



Ocena doseganja trajnostnih ciljev z vidika upravljanja in varovanja podzemnih voda v Sloveniji

Assessment of achieving sustainable goals from the groundwater management and protection perspective in Slovenia

Jože UHAN & Mišo ANDJELOV

Agencija Republike Slovenije za okolje, Vojkova 1b, SI-1000 Ljubljana, Slovenija
e-mail: joze.uhan@gov.si

Prejeto / Received 18. 11. 2019; Sprejeto / Accepted 12. 12. 2019; Objavljeno na spletu / Published online 24. 12. 2019

Ključne besede: podzemna voda, trajnostno upravljanje, vodni odtis, količinski stres, nitrat

Key words: groundwater, sustainable management, water footprint, quantitative stress, nitrate

Izvleček

Doseganje trajnostnih ciljev upravljanja in varovanja podzemnih vodnih virov v plitvih vodonosnikih Slovenije smo ocenili preko kazalnikov stresa za količinsko in kemijsko najbolj obremenjene aluvialne vodonosnike vodnih teles podzemne vode: Savska kotlina in Ljubljansko Barje, Savinjska kotlina, Krška kotlina, Dravska kotlina in Murska kotlina. S tem smo poglobili dosednji pristop ocenjevanja stanja podzemne vode v Sloveniji, kot ga za območje posameznih vodnih teles določa Okvirna direktiva o vodah. Stopnja izkoriščenosti podzemnih voda je na posameznih najbolj obremenjenih delih plitvih vodnih teles izrazito večja, kot je bila do sedaj ocenjena na celotnih vodnih telesih. V nekaterih primerih, kot je vodonosnik Ljubljanskega polja, se količina črpanja pri srednjih nizkovodnih razmerah že približuje polovici vseh razpoložljivih podzemnih vodnih virov. Stopnja nitratnega onesnaženja podzemne vode pa je na nekaterih aluvialnih vodonosnikih vodnih telesih, kot so Krška, Dravska in Murska kotlina, v manj vodnatih letih že presegla mejo trajnostne rabe podzemnih vodnih virov.

Abstract

Achieving the sustainable goals for management and protection of groundwater resources in shallow aquifers in Slovenia was evaluated with stress indicators for the alluvial aquifers of groundwater bodies with the highest quantitative and qualitative pressures: Savska kotlina with Ljubljansko Barje, Savinjska kotlina, Krška kotlina, Dravska kotlina and Murska kotlina. We have deepened the approach taken so far to assess the status of groundwater in Slovenia as defined by the Water Framework Directive for the area of individual bodies of water. The level of groundwater exploitation is markedly higher in some of the most polluted parts of shallow groundwater bodies than has been estimated so far in whole groundwater bodies. In some cases, such as Ljubljansko polje aquifer, the groundwater withdrawals in mid-low-water conditions are already approaching half of all available groundwater resources. In some alluvial aquifers of groundwater bodies, such as Krška, Dravska and Murska kotlina, the level of groundwater nitrate pollution in dry years has already exceeded the limit for the sustainable protection of groundwater resources.

Uvod

Med pomembnimi splošnimi cilji trajnostnega razvoja, ki so jih Združeni narodi zapisali v agendi za trajnostni razvoj 2030, je tudi dostop do vode in trajnostno upravljanje z vodnimi viri, da bomo lahko zadovoljili potrebe današnje in prihodnjih generacij (United Nations, 2015). Trajnostno upravljanje voda bo tudi po mnenju Evropske komisije pomembno vplivalo na zmožnost človeštva, da se prilagodi spreminjajočim se okoljskim, družbenim in ekonomskim razmeram. Pregled napredka pri doseganju ciljev trajnostnega razvoja (SDG - Sustainable Deve-

lopment Goals) v Sloveniji (Sachs et al., 2019) izpostavlja nekaj pomembnih izzivov tudi na področju zagotavljanja čiste vode in sanitarne ureditve (SDG6) ter odgovorne porabe in proizvodnje (SDG12). Dosedanje regionalne ocene količinskega stanja podzemnih voda v Sloveniji sicer ne nakazujejo neugodnega razmerja med razpoložljivimi in črpanimi količinami podzemne vode, po posameznih plitvih vodnih telesih z medzrnsko poroznostjo pa črpane količine že presegajo 20 % obdobjno razpoložljivih količin podzemne vode (Andjelov et al., 2016). Poleg omenjenega pa so kar tri vodna telesa podzemne vode

ocenjena s slabim kemijskim stanjem in več kot polovica oskrbovalnih območij pitne vode ima v Sloveniji stalno potrebo po dezinfekciji vode (Sovič, 2017). Zaradi tega vse bolj izstopa potreba po metodološki razširitvi dosedanjega ocenjevanja stanja voda in po nadaljnjih preverbah doseganja trajnostnih ciljev na področju črpanja in onesnaževanja podzemnih vodnih virov. Hipotezo o učinkovitosti uporabe konceptov vodnega odtisa (Hoekstra & Hung, 2002; Hoekstra, 2003; Gleeson & Wada, 2013; Esnault et al., 2014; McDonald et al., 2014) ter odtisa sive podzemne vode (Hoekster et al., 2011; Franke et al., 2013) pri razširitvi dosedanjega ocenjevanja stanja voda in trajnostnega upravljanja podzemnih voda v Sloveniji smo poskušali preveriti na najbolj obremenjenih in hkrati najbolj ranljivih vodnih telesih podzemne vode v Sloveniji.

Podatki in metode

Študijsko območje

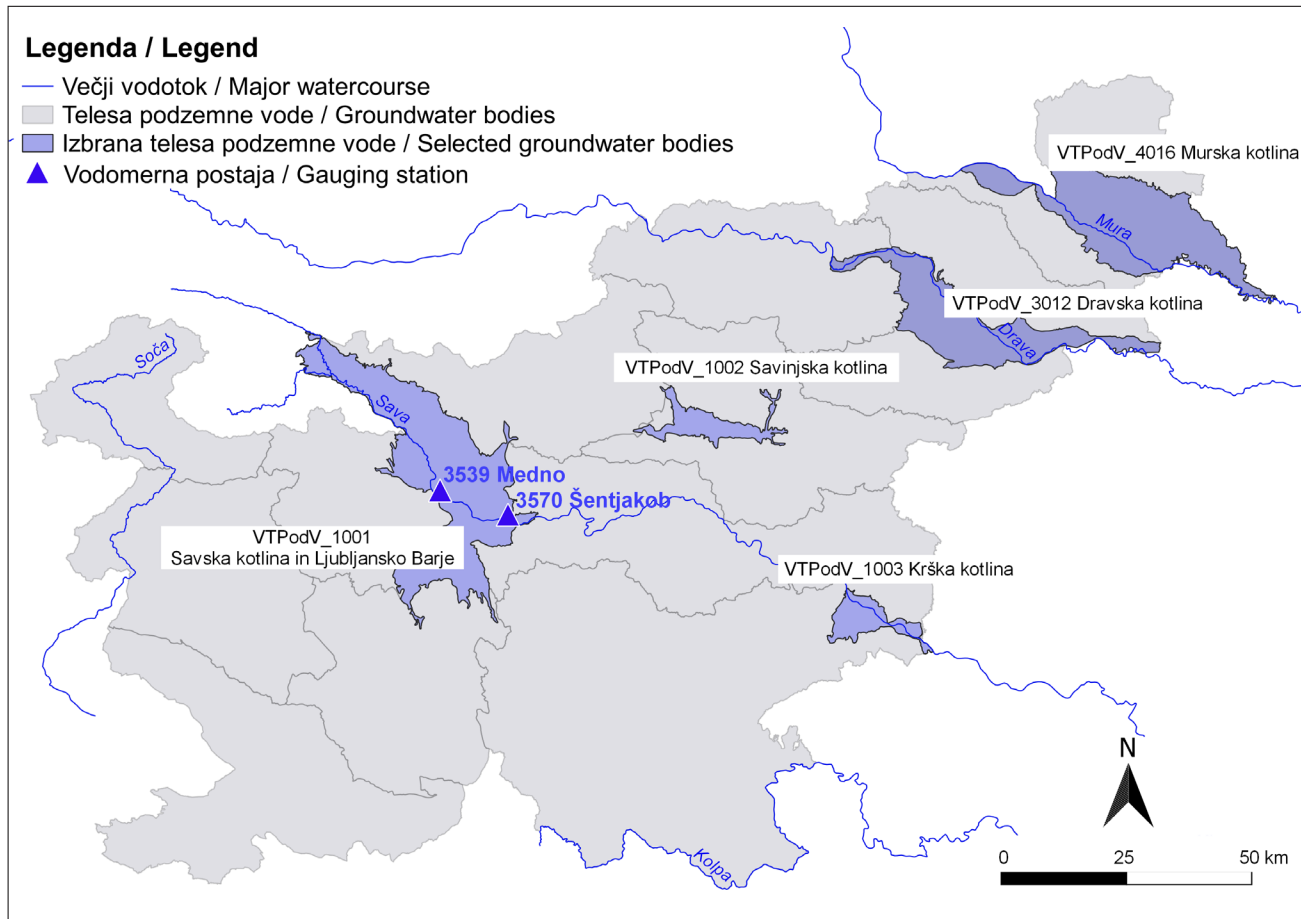
Za ocenjevanje doseganja trajnostnih ciljev z vidika upravljanja in varovanja voda v Sloveniji smo za študijsko območje izbrali pet aluvialnih vodonosnikov vodnih teles podzemne vode (sl. 1),

odprtih vodonosnikov z medzrnsko poroznostjo in s povprečno gladino podzemne vode od nekaj metrov do največ 25 metrov pod površjem.

Za podrobnejšo preverbo doseganja trajnostnih ciljev na področju črpanja in onesnaževanja podzemnih vodnih virov smo izbrali dva aluvialna vodonosnika z veliko količinsko in veliko kemijsko obremenitvijo:

- Ljubljansko polje (69,4 km²) s povprečno 2,1 m³/s črpane podzemne vode, kar predstavlja okoli 6,7 % povprečno načrpane podzemne vode v Sloveniji in
- Spodnjo Savinjsko dolino (76,7 km²) s povprečnim vnosom 42,3 kg dušika na hektar kmetijske obdelovalne površine v letu 2014, kar za 39 % presega povprečno obremenitev z dušikom na vseh kmetijskih obdelovalnih površinah v Sloveniji.

Vodno telo podzemne vode VTPodV_1001 Savska kotlina in Ljubljansko Barje, kamor se uvršča vodonosnik Ljubljanskega polja, s 21,1 % črpane razpoložljive količine podzemne vode v Sloveniji predstavlja povečano tveganje za doseganje dobrega količinskega stanja, predvsem zaradi velikega črpanja podzemne vode iz Lju-



Sl. 1. Študijska območja aluvialnih vodonosnikov vodnih teles podzemne vode v Sloveniji.

Fig. 1. Study areas of alluvial aquifers of groundwater bodies in Slovenia.

bljanskega polja (MOP, 2016). Vodno telo podzemne vode VTPodV_1002 Savinjska kotlina je z aluvialnim vodonosnikom Spodnja Savinjska dolina že od prvega načrta upravljanja voda (MOP, 2009) v slabem kemijskem stanju, predvsem zaradi preseženih vsebnosti nitrata v podzemni vodi.

Koncept ocenjevanja količinskega stanja in količinskega odtisa podzemne vode

S konceptom ocenjevanja količinskega stanja podzemnih voda je okvirna vodna direktiva (Direktiva 2000/60/ES) uvedla zakonodajno obvezo po poznavanju razpoložljivih količin vode v posameznih vodnih telesih podzemnih voda za vse države članice. Primerjanje črpanih in razpoložljivih količin podzemne vode je s tem postal osnovni kazalnik količinskega pritiska na podzemne vodne vire in kazalnik vodnega stresa v različnih ocenjevalnih shemah (Vrba & Lippinen, 2007).

Ocena razpoložljivih količin podzemnih voda izhaja iz poznavanja letnega količinskega obnavljanja podzemne vode ter ocene potrebnih količin podzemnih voda za ohranjanje ekosistemov in doseganje dobrega ekološkega stanja površinskih voda. Letno količino obnavljanja podzemne vode v Sloveniji ocenjujemo z regionalnim vodnobilančnim modelom GROWA-SI (Andjelov et al., 2016), ki se na območjih količinsko močno obremenjenih vodonosnikov z medzrnsko poroznostjo za podporo upravljanja voda dopolnjuje z rezultati šestih lokalnih modelov toka podzemne vode, ki so bili izdelani s programskim orodjem MODFLOW (Souvent et al., 2016).

Letne količine podzemnih voda za ohranjanje ekosistemov in doseganje dobrega ekološkega stanja površinskih voda so bile po posameznih vodnih telesih podzemnih voda celotnega območja Slovenije podana po metodologiji Janže in sodelavcev (2016), ki ločeno obravnava potrebne količine podzemnih voda za ohranjanje:

- gozdnih habitatov na aluvialnih vodonosnikih ob pomoči ločevanja modelirane realne evapotranspiracije v izhlapele prestrežene padavine, prepuščene padavine, ki izhlapevajo iz tal, in izhlapevanje preko rastlin,
- habitatov dvoživk ter mehkužcev na kraških območjih ob uporabi ločevalnih možnosti modela z obravnavo podzemnega odtoka kot vsote modeliranega podzemnega in pripovršinskega odtoka ter
- dobrega ekološkega stanja površinskih voda ob uporabi nemškega vodnobilančnega pristopa s scenarijem petih sušnih let v

zadnjem tridesetletnem obdobju (Schlüter, 2006), kar je približek vrednosti dvajsetega centila količine napajanja vodonosnikov v referenčnem vodnobilančnem obdobju in predpostavlja mejo slabih habitatnih rečnih pogojev, pogosto umeščeno v razpon od 10 do 30 % povprečnega letnega pretoka Q_s (Tennant, 1976).

Omenjena regionalna ocena letnih potrebnih količin podzemnih voda za ohranjanje ekosistemov in doseganje dobrega ekološkega stanja površinskih voda je zelo splošena. V primeru količinsko najbolj obremenjenih vodnih teles podzemne vode je priporočljiva ocena prispevka podzemne vode k ekološkemu pretoku reke (E) tudi preko razmerja med baznim (Q_{bazni}) in celotnim naravnim pretokom ($Q_{celotni}$). Ob tem pa je potrebno upoštevati ekološko sprejemljiv pretok (Q_{es}) (Charchousi et al., 2018).

$$E = \frac{Q_{bazni}}{Q_{celotni}} \cdot Q_{es}$$

Prispevek podzemne vode k ekološkemu pretoku (E) je torej mogoče oceniti ob poznavanju celotnega in baznega pretoka oz. ob poznavanju njunega razmerja, ki ga predstavlja indeks baznega odtoka (BFI). Za oceno baznega odtoka smo pri modeliranju vodne bilance Slovenije za obdobje 1981–2010 (Andjelov et al., 2016) uporabili metodologijo izračunov, znano pod oznako MoMLRr (Wundt, 1958; Kille, 1970; Demuth, 1993). Bazni odtok je po tej metodi vrednost mediane nizkih dnevni pretokov v n mesecih obravnavanega tridesetletnega obdobja 1971–2000 na premici najboljšega prileganja, kjer enačba premice z začetno vrednostjo (y_0) in smernim koeficientom (m) izhaja iz postopne regresijske analize linearnega dela porazdelitvene S-krivulje:

$$MoMLRr = m \cdot \frac{n}{2} + y_0$$

Metodologijo izračuna vrednosti ekološko sprejemljivega pretoka (Q_{es}) v Sloveniji določa uredba o kriterijih za določitev ter načinu spremljanja in poročanja ekološko sprejemljivega pretoka (Uradni list RS, 2009):

$$Q_{es} = f \cdot sQnp$$

Po omenjeni uredbi je ekološko sprejemljiv pretok odvisen od povprečja najmanjših srednjih dnevni pretokov posameznih let obravnavanega obdobja ($sQnp$) in faktorja (f), ki zavisi od vrste odvzema vode, dolžine odseka vodotoka s povratno rabo vode, količine odvzete vode, raz-

merja med srednjim in malim pretokom, ekološkega tipa vodotoka in od velikosti prispevnega območja.

Prispevek podzemne vode k ekološko sprejemljivemu pretoku se izkazuje kot zelo občutljiv parameter ocenjevanja količinskega stanja oz. trajnostne rabe podzemnih vodnih virov in ga je priporočljivo obravnavati po različnih pristopih, rezultate pa primerjati preko ocenjevalne sheme količinskega odtisa rabe podzemne vode (Gleeson et al., 2012).

Količinski odtis rabe podzemne vode, ki temelji na konceptu vodnega odtisa (Hoekstra & Hung, 2002), vključuje tudi princip naravnega obnavljanja in pokrivanja potreb ekoloških pretokov. Leta 2012 so pristop prvič uporabili na globalni ravni za oceno velikih regionalnih vodonosnikov, pomembnih za kmetijstvo. V naslednjih letih je ta koncept ocenjevanja prešel v široko uporabo in se izkazal za zelo primeren koncept ocenjevanja trenutne in predvidene rabe podzemne vode tudi na manjših vodonosnikih (Gleeson & Wada, 2013; Esnault et al., 2014; McDonald et al., 2014).

V izračunu količinskega odtisa rabe podzemne vode (GF) se črpane količine podzemne vode (C) primerjajo s količino letnega napajanja (R), zmanjšane za prispevek podzemne vode k ekološkemu pretoku (E). Ob upoštevanju površine obravnavanega vodonosnika (A) z izračunom količinskega odtisa rabe podzemne vode lahko kvantificiramo vodni stres in nakažemo velikost območja vodonosnika, ki je potreben za trajnostno rabo podzemnih vodnih virov:

$$GF = A \cdot \left[\frac{C}{R - E} \right]$$

Koncept ocenjevanja kemijskega stanja podzemne vode in odtisa sive podzemne vode

Ocena kemijskega stanja podzemnih voda v prvem koraku temelji na primerjavi povprečne letne vrednosti državnega monitoringa s standardom kakovosti oz. vrednostjo praga. V primeru preseganja mejnih vrednosti so predvideni različni preizkusi vpliva onesnaženja, opredeljeni z okoljskimi kriteriji in kriteriji rabe podzemne vode. Preizkusi se zaključijo s t.i. splošno oceno kemijskega stanja (European Communities, 2009), ki naj bi podala razmerje med delom vodnega telesa, kateremu pripadajo merilna mesta s preseženimi mejnimi vrednostmi ter celotnim telesom podzemne vode. Principom preizkusa splošne ocene kemijskega stanja sledi koncept odtisa sive vode (*ang. grey water footprint*), ki je indikator stopnje onesnaženosti vode in je opre-

deljen kot prostornina vode, potrebne za razredčenje bremena onesnaženja ob upoštevanju vrednosti naravnega ozadja in mejnih vrednosti (Hoekstra et al., 2011).

Ob tem se pri razpršenih virih onesnaženja podzemne vode, kot je npr. nitrat, predpostavlja, da le del bremena s pronicujočo vodo doseže vodno telo. Odtis sive podzemne vode (GWF) je tako razmerje med deležem bremena onesnaženja (L), ki lahko doseže vodno telo, ter razliko med mejno vsebnostjo onesnaževala (C_{max}) in mejno vrednost med naravnim ozadjem in povišanimi vrednostmi nitrata (C_{nat}):

$$GWF = \frac{L}{C_{max} - C_{nat}}$$

Z upoštevanjem količine vode, ki doseže zasičeno območje vodonosnika (R_{inf}), lahko preko odtisa sive podzemne vode (GWF) ocenimo stopnjo onesnaženja podzemne vode WPL (*ang. water pollution level*):

$$WPL = \frac{GWF}{R_{inf}}$$

Za oceno povprečnega letnega napajanja smo na študijskem območju vodonosnika Spodnje Savinjske doline uporabili vodnobilančno simulacijo obdobja 1981–2010 z regionalnim modelom GROWA-SI (Andjelov et al., 2016). Za oceno deleža bremena iz bilance dušika obdobja 2007–2014 (Sušin & Verbič, 2019), ki lahko doseže vodno telo podzemne vode, je bil uporabljen regionalni model toka nitrata DENUZ-WEKU (Andjelov et al., 2014; Matoz et al., 2016). Mejno vsebnost onesnaženja podzemne vode z nitratom smo s 50 mg/l prevzeli po standardu kakovosti za oceno kemijskega stanja po uredbi o stanju podzemnih voda (Uradni list RS, 2009). Za mejno vrednost med naravnim ozadjem in povišanimi vrednostmi nitrata, ki so lahko posledica človekove dejavnosti (Panno et al., 2006), smo za izračun regionalnega odtisa sive vode prevzeli vrednost srednje točke prevoja na verjetnostnem diagramu porazdelitve modelskih vrednosti nitrata v podzemni vodi vseh rasterskih celic na aluvialnih vodonosnikih po posameznih vodnih telesih (10 mg/l). Ta vrednost je pričakovano višja od povprečja naravnega ozadja vsebnosti nitrata (3,8 mg/l) v podzemnih vodah izvirov, vodnjakov in vrtin na celotnem območju Slovenije (Mezga, 2014) in je blizu vrednosti srednje točke prevoja verjetnostne porazdelitve (8,3 mg/l) vseh rezultatov obsežnih terenskih meritev vsebnosti nitrata v aluvialnem vodonosniku Spodnje Savinjske doline (Uhan, 2011).

Rezultati

Shema kazalnikov trajnostne rabe podzemne vode (Vrba & Lipponen, 2007) vsebinsko poenoteno razširja pogled na dolgoročno vzdržnost rabe podzemnih vodnih virov od obravnave količinskega in kemijskega stanja podzemne vode, kot ga metodološko opredeljuje evropska okvirna vodna direktiva, tudi na področje ranljivosti z vidika črpanja in onesnaževanja podzemne vode. Za območje Slovenije je ocenjeno sedem kazalnikov (Tabela 1), ki nudijo prvi splošni pogled na trajnostno rabo podzemne vode na nacionalni ravni. Letna količina obnovljive podzemne vode z 2.858 m³, oz. okoli 2.200 m³ razpoložljive podzemne vode na prebivalca v Sloveniji, izračunana za obdobje 1981–2010, močno presega splošno prepoznano mejo 1.600 m³, pod katero lahko nastopi vodni stres in pomanjkanje vode (Turton, 2003). V ocenjevalni shemi (Tabela 1) v Sloveniji izstopata predvsem dva kazalnika, ki govorita o:

- razmeroma majhnem deležu črpanih količin glede na razpoložljivo podzemno vodo (3,1 %) ob hkrati prevladujočem deležu podzemne vode v oskrbi prebivalstva s pitno vodo (99 %) ter

- razmeroma majhnem deležu območja Slovenije s slabim kemijskim stanjem podzemne vode (5,6 %) ob hkrati velikem deležu območja povišane ranljivosti na onesnaženje podzemne vode (70 %) in posledično velikim deležem oskrbovalnih območij pitne vode s stalno potrebo po priravi vode (60 %).

Kazalniki količinskega stresa rabe podzemne vode

Zaradi velike prostorske in časovne spremenljivosti količinskega obnavljanja podzemne vode, ocenjenega z regionalnim vodno-bilančnim modelom, smo pogled na trajnostno upravljanje podzemnih voda na najbolj obremenjenih vodonosnikih razširili s shemo količinskega odtisa rabe podzemne vode glede na modelirane količine iz modelov toka podzemne vode in ob tem preverili različne pristope k ocenjevanju količine podzemne vode za zagotavljanje potrebnega ekološkega pretoka.

Na hidrometričnem prispevnem območju, vodozbirnem zaledju vodomerne postaje, količinsko najbolj obremenjenega aluvialnega vodonosnika vodnega telesa podzemne vode VTPodV_1001 Ljubljanska kotlina in Ljubljansko Barje je preko indeksa baznega odtoka (Charchousi et al., 2018) možno razmeroma zanesljivo oceniti prispevek podzemne vode k ekološkemu pretoku. Po metodologiji Wundta (1958), Killeja (1970) in Demutha (1993) je bazni odtok mesečna vrednost mediane nizkih dnevnih pretokov na premici najboljšega prileganja, kjer enačba premice z začetno vrednostjo (y_0) in smernim koeficientom (m) izhaja iz postopne regresijske analize linearnega dela porazdelitvene S-krivulje. Vrednosti tako določenega indeksa baznega toka ($Q_{\text{bazni}}/Q_{\text{celotni}}$) vodomernih postaj državnega hidrološkega monitoringa na reki Savi, 3530 Medno in 3570 Šen-

Tabela 1. Trajnostno upravljanje podzemne vode v Sloveniji po prirejeni shemi kazalnikov UNESCO / IAEA / IHP (prirejeno po Vrba & Lipponen, 2007).

Table 1. Groundwater sustainable management in Slovenia according to the adapted indicator scheme UNESCO / IAEA / IHP (adapted after Vrba & Lipponen, 2007).

	KAZALNIKI TRAJNOSTNEGA UPRAVLJANJA PODZEMNE VODE V SLOVENIJI / INDICATORS OF GROUNDWATER SUSTAINABLE MANAGEMENT IN SLOVENIA	VREDNOST / VALUE
K 1	Letna količina obnovljive podzemne vode na prebivalca (MOP, 2016) / Annual quantity of renewable groundwater per capita (MOP, 2016)	2.858 m ³
K 2	Črpane količine podzemne vode kot delež povprečne letne obnovljive podzemne vode (MOP, 2016) / Groundwater abstraction quantities as a percentage of average annual renewable groundwater (MOP, 2016)	2,3 %
K 3	Črpane količine podzemne vode kot delež povprečne letne razpoložljive podzemne vode (MOP, 2016) / Groundwater abstraction quantities as a percentage of average annual available groundwater (MOP, 2016)	3,1 %
K 4	Podzemna voda kot delež skupne porabe pitne vode (SURs, 2017) / Groundwater as a percentage of total use of drinking water (SURs, 2017)	99 %
K 5	Delež območja z izčrpanjem podzemne vode / Percentage of the area with groundwater depletion	ni ocenjeno / not evaluated
K 6	Črpane količine neobnovljivih podzemnih vodnih virov kot delež skupne izkoristljive neobnovljive količine podzemnih vodnih virov / Abstraction of non-renewable groundwater resources as a percentage of total exploitable non-renewable groundwater resources	ni ocenjeno / not evaluated
K 7	Delež območja povišane ranljivosti na onesnaženje podzemne vode (GeoZS, 2016) / Percentage of the area with very high vulnerability to groundwater pollution (GeoZS, 2016)	70 %
K 8	Delež območja s slabim kemijskim stanjem podzemne vode (MOP, 2016) / Percentage of the area with low groundwater chemical status (MOP, 2016)	5,6 %
K 9	Delež oskrbovalnih območij pitne vode s stalno potrebo po dezinfekciji vode (Sovič, 2017) / Percentage of the drinking water supply areas with permanent water disinfection need (Sovič, 2017)	60 %
K 10	Odvisnost kmetijskega prebivalstva od podzemne vode / Dependence of agricultural population on groundwater	ni ocenjeno / not evaluated

tjakob (sl. 1), sta 0,47 in 0,54, kar sovпада z rezultati izračunov povprečnih indeksov baznega odtoka s standardnim programom za računanje BFI (Srebovt, 2014). Po pristopu Charchousija in sodelavcev (2018) je ob srednjih gladinah podzemne vode njen prispevek k ekološkemu pretoku (E) 0,85 m³/s, kar presega Tennantovo (1976) mejo dobrih habitatnih rečnih pogojev, t.j. 20 odstotkov povprečnega letnega pretoka, ki je za obdobje 1981–2010 na Savi med Mednim in Šentjakobom ocenjeno na 0,47 m³/s (Tabela 2).

Na količinsko obremenjenih vodonosnikih se je ocena prispevka podzemne vode k ekološkemu pretoku (E) izkazala za zelo občutljiv parameter, ki terja podrobnejši napajalni model ob upoštevanju podatkov o celotnem, baznem in ekološko sprejemljivem pretoku. Ocena napajanja podzemne vode vodonosnika Ljubljanskega polja ob upoštevanju interakcije površinskih in podzemnih voda sloni na konceptualni shemi numeričnega modela toka podzemne vode (Souvent et al., 2016), ocena ekološkega pretoka (Janža et al., 2016) pa je povzeta iz ocene količinskega stanja podzemnih voda (Andjelov et al., 2016). Ob uporabi scenarija petih sušnih let v zadnjem tridesletnem obdobju (Schlüter, 2006), kar je približek dvajsetemu centilu količine napajanja vodonosnikov v referenčnem vodnobilančnem obdobju po vodnobilančnem modelu GROWA-SI, je povprečni prispevek podzemne vode Ljubljanskega polja k ekološkemu pretoku 0,73 m³/s (Tabela 2). Ob srednjih gladinah podzemne vode v vodonosniku Ljubljanskega polja s 3,11 m³/s modeliranega napajanja vodonosnika (Petauer & Hiti, 2017, 2018) in 1,0 m³/s črpanih količin podzemne vode je ob količinskem odtisu (GF) 29,2 km² dosežena stopnja izkoriščenosti (GF/A_A) 0,42.

Stopnja izkoriščenosti podzemne vode v izbranem časovnem obdobju med leti 2007 in 2014 z dvema hidrološkima ekstremoma zadnjih petdesetih let (2011 in 2014) je pri ocenah za celotna območja vodnih teles po pristopu Schlüterja (2006) ter Andjelova in sodelavcev (2016) največja na vodnih telesih podzemne vode VTPodV_3012 Dravska kotlina (0,28) ter VTPodV_1001 Savska kotlina in Ljubljansko Barje (0,20). Kot količinsko najbolj ranljivo vodno telo izstopa Dravska kotlina, katere stopnja izkoriščenosti podzemne vode v suhem hidrološkem letu doseže vrednost 0,60 (Tabela 3). Povprečno gre v obdobju 2007–2014 za stopnjo izkoriščenosti podzemne vode v razponu od 0,08 v Krški kotlini do 0,28 v Dravski kotlini (Tabela 3, sl. 2).

Kazalniki ranljivosti in onesnaženja podzemne vode

S slabim kemijskim stanjem so v državnem načrtu upravljanja voda (MOP, 2016) opredeljena tri telesa podzemne vode: Savinjska, Dravska in Murska kotlina, ki skupaj predstavljajo 5,6 % površine države in 3,9 % obdobjno razpoložljivih količin podzemne vode v Sloveniji. V nasprotju s to oceno splošni kazalniki trajnostne rabe podzemne vode (Tabela 1) prinašajo informacijo o razmeroma velikem deležu oskrbovalnih območij pitne vode s stalno potrebo po dezinfekciji vode (60 %), ki se z leti zvišuje (Sovič, 2017), visok je tudi delež območja Slovenije z najvišjo ranljivostjo na onesnaženje podzemne vode, izražene s hitrostjo toka podzemne vode (Prestor & Janža, 2016).

Tudi v primeru vodonosnika Spodnje Savinjske doline, študijskega območja enega od teles podzemne vode v slabem stanju, je delež območja

Tabela 2. Količinski odtis in stopnja izkoriščenosti podzemne vode v vodonosniku Ljubljanskega polja.

Table 2. Groundwater quantitative footprint and exploitation level in Ljubljansko polje aquifer.

VODONOSNIK LJUBLJANSKEGA POLJA / LJUBLJANSKO POLJE AQUIFER	ČRPANJE PODZEMNE VODE / GROUNDWATER ABSTRACTION	NAPAJANJE PODZEMNE VODE (Petauer & Hiti, 2017, 2018) / GROUNDWATER RECHARGE (Petauer & Hiti, 2017, 2018)	PRISPEVEK PODZEMNE VODE K EKOLOŠKEMU PRETOKU REKE / GROUNDWATER CONTRIBUTION TO ENVIRONMENTAL STREAMFLOW	KOLIČINSKI ODTIS PODZEMNE VODE / GROUNDWATER QUANTITATIVE FOOTPRINT	STOPNJA IZKORIŠČENOSTI PODZEMNE VODE / GROUNDWATER EXPLOITATION LEVEL
	C [m ³ /s]	R _{Modflow} [m ³ /s]	E [m ³ /s]	GF [km ²]	GF/A _A [-]
Povprečni hidrološki pogoji / Average hydrological conditions			0,47*		
	1,00	3,11	0,73**	29,2	0,42
			0,85***		

Opomba:

* po pristopu iz Tennant (1976) / after approach from Tennant (1976)

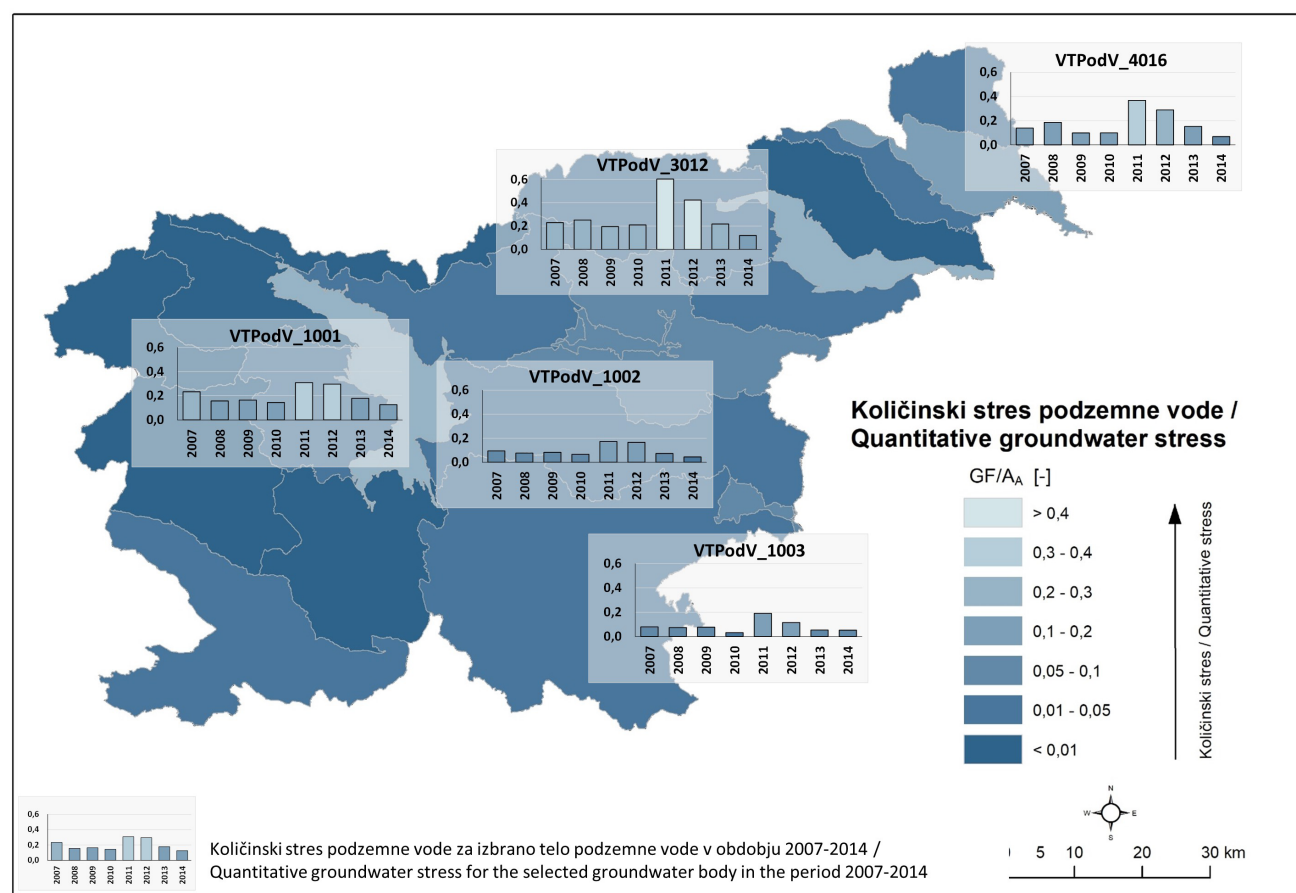
** po pristopih iz Schlüter (2006) in Andjelov in sod. (2016) / after approaches from Schlüter (2006) and Andjelov et al. (2016)

*** po pristopih iz Demuth (1993) in UL RS 97/09 (2009) / after approaches from Demuth (1993) and UL RS 97/09 (2009)

Tabela 3. Stopnja izkoriščenosti podzemne vode v aluvialnih vodonosnikih vodnih telesih Slovenije.

Table 3. Groundwater exploitation level in aluvial aquifers of groundwater bodies of Slovenia.

TELO PODZEMNE VODE / GROUNDWATER BODY	STOPNJA IZKORIŠČENOSTI PODZEMNE VODE / GROUNDWATER EXPLOITATION LEVEL		
	SUHO HIDROLOŠKO LETO 2011 / DRY HYDROLOGICAL YEAR 2011	MOKRO HIDROLOŠKO LETO 2014 / WET HYDROLOGICAL YEAR 2014	OBDOBJE 2007–2014 / PERIOD 2007–2014
	GF/A _A [-]		
VTPodV_1001 Savska kotlina in Ljubljansko Barje	0,31	0,13	0,20
VTPodV_1002 Savinjska kotlina	0,17	0,04	0,10
VTPodV_1003 Krška kotlina	0,19	0,05	0,08
VTPodV_3012 Dravska kotlina	0,60	0,12	0,28
VTPodV_4016 Murska kotlina	0,37	0,07	0,17



Sl. 2. Stopnja izkoriščenosti podzemne vode po izbranih telesih podzemne vode Slovenije v obdobju 2007–2014.

Fig. 2. Groundwater exploitation level for selected groundwater bodies of Slovenia in the period 2007–2014.

z največjo ranljivostjo na onesnaženje podzemne vode z omenjeno metodo razmeroma visok: 45 %. Delež površja z največjo ranljivostjo pa je nekoliko nižji pri parametrični oceni splošne ranljivosti po metodologiji SINTACS in kot posteriorna verjetnost na nitrarno onesnaženje podzemne vode po metodi teže evidenc WofE: 43 in 31 % (Uhan, 2011).

Tudi odtis sive podzemne vode za onesnaženje z nitratom, razmerje med povprečnim deležem bremena onesnaženja, ki lahko doseže zasiče-

no območje vodonosnika, ter razliko med mejno vsebnostjo onesnaževala (50 mg/l) in vrednostjo točke prevoja nad naravnim ozadjem (10 mg/l), je za celotno telo podzemne vode VTPodV_1002 Savinjska kotlina v okviru teh vrednosti. Glede na hidrološke razmere je bil odtis sive podzemne vode za onesnaženje z nitratom v VTPodV_1002 Savinjska kotlina v razponu od 0,22 v mokrem letu 2014 do 0,79 v sušnem letu 2011. V sušnem letu 2011 so odtisi sive podzemne vode za onesnaženje z nitratom presegali vrednost 1 kar v treh

Tabela 4. Odtis sive podzemne vode v povezavi z vsebnostmi nitrata v aluvialnih vodonosnikih vodnih telesih podzemnih voda Slovenije.

Table 4. Gray groundwater footprint related to nitrate concentration for alluvial aquifers of groundwater bodies of Slovenia.

TELO PODZEMNE VODE / GROUNDWATER BODY	STOPNJA NITRATNE ONESNAŽENOSTI PODZEMNE VODE (SUHO LETO 2011) / GROUNDWATER NITRATE POLLUTION LEVEL (DRY YEAR 2011)	STOPNJA NITRATNE ONESNAŽENOSTI PODZEMNE VODE (MOKRO LETO 2014) / GROUNDWATER NITRATE POLLUTION LEVEL (WET YEAR 2014)	ODTIS SIVE PODZEMNE VODE (OBDOBJE 2007-2014) / GRAY GROUNDWATER FOOTPRINT (PERIOD 2007-2014)
	WPL [-]		
VTPodV_1001 Savska kotlina in Ljubljansko Barje	0,46	0,17	0,28
VTPodV_1002 Savinjska kotlina	0,79	0,22	0,43
VTPodV_1003 Krška kotlina	1,38	0,31	0,67
VTPodV_3012 Dravska kotlina	1,81	0,35	0,75
VTPodV_4016 Murska kotlina	3,14	0,49	0,92

vodnih telesih podzemne vode: Krška kotlina (1,38), Dravska kotlina (1,81) in Murska kotlina (3,14) (Tabela 4). Regionalna analiza je pokazala visoke vrednosti odtisa sive podzemne vode za obremenitev z dušikom v sušnem letu 2011 tudi na nekaterih drugih območjih severovzhodne Slovenije (sl. 3).

Razprava

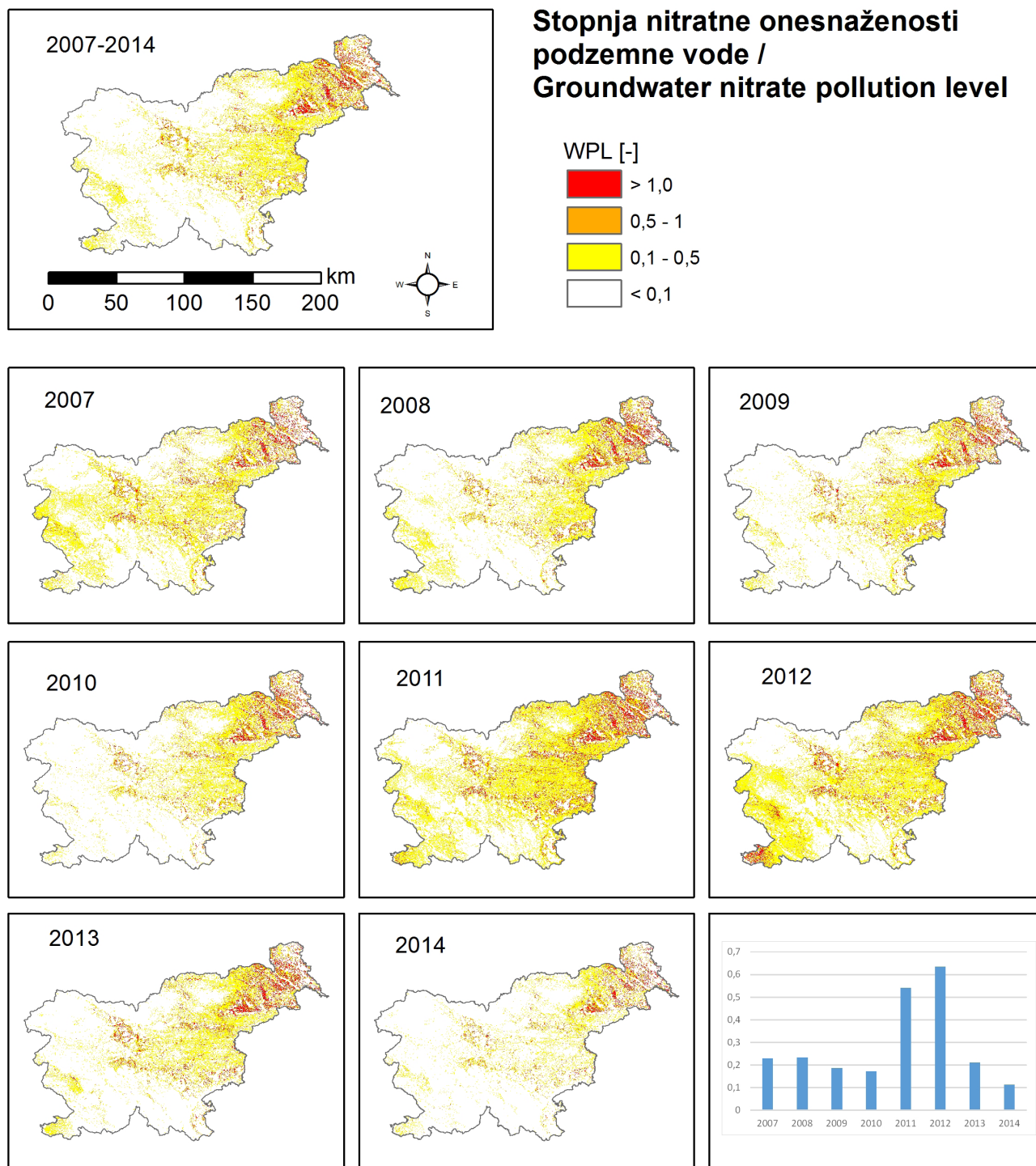
Sheme kazalnikov trajnostne rabe podzemne vode na nacionalni ravni, kot so jih razvili v delovni skupini UNESCO / IAEA / IAH (Vrba & Lipponen, 2007) (Tabela 1), sicer nudijo prvi primerljiv vpogled v stanje podzemnih voda ter problematiko varovanja in rabe podzemnih vodnih virov, vendar lahko take ocene prekrijejo upravljavsko pomembne informacije o ključnih lokalnih preobremenitvah.

Tako lahko kljub razmeroma majhnemu deležu črpane količine razpoložljive podzemne vode za celotno Slovenijo (3,1 %), deleži v posameznih vodnih telesih podzemnih voda predvsem v sušnih letih presegajo tudi 20 % razpoložljivih količin vodnega telesa, v posameznih količinsko obremenjenih vodonosnikih, kot so npr. Ljubljansko, Dravsko in Mursko polje, pa je ta delež še nekoliko višji. Ob upoštevanju količin iz evidence vodnih pravic za rabo podzemnih voda v najbolj obremenjenih vodonosnikih v Sloveniji v posameznih obdobjih že posegamo v drugo polovico razpoložljivih količin za črpanje podzemne vode (Tabela 3). Črpane količine podzemne vode iz aluvialnih vodonosnikov petih obravnavanih vodnih teles predstavljajo 45 % podeljenih vodnih pravic (Souvent & Čenčur Curk, 2019). Ob tem pa je potrebno opozoriti na potrebo po poglobljeni analizi razpoložljivosti tudi lokalnih podzemnih vodnih virov, predvsem s poudarkom na

podrobnejši oceni prispevka podzemne vode za ekološki pretok. V raziskavi smo ugotovili velika odstopanja pri izračunih prispevkov podzemne vode za ekološki pretok, ki so posledica različnih predpostavk in metodoloških pristopov, ob hkratnem neupoštevanju sezone spreminljivosti. Zaradi tega je priporočljiva uporaba kriterija trajnostnega upravljanja podzemnih voda, da s črpanjem podzemnih vodnih virov ne zmanjšamo 10 % naravnega mesečnega baznega pretoka v površinskih vodotokih (Gleeson & Richter, 2017).

Poznavanje hidrološkega režima oz. sezone spreminljivosti količin obnovljive podzemne vode je ključnega pomena tudi pri ocenah kemijskega stanja podzemnih voda. Kljub razmeroma stabilni dušikovi bilanci se vnosi dušika v vodonosnik v različno vodnatih hidroloških letih razlikujejo tudi za večkratnik, zato je interpretacija rezultatov monitoringa stanja podzemnih voda brez upoštevanja procesov v celotnem vodnem krogu lahko pomanjkljiva ali celo zavajajoča. Stopnja nitrata onesnaženja podzemne vode je bila v analiziranem obdobju največja v letih 2011 in 2012, vzrokov za to pa ne najdemo v povečanem bremenu dušika, ampak v zmanjšanem napajanju, saj gre za najbolj sušno zaporedje dveh let zadnjega pol stoletja.

Za sistematično spremljanje doseganja trajnostnih ciljev pri črpanju in ohranjanju kakovosti podzemnih voda priporočamo uvedbo kazalnikov vodnega stresa in vodnega odtisa, ki zelo nazorno pokažejo človekove vplive na stanje naravnih vodnih virov (Hoekstra, 2003; Hoekstra et al., 2011). Spremljanje kazalnikov se mora opreti na rezultate vodnobilančnega modeliranja in študije pritiskov in vplivov v upravljavsko primerni prostorski in časovni skali.



Sl. 3. Stopnja nitratne onesnaženosti podzemne vode v Slovenije v obdobju 2007–2014 po regionalnem modelu GROWA-SI / DENUZ-WEKU v prostorski skali 100 × 100 m.

Fig. 3. Groundwater nitrate pollution level in Slovenia in the period 2007–2014 after the GROWA-SI / DENUZ-WEKU regional model in the spatial resolution 100 × 100 m.

Sklep

Pri ocenjevanju doseganja trajnostnih ciljev upravljanja podzemnih voda v Sloveniji smo kot kazalnik količinskega stresa in nitratne obremenjenosti podzemnih voda prvič v Sloveniji uporabili koncept vodnega odtisa za podzemne vode, ki naj bi podpiral učinkovitejše načrtovanje upravljanja in strateški razvoj dolgoročnih okoljskih politik. V študiji je bila ob uporabi rezultatov regionalnega bilančnega modeliranja za pliv-

tve vodonosnike celotnega območja Slovenije in modeliranja toka podzemne vode na ravninskih aluvialnih vodonosnikih preizkušena metodologija količinskega odtisa podzemne vode in odtisa sive podzemne vode. Rezultati izračunanih stopenj izkoriščenosti podzemne vode na nekaterih vodonosnikih presegajo polovico razpoložljivih količin, stopnja nitratnega onesnaženja podzemne vode pa že presegajo mejo trajnostnega varovanja.

Rezultate smo primerjali z dosedanjimi ocenami stanja voda po posameznih vodnih telesih podzemnih voda in ugotovili, da uporaba koncepta količinskega stresa in količinskega odtisa podzemne vode z upoštevanjem površine napajalnega območja predstavlja koristno dopolnitev dosedanje ocene količinskega stanja podzemnih voda, odtis sive pozemne vode pa ob upoštevanju vodne bilance in hidrokemičnega ozadja prinaša možnost povsem novega vpogleda v prostorsko in časovno shemo obremenjevanja vodnih teles podzemnih voda v Sloveniji. Koncept odtisa sive vode bi bilo v prihodnje koristno uporabiti za vse parametre monitoringa, ki ogrožajo dobro stanje podzemnih voda, in preko teh kazalnikov spremljati učinke ukrepov v lokalnem in regionalnem merilu ter sproti usmerjati prostorsko in okoljsko politiko za doseganje dobrega stanja in trajnostnega upravljanja podzemnih voda v Sloveniji.

Doseganje trajnostnih ciljev v zvezi z zagotavljanjem dostopa do vode in sanitarne ureditve ter trajnostnim gospodarjenjem z vodnimi viri do leta 2030 bo odvisno predvsem od realizacije ukrepov, ki jih bo prinesel naslednji načrt upravljanja voda. Zato naj bi načrt upravljanja voda za obdobje 2022–2027 temeljil na oceni stanja po posameznih vodnih telesih, nadgrajeni z letnimi in obdobjnimi bilančnimi analizami izkoriščenosti in onesnaženosti podzemne vode na posameznih najbolj obremenjenih delih vodnih teles podzemne vode. V tem primeru bo ukrepe za doseganje ciljev okvirne direktive o vodah mogoče učinkovito usmerjati v opredeljevanje in zmanjševanje lokalnih pritiskov in vplivov, ki ogrožajo doseganje trajnostnih ciljev na področju podzemnih voda v Sloveniji.

Zahvala

Zasnova in prvi izračuni kazalnikov doseganja trajnostnih ciljev z vidika upravljanja in varovanja podzemnih voda v Sloveniji temelji na številnih simulacijah regionalnih modelskih sistemov GROWA-SI in DENUZ-WEKU, ki so rezultati nemško-slovenskega raziskovalnega projekta med Agencijo RS za okolje in Forschungszentrum Jülich. Ključno vlogo pri prenosu teh regionalnih modelskih sistemov v slovenski prostor sta imela nemška raziskovalca dr. Frank Wendland in dr. Ralf Kunkel. Avtorja članka se za njuno dolgotrajno odlično sodelovanje iskreno zahvaljujeva.

Reference

- Andjelov, M., Kunkel, R., Uhan, J. & Wendland, F. 2014: Determination of nitrogen reduction levels necessary to reach groundwater quality targets in Slovenia. *Journal of Environmental Sciences*, 26/9: 1806-1817. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2014.06.027>
- Andjelov, M., Frantar, P., Mikulič, Z., Pavlič, U., Savić, V., Souvent, P. & Uhan, J. 2016: Ocena količinskega stanja podzemnih voda za Načrt upravljanja voda 2015-2021 v Sloveniji. *Geologija*, 59/2: 205-219. <https://doi.org/10.5474/geologija.2016.012>
- Andjelov, M., Mikulič, Z., Tetzlaff, B., Uhan, J. & Wendland, F. 2016: Groundwater recharge in Slovenia: results of a bilateral German-Slovenian research project. *Schriften des Forschungszentrums Jülich, Reihe Energie & Umwelt*, Bd. 339: 138 p.
- Charchousi, D., Papadopoulou, M.P. & Nanou-Giannarou, A. 2018: Groundwater footprint: A tool for ecological-based groundwater resources management assessment. *American Geophysical Union, Fall Meeting 2018*. <https://doi.org/10.1002/essoar.10500228.1>
- Demuth, S. 1993: Untersuchungen zum Niedrigwasser in West-Europa (European low flow study). *Freiburger Schriften zur Hydrologie*, Band 1, Freiburg: 205 p.
- Direktiva 2000/60/ES: Direktiva Evropskega parlamenta in Sveta 2000/60/ES z dne 23. oktobra 2000 o določitvi okvira za ukrepe Skupnosti na področju vodne politike. *UL L št. 327 z dne 22. 12. 2000*: 1-73.
- Direktiva 91/676/EGS: Direktiva Sveta 91/676/EGS z dne 12. decembra 1991 o varstvu voda pred onesnaževanjem z nitrati iz kmetijskih virov. *Uradni list*, št. 375 z dne 31. 12. 1991: 1-8.
- European Communities 2009: Guidance on groundwater status and trend assessment. *Guidance document*, No. 18: 82 p.
- EEA 2015: The European environment – state and outlook 2015: synthesis report, European Environmental Agency, Copenhagen: 205 p.
- Esnault, L., Gleeson, T., Wada, Y., Heinke, J., Gerten, D., Flanary, E., Bierkens, M. F. P. & van Beek, L. P. H. 2014: Linking groundwater use and stress to specific crops using the groundwater footprint in the Central Valley and High Plains aquifer systems, USA. *Water Resources Research*, 50/6: 4953–4973. <https://doi.org/10.1002/2013WR014792>
- Franke, N.A., Bovaciuglu, H. & Hoekstra, A.Y. 2013: Grey Water Footprint Accounting:

- Tier 1 Supporting Guidelines - Value of Water Research Report Series 65; UNESCO-IHE: Delft: 59 p.
- Gleeson, T., Wada, Y., Bierkens, M. F. P. & van Beek, L. P. H. 2012: Water balance of global aquifers revealed by groundwater footprint. *Nature*, 488: 197-200. <https://doi.org/10.1038/nature11295>
- Gleeson, T. & Wada, Y. 2013: Assessing regional groundwater stress formations using multiple data sources with the groundwater footprint. *Environmental Research Letters*, 8/4:1-9. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/4/044010>
- Gleeson, T. & Richter, B. 2017: How much groundwater can we pump and protect environmental flows through time? Presumptive standards for conjunctive management of aquifers and rivers. *River Research and Applications*, 34/1: 83-92. <https://doi.org/10.1002/rra.3185>
- Hoekstra, A.Y. (ed.) 2003: Virtual water trade: Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade, Delft, The Netherlands, 12-13 December 2002, Value of Water Research Report Series No.12, UNESCO-IHE, Delft: 239 p.
- Hoekstra, A.Y. & Hung, P.Q. 2002: Virtual water trade: A quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade. Value of Water Research Report Series, No.11, IHE, Delft: 66 p.
- Hoekstra, A.Y., Chapagain, A.K., Aldaya, M.M., Mesfin M. & Mekonnen, M.M. 2011: The Water Footprint Assessment Manual. Setting the Global Standard. Earthscan: 203 p.
- Janža, M., Šram, D., Mezga, K., Andjelov, M. & Uhan, J. 2016: Ocena potrebnih količin podzemnih voda za ohranjanje ekosistemov in doseganje dobrega ekološkega stanja površinskih voda. *Geologija*, 59/2: 221-232. <https://doi.org/10.5474/geologija.2016.013>
- Kille, K. 1970: Das Verfahren MoMNQ, ein Beitrag zur Berechnung der mittleren langjährigen Grundwasserneubildung mit Hilfe der monatlichen Niedrigwasserabflüsse. *Zeitschrift der deutschen Geologischen Gesellschaft, Sonderheft Hydrogeologie Hydrogeochemie*: 89-95
- Matoz, H., Nagode, P., Mihorko, P., Cvitanich, I., Dobnikar Tehovnik, M., Remec Rekar, Š., Rotar, B., Andjelov, M., Uhan, J., Sever, M., Zajc, M., Krsnik, P., Kušar, U., Marolt, P., Hebat, I., Sušin, J., Verbič, J. & Zagorc, B. 2016: Poročilo Slovenije na podlagi 10. člena Direktive Sveta 91/676/EEC, ki se nanaša na varstvo voda pred onesnaženjem z nitrati iz kmetijskih virov za obdobje 2012 – 2015. Ministrstvo za okolje in prostor, Ljubljana: 73 p.
- McDonald, R.I., Weber, K., Padowski, J., Flörke, M., Schneider, C., Green, P.A., Gleeson, T., Eckman, S., Lehner, B., Balk, D., Boucher, T., Grill, G. & Montgomery, M. 2014: Water on an urban planet: Urbanization and the reach of urban water infrastructure. *Global Environmental Change*. 27: 96-105. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.04.022>
- Mezga, K. 2014: Natural hydrochemical background and dynamics of groundwater in Slovenia: doktorska disertacija. Univerza v Novi Gorici, Nova Gorica: 226 p.
- MOP 2009: Načrt upravljanja voda za vodni območji Donave in Jadranskega morja 2009-2015, Ministrstvo za okolje in prostor, Ljubljana: 524 p.
- MOP 2016: Načrt upravljanja voda na vodnem območju Donave za obdobje 2016-2021, Ministrstvo za okolje in prostor, Ljubljana: 287 p.
- Panno, S.V., Kelly, W.R., Martinsek, A.T. & Hackley, K.C. 2006: Estimating background and threshold nitrate concentrations using probability graphs. *Ground Water*, 44/5: 697-709. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2006.00240.x>
- Petauer, D. & Hiti, T. 2017: Matematični model vodonosnika Ljubljanskega polja umerjen na visoke in srednje hidrogeološke razmere. Poročilo GEORAZ d.o.o., ARSO, Ljubljana: 42 p.
- Petauer, D. & Hiti, T. 2018: Matematični model vodonosnika Ljubljanskega polja umerjen na visoke in srednje hidrogeološke razmere. Poročilo GEORAZ d.o.o., ARSO, Ljubljana: 34 p.
- Prestor, J. & Janža, M. 2016: Karta ranljivosti podzemne vode. In: Novak, M. & Rman, N. (ur.): Geološki atlas Slovenije. Geološki zavod Slovenije, Ljubljana: 46-47.
- Sachs, J., Schmidt-Traub, G., Kroll, C., Laforune, G. & Fuller, G. 2019: Sustainable Development Report 2019. New York: Bertelsmann Stiftung and Sustainable Development Solutions Network (SDSN).
- Schlüter, H. 2006: Ermittlung des nachhaltigen nutzbaren Grundwasserdargebots in stark genutzten Teileinzugsgebieten – Beurteilung des mengenmäßigen Zustandes gemäß EU Rahmenrichtlinie Wasser. Ph.D. Thesis. Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus: 193 p.
- Souvent, P., Vižintin, G., Celarc, S. & Čenčur Curk, B. 2016: An expert system supporting

- decision making process for sustainable groundwater use in main alluvial aquifers in Slovenia. In: European Geosciences Union, General Assembly 2016, Vienna, Austria, 17-22 April 2016, Geophysical research abstracts, 18: 4395.
- Souvent, P. & Čenčur Curk, B. 2019: Uporaba numeričnih modelov toka podzemne vode pri upravljanju s podzemnimi vodami. In: Geološki zbornik, 24. posvetovanje slovenskih geologov, Ljubljana, 29. november 2019. Naravoslovnotehniška fakulteta, Ljubljana: 116-119
- Sovič, N. 2017: Monitoring pitne vode 2017 – Letno poročilo o kakovosti pitne vode v letu 2017. Nacionalni laboratorij za zdravje, okolje in hrano. Maribor: 59 p.
- Srebovt, A. 2014: Izračun indeksov baznega odтока (BFI) za vodomerne postaje državnega hidrološkega monitoringa: diplomska naloga. Univerza v Ljubljani, Ljubljana: 44 p.
- Sušin, J. & Verbič, J. 2019: Bilančni presežek dušika v kmetijstvu. Internet: <http://kazalci.arso.gov.si/sl/content/bilancni-presezek-du-sika-v-kmetijstvu-0> (14.11.2019)
- Tennant, D.L. 1976: Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation, and related environmental resources. In: Instream flow needs, Volume II: Boise, Idaho, Proceedings of the symposium and specialty conference on instream flow needs, May 3-6, American Fisheries Society: 359-373. <https://trove.nla.gov.au/version/42683783>
- Turton, A.R. 2003: Water and state sovereignty: the hydropolitical challenge for state in aride regions. In: Wolf (ed.): 516-533
- Uhan, J. 2011: Ranljivost podzemne vode na nitrarno onesnaženje v aluvialnih vodonosnikih Slovenije: doktorska disertacija. Univerza v Ljubljani, Ljubljana: 163 p.
- United Nations 2020: Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. Internet: https://www.un.org/ga/search/view_doc.asp?symbol=A/RES/70/1&Lang=E
- Uradni list RS 2009: Uredba o kriterijih za določitev ter načinu spremljanja in poročanja ekološko sprejemljivega pretoka. Uradni list RS, št. 97/09.
- Uradni list RS 2009: Uredba o stanju podzemnih voda. Uradni list RS, št. 25/09, 68/12 in 66/16.
- Vrba, J. & Lipponen, A. 2007: Groundwater resources sustainability indicators. IHP/2007/GW-14: 123 p.
- Wundt, W. 1958: Die Kleinstwasserführung der Flüsse als Maß für die verfügbaren Grundwassermengen. In: Grahmann, R. (ed.): Die Grundwässer in Deutschland und ihre Nutzung. Forsch. Deut. Landeskunde, 105: 47-54.