

Prostorski model visečih vodonosnikov na Ljubljanskem polju

Perched aquifers spatial model: a case study for Ljubljansko polje (central Slovenia)

Dejan ŠRAM¹, Mihael BRENČIČ^{1,2}, Andrej LAPANJE¹ & Mitja JANŽA¹

¹Geološki zavod Slovenije, Oddelek za hidrogeologijo, Dimičeva ul. 14, SI-1000 Ljubljana

²Naravoslovnotehniška fakulteta, Oddelek za geologijo, Aškerčeva cesta 12, SI-1000 Ljubljana;

e-mail: dejan.sram@geo-zs.si; mihael.brencic@geo.ntf.uni-lj.si; andrej.lapanje@geo-zs.si; mitja.janja@geo-zs.si

Prejeto / Received 21. 3. 2012; Sprejeto / Accepted 11. 6. 2012

Ključne besede: viseči vodonosnik, geostatistično modeliranje, Ljubljansko polje, medzrnski vodonosnik

Key words: perched aquifer, geostatistical modeling, Ljubljansko polje, intergranular aquifer

Izvleček

Vodonosnik Ljubljanskega polja je eden izmed največjih in najpomembnejših vodonosnikov v Sloveniji. V večjem delu je vodonosnik odprt, na nekaterih območjih, v jugozahodnem delu pa se pojavljajo slabše prepustne plasti, kjer nastanejo viseči vodonosniki. Na podlagi obdelave litoloških podatkov iz vrtin je bil s pomočjo geostatističnega modeliranja s sekvenčno indikatorsko simulacijo izdelan hidrogeološki model zahodnega dela Ljubljanskega polja s poudarkom na prepustnosti litoloških enot. Iz hidrogeološkega modela so bile izločene slabše prepustne plasti s koeficientom prepustnosti $K < 10^{-6}$ m/s in površino večjo od 0,07 km², ki so potencialna območja za pojav visečih vodonosnikov. Rezultati modela kažejo največjo koncentracijo slabše prepustnih plasti pod vznožjem Šišenskega in Grajskega hriba.

Abstract

Ljubljansko polje aquifer is one of the biggest and most important aquifers in Slovenia. In general it is an unconfined aquifer, but locally, on the SW part, layers with low hydraulic conductivity appear and on those areas perched aquifers are formed. Based on lithological data from boreholes (emphasizing hydraulic conductivity of lithological units) and use of geostatistical method Sequential Indicator Simulation (SIS) hydrogeological model of western part of Ljubljansko polje was made. In the model layers with hydraulic conductivity $K < 10^{-6}$ m/s and area larger than 0.07 km² were defined as potential areas of perched aquifers. The majority of them are located on the foothills of Šišenski and Grajski hrib.

Uvod

Vodonosnik Ljubljanskega polja je eden izmed največjih vodonosnikov v Sloveniji. Iz njega se s pitno vodo oskrbuje preko 300.000 prebivalcev Ljubljane in okolice, zato je njegova zaščita in poznavanje njegovih geoloških lastnosti izjemnega pomena.

Vodonosnik je tema raziskav že vse od konca 19. stoletja in je zaradi tega že zelo dobro raziskan, njegove karakteristike in možnosti izkoriščanja so dobro opredeljene, kljub temu pa je zaradi pestre geologije še veliko neznanega oziroma neraziskanega. Med slabo raziskane pojave spadajo tudi viseči vodonosniki.

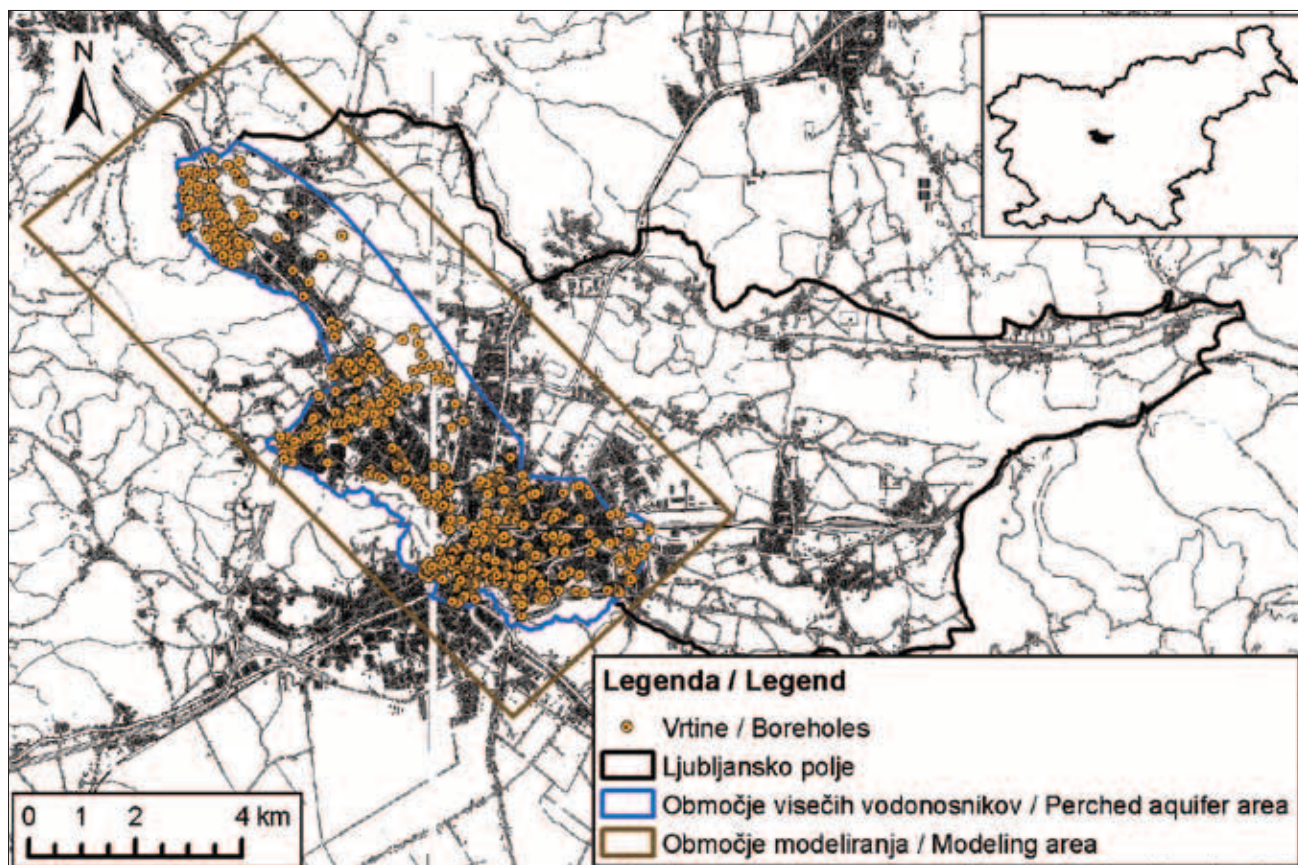
Vodonosnik je razvit v kotlini, ki je zasuta s kvartarnim rečnim prodom in peskom z vmesnimi lečami melja, glin in konglomerata (ŽLEBNIK, 1971). Slabše prepustne plasti med bolj prepustnimi plastmi omogočajo nastanek visečih vodonosnikov. Iz dosedanjega poznavanja hidrogeoloških lastnosti vodonosnika Ljubljanskega polja se do-

mneva, da je porazdelitev visečih vodonosnikov pomembna s stališča vpliva na kemijsko stanje podzemne vode in na razširjanje onesnaževal, vendar pa je njihovo trenutno poznavanje relativno omejeno.

Namen izdelave prostorskega modela visečih vodonosnikov je določitev razprostiranja slabše prepustnih plasti znotraj dobro prepustnega nezasičenega dela vodonosnika v zahodnem delu Ljubljanskega polja. Na podlagi obstoječih podatkov o že znanih visečih vodonosnikih in litoloških popisov vrtin so bila določena potencialna območja visečih vodonosnikov.

Obravnavano območje

Obravnavano območje se nahaja v osrednji Sloveniji in je del Ljubljanske kotline. Razteza se v smeri od severozahoda proti jugovzhodu. Severno in severovzhodno mejo predstavljajo Šmarna gora (669 m), Soteški hrib (406 m) in Videmski hrib



Sl. 1. Ljubljansko polje, območje visečih vodonosnikov, območje modeliranja ter lokacije vrtin

Fig. 1. Ljubljansko polje, perched aquifer area, modeling area and boreholes locations

(371 m). Na zahodu območje meji na Polhograjsko hribovje, ki se južno nadaljuje v Šišenski hrib (429 m) ter Grajski hrib. Na jugu in jugovzhodu je območje omejeno z reko Ljubljanico ter zahodnim Posavskim hribovjem (sl. 1).

Območje modeliranja je omejeno glede na znane podatke, kjer se pojavljajo viseči vodonosniki in sicer na zahodni del Ljubljanskega polja tj. Šiška, Vižmarje ter center mesta Ljubljane do Most (sl. 1).

Podlago Ljubljanskega polja sestavljajo karbonske in permske kamnine, ki jih tvorijo kremeni konglomerati, peščenjaki, meljevci in glinasti skrilavci (ŽLEBNIK, 1971; PREMUR, 1983; KOLAR-JURKOVŠEK & JURKOVŠEK, 2007). Največja globina do predkvartarne podlage je 105 m (BRAČIČ-ŽELEZNIK et al., 2005).

V pleistocenu in holocenu so Ljubljansko udorino s svojimi nanosi zapolnjevale številne reke in potoki, od tega največji delež pripada prodno peščenim naplavinam reke Save (BRAČIČ-ŽELEZNIK et al., 2005). Prod in pesek sta pogosto sprijeta v konglomerat.

Med pleistocenskimi sedimenti prevladujejo karbonatni konglomeratni in prodni zasipi (PREMUR, 1983). Sedimentacijo, erozijo in razvoj Ljubljanske kotline je podrobno preučil ŽLEBNIK (1971), ki je na območju ločil tri konglomeratne zasilne in zgornji prodni zasip, ki oblikujejo visoke terase. Nad vsakim zasipom se na več mestih pojavljajo glinene plasti s preperelimi prodniki. Absolutna starost zasipov ni določena. Relativno

datiranje je možno le na podlagi lege glin, ki se nahajajo med zasipi.

Viseči vodonosnik

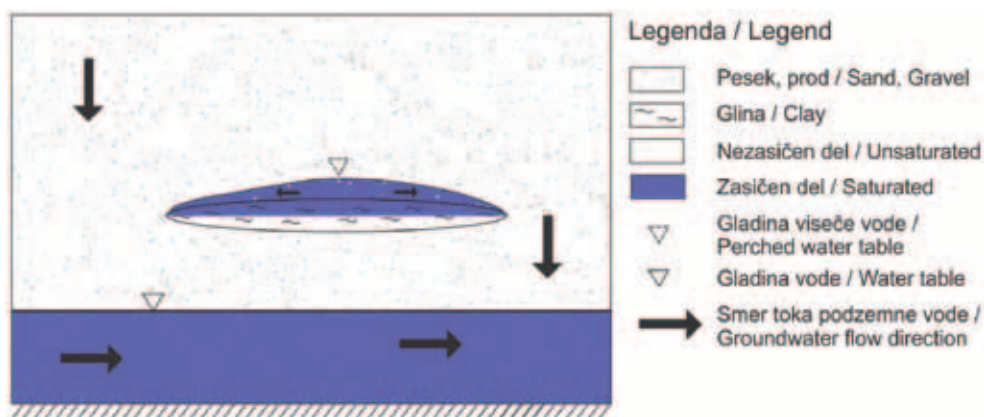
Viseči vodonosnik je pojav podzemne vode v pretežno nezasičenem delu vodonosnika nad regionalno gladino podzemne vode v odprtem vodonosniku. Do nastanka visečega vodonosnika pride, ko voda med vertikalnim tokom skozi nezasičeno območje naleti na zelo slabo prepustne plasti, kot so na primer leče gline. Zaradi tega se voda nabere nad glineno plastjo in prične odtekati horizontalno do roba slabo prepustne plasti, ko se ponovno prične precejati v vertikalni smeri (sl. 2). Obseg visečega vodonosnika in debelina omočenega dela sta sezonsko zelo spremenljivi.

Metode

Prostorski model visečih vodonosnikov na Ljubljanskem polju je bil izdelan na podlagi:

- klasifikacije litoloških podatkov,
- izdelave tridimenzionalnega strukturnega modela,
- geostatistične analize.

Klasifikacija litoloških podatkov izhaja iz popisov vrtin, ki so bili poenoteni s pomočjo geomehanske AC klasifikacije ter uporabi koncepta hidrofaciesa. Arthur Casagrande (AC) klasifikacija



Sl. 2. Viseči vodonosnik (prirejeno po HISCOCK, 2005)
 Fig. 2. Perched aquifer (modified after HISCOCK, 2005)

razvršča zemljine v posamezne razrede, glede na velikost njihovih delcev in plastičnost. Posamezni hidrofacies zajema sedimente, ki so nastali v enotnem sedimentacijskem okolju in imajo primerljive hidrogeološke lastnosti (ANDERSON, 1989). Na podlagi teh izhodišč je bilo določenih pet skupin. Prve štiri skupine predstavljajo hidrofaciesi (tab. 1), v zadnjo, peto skupino so uvrščene vse ostale enote AC klasifikacije.

Primerno urejeni podatki so bili nato vključeni v programski paket Jewel Suite 2011 (JOA OIL & GAS, 2011), kjer se je izvedla geostatistična interpolacija.

Tridimenzionalni strukturni model je namenjen opredelitvi meje modeliranega območja. V tem modelu se določi površje in podlago modela.

Geostatistična analiza predstavlja najbolj kompleksen del izdelave prostorskega modela visečih vodonosnikov. Izvedena je bila s programskim paketom Jewel Suite 2011, ki omogoča izdelavo zahtevnih tridimenzionalnih strukturnih in geoloških modelov. Programska oprema za geostatistično analizo je bila izbrana glede na dostopne programe in ocenjeno primernost metod. Za izdelavo porazdelitve slabše prepustnih plasti je bil preizkušen tudi program Rockworks, ki se je izkazal za manj uporabnega od Jewel Suite 2011 (ŠRAM, 2011). Rockworks uporablja interpolacijsko metodo »lithological blending«, ki deluje po principu najbližjih znanih enot. Interpolacija poteka tako, da program radialno iz celice z znano

vrednostjo pripiše enako vrednost vsaki naslednji celici, vse dokler nimajo vse celice v modelu določene vrednosti. Ta interpolacijska metoda se je izkazala za neprimerno predvsem na območjih, kjer ni veliko podatkov saj tam posledično dobimo na relativno velikem območju samo vrednosti ene točke. Jewel Suite 2011 za interpolacijo ponuja vrsto metod, ki so uporabne za parametrične spremenljivke. Za neparametrične spremenljivke pa je primerna sekvenčna indikatorska simulacija, ki je bila uporabljena za izdelavo opisanega modela visečih vodonosnikov.

Semivariogram

Prvi korak pri uporabi geostatističnih metod je analiza povezanosti prostorskih spremenljivk. To pomeni, da se mora najprej določiti funkcija, ki opiše prostorsko odvisnost spremenljivk. Statistika, ki podaja odvisnost prostorske spremenljivke od položaja v prostoru, se imenuje semivarianca:

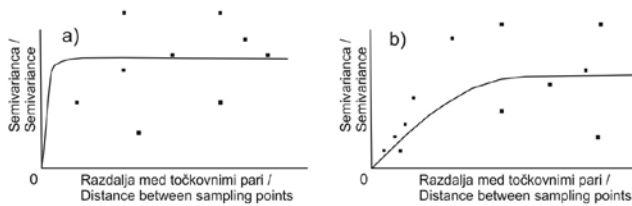
$$\gamma = \frac{(X_i - X_j)^2}{2}$$

kjer je X vrednost spremenljivke v točkah i in j . Za točki na istem mestu ($i = j$) bo vrednost semivariance enaka nič. Ko oddaljenost med njima narašča, prav tako narašča vrednost semivariance ($\gamma \geq 0$) (MCKILLUP & DYAR, 2010) (sl. 3).

Tabela 1. Osnovne značilnosti hidrofaciesov (JANŽA, 2009)

Table 1. Attributes of the hydrofacies (JANŽA, 2009)

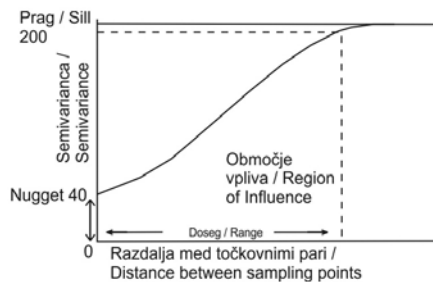
| Hidrofaciesi / Hydrofacies | Geološke interpretacije / Geologic interpretations | Pogosti opisi / Common descriptions |
|--|--|--|
| <i>P – Prod / Gravel</i> | Sedimenti rečnih kanalov / Channel deposits | Prod, peščen prod, sortiran pesek / Gravel, sandy gravel, pebbles, well sorted sand |
| <i>MGP – Melj in glina s prodrom / Silt and clay with gravel</i> | Produkt pedogenih procesov, zapolnitev prostora med prodniki z drobno frakcijo, sedimenti gravitacijskih tokov / Products of pedogenic processes, fine grained sediments, filled pore space between pebbles, debris flow sediments | Meljast ali glinen prod, melj ali glina s prodniki / Silty or clayey gravel, silt and clay with gravel |
| <i>MG – Melj in glina / Silt and clay</i> | Sedimenti poplavnih ravnin, produkt pedogenih procesov / Flood plain sediments, products of pedogenic processes | Melj, glina, glinast melj, slabo sortiran pesek / Silt, clay, clayey silt, poorly graded sand |
| <i>Ko – Konglomerat / Conglomerate</i> | Litificirani rečni sedimenti (predvsem rečnih kanalov) / Lithified river sediments (mainly channel sediments) | Konglomerat, konglomerat z vložki proda ali peska / Conglomerate, conglomerate with intercalations of gravel or sand |



Sl. 3. Teoretični semivariogram: (a) brez regionalne odvisnosti in (b) z regionalno odvisnostjo (prirejeno po MCKILLUP & DYAR, 2010).

Fig. 3. The theoretical semivariogram: (a) No regional dependence and (b) with regional dependence (modified after MCKILLUP & DYAR, 2010).

Semivarianca se z večanjem razdalje med točkami povečuje, posledično pa se zmanjša regionalna odvisnost. Semivarianca narašča samo do določene meje, ki ji pravimo doseg oziroma območje vpliva (sl. 4). Doseg določa soseščino, znotraj katere so vrednosti med seboj odvisne. Največja dosežena vrednost semivariance znotraj dosega se imenuje prag (ang. sill) (sl. 4) in predstavlja zgornjo mejo semivariance. Ko teoretični semivariogram preseže vrednost praga, točke nimajo več medsebojnega vpliva (MCKILLUP & DYAR, 2010).



Sl. 4. Teoretični semivariogram (prirejeno po MCKILLUP & DYAR, 2010).

Fig. 4. Theoretical semivariogram (modified after MCKILLUP & DYAR, 2010).

Krigiranje

Osnovno krigiranje je ena izmed bolj pogosto uporabljenih interpolacijskih metod, ki nam poda neznano vrednost (Z) v eni (x_0) ali več točkah ali na večjih površinah z malo znanimi vrednostmi, in sicer glede na znane vrednosti v njeni okolici in ustrezen semivariogram (WEBSTER, 2007):

$$\hat{Z}(x_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(x_i),$$

kjer je λ_i utežnostni koeficient, katerega izračunamo na podlagi oddaljenosti točk, ki se nahajajo znotraj semivariograma (MALVIĆ, 2008).

Za pravičen izračun krigirane vrednosti je potrebno vpeljati in rešiti še dodatno enačbo (DAVIS, 2002; BOHLING, 2005):

$$\hat{\sigma}^2(x) = \sum_{i=1}^N \lambda_n \gamma(x_n - x) - \mu_n,$$

kjer je

- $\hat{\sigma}^2(x)$ varianca napake,
- λ_n utežnostni koeficient,
- γ semivarianca,
- μ_n Langrageov multiplikator.

Indikatorsko krigiranje

Osnovno krigiranje ocenjuje vrednost regionalne parametrične spremenljivke (koncentracije, gladina podzemne vode, ...) na neznanem območju. Velikokrat pa se pojavijo potrebe po oceni neparametričnih spremenljivk (npr. litološki podatki). Na tem mestu je priročno indikatorsko krigiranje, ki uporablja binarne spremenljivke oz. indikatorje. V indikatorje je moč spremeniti tudi zvezne spremenljivke, kadar želimo imeti informacije o prekoračitvi mejne vrednosti (WEBSTER, 2007):

$$\omega(x) = \begin{cases} 1; & z(x) \leq z_c \\ 0; & \text{drugače} \end{cases}$$

kjer je z_c mejna vrednost.

Indikatorsko krigiranje je z vpeljavo indikatorjev rešljivo s preprostim krigiranjem:

$$\hat{\Omega}(x_0; z_c) = \sum_{i=1}^N \lambda_i \omega(x_i; z_c) + \left\{ 1 - \sum_{i=1}^N \lambda_i \right\} (\bar{\omega}; z_c),$$

kjer je

$\hat{\Omega}$ indikatorska funkcija,

λ_i utež,

ω indikator,

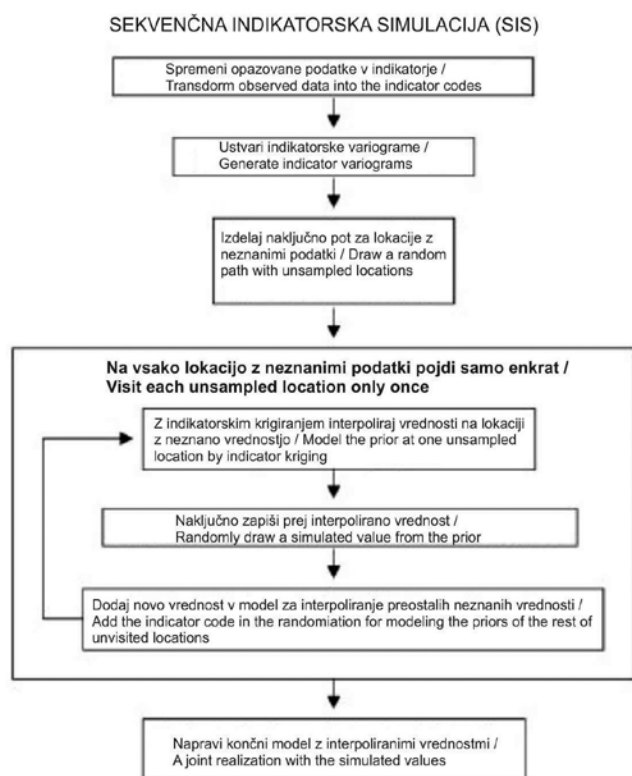
$\bar{\omega}$ povprečje indikatorja

z_c mejna vrednost.

Sekvenčna indikatorska simulacija

Sekvenčna indikatorska simulacija je metoda, ki združuje parametrične in neparametrične interpolacijske metode za oceno neznanih vrednosti. Temelji na zaporednih simulacijah in indikatorskem krigiranju (sl. 5). Vključuje vse podatke v dosegu, določene na semivariogramu, originalne podatke in že prej simulirane vrednosti (JUANG et al., 2004) in uporablja algoritem, ki temelji na vsaki celici posebej (DEUTSCH, 1999). Je metoda, ki spada med naključne (stohastične) simulacije. Krigiranje, kot deterministična metoda teži k srednji vrednosti podatkov, kar pomeni, da podcenjuje najvišje vrednosti in precenjuje najnižje vrednosti, medtem ko stohastične metode ne uporabljajo srednje vrednosti in podajajo rezultate v celotnem razponu vrednosti vhodnih podatkov (WEBSTER, 2007).

Sekvenčno indikatorsko simulacijo so uporabili mnogi raziskovalci, tako za dvodimenzionalno (JUANG et al., 2004) kot za tridimenzionalno modeliranje (CABELLO, 2007; ZAPPA et al., 2006).



Sl. 5. Potek sekvenčne indikatorske simulacije (prirejeno po JUANG et al., 2004).

Fig. 5. Sequential indicator simulation flow chart (modified after JUANG et al., 2004).

Hierarhična sekvenčna interpolacija je metoda, ki s pomočjo sekvenčne indikatorske simulacije izdeluje parcialne modele, kateri se na koncu združijo v končni model. CABELLO et al. (2007) ter ZAPPA et al. (2006) ugotavljajo njene prednosti, saj zaradi heterogenosti litoloških enot ni primerno uporabiti enotnih parametrov za celoten model. Jewel Suite 2011 omogoča izdelavo semivariograma za vsako spremenljivko posebej v horizontalni in vertikalni smeri, kar omogoča uporabo hierarhične sekvenčne simulacije. Priprava semivariograma in izbira najbolj ustreznega modela za semivariogram sta ključnega pomena pri interpolacijski metodi. V primeru napačne izbire parametrov semivariograma, so rezultati lahko popačeni ali celo napačni.

Sekvenčna indikatorska simulacija je interpolacijska metoda, s katero je moč dobiti različne, vendar enako verjetne modele iz enakih vhodnih podatkov. Predstavljen hidrogeološki model je ena izmed možnih realizacij metode.

Za izdelavo prostorskega modela so bile potrebne poenostavitve podatkov, prav tako pa so v modelu vključeni že predhodno obdelani podatki (popis jeder vrtin). Zanesljivost modela je tako odvisna od kakovosti litološkega popisa jedra vrtin (JANŽA, 2009), določitev pravilne razdalje za povprečeneje podatkov pri izdelavi semivariograma, ter pravilne izbire teoretičnega modela za indikatorski semivariogram.

Rezultati

Klasifikacija litoloških podatkov

Pri izdelavi hidrogeološkega modela so izhodišče predstavljali popisi jeder vrtin na izbranem območju (sl. 1). Obdelanih je bilo 1138 vrtin s skupno dolžino opisanih odsekov 20944 m. Pri obdelavi so se uporabili vsi dostopni podatki iz poročil arhiva Geološkega zavoda Slovenije, kjer se nahajajo informacije o visečih vodonosnikih.

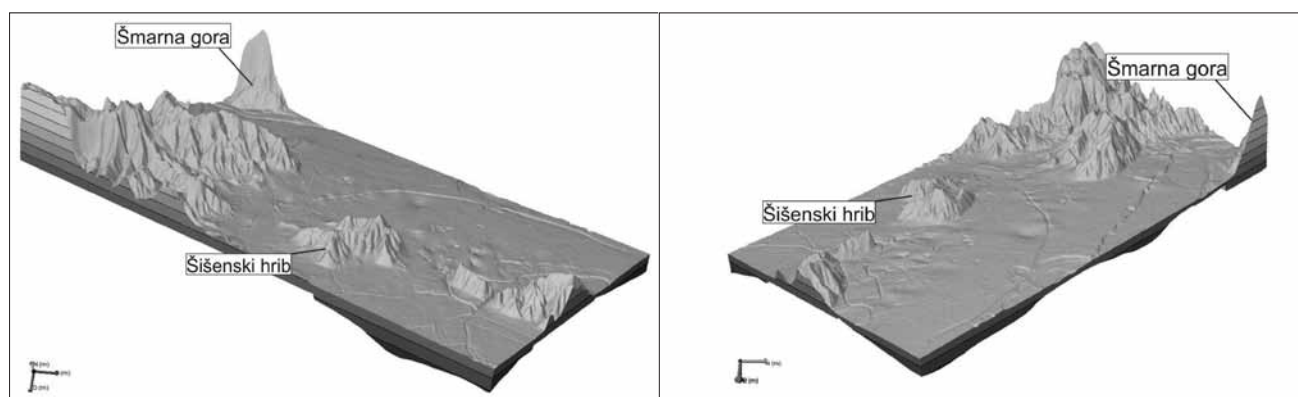
Litološki podatki iz vrtin so bili v prvem koraku razvrščeni po geomehanski AC klasifikaciji. V nadaljevanju pa je bilo 34 razredov AC klasifikacije združenih v pet skupin, štiri hidrofaciese, ki temeljijo na sedimentoloških ter hidroloških kriterijih in dodatno skupino, kamor so bile uvrščene vse ostale kategorije (humus, nasip, predkvartarna podlaga, šota, ...).

Strukturni tridimenzionalni model

Strukturni model (sl. 6) je omejen s:

- horizontalnima ploskvama, ki določata spodnjo in zgornjo mejo modela in
- tridimenzionalno mrežo, ki določa horizontalno raztezanje v x, y in z smeri.

Za zgornjo ploskev v modelu je bil uporabljen digitalni model višine (DMV) (MOP – GURS, 2009) z ločljivostjo 12,5 * 12,5 m. Spodnjo plo-



Sl. 6. Tridimenzionalni strukturni model zahodnega dela Ljubljanskega polja (povečava v vertikalni smeri je 5x)

Fig. 6. 3D structural model of Western part of Ljubljansko polje (vertical exaggeration is 5x)

skeve modela predstavlja rastrska datoteka s podatki o nadmorski višini predkvartarne podlage v ločljivosti 200 * 200 m (JAMNIK et al., 2001). Model je omejen na že prej določeno območje, tj. zahodni del Ljubljanskega polja. Velikost celice v modelu je 25 m v horizontalni smeri ter 1 m v vertikalni smeri.

Hidrogeološki tridimenzionalni model

Semivariogram

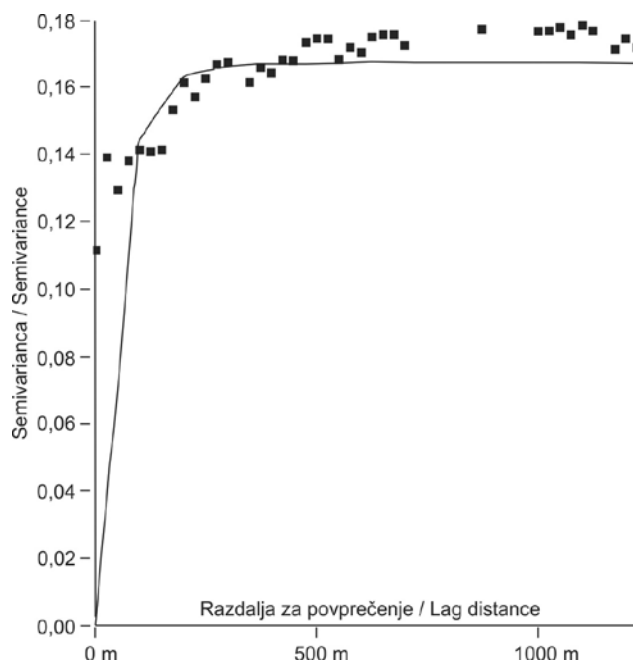
Tridimenzionalni hidrogeološki model je bil izdelan s pomočjo interpolacije litoloških podatkov – hidrofaciesov iz vrtin.

Zaradi ogromnega števila podatkov, se je v prvem koraku določila razdalja za povprečenje. Razdalja za povprečenje zajema vse vrednosti v določenem radiju, katerih povprečna vrednost predstavlja eno točko v semivariogramu. Določitev razdalje je za povprečenje pomembna, saj z njo dobimo povprečne semivariance za točke z enako medsebojno razdaljo. V programski opremi Jewel Suite 2011 se je tako za vsak hidrofacies pripravil najbolj ustrezen semivariogram z razdaljo za povprečenje (ang. lag distance) 25 m v horizontalni ter 2 m v vertikalni smeri (sl. 7). Ko so bili pripravljene vsi semivariogrami, je bila uporabljena hierarhična sekvenčna simulacija. S pomočjo sekvenčne indikatorske simulacije so se izdelali parcialni hidrogeološki modeli, ki so bili postopoma združeni v končni hidrogeološki model.

Prepustnost

Eden izmed pogojev za nastanek visečega vodonosnika je pojav slabo prepustne plasti nad glavnim vodonosnikom. Za lažjo interpretacijo hidrogeološkega modela so bili zbrani dostopni podatki iz literature (PRESTOR et al., 2002; KRIVIC, 2009; HERIČ, 2010; Internet 1) o prepustnosti litoloških enot na celotnem Ljubljanskem polju. Za vsak hidrofacies je podanih več različnih vrednosti, saj vsak črpalni poskus odraža prepustnost litološke enote na eni izmed lokacij na Ljubljanskem polju. Za vsak hidrofacies se je izračunala povprečna vrednost, ki se je nato vključila v hidrogeološki tridimenzionalni model (tab. 2). Zaradi relativno velike količine podatkov in velikosti območja, so se plasti s podatki o prepustnosti debeline 1 m, povprečile na debelino 5 m (sl. 8).

Za izločitev potencialnih območij visečih vodonosnikov iz tridimenzionalnega hidrogeološkega modela sta bila postavljena naslednja pogoja:



Sl. 7. Izbira primerne semivariograma (primer za hidrofacies 2 v horizontalni smeri)

Fig. 7. Semivariogram fitting (example for hydrofacies 2 in lateral direction)

- plast mora imeti koeficient prepustnosti $K \leq 1 \times 10^{-6}$ m/s in
- plast mora imeti minimalno površino 0,07 km².

Koeficient prepustnosti plasti, ki predstavljajo viseče vodonosnike na Ljubljanskem polju ni enoten na celotnem območju, prav tako so to plasti različnih litoloških enot. Vendar pa je dejstvo, da so to drobnozrnati sedimenti s koeficientom prepustnosti $K < 10^{-6}$ m/s. Najverjetneje so to sedimenti poplavnih ravnin ali opuščeni rečni rokavi reke Save, ki so nastali z nanašanjem drobnozrnatega materiala ob višjih vodostajih ali poplavih. V modelu so tako bile uporabljene litološke enote, ki so uvrščene v hidrofaciesa Melj in glina s prodom ter Melj in glina, ki imata koeficient prepustnosti $K < 10^{-6}$ m/s.

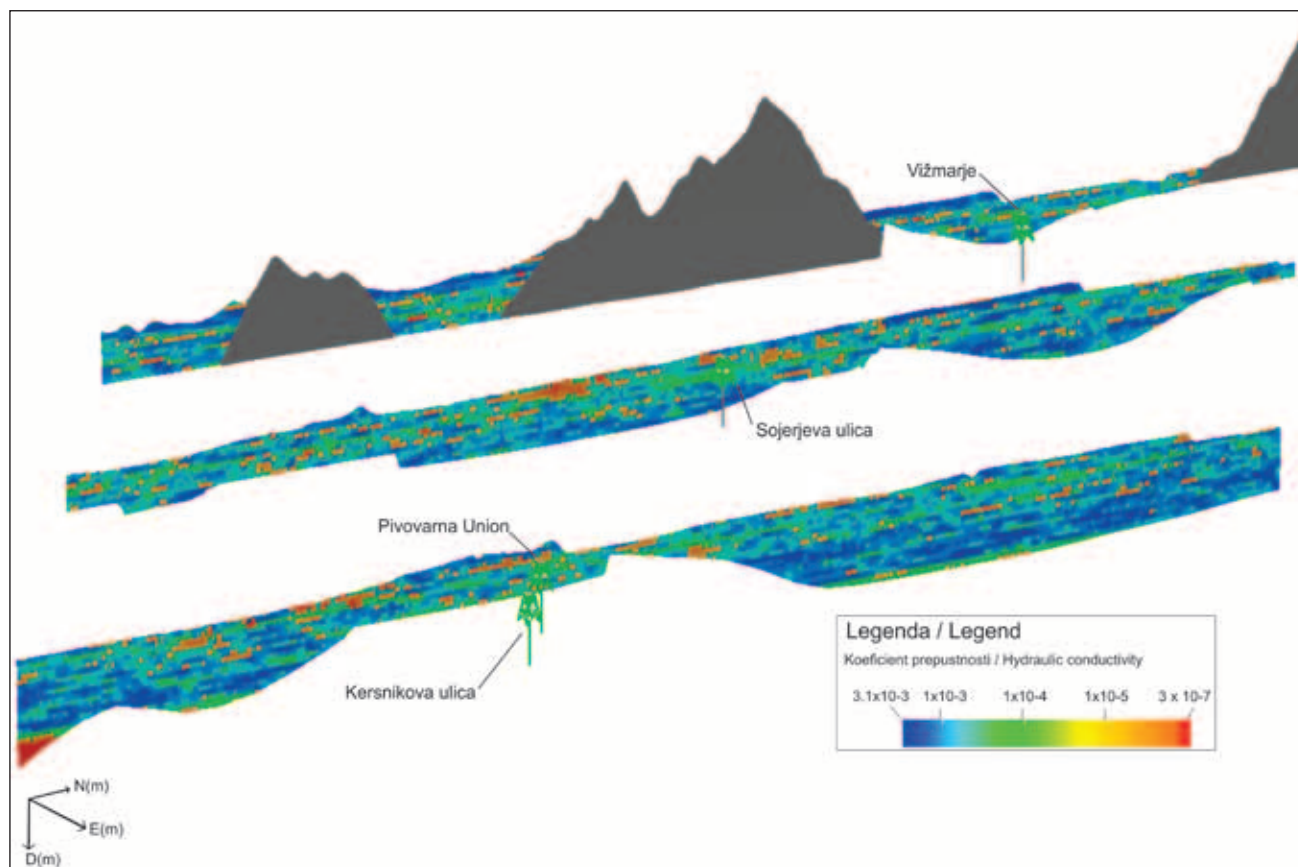
Podatkov o horizontalni velikosti visečih vodonosnikov na Ljubljanskem polju ni, zato je robni pogoj minimalne velikosti plasti za nastanek visečega vodonosnika (0,07 km²) določen kot ocena. Za oceno velikost se je privzela površina najmanjše plasti, na območjih, kjer so točkovno dokazani viseči vodonosniki.

Na podlagi robnih pogojev so bile iz modela izdvojene dovolj velike slabše prepustne plasti, ki predstavljajo podlago za nastanek visečih vodonosnikov. Iz dobljenih rezultatov (sl. 9) je moč

Tabela 2. Prepustnost hidrofaciesov

Table 2. Hydraulic conductivity of hydrofacies

| HIDROFACIES / HYDROFACIES | K (m/s) – P – Prod / Gravel | K (m/s) – MGP – Melj in glina s prodom / Silt and clay with gravel | K (m/s) – MG – Melj in glina / Silt and clay | K (m/s) – Ko – Konglomerat / Conglomerate | K (m/s) – O – Ostalo / Other |
|------------------------------|--------------------------------|--|--|---|---------------------------------|
| \bar{K} (m/s) | 3×10^{-3} | 3×10^{-6} | $3,25 \times 10^{-7}$ | 4×10^{-4} | 6×10^{-6} |



Sl. 8. Prečni izseki iz modela prepustnosti (povečava v Z smeri je 5x)

Fig. 8. Vertical cross-section from Hydraulic conductivity model (Z exaggeration is 5x)

sklepati, da je največ slabše prepustnih plasti med Grajskim in Šišenskim hribom. Na tem območju se pojavijo slabše prepustne plasti v več horizontih, in sicer tik pod površjem (296 m.n.v.) do globine 32 m (264 m.n.v.). Druga največja koncentracija slabše prepustnih plasti je na severnem, severovzhodnem vznožju Šišenskega hriba, kjer se plasti pojavijo prav tako tik pod površjem (306 m.n.v.) ter do globine 25 m (281 m.n.v.). Na ostalem območju modela se slabše prepustne plasti pojavijo do globine 10 m, na jugovzhodnem delu modela je manjša koncentracija slabše prepustnih plasti na globini okoli 20 m.

Gladina podzemne vode glavnega vodonosnika na Ljubljanskem polju je med 274 m (Obrije) ter 282 m (Vižmarje). Za nastanek visečega vodonosnika se mora slabše prepustna plast pojaviti v nezasičenem delu vodonosnika, zato so iz tridimenzionalnega modela bile izdvojene samo plasti v nezasičenem delu vodonosnika (sl. 9).

Razprava

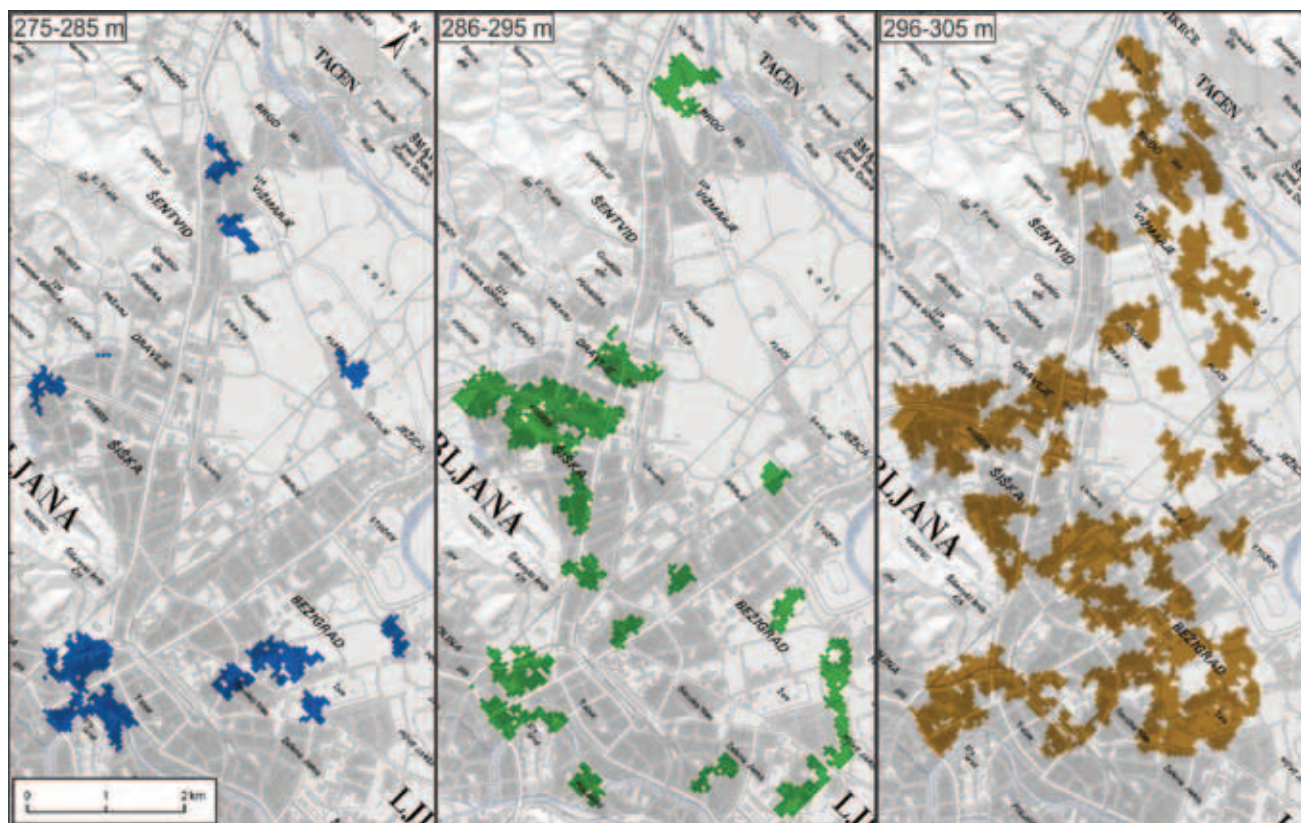
Tridimenzionalni hidrogeološki model zahodnega dela Ljubljanskega polja je prvi predstavljeni model s poudarkom na opredelitvi prostorske lege slabo prepustnih plasti, ki predstavljajo podlago za potencialne viseče vodonosnike.

Točkovno dokazani viseči vodonosniki se po do sedaj znanih podatkih pojavljajo na severozahodnem delu mesta Ljubljane. Na severni strani

Šišenskega hriba se med sedimenti reke Save pojavijo plasti glin z delci preperlega grušča in proda. V Kosezah je Rakovec opisal tri horizonte viseče podzemne vode (DROBNE & TOVORNIK, 1961). Viseči vodonosniki so dokazani z meritvami v vodnjakih na Sojerjevi ulici v Dravljah ter na Bravničarjevi ulici (SAVIĆ, 2009). Na območju Pivovarne Union sta VESELIČ in VIŽINTIN (2002) postavila konceptualni hidrogeološki model, kjer sta določila zgornji in spodnji vodonosnik; zgornji vodonosnik sta opredelila kot viseč vodonosnik. Viseči vodonosniki se pojavijo tudi v centru mesta Ljubljane na območju Ville Urbane, Komenskega ulice in Kongresnega trga (PRESTOR, 2000; PRESTOR et al., 2006; 2008a; 2008b) ter med Prežihovo in Beethovnovno ulico (DROBNE & TOVORNIK, 1961).

Izdelani prostorski model kaže dobro ujemanje s podatki v literaturi. Model podaja slabše prepustne plasti ($K < 10^{-6}$ m/s) povsod tam, kjer so točkovno že dokazani viseči vodonosniki. Izjema je območje Bravničarjeve ulice, kljub temu pa model napove slabše prepustne plasti v neposredni bližini (ŠRAM, 2011).

Pomemben vir negotovost modela predstavljajo nekateri subjektivno določeni parametri. Tako je skupina sedimentov, ki so uvrščeni pod *Drugo* zelo heterogena in združuje različne litološke enote. Povprečna prepustnost skupine, ustreza prepustnosti podlage visečih vodonosnikov, kar je vplivalo na določitev potencialnih visečih vodonosnikov. Ker pa so v skupino vključene tudi enote, ki ne morejo tvoriti podlage visečih vodonosni-



Sl. 9. Raztezanje slabše prepustnih plasti v nezasičenem delu vodonosnika (debelina plasti je 5 m).

Fig. 9. Areas of layers with low hydraulic conductivity in unsaturated zone of the aquifer (layer thickness is 5 m).

kov (enote predkvartarne podlage ter enote, ki so blizu površja in so antropogenega izvora) obstaja verjetnost, predvsem na površini modela, da so bile nekatere plasti določene kot podlaga visečega vodonosnika, čeprav to dejansko niso.

Horizontalno raztezanje plasti je pogojeno s parametri določenimi v semivariogramu. Za horizontalno raztezanje je najpomembnejši parameter »doseg«, ki določa do katere meje so vrednosti regionalno odvisne in tako posledično določa velikost plasti; večja je regionalna odvisnost, večje in bolj zvezne bodo plasti na modeliranem območju in obratno, manjša kot je odvisnost, manjše so plasti. Zaradi ogromno prepletajočih se procesov na Ljubljanskem polju, je težko oceniti realno regionalno odvisnost litoloških podatkov iz vrtin. Iz dostopnih podatkov se je na semivariogramu določila najbolj ustrezna krivulja, ki opisuje regionalno odvisnost med litološkimi podatki iz vrtin. Vendar pa, obstaja verjetnost, da izbrana velikost visečih vodonosnikov v horizontalni smeri odstopa od realne vrednosti in da obstajajo tudi manjši oziroma samo večji in bolj zvezni viseči vodonosniki. Brez dodatnih terenskih raziskav obstoja teh vodonosnikov ni mogoče določiti.

Sklep

Izdelava tridimenzionalnih geoloških modelov z uporabo geostatističnih metod je zahtevna naloga, saj dober model zahteva veliko podatkov, dobro poznavanje modeliranega območja ter kritičen pristop do rezultatov. Podatke pridoblje-

ne s pomočjo geostatistične interpolacije je potrebno obravnavati z veliko mero previdnosti, saj je potrebno upoštevati dejstvo, da nobena metoda ne more popolnoma rekonstruirati številnih zapletenih in prepletajočih se procesov, ki so se odvijali v geološki preteklosti.

Predstavljeni prostorski model je prvi poskus geostatistične določitve razporeditve potencialnih visečih vodonosnikov na zahodnem delu Ljubljanskega polja. V modelu so potencialna območja visečih vodonosnikov določena na podlagi obdelave podatkov iz vrtin s pomočjo dveh pogojev, prepustnostjo in površino slabše prepustnih sedimentov. Tako imajo plasti potencialnih visečih vodonosnikov prepustnost velikost $K = 10^{-6}$ m/s ali manj, površino vsaj 0,07 km² ter minimalno debelino 5 m, ki je pogojena s parametri iz modela. Sedimenti nezasičenega dela vodonosnika, ki predstavljajo slabše prepustne plasti so melj, glina, melj ali glina s prodom ter slabo sortiran pesek.

Študija je bila izdelana v raziskovalne namene, kjer je bil namen pridobiti generalno sliko razprostiranja slabše prepustnih plasti na Ljubljanskem polju. Tako rezultati študije nudijo koristne informacije za prihodnje raziskave vodonosnika Ljubljanskega polja in lahko služijo kot pomoč pri načrtovanju novih vrtin. Zanesljivost modela za načrtovanje novih vrtin pa je odvisna od gostote in globine vrtin na izbranem območju. Pomoč, ki jo lahko nudijo rezultati modela so orientacijskega značaja, predvsem zaradi velikosti modeliranega območja ter manjše vertikalne ločljivosti modela. Z novimi vrtinami na območjih potencialnih vi-

sečih vodonosnikov in spremljanjem gladin podzemne vode bo možno oceniti zanesljivost modela in ga nadgraditi.

Podatki iz modela imajo pomembno vlogo pri ugotavljanju smeri toka podzemne vode in razširjanju onesnaževal s površja. Zatorej se lahko uporabijo kot nadgradnja že obstoječih modelov toka podzemne vode ter nudijo osnovo za njihovo izboljšanje.

Izdelava geostatističnega modela ni prinesla samo novih rezultatov, temveč je odprla tudi nova vprašanja. Omejili smo območja, predvsem v centru Ljubljane, med Grajskim hribom in Rožnikom, kjer bo potrebno izdelati natančnejše modele. Na teh območjih se lahko s pridobljenim znanjem in podatki izvede več variant geostatističnega modeliranja. Z natančno analizo časovnih nizov višine gladine podzemne vode ter količine padavin in uporabo novih modelov bo mogoča natančnejša opredelitev raztezanja visečih vodonosnikov.

Zahvala

Študija je bila delno sofinancirana iz projekta INCOME-LIFE07 ENV/SLO/000725 ter iz raziskovalnega programa Podzemne vode in geokemija (št. P1-0020), ki ga financira Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije. Hvala Dragomirju Skabernetu za pomoč pri interpretaciji rezultatov in Jožetu Rateju za natančen pregled članka ter konstruktivne predloge za izboljšanje članka.

Literatura in viri

- ANDERSON, M.P. 1989: Hydrogeologic facies models to delineate large-scale spatial trends in glacial and glaciofluvial sediments. *Geological Society of America Bulletin*, April, v. 101, p. 501-511
- BOHLING, G. 2005: Geostatistics in Three Easy Lessons.: <http://people.ku.edu/~cgbohling/cpe940/> (22.8.2011)
- BRAČIČ-ŽELEZNIK, B., PINTAR, M. & URBANC, J. 2005: Naravne razmere vodonosnika. Podtalnica Ljubljanskega polja: 17-26.
- CABELLO, P., CUEVAS, J. L. & RAMOS, E. 2007: 3D modelling of grain size distribution in quaternary deltaic deposits (Llobregat delta, NE Spain). *Geologica acta: and international earth science journal*, 5: 231-241.
- DAVIS, C. J. 2002: *Statistics and Data Analysis in Geology*. New York: John Wiley & Sons, Inc: 257 p.
- DEUTSCH, C. V. 1999: Reservoir modeling with publicly available software. *Computer&Science*: 355-363.
- DROBNE, F. & TOVORNIK, S. 1961: Obvestilo o raziskavah geoloških pogojev za gradnje na območju mesta Ljubljana. *Geologija*, 7: 269-274.
- HERIČ, J. 2010: Idejna zasnova in hidrogeološke strokovne osnove raziskovalno piezometričnih vrtin Pincome-2/10, Pincome-3/10, Pincome-4/10 in Pincome-5/10, Ljubljansko polje. Ljubljana: Geološki zavod Slovenije, 24 str.
- HISCOCK, K. M. 2005: *Hydrogeology: principles and practice*. Blackwell Science Ltd, Padstow: 405 p.
- JAMNIK, B., REFSGAARD, A., JANŽA, M. & KRISTENSEN, M. 2001: Water resources management model for Ljubljana City. Rasterski sloj: digitalni model predkvartarne podlage na Ljubljanskem polju. Geološki zavod Slovenije.
- JANŽA, M. 2009: Modeliranje heterogenosti vodonosnika Ljubljansko polje z uporabo Markovih verig in geostatistike. *Geologija*, 52/2: 233-240, doi:10.5474/geologija.2009.023.
- JOA OIL & GAS 2011: priročnik Jewel Suite 2011. Delft: 953 p.
- JUANG, K-W., CHEN, Y-S. & LEE, D-Y. 2004: Using sequential indicator simulation to assess the uncertainty of delineating heavy-metal contaminated soils. *Environmental Pollution*, 127: 229-238.
- KOLAR-JURKOVŠEK, T. & JURKOVŠEK, B. 2007: Zgor-njekarbonska flora Grajskega hriba v Ljubljani. *Geologija*, 50/1: 9-18, doi:10.5474/geologija.2007.001.
- KRIVIC, J. 2009: Strokovna opredelitev največje dopustne globine gradnje objektov na območju »ROG«. Ljubljana: Geološki zavod Slovenije, 14 str.
- MALVIĆ, T. 2008: Primjena geostatistike u analizi geoloških podataka. Zagreb: INA – industrija nafte d.d., 97 str.
- MCKILLUP, S. & DYAR, D. M. 2010: *Geostatistics Explained: an Introductory Guide for Earth Scientists*. Cambridge: Cambridge University press: 414 p.
- MOP – GURS 2009: Digitalni model višine 12.5 * 12.5 m. Ljubljana.
- PREMRU, U. 1983: Osnovna geološka karta SFRJ. Tolmač lista Ljubljana: L 33-66. Zvezni geološki zavod, Beograd: 111 p.
- PRESTOR, J. 2000: Hidrogeološko mnenje o stanju podzemnih voda za lokacijo CO 1/5 Komenskega v Ljubljani. Geološki zavod Slovenije, Ljubljana: 3 str.
- PRESTOR, J., URBANC, J., JANŽA, M., RIKANOVIC, R., BIZJAK, M., MEDIĆ, M. & STROJAN, M. 2002: Preverba in dopolnitev strokovnih podlag za določitev varstvenih pasov vodnih virov centralnega sistema oskrbe s pitno vodo v MOL – Ljubljansko polje. Ljubljana: Geološki zavod Slovenije, 101 str.
- PRESTOR, J., STROJAN, M., HÖTZL, M., MATOZ, T. & MEDIĆ, M. 2006: Določitev prepustnosti tal in hitrosti toka podzemne vode na območju gradbene jame Villa Urbana v Ljubljani. Geološki zavod Slovenije, Ljubljana: 8 str.
- PRESTOR J., BIZJAK, M. & STROJAN, M. 2008a: Hidrogeološko poročilo o pogojih gradnje objekta na Kongresnem trgu v Ljubljani. Geološki zavod Slovenije, Ljubljana: 8 str.
- PRESTOR, J., JANŽA, M. & BENČINA, D. 2008b: Analiza tveganja zaradi gradnje objekta na območju Kongresnega trga v Ljubljani. Geološki zavod Slovenije, Ljubljana: 21 str.
- SAVIĆ, V. 2009: Analiza podatkov opazovanj in optimizacija merilne mreže glede na različne

- potrebe izkoriščanja vode: diplomsko delo. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana: 115 str.
- ŠRAM, D. 2011: Hidrogeologija visečih vodonosnikov na Ljubljanskem polju: diplomsko delo. Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta, Ljubljana: 83 str.
- VESELIČ, M. & VIŽINTIN, G. 2002: Raziskave za zaščito vodnega vira pivovarne Union, D.D. Zaščita vodnih virov in vizija oskrbe s pitno vodo v Ljubljani: 57–67.
- ZAPPA, G., BERSEZIO, R., FELLETTI, F. & GIUDICI, M. 2006: Modeling heterogeneity of gravel-sand, braided stream, alluvial aquifers at the facies scale. *Journal of Hydrology*, 325: 134–153, doi:10.1016/j.jhydrol.2005.10.016.
- ŽLEBNIK, L. 1971: Pleistocen Kranjskega, Sorškega in Ljubljanskega polja. *Geologija*, 17: 477–491.
- WEBSTER, R. 2007: *Geostatistics for Environmental Scientists*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd.; 332 p.
- Internet 1: http://www.pivo-union.si/si/files/default/Ponudba/tehnichni-podatki/zala_union_hidrogeoloska_karta_in legenda.pdf (14.8.2011)