitne vode, druge pomembne lokacije v vodonosniku ali lokacije, ki nam pomagajo opredeliti druge pomembne značilnosti širjenja onesnaževal (slika 75).





Slika 75: Konceptualni model širjenja onesnaževala v zasičenem območju Ljubljanskega polja.

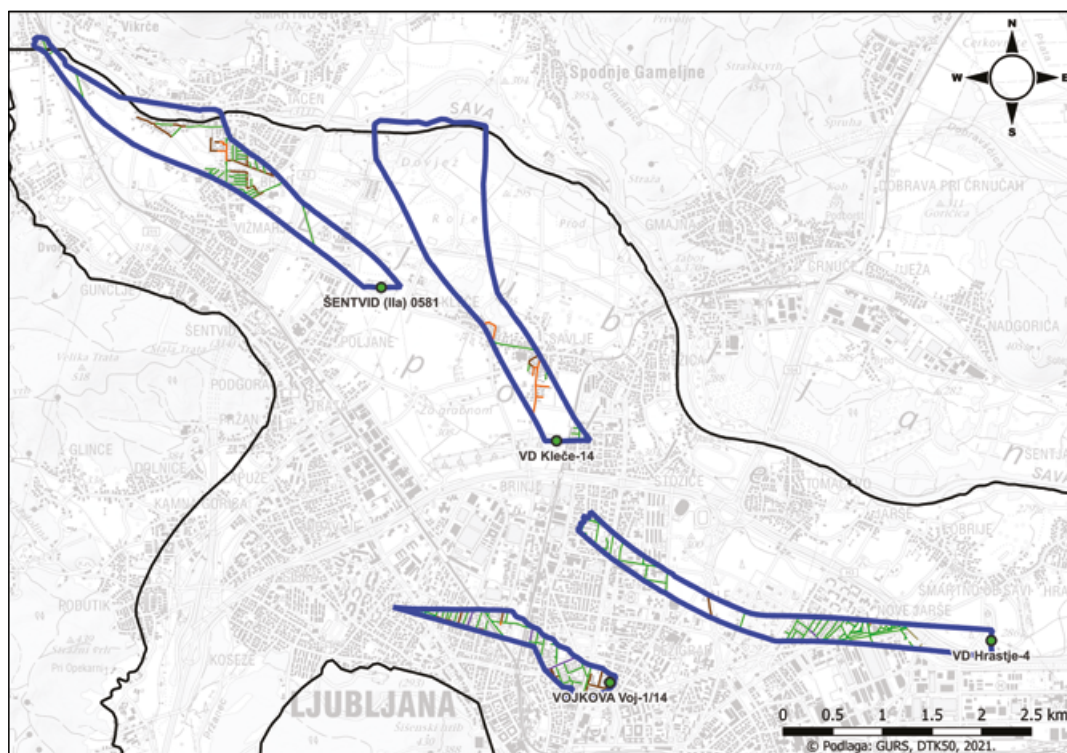
Ko se osredotočimo na posamezno lokacijo v vodonosniku, za katero želimo natančneje izvedeti, kakšna so onesnaževala, ki se lahko pojavljajo v njej, in s tem izberemo cilj drugega podsistema, moramo upoštevati tudi prostorsko razporeditev vira onesnaževanja v napajalnem območju vrtine.

Pri modeliranju širjenja onesnaževal v zasičenem območju smo izbrali štiri lokacije v vodonosniku. Tri so vodnjaki, ki se uporabljajo za črpanje vode za oskrbo s pitno vodo, ena pa je opazovalna vrtina. Izbrane črpalne vrtine so v Šentvidu, Klečah in Hrastju, opazovalna vrtina pa leži v osrednjem delu Ljubljanskega polja, v Bežigradu. Na podlagi dveh stacionarnih modelov toka podzemne vode, ki sta bila izdelana za nizko in visoko vodno stanje, smo opredelili napajalna območja vseh štirih lokacij. Napajalna območja posameznih vrtin se raztezajo gorvodno glede na hidroizohipse, to so linije, ki podajajo enake višine gladine podzemne vode v prostoru. Odvisno od tega, kakšno je črpanje iz vodnjakov, so napajalna območja različno široka, glede na to, za katero obdobje želimo simulirati tok podzemne vode in transport onesnaževal z njo, pa so tudi različno dolga. Na sliki 76 so znotraj posameznega napajalnega zaledja izbranih točk označene linije različnih vrst kanalizacije.

V posameznem napajalnem območju smo izdvojili lokacije, kjer lahko potencialno prihaja do vnosa onesnaževal na gladini podzemne vode; to so lokacije na dnu nezasičenega območja neposredno pod kanalizacijskim omrežjem. Ker transport v nezasičenem območju poteka pretežno v vertikalni smeri, lahko s projekcijo na dno profila nezasičenega območja, katerega debelina se pod kanalizacijo spreminja od točke do točke, predpostavimo vnos onesnaževal s koncentracijo na viru, zmanjšano za dejavnik zadrževanja v nezasičenem območju.

Da bi ugotovili, kakšne so značilnosti širjenja novodobnih onesnaževal na Ljubljanskem polju, smo se oprli na rezultate vzorčenja v obdobju 2018-2021. Pri tem smo upoštevali rezultate, ki so del javnih monitoringov podzemne vode. Zaradi splošnih značilnosti prisotnosti, širjenja in zaznavanja novodobnih onesnaževal v vodonosnikih so bile koncentracije propifenazona, kofeina in karbamazepina v podzemnih vodah Ljubljanskega polja nizke, pogosto pod mejo zaznave ali določitve posamezne analizne metode. Slika 77 prikazuje časovno pojavljanje karbamazepina v podzemni vodi Ljubljanskega polja za obdobje 2020-2021, kjer so izmerjene koncentracije prikazane glede na najvišjo izmerjeno koncentracijo, ki je znašala 12,6 ng/l. Prisotnost karbamazepina je bila potrjena že z večmesečnim pasivnim vzorčenjem, kar je na diagramu prikazano z modro površino. Z aktivnim vzorčenjem smo pristopili še k poizkusu natančnejše opredelitve koncentracij, v katerih se pojavlja na tem območju, vendar smo ugotovili, da se večinoma pojavlja pod mejo določitve. To je na diagramu prikazano z rdečimi razponi vrednosti, ki segajo od 0 do 10 ng/l. Njegovo pojavljanje je bilo mogoče le štirikrat opredeliti s številčno vrednostjo, in sicer na dveh lokacijah v Savi, ko smo za določanje njegove koncentracije v vzorcih vode uporabili nekoliko bolj občutljivo analizno metodo. Te vrednosti so v odstotkih maksimalne izmerjene koncentracije na diagramu na sliki 77 prikazane s črnimi točkami.

Zaradi omejitev, ki so jih podali končni rezultati vzorčenja v smislu odsotnosti natančne kvantitativne vrednosti koncentracij onesnaževal, ki ob vsaki meritvi niso bile možne, smo uporabili scenarijski pristop k modeliranju.



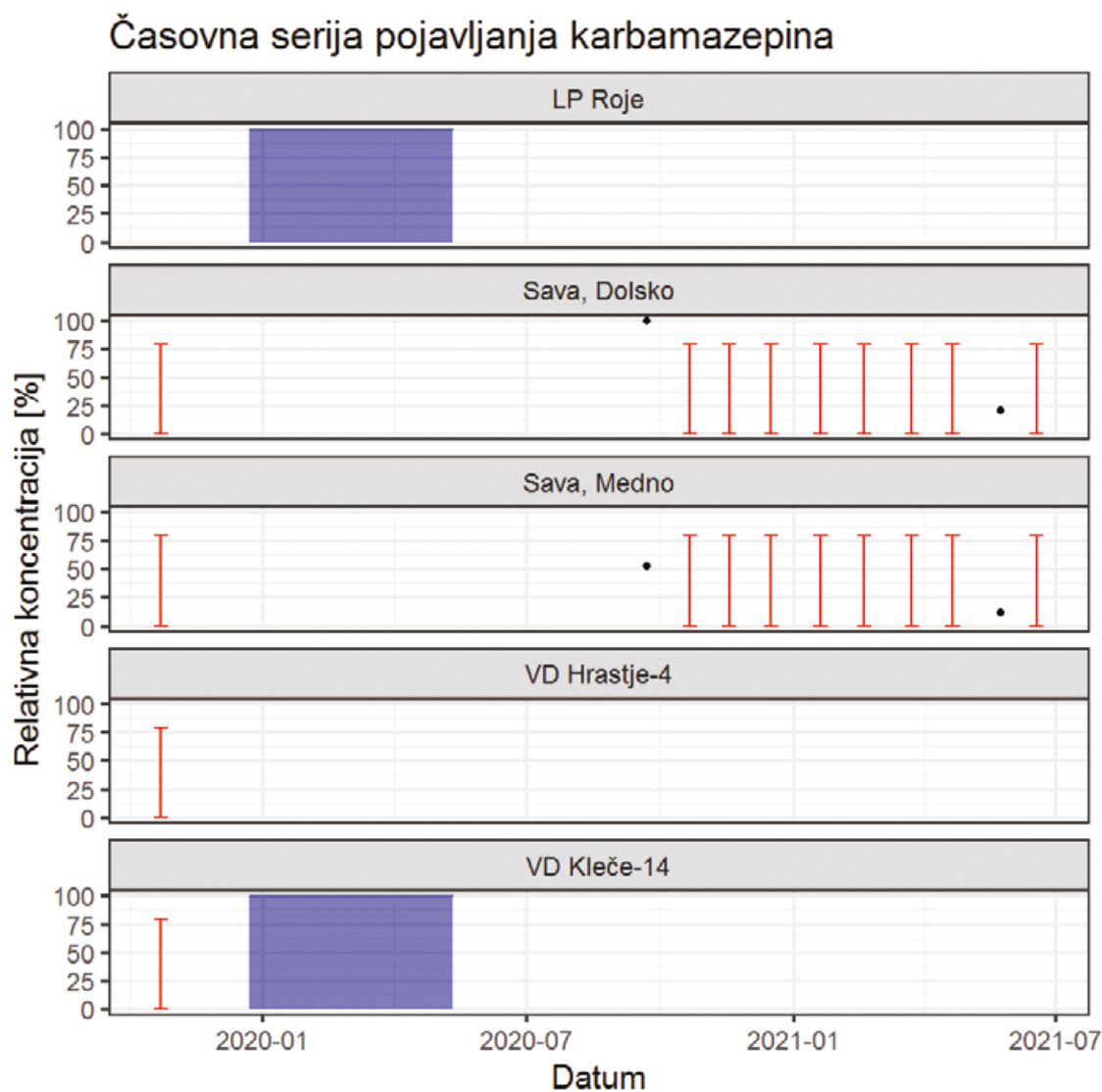
Slika 76: Prikaz analize obsega napajalnega zaledja posameznega opazovalnega objekta, v katerem smo opazovali prisotnost novodobnih onesnaževal.

Scenariji, ki smo jih upoštevali pri simulacijah širjenja, so obsegali hidrološko stanje vodonosnika ter lastnosti vira onesnaževanja. Rezultate smo tako simulirali za primera nizke in visoke gladine podzemne vode ter za primera nizke in visoke stopnje puščanja kanalizacije. Izdelali smo štiri različne modele kombinacij scenarijev za vsa tri izbrana onesnaževala ter za vse štiri lokacije.

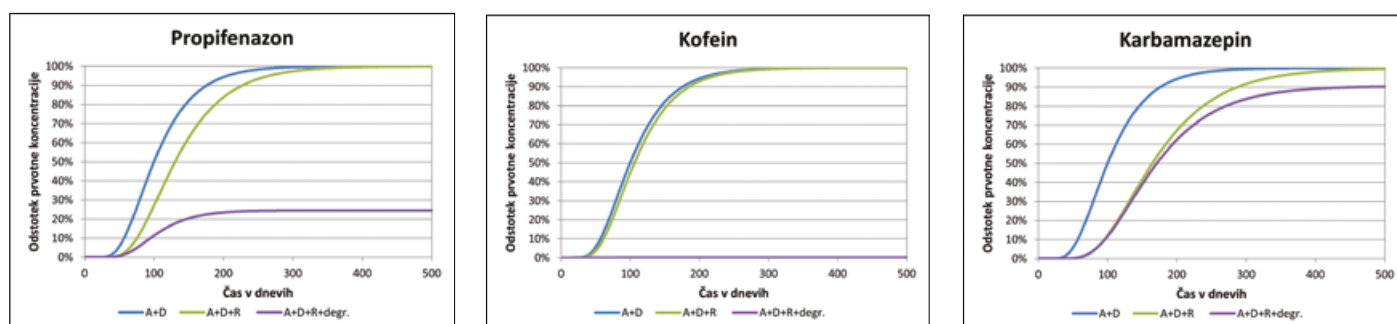
V prvem koraku smo za pogoje, ki vladajo v vodonosniku Ljubljanskega polja, analizirali obnašanje vsakega od onesnaževal ločeno (slika 78). Transport je bil analiziran na podlagi modelnega izhodišča, da je dolžina poti onesnaževala skozi zasičeni del vodonosnika 500 m. Pri tem smo simulacijo izvajali s kombinacijo različnih transportnih procesov. V prvem koraku smo upoštevali le advekcijo in disperzijo (A+D), v drugem koraku pa smo tema procesoma dodali še zadrževanje ali retardacijo (A+D+R) in v zadnji simulaciji degradacijo (A+D+R+deg). Iz simulacije advekcijsko-disperzijskih procesov sledi, da se koncentracija vseh treh

onesnaževal v opazovalni točki po 34 dneh dvigne na 1 % začetne koncentracije na viru, po 100 dneh na 50 %, začetno koncentracijo vira pa doseže po 300 dneh. Če upoštevamo zadrževalne lastnosti onesnaževal, se prispetje maksimalne koncentracije kofeina zamakne za 16 dni (celoten čas 316 dni), propifenazona za 88 dni (celoten čas 388 dni) in karbamazepina za 190 dni (celoten čas 490 dni). Ob upoštevanju degradacije se končna koncentracija propifenazona v opazovalni točki zmanjša s 100 % na 91 %, propifenazona na 25 %, kofeina pa na manj kot 0,1 %.

Prikazani rezultati simulacije (slika 78) ponazarjajo, kako raznolik je vpliv transportnih značilnosti posameznega onesnaževala in kako različni procesi vplivajo na njihovo širjenje v vodonosniku. Hkrati se ne glede na to, da posamezna onesnaževala izhajajo iz istega vira, v našem primeru je to kanalizacija, ta znotraj vodonosnika zelo različno porazdelijo. Ker v podzemni vodi v primerjavi s karbamazepinom in propifenazonom skoraj pov-



Slika 77: Prikaz časovnega pojavljanja karbamazepina v podzemni vodi Ljubljanskega polja.

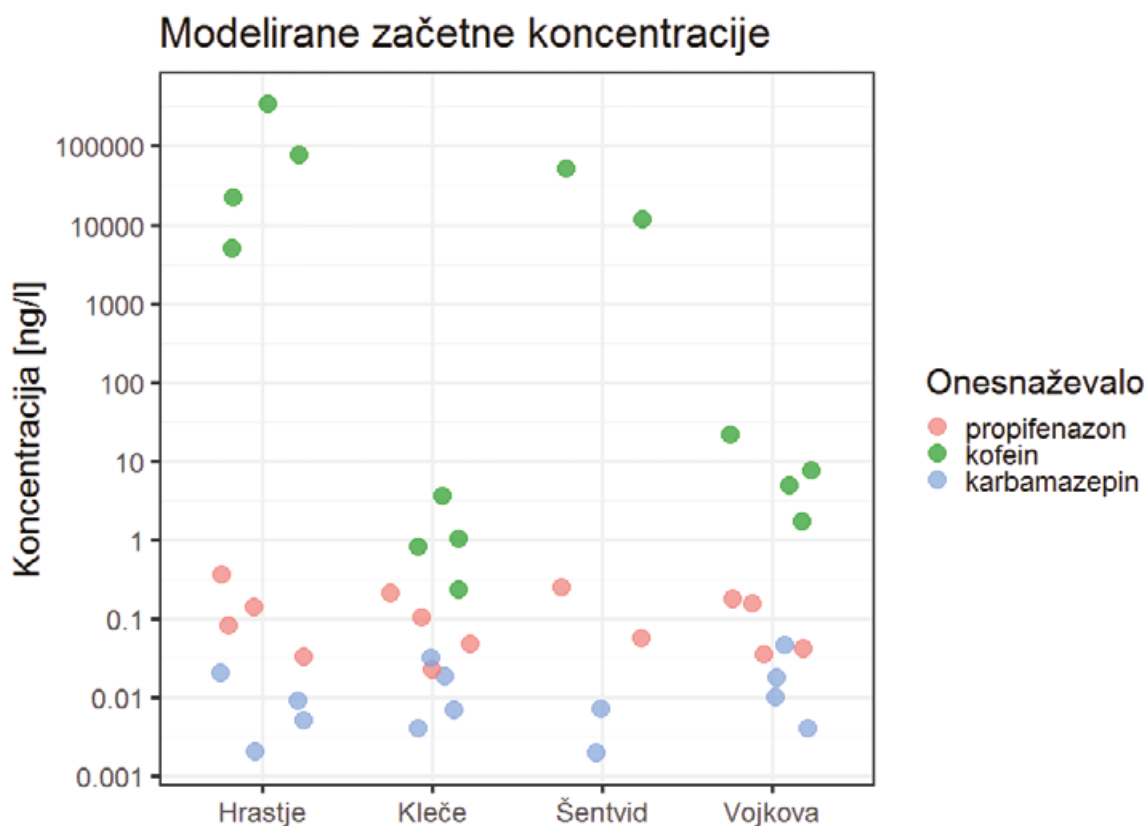


Slika 78: Prikaz vpliva različnih transportnih procesov na transport izbranih zdravilnih učinkovin v podzemni vodi.

sod ugotavljamo razmeroma visoke koncentracije kofeina, to nakazuje, da so koncentracije te snovi v kanalizacijskih sistemih razmeroma visoke. Takšno modelirano pojavljanje kofeina je morda tudi posledica tega, da so njegovi transportni parametri določeni premalo natančno.

Na podlagi rezultatov monitoringa ugotavljamo, da se izmerjene koncentracije izbranih treh onesnaževal od opazovalnega mesta do opazovalnega mesta razlikujejo. Koncentracije, ki jih izmerimo na posameznem opazovalnem mestu, so rezultat toka onesnaževala od mesta, od koder se je to onesnaževalo sprostil v vodonosnik. Zastavimo si lahko vprašanje, kakšne so koncentracije izbranih onesnaževal na viru, tj. pod posameznimi kanalizacijskimi cevmi na stiku nezasičenega območja in gladine podzemne vode. S tem namenom smo

za izbrane lokacije določili prispevna območja, nato pa razdalje do posameznih kanalizacijskih cevi (slika 76). Rezultati te povratne analize so prikazani na sliki 79. Za vsako opazovalno lokacijo (lokacije Hrastje, Kleče, Šentvid in Vojkova cesta) so prikazane ocenjene lokacije na viru, tj. na stiku nezasičenega območja in gladine podzemne vode pod kanalizacijskim omrežjem. Če primerjamo koncentracije posameznih onesnaževal med seboj, ugotovimo, da so najvišje koncentracije kofeina, sledijo koncentracije propifenazona in karbamazepina. Začetne koncentracije se od lokacije do lokacije razlikujejo. Najvišje so koncentracije kofeina v napajalnem zaledju Hrastja, sledi zaledje lokacije Šentvid. Rezultati modeliranja pa kažejo, da so začetne koncentracije propifenazona in karbamazepina na viru podobne.



Slika 79: Rezultati povratnega modeliranja v obliki razponov začetnih koncentracij na viru (pod kanalizacijskim omrežjem na stiku z gladino podzemne vode) na območju napajalnih zaledij opazovalnih objektov.



## 7 UPRAVLJANJE S TVEGANJI ZARADI PRISOTNOSTI NOVODOBNIH ONESNAŽEVAL V VODNIH VIRIH

### 7.1 Izhodišča

Intenzivna uporaba številnih in raznolikih snovi v vsakdanjem življenju, industriji in kmetijstvu ima za posledico, da se številne od teh snovi pojavljajo v okolju, v vseh njegovih komponentah, od tal in zraka do različnih delov vodnega kroga, in ne nazadnje v različnih prehranskih verigah, katerih del je tudi človek. Nekatere od teh snovi (na primer pesticidi) ali kemijske zvrsti (na primer nitrati in nitriti) so že dolgo predmet opazovanj in monitoringov v okolju, prav tako skušamo njihovo prisotnost zmanjšati in vplivati na njihovo pojavljanje. Dobro so znani negativni in škodljivi učinki številnih od teh snovi, zato se zavedamo posledic, ki jih lahko povzročajo. Te spojine so pravno regulirane. Kaj pa številne druge spojine, ki smo jih v naši raziskavi zasledili v vodah Ljubljanske kotline, ali podobne in še mnoge druge spojine, ki bi jih verjetno našli tudi na drugih območjih po Sloveniji? Kaj pomeni njihovo pojavljanje v vodnem okolju, ali je škodljivo? In kaj moramo storiti, da bomo njihovo nadaljnje pojavljanje preprečili ali celo dosegli, da v okolju ne bodo več prisotne? Vse to so vprašanja, na katera v veliki meri še ne poznamo odgovorov in bodo pred nas v prihodnosti postavljala še veliko izzivov. Ne glede na to, da je veliko vprašanj, povezanih z novodobnimi onesnaževali, še odprtih in da se s porajanjem vedno

novih onesnaževal odpirajo vedno nova vprašanja, si v nadaljevanju pogledjmo nekaj osnovnih izhodišč za upravljanje s tveganji, ki jih novodobna onesnaževala pomenijo v vodnem okolju.

Sodobnega življenja si ne moremo predstavljati brez uporabe številnih snovi - spojin, kemikalij in raznovrstnih materialov. Njihova uporaba ni povezana le z luksuzom in visokim standardom, kot si včasih poenostavljeno predstavljamo, ampak so od njih odvisni številni življenjsko in družbeno pomembni sistemi. Oglejmo si nekaj primerov. Brez fitofarmaceutskih sredstev ni mogoče zagotoviti sodobne intenzivne proizvodnje hrane. Prav tako si brez uporabe goriv iz ogljikovodikov, raznovrstne plastike in drugih umetnih materialov ni mogoče predstavljati transporta. Sodobni napredek na področju zdravja in higiene nas je pripeljal do višjega življenjskega standarda, a obenem do tega, da uporabljamo veliko sinteznih zdravil, sredstev za osebno nego in prehranskih dodatkov.

Nepreštevna množica spojin, ki jih uporabljamo, vodi h kemizaciji okolja kot celote in njegovih komponent, med katerimi je vodni krog eden najpomembnejših. Kemizacijo vodnega kroga razumemo kot proces, pri katerem prihaja do vnosa



Slika 80: Prikaz odnosa med antropogenim in naravnim krogom onesnaževala.

snovi - onesnaževal, ki jih brez vplivov človeka v njem ne bi bilo. Zaradi izmenjave energije kroži tudi masa, zaradi česar v naravnih pogojih krožijo elementi, spojine, minerali in snovi. Tako kot vodni krog opredeljuje koncept toka vode, lahko v naravi opredelimo tudi druge masne in energijske kroge ali cikle. Tudi umetna snov - onesnaževalo, ki vstopi v naravni sistem - prične krožiti, njena pot ali usoda onesnaževala pa je odvisna od njenih lastnosti, od transportnega medija, ki jo transportira skozi okolje, ter od interakcij z živo in neživo naravo. Tako kot govorimo o ogljikovem ali dušikovem krogu, lahko govorimo o krogu posameznega onesnaževala ali skupin onesnaževal. Celoten krog onesnaževala razdelimo na dva podsistema ali kroga: antropogeni podsystem ali krog, ki opredeljuje pot onesnaževala od njegove proizvodnje do uporabe in odpadka, ter naravni podsystem ali krog, ki opredeljuje njegovo usodo v naravi. Ta podsistema se stikata in deloma prekrivata (slika 80).

Naj opredelimo še pojem potencialnega in dejanskega onesnaževala. Potencialno onesnaževalo je tista snov, ki je v okolju še nismo zaznali, lahko pa se zaradi napačnega ravnanja v antropogenem okolju v njem znajde. Dejansko onesnaževalo pa je tisto, ki je že v naravnem krogu. Sem uvrščamo tako dobro znana in pravno regulirana onesnaževala kot tudi novodobna ali porajajoča se onesnaževala. Slednja so namreč že prisotna v okolju, vendar je nabor informacij o njih, s katerimi razpolagamo, omejen.

Kemizacija vodnega kroga je nesprejemljiva, vendar se ji zaradi narave človekovih dejavnosti ne moremo v celoti izogniti. Do nje je z razvojem industrije že prišlo, sovpada z geološkimi in drugimi procesi, ki jih uvrščamo v antropocen, geološko dobo, ki jo pogojuje človek. Ne glede na vzroke in posledice, ki jih v vodnem krogu povzročajo posamezna onesnaževala, bi morali v največji možni meri stremeti k preprečitvi vnosa potencialnih onesnaževal v okolje, z raznovrstnimi ukrepi pa bi se morala zmanjšati prisotnost dejanskih onesnaževal. Realizacija tega koncepta je v celoti neuresničljiva, tako zaradi obsega že prisotnih onesnaženj kot zaradi kompleksnosti snovi, ki jih proizvajamo na novo, ter ne nazadnje zaradi kul-

turnih, socialnih, političnih in ekonomskih razmerij na globalni in lokalni ravni.

Z ukrepi, ki so nam na voljo, moramo stremeti k omejevanju kroga potencialnega onesnaževala le na antropogeni krog. Težiti moramo torej k temu, da do vzpostavitve naravnega kroga onesnaževala ne pride in da se povezava med krogoma ne vzpostavi. Če se ta povezava s kakršnegakoli razloga vendarle vzpostavi in onesnaževalo preide iz antropogenega kroga v naravni krog, pa moramo poskrbeti, da se naravni krog onesnaževala ne vzpostavi v celoti. Pot onesnaževala v naravno okolje moramo preprečiti že na samem začetku. V primerih, ko so naravni podsistemi kroženja onesnaževal že vzpostavljeni, moramo težiti k temu, da se povezave med njegovimi posameznimi (pod)komponentami prekinejo.

Na krog dejanskih in potencialnih onesnaževal vplivamo s procesi, ki jih v najširšem pomenu besede opredelimo kot upravljanje z onesnaževali. To je zelo širok in težko opredeljiv pojem, ki vsebuje celoto vseh aktivnosti, s katerimi zmanjšujemo ali preprečujemo vplive dejanskih onesnaževal na okolje ali vstop potencialnih onesnaževal v okolje. Med te aktivnosti sodijo različne politike (ang. Policy)<sup>1</sup> odnosa do onesnaževal, vladovanje (ang. Governance)<sup>2</sup> na področju onesnaževal, pravna regulacija onesnaževal in gospodarjenje z onesnaževali. Sem ne nazadnje sodijo tudi ukrepi, s katerimi želimo zmanjšati prisotnost, posledice in vplive dejanskih onesnaževal v okolju. Vse te aktivnosti so prepletene in jih ni mogoče ločiti (slika 81).

Upravljanje vodnega kroga in njegovih komponent povezujemo z načelom celostnega upravljanja z vodami (IWRM<sup>3</sup> - ang. Integrated Water Resources Management), ki je mednarodno uveljavljen koncept upravljanja in temelj skupne evropske politike na področju voda, ki je bil leta 2000 sprejet in pravno implementiran z Okvirno direktivo o vodah

<sup>1</sup> Gre za v slovenščino težko prevedljiv angleški izraz, ki pa se je v tuji literaturi zelo uveljavil. Pomen tega izraza se razlikuje od pomena politike (na primer strankarske politike) in označuje različne pristope do družbeno relevantnih problemov - od zainteresirane civilne družbe do političnih strank.

<sup>2</sup> Tudi ta izraz je v slovenščino težko prevedljiv, je pa v tuji literaturi zelo uveljavljen. Splichal (2008) ga je prevedel kot vladovanje, tak prevod pa zagovarjajo tudi številni drugi avtorji (na primer Turnšek Hančič et al., 2013). Ne glede na to pa se prevod ni povsem uveljavil.

<sup>3</sup> Mednarodno uveljavljena kratica, ki ima pogosto vlogo termina.



Slika 81: Odnos med aktivnostmi in ukrepi pri upravljanju z onesnaževali.

(WFD<sup>4</sup> - ang. Water Framework Directive). Načela te direktive so prenesena tudi v slovensko zakonodajo na področju voda. Glavni načeli direktive sta zagotavljanje dobrega stanja voda ter vključevanje interesov vseh deležnikov in ekosistemov. Zaradi tega je aktualno upravljanje onesnaževal v vodnem krogu tesno povezano z izhodišči in zahtevami te direktive.

Upravljanje z antropogenim krogom onesnaževal je v veliki meri povezano z zakonodajo, ki regulira njihovo proizvodnjo, rabo, prodajo in po njihovi uporabi tudi odstranjevanje kot odpadke. Zato v osnovi ne gre za okoljska izhodišča in okoljsko zakonodajo. Vendar tudi to upravljanje teži k temu, da ne bi prišlo do stika z naravnim krogom onesnaževal, ne glede na to pa se temu pri številnih snoveh ni mogoče izogniti. Zato se ta zakonodaja prekriva z zakonodajo na področju okolja in voda, saj posredno predvideva, da bo do tega stika prišlo, ne glede na vse preventivne ukrepe.

Problemатiko pojavljanja novodobnih onesnaževal v vodnem okolju je treba povezati z upravljanjem že reguliranih onesnaževal v vodi. Politike, vladovanje, pravna regulacija in gospodarjenje, ki jih uvrščamo v celostni koncept upravljanja, so tesno povezani z ukrepi za obvladovanje kroga onesnaževal, in sicer v takšni meri, da že sami po sebi pomenijo ukrep obvladovanja kroženja onesnaževal. To najlažje ponazorimo z zakonodajo, ki lahko prepove ali omeji proizvodnjo določene, za vodno okolje nevarne snovi, kar je ukrep z neposrednim učinkom, saj tako že na samem viru ustavimo vnos onesnaževala v okolje. Ukrepi za obvladovanje

onesnaževal so torej vzporeden nabor aktivnosti v celostnem konceptu upravljanja.

Med ukrepi za obvladovanje onesnaževal ločimo:

- pasivne ukrepe,
- aktivne ukrepe.

Pasivni ukrepi so tisti, pri katerih vplivamo na krog onesnaževala, ne da bi neposredno posegali v vodni krog ali njegove komponente. Ti ukrepi vključujejo strategije, področno zakonodajo, monitoringe in mnoge druge aktivnosti. Aktivni ukrepi so tisti ukrepi, pri katerih z inženirskimi postopki aktivno posegamo v vodni krog, da bi zmanjšali koncentracije ali povsem odstranili pojavljajoča se onesnaževala, ter ukrepi, pri katerih z inženirskimi postopki preprečujemo širjenje onesnaževal iz enega dela vodnega kroga v drugega.

Razmerje med pasivnimi in aktivnimi ukrepi je pogosto povezano z oceno tveganj, ki jih posamezna onesnaževala pomenijo za vodne organizme in človeka. Zaradi obsega in števila potencialnih in dejanskih onesnaževal je ocena tveganja posledica pragmatičnega pristopa k problematiki. Ker so sredstva in viri omejeni, najprej rešujemo tiste probleme, ki pomenijo visoko tveganje, šele nato se lotevamo manjših tveganj. Presoja tveganj za vodno okolje in organizme je pomembna tudi v fazi razvoja in proizvodnje snovi, saj naj bi se s tem omejili predvsem na snovi, ki pomenijo majhno tveganje. Postopki ocene tveganja so zelo kompleksni, zato se v nadaljevanju omejimo le na opis nekaterih osnovnih izhodišč, ki so pomembna za razumevanje upravljanja z novodobnimi onesnaževali.

## 7.2 Ocena tveganj

Maja 2021 je Evropska komisija v okviru Evropskega zelenega dogovora sprejela Akcijski načrt EU: Naproti ničelnemu onesnaževanju zraka, vode in tal<sup>5</sup> (ang. EU Action Plan: »Towards Zero Pollution

<sup>4</sup> Gre za uradni prevod originalnega angleškega naslova. Pri tem velja opozoriti, da je v originalu uporabljena beseda »pollution« v pomenu škodljivih učinkov. Slovenski prevod z onesnaženjem je zaradi tega pomensko premalo natančen.

<sup>4</sup> Prav tako mednarodno uveljavljena kratica, ki ima pogosto vlogo termina.

for Air, Water and Soil«). V njem je zapisano, da so cilji ničelnega onesnaževanja: »Onesnaževanje zraka, vode in tal se zmanjša na ravni, ki ne veljajo več za škodljive zdravju in naravnim ekosistemom ter ustrezajo mejam zmogljivosti našega planeta, s čimer se ustvari okolje brez strupov.« Citirani dokument je preobširen, da bi ga podrobneje obravnavali, nekoliko podrobneje si oglejmo le prej navedeni citat. Ta predvideva, da je vnos onesnaževal v okolje dopusten, vendar le do meje, ki ne škodi zdravju in ekosistemom. Mejo med neškodljivimi in škodljivimi učinki pa je mogoče postaviti le na osnovi analize tveganja. Ta je lahko usmerjena analiza tveganja (na primer za določen organizem, odvisen od podzemne vode) ali okoljska analiza tveganja, pri kateri preverjamo tveganje za celotno okolje.

Analiza tveganja temelji na odnosu med odmerkom ali dozo in odzivom (ang. dose - response) nanj. Ta odnos predpostavlja, da bo odziv organizma večji, če bo odmerek snovi, ki ga dobi, večji (na primer tako, da kot odmerek použije snov, raztopljeno v vodi), kot če bo odmerek manjši. Ta odnos praviloma ni sorazmeren. Pri nizkih odmerkih snovi pogosto ne beležimo nobenega učinka, z naraščanjem odmerka pa pri določeni količini ali koncentraciji snovi pride do odziva. Mejno koncentracijo med območjem koncentracij ali količin brez odziva ali z odzivom imenujemo koncentracija brez učinka. Odnos med odmerkom in odzivom je omejen tudi navzgor. Nad določeno koncentracijo ali količino je ne glede na njeno vrednost odziv enak. To vrednost imenujemo prag. Odnos med odmerkom in odzivom lahko ponazorimo tudi grafično ali opišemo z matematično enačbo. To imenujemo krivulja odmerka ali krivulja odziva na odmerek.

Le za redka onesnaževala poznamo zanesljive krivulje odmerka, ki bi v celoti temeljile na eksperimentalnih podatkih. Tudi za najpogostejša onesnaževala, ki se pojavljajo v vodnem okolju, krivulje odmerka v veliki meri temeljijo na teoretičnih izhodiščih in predpostavkah. To še toliko bolj velja za novodobna onesnaževala, za katera so krivulje odmerka pogosto zasnovane na povsem teoretičnih predvidevanjih ali pa na in vitro testih (na primer na celičnih linijah, ki so model za napovedovanje dogajanja in vivo v telesu). Pri tem se

je treba zavedati, da se z napredovanjem znanja o posameznih onesnaževalih s časom spreminjajo tudi krivulje odmerka. Številčnejši podatki neredko pokažejo, da je koncentracija brez učinka nižja, kot je bilo ocenjeno na začetku raziskav snovi.

Za opredelitev teoretičnih odzivnih krivulj so v veljavi pravila, ki izhajajo iz zakonodaje o kemikalijah in snoveh, ta pa iz ekotoksikoloških načel. Kadar proizvajalec določeno snov pošlje na tržišče in jo s tem preda v uporabo, mora biti snov opremljena z varnostnim listom, na katerem so poleg njenih fizikalno-kemijskih lastnosti navedeni podatki o tveganjih in nevarnostih, ki jih lahko povzroča. Hkrati morajo biti na varnostnem listu podani stavki za nevarnost (t. i. H-stavki - ang. Hazard) in po potrebi tudi previdnostni stavki (t. i. P-stavki - ang. Precaution). Uporabljajo se lahko tudi kombinacije posameznih stavkov. Ti stavki predstavljajo možne verige nevarnosti, ki se lahko realizirajo, če se onesnaževalo sprosti. Kot primer navedimo stavek z oznako H413, kar pomeni snovi, ki lahko imajo »dolgotrajne škodljive učinke na vodne organizme«. H-stavke lahko obravnavamo kot opredelitev scenarijev, ki določajo, kaj se bo zgodilo s snovjo ob njeni sprostitvi (na primer razlitju, raztrosu ...). Za novodobna onesnaževala, ki so rezultat proizvodnih procesov in imajo dovoljenje za proizvodnjo, so ti stavki opredeljeni ter so nam v veliko pomoč pri presoji tveganj in vplivov na vodno okolje in vodne organizme. Le malo pa je znanega o transformacijskih produktih novodobnih onesnaževal, ki nastanejo v antropogenem ali naravnem krogu onesnaževala.

Podobne težave pri novodobnih onesnaževalih nastanejo pri določanju koncentracije brez učinka. Pomemben koncept pri oceni tveganj je t. i. napovedna koncentracija brez učinka (PNEC - ang. Predicted No-Effect Concentration). To je koncentracija, ki je ocenjena na podlagi vnaprej predpisanih postopkov ocenjevanja in ki pri novodobnih onesnaževalih in njihovih transformacijskih produktih v večini primerov temelji le na teoretičnih izračunih. Nekoliko bolje poznamo snovi, ki prihajajo s t. i. prednostnih list, saj v njihovo poznavanje vlagamo več sredstev in virov. Vrednosti PNEC so praviloma zbrane v ekotoksikoloških bazah podatkov



(na primer baza podatkov projekta NORMAN) ali pa jih je mogoče oceniti v ekspertnem postopku.

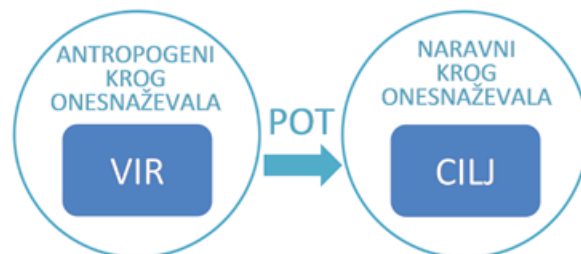
Presoje vrednosti PNEC izhajajo iz fizikalno-kemijskih podatkov o topnosti, hidrofobnosti, hlapnosti in mobilnosti posameznih spojin ali snovi, temeljijo pa tudi na podatkih o njihovi obstojnosti, bioakumulativnosti, strupenosti za vodne organizme, kancerogenosti, mutagenosti in škodljivosti za reprodukcijo. Pri novodobnih ali porajajočih se onesnaževalih so prav ti podatki, ki bi temeljili na eksperimentih ali opazovanjih, pogosto pomanjkljivi ali v celoti odsotni.

Za pojavljanje novodobnih onesnaževal v vodnem okolju je praviloma značilno, da nastopajo v zelo nizkih koncentracijah, kar pomeni, da imamo opraviti z razmeroma visoko negotovostjo določitve rezultatov, ki izhaja iz negotovosti vzorčenja in meritev. Tako nizke koncentracije in negotovosti pa vplivajo na določitev PNEC ter iz tega izhajajočih analiz tveganja za okolje. Pri določanju vrednosti PNEC za novodobna onesnaževala je potrebna velika previdnost; v največji možni meri je treba upoštevati previdnostno načelo in dejstvo, da se vedenje o novodobnih onesnaževalih neprestano spreminja, pogosto tako, da se vrednosti PNEC s časom znižujejo - pogosto do te mere, da proizvodnjo in uporabo nekaterih snovi s časom prepove zakonodaja.

## 7.3 Pasivni ukrepi

### 7.3.1 Razdelitev ukrepov

Iz razprave o tveganjih, povezanih s pojavljanjem novodobnih onesnaževal v vodnem okolju, izhaja, da so meritve koncentracij ter na njih temelječe ocene o nevarnostih in tveganjih podvržene velikim negotovostim in da pri tem pogosto izhajamo le iz ocen, ne pa iz eksperimentalnih podatkov. V teh primerih moramo delovati preventivno, na podlagi previdnostnega načela, hkrati pa izvajati širok nabor pasivnih ukrepov, ki v čim večji meri preprečujejo vstop onesnaževal v vodni krog. Oglejmo si nabor možnih pasivnih ukrepov, na podlagi katerih lahko zasnujemo zaščito vodnega okolja pred vstopom onesnaževal in onesnaženjem s strani novodobnih onesnaževal.



Slika 82: Odnos antropogenega in naravnega kroga onesnaževala v odnosu do konceptualnega modela vir-pot-cilj.

Pri svojih izvajanjih izhajamo iz opredelitve kroga onesnaževala ter njegove razdelitve na antropogeni krog in naravni krog; prav tako nam je v pomoč konceptualni model, kjer usodo onesnaževala opredelimo v odnosu vir-pot-cilj (slika 82). V skladu s tem je treba določiti hierarhijo ukrepov. V prvem koraku je treba aktivnosti usmeriti predvsem v ukrepe v antropogenem krogu onesnaževal, ki morajo biti usmerjeni tako, da v največji možni meri preprečimo vstop onesnaževala v naravni krog. Ukrepi v naravnem krogu onesnaževala so smiselni od tistega trenutka, ko onesnaževalo vstopi v ta del kroga.

### 7.3.2 Raziskave in razvoj

Znanje o potencialnih in dejanskih novodobnih onesnaževalih se neprestano povečuje. Nekatera onesnaževala s časom postanejo dobro opredeljena, tako da o njih ne moremo več govoriti kot o novodobnih onesnaževalih, druga postanejo nerelevantna. Ne glede na to ostaja v povezavi z njimi veliko sivih polj. Zaradi tega je generiranje novega znanja o novodobnih onesnaževalih na različnih segmentih, od povsem fizikalno-kemijskih in ekotoksikoloških vidikov do socioekonomskih implikacij, poglobitvenega pomena. Raziskave novodobnih onesnaževal in nadgrajevanja znanja o njih morajo biti enakopravne vsem ukrepom za ravnanje z njimi.

### 7.3.3 Monitoring

Pomemben del ukrepov v celotnem krogu onesnaževala je monitoring. Gre za aktivnost, namenjeno opazovanju procesov, ki vplivajo na časovno

in prostorsko porazdelitev onesnaževal. Postopki monitoringa se glede na del kroga onesnaževal med seboj razlikujejo. V antropogenem krogu se moramo usmeriti predvsem v opazovanje masnih tokov in masnih bilanc ter preverjanje njihove zaključenosti; zanima nas, ali v celoti nadzorujemo pot onesnaževala, ki je predmet monitoringa. V naravnem krogu onesnaževala z monitoringom preverjamo, ali je določena spojina prisotna ali ne. Ko posamezno spojino zaznamo, sledijo nadaljnji koraki, ki so usmerjeni v kvantifikacijo - v določanje koncentracij ter njihove prostorske in časovne porazdelitve. Prav pri izvajanju monitoringov novodobnih onesnaževal v vodnem okolju pa se pojavljajo številni izzivi. Obstoječi monitoringi temeljijo na spojinah in snoveh, ki so določene v predpisih, tj. v tistih pravnih dokumentih, ki predpisujejo redne monitoringe, in tistih predpisih, ki opredeljujejo snovi s t. i. prednostnih list. Predpisi pa praviloma ne vključujejo množice drugih spojin, ki se lahko prav tako pojavljajo v komponentah vodnih krogov, zato teh spojin ne opazujemo, njihovih koncentracij pa ne poznamo. Ena od značilnosti novodobnih onesnaževal je tako njihova nereguliranost. To praznino pri izvajanju monitoringa je treba preseči. Večjo pozornost je treba posvetiti nereguliranim spojinam ter razviti in regulirati monitoringe, ki bodo vključili tudi ta vidiki. Bolje moramo opredeliti seznanitveni korak monitoringa vodnega okolja ter bolj učinkovito in sproti vključevati dognanja sodobne znanosti.

Z monitoringom je tesno povezan tudi razvoj analiznih metod. Sodobna kemijska analitika je močno napredovala. Danes je mogoče izmeriti zelo nizke koncentracije snovi, raztopljenih v vodi, kar je bilo še nedolgo tega nepredstavljivo. Z napredkom analiznih tehnologij pa lahko pričakujemo, da se bodo metode še izboljšale in da bo mogoče meriti še nižje koncentracije kot danes. Prav meritve zelo nizkih koncentracij raztopljenih snovi so za razumevanje kroga novodobnih onesnaževal izredno pomembne. Uporaba metod za analizo določanje zelo nizkih koncentracij nam lahko služi kot pomoč pri sistemu zgodnjega opozarjanja na prisotnost novodobnih onesnaževal. Ker posamezno onesnaževalo zaznamo že v zelo nizkih koncentracijah, lahko sprožimo posamezne preventivne ukrepe, ki preprečijo nadaljnje poviševanje koncentracij.

Pri raziskavah pojavljanja novodobnih onesnaževal, katerih število je potencialno zelo visoko, se zastavlja vprašanje ciljanih analiz. Ali pri posameznem vzorčenju in kasnejših analizah zaznamo vsa v vodi prisotna onesnaževala? Zelo pomemben je nadaljnji razvoj analiznih metod, ki bodo omogočale hitro in neposredno ugotavljanje onesnaževal zelo širokega spektra. V povezavi s tem mora biti ena od aktivnosti tudi razvoj baz podatkov o lastnostih spojin. V seznanitvenem koraku monitoringa moramo prepoznati prisotnost posamezne spojine. Če strokovna presoja pokaže, da gre za pomembno spojino, lahko v drugem določitvenem koraku monitoringa izmerimo njene koncentracije. Vse to sodobne masno spektrometrične metode že v veliki meri omogočajo, kljub temu pa se nam nekatere spojine pri monitoringih izmuznejo, zato je treba pozornost posvetiti tudi njim. Prav takšne težko določljive spojine uvrščamo med novodobna onesnaževala.

Poleg razvoja analiznih metod je treba v povezavi z izvajanjem in razvojem monitoringa pozornost nameniti sistemom za vzorčenje in opazovanje. Pri tem moramo ločiti vzorčenje na površinskih vodah od vzorčenja na podzemnih vodah. Slednje je mnogo bolj zahtevno ter terja večje finančne in materialne vložke. Pri površinskih vodah je dostop do vzorčnih mest razmeroma enostaven in terja le pripravo ustreznega dostopa, pri podzemnih vodah pa potrebujemo posebne za to pripravljene opazovalne objekte - praviloma opazovalne vrtine. Tudi na tem področju so monitoringi v zadnjem desetletju naredili velik korak naprej, zlasti sistemi državnih monitoringov, ki so vsaj do določene mere vzpostavili sektorsko vzorčenje, na primer razlikovanje med podzemno vodo v plitvejših in globljih predelih vodonosnikov. Vendar je treba te monitoringe razvijati še naprej. Dosedanje raziskave novodobnih onesnaževal nakazujejo, da se ta izrazito porazdeljujejo po globini vodonosnikov, zato je treba vzpostaviti takšna vzorčna mesta, ki bodo omogočala sektorsko vzorčenje po globini vodonosnika. Pri razvoju vzorčnih mest za ugotavljanje prisotnosti novodobnih onesnaževal v podzemni vodi se zastavlja tudi vprašanje materialov, ki jih uporabljamo v ta namen. Ker pri novodobnih onesnaževalih ugotavljamo prisotnost zelo nizkih koncentracij, je zelo pomembno, da ne pride do kontaminacije na samem vzorčnem mestu.

Razvoj sodobnih računalniških metod in drugih tehnologij prodira tudi na to področje. Meritve postajajo avtomatizirane in v nekaterih primerih tudi daljinsko vodene. Pričakujemo lahko, da bo v prihodnosti mogoče na licu mesta, na terenu, uporabiti nekatere metode, ki jih lahko danes izvajamo le v laboratorijskih pogojih. Današnji podatki o novodobnih onesnaževalih so prostorsko in časovno zelo omejeni, razvoj naprednih monitoringov za njihovo zaznavanje pa nam bi omogočil boljše poznavanje njihove dinamike.

V povezavi z novodobnimi onesnaževali in vodnim okoljem je treba opozoriti tudi na biološke monitoringe, pri katerih opazujemo pojavljanje posameznih organizmov in njihovo število, razvojne stopnje ter raznovrstnost. Voda je esencialna snov, ki v organizme vstopa s hrano, nekateri organizmi pa so od vode odvisni tudi življenjsko. Opraviti imamo s številnimi ekosistemi, ki so odvisni tako od površinskih kot podzemnih vod ali celo od vzajemnega odnosa med površinsko in podzemno vodo. Monitoring je pomemben tudi v teh ekosistemi.

#### 7.3.4 Omejevanje onesnaževal na viru

Novodobna onesnaževala se v vodnem okolju pojavljajo v zelo nizkih koncentracijah, kar je v veliki meri posledica njihove visoke mobilnosti. Zaradi tega je ukrepe zmanjševanja in preprečevanja zelo težko izvajati tam, kjer so te koncentracije ugotovljene. Pri novodobnih onesnaževalih je ključno njihovo omejevanje na viru, tj. v proizvodnji, potrošnji in uporabi ter pri njihovem odlaganju in odstranjevanju. Nekatere omejitve je zaradi zelo široke uporabe različnih spojin težko izvajati, ne glede na to pa bi morale biti cilj, h kateremu bi morali stremeti.

Za pojav novodobnih onesnaževal v okolju je pomemben vidik razvoja snovi. V grobem lahko ta proces razdelimo na raziskovalni in proizvodni del. V raziskovalnem delu snov proizvedemo na laboratorijski ravni (na primer sinteza posameznih spojin). Pri tem določimo njene osnovne fizikalno-kemijske, včasih tudi ekotoksikološke lastnosti, ki so v nadaljevanju podlaga za odločanje o tem, ali je to snov mogoče uporabiti za katerega od namenov. Ko je ta odločitev sprejeta, se prične razvoj, ki je vezan na

morebitno proizvodnjo snovi. V tej fazi izvajamo pilotne in saržne poskuse ter različna testiranja, praviloma določimo tudi nekatere značilnosti snovi, ki so osnova za okoljsko analizo tveganja v primeru njene prisotnosti ali sprostitev v okolje. Izkušnje kažejo, da so okoljsko relevantni podatki posameznih snovi, predvsem različnih kemijskih spojin, pogosto zelo pomanjkljivi in premalo natančni, da bi omogočali ustrezno in celostno okoljsko analizo tveganj. Pri razvoju snovi, zlasti različnih spojin, je ključna analiza njihovih značilnosti, ki vplivajo na njihovo obnašanje v okolju. Tudi te lastnosti bi morale biti izhodišče za uporabo določene snovi, ne le njena uporabna vrednost.

V sodobnem ekonomskem sistemu je pri proizvodnji ključen odnos med ponudbo in povpraševanjem. Potrošnja teoretično vpliva na obseg proizvodnje, vendar to ne drži povsem. Nekatere snovi pogosto proizvajajo v presežnih količinah. Zaradi ekonomske logike za presežne količine snovi iščejo dodatne načine uporabe, kar lahko privede do vstopanja teh snovi v naravni krog onesnaževal. Pri nadzoru virov novodobnih onesnaževal je ključno omejevanje presežne proizvodnje in njihove sekundarne rabe, katere okoljske posledice niso dovolj natančno opredeljene.

Pri vseh novodobnih onesnaževalih je ključno omejevanje njihovega stika z vsemi naravnimi in umetnimi transportnimi mediji, ki jih lahko premestijo iz antropogenega kroga v naravni krog. Pri novodobnih onesnaževalih je ključno omejevanje njihovega stika z vodo. Tam, kjer je to omogočeno, naj se potencialna novodobna onesnaževala ne uporabljajo kot vodne raztopine, prav tako se moramo v okolju v čim večji meri izogibati njihovi uporabi v obliki tekočin z dobro topnostjo.

Sodobne doktrine trajnostnega razvoja stremijo h krožnemu ravnanju s snovmi. Snov, ki je v enem od korakov uporabe odpadek, v naslednjem koraku postane surovina. Tak pristop gotovo zmanjšuje pritiske na naravne vire, hkrati pa lahko povzroči redistribucijo nekaterih onesnaževal, zlasti novodobnih, ki nastopajo v zelo nizkih koncentracijah. Sekundarne surovine je treba testirati in presojati na nabor vseh potencialnih onesnaževal, ki se lahko sprostijo v okolje.

Pomemben vidik omejevanja vstopa novodobnih onesnaževal iz antropogenega kroga v naravni krog je ustrezno gospodarjenje z odpadki. Ko potencialno novodobno onesnaževalo postane odpadna snov, jo je treba ustrezno odstraniti ali uničiti do komponent, ki niso škodljive za okolje. Ustrezne verige ravnanja z odpadki so ključne tako v industriji kot v vsakdanjem življenju. Kljub temu, da je bilo veliko narejenega na ločevanju odpadkov ter njihovem gospodarjenju, je za okolje potencialne nevarne odpadke v gospodinjstvih težko ustrezno odložiti, saj za to ni ustreznih lažje dostopnih mest.

### 7.3.5 Razvoj zakonodaje

Okoljska in druga zakonodaja, povezana s potencialnimi in dejanskimi onesnaževali, je v preteklih desetletjih doživela intenziven razvoj, postala je kompleksna, razvejana in včasih tudi težko pregledna. Zaradi tega jo je včasih težko izvajati in nadzorovati.

Z zakonodajnega vidika je pri novodobnih onesnaževalih ključna njihova reguliranost. Zaradi njihove socioekonomske narave, ki je posledica nove proizvodnje, nove rabe in odsotnosti relevantnih informacij o njihovi usodi v okolju, so to snovi, ki so praviloma podregulirane. Njihova regulacija navadno zaostaja za razvojem tehnologije in znanstvenih spoznanj o njih. Evropska zakonodaja je na področju proizvodnje snovi in njihovega nadzora že tako napredovala, da omogoča sprotno vključevanje novih spoznanj.

Pri razvoju zakonodaje, vezane na novodobna onesnaževala, bi bilo treba razmisliti tudi o boljši regulaciji previdnostnih načel. Zdi se, da so ta opredeljena preveč ohlapno, na operativni ravni pa jih ni mogoče udejanjiti.

### 7.3.6 Izobraževanje

Izobraževanje o onesnaževalih, zlasti novodobnih, in ravnanju z njimi ter njihovimi viri (na primer proizvodnja, odlaganje odpadkov ...) je eden ključnih pasivnih ukrepov za njihovo zmanjševanje v okolju. Tako lahko vplivamo na količine njihove rabe in odlaganje presežnih količin.

Izobraževanje in ozaveščanje o njihovi prisotnosti sta ključna na vseh ravneh izobraževanja, tako na šolski ravni kot pri izobraževanju populacije, ki ni več del šolskega sistema. Prav tako je ključno stalno izobraževanje strokovnih uporabnikov snovi, ki so dejanska in potencialna onesnaževala.

Z izobraževanjem je tesno povezana tudi komunikacija med znanostjo, odločevalci in javnostmi. Razvoj komunikacijskih strategij na tem področju je zelo pomemben.

## 7.4 Aktivni ukrepi

### 7.4.1 Opredelitev aktivnih ukrepov

Med aktivne ukrepe za upravljanje z novodobnimi onesnaževali in za sanacijo prisotnosti onesnaževal v vodnem okolju uvrščamo vse tiste aktivnosti, pri katerih so potrebni inženirski posegi v najširšem pomenu besede. To so lahko gradbeno-tehnični posegi v struge vodotokov ali vodonosnike ali tehnološki posegi čiščenja vode. Izvajamo jih lahko za potrebe priprave pitne vode, zbiranja (kanalizacije) in čiščenja odpadnih vod ter v skrajnem primeru za čiščenje vode na mestu, v vodonosniku ali strugi vodotoka. Med gradbeno-tehnične posege, zlasti v vodonosnikih, uvrščamo metode: črpanje in čiščenje (ang. pump & treat), neprepustne in reaktivne bariere, fizično odstranjevanje kontaminiranega materiala in kemična nevtralizacija.

V praksi ne poznamo sistemov, s pomočjo katerih bi izvajali aktivne ukrepe čiščenja in zadrževanja novodobnih onesnaževal. Iz literature poznamo predvsem pilotne projekte, ki temeljijo na kombinaciji metod. Raznovrstnost snovi, ki jih uvrščamo med novodobna onesnaževala, je glavni izziv za načrtovanje in izvedbo učinkovitih praktičnih sistemov za zadrževanje in čiščenje. Poleg tega je pomemben vzrok za odsotnost operativnih sistemov dejstvo, da so obratovalni stroški zelo visoki.

### 7.4.2 Na naravi temelječe rešitve

Na naravi temelječe rešitve (ang. Nature based solutions) obvladovanja prisotnosti novodobnih onesnaževal v vodnem okolju temeljijo na pro-



cesih, na katere naletimo v naravi. Pri tem lahko izkoriščamo naravne danosti, ne da bi posegali v potek procesov, lahko pa do določene mere preoblikovane naravne sisteme uporabimo za čiščenje in zadrževanje.

Na naravi temelječe rešitve vključujejo fizikalne, kemijske in biološke procese, ki potekajo v naravi ter zmanjšujejo toksičnost, količino in koncentracijo onesnaževal. Sem sodijo procesi zmanjševanja koncentracije (z razredčenjem, sorpcijo, imobilizacijo, izhlapevanjem, difuzijo in disperzijo) in degradacije (biodegradacija, biološka in kemična transformacija, fotoliza). Nekatere od teh procesov izkoriščamo tudi pri tehnoloških procesih čiščenja vode.

Kadar ne posegamo v neposreden potek naravnih procesov, temveč naravi v celoti prepustimo usodo onesnaževal, govorimo o naravni sanaciji (ang. natural attenuation), njena učinkovitost pa je odvisna od samočistilnih sposobnosti dela vodnega kroga. Kadar prepoznamo možnosti naravne sanacije ne glede na to, da ne bomo aktivno posegali v procese, izvajamo natančen in usmerjen monitoring, s katerim opazujemo hitrost in naravo teh procesov.

Naštejmo še nekatere na naravi temelječe rešitve. Delovanje prostoživečih bakterij v okolju se pogosto izkaže za proces, ki v veliki meri omili in zmanjša koncentracije zlasti organskih onesnaževal, ki so zanje vir hrane. Prisotnost različnih bakterij izkoriščamo tudi v procesih čiščenja odpadne vode, pri aerobnem ali anaerobnem čiščenju in uporabi aktivnega blata. Sedimenti in na njih ležeča tla, v manjši meri pa to velja tudi za kamnine, imajo izražene močne sorpcijske lastnosti z aktivnimi biološkimi procesi. Pri procesih infiltracije v takšna tla in sedimente lahko v veliki meri zmanjšamo prisotnost onesnaževal. Pomembna različica takšnega procesa so postopki uporabe obrežnega filtrata, ko s pomočjo črpalnih vodnjakov na bregovih vodotokov induciramo infiltracijo rečne vode v vodonosnik ali umetnega napajanja vodonosnikov (MAR - ang. managed aquifer recharge) s pomočjo različnih infiltracijskih polj ali vodnjakov (v Sloveniji se ti sistemi uporabljajo v Mariboru in Ormožu). Tako kot imajo bakterijske združbe pomemben vpliv na koncentracije onesnaževal, lahko v simbiozi z rastlina-

mi dodatno pomembno prispevajo k zmanjševanju onesnaženja. V ta namen izdelujemo umetne lagune in mokrišča, v katerih prihaja do biodegradacije in imobilizacije onesnaževal. V teh okoljih prihaja tudi do absorpcije onesnaževal na biofilm in gline delce. Podatki v literaturi kažejo, da so ti sistemi učinkoviti prav pri zmanjševanju koncentracij novodobnih onesnaževal.

#### 7.4.3 Ukrepi čiščenja vode

V današnjem razvitem svetu je skorajda samoumevno, da moramo odpadno vodo, preden jo izpustimo v naravne odvodnike, očistiti. Vendar je to spoznanje, ki je razmeroma novo. Tako kot drugod tudi v Sloveniji kljub dolgoletnim naporom ponekod še vedno nismo ustrezno rešili odvodnje in čiščenja odpadne vode. Današnje stanje odvodnje in čiščenja odpadne vode je rezultat dolgega razvoja. Prvi sistemi za čiščenje odpadnih vod so se v zahodni Evropi pojavili sredi 19. stoletja, spoznanje potrebe po čiščenju teh voda je bilo tesno povezano z odkritji o povezanosti kvalitete pitne vode s kvaliteto naravnih vodotokov. Dokler te povezave niso postale jasne, so bile zelo pogoste hidrične epidemije (dizenterije, kolera ...). Prvi sistemi za odvodnjo odpadnih vod so bili mešani, odvajali so tako padavinske kot odpadne vode. Obe vrsti vode sta bili združeni predvsem zaradi tehničnih razlogov in dejstva, da so ju odvajali neposredno v vodotoke. Zato ima veliko mest še danes mešane sisteme odvodnje, ki jih je zaradi pretekle urbanizacije težko spremeniti v ločene sisteme. Dokaj kmalu je dozorelo spoznanje, da je treba zaradi delovanja mešanega sistema iz odpadne vode odstraniti težje snovi (na primer pesek, trdni delci). Kmalu zatem je sledil celostni razvoj t. i. primarnega čiščenja, tj. poleg odstranjevanja težjih snovi tudi odstranjevanje lažjih snovi, ki plavajo na vodi (na primer olja, maščobe). V velikih evropskih urbanih središčih je že pred drugo svetovno vojno dozorelo spoznanje, da zgolj primarno čiščenje odpadnih vod ne zadošča. Zlasti po drugi svetovni vojni se je pričelo razvijati tudi sekundarno čiščenje komunalnih odpadnih vod, tj. čiščenje raztopljenih snovi, sprva predvsem ogljikovih spojin, nato pa tudi fosforjevih in dušikovih spojin.

V Ljubljani je razvoj odvajanja odpadnih vod potekal vzporedno z razvojem sistema za oskrbo prebivalstva s pitno vodo. Najstarejši odvodniki so nedolgo tega segali še v dobo rimske Emone. Prvi celovit načrt kanalizacijskih sistemov s čistilno napravo je bil v okviru popotresne obnove Ljubljane zastavljen že konec 19. stoletja. Navori za čiščenje odpadnih vod so se intenzivirali v sedemdesetih letih 20. stoletja; od takrat se sistemi za čiščenje odpadnih vod na širšem območju Ljubljane ves čas postopoma razvijajo in sledijo modernim trendom na tem področju.

Tehnologije čiščenja za potrebe priprave pitne vode in čiščenja odpadnih vod so številne in odvisne od mnogih dejavnikov. Ukrepi čiščenja, s katerimi želimo zagotoviti uporabo vode za določen namen, so praviloma zasnovani stopenjsko, z verigami različnih tehnologij, preko katerih prehaja voda med čiščenjem. Tehnologije aktivnega odstranjevanja onesnaževal so osredotočene na specifične snovi, na podlagi katerih jih poimenujemo (na primer deferizacija - odstranjevanje železa, demanganizacija - odstranjevanje mangana).

Pri odstranjevanju neželenih snovi iz vode, ki bo uporabljena za oskrbo s pitno vodo, govorimo o postopkih za pripravo pitne vode. Med njimi je dezinfekcija, ki se nanaša na odstranjevanje, uničenje ali transformacijo mikroorganizmov iz vode z biocidnimi proizvodi. Za celovito odstranjevanje novodobnih onesnaževal je treba izvajati terciarno čiščenje, ker s primarnim in sekundarnim čiščenjem teh snovi ne odstranimo v celoti. Včasih je treba izvajati tudi čiščenje na kvartarni ravni, tj. takrat, ko odstranjujemo snovi v zelo nizkih koncentracijah.

Dosedanje izkušnje kažejo, da se koncentracija novodobnih onesnaževal v odpadni vodi zmanjša tudi v običajnih postopkih čiščenja v primarni in sekundarni fazi. To potrjujejo izkušnje iz Centralne čistilne naprave v Ljubljani, kjer so meritve pokazale, da na iztoku pride do znižanja koncentracij novodobnih onesnaževal za nekaj velikostnih redov. Če bi ta onesnaževala želeli v celoti odstraniti, bi morali poseči po višjih stopnjah čiščenja odpadne vode.

Višje stopnje čiščenja izvedemo šele potem, ko odpadna voda preide začetne faze, torej v njih

čistimo že delno prečiščeno vodo. V primarnih fazah čiščenja potekajo fizikalno-kemijski procesi osnovnega ali preliminarne čiščenja, ki jih sestavljajo: koagulacija, flokulacija, sedimentacija, filtracija in flotacija. Te procese lahko opredelimo tudi kot procese separacije. Med koagulacijo se z dodajanjem koagulantov v obliki železovih ali aluminijevih soli ter anorganskih ali organskih polimerov raztopljeni in suspendirani delci združujejo v mikroflokule, ki sčasoma postanejo večje. Vidne so v suspenziji ter so dovolj težke, da se sedimentirajo, tako da jih lažje mehansko odstranimo. Klasična filtracija poteka s pomočjo peščenih filtrov. Med flotacijo v vodi separiramo snovi s plavljenjem na njeni površini.

Sekundarno čiščenje obsega anaerobno in aerobno uporabo naravnega biološkega čiščenja, vezanega na mikroorganizme (slika 83). Postopke naravne razgradnje lahko pospešimo z dodajanjem snovi, ki pospešujejo rast mikroorganizmov. V tem delu postopka čiščenja se koncentracije novodobnih onesnaževal znižajo predvsem v aerobnem delu procesa. Kljub temu, da primarni in sekundarni postopki čiščenja novodobnih onesnaževal večino ne odstranijo, lahko pripomorejo k pospešitvi postopkov v kasnejših fazah odstranjevanja.

Med aktivnimi postopki odstranjevanja novodobnih onesnaževal v literaturi največkrat omenjajo napredno oksidacijo in membransko filtracijo. Napredni oksidacijski procesi (ang. AOP: Advanced Oxidation Processes) so skupina metod, uporabnih za odstranjevanje onesnaževal, ki jih je z običajnimi metodami težje ali povsem nemogoče odstraniti. V ta namen uporabljamo različne oksidante. Pri uporabi teh metod stremimo k doseganju višje stopnje mineralizacije organskih snovi ob prisotnosti hidroksilnih radikalov, ki nastajajo pri tem. V primerjavi s klasično oksidacijo z vodikovim peroksidom ( $H_2O_2$ ) ali kalijevim manganatom ( $KMnO_4$ ) so zaradi večje reaktivnosti in kratkoživosti radikalov te metode hitrejšje in učinkovitejše ter manj obremenjujejo okolje.

Na kratko opišimo nekatere metode oksidacije. Z ozonacijo povzročimo razpad organskih molekul, kamor sodijo tudi novodobna onesnaževala. Slaba stran uporabe te metode so visoki obratovalni stroški, slaba topnost in stabilnost ozona v



Slika 83: Del sistema sekundarnega čiščenja na Centralni čistilni napravi Ljubljana.

vodi, v primeru reakcije z nekaterimi aromatskimi spojinami pa te potekajo zelo počasi. Čiščenje s pomočjo ultravijolične svetlobe temelji na reakcijah fotolize, zaradi česar se molekule razgradijo. Slaba stran te metode so visoki obratovalni stroški zaradi kratke življenjske dobe žarnic za UV svetlobo. Proces čiščenja s fotokatalizo je postopek, pri katerem kombiniramo ultravijolično svetlobo in katalizatorje. Ti so lahko različni kovinski oksidi ali sulfidi ( $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{CeO}_2$ ,  $\text{CdS}$ ,  $\text{ZnS}$ ). Vode lahko čistimo tudi s pomočjo kavitacije. To je pojav, pri katerem se zaradi območij nizkega tlaka pojavijo mehurčki. Delimo jo na hidrodinamično in ultrazvočno kavitacijo. Pri čiščenju izkoriščamo implozijo mehurčkov in povišano temperaturo. Za čiščenje uporabljamo tudi elektrokemijsko oksidacijo (Klančar in sodelavci, 2016), ki poteka s pomočjo umetnih elektrod.

Pomembni postopki čiščenja temeljijo na filtraciji. Najstarejša tehnologija na tem področju je filtracija z aktivnim ogljem. Temelji na visoki sorpcijski sposobnosti oglja, ki nase veže predvsem razmeroma velike molekule. Aktivno oglje je ena bolj ekonomičnih metod za odstranjevanje novodobnih onesnaževal iz vode, vendar ima to slabost, da se

njegove sorpcijske kapacitete s časom zmanjšujejo. Aktivno oglje lahko uporabljamo v različnih oblikah. Tako poznamo oglje v obliki granul (GAC - ang. granular activated carbon), prahu (PAC - ang. powder activated carbon) in vlaken. Naslednja pomembna metoda temelji na nanocevkah iz grafena ali grafenovega oksida, ki imajo zelo visoko specifično površino ter posledično visoko sorpcijsko kapaciteto. Uporaba te metode čiščenja je povezana z visokimi obratovalnimi stroški. Med sodobnejše metode filtracije sodi tudi membranska filtracija, ki jo uvrščamo med mikro- in ultrafiltracijo. Sem sodi širok nabor metod: mikrofiltracija in ultrafiltracija, ki potekata pod razmeroma nizkim tlakom, ter nanofiltracija in reverzna osmoza, ki potekata pod visokim tlakom. Filtri so izdelani iz bombaža, volne, celuloze, steklenih vlaken, najlona, polipropilena, azbesta, akrilikov in fluoropolimerov. Razporejeni so lahko v različnih oblikah, v obliki ploščic, cevi ali spiral. Učinkovitost membranske filtracije je odvisna od učinkovitosti predhodnih faz čiščenja. Izboljšuje se z delovnim tlakom, kar velja zlasti za čiščenje novodobnih onesnaževal.

#### 7.4.4 Optimizacija sistemov za ravnanje z odpadno vodo

Rezultati meritev prisotnosti novodobnih onesnaževal kažejo, da so njihovi viri v veliki meri vezani na sisteme za odvodnjo odpadnih vod, kamor sodijo kanalizacijski sistemi (komunalne in industrijske odpadne vode ter z njimi povezane čistilne naprave), male čistilne naprave in greznične jame. Slednje v strnjenih urbanih naseljih postopoma ukinjajo zaradi širitve kanalizacijskih omrežij, tako da v teh okoljih sčasoma ne bodo več aktivni vir onesnaženja.

V večini urbanih kanalizacijskih sistemov prihaja do puščanja kanalizacijskih cevi. To puščanje je odvisno od starosti kanalizacijskih cevi, izvedbe kanalizacijskega sistema, uporabljenih materialov in narave kanalizacijskega sistema. Poznamo sisteme kanalizacije za odpadno in padavinsko vodo. Poleg tega, tako kot ponekod v Ljubljani, poznamo kombinirane kanalizacijske sisteme, v katerih se mešajo padavinske in odpadne vode. Pri mešanih sistemih gre predvsem za starejšo kanalizacijo, ki je podvržena višji stopnji puščanja. Najbolj kritični so hišni priključki ter stičišče hišnega priključka in kanalizacijske cevi.

Številna mesta, tudi Ljubljana, v vzdrževanje kanalizacije (na primer pregledi s kamero, sanacija zlomov, notranje preplastitve kanalizacijskih cevi) vlagajo visoka sredstva, vendar bo treba, če bomo želeli zmanjšati prisotnost novodobnih onesnaževal v vodah na urbanih območjih, izvesti še dodatno optimizacijo obstoječih kanalizacijskih sistemov. Zaradi optimalnejšega delovanja čistilnih naprav je treba ločiti kanalizacije za odpadno vodo in padavinske kanalizacije. To ločevanje je pomembno tudi zaradi vzdrževanja in obratovanja kanalizacijskih sistemov. Za kanalizacijo padavinske vode je mogoče uporabiti drugačne in cenejše rešitve kot za kanalizacijo odpadne vode. Z ločevanjem obeh vrst kanalizacije pa je mogoče tudi optimizirati njun potek in dimenzije.

Sodobna odvodnja urbanih vod teži k t. i. trajnostnemu odvajanju padavinskih vod. To pomeni, da

padavinskih vod ne odvajamo več v mešano kanalizacijo, temveč v naravne površinske odvodnike ali pa jo ponikamo neposredno v tla in s tem skrbimo za napajanje podzemne vode, ki je v urbanih pogojih zaradi slabo prepustnih površin manjše. Tudi podnebne spremembe prinašajo veliko izzivov; zaradi njih so intenzivnejši zlasti ekstremi, kar pomeni, da v razmeroma kratkih časovnih intervalih pade veliko padavin. Ker sistemi za odvodnjo niso načrtovani in izvedeni za tako velike količine vode v tako kratkem času, prihaja do urbanih poplav. Pri tem ostaja velika neznanka, ali zaradi uporabe trajnostnih sistemov urbane odvodnje in sprememb dinamike odvodnje prihaja do dodatnega vnašanja novodobnih onesnaževal v vodno okolje. V prihodnje bi morali raziskave usmeriti na to področje.

Optimizacija sistemov za odvodnjo padavinskih in odpadnih vod je izrazit aktivni ukrep varovanja in zaščite vodnih virov pred onesnaževanjem s strani novodobnih onesnaževal. Vendar pa, čeprav se zdi ta ukrep preprost, ga v urbanih okoljih ni mogoče izvesti hitro in enostavno, ker imamo že zatečeno stanje in že staro obstoječe kanalizacijsko omrežje, katerega sanacija terja zelo visoke stroške in dolgotrajne ter zamudne postopke.

#### 7.5 Sklep

Upravljanje z novodobnimi onesnaževali je za stroke, ki se ukvarjajo s to problematiko, velik izziv. Eden glavnih vzrokov za to je, da gre za veliko in slabo definirano skupino onesnaževal. Razumevanje onesnaževal, ki so uvrščena v to skupino, je bolj kot na fizikalno-kemijske lastnosti ter ekotoksikološke posledice, ki jih povzročajo, vezano na njihovo socioekonomsko pogojenost. Obseg in število onesnaževal, ki jih najdemo v tej skupini, se neprestano spreminjata, zato sta zlasti za naravoslovno-tehniške znanosti in stroke težko opredeljiva. Poleg karakterizacije teh snovi in tehničnih rešitev se je treba usmeriti v celostno razumevanje njihovega pojavljanja, vzrokov in posledic. Odprtih vprašanj, povezanih z upravljanjem, je še veliko, na nekatera smo nakazali v tem poglavju.



## 8 SKLEP

Novodobna onesnaževala, ki se pojavljajo v komponentah vodnega kroga, so zelo široka skupina onesnaževal, v katero vključujemo vse od zdravilnih učinkovin do nanoplastike. Njihova skupna značilnost je, da se pojavljajo v zelo nizkih koncentracijah, ki ne presegajo 1 µg/l, praviloma pa se pojavljajo še v mnogo nižjih koncentracijah, vse tja do pg/l. Prisotnosti teh onesnaževal v vodnem okolju do nedavnega nismo poznali, čeprav smo lahko na podlagi njihovih fizikalno-kemijskih značilnosti to domnevali. Takšno stanje je najprej posledica tega, da se proizvajajo vedno nove in nove spojine, številne starejše pa so umaknili iz proizvodnje in prodaje. Spoznavamo tudi, da imamo opraviti z velikim številom transformacijskih produktov (npr. vključevanje spojin v metabolne procese, kar proizvede nove spojine). Hkrati s snovmi se razvijajo različne analize tehnike, ki omogočajo določanje velikega števila raztopljenih snovi pri zelo nizkih koncentracijah, kar je bilo še pred nekaj leti povsem nepredstavljivo.

Soočeni smo z razmeroma velikim številom onesnaževal zelo raznovrstnega izvora, ki jih ni mogoče obravnavati naenkrat. Kako obravnavati veliko množico potencialnih in prisotnost dejanskih onesnaževal v vodnem krogu? Kako naj se do njih opredelimo? Kakšni naj bodo ukrepi, ki bodo preprečili njihovo pojavljanje, in kakšne naj bodo aktivnosti, da bomo zmanjšali koncentracije in obremenitve, ki smo jih že zaznali?

Problematika prisotnosti novodobnih onesnaževal v vodnem okolju je tako široka, da je ni mogoče reševati zgolj na podlagi načela enega onesnaževala, tj. pristopa, pri katerem analiziramo vsako

onesnaževalo zase. Oblikovati moramo pristope, v katerih bomo obravnavali skupine onesnaževal. Razviti moramo analize tehnike in druge metode ocenjevanja (različna modeliranja, interpretacije), tako da bomo lahko bolje obvladali obsežno množico spojin.

Trenutne analize prisotnosti novodobnih onesnaževal v vodnem krogu Ljubljanske kotline in primerjava teh rezultatov s primerljivimi naravnimi sistemi po svetu kažejo, da je stopnja onesnaženosti z novodobnimi onesnaževali razmeroma nizka in da lahko opazovane vode obravnavamo kot razmeroma čiste. Ne glede na to pa z zatečenim stanjem ne smemo biti zadovoljni. Stremeti je treba k zmanjšanju števila novodobnih onesnaževal in njihove koncentracije v vodnem okolju ter preprečevanju vnosa novih onesnaževal. S podobno usmerjenimi meritvami, kot smo jih izvedli, pa bi morali nadaljevati, saj ne poznamo morebitnih časovno odvisnih trendov; ne vemo, ali se te koncentracije s časom zmanjšujejo ali povečujejo.

Vzporedno z izboljševanjem poznavanja novodobnih onesnaževal v vodnem krogu bi morali razvijati tudi ukrepe za zniževanje ali celo preprečevanje njihove prisotnosti. Če skušamo primerjati razmerje med rezultati monitoringov in ukrepov, ki izhajajo iz teh rezultatov, lahko za slednje ugotovimo, da zaostajajo za monitoringom. Čeprav je nadaljnji razvoj monitoringov novodobnih onesnaževal nujen, je treba ugotoviti, da je prenos znanja, ki izhaja iz monitoringov o novodobnih onesnaževalih, v zakonodajo in prakso, ki bi za seboj potegnili določene ukrepe, prepočasen.

Auersperger, P., Lah, K., Kramarič Zidar, V., Mali, N. 2011: Kvalitativni monitoring organskih onesnaževal v podzemni vodi z uporabo pasivnega vzorčenja in plinske kromatografije z masno spektrometrijo. Slovenski kemijski dnevi 2011, Portorož, 1-10.

Geološki zavod Slovenije, 2022a: Hidrogeološka karta (IAH) Slovenije 1:250.000. Dostopno na portalu <http://egeologija.si/>, datum dostopa: 24.3.2022.

Geološki zavod Slovenije, 2022b: Hidrogeološka karta (LAWA) Slovenije 1:250.000. Dostopno na portalu <http://egeologija.si/>, datum dostopa: 24.3.2022.

Harbaugh, A. W., 2005: MODFLOW-2005, The U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model—the Ground-Water Flow Process. U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A16. U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, 253, 2005.

Jamnik, B., Auersperger, P., Urbanc, J., Lah, K., Prestor, J. 2009: Ostanki zdravil kot pokazatelj antropogenih vplivov na podzemno vodo Ljubljanskega polja in Ljubljanskega barja. *Geologija*, 52/2, 241-248.

Klančar A, Trontelj J, Kristl A, Meglič, A., Rožinac, T., Zupančič, M., Roškar, R., 2016: An advanced oxidation process for wastewater treatment to reduce the ecological burden from pharmaceuticals and the agricultural use of pesticides. *Journal of Ecological Engineering* 97, 186-195.

Koroša, A., 2019: Izvor in transport organskih onesnaževal v medzrnskih vodonosnikih. Univerza v Ljubljani- doktorska disertacija, 207 str.

Koroša, A., Brenčič, M., Mali, N., 2020: Estimating the transport parameters of propyphenazone, caffeine and carbamazepine by means of a

tracer experiment in a coarse-gravel unsaturated zone. *Water Research* 175, 115680.

McGrath, S., Ratej, J., Jovičič, V., Čenčur Curk, B., 2015: Hydraulic characteristics of alluvial gravels for different particle sizes and pressure heads. *Vadose Zone Journal* 14/3, 1-18.

Mikulič, Z., 1992: Hidrološki vidiki varovanja kakovosti podtalnic na Slovenskem. *Ujma* 6, 133-139.

Nguyen, H.H., Peche, A., Venohr, M., 2021: Modeling of sewer exfiltration to groundwater in urban wastewater systems: A critical review. *Journal of Hydrology*, 596, 126130.

Rüdel, H., Körner, W., Letzel, T. Neumann, M., Nödler, K., Reemtsma, T., 2020: Persistent, mobile and toxic substances in the environment: a spotlight on current research and regulatory activities. *Environmental Sciences Europe* 32, 5.

Šimůnek, J., Šejna, M., Saito, H., Sakai, M., van Genuchten, M.T., 2013: The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably Saturated Media, Version 4.17, HYDRUS Software Series 3, Department of Environmental Sciences, University of California Riverside, Riverside, California, USA, pp. 343.

van Genuchten, M. T., 1980: A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal* 44/5, 892-898.

Splichal, S., 2010: Javnost med »novimi« mediji in »starimi« teorijami. *Teorija in praksa* 47/1, 8-12-

Turnšek Hančič, M., Červ, G., Bačlija, I., 2013: Governance kot vladovanje: pojmovna in poimevalna razčlemba. V: Bačlija, I. (ured.): *Koncept in prakse lokalnega vladovanja*, Friedrich Ebert Stiftung in Fakulteta za družbene vede, 11-19.

## ZAHVALA

---

Poleg avtorjev monografije so k raziskavam in rezultatom prispevali tudi mnogi drugi. Jože Herič iz podjetja AlfaGeo, d. o. o., nam je bil v veliko pomoč pri izvajanju terenskih meritev in vzorčenj. Kolega iz Agencije RS za okolje Matevž Hočevar in dr. Urška Pavlič ter sodelavca projektne partnerja Javnega podjetja VOKA SNAGA, d. o. o., Andrej Vrbec in Karin Lah so pomembno prispevali k izvedbi terenskih meritev in vzorčenj.

Pri projektih, ki so financirani iz evropskih skladov, je zelo pomembno upravljanje poteka projekta. Pri tem so nam pomagali zaposleni v skupnih službah Naravoslovnotehniške fakultete Špela Turić, Marinko Kondić in Željko Turić. Za pomoč pri tem delu projekta se jim zahvaljujemo. Zahvala za pomoč pri iskanju informacijskih virov gre tudi bibliotekarki Oddelka za geologijo Naravoslovnotehniške fakultete Barbari Bohar Bobnar. Pri izvedbi projekta sta nam pomagala tudi absolventa študija geologije Blaž Pucihar in Mojca Zotler. Izračuni numeričnega modela toka podzemne vode so bili pomembna podlaga za naše izračune, opravil jih je Dare Petauer iz podjetja GEORAZ, hidrogeološke raziskave, d. o. o. Pomemben del vsakega evropskega projekta je tudi javna predstavitev rezultatov. Brez pomoči Miše Hrovat iz podjetja Maga, d. o. o., bi bil odmev

naših rezultatov mnogo manjši. Ilustrator Marijan Pečar je pomembno prispeval h grafični podobi naše monografije, predvsem pa je nekatere zahtevne strokovne koncepte uspešno prikazal v preglednih in poučnih ilustracijah. Za celostno grafično podobo monografije gre zahvala grafični oblikovalki Maši Kokalj.

V času nastajanja je monografijo natančno pregledala dr. Anja Koroša, za pomoč in vse pripombe se ji avtorji toplo zahvaljujemo. Prav tako se zahvaljujemo dr. Urošu Kranjcu, ki se je poglobil v poglavje o upravljanju in čiščenju odpadne vode, kjer je prispeval številne tehtne pripombe. Pri pisanju zahtevnejših strokovnih besedil je pomembna tudi vloga lektorja, Roku Janežiču se zahvaljujemo za vse pripombe, predloge in popravke, saj je z njimi pripomogel k boljši razumljivosti in berljivosti besedila.

In ne nazadnje gre zahvala vsem ostalim, ki so kakorkoli pripomogli k uspešnemu zaključku projekta in izdaji monografije, pa niso poimensko omenjeni.

## OSEBNA IZKAZNICA PROJEKTA BODEREC-CE

Strokovna monografija »Novodobna onesnaževala v vodah Ljubljanske kotline« je nastala v okviru aktivnosti projekta boDEREC-CE. V monografiji so prikazani rezultati dela slovenskih projektnih partnerjev Univerze v Ljubljani - Naravoslovnotehniške fakultete - Oddelka za geologijo (odgovorni vodja projektnega partnerja prof. dr. Mihael Brenčič) - ter Javnega podjetja VOKA SNAGA, d. o. o., iz Ljubljane (odgovorni vodja projektnega partnerja mag. Branka Bračič Železnik). V okviru Univerze v Ljubljani je sodelovala tudi Fakulteta za farmacijo.

Ime projekta boDEREC-CE je kratica za angleški naziv projekta »Board for Detection and Assessment of Pharmaceutical Drug Residues in Drinking Water - Capacity Building for Water Management in CE«. Naziv projekta smo smiselno prevedli v nekoliko krajši slovenski naziv »Odkrivanje in ocena prisotnosti novodobnih onesnaževal v vodnem okolju«. Projekt je trajal tri leta - od 1. aprila 2019 do 31. marca 2022. Delo na projektu je v veliki meri zaznamovala pandemija korona virusa.

Financiranje projekta je potekalo v okviru Evropskega teritorialnega sodelovanja Interreg - Srednja Evropa. Projekt sta zaznamovala prioriteta »Sodelovanje pri razvoju naravnih in kulturnih virov za

vzdržni razvoj v Srednji Evropi« in cilj »Izboljšanje zmožnosti celostnega upravljanja okolja za zaščito in vzdržno rabo naravne dediščine in virov«. Celoten proračun projekta vseh projektnih partnerjev je znašal 2.328.140,81 €, od tega je bilo neposrednega financiranja s strani sklada Interreg - Srednja Evropa 1.938.208,22 €.

Celoten partnerski konzorcij je bil sestavljen iz 12 partnerjev, poleg tega je sodelovalo še 7 pridruženih partnerjev. Vodilni partner projekta je bil Hrvaški geološki inštitut iz Zagreba (odgovorni vodja projekta dr. Josip Terzić). Projektni partnerji so prihajali iz Avstrije, Hrvaške, Italije, Nemčije, Slovenije in Poljske. Partnersko skupino so sestavljali javni vodovodni sistemi, agencije za vodo in raziskovalne ustanove. Poleg kabinetnih in laboratorijskih obdelav ter številnih javnih dogodkov v okviru delavnic, tečajev in konferenc je potekalo tudi terensko delo na sedmih pilotnih območjih. Rezultati dela so bili predstavljeni v številnih delovnih poročilih, dveh ekspertnih računalniških sistemih, pripravljenih strategijah, orodjih, monografijah, posvečenih pilotnim območjem, in zaključni monografiji projekta.





