



Analiza nihanja gladine podzemne vode na območju plitvih aluvialnih vodonosnikov Pomurja v SV Sloveniji

Groundwater level oscillation analysis in shallow alluvial aquifers in Pomurje, NE Slovenia

Urška PAVLIČ & Petra SOUVENT

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

Prejeto / Received 19. 6. 2019; Sprejeto / Accepted 1. 7. 2021; Objavljeno na spletu / Published online 19. 7. 2021

Ključne besede: Gladina podzemne vode, aluvialni vodonosniki, clusterska analiza, analiza percentilov, časovne vrste, analiza trendov, analiza sekvenčnih trendov, Pomurje

Key words: Groundwater level, alluvial aquifers, cluster analysis, percentile analysis, time series, trend analysis, sequential trend analysis, Pomurje, Slovenia

Izvleček

Sistematično spremljanje gladin podzemne vode na državni ravni v Sloveniji poteka že od leta 1952. Analiza dolgoletnih podatkov gladin podzemne vode nam omogoča ugotavljanje posebnosti in sprememb v nihanju gladine podzemne vode v prostoru in času. V članku z uporabo različnih statističnih analiz značilnih mesečnih gladin podzemne vode ugotavljamo, kaj nam dolgoletni podatkovni nizi nihanja podzemne vode razkrivajo o vodonosnikih vodnega telesa podzemne vode Murska kotlina. Na podlagi rezultatov uporabljenih metod zaključimo, da se v nihanju gladine podzemne vode Pomurja odražajo kompleksni dejavniki, ki imajo mestoma izvor v naravnih vplivih napajanja in praznjenja vodonosnika, mestoma pa v človeških posegih v prostor. Z metodo percentilnih analiz v kombinaciji s clustersko analizo smo določili območja s sorodnim nihanjem gladine podzemne vode, z dolgoročnimi trendi mesečnih gladin podzemne vode pa smo se opredelili do povezave med nihanjem vodnih količin in podnebnimi značilnostmi raziskovanega ozemlja. Poleg naravnih, smo z metodo trendov nihanja gladin podzemne vode, izdvojili nekatera območja z izkazanim antropogenim vplivom na vodno telo podzemne vode.

Abstract

Systematic hydrologic monitoring of groundwater quantity at the national level in Slovenia has been ongoing since 1952. An insight into long-term groundwater level data enables us to delineate parts of aquifers with similar groundwater level oscillation properties as well as to identify changes of those properties in time. We used variety of statistical methods to identify long-term behaviour of groundwater level oscillation of groundwater body (GWB) Murska kotlina. Results showed that fluctuation of groundwater level in time reflect complex set of events that originate in natural or anthropogenic interferences. Using percentile analysis in combination with cluster analysis, we were able to isolate areas with a related groundwater fluctuation. Results of long-term data trends analyses of monthly groundwater level showed the impact of the research area climate on long-term and seasonal groundwater level fluctuation. In addition to natural causes, by performing trend analysis on groundwater level data, we were able identify some human induced interventions into the environment made in the past.

Uvod

»Meriti pomeni vedeti«, je menil že Lord Kelvin (1883). Podatki o gladinah podzemne vode predstavljajo osnovni vir informacije o količinah podzemne vode, hidroloških pritiskih, ki se izvajajo na vodonosnik, in o tem, kako ti pritiski vplivajo na napajanje, uskladičenje in odtok podzemne vode. Dolgoročne sistematične meritve gladine podzemne vode zagotavljajo osnovne informacije za oceno sprememb vodnih virov v

času, za razvoj analitičnih in numeričnih modelov toka podzemne vode, za napoved trendov ter za načrtovanje, vpeljavo in spremljanje učinkovitosti upravljanja z vodami in pripravo programov zaščite podzemne vode (Taylor & Alley, 2001).

Podzemna voda je le del vodnega kroga, katere količina se lahko v času spreminja. Za natančno prepoznavo vzrokov, ki so povzročili spremembe v količinah podzemne vode, so potrebne temeljite lokalne raziskave vodnega okolja. Pred izvedbo natančnih hidrogeoloških raziskav, usmerjenih

v zasledovanje ciljev, povezanih z ugotavljanjem količinskega stanja podzemne vode na lokalni ravni, je smiselna predhodna analiza razpoložljivih podatkov časovnih vrst državnega monitoringa količinskega stanja podzemne vode. Državna zbirka hidroloških podatkov nam zaradi dolgega opazovalnega niza meritev na merilnih lokacijah nudi vpogled v razmere v vodonosnikih tako v času kot tudi v prostoru.

Območje Pomurja je bilo zaradi razmeroma nizke globine do podzemne vode med prvimi v državi, kjer je bil vzpostavljen sistematični državni monitoring količin podzemne vode, v letu 1952 se je na Prekmurskem polju opazovalo gladino podzemne vode na 16 lokacijah. Opazovanja so bila ročna vse do leta 1970, ko so se pričela leta nadomeščati z limnigrafskimi meritvami, v letu 2000 pa z avtomatskimi podatkovnimi zapisovalci, ki predstavljajo prevladujoč način zapisovanja meritev tudi danes.

Namen raziskav prispevka je bila preveritev, ali nam lahko državna baza merjenih hidroloških in hidrogeoloških podatkov Agencije RS za okolje na območju plitvih aluvialnih vodonosnikov Pomurja, ob uporabi izbranih metodoloških pristopov, nudi vpogled v časovno dinamiko nihanja gladin podzemne vode na posameznih merilnih območjih in ali je ta dinamika primerljiva med merilnimi postajami. Na podlagi analize trendov gladin podzemne vode smo v nadaljevanju želeli preveriti, ali na območju Pomurja prihaja do dolgoročnih sprememb gibanja gladin podzemne vode ter se na podlagi rezultatov skušali opredeliti do vzroka teh sprememb.

Raziskovano območje

Raziskovano območje predstavljajo plitvi kvartarni prodno peščeni vodonosniki ob Muri, ki so zajeti v vodnem telesu podzemne vode (VTPodV) Murska kotlina (Uradni list RS, št. 63/2005). VTPodV Murska kotlina leži v SV delu Slovenije in s svojimi 591 km² pripada tektonski enoti Panonskega bazena. Območje tega vodnega telesa zajema celotno prekmursko nižino med Goričkim, Lendavskimi in Slovenskimi gorami. Pod zgornjimi vodonosniki se nahajajo še vodonosniki v terciarnih sedimentih, pod tem pa termalni vodonosniki v globljih terciarnih sedimentih in predterciarni podlagi (Prestor et al., 2005).

Območje Pomurja je bilo v preteklosti skoraj v celoti zamočvirjeno in gozdnato, prepleteno s številnimi vodotoki, ki so jih v 18. stoletju začeli sistematično regulirati in tako posredno osuševati zemljišča za začetek kmetijstva (Novak,

2009). Večino območja nad vodonosnikom prekrivajo kmetijske površine.

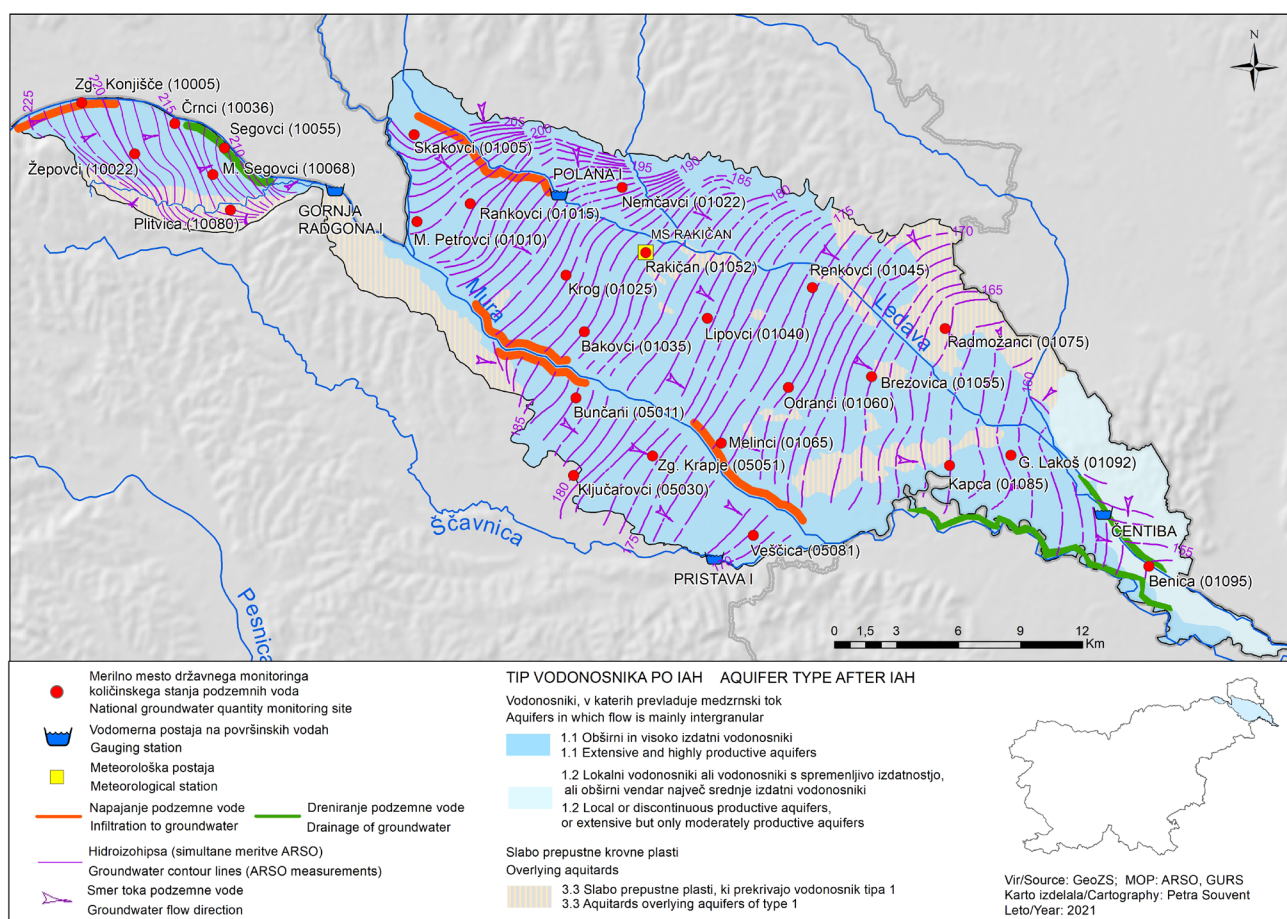
Sistematične hidrogeološke raziskave na območju plitvih vodonosnikov Pomurja segajo v sedemdeseta leta prejšnjega stoletja, ko je bila podana hidrogeološka slika ozemlja, ocenjena prepustnost in izdatnost vodonosnikov ter vodna bilanca (Drobne, 1974). V začetku osemdesetih let so se hidrogeološke raziskave na obravnavanem območju izvajale predvsem z namenom zagotavljanja oskrbe s pitno vodo in raziskav za melioracije Ledave (Drobne, 1983; Meden, 1981). Karta gladin podzemne vode širšega raziskovanega območja je bila izdelana v okviru simultanih meritev na Hidrometeorološkem Zavodu Ljubljana (Savić, 1992). V sklopu nacionalne baze hidrogeoloških podatkov za opredelitev teles podzemne vode v RS je bil izdelan konceptualni model vodnega telesa podzemne vode Murska kotlina (Prestor et al., 2005). Z namenom ureditve celovite oskrbe prebivalstva s pitno vodo in varovanja vodnih virov v Pomurju so bile izvedene obsežne hidrogeološke raziskave in strokovne podlage za območji vodonosnikov Mursko polje in Dolinsko Ravensko (Petauer et al., 2007). Z namenom določanja modelskih izhodiščnih količin podzemne vode na območju vodnega telesa Murska kotlina in oceno medsebojnih vplivov med porabniki podzemne vode je bil za raziskovano ozemlje izdelan stacionarni numerični model toka podzemne vode (Vižintin et al., 2011; Vižintin et al., 2014). Za Apaško polje je bila izdelana analiza vpliva nizkega vodnega stanja reke Mure in podzemnih voda Apaškega polja na količinske in kakovostne parametre črpališča Podgrad (Feguš & Golnar, 2012). S podrobnim hidrogeološkim kartiranjem med Goričkim in Prekmurskim poljem je bila opredeljena karta gladin podzemne vode in določene smeri njenega toka (Koren et al., 2015).

Plitvi vodonosniki obravnavanega vodnega telesa podzemne vode sestavljajo pretežno odprti vodonosniki kvartarne starosti (njeno obrobje pa tudi miocenski, pliocenski in pliokvartarni sedimenti in kamnine), ki so nastali s peščeno prodnimi nanosi reke Mure in njenih pritokov (Plitvica, Kučnica, Ledava s pritoki, Bukovnica, Kobiljski potok, Ščavnica) (Prestor et al., 2005). Glavni vir napajanja podzemne vode so padavine (srednja letna višina padavin obdobja 1981-2010 je 798 mm), dotok površinskih vod z območja Slovenskih in Lendavskih gor, Goričkega ter površinski vodotoki, predvsem reka Mura. Podlago kvartarnega zasipa gradijo pliocenski sedimenti, ki so po svoji sestavi za vodo zelo slabo prepustni.

Vodonosniki so prekriti z različno debelo plastjo gline, melja in peska, ki je ponekod skoraj odnešana, drugod pa preseže debelino 2 m, na severnem robu pa je debelina tudi do 7 m. Ta, v večjem delu plitev pokrov, tanjši od 2 m, je za vodo slabo do zelo slabo prepusten, koeficient prepustnosti teh sedimentov znaša med $1 \cdot 10^{-6}$ in $1 \cdot 10^{-8}$ m/s (Petauer et al., 2007). Hidrodinamične značilnosti vodonosnika vplivajo na režim napajanja in praznjenja vodonosnika, kar vpliva tudi na kemijsko stanje podzemne vode, ki se v prostoru spreminja (Gacín, 2015). Koeficient prepustnosti visoke Murske terase na Mursko-Ljutomerskem polju znaša med $1 \cdot 10^{-5}$ in $1 \cdot 10^{-3}$ m/s, nizke Murske terase pa med $2 \cdot 10^{-3}$ in $8 \cdot 10^{-3}$ m/s. Prepustnost vodonosnika Dolinsko Ravenskega je velikostnega reda $3 \cdot 10^{-3}$ in se nekoliko spreminja glede na lokacijo (Petauer et al., 2007). Prodni nasip Mure je na severovzhodnem delu debel približno 5 m ter se pravokotno

na Muro debeli do 8 m, na meji z Goričkim izklini, na jugovzhodu pa se debelina vodonosnika poveča na preko 11 metrov (Kralj, 1979).

Iz karte gladin podzemne vode izvedene s simultanimi meritvami vodnih gladin v letu 1992 (Savić, 1992) je razvidno, da na severnem in severovzhodnem obrobju vodnega telesa in na jugovzhodnem robu polja na območju dotokov z Lendavskih gorc podzemna voda vodonosnika Dolinsko Ravenskega teče v smeri proti jugu oziroma jugovzhodu (sl. 1). Na severnem delu se vodonosnik napaja z Goričkima, vendar so količine glede na prostorsko porazdelitev gladine podzemne vode relativno majhne (Koren et al., 2015). Na podlagi stacionarnega numeričnega modela toka podzemne vode je bil delež dotoka iz zaledja Goričkima in Lendavskih gorc ocenjen na $0,26 \text{ m}^3/\text{s}$ (Vižintin et al., 2014). Primerljiv delež dotoka vode v modelu je bil določen tudi za ob-



Sl. 1. Hidrogeološka karta raziskovanega ozemlja z lokacijami merilnih mest, uporabljenih v analizah. Prostorski podatkovni sloji na karti in njihovi viri: Merilna mesta državnega monitoringa količinskega stanja podzemnih voda, vodomerne postaje na površinskih vodah in meteorološka postaja (MOP-ARSO); napajanje/dreniranje podzemne vode, hidroizohipse in smer toka podzemne vode (MOP-ARSO simultane meritve avgust-september 1992; Savić 1992), tip vodonosnika IAH (GeoZS), kartografska podlaga in rečna mreža (MOP-GURS).

Fig. 1. Hydrogeological map of research area with monitoring sites included in the analyses. Spatial data on the map and their sources: national groundwater quantity monitoring sites, gauging stations and meteorological station (Ministry of the Environment and Spatial Planning-Slovenian Environment Agency); infiltration to/drainage of groundwater, groundwater contour lines and flow direction (Ministry of the Environment and Spatial Planning-Slovenian Environment Agency measurements; Savić, 1992); aquifer type after IAH (Geological Survey of Slovenia); base map and river network (Ministry of the Environment and Spatial Planning-Surveying and Mapping Authority).

močje severozahodnega dela Prekmurskega polja na območju Kučnice. V osrednjem in južnem delu polja prevladuje smer toka podzemne vode od zahoda, severozahoda proti vzhodu, jugovzhodu, skoraj vzporedno s tokom Mure (Savić, 1992). V iztočnem, jugovzhodnem delu vodonosnika med Kapco in Benico podzemna voda konvergira proti vodotokoma Ledave in Mure, v katera se podzemna voda tudi izteka. Na zahodnem robu vodonosnika Mursko-Ljutomerskega polja, na mejnem območju s Slovenskimi goricami, je prevladujoča smer toka podzemne vode od zahoda proti vzhodu. V osrednjem delu polja podzemna voda teče v smeri od severozahoda proti jugovzhodu, vzporedno z reko Muro. To smer zadrži do jugovzhodnega roba polja do meje z Muro in Ščavnico. Tok podzemne vode na Apaškem polju poteka na severnem vtočnem delu v smeri toka reke Mure od zahoda, jugozahoda proti vzhodu, severovzhodu. Podobna smer prevladuje tudi v osrednjem delu polja, na severovzhodnem, iztočnem robu polja pa se tok podzemne vode usmeri od jugozahoda proti severovzhodu. Južni rob vodonosnika napajajo vode iz prispevnega zaledja Slovenskih goric, zaradi česar v tem delu prevladuje smer toka podzemne vode od juga proti severu (sl. 1).

Reka Mura pomembno prispeva h količinskemu stanju podzemne vode na območju VTPodV Murska kotlina. Na pretočni režim reke Mure vpliva taljenje snega iz visokogorskega prispevnega zaledja, zato ima ta reka izrazit višek pretokov v maju in izrazit nižek v januarju. Kljub temu ima Mura v zadnjih desetletjih vse višje tudi jesenske vode (Bat et al., 2008). Mura drenira prodno peščen vodonosnik Prekmurskega polja med Petanjci in Bakovci, med Hrastjem in

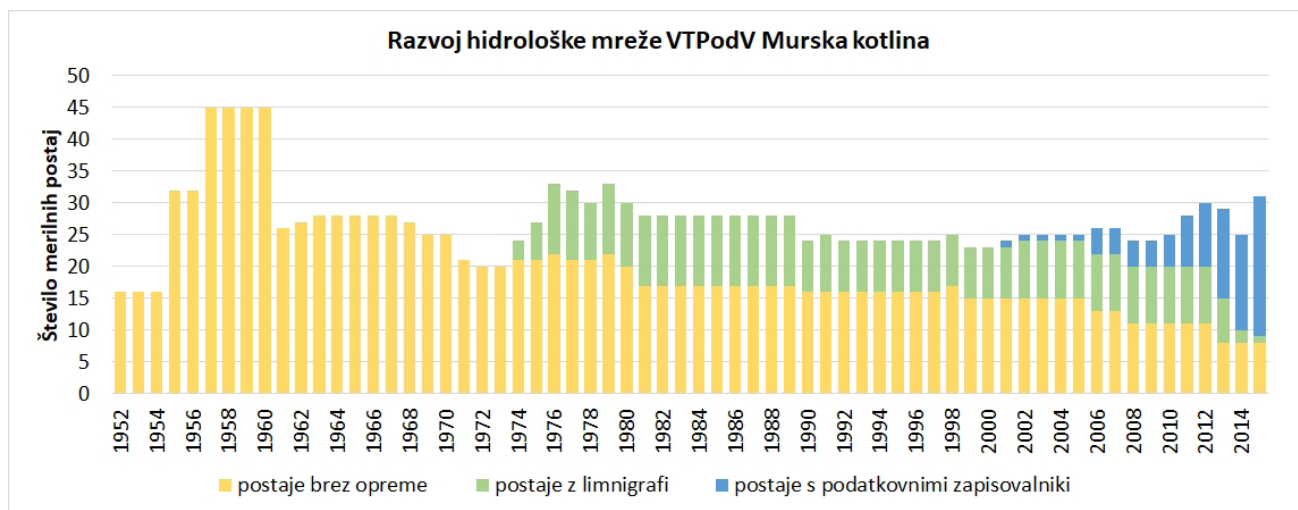
Babičevim mlinom pri Veržeju ter med Hotizo in Mursko šumo. Mura napaja vodonosnik Prekmurskega polja med Melinci in Dolnjo Bistrico (Vižintin et al., 2011). Ledava napaja vodonosnik Prekmurskega polja med Skakovci in Polano in drenira vodonosnik med Lendavo in Pincami na levem bregu Ledave med reko in Lendavskimi goricami (Vižintin et al., 2011).

Ocena količinskega stanja podzemne vode VTPodV Murska kotlina, izvedena za potrebe načrta upravljanja z vodami, je pokazala, da sodi VTPodV Murska kotlina glede na rabo vode med bolj obremenjena v državi (Andjelov in sod., 2021). Razmerje med povprečnimi letnimi količinami črpanja podzemne vode glede na evidenco vodnih povračil Direkcije RS za vode v obdobju 2014 – 2019 in razpoložljivo količino podzemne vode ocenjeno z regionalnim vodnobilančnim modelom GROWA-SI za obdobje 1991–2020 v tem vodnem telesu znaša okrog 21 % in je tretje najvišje v državi.

Vhodni podatki

Vsi podatki v članku, ki smo jih uporabili v analizah, so iz zbirke javnih podatkov državnega monitoringa, s katerim upravlja Agencija Republike Slovenije za okolje. Državni hidrološki monitoring gladin podzemne vode se izvaja v zgornjih, plitvih aluvialnih vodonosnikih VTPodV Murska kotlina.

Temelji sistematičnega izvajanja hidrološkega monitoringa podzemnih voda v Sloveniji segajo v 50. leta prejšnjega stoletja, ko je bila izdana Odredba o ustanovitvi Uprave hidrometeorološke službe pri tedanji vladi Ljudske Republike Slovenije. S tem so bili postavljeni temelji za hidrološko dejavnost, na katero je vplivalo predvsem



Sl. 2. Razvoj hidrološke mreže na območju VTPodV Murska kotlina.

Fig. 2. Development of groundwater monitoring network on GWB Murska kotlina.

varstvo naselij pred vodnimi ujmami, izraba vodne energije in kompleksno vodno gospodarstvo. Na raziskovanem ozemlju s podatki razpolagamo od leta 1952 dalje, ko je na območju Prekmurskega polja oz. vodonosnika Dolinsko Ravenskega delovalo 16 merilnih postaj. Sprva so bile meritve ročne, opazovalec je enkrat na dan oziroma nekajkrat na teden ali mesec na merilnem traku izmeril ali na števnici napravil odčitano globino do podzemne vode. Leta 1974 so se ročne meritve pričele dopolnjevati z limnigrafskimi, s čimer se je na papir zvezno izrisoval nivogram, leta 2001 pa so pričeli delovati prvi digitalni podatkovni zapisovalniki (sl. 2). Z uvedbo merjenja gladine podzemne vode z limnigrafii in podatkovnimi zapisovalniki se je informativna vrednost podatkov izboljšala predvsem zaradi povečane frekvence meritev. Natančnost meritev se je s časom mestoma povečevala tudi z izgradnjo namenskih opazovalnih objektov monitoringa stanja podzemne vode, ki se je na območju vodonosnikov Pomurja pričelo leta 2009.

Na Agenciji RS za okolje (v nadaljevanju ARSO) je bil tako v preteklosti kot je tudi danes velik poudarek monitoringa namenjen zagotavljanju kakovosti meritev, kar zagotavlja visoko stopnjo zaupanja v podatke. Za izvajanje državne hidrološke službe in strokovne naloge spremljanja stanja okolja je vzpostavljen in vzdrževan sistem vodenja, ki izpolnjuje zahteve standarda SIST ISO 9001:2000. Kakovost podatkov monitoringa količinskega stanja podzemnih voda se zagotavlja z načrtovanim izborom in vzdrževanjem merilnih mest, z umerjanjem merilne opreme ter z ustrezno strukturo, varovanjem in kontrolo podatkov. Na vseh merilnih mestih državnega monitoringa podzemnih voda se od samega začetka delovanja merilne postaje izvajajo mesečne kontrolne meritve. Potrebna natančnost merjenih veličin je $\pm 0,01$ m za globino oz. višino vode in ± 1 % merjene vrednosti za hitrost toka površinske vode. Sledijo višje obdelave podatkov, ki vključujejo ekspertni pregled kakovosti posameznih časovnih vrst, pri čemer se oceni in po potrebi odstrani ali prilagodi merjene vrednosti, ki so lokalnega značaja in za spremljanje dolgoročnega monitoringa vodnih količin niso relevantne (npr: zatekanje padavinske vode neposredno v opazovalni objekt, lokalno črpanje vode iz opazovalnega objekta za potrebe zalivanja poljščin in podobno). Po končanih osnovnih in višjih obdelavah se podatki verificirajo in arhivirajo v državno zbirko hidroloških podatkov.

Homogenizacija podatkov hidrološkega monitoringa podzemne vode

Od leta 2009 naprej se je državna merilna mreža monitoringa količinskega stanja podzemne vode na območju Pomurja pričela posodabljati na način nadomeščanja starih objektov (vaški vodnjaki) z modernejšimi objekti (namenski piezometri), pri čemer se je na nekaterih območjih v obdobju analiz v krajšem obdobju istočasno spremljalo nihanje podzemne vode na dveh bližnjih merilnih postajah. V izogib podvajanju rezultatov smo iz izbranih analiz izvzeli podvojene merilne postaje. Da bi ohranili celoten niz meritev gladin podzemne vode nove kot nadomeščene postaje, smo podatke homogenizirali. Ob ugotovljeni dobri linearni korelaciji med staro in novo merilno postajo (korelacijski koeficient $R^2 > 0.95$), smo podatke stare merilne postaje prek enačbe linearne regresijske premice prevedli na nivo podatkov nove merilne postaje. Opisana homogenizacija je bila za potrebe tega prispevka izvedena za naslednje pare merilnih postaj: Gornji Lakoš 0271 – Gornji Lakoš Glak-2/14, Zgornje Krapje 0400 – Zgornje Krapje (Kr-2/09), Veščica 0120 – Veščica Ve-2/09, Žepovci 0300 – Žepovci Žep 1/11 in Črnci 0136 – Črnci Črn 1/11 (Tab.1). Nekateri merilni objekti (Apaško polje: Žepovci (10020), Dolinsko Ravensko: Lipovci (01040) in Renkovci (01045)) so v času zelo nizkih vodnih razmer presušili. Za čas presušenosti smo na teh merilnih mestih kot višino gladine podzemne vode upoštevali dno merilnega objekta ter na ta način ohranili pomemben del informacije o vodnih razmerah v vodonosniku.

Podatki uporabljeni v analizah prispevka

Za merilne postaje podzemne vode smo analizirali parameter nadmorske višine gladine podzemne vode, za merilne postaje površinske vode pretok vodotoka na izbranem merskem profilu, za meteorološko merilno postajo v Murski Soboti pa vsoto padavin. Osnovni vhodni podatki so bili agregirani na nizke, srednje in visoke (v nadaljevanju: značilne) mesečne gladine podzemne vode, značilne mesečne pretoke vodotokov in mesečno vsoto padavin. V študiji sekvenčnih trendov gladin podzemne vode smo večji pomen kot povprečnim in visokim mesečnim gladinam podzemne vode oziroma pretokom vodotokov posvečali nizkim vodnim količinam. Privzeli smo, da so nizke vodne količine primerni kazalec dinamike toka podzemne vode, saj vsebujejo te časovne vrste določeno stopnjo spomina (Pavlič, 2016). Naključnost visokovodnih dogodkov v hidrologiji je razmeroma velika in zato ti niso

enakovreden pokazatelj dolgoročnih značilnosti v nihanju količin podzemne vode nizkim količinam podzemne vode.

V letu 2015 se je globino do podzemne vode na območju vodonosnikov vodnega telesa VTPodV Murska kotlina spremljalo ročno na 8. merilnih postajah, na 1 merilni postaji so se hidrološke meritve izvajale na način limnigrafskega zve-

znega beleženja višin vodnih gladin, na 22 merilnih lokacijah pa so se meritve izvajale na način digitalnih meritev s podatkovnimi zapisovalci podatkov (sl. 2). V prispevku smo clustersko analizo in analizo percentilov izvedli na skupno 25 merilnih mestih, analizi trendov pa na 17 merilnih mestih (Tabela 1). Dolžine izbranih časovnih vrst niso enake (Tabela 1). Iz nabora merilnih

Tabela 1. Merilna mesta državnega hidrološkega monitoringa podzemne vode VTPodV Murska kotlina v letu 2015 uporabljena v analizah.

Table 1. Monitoring sites of national groundwater monitoring network on GWB Murska kotlina in the year 2015, used in analyses.

Vodonosni sistem	Ime merilnega mesta	Šifra merilnega mesta	Pričetek obdelave (leto)	Clusterska analiza	Analiza percentilov	Analiza monotoni trendov	Analiza sekvenčnih trendov
Dolinsko Ravensko	Skakovci 3471	01005	1990	DA	DA		
	Murski Petrovci 3552	01010	1990	DA	DA		
	Rankovci 3370	01015	1968	DA	DA	DA	DA
	Nemčavci 2762	01022	1998	DA	DA		
	Krog 2932	01025	1990	DA	DA		
	Bakovci 2630	01035	1981	DA	DA	DA	DA
	Lipovci 2270	01040	1953	DA	DA	DA	DA
	Renkovci 0850	01045	1953	DA	DA	DA	DA
	Rakičan Rak-2/09	01052	2011	DA	DA		
	Brezovica 0970	01055	1979	DA	DA	DA	DA
	Melinci 2000	01065	1974	DA	DA	DA	DA
	Radmožanci 0411	01075	1979	DA	DA	DA	DA
	Kapca 0473	01085	1991	DA	DA		
	Gornji Lakoš 0271	01090	1981			DA	DA
	Gornji Lakoš Glak-2/14	01092	2015	DA	DA		
Benica 0111	01095	1990	DA	DA			
Mursko-Ljutomersko polje	Bunčani 0611	05011	1955	DA	DA	DA	DA
	Ključarovci 0540	05030	1955	DA	DA	DA	DA
	Zgornje Krapje 0400	05050	1955			DA	DA
	Zgornje Krapje (Kr-2/09)	05051	2011	DA	DA		
	Veščica 0120	05080	1974			DA	DA
	Veščica Ve-2/09	05081	2011	DA	DA		
Apaško polje	Zgornje Konjšiše S-0176	10005	1976	DA	DA	DA	DA
	Žepovci 0300	10020	1975			DA	DA
	Žepovci Žep 1/11	10022	2012	DA	DA		
	Črnci 0163	10035	1981	DA	DA		
	Črnci Črn 1/11	10036	2012	DA	DA	DA	DA
	Segovci 0141	10055	1981	DA	DA	DA	DA
	Mali Segovci MSeg-1/14	10068	2015	DA	DA		
	Plitvica 0090	10080	1981	DA	DA	DA	DA

mest, uporabljenih v analizah monotonih in sekvenčnih trendov, smo izvzeli merilna mesta z naborom podatkom krajšim od 30 let. Iskali smo namreč dolgoročne spremembe v nihanju gladine podzemne vode raziskovanega območja, zaradi česar bi bili lahko rezultati časovnih vrst s krajšim obdobjem merjenja zavajajoči. Za analizo sekvenčnih trendov vodnih količin smo uporabili le časovne vrste s frekvenco meritev vsaj trikrat mesečno, kar predstavlja minimalni nabor vrednosti za izračun značilnih mesečnih vodnih količin.

Poleg merilnih mest hidrološkega monitoringa podzemne vode smo analize trendov izvedli tudi za podatke hidrološkega monitoringa površinskih voda na merskih profilih Mura - Gornja Radgona, Ledava - Čentiba, Ledava - Polana in Ščavnica - Pristava ter za podatke meteorološkega monitoringa v Murski Soboti (Tabela 1, sl. 1).

Metode dela

Nabor uporabljenih metodologij smo izbrali na podlagi zasledovanja cilja raziskovalnega problema. Gre za razmeroma široko znane statistične metode v hidrologiji časovnih vrst (Helsel & Hirsch, 2002; Tallaksen & Van Lanen, 2004). Percentilna analiza gladin podzemne vode predstavlja robustno opisno statistiko za oceno količinskega stanja podzemne vode na dnevni, mesečni ali letni skali (Post, 2013; Tallaksen & Van Lanen, 2004). Analiza razvrščanja časovnih podatkov o višinah gladin podzemne vode v skupine (clusterska analiza) se v zadnjem času pogosto uporablja v začetni fazi hidrogeoloških raziskav z namenom razvrščanja merilnih lokacij v skupine s sorodnim odzivom dela vodonosnika na zunanje vplive napajanja in praznjenja le-tega (Haaf & Barthel, 2018; Naranjo - Fernandez et al., 2020). Analiza trenda oziroma analiza odvisnosti nihanja izbrane spremenljivke po času sodi med uveljavljene statistične metode za ugotavljanje sprememb nihanju vodnih količin (Gibbons, 1994; Helsel & Hirsch, 2002). V novejših raziskavah se analiza trenda pogosto uporablja kot dopolnilna metoda matematičnim modelom toka podzemne vode in vodno bilančnih modelov za ugotavljanje vpliva podnebnih sprememb na količine podzemne vode (Jackson et al., 2015; Green, 2016; Haas & Birk, 2019; Li et al., 2020; Kumar & Singh, 2015). Analize trendov so pogoste tudi v raziskavah, ki se nanašajo na pogostost suš v vodonosnikih in odkrivanje ostalih pritiskov na obnovljive količine podzemne vode (Haas & Birk, 2019; Shamsudduha et al., 2009; Jackson et al., 2015). V Sloveniji smo kot člani Evropske

Skupnosti analize trendov pričeli sistematično izvajati z vpeljavo Direktive Evropskega parlamenta in Sveta 2000/60/ES. V primeru dostopnih podatkov o gladini podzemne vode v vodnem telesu podzemne vode se ti podatki uporabljajo za ugotavljanje napredujočega trenda zniževanja gladin od leta 1990 dalje, povzročena zaradi prevelike rabe podzemne vode (Andjelov et al., 2019, Andjelov et al., 2021). Sekvenčna analiza trendov nihanja gladin podzemne vode se v hidrologiji uporablja predvsem v oceni sezonske spremenljivosti nihanja količinskega stanja podzemne vode (Satish Kumar & Rathnam, 2020; Kumar et al., 2018; Li et al., 2020), pa tudi z namenom ugotavljanja sprememb v trendih nihanja dolgoletnih vodnih količin (Garbrecht & Fernandez, 1994; Bonacci, 2007). Na območju izvirov Vipave so se sekvenčne analize trendov izvajale z namenom karakterizacije odtoka iz prispevnega zaledja izvirov (Pavlič & Brenčič, 2011).

Clusterska analiza

Po metodi razvrščanja v clustre razvrstimo objekte v bolj ali manj homogene skupine na način, da se izrazijo zveze med posameznimi clustri. Če imamo n predmetov in merimo m značilnosti, metoda razvrščanja v clustre izrazi mere podobnosti med vsako dvojico predmetov. Primer izračuna koeficienta podobnosti k_i je Evklidova razdalja d_{ij} . Izračunamo ga po enačbi:

$$d_{ij} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^m (X_{ik} - X_{jk})^2}{m}}$$

X_{ik} pomeni k -to spremenljivko, merjeno na predmetu i in X_{jk} pomeni k -to spremenljivko, merjeno na predmetu j . Matriko $n \times m$ naravnih podatkov pred izračunom indeksa razdalje standardiziramo (Zupančič, 2013).

Analiza percentilov

Percentilni rang je standardna statistična metoda, ki daje relativen položaj številčne vrednosti (v našem primeru povprečne mesečne gladine podzemne vode) v primerjavi z vsemi drugimi številčnimi vrednostmi v porazdelitvi. Percentil je vrednost na lestvici od 0 do 100, ki označuje odstotek opazovanj, ki je enak ali pod to vrednostjo. P -ti percentil izračunamo po enačbi:

$$P_j = X_{(n+1)} * j$$

n predstavlja velikost vzorca X_i , j pa del podatkov, ki je manjši ali enak percentilni vrednosti.

V analizi smo uporabili percentilni rang, ki je mesto oziroma položaj izmerjene gladine podzemne vode na odstotni lestvici glede na rezultat, ki ga je ta meritev dosegla pri celotnem naboru meritev, ki ji tudi sama pripada.

Analiza trenda s statistično značilnostjo po Spearmanu

Monotoni trend posamezne analizirane spremenljivke v času smo testirali z uporabo metode neparametričnega Spearmanovega koeficienta korelacije rangov ρ s 95 % intervalom zaupanja. Spearmanov koeficient korelacije rangov je definiran z vsoto razlik rangov (R) med odvisno y in neodvisno x spremenljivko, pri čemer n predstavlja število vseh enot (parov rangov), in ga lahko zapišemo kot (Yue et al., 2002):

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n (R(x_i) - R(y_i))^2}{n(n^2 - 1)}$$

Analiza sekvenčnih trendov

Za ugotavljanje strukturnih sprememb znotraj uporabljenih časovnih nizov podatkov smo uporabili programski sistem R za statistične izračune, knjižnico Strucchange (Zeileis et al., 2002).

V časovni vrsti lahko predvidevamo, da obstaja m točk, pri katerih se regresijski koeficient spremeni iz ene stabilne regresije v drugo. Torej obstaja $m+1$ segmentov, pri katerih so regresijskih koeficienti konstantni in linearno regresijsko enačbo lahko zapišemo kot:

$$y_i = x_i^j \beta_j + u_i \quad (i = i_{j-1} + 1, \dots, i_j, j = 1, \dots, m + 1),$$

kjer je j segmentni indeks, $i_{m,n} = \{i_1, \dots, i_m\}$ pripevek nabora točk prevoja ($i_{m,n}$ se imenuje tudi m -particija). Običajno znaša $i_0 = 0$ in $i_{m+1} = n$.

V praksi je število točk prevoja pogosto neznano, zato se mora oceniti iz podatkov. Model standardne linearne regresije tako primerjamo s podatki, pri čemer se izpelje empirični proces, ki zajame nihanje ali ostankov modela ali pa samih parametrov modela. Znotraj ničelne hipoteze se to ureja s centralnim limitnim izrekom funkcije (Kuan & Hornik, 1995), pri čemer lahko določimo preseganje meje z verjetnostjo α znotraj ničelne hipoteze. Znotraj alternative se normalno nihanje v procesu spremeni, kar predstavlja odstopanje od ničelne hipoteze. V analizi smo za preverjanje konstantnosti regresijskih odvisnosti v času uporabili kombinacijo testov (RE, CUSUM in MOSUM), ki temeljijo na porazdelitvi rekurzivnih in standardnih ostankov najmanjših kvadratov podatkovne osnove. Standardni ostanki

najmanjših kvadratov predstavljajo najmanjšo vsoto kvadratov razlik med vrednostmi odvisne spremenljivke od pričakovane vrednosti te spremenljivke glede na linearni regresijski model. Izračun rekurzivnih ostankov linearnega regresijskega modela pa lahko zapišemo kot (Hackl, 2016):

$$W_t = \frac{y_t - z_t' b_{t-1}}{\sqrt{1 + z_t'(Z_{t-1}' Z_{t-1})^{-1} z_t}}, \quad t = k+1, \dots, T$$

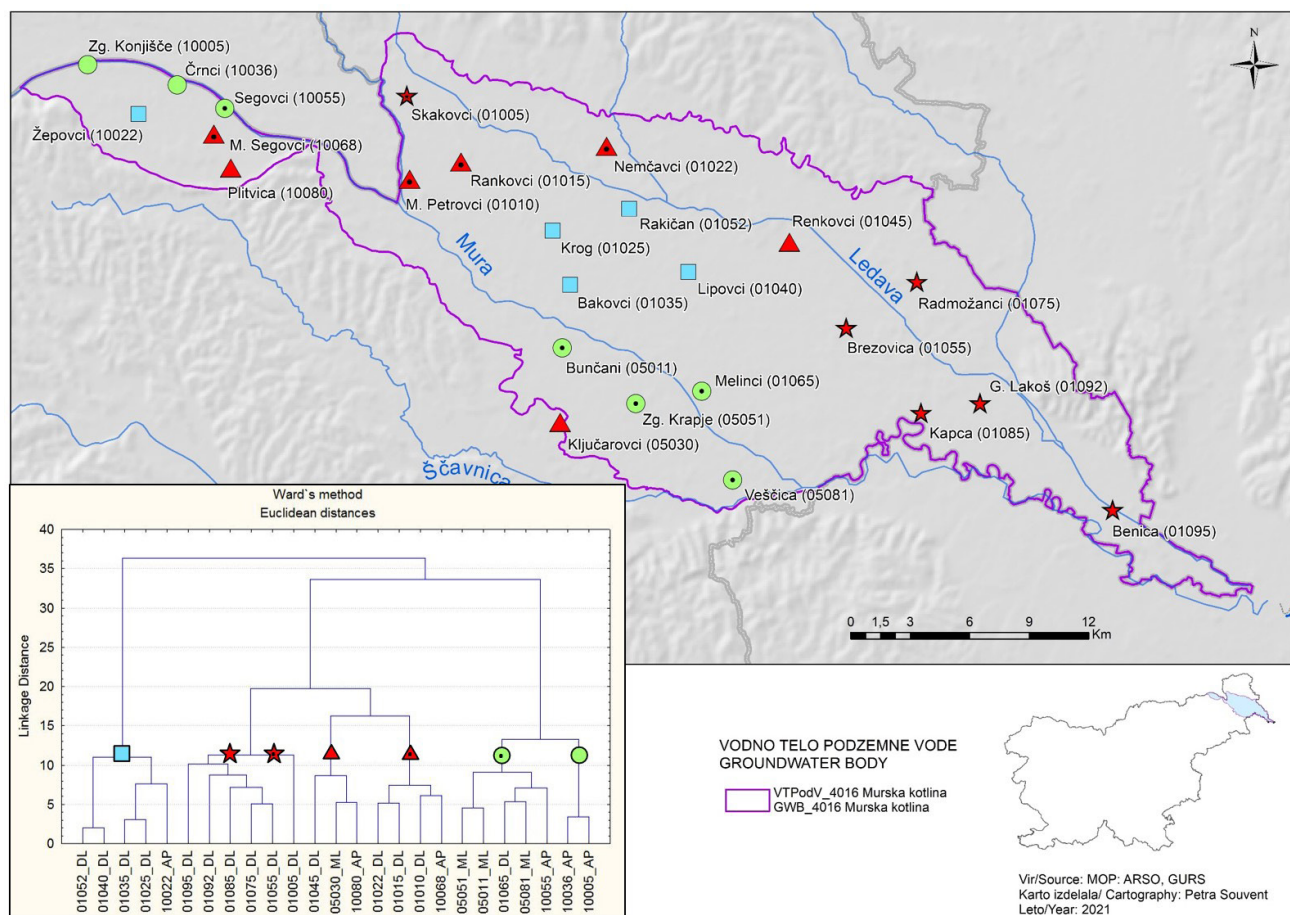
$Z_{t-1}' = (z_1, \dots, z_{t-1})$ in b_{t-1} sta oceni najmanjših kvadratov koeficienta β glede na opazovanja vse do časa $t-1$. V primeru stalnosti parametrov so rekurzivni ostanki neodvisno normalno porazdeljeni s srednjo vrednostjo 0 in varianco σ^2 . Če temu ni tako, gre za odstopanje od ničelne hipoteze.

Testiranje konstantnosti regresijskih odvisnosti po principu RE testa temelji na primerjavi rekurzivnih ostankov regresijskih koeficientov z ostanki celotnega vzorca (Ploberger et al., 1989), testa CUSUM in MOSUM pa temeljita na preverjanju konstantnosti regresijskih ostankov le dela vzorca opazovanj in ne celotnega vzorca. Ostanki celotnega vzorca so namreč manj občutljivi na spremembe regresijskih koeficientov kot ostanki le dela podatkov. Test kumulativne vsote ostankov (CUSUM) ugotavlja morebitne spremembe koeficienta β v modelu linearne regresije na način primerjave sekvenčne vsote napovedane standardizirane napake rekurzivnih ostankov z robnim pogojem, ki ga predstavlja 95 % stopnja zaupanja. Statistika CUSUM se oceni za en časovni korak vnaprej. Test ugotavljanja sekvence časovnih vrst z uporabo drseče vsote ostankov (MOSUM) v nasprotju s testom CUSUM ne temelji na izračunu statistik iz ostankov linearnega regresijskega modela do določenega časa ampak na vsoti drsečega povprečja določenega števila ostankov v vnaprej določenem podatkovnem oknu, ki ga premika preko celotnega vzorca opazovanj (Zeileis et al., 2002).

Rezultati

Clusterska analiza

Clustersko analizo smo izvedli s podatki srednjih mesečnih vrednosti gladin podzemne vode, na 25 v letu 2015 delujočih merilnih mestih (sl. 1), razen na merilnem mestu Odranci, ki ga zaradi prekratkega časovnega niza (merilno mesto je začelo delovati marca 2011) nismo vključili v analizo. V analizo vključena merilna mesta smo klasificirali v tri večje skupine (sl. 3): skupina 1 z merilnimi mesti Žepovci (10022),



Sl. 3. Drevo združevanja clusterske analize gladin podzemne vode in prikaz rezultatov na pregledni karti VTPodV Murska kotlina.

Fig. 3. Cluster dendrogram of groundwater levels and the results of the analysis on a map.

Krog (01025), Rakičan (01052), Bakovci (01035) in Lipovci (01040); skupina 2 z merilnimi mesti Zgornje Konjišče (10005), Črnci (10036), Segovci (10055), Melinci (01065), Bunčani (05011), Zgornje Krapje (05051) in Veščica (05081) ter skupina 3 z merilnimi mesti Plitvica (10080), Ključarovci (05030), Nemčavci (01022), Renkovci (01045), Skakovci (01005), Rankovci (01015), Murski Petrovci (01010), Mali Segovci (10068), Brezovica (01055), Radmožanci (01075), Kapca (01085), Gornji Lakoš (01092) in Benica (01095).

Analiza percentilov

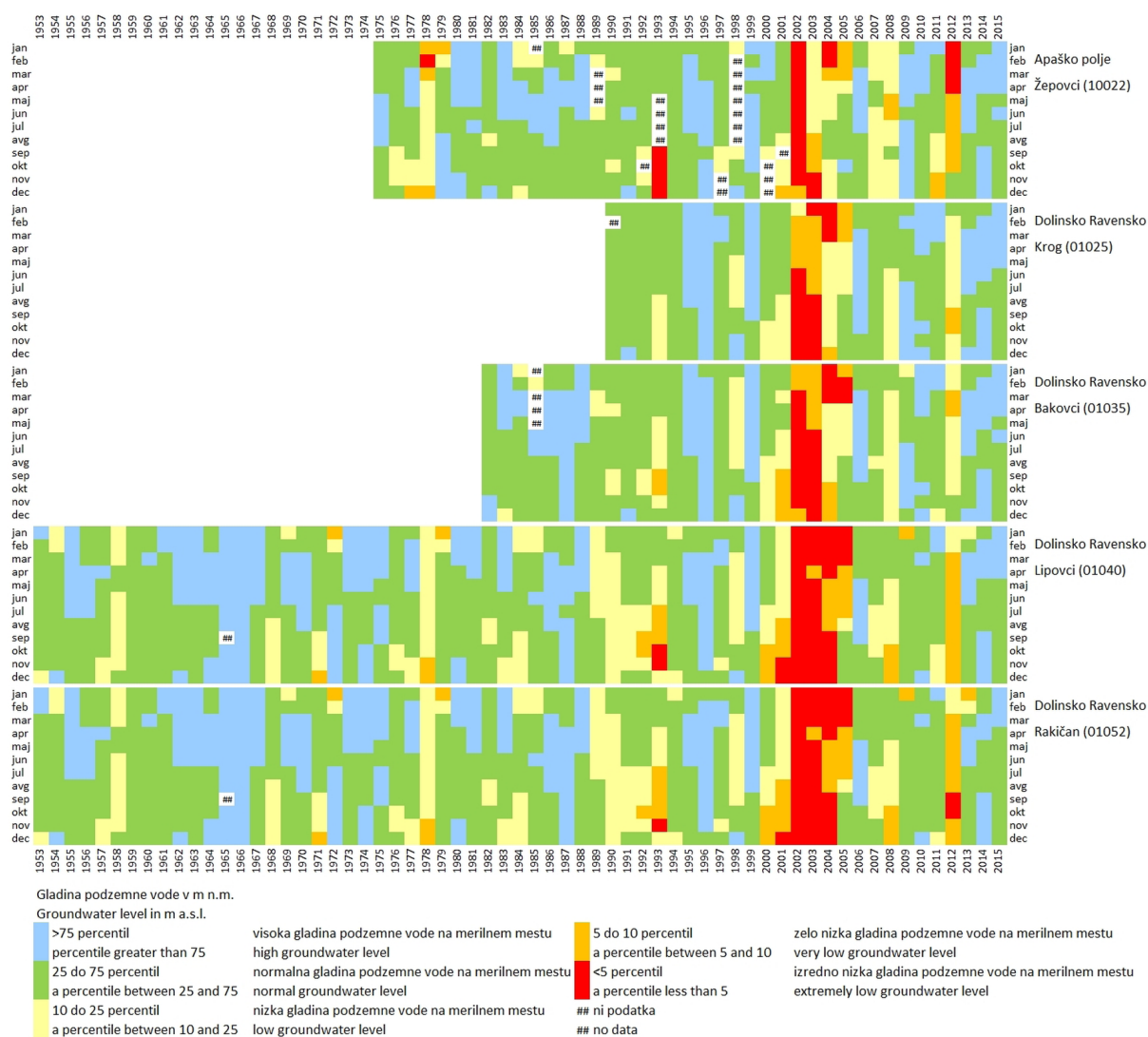
Percentilno analizo smo, kot tudi clustersko analizo, izvedli na 25 merilnih mestih s podatki srednjih mesečnih vrednosti gladin podzemne vode, v celotnem obdobju delovanja postaje. Rezultat analize so mesečni percentilni grafi, ki smo jih glede na podobnost grafov združili v pet skupin merilnih mest (sl. 4 do 8) in sicer:

1. Žepovci (10022), Krog (01025), Bakovci (01035), Lipovci (01040) in Rakičan (01052);
2. Zgornje Konjišče (10005), Črnci (10036), Segovci (10055), Melinci (01065), Bunčani (05011), Zgornje Krapje (05051) in Veščica (05081);

3. Skakovci (01005), Brezovica (01005), Radmožanci (01075), Kapca (01085), Gornji Lakoš (01092) in Benica (01095);
4. Plitvica (10080), Ključarovci (05030) in Renkovci (01045) in
5. Mali Segovci (10068), Murski Petrovci (01010), Rankovci (01015) ter Nemčavci (01022).

Analiza monotonih trendov

Značilne srednje mesečne gladine podzemne vode se v dolgoletnem analiziranem obdobju statistično značilno zvišujejo na merilnih postajah Radmožanci (01075), Veščica (05081) in Segovci (10055) (sl. 1). Statistično značilno se gladine podzemne vode znižujejo na merilnih postajah Renkovci (01045), Lipovci (01040), Zgornje Konjišče (10005), Črnci (10036), Bunčani (05011) in Ključarovci (05030) (sl. 1). Nizke in srednje mesečne vrednosti gladin podzemne vode se statistično značilno znižujejo tudi na merilni lokaciji Melinci (01065), nizke mesečne vrednosti gladin pa še v Gornjem Lakošu (01090). Na merilnih postajah Rankovci (01015), Bakovci (01035), Brezovica (01055), Žepovci (10020), Plitvica (10080) in Zgornje Krapje (05050) (sl. 1) ni bilo ugotovljenega



Sl. 4. Merilna mesta na Apaškem polju ter Dolinsko Ravenskem, kjer je prevladujoče napajanje podzemne vode infiltracija padavin.

Fig. 4. Monitoring sites with predominant infiltration of precipitation as groundwater recharge.

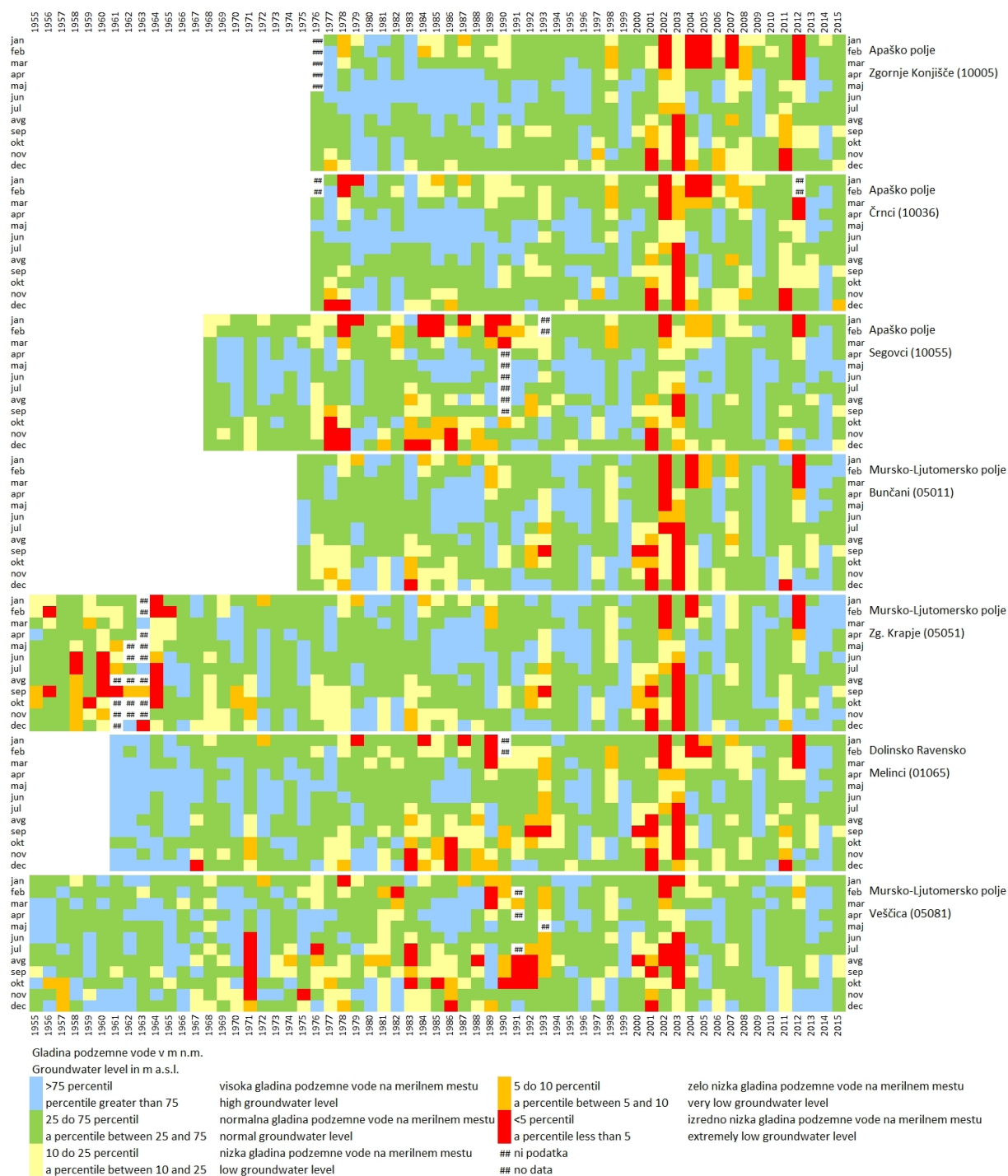
statistično značilnega trenda v nihanju značilnih mesečnih gladin podzemne vode na stopnji zaupanja 95 %.

Trendi nihanja značilnih mesečnih gladin podzemne vode na merilnih postajah z ugotovljenim trendom zniževanja v dolgoletnem obdobju po posameznih mesecih kažejo, da se vodna gladina najpogosteje statistično značilno znižuje med marcem in avgustom. Izjemi sta merilni postaji Zgornje Konjišče (10005), kjer se značilne mesečne gladine podzemne vode statistično značilno znižujejo v večini mesecev leta z izjemo januarja in decembra in Ključarovi (05030), kjer je zniževanje nizkih gladin značilno v večini mesecev leta z izjemo oktobra, novembra in decembra. Statistično značilnega monotonega trenda gladin podzemne vode po po-

sameznih mesecih nismo ugotovili na merilnih postajah Rankovci (01015), Bakovci (01035), Brezovica (01055), Žepovci (10020), Plitvica (10080) in Zgornje Krapje (05051) (sl. 1). Statistično značilno zviševanje dolgoletnih nizkih mesečnih gladin je bilo v mesecih med oktobrom in marcem ugotovljeno na merilni postaji Segovci (10055), v septembru, novembru, decembru in januarju pa na merilni postaji Veščica (05080) (sl. 1).

Analiza sekvenčnih trendov

Z analizo sekvenčnih trendov nismo ugotovili trenda oziroma prevoja le-tega za dolgoletne serije podatkov mesečnih vsot padavin v Murski Soboti (obdobje meritev 1950 – 2015). Najmanjše količine mesečne vsote padavin v analiziranem obdobju so bile na tem merilnem mestu izmerje-

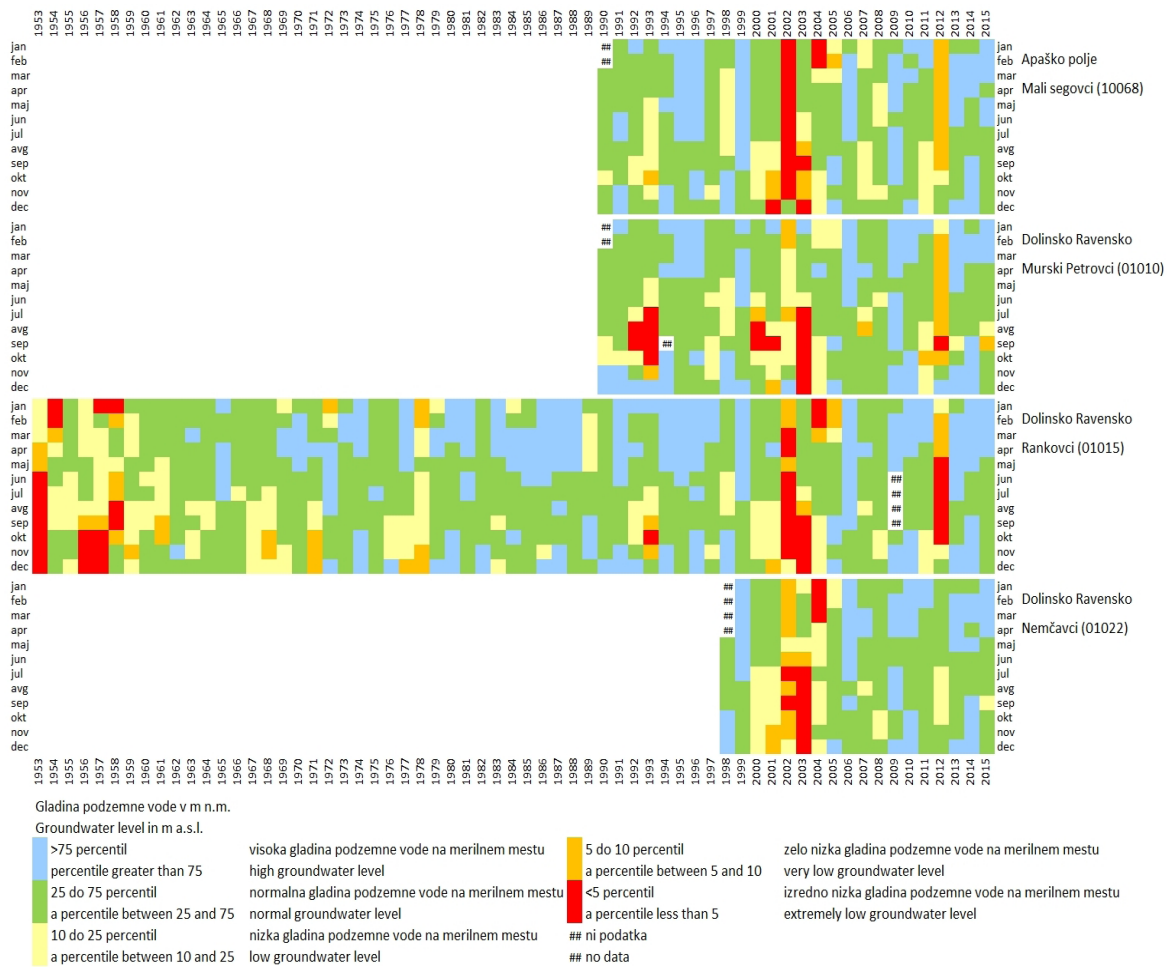


Sl. 5. Merilna mesta na območjih vodonosnikov, kjer so gladine pod hidrološkim vplivom režima reke Mure.
Fig. 5. Monitoring sites where groundwater levels are influenced by the Mura river regime.

ne v februarju 1998, januarju 2002 ter januarju 1954, največje vrednosti vsot pa v oktobru 2014, avgustu in v septembru 1972 (arhiv ARSO).

Za dolgoletne pretoke Mure v Gornji Radgoni nismo ugotovili sekvenc v trendu nihanja značilnih mesečnih vrednosti v analiziranem obdobju (Tabela 3). S sekvenčno analizo trendov nizkih mesečnih pretokov Ščavnice v Pristavi smo določili tri sekvence (prevoj novembra 1993 in marca 2000), za srednje in visoke pretoke tega vodoto-

ka pa dve sekvenci v nihanju mesečnih pretokov (Tabela 3). Za nizke pretoke Ledave na merilni postaji v Polani smo določili štiri sekvence s prevoji maja 1970, 1988 in 1999, za nizke pretoke istega vodotoka na merilnem mestu v Čentibi pa tri sekvence s prevoji oktobra 1988 in marca 2000 (Tabela 3, sl. 9). Vse tri sekvence nizkih pretokov Ledave v Polani kažejo na zviševanje vodnih gladin, kar za merilno postajo v Čentibi ne drži (sl. 9).

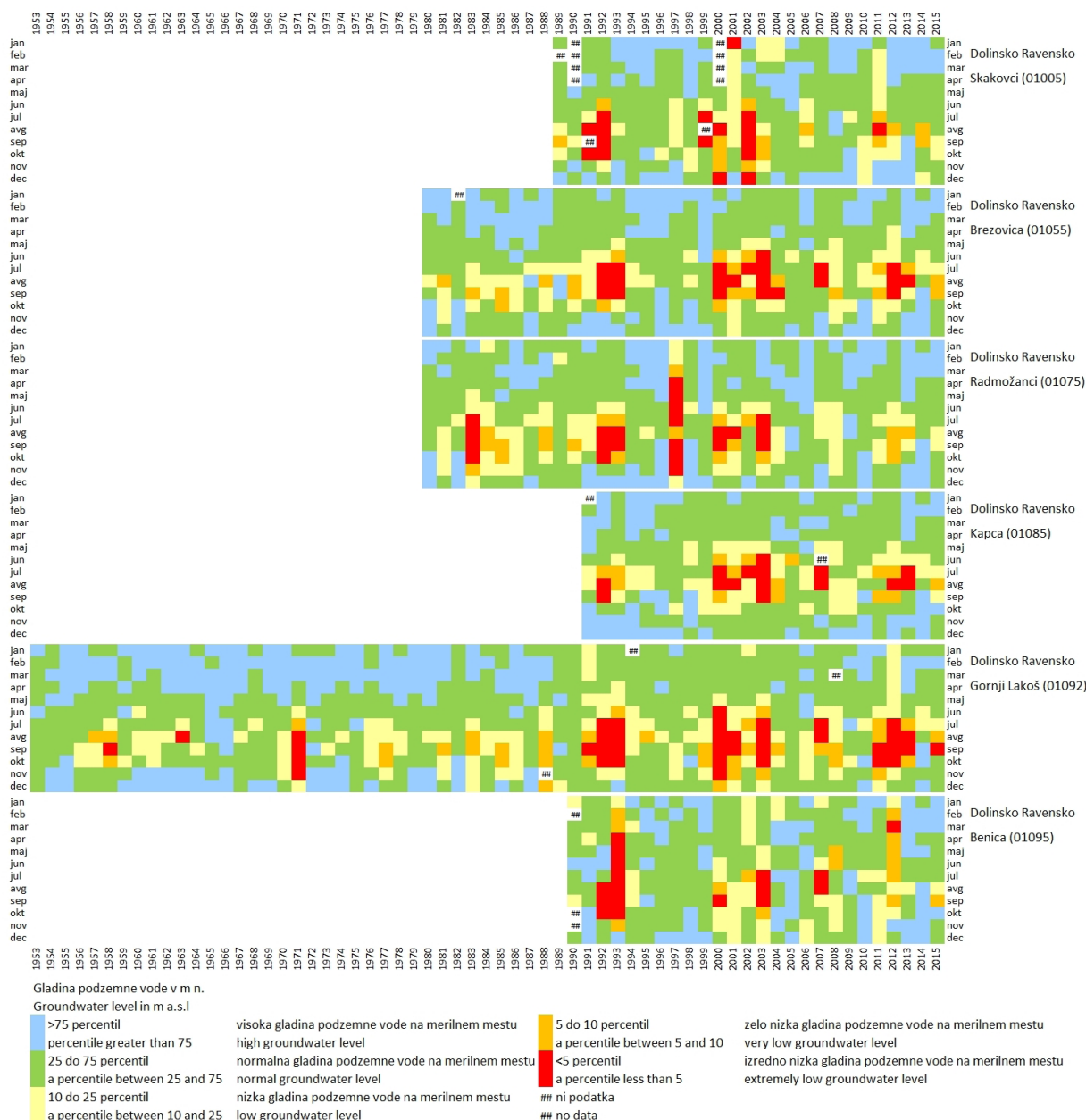


Sl. 6. Merilna mesta s podobnim režimom nihanja gladine podzemne vode na vtoku in iztoku iz vodonosnika.
Fig. 6. Monitoring sites at inflow or outflow of the aquifer with a similar groundwater level regime.

Tabela 2. Rezultati sekvenčne analize trendov z ugotovljenim nastopom prevoja v nihanju nizkih, srednjih in visokih mesečnih gladin podzemne vode.

Table 2. Sequential trend analysis results with turning points occurrence in trend for low, mean and high monthly groundwater level.

Šifra MM	Ime MM	Zač. niza	Nizke mesečne gladine podzemne vode			Srednje mesečne gladine podzemne vode			Visoke mesečne gladine podzemne vode		
			Prevoj 1	Prevoj 2	Prevoj 3	Prevoj 1	Prevoj 2	Prevoj 3	Prevoj 1	Prevoj 2	Prevoj 3
10036	Črnci	1981	Okt-98	Jul-04		Jun-83	Jun-01		Jul-01		
10005	Zgornje Konjšče	1976	Jun-01			Maj-01			Nov-00		
10020	Žepovci	1975	Jan-00	Jan-05		Jan-00	Feb-05		Jan-00	Feb-05	
10055	Segovci	1981	Jan-98	Jul-03		Nov-00	Dec-05		Okt-00	Nov-05	
10080	Plitvica	1981	Okt-98	Mar-04		Sept-98	Feb-04		Sept-98	Feb-04	
01015	Rankovci	1968	Dec-93	Apr-05		Sep-75	Maj-00		Sep-94	Mar-05	
01045	Renkovci	1953	Maj-67	Okt-94	Mar-05	Maj-67	Okt-94	Mar-05	Apr-67	Okt-94	Feb-05
01035	Bakovci	1981	Dec-93	Jun-02		Nov-93	Feb-04		Nov-93	Feb-04	
01055	Brezovica	1979	Feb-94	Feb-03		Feb-93	Aug-99		Jan-94	Mar-03	
01075	Radmožanci	1979									
01065	Melinci	1974	Maj-93	Okt-03		Maj-93	Okt-03		Okt-89		
01090	Gornji Lakoš	1981	Okt-93	Okt-03		Okt-93	Okt-03		Sept-93	Okt-03	
01040	Lipovci	1953	Jun-67	Jan-95	Apr-05	Jun-67	Jan-95	Apr-05	Jun-67	Jan-95	Apr-05
05080	Veščica	1974	Feb-93			Feb-93			Jan-93		
05050	Zgornje Krapje	1955	Jan-95	Maj-04		Maj-93	Okt-02		Dec-94	Apr-04	
05011	Bunčani	1955	Jun-01			Jun-01			avg-01		
05030	Ključarovci	1955	Dec-94	Apr-04		Jun-88	Apr-00		Sep-94	Jan-04	



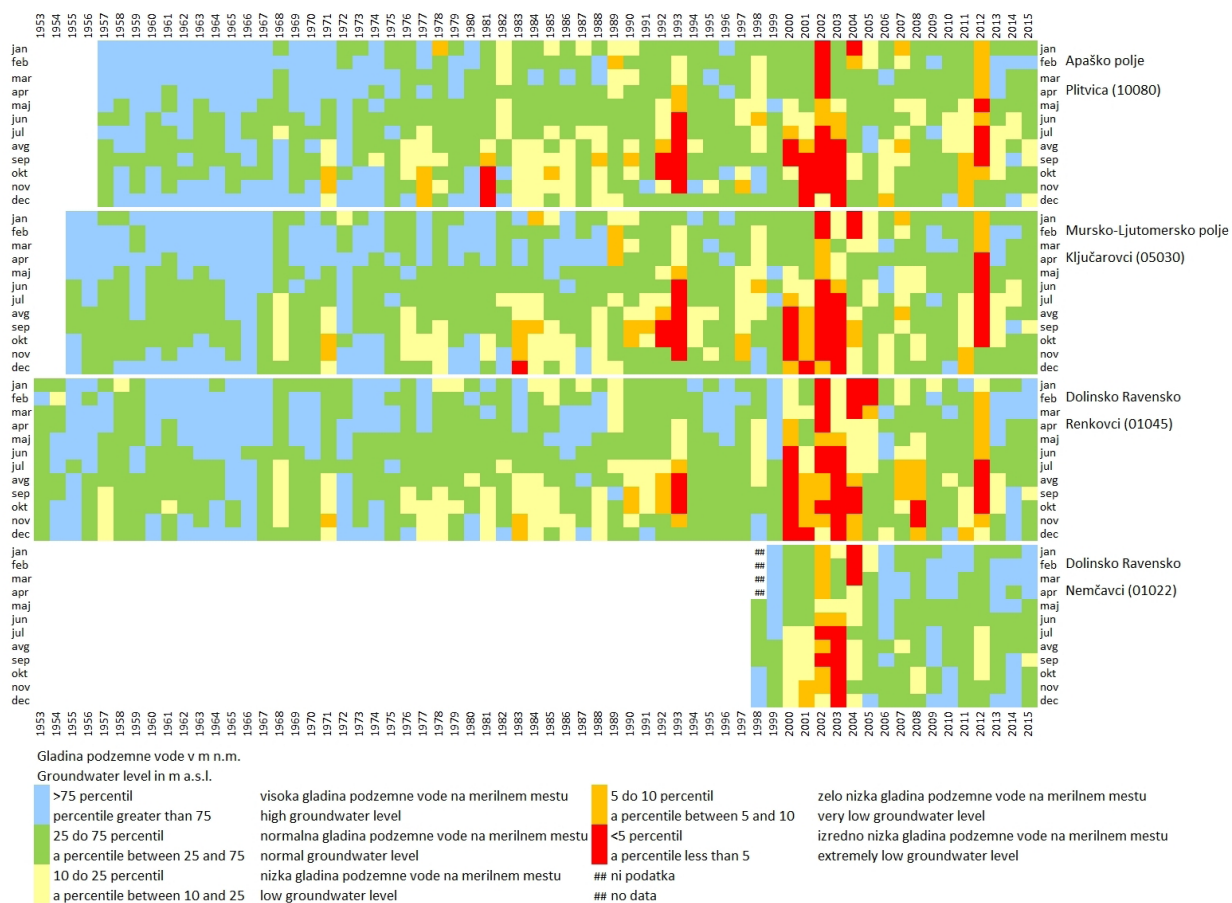
Sl. 7. Merilna mesta s podobnim režimom nihanja gladine podzemne vode z dotoki podzemne vode v vodonosnik iz gričevnatega zaledja.

Fig. 7. Monitoring sites with a similar groundwater level regime, where inflow to the groundwater is from hilly hinterland.

Tabela 3. Rezultati sekvenčne analize trendov z ugotovljenim nastopom prevoja v nihanju nizkih, srednjih in visokih mesečnih pretokov vodotokov.

Table 3. Sequential trend analysis results with turning points occurrence in trend for low, mean and high monthly surface water discharges.

Šifra MM	Ime MM	Zač. niza	Nizki mesečni pretoki vodotoka			Srednji mesečni pretoki vodotoka			Visoki mesečni pretoki vodotoka		
			Prevoj 1	Prevoj 2	Prevoj 3	Prevoj 1	Prevoj 2	Prevoj 3	Prevoj 1	Prevoj 2	Prevoj 3
1060	Mura-Gornja Radgona	1946									
1140	Ščavnica-Pristava	1975	Nov-93	Mar-00		Mar-00			Jun-99		
1260	Ledava-Centiba	1969	Okt-88	Mar-00		Okt-88	Mar-00				
1220	Ledava-Polana	1956	Maj-70	Maj-88	Maj-99	Apr-67	Jun-99		Jun-67		

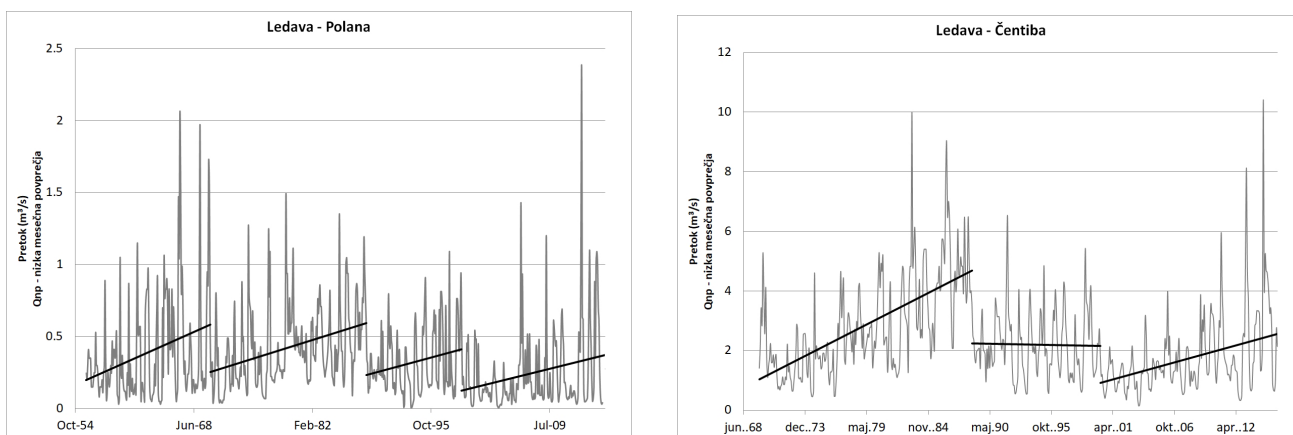


Sl. 8. Merilna mesta, ki se glede na clustersko analizo grupirajo v samostojno podskupino, kažejo pa podobno dinamiko nihanja gladin kot jo spremljamo pri merilnih mestih, kjer prevladuje infiltracija padavin oziroma dotok iz obrobja in vpliv reke.
 Fig. 8. Monitoring sites which are in the same subgroup according to the hierarchical cluster analysis but show similar groundwater level regime to those monitoring sites where infiltration of precipitation prevail or to those with prevailing inflow to groundwater from hinterland or the river.

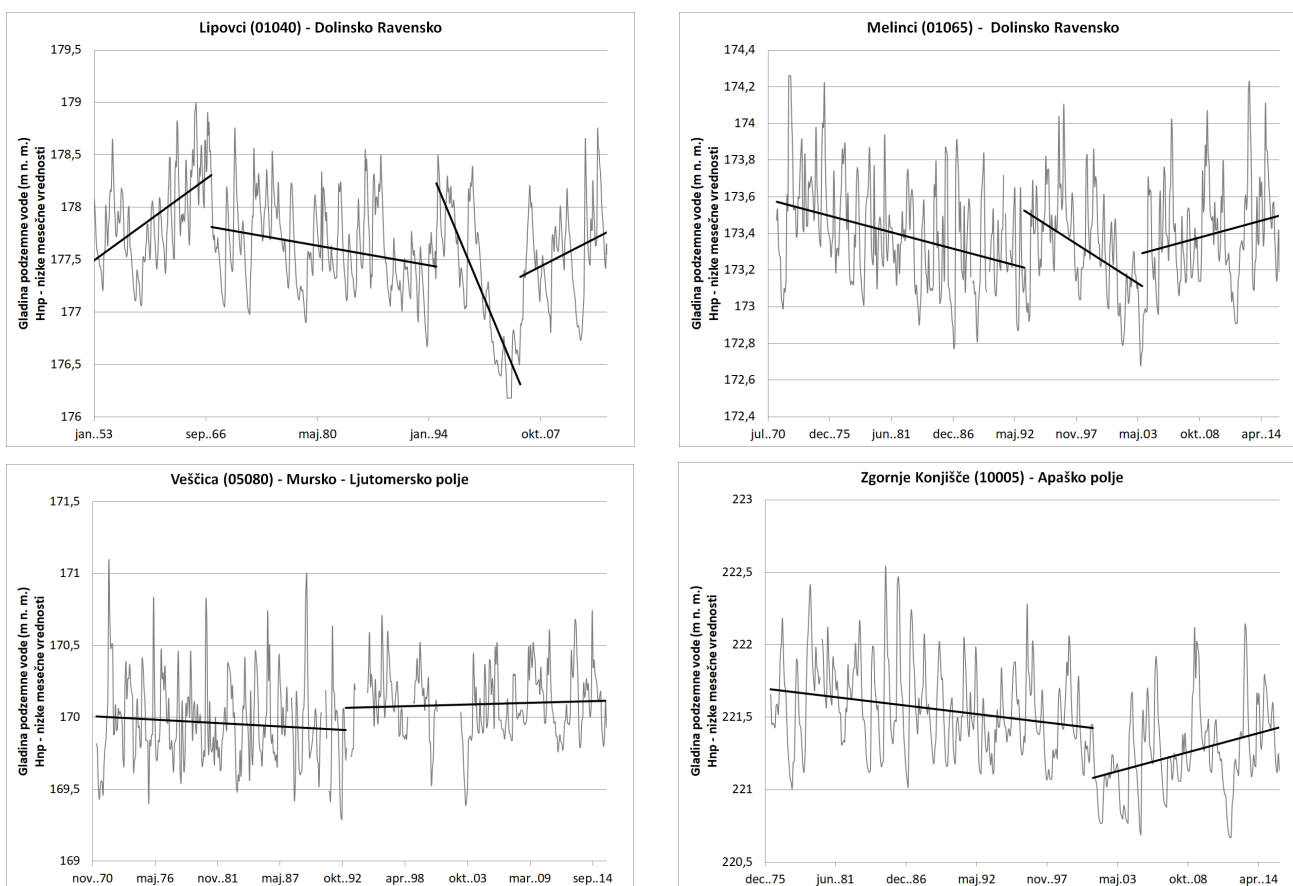
S sekvenčno analizo trendov nizkih mesečnih gladin podzemne vode smo določili med 1 in 3 prevojnega točke v nihanju vrednosti (Tabela 2, sl. 10 in 11). Prvo prevojno obdobje je bilo značilno za konec pomladi oziroma začetek poletja leta 1967 na merilnih mestih v Renkovcih (01045) in Lipovcih (01040) (sl. 1). Sledilo je obdobje pogostega pojavljanja prevojev v sekvencah gladin podzemne vode med leti 1993 in 1995, ki je na večini merilnih mest nastopilo po daljšem obdobju brez trenda ali s trendom upadanja podzemne vode (Tabela 2, sl. 11). Temu je sledilo obdobje s prevladujočim trendom zniževanja vodnih gladin do naslednjega izstopajočega obdobja pojavljanja prevojev v sekvencah časovnih vrst, to je med leti 2003 in 2005 (Tabela 2, sl. 11). Značilnost zadnje sekvence posameznih časovnih vrst je trend zviševanja gladin podzemne vode do konca analiziranega obdobja (sl. 10). Izjeme v opisanih rezultatih sekvenčne analize trendov nihanja nizkih mesečnih gladin podzemne vode so bile opredeljene na vseh analiziranih merilnih postajah na območju Apaškega polja (Tabela 1) in v Bunčanih (05011) na Mursko-Ljutomerskem polju (sl. 1).

Pri teh merilnih postajah značilnega prevojnega obdobja med leti 1993 in 1995 z opisano metodo nismo ugotovili, prevojno obdobje med leti 2003 in 2005 pa je za razliko od ostalih merilnih mest Pomurja v Črncih (10036), Segovcih (10055) in Plitvici (10080) nastopilo leta 1998, v Žepovcih (10020) januarja 2000, v Zgornjem Konjišču (10005) in Bunčanih (05011) pa junija 2001 (sl. 11). Od rezultatov sekvenčne analize trendov nizkih mesečnih gladin podzemne vode večine merilnih postaj odstopata tudi merilni mesti Veščica (05080), kjer v prvih 21. letih ni bilo določenega prevoja v trendu, in Radmožanci (01075) brez ugotovljenega trenda analizirane časovne vrste (sl. 11).

Razpršenost prevojnih točk srednjih mesečnih gladin podzemne vode v času je v primerjavi z razpršenostjo točk prevoja nizkih mesečnih gladin podzemne vode večja. Prvo obdobje pogostejšega pojava prevojev trendov nastopi med majem in junijem 1967 (Lipovci (01040) in Renkovci (01045)), drugo obdobje med februarjem 1993 in januarjem 1995 (izjeme: Bunčani (05011), Zgornje Konjišče (10005), Žepovci (10020), Segovci



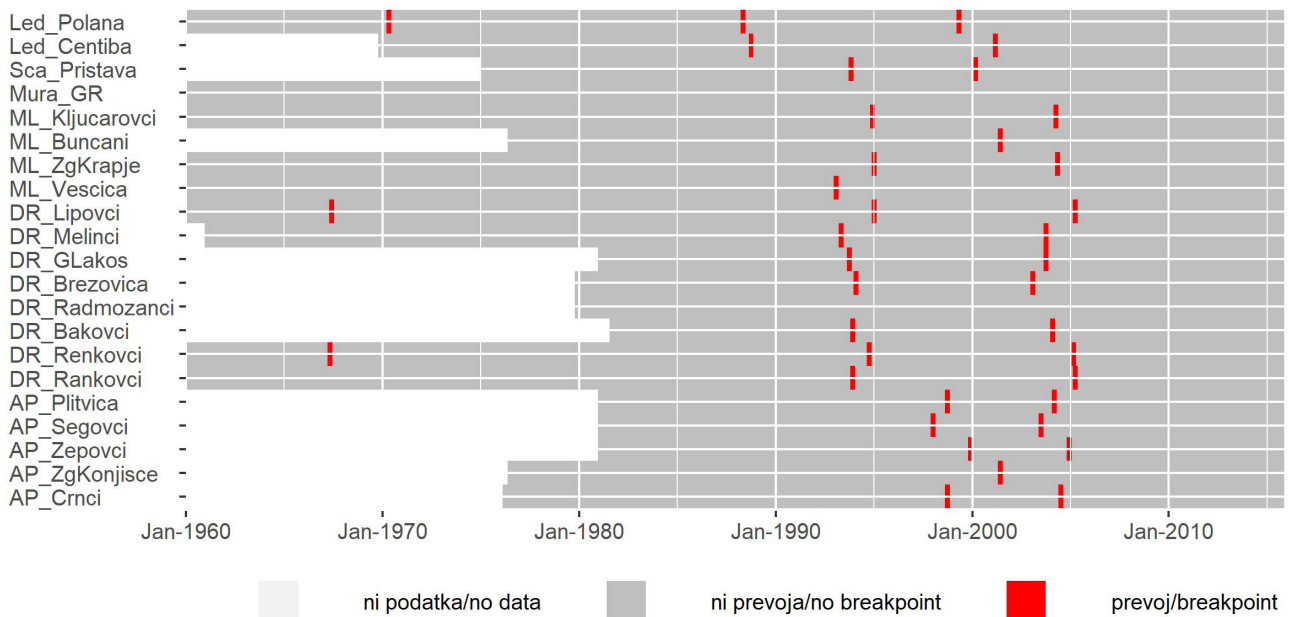
Sl. 9. Rezultati sekvenčne analize trendov nizkih mesečnih pretokov Ledave na merilnem mestu v Polani (levo) in Čentibi (desno).
 Fig. 9. Sequential trend analysis results of low monthly discharges of Ledava stream on measuring stations in Polana (left) and in Čentiba (right).



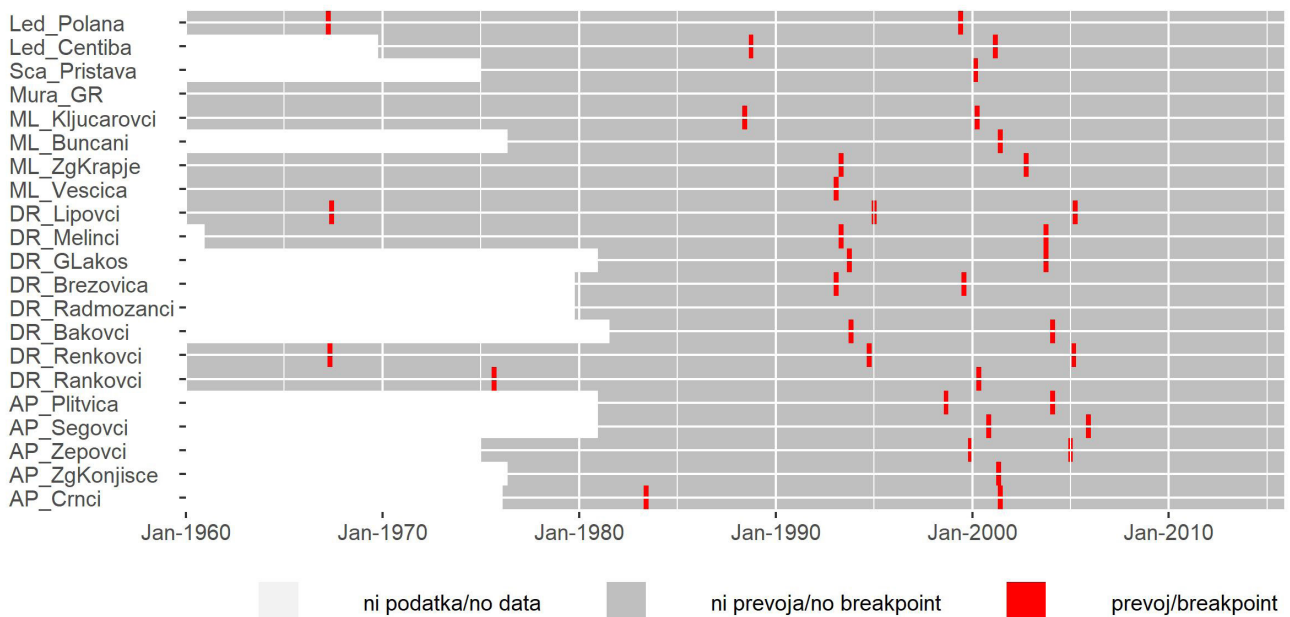
Sl. 10. Rezultati analize sekvenčnih trendov nizkih mesečnih gladin podzemne vode na izbranih merilnih mestih.
 Fig. 10. Sequential trend analysis results for low monthly groundwater levels on selected measuring stations.

(10055), Plitvica (10080), Črnci (10036)). Zadnje obdobje s pogostejšimi prevoji trendov smo opredelili z dvema časovnima intervaloma in sicer med avgustom 1999 in junijem 2001 (Ključarovci (05030), Bunčani (01055), Zgornje Krapje (05050), Brezovica (01055), Rankovci (01015), Zgornje Konjišče (10005), Črnci (10036), Segovci (10055)) in med oktobrom 2003 in decembrom 2005 (Žepovci (10020), Segovci (10055), Plitvica (10080), Bakovci (01035), Melinci (01065), Renkovci (01045), Lipovci (01040)). Smeri trendov posameznih segmentov

časovnih vrst so sorodni trendom ugotovljenim za nizke mesečne vrednosti (sl. 12). Izrazitejše izjeme v pojavu prevojnih točk srednjih mesečnih gladin podzemne vode smo določili na merilnih postajah Ključarovci (05030) na Mursko-Ljutomerskem polju (junij 1988), Rankovci (01015) (september 1975), Radmožanci (01075) (brez prevoja trenda) na območju vodonosnika Dolinsko - Ravensko in Črnci (10036) na Apaškem polju (prevoj junija 1983).



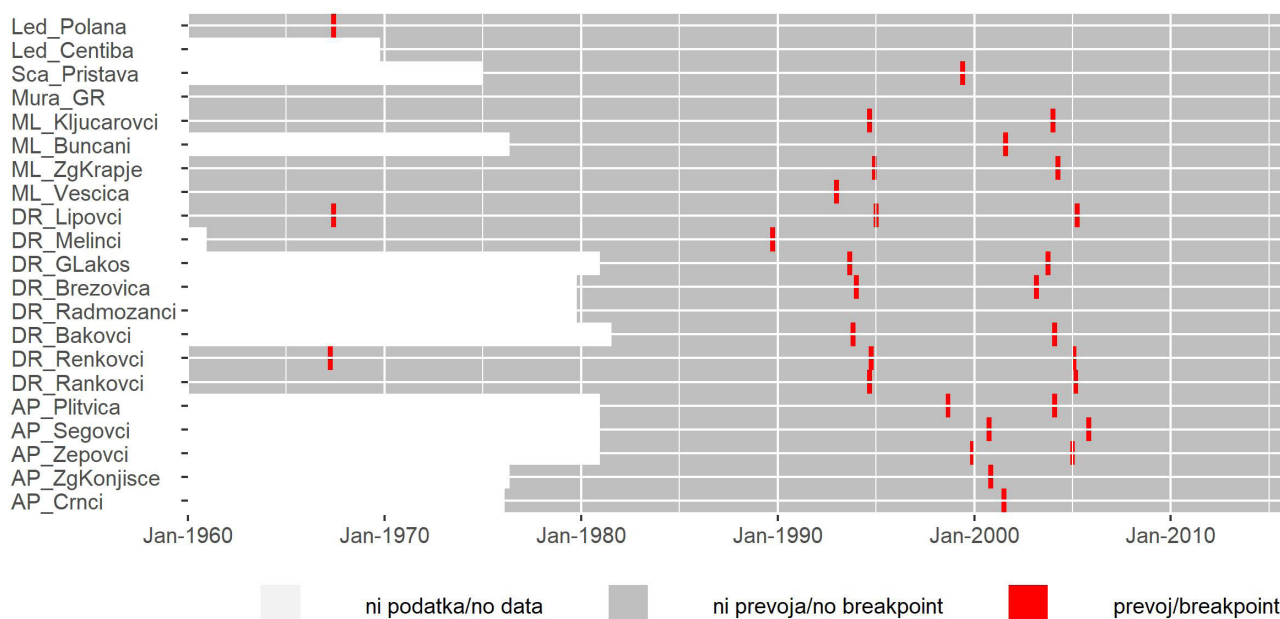
Sl. 11. Rezultati sekvenčne analize trendov nizkih mesečnih gladin podzemne vode/pretokov vodotokov med leti 1960 in 2015
 Fig. 11. Sequential trend analysis results for low monthly groundwater levels/river discharges in period from 1960 to 2015.



Sl. 12. Rezultati sekvenčne analize trendov srednjih mesečnih gladin podzemne vode/pretokov vodotokov med leti 1960 in 2015.
 Fig. 12. Sequential trend analysis results for mean monthly groundwater levels/river discharges in period from 1960 to 2015.

Rezultati analize sekvenčnih trendov visokih mesečnih vrednosti gladin podzemne vode so primerljivi z rezultati te analize za srednje mesečne vrednosti. Prvo prevojno obdobje med aprilom in junijem 1967 je značilno za Lipovce (01040) in Renkovce (01045) (sl.1), drugo med januarjem 1993 in januarjem 1995 za vse merilne postaje podzemnih voda z izjemo Melincev (01065) (prevoj določen oktobra 1989), Bunčanov

(05011) ter vseh analiziranih merilnih mest na Apaškem polju (Tabela 2). Iz zadnjega obdobja pogostega pojavljanja točk prevoja med segmenti visokih mesečnih gladin podzemne vode med novembrom 2000 in aprilom 2005 sta bili izvzeti merilni mesti Veščica (05080) in Melinci (01065) (sl. 13). V Radmožancih (01075) ni bilo ugotovljenega prevoja v nihanju visokih mesečnih vodnih količin.



Sl. 13. Rezultati sekvenčne analize trendov visokih mesečnih gladin podzemne vode/pretokov vodotokov med leti 1960 in 2015.
Fig. 13. Sequential trend analysis results for high monthly groundwater levels/river discharges in period from 1960 to 2015.

Razprava

Iz rezultatov izvedenih analiz značilnih mesečnih gladin podzemne vode na VTPodV Murska kotlina je razvidno, da se v nihanju gladine podzemne vode Pomurja odražajo kompleksni procesi, ki so lahko posledica tako naravnih kot tudi antropogenih vplivov. Ob primerjavi nihanja gladin podzemne vode med posameznimi lokacijami smo lahko z metodami, kot je percentilna analiza v kombinaciji s clustersko analizo, izdvojili območja s sorodnimi značilnostmi nihanja podzemne vode. Z analizo trendov smo prepoznali vzorce sprememb v nihanju podzemne vode skozi čas, katerih vzroke smo v prispevku do določene mere lahko povezali s preteklimi podnebnimi in hidrološkimi dogodki na raziskovanem ozemlju. Vzporednice z nastopom prevojev v sekvencah trendov mesečnih gladin podzemne vode v prispevku med drugim interpretiramo z ugotovitvami analiz standardiziranega padavinskega indeksa (SPI) na merilni postaji Murska Sobota (Dornik, 2016), standardiziranega indeksa pretoka vodotokov (SSI) na območju Pomurja (Zalokar, 2018) in standardiziranega indeksa gladine podzemne vode (SGI) na območju medzrnskih vodonosnikov severovzhodne Slovenije (Draksler et al., 2017; Adrinek & Brenčič, 2019).

Rezultati percentilne analize mesečnih gladin podzemne vode kažejo na več vzorcev nihanja gladine podzemne vode na merilnih mestih VTPodV Murska kotlina, ki jih lahko v grobem vzporejamo z rezultati clusterske analize. Glede na potek gladin podzemne vode (sl. 1, Savič,

1992) in pretekle hidrogeološke raziskave na danem ozemlju (Petauer et al., 2007; Vižintin et al., 2011; Vižintin et al., 2014; Koren et al., 2015), lahko rezultate analiz povežemo s prevladujočimi viri napajanja vodonosnika. Tako smo z omenjenima analizama na obravnavanih merilnih mestih izdvojili območja, kjer:

- je prevladujoče napajanje podzemne vode z infiltracijo padavin: Žepovci (10022) in Mali Segovci (10068) na Apaškem polju; Krog (01025), Bakovci (01035), Lipovci (01040), Rakičan (01052), Murski Petrovci (01010) in Rankovci (01015) na Dolinsko Ravenskem;
- so gladine podzemne vode pod hidrološkim vplivom režima reke Mure (napajanje/dreniranje podzemne vode): Zgornje Konjišče (10005), Črnci (10036) in Segovci (10055) na Apaškem polju; Bunčani (05011), Zgornje Krapje (05051) in Veščica (05081) na Mursko-Ljutomerskem polju; Melinci (01065) na Dolinsko Ravenskem;
- prevladujejo dotoki podzemne vode v vodonosnik iz gričevnatega zaledja: Plitvica (10080) na Apaškem polju, Ključarovci (05030) na Mursko-Ljutomerskem polju in Renkovci (01045) ter Nemčavci (01022) na Dolinsko Ravenskem;
- gre za različne vire napajanja podzemne vode na vtoku oziroma iztoku iz vodonosnikov: Skakovci (01005), Brezovica (01055), Radmožanci (01075), Kapca (01085), Gornji Lakoš (01092) in Benica (01095) na Dolinsko Ravenskem.

Na merilnih mestih: Žepovci (10022), Krog (01025), Bakovci (01035), Lipovci (01040) in Rakičan (01052) (sl. 4), ki jih je združila metoda razvrščanja v skupine (sl. 3), se opazno odraža signal primanjkljaja padavin v letih 2002, 2003 in 2004 (Dornik, 2016). V teh treh letih je na VTPodV Murska kotlina v povprečju padlo za 13 % manj padavin glede na povprečje 1981–2010. Po zelo nizkih oziroma izredno nizkih gladinah podzemne vode mestoma izstopata tudi leti 1993 in 2012. Obdobje primanjkljaja padavin med leti 2002 in 2003 ter v letu 1993 sovпада s pojavom znatno izraženih prevojnih točk nizkih mesečnih gladin podzemne vode, ugotovljenih z s sekvenčno analizo trendov (sl. 12). Za omenjena merilna mesta ocenjujemo prevladujoče napajanje podzemne vode z infiltracijo padavin v vodonosnik.

Gladine na merilnih mestih: Zgornje Konjišče (10005), Črnci (10036), Segovci (10055), Melinci (01065), Bunčani (05011), Zgornje Krapje (05051) in Veščica (05081) odražajo povezavo z režimom nihanja pretočnosti reke Mure. Mura ima s svojim snežnim režimom glavni višek v poletnih mesecih (Bat et al., 2008), kar se odraža tudi na gladinah podzemne vode, ki so v poletnih mesecih višje kot v preostalih mesecih leta (sl. 5).

Vzorec nihanja gladine podzemne vode na merilnih mestih, ki so locirana na vtoku: Skakovci (01005) in iztoku: Brezovica (01005), Radmožanci (01075), Kapca (01085), Gornji Lakoš (01092) in Benica (01095) podzemne vode iz vodonosnika Dolinsko Ravensko, sledi manjšim vodnim količinam v vodonosniku v poletnih mesecih med julijem in septembrom, na nekaterih merilnih mestih tudi v jesenskem obdobju (sl. 6). Signal sušnega obdobja 2002–2004 tukaj ni izrazit.

Merilna mesta na delih vodonosnikov, kjer prevladujejo dotoki podzemne vode iz neposrednega gričevnatega zaledja so: Plitvica (10080), Ključarovci (05030) in Renkovci (01045). Tukaj srednje mesečne gladine v poletnem času večinoma izkazujejo nižja vodna stanja kot v preostalih mesecih v posameznem letu, izstopajo pa tudi sušna obdobja v letih 1993, 2000–2004 in 2012 (sl. 7).

Merilna mesta: Mali Segovci (10068) na iztoku podzemne vode iz Apaškega polja, Murski Petrovci (01010) in Rankovci (01015) na vtoku v vodonosnik Dolinsko Ravensko ter Nemčavci (01022) na severovzhodnem obrobju istega vodonosnika, se glede na clustersko analizo grupirajo v samostojno podskupino (sl. 3). Percentilni diagrami mesečnih gladin teh merilnih mest (sl. 8) kažejo na podobno dinamiko, kot jo spremljamo pri merilnih mestih, kjer prevladuje infiltracija

padavin (sl. 4). Percentilni diagram merilnega mesta Nemčavci (01022) kaže tudi podobno dinamiko nihanja gladine podzemne vode kot merilna mesta, ki so v skupini, kjer sklepamo da je glavna napajanja iz gričevnatih zaledij (sl. 7), kar v primeru Nemčavcev pomeni vpliv dotoka podzemne vode iz Goriškega, ki je bil ugotovljen tudi v hidrogeoloških raziskavah toka podzemne vode med Prekmurskim poljem in Goričkim (Koren et al., 2015).

Analizirane časovne vrste analize monotonih in sekvenčnih trendov nimajo enako dolgega niza meritev, kar je treba upoštevati pri interpretaciji rezultatov in pri primerjavi rezultatov med merilnimi lokacijami. Rezultate smo ovrednotili glede na ugotovljene podnebne značilnosti obdobja preteklih meritev podnebnih parametrov na raziskovanem ozemlju in znane antropogene posege na raziskovanem območju. Podnebne značilnosti preteklega obdobja meritev ne kažejo nujno na podnebno spremenljivost, saj se je za simulacijo vpliva podnebnih sprememb na hidrološke spremenljivke, kot je gladina podzemne vode, potrebno poslužiti modelov, ki temeljijo ali na matematičnih konceptih, kompleksnejših statističnih analizah podatkov ali izračunih zahtevnih fizikalnih procesov, pri čemer je treba upoštevati tudi razlike v prostorskih in časovnih ločljivostih med hidrološkimi in podnebnimi modeli (Jackson et al., 2015).

Rezultati dolgoročnih monotonih trendov nihanja nizkih mesečnih gladin podzemne vode kažejo, da se na 8 od 17 analiziranih merilnih postajah gladine podzemne vode s časom statistično značilno znižujejo, na 3 statistično značilno zvišujejo, na 6 pa ni ugotovljenega statistično značilnega trenda v dolgoročnem nihanju vodnih gladin. Glede na ugotovljene podnebne značilnosti severovzhodnega dela države in ocenjeno spremembo vodne bilance v tem času lahko predvidevamo, da so glavni razlog ugotovljenih trendov zniževanja gladin podzemne vode, ki so izrazitejši med marcem in avgustom, posledica podnebnih značilnosti raziskovanega prostora v dolgoletnem obdobju opazovanj. Analize podnebja vzhodne polovice države v dobi meritev med leti 1962 in 2011 namreč kažejo na zviševanje temperature zraka spomladi in poleti, kar povečuje stopnjo evapotranspiracije in zmanjšuje količino vode, ki odteka v vodonosnike. V dolgoletnem referenčnem obdobju je za severovzhod države ocenjen tudi približno 10 % primanjkljaj padavin v pomladnem in poletnem času (Vertačnik et al., 2018).

Ker podnebnih značilnosti raziskovanega območja v celoti ne moremo povezati z rezultati analize trendov predvidevamo, da na nihanje gladine podzemne vode na območju Pomurja vplivajo tudi drugi, lokalno pogojeni dejavniki, ki so bodisi naravnega bodisi antropogenega izvora. V nadaljevanju podajamo nekaj možnih vplivov na nihanje gladine podzemne vode, ki povzročajo odklon od prevladujočega vzorca rezultatov analize monotonih trendov gladin podzemne vode.

Na gladino merilnega mesta Plitvica (10080) v vodonosniku Apaškega polja, za katero ni bilo ugotovljenega statistično značilnega trenda nihanja vodnih gladin, lokalno vpliva potok Plitvica (Petauer et al., 2007) in dotoki iz gričevnatega zaledja vodonosnika (Savić, 1992), kar lahko povzroča odstopanje od ostalih rezultatov trendov gladin podzemne vode. Merilno območje v Segovcih (10055) v istem vodonosniku, kjer se podzemna voda dolgoročno zvišuje, je pod znatnim vplivom istoimenskega črpališča. Kvaliteta načrpane vode v črpališču Segovci je odvisna od načrpane količine in intenzitete uporabe gnojil in škropiv pri predelavi poljščin na velikih površinah v zaledju vodnega vira. Črpališče ima izdatnost 70 l/s, vendar pri črpanju več kot 14 l/s kvaliteta načrpane vode ne ustreza Pravilniku o pitni vodi, saj vsebnost nitratov v načrpani vodi znatno naraste preko dopustne meje (Petauer et al., 2007), kar je privedlo do omejitve količine črpanja. Dodatni umetni poseg na območju merilne postaje Segovci (10055) je bila izgradnja aktivne zaščite vodnega vira v sklopu projekta Oskrba s pitno vodo Pomurja – sistem C med leti 2013 in 2015, ki obsega 14 črpalno nalivalnih vodnjakov (Kukovec, 2013). V Veščici (05080) na jugu vodonosnika Mursko-Ljutomerskega polja so ugotovljeni monotoni trendi v smeri zviševanja vodnih količin. Globina merilnega objekta se na tej lokaciji nahaja na približno 3 metrih (Arhiv ARSO), kar pomeni, da se meritve izvajajo v zgornjem, slabše prepustnem pokrovu glavnega vodonosnika Mursko-Ljutomerskega polja, katerega globina je na tem območju ocenjena na preko 4 metre (Petauer et al., 2007) in zato ne odražajo nujno hidrogeoloških razmer analiziranega medzrnskega vodonosnika. Posebnost rezultatov analize trendov nihanja gladine podzemne vode po posameznih mesecih na merilni postaji Zgornje Konjišče (10005) na Apaškem polju je, da se gladina podzemne vode statistično značilno znižuje v večini mesecev z izjemo decembra in januarja. Pojav si razlagamo s poglobljanjem dna struge reke Mure v njenem zgornjem toku, zaradi česar se posledično zmanjšuje intenzivnost količine napajanja

vodonosnika iz vodotoka (Feguš & Golnar, 2012).

Rezultati analize sekvenčnih trendov na območju VTPodV Murska kotlina kažejo podrobnejšo dinamiko nihanja posamezne uporabljene časovne vrste, ki je z drugimi uporabljenimi metodami ni bilo mogoče ugotoviti v enakem obsegu. Obdobja prevojev v nihanju gladin podzemne vode si v večini primerov lahko razlagamo s podnebnimi značilnostmi raziskovanega območja oziroma s pretočnostjo reke Mure, dveh robnih pogojev napajanja vodonosnikov, ki pomembno vplivata na količinsko stanje podzemne vode v Pomurju (Savić, 1992; Vižintin et al., 2014).

Prvo obdobje prevojev, ki so ga podali rezultati sekvenčne analize trendov nizkih mesečnih gladin podzemne vode, je bilo ugotovljeno na merilnih mestih v osrednjem delu vodonosnika Dolinsko Ravensko (Lipovci (01040) in Renkovci (01045)) in je nastopilo med aprilom in junijem 1967. Ugotovljen prevoj v nihanju gladin podzemne vode sovпада z vrednostmi nihanja srednjih in visokih mesečnih pretokov vodotoka Ledave v Pristavi, ne pa tudi istega vodotoka v dolvodni Čentibi. V času prevoja so se gladine podzemne vode na omenjenih merilnih postajah znižale, pretoki Ledave v Polani pa zmanjšali (sl. 9). Prvo prevojno obdobje povezujemo s spremembo v količini obnavljanja podzemne vode v tem času, povezano s spremembo v količini padavin na obravnavanem ozemlju. Z analizo standardiziranega indeksa padavin (SPI) dve oziroma večmesečne (6, 9, 12) akumulacije padavin na merilni postaji Murska Sobota je bilo namreč ugotovljeno, da je bil po padavinsko ugodnemu obdobju med oktobrom 1960 in decembrom 1967 na merilni postaji Murska Sobota zabeležen dvomesečni odklon negativnih vrednosti SPI2 v letu 1968, proti koncu leta 1971 pa tudi negativni odklon vrednosti SPI6, SPI9 in SPI12, ki se je nadaljeval v leto 1972 (Dornik, 2016). Pojav se kaže tudi v rezultatih standardiziranega indeksa pretoka (SSI) na 12 oziroma 24 kumulativni stopnji povprečnega pretoka na merilni postaji Ledava – Polana med leti 1960 in 2016, kjer po obdobju pozitivnih vrednosti indeksa SSI pred letom 1968 nastopi očitnejša sprememba v vodnatosti tega vodotoka (Zalokar, 2018). Primerljivega pojava na merilni postaji Ledava – Čentiba nismo ugotovili zaradi kasnejšega začetka izvajanja meritev na merilni postaji (Tabela. 3).

Drugo obdobje v pogostem prevoju trendov na analiziranih nizih merilnih postaj je nastopilo med februarjem 1993 in januarjem 1995, ko je večmesečno obdobje podpovprečnega napajanja vodonosnikov z infiltracijo padavin prešlo v

krajše obdobje nadpovprečnega napajanja (arhiv ARSO). Pojav je bil izražen z izrazitejšim negativnim odklonom standardiziranega padavinskega indeksa (SPI) 6 oziroma 9 mesečne akumulacije padavin na merilni postaji Murska Sobota v letih 1989, 1992 in 1993, v oktobru 1995 pa tudi z negativnim odklonom 1 in 2 mesečne akumulacije padavin na tej merilni postaji (Dornik, 2016). Prav tako je bil pojav izjemno nizkih gladin podzemne vode v tem obdobju ugotovljen tudi z znatnim odklonom standardiziranega indeksa gladin podzemne vode (SGI) v medzrnskih vodonosnikih Dravske in Murske kotline (Draksler et al., 2017, Adrinek & Brenčič, 2019). V VTPodV Murska kotlina se je pojav v sekvencah trendov odrazil skladno s količino napajanja tako, da je bilo obdobje brez trenda ali s trendom zniževanja gladine podzemne pred letom 1993 na večini merilnih mest prekinjeno zaradi dviga podzemne vode, sledilo pa je obdobje s trendom zniževanja vodnih gladin do naslednjega prevojnega obdobja, ki je na večini analiziranih merilnih postaj nastopilo med leti 2003 in 2005. Prevoja trenda med leti 1993 in 1995 ni bilo opredeljenega za merilno območje vodonosnika Apaškega polja in Bunčanov (05011) na območju vodonosnika Mursko-Ljutomerskega polja. Na dinamiko toka podzemne vode na teh merskih območjih izrazilo vpliva režim nihanja pretokov reke Mure. Značilnost pretočnosti Mure med leti 1993 in 1995 je bila, da so med majskim viškom leta 1992 in junijskim viškom leta 1995 povprečni mesečni pretoki reke odstopali od značilnega snežno dežnega pretočnega režima reke. Pričakovanih pozno pomladnih viškov zaradi tanjše snežne odeje v visokogorskem zaledju reke v letih 1993 in 1994 ni bilo, pretoki vodotoka so bili v tem času nižji od običajnih. Na drugi strani smo 1992 in 1993 spremljali povišane jesenske pretoke Mure (arhiv ARSO). Na povišano pretočnost Mure v Gornji Radgoni v začetku 90. let kažejo tudi standardizirani indeksi pretokov (SSI), ki za razliko od analiziranih standardiziranih padavinskih indeksov (SPI) v tem obdobju niso izpostavili sušnih dogodkov (Zalokar, 2018).

Tretje prevojno obdobje, ki je bilo izraženo s prevojem sekvenc trendov nizkih mesečnih gladin podzemne vode gladin med februarjem 2003 in aprilom 2005 (sl. 11), lahko povežemo s pojavom ene izmed najizrazitejših meteoroloških in hidroloških suš v zadnjem stoletju. Standardiziran indeks letne vsote padavin (SPI12) je na merilni postaji Murska Sobota v letu 2003 dosegel ekstremno nizko vrednost dolgoletnega referenčnega obdobja (Dornik, 2016), ekstremno niz-

ke vrednosti v obdobju med leti 2003 in 2005 so bile ugotovljene tudi za vse analizirane standardizirane indekse kumulativnega volumna mesečnega pretoka (1, 3, 6, 12, 24) na merilni postaji Mure v Gornji Radgoni (Zalokar, 2018), pa tudi za standardizirane indekse gladin podzemne vode na merilnih postajah Murske in Dravske kotline (Draksler et al., 2017; Adrinek & Brenčič, 2019). Na večini merilnih mest je temu prevojnemu obdobju sledilo obdobje s trendom zviševanja gladin podzemne vode, ki je trajalo do konca obdobja. Na merilnih mestih Zgornje Konjšiče (10005) na Apaškem polju, ter Veščica (05080) in Bunčani (05011) na Mursko-Ljutomerskem polju je bil prevoj trenda ugotovljen nekoliko prej kot na ostalih merilnih postajah, v letih 2000 oziroma 2001 (sl. 11, Tabela 2).

Zaključki

Na podlagi izvedenih raziskav sklenemo, da nam državna zbirka hidroloških podatkov, ob uporabi izbrane metodologije, lahko poda dragocene informacije o značilnostih nihanja podzemne vode in o spremembah teh značilnosti skozi čas. Ugotovili smo, da so za plitve medzrnske vodonosnike Pomurja značilni različni vzorci nihanja podzemne vode, ki smo jih lahko uvrstili v posamezne skupine. Dobljene skupine smo povezali s prevladujočim vplivom napajanja vodonosnikov, pri čemer smo razdvojili območja s prevladujočim napajanjem iz reke Mure od območij s prevladujočim napajanjem z infiltracijo padavin oziroma z dotoki iz gričevnatega zaledja vodonosnika. Dolgi časovni nizi podatkov, ki omogočajo vpogled v dinamiko nihanja gladin podzemne vode skozi čas, na območju plitvih aluvialnih vodonosnikov Pomurja ne kažejo enotne slike, saj smo mestoma ugotovili statistično značilno zniževanje gladin podzemne vode, mestoma statistično značilno zviševanje tega parametra, na nekaterih merilnih mestih pa trend nihanja gladin podzemne vode ni bil izražen. Znotraj posameznih časovnih vrst smo lahko določili sekvence v trendih nihanja gladin in ugotovili, da so nastopi prehoda iz ene v drugo sekvenco trenda med različnimi merilnimi postajami pogosto med seboj časovno primerljivi. Z izbranim metodološkim pristopom smo tako potrdili osnovno raziskovalno vprašanje.

Ugotovili smo, da je območje Pomurja v veliki meri odvisno od podnebni značilnosti območja, ki se odražajo v količini napajanja vodonosnikov bodisi s prenicanjem padavin, dotoki iz prispevnega zaledja ali z napajanjem iz vodotokov. Vseh trendov v nihanju gladine podzemne vode ni bilo

možno povezati s podnebnimi značilnostmi območja, kar je pokazatelj, da na količinsko stanje podzemne vode v VTPodV_Murska kotlina lokalno vplivajo tudi drugi, predvidoma antropogeni posegi v vodno okolje. Del teh posegov smo poskušali pojasniti z dostopnimi navedbami iz literature, del pa je ostal nepojasnen.

V prihodnje bi bilo podobne analize smiselno izvesti tudi za ostala vodna telesa podzemne vode s prevladujočo medzrnsko poroznostjo, na katerih razpolagamo z dolgimi nizi meritev državne mreže monitoringa podzemnih voda na več lokacijah. Na območju kraških vodonosnikov je uporabljen pristop verjetno omejen zaradi manjšega nabora merilnih mest, saj količinsko stanje podzemne vode v kraških vodonosnikih običajno spremljamo le na območju kraškega izvira, ki predstavlja koncentriran iztok podzemne vode iz celotnega prispevnega zaledja izvira.

Pogoj za uspešno analizo in njeno interpretacijo je dovolj dolg niz meritev na primerni merilni lokaciji s primerno frekvenco meritev. Ocenjujemo, da je za metodo analize dolgoročnih trendov pogoj vsaj 30 letni niz opazovanj s pogostostjo meritev vsaj trikrat mesečno. Pri clusterski analizi in analizi percentilov ocenjujemo, da dobimo zadovoljive rezultate pri vsaj 15 letnem nizu opazovanj. Pomembno pa je, da merilna lokacija odraža najpomembnejše elemente konceptualnega modela dela vodonosnika, ki ga predstavlja. Pogosto se primernost merilne lokacije izkaže šele po večletnem opazovanju gladine podzemne vode, saj šele z daljšim razpoložljivim nizom meritev lahko ovrednotimo značilnosti nihanja podzemne vode. Poleg tega se pogosto sprememba v nihanju podzemne vode zaradi umetnih vplivov na količinsko stanje podzemne vode pokaže šele po določenem odzivnem času od nastopa spremembe.

Zahvala

Avtorici se zahvaljujeva recenzentom revije za strokovni pregled članka ter konstruktivno kritiko - pripombe in nasvete, ki so privedli h končni, izboljšani vsebini in obliki članka. Iskreno se zahvaljujeva tudi kolegu dr. Mišu Andjelovu, ki nama je v večletnem skupnem delu dal dober temelj v statistiki in obdelavih podatkov ter bil odličen sogovornik pri debatah in dilemah uporabe statističnih orodij v hidrogeologiji.

Literatura

- Adrinek, S. & Brenčič, M. 2019: Statistical analysis of groundwater drought on Dravsko-Ptujsko polje. *Geologija*, 62/2: 251–266. <https://doi.org/10.5474/geologija.2019.012>
- Andjelov, M., Draksler, A., Frantar, P., Pavlič, U., Rman, N. & Souvent, P. 2019: Količinsko stanje podzemnih voda v Sloveniji. Poročilo o monitoringu 2017. Agencija Republike Slovenije za okolje, Ljubljana: 103 p.
- Andjelov, M., Frantar, P., Pavlič, U., Rman, N. & Souvent, P. 2021: Količinsko stanje podzemnih voda v Sloveniji; Osnove za NUV 2022–2027. Agencija Republike Slovenije za okolje, Ljubljana: 95 p.
- Bat, M., Frantar, P., Dolinar, M. & Fridl, J. 2008: Vodna bilanca Slovenije 1971–2000 = Water balance of Slovenia 1971–2000. Ministrstvo za okolje in prostor, Agencija Republike Slovenije za okolje, Ljubljana: 119 p.
- Bonacci, O. 2007: Analysis of long-term (1878–2004) mean annual discharges of the karst spring Fontaine de Vaucluse (France). *Acta Carsologica*, 36/1: 151–156. <https://doi.org/10.3986/ac.v36i1.217>
- Dornik, M. 2016: Standardizirani padavinski indeks - izračun in analiza za Slovenijo, Diplomaska naloga. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana: 98 p.
- Draksler, A., Frantar, P. & Savić, V. 2017: Indeks SGI – Kazalnik hidrološke suše podzemnih voda, In: 28. Mišičev Vodarski Dan: Zbirka Referatov. Vodnogospodarski biro Maribor: 62–68.
- Drobne, F. 1974: Regionalne hidrogeološke raziskave porečja zgornje Drave in Mure. *Geologija*, 17: 508–510.
- Drobne, F. 1983: Kratko poročilo o rezultatih hidrogeoloških raziskav I., II., III. In IV. Faze študije »Hidrogeologija pitne podtalnice v Pomurju«. Geološki zavod Ljubljana, Ljubljana.
- Feguš, B. & Golnar, M. 2012: Vpliv nizkega vodnega stanja reke Mure in podzemnih voda Apaškega polja na količinske in kakovostne parametre črpališča Podgrad. In: 23. Mišičev vodarski dan: Zbirka Referatov. Vodnogospodarski biro Maribor: 73–81.
- Gacin, M. 2015: Metode ocenjevanja kemijskega stanja podzemne vode na primeru Pomurja, Magistrsko delo. Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta, Ljubljana: 100 p.

- Garbrecht, J. & Fernandez, G.P. 1994: Visualization of trends and fluctuations in climatic records. *J Am Water Resour Assoc*, 30: 297–306. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1994.tb03292.x>
- Gibbons, R. D. 1994: *Statistical Methods for Groundwater Monitoring*. Wiley, New York: 304 p. <https://doi.org/10.1002/9780470172940>
- Green, T.R. 2016: Linking Climate Change and Groundwater, In: Jakeman, A.J., Barreteau, O., Hunt, R.J., Rinaudo, J.-D., Ross, A. (eds.): *Integrated Groundwater Management*. Springer International Publishing, Cham: 97–141. https://doi.org/10.1007/978-3-319-23576-9_5
- Haaf, E., Barthel, R., 2018: An inter-comparison of similarity-based methods for organisation and classification of groundwater hydrographs. *J. Hydrol*, 559: 222–237. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.02.035>
- Haas, J.C. & Birk, S. 2019: Trends in Austrian groundwater – Climate or human impact? *J. Hydrol: Regional Studies*, 22: 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2019.100597>
- Hackl, P. 2016: Moving sums (MOSUM). In: Balakrishnan, N., Colton, T., Everitt, B., Piegorsch, W., Ruggeri, F. & Teugels, J. L. (eds.): *Wiley StatsRef: Statistics Reference Online*. John Wiley & Sons, Chichester, UK: 1–6. <https://doi.org/10.1002/9781118445112.stat03107.pub2>
- Helsel, D. R. & Hirsch, R. M. 2002: *Statistical methods in water resources*. U. S. Geological Survey, Reston, Virginia: 510 p. <https://doi.org/10.3133/twri04A3>
- Jackson, C.R., Bloomfield, J.P. & Mackay, J.D. 2015: Evidence for changes in historic and future groundwater levels in the UK. *Prog Phys Geogr. Earth and Environment*, 39/1: 49–67. <https://doi.org/10.1177/0309133314550668>
- Jakeman, A.J., Barreteau, O., Hunt, R.J., Rinaudo, J.-D. & Ross, A. 2016: *Integrated Groundwater Management: Concepts, Approaches and Challenges*. Springer, Cham: 732 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-23576-9>
- Koren, K., Brenčič, M. & Lapanje, A. 2015: Hydrogeology of the transition area between Prekmursko polje and Goričko (NE Slovenia). *Geologija*, 58/2: 175–182. <https://doi.org/10.5474/geologija.2015.013>
- Kralj, P. 1979: *Hidrogeologija severnega dela Murskega polja*. Diplomsko naloga. Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta, Ljubljana: 61 p.
- Kuan, C.-M. & Hornik, K. 1995: The generalized fluctuation test: A unifying view. *Econom. Rev.*, 14/2: 135–161. <https://doi.org/10.1080/07474939508800311>
- Kukovec, B. 2013: *Analiza projektov preskrbe prebivalcev s pitno vodo na desnem bregu Mure – Sistem C*. Diplomsko naloga. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana: 70 p.
- Kumar, P., Chandniha, S.K., Lohani, A.K., Nema, A.K. & Krishan, G. 2018: Trend analysis of groundwater level using non-parametric tests in alluvial aquifers of the Uttar Pradesh, India. *Curr. World Environ*, 13/1: 44–54. <https://doi.org/10.12944/CWE.13.1.05>
- Li, H., Lu, Y., Zheng, C., Zhang, X., Zhou, B. & Wu, J. 2020: Seasonal and Inter-Annual Variability of Groundwater and Their Responses to Climate Change and Human Activities in Arid and Desert Areas: A Case Study in Yaoba Oasis, Northwest China. *Water*, 12: 1–23. <https://doi.org/10.3390/w12010303>
- Meden, S. 1981: *Režim podtalnice na melioracijskem območju SO Lendava*. Hidrometeorološki zavod SRS, Ljubljana: 15 p.
- Naranjo-Fernández, N., Guardiola-Albert, C., Aguilera, H., Serrano-Hidalgo, C., Montero-González, E., 2020: Clustering Groundwater Level Time Series of the Exploited Almonte-Marismas Aquifer in Southwest Spain. *Water*, 12: 1063. <https://doi.org/10.3390/w12041063>
- Novak, J. 2009: *Poplavna zaščita in ukrepi ob nastopu visokih voda v porečju Mure*. In: Kikec, T. (eds.): *Pomurje: Trajnostni regionalni razvoj ob reki Muri*. Zbornik Referatov. Zveza geografov Slovenije, Ljubljana: 106–126.
- Pavlič, U. & Brenčič, M. 2012: Application of sequential trend analysis for discharge characterisation of Vipava karstic springs, Slovenia. *Acta Carsologica*, 40/2: 283–291. <https://doi.org/10.3986/ac.v40i2.13>
- Pavlič, U. 2016: *Ocena zalog podzemne vode v kraškem vodonosniku na podlagi analize pretokov izvirov ob nizkem vodnem stanju*. Doktorska disertacija. Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta, Ljubljana: 150 p.
- Petauer, D., Sadnikar, J., Juren, A. & Štucin, P. 2007: *Projektna naloga za izdelavo hidrogeoloških podlag za projekt: Ureditev celovite oskrbe prebivalstva s pitno vodo in varovanje vodnih virov v Pomurju (II. faza - zaključno poročilo No. K-30-II-30d/c-4/131c)*. Geoko d.o.o., Ljubljana.
- Ploberger, W., Krämer, W. & Kontrus, K. 1989: A new test for structural stability in the linear

- regression model. *J. Econom.*, 40/2: 307–318. [https://doi.org/10.1016/0304-4076\(89\)90087-0](https://doi.org/10.1016/0304-4076(89)90087-0)
- Post, R., 2013: Percentile Groundwater Indicator Literature Review. Nottawasaga Valley Conservation Authority, Utopia, ON: 21 p.
- Prestor, J., Mali, N., Urbanc, J., Komac, M., Hribernik, K., Šinigoj, J., Janža, M., Meglič, P., Strojan, M., Brenčič, M., Lapanje, A., Rajver, D., Levičnik, L., Rikanovič, R., Bavec, M., Šajn, R., Rokavec, D. & Bizjak, M. 2005: Nacionalna baza hidrogeoloških podatkov za opredelitev teles podzemne vode Republike Slovenije. Geološki zavod Slovenije, Ljubljana.
- Satish Kumar, K. & Rathnam, E.V. 2020: Comparison of six trend detection methods and forecasting for monthly groundwater levels – a case study. *ISH J. Hydraul. Eng.*, 1–10. <https://doi.org/10.1080/09715010.2020.1715270>
- Savič, V. 1992: Tokovnice območja napajanja in dreniranja aluvialnih vodonosnikov: simultane meritve v letu 1992 ob nizkem hidrološkem stanju (Interno kartografsko gradivo). Hidrometeorološki zavod Ljubljana, Ljubljana.
- Shamsudduha, M., Chandler, R.E., Taylor, R.G. & Ahmed, K.M. 2009: Recent trends in groundwater levels in a highly seasonal hydrological system: the Ganges-Brahmaputra-Meghna Delta. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 13: 2373–2385. <https://doi.org/10.5194/hess-13-2373-2009>
- Souvent, P., Gale, U., Mikulič, Z., Andjelov, M., Trišić, N. & Savič, V. 2007: Stokovna izhodišča za izpopolnitev mreže za spremljanje količin podzemne vode (Interno poročilo No. 9-1241-1). Agencija Republike Slovenije za okolje, Ljubljana: 104 p.
- Tallaksen, L.M. & Van Lanen, H.A.J. 2004: Hydrological Drought. Processes and Estimation Methods for Streamflow and Groundwater. *Developments in Water Science*, 48, Elsevier Science, Amsterdam: 579 p.
- Taylor, C.J. & Alley, W.M. 2001: Ground-Water-Level Monitoring and the Importance of Long-Term-Water-Level Data, Circular 1217. U. S. Geological Survey, Reston, Virginia: 68 p.
- Vertačnik, G., Bertalanič, R., Draksler, A., Dolinar, M., Vlahovič, Ž. & Frantar, P. 2018: Podnebna spremenljivost Slovenije v obdobju 1961-2011 (Povzetek). Agencija Republike Slovenije za okolje, Ljubljana: 23 p.
- Vižintin, G., Supovec, I., Tancar, M.T. & Celarc, S. 2014: Mejnik 8/1 - Izvedba nadgradnje numeričnega modela toka podzemne vode za Mursko in Prekmursko polje za ekspertno numerični sistem, končno poročilo (3. sklop: Ekspertno numerični sistem za podporo odločanju na aluvijalnih telesih podzemnih voda Slovenije No. P4B), BOBER - Boljša Opazovanja za Boljše Ekološke Rešitve. HGEM d.o.o.: Hidrogeologija, Geotehnologija, Ekologija, Monitoring, Ljubljana: 23 p.
- Vižintin, G., Supovec, I. & Tancar, M.T. 2011: Mejnik 2 - Konceptualni model za Mursko - Prekmursko polje (3. sklop: Ekspertno numerični sistem za podporo odločanju na aluvijalnih telesih podzemnih voda Slovenije No. P1B), BOBER - Boljša Opazovanja za Boljše Ekološke Rešitve. HGEM d.o.o.: Hidrogeologija, Geotehnologija, Ekologija, Monitoring, Ljubljana: 33 p.
- Yue, S., Pilon, P. & Cavadias, G. 2002: Power of the Mann-Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series. *J. Hydrol.*, 259/1-4: 254–271. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00594-7](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00594-7)
- Zalokar, L. 2018: Izbira sušnega indeksa za razglasitev hidrološke suše površinskih voda v Sloveniji, Magistrsko delo. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana: 66 p.
- Zeileis, A., Leisch, F., Hornik, K. & Kleiber, C. 2002: strucchange: An R Package for Testing for Structural Change in Linear Regression Models. *J. Stat. Soft.* 7: 1 - 38. <https://doi.org/10.18637/jss.v007.i02>
- Zupančič, N. 2013: Statistika v geologiji 1: univerzitetni učbenik. Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta, Ljubljana: 172 p.