



# Ocena količinske ranljivosti podzemne vode na podnebno spremembo v Sloveniji

## Assessment of groundwater quantitative vulnerability to climate change in Slovenia

Jože UHAN & Mišo ANDJELOV

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

Prejeto / Received 19. 06. 2021; Sprejeto / Accepted 1. 7. 2021; Objavljeno na spletu / Published online 19. 7. 2021

*Ključne besede:* podzemna voda, podnebna sprememba, izpostavljenost, občutljivost, prilagodljivost, ranljivost  
*Key words:* groundwater, climate change, exposure, sensitivity, adaptivity, vulnerability

### Izveček

Ocena potencialnega vpliva podnebne spremembe na napajanje vodonosnikov in razpoložljivost podzemnih vodnih virov je tudi za Slovenijo pomembno izhodišče načrtovanja prilagajanja za zmanjševanje vplivov, predvsem na območjih, kjer je stopnja njene izkoriščenosti največja, sposobnost prilagajanja pa najmanjša. Količinsko ranljivost podzemne vode na podnebno spremembo v Sloveniji smo ocenili preko kazalnika potencialnega vpliva in kazalnika prilagoditvene sposobnosti za vsa telesa podzemnih voda v Sloveniji. Povišano količinsko ranljivost podzemne vode v Sloveniji izkazuje le okoli 9 % ozemlja države. Največjo količinsko ranljivost smo ugotovili v plitvih aluvialnih vodnih telesih podzemnih voda v severovzhodnem delu države, kjer pričakovane letne količinske spremembe napajanja vodonosnikov zaradi podnebne spremembe do sredine tega stoletja predstavljajo več kot četrtno sedanjega povprečnega letnega odvzema podzemne vode.

### Abstract

Assessment of the potential impact of climate change on groundwater recharge and availability of groundwater resources is as essential in Slovenia as it is elsewhere. Adaptive planning is of immense importance when aiming for reduction of negative impacts, even more so in areas with the highest groundwater exploitation levels and the lowest adaptive capacity. We have assessed quantitative groundwater vulnerability to climate change through potential impact and adaptive capacity indicators for all groundwater bodies in Slovenia. High and moderately high quantitative groundwater vulnerability can be observed in merely 9 % of Slovenian territory. The highest quantitative vulnerability was accounted to shallow alluvial groundwater bodies in the northeastern part of the country, where the annual change in groundwater recharge due to climate change until the middle of this century is expected to represent more than a quarter of the current average annual groundwater extraction.

### Uvod

S potrebo po oceni potencialnih vplivov podnebne spremembe na količinsko obnavljanje podzemne vode v Sloveniji so se soočili že avtorji prvega nacionalnega poročila okvirne konvencije Združenih narodov o spremembi podnebja (Kajfež-Bogataj et al., 1999; Paradiž & Kranjc, 2002). Na podlagi rezultatov vseh takratnih nacionalnih poročil in ostalih študij, med katerimi so srednjeevropske raziskave napovedovale tudi polovično zmanjšanje poletnega napajanja vodonosnikov (Eckhardt & Ulbrich, 2003), v sredozemskem prostoru pa celo preko 70 % (Döll & Flörke,

2005), je *Medvladni panel za podnebne spremembe* nekaj let kasneje podal okvir za potrebo po ocenjevanju ranljivosti človeka in ekosistemov na podnebne spremembe ter ranljivost opredelil kot oceno potencialnih vplivov podnebne spremembe in sposobnosti prilagajanja sistemov (IPCC, 2007). Ranljivosti podzemne vode na podnebno spremembo so se za območje Slovenije dotaknile različne regionalne študije (Döll, 2009; Nistor et al., 2016; Nistor, 2019) in severovzhodni del Slovenije z najmanjšo količino padavin v državi ocenile kot območje srednjega razreda ranljivosti, katerega površina pa naj bi se po predvidevanjih za ta del Panonskega bazena do leta 2050 nekoliko

povečala. Tudi kompleksna regionalna ocena vpliva podnebne spremembe na napajanje vodonosnikov v jugovzhodni Evropi, ki so jo izdelali raziskovalci projekta *Climate Change and Impact on Water Supply »CC-WaterS«* (Čenčur Curk et al., 2014), območje podzemnih voda Slovenije ocenjuje kot nizko do največ srednje ranljivo na podnebno spremembo z verjetnostjo za povečanje njene količinske ranljivosti v naslednjih desetletjih.

Rezultati dosedanjih regionalnih študij omogočajo grobo oceno izpostavljenosti in količinske ranljivosti podzemnih voda na podnebno spremembo v Sloveniji, vendar pa njihova merila oz. prostorske ločljivosti rezultatov niso omogočale podrobnejših razmislekov o potrebi po lokalnih prilagoditvenih ukrepih oz. ukrepih po posameznih telesih podzemnih voda v Sloveniji. Na celotnem območju Slovenije je prvo oceno vpliva podnebne spremembe na napajanje vodonosnikov omogočila uporaba regionalnega modela vodne bilance GROWA-SI v okviru priprave »Načrta upravljanja voda 2016–2021« (Andjelov et al., 2016; MOP, 2016) in kasneje s spremenjenimi podnebnimi scenariji še v projektu »Ocena podnebnih sprememb v Sloveniji do konca 21. stoletja« (Dolinar, 2018). V okviru priprav strokovnih izhodišč za nadaljnje načrtovanje upravljanja podzemnih voda smo rezultate dosedanjih modelskih simulacij letnih vodnih bilanc in poznavanja hidrogeoloških lastnosti vodonosnikov preko pristopa razvrščanja in tehtanja parametrov (Hölbling et al., 2018) ocenili izpostavljenost in občutljivost sistema ter ob uporabi indeksa vodne revščine (Liu et al., 2019) ocenili tudi prilagoditveno sposobnost teles podzemnih voda na podnebno spremembo v Sloveniji.

### Podatki in metode

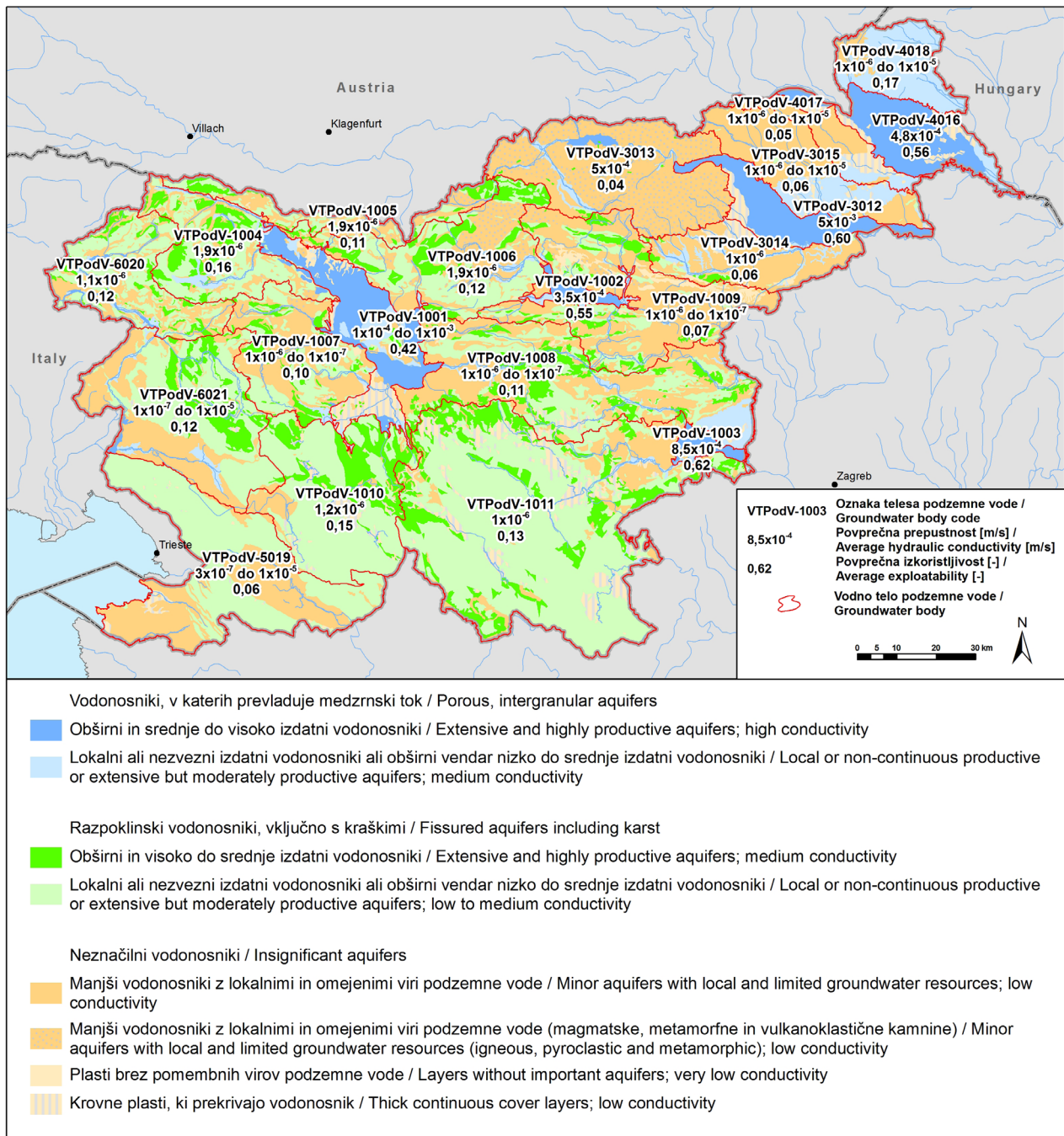
Za potrebe ocenjevanja stanja in upravljanja podzemnih voda je območje Slovenije razdeljeno na 21 teles podzemne vode z zelo raznoliko hidrogeološko zgradbo in hidravlično prepustnostjo ter posledično zelo različno izkoristljivostjo podzemne vode (sl. 1), ocenjeno in regionalizirano po metodologiji za opredelitev vodnih teles podzemnih (Prestor et al., 2006). Izkoristljivost, določena na podlagi lastnosti vodonosnikov in njihove členitve po priporočilih IAH (Struckmeier & Margat, 1995), je najmanjša v vodnih telesih s prevladujočimi manjšimi vodonosniki in lokalnimi omejenimi vodnimi viri, največja pa v aluvialnih vodnih telesih z medzrnsko poroznostjo in razmeroma visokim koeficienti prepustnosti v razponu od  $1 \cdot 10^{-4}$  do  $1 \cdot 10^{-3}$  m/s (Prestor et

al., 2006). Pet ravninskih aluvialnih vodnih teles na okoli 10 % območja Slovenije po podatkih iz evidence vodnih povračil skupno zagotavlja  $85.500.000 \text{ m}^3$  vode letno (46 % vse odvzete podzemne vode v Sloveniji) in predstavljajo količinsko najbolj obremenjene vodonosnike v Sloveniji. Stopnja izkoriščenosti podzemnih voda, razmerje med odvzeto in razpoložljivo količino, je na posameznih najbolj obremenjenih delih aluvialnih vodnih teles izrazito večja, kot se ocenjuje na celotnih vodnih telesih. V nekaterih vodonosnikih se količina črpanja pri srednjih nizkovodnih razmerah že približuje polovici vseh razpoložljivih podzemnih vodnih virov (Uhan & Andjelov, 2019).

Pregled metodologije ocenjevanja ranljivosti podzemne vode na podnebno spremembo po sve-tu odkriva velike razlike in ob tem razmeroma slabo primerljivost in zanesljivost rezultatov dosedanjih raziskav s tega področja. Vzroki so predvsem v nekritični uporabi različnih kazalnikov, scenarijev in konceptov vrednotenja v različnih časovnih in prostorskih skalah. Zaradi tega raziskovalci izpostavljajo potrebo po predhodnih analizah kazalnikov, tako s področja okolja kot tudi s področja človekovih aktivnosti v širšem socialnem in ekonomskem okviru ter potrebo po uporabi enotne konceptualne sheme »izpostavljenost – občutljivost – prilagoditvena sposobnost« (Schröter et al., 2004; IPCC, 2007; Aslam et al., 2018). Ob tem konceptualnem izhodišču smo za oceno ranljivosti podzemnih voda na podnebno spremembo po posameznih telesih podzemnih voda v Sloveniji uporabili kombiniran model ocene potencialnega vpliva in prilagoditvene sposobnosti, kot je bila predlagana v projektu »CCWaters« (Čenčur Curk et al., 2014). Ocena potencialnih vplivov oz. izpostavljenosti in občutljivosti temelji na pristopu »AQUICLIM« (Hölbling et al., 2018), za oceno prilagoditvene sposobnosti sistema pa smo po shemi kazalnikov »gonilne sile – obremenitev – stanje – vpliv – odziv« (DPSIR) za podzemne vode izračunali indeks vodne revščine (WPI) (Liu et al., 2019) (sl. 2).

### Potencialni vplivi podnebne spremembe na podzemne vode

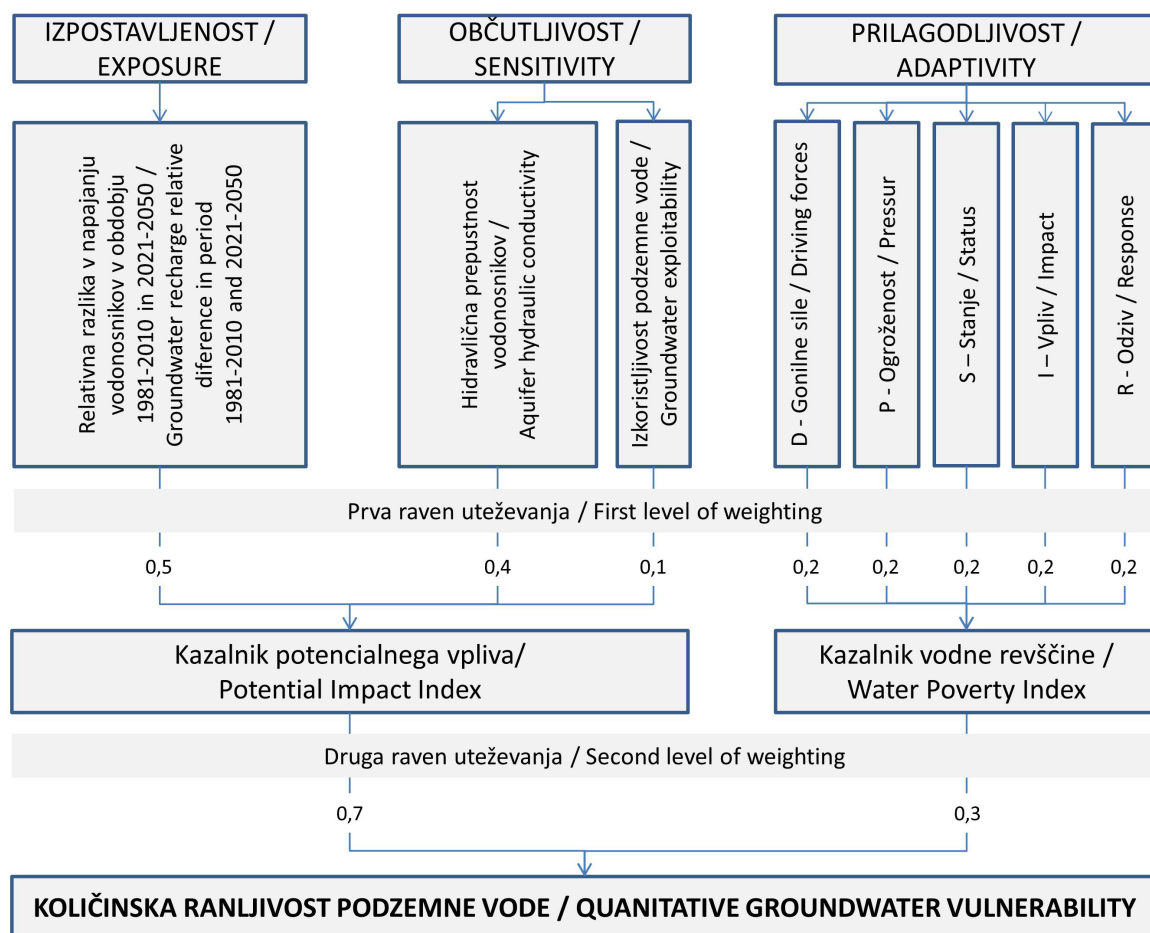
Za oceno izpostavljenosti in občutljivosti podzemnih voda na podnebno spremembo so v Nemčiji razvili pristop »AQUICLIM« in ga preizkusili tudi na številnih pilotnih območjih v projektu GeoERA - TACTIC »Tools for assessment of climate change Impact on groundwater and adaptation strategies« (Hinsby et al., 2020). Pristop »AQUICLIM« je enostavna metoda razvrščanja in



Sl. 1. Hidrogeološke lastnosti teles podzemnih voda v Sloveniji po podatkih Geološkega zavoda Slovenije (Prestor et al., 2006)  
 Fig. 1. Hydrogeological characteristics of groundwater bodies in Slovenia after Geological Survey of Slovenia (Prestor et al., 2006)

tehtanja hidrogeoloških parametrov izpostavljenosti (napajanje vodnosnikov) in občutljivosti (hidravlična prepustnost kamnin in izkoristljivost podzemne vode) z namenom ocene potencialnega vpliva podnebne spremembe na podzemne vode (sl. 2). Nedvomno bi oceno občutljivosti lahko izboljšali še z upoštevanjem transmisivnosti, vendar so podatki o debelinah vodnosnikov po posameznih vodnih telesih skopi in podani v velikih razponih. Predstavljena ocena vplivov podnebne spremembe na podzemne vode v Sloveniji zato sledi mednarodno že preizkušenemu pristopu »AQUICLIM«.

Za oceno izpostavljenosti smo uporabili podatke o napajanju oz. relativni razliki pri napajanju plitvih vodnosnikov v referenčnem vodno-bilančnem obdobju 1981-2010 in simuliranem napajanju v obdobju 2021-2050 Agencije Republike Slovenije za okolje. Napajanje vodnosnikov je bilo ocenjeno z empiričnim regionalnim vodnobilančnim modelom GROWA-SI, ki konceptualno kombinira distribuirane meteorološke podatke z distribuiranimi hidrološkimi in drugimi fizično-geografskimi parametri za izračun elementov vodne bilance v prostoru (Andjelov et al., 2016). Za vodnobilančno modeliranje so bili na Agen-



Sl. 2. Shema ocenjevanja količinske ranljivosti podzemne vode na podnebno spremembo v Sloveniji (prilagojeno po Hölbling et al., 2018, Liu et al., 2019 in Čenčur Curk et al., 2014)

Fig. 2. Scheme for quantitative groundwater vulnerability assessment to climate change in Slovenia (adapted after Hölbling et al., 2018, Liu et al., 2019 and Čenčur Curk et al., 2014)

ciji Republike Slovenije za okolje uporabljeni scenariji, kot so jih razvili v evropskem projektu ENSEMBLES (van der Linden & Mitchell, 2009), kasneje pa nadgradili na Agenciji RS za okolje (Dolinar, 2018).

Ocena občutljivosti pa je temeljila na podatkih o hidravlični prepustnosti vodonosnikov ter izkoristljivosti podzemnih voda, pridobljenih iz hidrogeološke podatkovne zbirke Geološkega zavoda Slovenije. V pristopu »AQUICLIM« (Hölbling et al., 2018) predpostavljajo višjo količinsko ranljivost območja vodonosnikov z bolj prepustnimi kamninami ter območjih vodonosnikov z večjo izdatnostjo. Ob tem predpostavljamo, da bodo pričakovani učinki časovnega spreminjanja v količinskem obnavljanju in razpoložljivosti podzemne vode zaradi počasnejšega pretakanja in napajanja zasičenega dela vodonosnika v manj prepustnih kamninah manjši. Interpretiranje rezultatov pa mora kritično slediti tovrstnim predpostavkam in metodološkim poenostavitvam, ki so za pregledne regionalne študije kompleksnih procesov pogosto neizbežne. Za izračun kazalni-

ka potencialnega vpliva smo podatke o relativni razliki v napajanju, prepustnosti vodonosnikov in izkoristljivosti podzemne vode, ob upoštevanju pozitivnega ali negativnega vpliva spremenljivke, normalizirali z metodo Min-Max in utežili v razmerju 0,5 : 0,4 : 0,1, kot je bilo priporočeno in preizkušeno v pristopu »AQUICLIM« (Hölbling et al., 2018; Damm et al., 2018).

Na podlagi podatkov regionalnega vodno-bilančnega modela GROWA-SI (Andjelov et al., 2016) in »Nacionalne baze hidrogeoloških podatkov za opredelitev vodnih teles podzemnih voda« (Prestor et al., 2006) je bil po shemi »AQUICLIM« (Hölbling et al., 2018; Damm et al., 2018) s prilagojenimi parametri (sl. 2) izračunan indeks potencialnega vpliva za vsa vodna telesa podzemnih voda v Sloveniji. Indeks ( $vi$ ) je za vsako prostorsko enoto seštevek zmnožkov uteži parametra  $j$  ( $w_j$ ) in vrednosti razvrstitvenega razreda  $i$  znotraj parametra  $j$  ( $x_{ji}$ ) (Enačba 1):

$$vi = \sum_{j=1}^3 w_j \cdot x_{ji} \quad (1)$$

## Sposobnost prilagajanja na podnebno spremembo

Za integralno oceno sposobnosti prilagajanja sistema na podnebno spremembo smo uporabili kazalnik vodne revščine WPI (*ang. Water Poverty Index*). Kazalnik WPI je široko uporabljeno interdisciplinarno ocenjevalno orodje, ki upošteva ključna vprašanja v zvezi z vodnimi viri in združuje fizične, socialne in ekonomske informacije (Sullivan, 2002). Kazalnika WPI smo za podzemne vode območja celotne Slovenije izračunali preko petdelne modelske sheme DPSIR (D – gonilne sile, P – obremenitve, S – stanje, I – vplivi, R – odzivi) (Smeets & Weterings, 1999), ki vrednoti skupne učinke odnosov med okoljem oz. podzemno vodo in človekovimi aktivnostmi v širšem socialnem in ekonomskem okviru (Liu et al., 2019). Izračun kazalnika, ki ga v primeru študije območja Slovenije označujemo z gWPI (DPSIR), temelji na letnih podatkih petnajstih spremenljivk za obdobje 2007–2017 iz podatkovnih zbirk Statističnega urada Republike Slovenije (SURIS), Direkcije Republike Slovenije za vode (DRSV), Agencije Republike Slovenije za okolje (ARSO), Nacionalnega inštituta za javno zdravje (NIJZ) in Kmetijskega inštituta Slovenije (KIS) (Tabela 1). Podatke vsake posamezne spremenljivke smo z metodo normaliziranja Min–Max linearno transformirali v vrednosti glede na pozitivni ali negativni vpliv spremenljivke na kazalnik gWPI (DPSIR). Uteževanje posameznih normaliziranih spremenljivk za izračun kazalnika gWPI (DPSIR) je v tej raziskavi temeljilo na uporabi metode analitičnega hierarhičnega procesa AHP (Saaty, 1980; Goepel, 2013) in entropijske metode uteževanja EWM (Diakoulaki et al., 1995). Na tak način smo razmeroma subjektivno ekspertno presojo po metodi večparametrskega odločanja AHP (DPSIR) korigirali z objektivnejšo entropijsko metodo EWM, ki temelji na analizi merjenih podatkov (Li & Zhang, 2017; Liu et al., 2019).

V okviru analitičnega hierarhičnega procesa AHP se hierarhijo kriterijev opiše z matrikami ekspertnih primerjav njihove pomembnosti ob uporabi devetstopenjske lestvice relativne pomembnosti (Saaty, 1980), iz konsistentne matrike parnih primerjav pa se izračuna elemente normiranih lastnih vektorjev, ki predstavljajo uteži. Zaradi zmanjšanja subjektivnosti ekspertnega presojanja v procesu AHP smo upoštevali priporočilo korekcije uteži z entropijsko metodo uteževanja EWM (Shannon, 1948). Po tej metodi se podatke  $x_{ij}$  iz matrike  $m \times n$  standardizira v  $p_{ij}$  (Enačba 2) in iz njih izračuna entropija  $E_i$  (Enačba 3) in utež  $w_i$  (Enačbe 4):

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{j=1}^n x_{ij}} \quad (2)$$

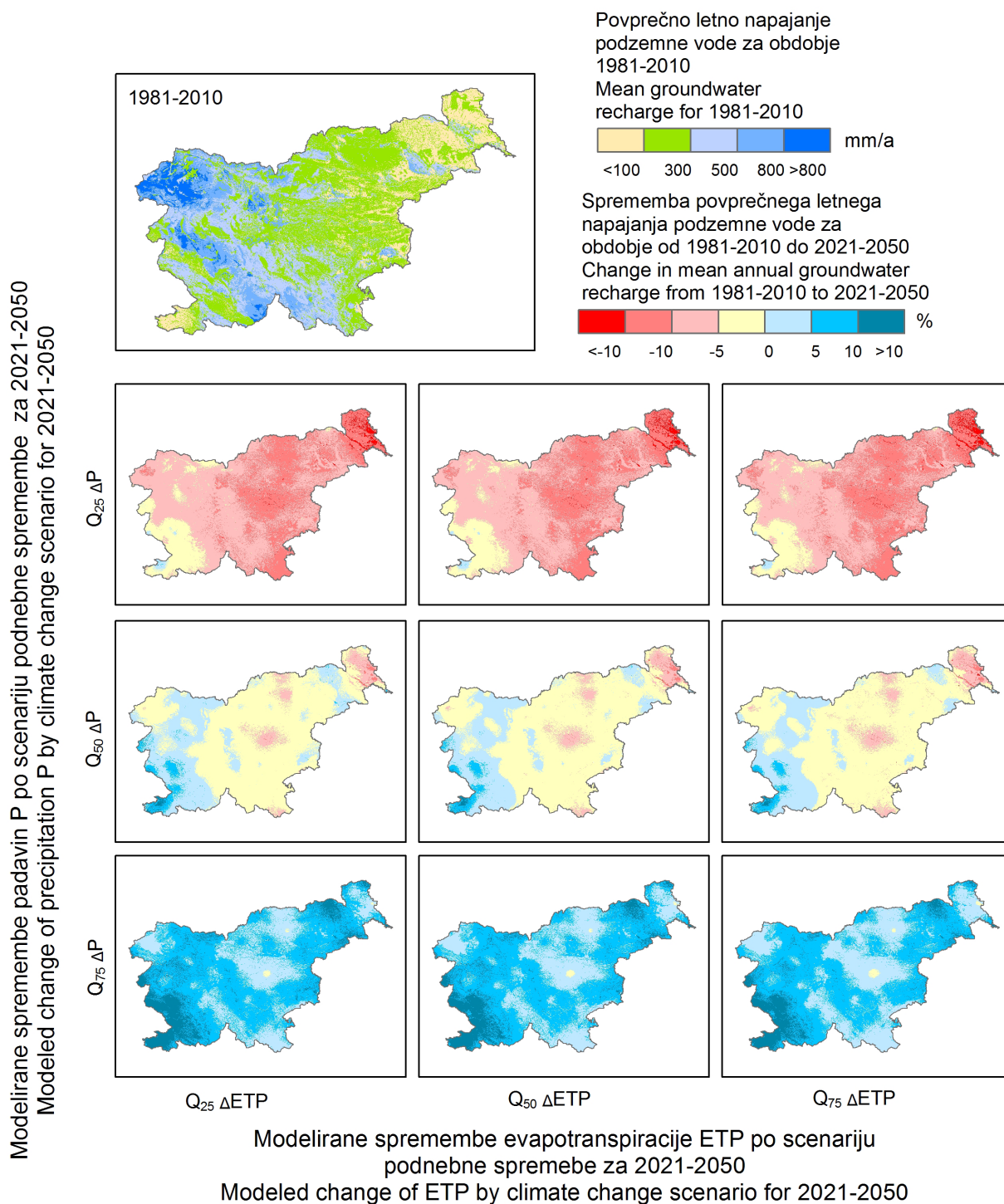
$$E_i = -\frac{\sum_{j=1}^n p_{ij} \cdot \ln p_{ij}}{\ln n} \quad (3)$$

$$w_i = \frac{1 - E_i}{\sum_{i=1}^m (1 - E_i)} \quad (4)$$

## Rezultati in razprava

Analiza meteoroloških podatkov o podnebnju v Sloveniji v obdobju 1961–2010, je ugotovila zvišanje povprečne letne temperature zraka za 1,7 °C in zmanjšanje povprečnih letnih padavin do 20 % (Vertačnik & Bertalanč, 2017). Sprememba podnebja tega 50-letnega obdobja je vplivala tudi na vodni krog z zmanjšanjem obnovljivih količin podzemnih voda. Primerjava modelskih rezultatov povprečnega letnega napajanja med obdobjema 1971–2000 in 1981–2010 je pokazala zmanjšanje letnega napajanja plitvih vodonosnikov za 15 mm oz. odstopanje za okoli -5 % (Andjelov et al., 2014).

Rezultati podnebnih modelskih simulacij do konca 21. stoletja za Slovenijo sicer predvidevajo znatno povečanje povprečne letne višine padavin (Dolar, 2018), vendar pa kratkoročnejše simulacije z vodnobilančnim modelom GROWA-SI (Andjelov et al., 2016) po različnih kombinacijah podnebnih in emisijskih scenarijev iz evropskega projekta ENSEMBLES (van der Linden & Mitchell, 2009) predvidevajo manjša odstopanja. Za pripravo scenarijev za območje Slovenije so na Agenciji Republike Slovenije za okolje uporabili 18 modelskih izračunov iz projekta ENSEMBLES in iz njih ocenili vrednosti 25. in 75. percentila ter mediano vseh modelskih izračunov višine padavin in temperature zraka, posredno pa tudi evapotranspiracije. Kombinacije višine padavin in potencialne evapotranspiracije 25. percentila, mediane in 75. percentila za obdobje 2021–2050 so bile uporabljene kot vhodne informacije v modelu GROWA-SI, ki je omogočil simulacijo devetih kombinacij napajanja podzemne vode (sl. 3). Na podlagi teh modelskih simulacij lahko v prihodnem obdobju 2021–2050 pričakujemo, da se bodo povprečne letne obnovljive količine podzemne vode na območju celotne Slovenije, glede na dolgoletno povprečje 1981–2010, spremenile v razponu od -8,7 do +6,5 %, povprečno za okoli -1 %.



Sl. 3. Odstopanje v napajanju podzemnih voda, modelirano z regionalnim vodnobilančnim modelom GROWA-SI ob uporabi 25. percentila, mediane in 75. percentila padavin in potencialne evapotranspiracije iz ansambelskih napovedi podnebne spremembe za obdobje 2021-2051 (Andjelov et al., 2016).

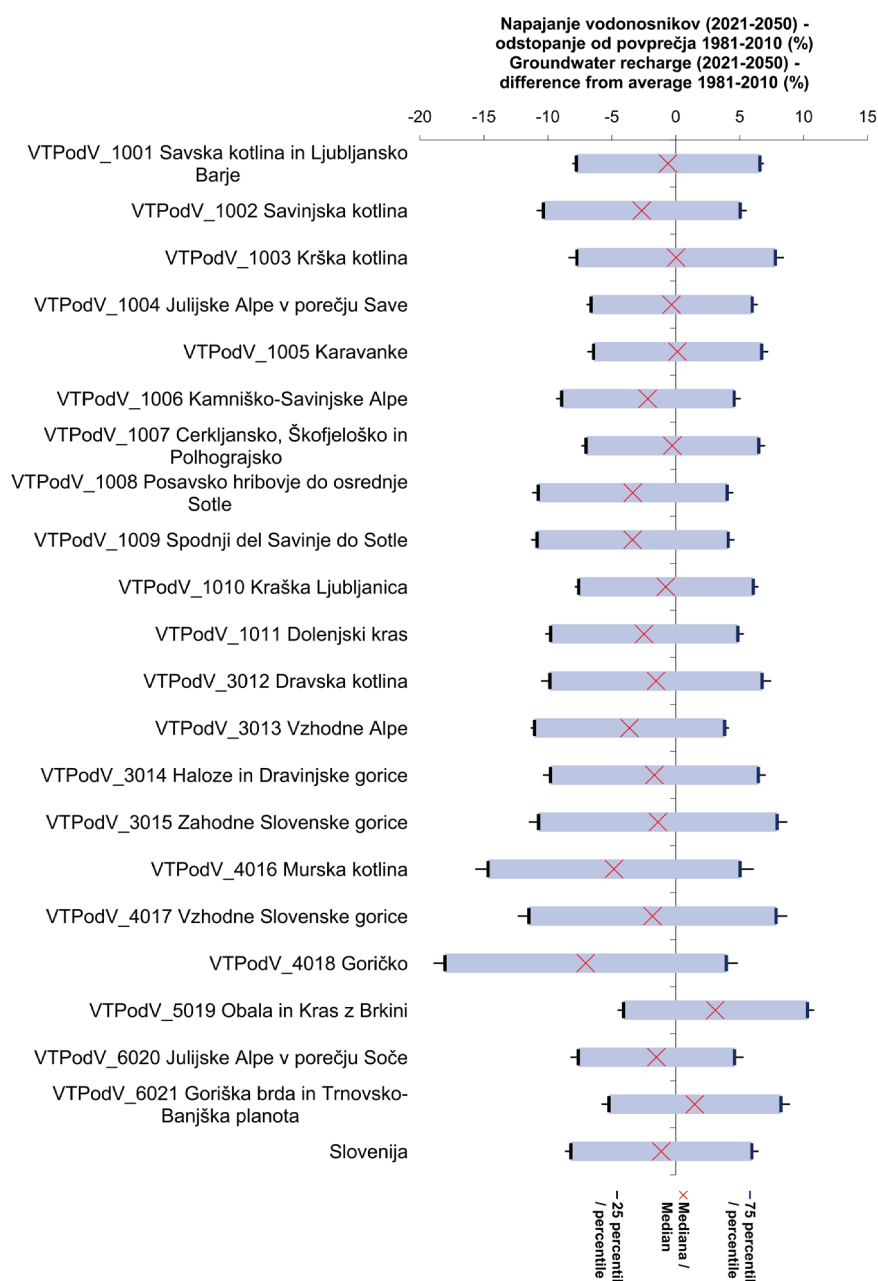
Fig. 3. Deviation in groundwater recharge by GROWA-SI regional water balance model, applying the 25th, median and 75th percentile of precipitation and potential evapotranspiration of climate change model ensemble for the period 2021-2050 (Andjelov et al., 2016).

Največje potencialne vplive pričakovane podnebne spremembe na napajanje plitvih vodonosnikov lahko po simulaciji do leta 2050 pričakujemo v severovzhodni Sloveniji, povprečno -4,8 % v VTPodV\_4016 Murska kotlina in -7 % v VTPodV\_4018 Goričko (sl. 3, 4). Omenjeni vodni telesi pa tudi po uteženju z normaliziranimi

hidrogeološkima spremenljivkama hidravlične prepustnosti vodonosnika in izkoristljivostjo podzemne vode izstopata kot območji z največjim potencialnim vplivom podnebne spremembe na napajanje podzemne vode, ki se izražajo z najnižjim vrednostmi vsote uteženih normaliziranih vrednosti.

Drugi del ocenjevalnega postopka količinske ranljivosti podzemne vode na podnebno spremembo odkriva stopnjo prilagoditvene sposobnosti sistema, ocenjene preko petdelne sheme DPSIR z izbranimi petnajstimi parametri. Uteži posameznega parametra odražajo vpliv na skupni kazalnik prilagoditvene sposobnosti, izraženim s kazalnikom vodne revščine gWPI (DPSIR). Višja vrednost uteži govori o večji povezanosti parametra s skupnim kazalnikom. V sklopu gonilnih sil (D) je v analitičnem hierarhičnem procesu ocenjevanja ob upoštevanju entropije največjo težo dobil parameter količine porabljene vode iz javnega vodovoda na prebivalca (P2), v sklopih obremenitev (P) in stanja (S) pa problematika nitratnega onesnaženja podzemnih voda (P3 in

S3), kateri se v sklopu vplivov (I) pridružuje še problematika izpostavljenosti prebivalcev s preseženimi vsebnostmi pesticidov v pitni vodi (I3). V sklopu odzivov (R) pa so vrednosti uteži najvišje pri parameteru višine investicij v upravljanje odpadnih voda (R3), celo višje od parametra vodne produktivnosti (R1), ki podaja razmerje med bruto domačim proizvodom in količino vode, dobavljene iz javnega vodovoda (Tabela 1). Učinki povečanja investicij v upravljanje odpadnih voda bi lahko pomembno vplivali na količine onesnažene vode oz. odtis sive podzemne vode (Uhan & Andjelov, 2019) in bi marsikje lahko celo presegli pričakovane učinke podnebne spremembe na nje-no količinsko stanje.



Sl. 4. Statistika predvidenih sprememb v napajanju podzemnih vodnih teles v Sloveniji med obdobjema 1981-2010 in 2021-2050.

Fig. 4. Statistics of predicted changes in recharge of groundwater bodies in Slovenia between the period 1981-2010 and 2021-2050.

Tabela 1. Uteži izbranih DPSIR kazalnikov, ocenjene z analitičnim hierarhičnim procesom AHP in entropijsko metodo uteževanja EWM.

Table 1. Weights of selected DPSIR indicators, assessed with Analytic hierarchy process AHP and Entropy weight method EWM.

Sklopi modela DPSIR / DPSIR model components	DPSIR kazalniki / DPSIR indicators	Vir podatkov / Data sources	AHPw	EWMw	Iw
D: GONILNA SILA / D: DRIVING FORCE	D1: Skupni prirast prebivalstva / D1: Growth rate of population	SURS	0,221	0,238	0,229
	D2: Porabljene vode iz javnega vodovoda na prebivalca / D2: Water consumption from public water supply per capita	SURS	0,319	0,381	0,420
	D3: Rast bruto družbenega proizvoda (BDP) na prebivalca / D3: Gross domestic product (GDP) growth rate per capita	SURS	0,460	0,381	0,269
P: OBREMENITEV / P: PRESSURE	P1: Količina načrpane podzemne vode za javno oskrbo / P1: Groundwater withdrawal quantities for public supply	SURS	0,387	0,355	0,371
	P2: Izpust neprečiščene odpadne vode / P2: Untreated wastewater discharge	SURS	0,169	0,318	0,244
	P3: Bilančni presežki dušika v kmetijstvu / P3: Nitrogen balance surplus in agriculture	KIS (KOS)	0,443	0,326	0,385
S: STANJE / S: STATE	S1: Količina razpoložljive podzemne vode / S1: Available groundwater quantities	ARSO	0,327	0,344	0,336
	S2: Količinski stres podzemne vode / S2: Quantitative groundwater stress	ARSO	0,260	0,333	0,296
	S3: Stopnja nitratne onesnaženosti podzemne vode / S3: Groundwater nitrate pollution level	ARSO	0,413	0,323	0,368
I: VPLIV / I: IMPACT	I1: Zniževanje gladine podzemne vode / I1: Groundwater table decline	ARSO	0,249	0,378	0,313
	I2: Prebivalci s preseženimi nitrati v pitni vodi / I2: Inhabitants with exceeded nitrates in drinking water	NIJZ (KOS)	0,157	0,319	0,238
	I3: Prebivalci s preseženimi pesticidi v pitni vodi / I3: Inhabitants with exceeded pesticides in drinking water	NIJZ (KOS)	0,594	0,304	0,449
R: ODZIV / R: RESPONSE	R1: Vodna produktivnost / R1: Water productivity	SURS	0,349	0,339	0,344
	R2: Investicije za varstvo okolja / R2: Environmental protection investments	SURS	0,168	0,330	0,249
	R3: Investicije za upravljanje odpadnih voda / R3: Investments for waste water management	SURS	0,484	0,331	0,407

Opombe / Notes:

SURS – Statistični urad Republike Slovenije / Statistical Office of the Republic of Slovenia

DRSV – Direkcija Republike Slovenije za vode / Slovenian Water Agency

ARSO – Agencija Republike Slovenije za okolje / Slovenian Environmental Agency

KIS – Kmetijski inštitut Slovenije / Agricultural Institute of Slovenia

NIJZ – Nacionalni inštitut za javno zdravje / National Institute of Public Health Slovenia

KOS – kazalci okolja Slovenije / Environmental indicator of Slovenia

AHPw – utež analitičnega hierarhičnega procesa / Weight of Analytic hierarchy process

EWMw – utež entropijske metode uteževanja / Weight of Entropy weight method

Iw = (AHPw+EWMw)/2 - skupna utež / Integrated weight

Tabela 2. Kazalnik gWPI po sklopih modela DPSIR za podzemne vode Slovenije v obdobju 2007-2017.

Table 2. gWPI index for DPSIR model components for groundwater in Slovenia in the period 2007-2017.

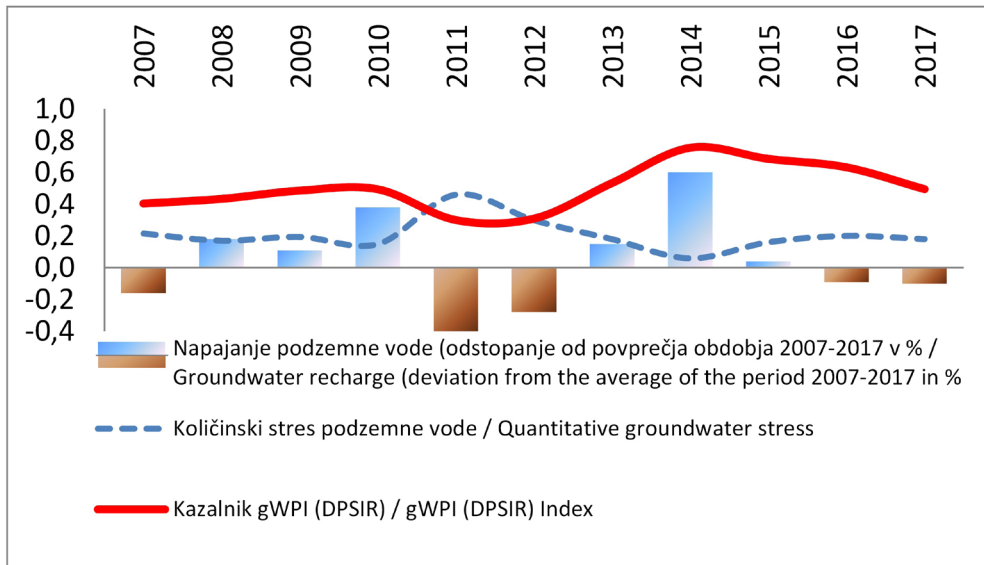
LETO / YEAR	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
D	0,26	0,17	0,24	0,47	0,46	0,45	0,61	0,62	0,67	0,79	0,78
P	0,40	0,63	0,53	0,58	0,38	0,39	0,46	0,86	0,83	0,76	0,17
S	0,55	0,69	0,68	0,82	0,07	0,16	0,69	1,00	0,68	0,59	0,60
I	0,59	0,45	0,42	0,28	0,48	0,30	0,62	0,78	0,78	0,94	0,86
R	0,22	0,22	0,55	0,31	0,11	0,25	0,29	0,52	0,47	0,08	0,06
<b>gWPI (DPSIR)</b>	<b>0,40</b>	<b>0,43</b>	<b>0,49</b>	<b>0,49</b>	<b>0,30</b>	<b>0,31</b>	<b>0,53</b>	<b>0,76</b>	<b>0,69</b>	<b>0,63</b>	<b>0,49</b>

Ocena kazalnika vodne revščine (gWPI) je bila za potrebe ocene prilagoditvene sposobnosti sistema izdelana na standardiziranih podatkovnih nizih parametrov sheme DPSIR za obdobje 2007-2017 po metodi utežene vsote. Zmanjševanje vrednosti gWPI (DPSIR) od 1 proti 0 govori o slabšanju razmer in vse večjem tveganju za pomanjkanje podzemne vode. Vrednost gWPI (DPSIR) je bila v obravnavanem obdobju v razponu od 0,30 do 0,76, s povprečjem 0,50 (Tabela 2,

sl. 5). K velikemu razponu največ prispevata parametra, ki opisujeta odziv (R) in stanje (S).

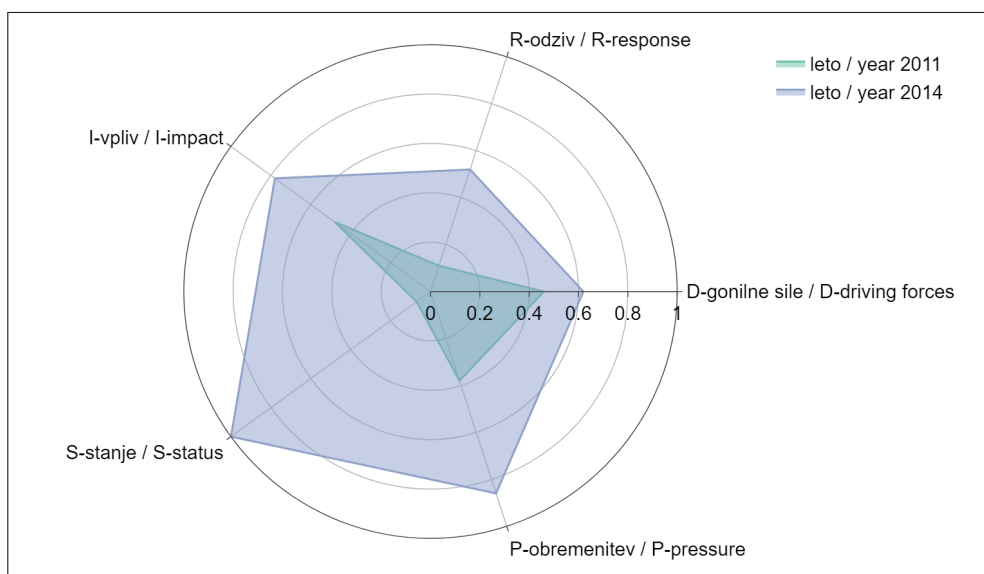
Najnižje vrednosti je kazalnik gWPI (DPSIR) dosegel v letu 2011, ko je bilo napajanje podzemne vode v Sloveniji 40 % pod povprečjem obdobja 1981-2010, najvišje vrednosti pa leta 2014, ko je bilo napajanje v Sloveniji 60 % nad omenjenim primerjalnim obdobjem povprečjem. V hidrološko sušnem letu 2011 se je stanje (S) podzemnih voda, predvsem zaradi manjšega napajanja,





Sl. 5. Napajanje podzemne vode, količinski stres in vrednost kazalnika gWPI (DPSIR) podzemne vode v Slovenijo v obdobju 2007-2017.

Fig. 5. Groundwater recharge, quantitative stress and gWPI (DPSIR) values for groundwaters in Slovenia in the period 2007-2017.



Sl. 6. Komponente DPSIR kazalnika gWPI podzemnih voda v Sloveniji v hidrološko sušnem letu 2011 in v hidrološko mokrem letu 2014.

Fig. 6. DPSIR components for groundwaters gWPI index in Slovenia in the hydrological drought year 2011 and in hydrological wet year 2014.

izrazito poslabšalo, ki pa mu ni sledilo povečanje odziva (R), vrednotenega preko izbranih parametrov vodne produktivnosti in višine investicij (sl. 6). Vrednosti kazalnika gWPI (DPSIR) smo zaradi nekaterih podatkovnih vrzeli regionalizirali preko vodnobilančnega modela in kazalnika vodnega stresa (Andjelov et al., 2016; Uhan & Andjelov, 2019), ki je izmed vseh petnajstih DPSIR kazalnikov korelacijsko najtesneje povezan s kazalnikom vodne revščine oz. vodne blaginje. Vpliv slabe prilagoditvene sposobnosti je najizrazitejši na najbolj obremenjenih ravninskih vodonosnikih z medzrnsko poroznostjo (Tabela 3). Povišano količinsko ranljivost podzemne vode v Sloveniji izkazuje le okoli 9 % ozemlja države. V skupino količinsko najbolj ranljivih podzemnih vodnih teles z visoko in srednje visoko ranljivostjo se v Sloveniji uvrščata VTPodV\_4016 Murska kotlina in VTPodV\_3012 Dravska kotlina, sledita pa VTPodV\_1001 Savska kotlina in Lju-

bljansko Barje ter VTPodV\_1002 Savinjska kotlina (Tabela 3, sl. 7).

Predstavljena ocena količinske ranljivosti podzemne vode na podnebno spremembo v Sloveniji temelji na rezultatih modelske vodnobilančne simulacije za obdobje 2021-2050 v letni časovni skali na celotnem območju države (Andjelov et al., 2016). Po tej simulaciji se največja odstopanja pričakuje v severovhodnem in jugozahodnem delu, prav na območjih z najmanj padavinami v državi. Na Goričkem naj bi se napajanje plitvih vodonosnikov zmanjšalo za 7 %, na Obali in Krašu z Brkini pa naj bi se glede na primerjalno obdobje 1981-2010 povečalo za 3,1 %.

Te ocene sicer nekoliko odstopajo od najnovejših predvidevanj, ki za severovzhodni predel Slovenije napovedujejo več padavin in povečanje napajanja (Dolinar, 2018), vendar so blizu ugotovitvam analiz meteoroloških podatkov o zmanjšanju višine padavin v obdobju 2061-2010

Tabela 3. Normalizirane in utežene vrednosti kazalnikov potencialnega vpliva podnebne spremembe in vpliva slabe prilagoditvene sposobnosti ter vsota uteženih normaliziranih vrednosti, kot skupna ocena količinske ranljivosti podzemne vode na podnebno spremembo teles podzemnih voda v Sloveniji.

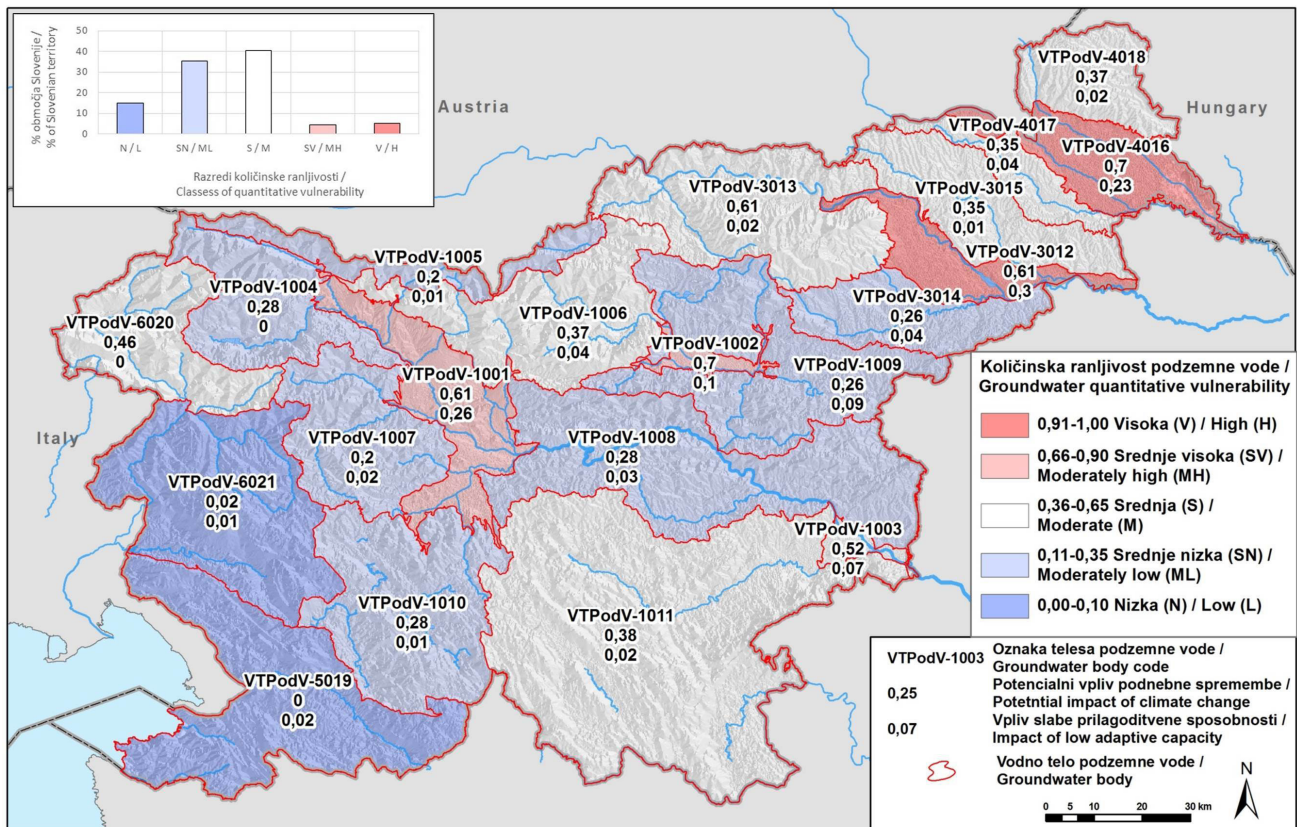
Table 3. Weighted normalized values for potential impact of climate change and impact of low adaptive capacity with the sums of weighted normalized values as a groundwater quantitative vulnerability assessment to climate change in Slovenia.

Vodno telo podzemne vode / Groundwater body	Potencialni vpliv podnebne spremembe / Potential impact of climate change		Vpliv slabe prilagoditvene sposobnosti / Impact of low adaptive capacity		Količinska ranljivost podzemne vode / Groundwater quantitative vulnerability
	Normalizirane vrednosti / Normalized values	Utežene normalizirane vrednosti / Weighted normalized values	Normalizirane vrednosti / Normalized values	Utežene normalizirane vrednosti / Weighted normalized values	Vsota uteženih normaliziranih vrednosti / Sum of weighted normalized values
VTPodV_1001 Savska kotlina in Ljubljansko Barje	0.88	0.61	0.85	0.26	
VTPodV_1002 Savinjska kotlina	1.00	0.70	0.32	0.10	0.80
VTPodV_1003 Krška kotlina	0.75	0.53	0.23	0.07	0.60
VTPodV_1004 Julijske Alpe v porečju Save	0.41	0.28	0.01	0.00	0.29
VTPodV_1005 Karavanke	0.28	0.20	0.02	0.01	0.20
VTPodV_1006 Kamniško-Savinjske Alpe	0.53	0.37	0.13	0.04	0.41
VTPodV_1007 Cerkljansko, Škofjeloško in Polhograjsko hribovje	0.28	0.20	0.06	0.02	0.21
VTPodV_1008 Posavsko hribovje do osrednje Sotle	0.41	0.28	0.11	0.03	0.32
VTPodV_1009 Spodnji del Savinje do Sotle	0.38	0.26	0.29	0.09	0.35
VTPodV_1010 Kraška Ljubljana	0.41	0.28	0.03	0.01	0.29
VTPodV_1011 Dolenjski kras	0.54	0.38	0.06	0.02	0.39
VTPodV_3012 Dravska kotlina	0.88	0.61	1.00	0.30	0.91
VTPodV_3013 Vzhodne Alpe	0.88	0.61	0.07	0.02	0.63
VTPodV_3014 Haloze in Dravinjske gorice	0.38	0.26	0.15	0.04	0.31
VTPodV_3015 Zahodne Slovenske gorice	0.50	0.35	0.03	0.01	0.36
VTPodV_4016 Murska kotlina	1.00	0.70	0.77	0.23	0.93
VTPodV_4017 Vzhodne Slovenske gorice	0.50	0.35	0.13	0.04	0.39
VTPodV_4018 Goričko	0.53	0.37	0.06	0.02	0.39
VTPodV_5019 Obala in Kras z Brkini	0.00	0.00	0.06	0.02	0.02
VTPodV_6020 Julijske Alpe v porečju Soče	0.66	0.46	0.00	0.00	0.46
VTPodV_6021 Goriška brda in Trnovsko-Banjska planota	0.03	0.02	0.03	0.01	0.03

(Vertačnik & Bertalanič, 2017) in modelskim vodnobilančnim analizam med obdobjema 1971-2000 in 1981-2010, ki so pokazale zmanjšanje letnega napajanja plitvih vodonosnikov za okoli 5 % (Andjelov et al., 2014). Rezultati modelske vodnobilančne simulacije za obdobje 2021-2050 v letni časovni skali na celotnem območju države temeljijo na upoštevanju mediane višine pa-

davin in potencialne evapotranspiracije iz ansambelskih napovedi podnebne spremembe za obdobje 2021-2051 (Andjelov et al., 2016). Rezultate omenjene modelske simulacije prevzema tudi Načrt upravljanja voda v Sloveniji za obdobje 2016-2021 (MOP, 2016).

Za oceno potencialnega vpliva podnebne spremembe na napajanje teles podzemnih voda smo



Sl. 7. Količinska ranljivost podzemne vode na podnebno spremembo v Sloveniji za obdobje 2021-2051.  
Fig. 7. Groundwater quantitative vulnerability to climate change in Slovenia for the period 2021-2051.

oceno izpostavljenosti uteženo vrednotili v luči občutljivosti, ki jo v tej analizi predstavljata parametra regionalne ocene hidravlične prepustnosti vodonosnikov in izkoristljivosti podzemne vode. Zaradi razmeroma velike prepustnosti in velike izkoristljivosti se kot najbolj občutljiva območja izkazujejo plitvi aluvialni vodonosniki z medzrnsko poroznostjo, kjer so lahko potencialni vplivi podnebne spremembe na napajanje zaradi teh hidrogeoloških lastnosti vodonosnikov najvišji. Pričakovane količinske spremembe podzemne vode do leta 2050 na teh območjih presegajo količine, ki so potrebne za ohranjanje kopenskih ekosistemov (Janža et al., 2017) in predstavljajo zaznaven delež povprečnega letnega odvzema podzemne vode (Uhan & Andjelov, 2019).

Končna ocena količinske ranljivosti v predstavljeni analizi upošteva tudi prilagoditveno sposobnost sistema, ki je preko petnajstih parametrov sheme DPSIR ocenjena s kazalnikom vodne revščine gWPI. Izbor parametrov DPSIR močno omejuje razpoložljivost podatkov, od katerih se večinoma zbira in prikazuje po prostorskih enotah statističnih regij ali občin in ne po vodnih telesih, ki so osnovne prostorske enote načrtovanja in upravljanja voda. Izbor parametrov o odzivih bi v prihodnje moral vključevati tudi informacije

o porabi sredstev sklada za podnebne spremembe in sklada za vode. Vpliv subjektivnosti je v tem delu analize izrazit tudi v analitičnem hierarhičnem procesu ekspertnega presojanja pomena posameznih parametrov za oceno kazalnika vodne revščine, ki smo ga z upoštevanjem entropije podatkov poskušali dodatno zmanjšati, vendar je potrebno biti pri interpretaciji končnih rezultatov dodatno pozoren prav na ta vir negotovosti, ki bo terjal posebno skrb tudi v nadaljnjih analizah.

Končna ocena količinske ranljivosti podzemne vode na podnebno spremembo kaže na dve izstopajoči vodni telesi: VTPodV\_4016 Murska kotlina in VTPodV\_3012 Dravska kotlina. Murska kotlina izstopa že po visoki oceni potencialnega vpliva, medtem ko je Dravska kotlina izstopajoča tudi po slabi prilagoditveni sposobnosti. Klasificiranje kazalnika količinske ranljivosti podzemne vode pokaže, da se v skupino visoke in zelo visoke ranljivosti uvrščajo štiri telesa podzemne vode: poleg VTPodV\_4016 Murska kotlina in VTPodV\_3012 Dravska kotlina še VTPodV\_1001 Savska kotlina in Ljubljansko Barje in VTPodV\_1002 Savinjska kotlina, katerih skupna površina ne presega 10 % državnega ozemlja.

## Sklep

Sprememba podnebja bo s spremembo temperature zraka in višine padavin nedvomno zaznavno vplivala tudi na vodni krog. Poznavanje količinske ranljivosti podzemne vode so zaradi pomena podzemnih vodnih virov za oskrbo prebivalstva s pitno vodo ene od ključnih izhodišč načrtovanja upravljanja voda. Prvi poskus tovrstne ocene vpliva podnebne spremembe na količino letnega napajanja plitvih vodonosnikov posameznih teles podzemnih voda v Sloveniji ob nekaterih podatkovnih vrzelih odkriva razmerna veliko prostorsko spremenljivost količinske ranljivosti. S povišano stopnjo količinske ranljivosti izstopajo štiri vodna telesa z okoli 9 % državnega ozemlja, ki zagotavljajo 45 % vodnih količin za oskrbo prebivalstva s pitno vodo. Med temi štirimi telesi je stopnja izkoriščenosti podzemnih voda oz. količinski stres največji v Murski in Dravski kotlini. Pričakovane količinske spremembe do leta 2050 predstavljajo v teh vodnih telesih več kot četrtino povprečnega letnega odvzema podzemne vode. Iz gledišča letne vodne bilance po posameznih vodnih telesih omenjena predvidevanja ne bi smela biti zaskrbljujoča, vendar pa se moramo zavedati velike sezonske spremenljivosti količinskega obnavljanja vodonosnikov, ki lahko občasno in lokalno ogrozi tudi količinsko varnost oskrbe s pitno vodo v državi.

Ob tej prvi oceni količinske ranljivosti teles podzemne vode v Sloveniji je potrebno opozoriti predvsem na dve področji možnih oz. potrebnih izboljšav v nadaljevanju raziskav. Prvo priporočilo je s področja ocene potencialnih vplivov, ki se v tej raziskavi osredotoča le na spremembo letne višine padavin, ne analizira pa spremembe drugih parametrov podnebja, ki bi še lahko vplivali na spremembo napajanja vodonosnikov: intenziteta padavin, višina snežne odeje itd. Čeprav nekatere raziskave na posameznih območjih ne nakazujejo velikega pomena tem spremembam, bi kljub temu veljalo v prihodnje analize količinske ranljivosti vključiti tudi ostale podnebne parametre in jih skupno analizirati v podrobnejši časovni in prostorski skali. Nadaljnje raziskave količinske ranljivosti podzemne vode naj bi bile usmerjene predvsem v podrobnejšo sezonsko analizo obdobja z najmanjšim napajanjem vodonosnikov in največjo potrebo po podzemni vodi. Drugo priporočilo pa se nanaša na oceno prilagoditvene sposobnosti na podnebne spremembe, kjer je nedvomno potrebna sistemska sprememba pri definiranju za upravljanje voda pomembnih parametrov in zbiranju ter obdelovanju podatkov na ravni osnovnih prostorskih enot upravljanja

voda (Direktiva 2000/60/ES), na vodnih telesih podzemnih voda in ne na nivoju statističnih regij ali upravnih enot.

## Zahvala

Prve ocene izpostavljenosti podzemnih voda na podnebno spremembo v Sloveniji temeljijo na številnih simulacijah regionalnega vodno-bilančnega modela GROWA-SI, ki je rezultat nemško-slovenskega raziskovalnega projekta med Agencijo Republike Slovenije za okolje in Forschungszentrum Jülich. Ključno vlogo pri prenosu tega regionalnega modela v slovenski prostor je imel nemški raziskovalec prof. dr. Frank Wendland. Avtorja članka se za njegovo dolgoletno odlično sodelovanje iskreno zahvaljujeta.

## Reference

- Andjelov, M., Wendland, F., Mikulič, Z., Tetzlaff, B., Uhan, J. & Dolinar, M. 2014: Regional water balance modelling by GROWA in Slovenia. In: Dorner, W., Marquardt, A. & Schröder, U. (eds.): Bridging the sciences - crossing borders: Danube Conference 2014: proceedings. XXVI Conference of the danubian countries on hydrological forecasting and hydrological bases of water management, 22-24 September 2014, Deggendorf, Germany. Deggendorf: Deggendorf Institute of Technology: 161-164.
- 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.
- Aslam, R.A., Shrestha, S. & Pandey, V.P. 2018: Groundwater vulnerability to climate change: A review of the assessment methodology. *Science of The Total Environment*, 612: 853-875. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.237>
- Čenčur Curk, B., Cheval, S., Vrhovnik, P., Verbovšek, T., Herrnegger, M., Nachtnebel, H., Marjanovic, P., Siegel, H., Gerhardt, E., Hochbichler, E., Koeck, R., Kuschnig, G., Senoner, T., Wesemann, J., Hochleitner, M., Rožič, P., Brenčič, M., Zupančič, N., Bračič Železnik, B. & Milanović, S. 2014: CC-WARE Mitigating Vulnerability of Water Resources under Climate Change, WP3 - Vulnerability of Water Resources in SEE: 82 p.
- Damm, J.U., Wittenberg, A., Wurl, C., Ladage, S., Stück, H., Knopf, S., Jähne-Klingberg, F., Broda, S., Pflanz, D., Kuhn, T., Sievers, H.

- & Maul, A. 2018: Das europäische Netzwerk GeoERA: Aktueller Stand, Perspektiven und die Beteiligung der BGR und des LBEG an den Fach-Projekten. TACTIC - Tools for Assessment of Climate change Impact on groundwater and adaptation Strategies. Hauskolloquium 11.12.2018. Internet: [https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Zusammenarbeit/BGR-Europa/GeoERA/2018-12-11-hauskolloquium.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=1](https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Zusammenarbeit/BGR-Europa/GeoERA/2018-12-11-hauskolloquium.pdf?__blob=publicationFile&v=1) (15.4.2020)
- Diakoulaki, D., Mavrotas, G. & Papayannakis, L. 1995: Determining objective weights in multiple criteria problems: The CRITIC method. *Computers Ops Res.*, 22/7: 763-770.
- Dolinar, M. (ur.) 2018: Ocena podnebnih sprememb v Sloveniji do konca 21. stoletja. Sintezno poročilo – prvi del. Agencija RS za okolje, Ljubljana: 156 p.
- Döll, P. & Flörke, M. 2005: Global-Scale Estimation of Diffuse Groundwater Recharge. Frankfurt Hydrology Paper 03, Institute of Physical Geography, Frankfurt University: 21 p.
- Döll, P. 2009: Vulnerability to the impact of climate change on renewable groundwater resources: a global-scale assessment. *Environ. Res. Lett.*, 4/3: 035006: 12 p. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/4/3/035006>
- Eckhardt, K. & Ulbrich, U. 2003: Potential impacts of climate change on groundwater recharge and streamflow in a central European low mountain range. *Journal of Hydrology*, 284/1-4: 244-252. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2003.08.005>
- 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.
- Goepel, K.D. 2013: Implementing the Analytic Hierarchy Process as a Standard Method for Multi-Criteria Decision Making In Corporate Enterprises – A New AHP Excel Template with Multiple Inputs. *Proceedings of the International Symposium on the Analytic Hierarchy Process 2013*: 1-10.
- Hinsby, K., Gourcy, L., Broers, H.P., Anker, L., Højberg, A.L. & Bianchi, M. 2020: Integrated and sustainable management of subsurface resources - Introducing the contributions of the four GeoERA groundwater projects to the European Geological Data Infrastructure. EGU General Assembly, 2020-4253. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-4253>
- Hölbling, C., Broda, S., Chiffard, P., Pflanz, D. & Reichling, J. 2018: Assessing groundwater vulnerability to climate change using an index based approach. *GeoBoon2018 – Living Earth, Abstract book*: 155 p.
- IPCC, 2007: Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge: 976 p.
- Janža, M., Šram, D. & Mezga, K. 2017: Pomen ekosistemov, odvisnih od podzemne vode pri določitvi količinskega stanja podzemnih voda v Sloveniji. In: Globevnik, L. & Širca, A. (eds.): Zbornik. Drugi slovenski kongres o vodah 2017, [19. in 20. april 2017, Podčetrtek]. Ljubljana: SLOCOLD - Slovenski nacionalni komite za velike pregrade: DVS - Društvo vodarjev Slovenije, 310-315.
- Kajfež-Bogataj, L., Bergant, K., Zupančič, B., Črepinšek, Z., Matajč, I., Leskošek, M., Gomboc, S., Robič, D., Bizjak, A., Rogelj, D., Uhan, J., Skoberne, P., Cegnar, T. & Hočevar, A. 1999: Ocena ranljivosti in strategija prilagoditve ekosistemov na spremembo podnebja v Sloveniji. Biotehniška fakulteta, Oddelek za agronomijo: Ministrstvo za okolje in prostor: Hidrometeorološki zavod Republike Slovenije.
- Li, Y.-P. & Zhang, X. 2017: Research on Comprehensive Decision Model Based on Analytic Hierarchy Process and Entropy Method. 3rd Annual International Conference on Modern Education and Social Science (MESS 2017): 19-23.
- Liu, W., Sun, C., Zhao, M. & Wu, Y. 2019: Application of a DPSIR Modeling Framework to Assess Spatial-Temporal Differences of Water Poverty in China. *Journal of the American Water Resources Association*, 55/1: 259-273. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12724>
- MOP 2016: Načrt upravljanja voda na vodnem območju Donave za obdobje 2016-2021, Ministrstvo za okolje in prostor, Ljubljana: 287 p.
- Nistor, M.-M., Dezsi, S., Cheval, S. & Baciuc, M. 2016: Climate change effects on groundwater resources: a new assessment method through climate indices and effective precipitation in Belis district, Western Carpathians. *Meteorol. Appl.* 23: 554-561. <https://doi.org/10.1002/met.1578>

- Nistor, M.M. 2019; Vulnerability of groundwater resources under climate change in the Pannonian basin. *Geo-spatial Information Science*, 22/4: 345-358, <https://doi.org/10.1080/10095020.2019.1613776>
- Paradiž, B., & Kranjc, A. 2002: Slovenias first national communication under the UN framework convention on climate change. Republic of Slovenia, Ministry of the environment, spatial planning and energy, Ljubljana: 90 p.
- Prestor, J., Urbanc, J., Janža, M., Meglič, P., Šinigoj, J., Hribernik, K., Komac, M., Strojani, M., Bizjak, M., Feguš, B., Brenčič, M., Krivic, M., Kumelj, Š., Požar, M., Hötzl, M., Sušnik, A., Benčina, D., Krajnc, M. & Gacin, M. 2006: Nacionalna baza hidrogeoloških podatkov za opredelitev teles podzemne vode Republike Slovenije. Poročilo, Geološki zavod Slovenije, Ljubljana: 61 p. Internet: <http://www.istra-hidro.eu/web/images/3-metodologija.pdf>
- Saaty, L. 1980: *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill, 287 p.
- Schröter, D., Metzger, M.J., Cramer, W. & Leemans, R. 2004: Vulnerability assessment. Analysing the human-environment system in the face of global environmental change. *ESS Bulletin*, 2/2: 11-17.
- Shannon, C.E. 1948: A mathematical theory of communication. *The Bell System Technical Journal*, 27: 379-423.
- Smeets, E. & Weterings, R. 1999: Environmental indicators: Typology and overview. European Environment Agenc, Technical report: 25: 19 p.
- Sullivan, C. 2002: Calculating a Water Poverty Index. *World Development*, 30/7: 1195-1210. [https://doi.org/10.1016/S0305-750X\(02\)00035-9](https://doi.org/10.1016/S0305-750X(02)00035-9)
- Struckmeier, W.F. & Margat, J. 1995: Hydrogeological maps: a guide and a standard legend. *International Association of Hydrogeologists*, Hannover, 17: 177 p.
- Uhan, J. & Andjelov, M. 2019: Ocena doseganja trajnostnih ciljev z vidika upravljanja in varovanja podzemnih voda v Sloveniji. *Geologija*, 62/2: 267-278. <https://doi.org/10.5474/geologija.2019.013>
- van der Linden, P. & Mitchell, J.F.B. (eds.) 2009: ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project. Met Office Hadley Centre, FitzRoy Road, Exeter: 160 p.
- Vertačnik, G. & Bertalanič, R. 2017: Podnebna spremenljivost Slovenije v obdobju 1961-2011. 3. Značilnosti podnebja v Sloveniji. Ljubljana: Ministrstvo za okolje in prostor, Agencija RS za okolje: 197 p.