

Prošireni sažetak

Voda namijenjena javnoj vodoopskrbi ulazi u javni vodoopskrbni sustav (VS) u skladu s propisanim standardima za vodu namijenjenu ljudskoj potrošnji (Diretiva (EU) 2020/2184, 2020). Prije toga prolazi kroz različite stupnjeve obrade, ovisno o kvaliteti izvorišne vode, kako bi zadovoljila te standarde te se dezinficira prije ulaska u sustav. Ipak, i unutar samog distributivnog sustava voda je podložna različitim fizikalnim, kemijskim i biološkim procesima koji mogu utjecati na njezinu kvalitetu i organoleptička svojstva koja primjećuju potrošači. Javni isporučitelji kontinuirano prate kvalitetu vode u sustavu putem vlastitih ili akreditiranih vanjskih laboratorija, prikupljajući podatke koji omogućuju uvid u usklađenost vode s propisanim zahtjevima.

U ovom istraživanju rutinski rezultati praćenja nadopunjeni su eksperimentalnim podacima prikupljenima tijekom jednogodišnje kampanje uzorkovanja, s ciljem procjene glavnih kationa, aniona i stabilnih izotopa vode. Istraživano područje obuhvaća javni vodoopskrbni sustav kojim upravlja Varkom d.o.o. u Varaždinskoj županiji, sjeverozapadna Hrvatska. Na temelju ovih podataka procijenjena je statistička značajnost razlika u osnovnim parametrima kvalitete vode između različitih lokacija u sustavu, kao i vrijeme zadržavanja vode u mreži. Rezultati su pokazali tek manje promjene u kemijskom sastavu vode unutar sustava, koje su ostale ispod maksimalno dopuštenih koncentracija (MDK) za ljudsku potrošnju. Ipak, čimbenici poput vremena zadržavanja vode, stvaranja naslaga kalcijeva karbonata, promjena pH vrijednosti i mikrobiološkog rasta mogu utjecati na prikladnost vode, što ukazuje na potrebu za daljnjim istraživanjima mogućih rizika koji utječu na njezinu kvalitetu.

Učinkovito upravljanje sustavom javne vodoopskrbe ključno je za osiguranje sigurne vode za piće. Kako bi se postigla cjelovita karakterizacija sustava, prikupljeni podaci integrirani su s geokemijskim modeliranjem. Proces miješanja vode u sustavu procijenjen je pomoću triju pristupa:

i) modelom masene ravnoteže (MB); ii) inverznim geokemijskim modeliranjem pomoću softvera PHREEQC (IM); te iii) direktnim (forward) geokemijskim modeliranjem pomoću softvera NETPATH, koji se temelji na pristupu modeliranja krajnjih članova (FM).

Inverzno modeliranje pokazalo se pouzdanijim u odnosu na izravno modeliranje i model masene ravnoteže. Rezultati su pokazali da zapadni, jugozapadni i sjeverni dijelovi sustava primaju vodu iz sva tri izvora, dok se istočni, jugoistočni i sjeverni dijelovi uglavnom oslanjaju na dublji vodonosnik crpilišta Bartolovec, što ukazuje na potencijalnu ranjivost. Strogi kriteriji validacije osigurali su pouzdanost rezultata, potvrđujući učinkovitost i primjenjivost geokemijskog modeliranja u planiranju sigurnosti i upravljanja opskrbom vodom.

Podzemne vode i vodoopskrbni sustavi sve su osjetljiviji na onečišćenje, no većina procjena razmatra hidrogeološke ili infrastrukturne rizike zasebno. Ovo istraživanje uvodi Total Integrated Network (TIN) pristup, sveobuhvatan okvir osmišljen za procjenu ranjivosti od izvora do slavine. Terenska istraživanja provedena su u Varaždinskoj županiji, s fokusom na izvor Belski Dol, vodospremu Briška i precrpnu stanicu Filipići. Provedene su hidrokemijske analize, određivanje stabilnih izotopa vode ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$), tricija, plemenitih plinova i koncentracija radona, u kombinaciji s procjenama na razini sustava.

Rezultati su pokazali da izvor Belski Dol karakterizira visoka stabilnost i niska ranjivost, s TIN indeksom od približno 25 %, što je povezano s dugim vremenom zadržavanja podzemne vode i stabilnom kvalitetom. Precrpnna stanica Filipići pokazala je umjerenu ranjivost (35 %), dok je vodosprema Briška imala najviši indeks (53 %), što se povezuje s povišenim koncentracijama radona i nitrata te infrastrukturnim rizicima. Ovi rezultati ukazuju da prirodna hidrogeološka zaštita sama po sebi ne može osigurati sigurnu vodu za piće. TIN pristup naglašava važnost

integracije uvjeta u vodonosniku s učinkom distribucijskog sustava kako bi se identificirale ključne kontrolne točke i odredili prioriteti za intervencije.

Ukratko, rezultati prikazuju učinkovito i poboljšano upravljanje vodoopskrbnim sustavom korištenjem svakodnevnih rutinskih analiza vode, dopunjenih izotopnim analizama kroz geokemijsko modeliranje i procjenu ranjivosti sustava TIN metodologijom. Na taj način je dobivena realnija osnova za upravljanje sigurnošću vodoopskrbe, podupirući proaktivne mjere za poboljšanje otpornosti sustava i zaštitu javnog zdravlja.

Ključne riječi: vodoopskrbni sustav, geokemijsko modeliranje, vrijeme zadržavanja vode, izotopi, kemijski sastav, ranjivost, TIN pristup, Varaždinska županija

Extended abstract

Water intended for public supply enters the water supply system (WSS) in accordance with the prescribed standards for water intended for human consumption (Directive (EU) 2020/2184, 2020). Prior to this, it undergoes varying degrees of treatment, depending on the quality of the source water, to meet these standards, and is disinfected before entering the WSS. Nevertheless, once within the distribution network, the water remains subject to various physical, chemical, and biological processes that can degrade its quality and affect its organoleptic properties perceived by consumers. Public utilities continuously monitor water quality within the system through internal or accredited external laboratories, collecting data that provide insight into compliance with regulatory requirements.

In this study, routine monitoring results were complemented by experimental data obtained during a one-year sampling campaign aimed at assessing major cations, anions, and stable isotopes of water. The study area comprised the public water supply system managed by Varkom d.o.o. in Varaždin County, northwestern Croatia. Using these datasets, the statistical significance of variations in fundamental water quality parameters among different WSS locations was evaluated, along with the estimation of water residence time within the system. The results revealed only minor variations in water chemistry throughout the WSS, remaining below the Maximum Contaminant Level (MCL) for human consumption. However, factors such as water retention time, calcium carbonate scaling, pH variability, and microbial growth may influence overall water suitability, highlighting the need for further research into potential risks affecting water quality.

Effective management of WSS is essential to ensure the provision of safe drinking water. To achieve a comprehensive characterization of the system, the collected data were integrated with geochemical modeling. The water mixing processes within the WSS were evaluated using three complementary approaches:

i) mass balance (MB); ii) inverse geochemical modeling using PHREEQC software (IM); and iii) forward geochemical modeling via NETPATH software, based on end-member mixing (FM). Inverse modeling proved to be more reliable than both forward and mass balance approaches. The results indicated that the western, southwestern, and northern sectors of the WSS receive water from all three sources, while the eastern and southeastern sections primarily rely on the deeper Bartolovec wellfield aquifer, indicating potential vulnerability. Rigorous validation criteria ensured the robustness of the findings, demonstrating the efficiency and applicability of geochemical modeling for water security and management planning.

Groundwater and distribution systems are increasingly susceptible to contamination, yet most assessments address either hydrogeological or infrastructural risks. This study introduces the Total Integrated Network (TIN) approach, a comprehensive framework designed to evaluate vulnerability from source to tap. Field investigations were conducted in Varaždin County, Croatia, focusing on the Belski Dol spring, Briška reservoir, and pumping station (PS) Filipići. Hydrochemical analyses, stable isotopes of water ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$), tritium, noble gases, and radon concentrations were monitored and combined with system-level evaluations.

The results indicate that the Belski Dol spring exhibits high stability and low vulnerability, with a TIN index of approximately 25%, supported by long groundwater residence times and stable water quality. PS Filipići shows moderate vulnerability (35%), whereas the Briška reservoir records the highest index (53%), linked to elevated radon and nitrate concentrations and infrastructure-related risks. These findings suggest that natural hydrogeological protection alone cannot guarantee safe drinking water. The TIN framework emphasizes the necessity of

integrating aquifer characteristics with distribution system performance to identify critical control points and prioritize mitigation measures.

In summary, the results demonstrate effective and improved management of the water supply system using routine daily water analyses, supplemented by isotopic analyses through geochemical modeling and system vulnerability assessment using the TIN methodology. This approach provides a more realistic basis for water supply security management, supporting proactive measures to improve system resilience and protect public health.

Keywords: water supply system, geochemical modeling, water retention time, isotopes, chemical composition, vulnerability of groundwater and water supply system, TIN approach, Varaždin County