

Ocena možnosti zajema podzemne vode z uporabo MIKE SHE programskega orodja za hidrogeološko modeliranje – primer Selniška Dobrava

Evaluation of water resource exploitation options using the MIKE SHE integrated hydrogeological modelling package – case study Selniška Dobrava

Nina MALI & Mitja JANŽA

Geološki zavod Slovenije, Dimičeva 14, SI – 1000 Ljubljana

E-pošta: nina.mali@geo-zs.si

mitja.janja@geo-zs.si

Ključne besede: hidrogeološko modeliranje, MIKE SHE, vodonosnik, vodni vir, Selniška Dobrava, Slovenija

Key words: hydrogeological modelling, MIKE SHE, aquifer, water resource, Selniška Dobrava, Slovenia

Povzetek

Na podlagi rezultatov dolgoletnih raziskav je bil vodni vir Selniške Dobreve ocenjen kot primeren vir pitne vode za oskrbo sistema Mariborskega vodovoda. Za optimalno izkoriščanje in upravljanje vodnega vira je za njegovo nadaljnjo aktivacijo potrebno predvideti primerno postavitev črpalnih vodnjakov glede na hidrogeološke pogoje. V članku je opisana izdelava in uporaba hidrogeološkega modela vodnega vira Selniške Dobreve, ki je bil razvit s programskim orodjem MIKE SHE. Hidrogeološki model omogoča analize kompleksnih hidrogeoloških procesov in ocene vplivov na okolje pri posegih v vodni vir (vodonosnik) ter velja za pomemben del osnov strategije uravnoteženega upravljanja z vodnim virom Selniške Dobreve. S simulacijo različnih scenarijev postavitve novih črpalnih vodnjakov smo poleg možnosti pridobivanja zadostne količine vode, ocenili tudi primernost lokacije novega črpalnišča. Rezultati simulacij kažejo, da je na območju Selniške Dobreve možna izvedba črpalnišča skupne izdatnosti 200 l/s, ki ga je možno razširiti na izdatnost 400 l/s. V simulacijah se je pokazala ugodnejša postavitev črpalnih vodnjakov prečno na smer toka podzemne vode, ki omogoča tudi lažjo izvedbo ukrepov za zaščito vodnega vira.

Abstract

Based on the results of long-term research, Selniška Dobrava water resource was estimated as an adequate source of drinking water supply for the Maribor waterworks. Further activation of the resource for its optimum exploitation and management requires the determination of suitable pumping well locations on the basis of hydrogeological properties. This paper describes the development and application of an integrated hydrogeological model for the Selniška Dobrava. Model development is considered to be an important part in the establishment of sustainable water management policies for the Selniška Dobrava- Maribor waterworks. Selniška Dobrava model was developed by using the MIKE SHE integrated modelling package. The model enables an analysis of the complex hydrogeological regime in the region and the prediction of environmental impacts of various management options. Different scenario simulations were used to evaluate pumping station location suitability and the possibility of pumping sufficient quantities of water. Results of different simulations show that the construction of a pumping station for 200 l/s and more on Selniška Dobrava is possible. The model indicates a more favourable setting up of pumping wells in the section transversal to groundwater flow direction. Such setting up enables an easier application of water resource protection measures.

Uvod

Z matematičnim modeliranjem vodonosnih sistemov simuliramo dinamiko podzemne vode in predvidevamo spremembe v vodonosniku glede na predvidene posege v prostoru. Najširše uporabljeno programsko orodje za hidrogeološko modeliranje je MODFLOW. Program MODFLOW je bil v okviru projektov Geološkega zavoda Slovenije (GeoZS) uporabljen pri reševanju hidrogeoloških problemov pri sanaciji Jalovišča Boršt v Rudniku Žirovski vrh (Brenčič et al., 2005; Krivic & Brenčič, 2005), v analizah tveganja na območju Dravskega polja (Brenčič & Krivic, 2005), Domžalsko-Mengeškega polja, Volčjega potoka (Brenčič & Krivic, 2005) in pri postavitvi kompleksnih hidrogeoloških modelov vodonosnih sistemov Dravskega polja (Brenčič & Krivic, 2005) in Krškega polja (Brenčič & Krivic, 2003). Bolj kompleksno programsko orodje za hidrogeološko modeliranje MIKE SHE omogoča natančnejšo simulacijo interakcije med evapotranspiracijo, nezasičeno cono, površinsko in podzemno vodo. Z orodjem MIKE SHE je bil pri nas izdelan kompleksen hidrogeološki model Ljubljanskega polja in Ljubljanskega Barja (Kristensen, 1999; Kristensen & Andersson, 1999; Kristensen et al., 2000, Jamnik et al., 2001). Na območju Ljubljanskega polja je bil model uporabljen za določitev varstvenih pasov (Prestor et al., 2002) in pri sanaciji onesnaženja podzemne vode s trikloretenom (Urbanc et al., 2004; Prestor et al., 2005). Model Ljubljanskega polja je bil kasneje nadgrajen z novimi podatki in prirejen za uporabo v novejši različici programskega orodja (Janža, 2005). Na območju Ljubljanskega Barja je bil model uporabljen za oceno vpliva odlagališča komunalnih odpadkov na podzemno vodo (Prestor & Janža, 2002). V napajalnem zaledju izvira Rižane je bilo z modelom ocenjeno napajanje vodonosnika in simulirana količina pretoka izvira (Janža, 2003).

Zaradi povečane urbanizacije in ostalih pritiskov na prostor je povečana tudi ogroženost obstoječih vodnih virov. Nekateri vodni viri že sedaj po svoji kakovosti ne ustrezajo nadaljnji uporabi za oskrbo s pitno vodo. Na območju sistema Mariborskega vodovoda se ne glede na zmanjšanje skupne porabe povečuje količina načrpane vode iz posameznih vodnih virov,

kar povzroča opazno dolgoročno upadanje gladin podzemne vode v teh virih. Drugi problem v oskrbi s pitno vodo je njena kakovost (Jurin et al., 1996; Jecelj, 2004). Zaradi potreb po zagotavljanju večjih količin kakovostne pitne vode potekajo od l. 1993 raziskave vodnega vira Selniške Dobrave (Mali, 1996). Raziskave so potrdile primernost tega vodnega vira tako po kakovosti kot količini za oskrbo s pitno vodo Maribora in okolice. V prihodnosti je predvidena izvedba črpališča za izkoriščanje 200 l/s vode. V okviru raziskav je bil s programskim orodjem MIKE SHE izdelan hidrogeološki model vodonosnika Selniške Dobrave (Janža, 2000; Mali et al., 2005). Namen izdelave modela je bil razvoj orodja, ki bo uporabno tako v fazi planiranja kakor tudi pri izvedbi izbranih rešitev in kasneje pri upravljanju vodnega vira. Model pokriva območje skupne površine 7 km² in predstavlja popoln opis hidrogeološkega sistema vodnega vira Selniške Dobrave za analizirano obdobje od leta 1997 do leta 2003.

Članek opisuje izdelavo modela in predstavlja rezultate simulacij. V scenarijih so bile uporabljene različne količine črpanja in postavitve črpalnih vodnjakov. Na podlagi ocenjenih dinamičnih zalog podzemne vode in simuliranih sprememb dinamike podzemne v posameznih scenarijih je bila izbrana najprimernejša postavitev vodnjakov za črpanje 200 l/s, ki dopušča možnost razširitve črpališča in povečanja črpanja do 400 l/s.

Opis območja

Širše območje Selnice ob Dravi leži v severovzhodni Sloveniji. Razteza se na površini 7 km². Območje leži na levem bregu Drave in sega do potoka Bistrica na vzhodu. Na jugu je omejeno z Dravo, na severu pa preide v gričevnata Spodnji in Zgornji Boč (Rikanovič, 2005). Površje je izoblikovala Drava, ki je na južnem delu območja odložila več 10 metrov debele nanose proda, na severnem delu pa je zaradi erozije nastalo razgibano gričevje. Južni del območja je ravninski, severno pa se površje hitro dviguje. Gričevje je močno prepredeno z dolinami in hudourniškiimi grapami potokov. Hidrološko mrežo območja tvori Drava, največji vodotok širšega območja, ter njeni številni pritoki.

Podnebno pripada območje zmernemu celinskemu podnebjju osrednje Slovenije za ka-

terega je značilen celinski padavinski režim ter povprečna letna količina padavin od 1200 do 1300 mm. Povprečna letna temperatura zraka je med 8 in 12 °C.

Dravska dolina med Dravogradom in Mariborom je razmeroma mlada in je nastala z mladimi neotektonskimi premiki (Mioč & Žnidarčič, 1976). Kvartarne naplavine Drave v Selniški Dobravi ležijo na mestu, kjer se Drava prebije iz ozke soteske pri Fali. Podlago kvartarnih naplavin Selniške Dobrave v pretežni meri gradijo miocenski konglomerati, sestavljeni iz prodnikov metamorfnih kamenin s sivim glinasto-lapornatim vezivom. Za zajem podzemne vode je najbolj pomembna geološka sestava kvartarnih naplavin Drave. Kvartarne sedimente lahko razdelimo na starejše, pleistocenske sedimente in mlajši, holocenski zasip. V akumuliranem materialu vzdolž doline so se izoblikovali štirje terasni nivoji. Najstarejši nivo ima najdebelejši glinen pokrov, je najbolj dvignjen nad današnjim rečnim nivojem in je najslabše ohranjen ter slabše prepusten. Ostale terase so zgrajene pretežno iz proda (70%), peska (20 %) in peščene gline (10 %). Območje predstavlja medzrnski vodonosnik iz dobro prepustnega materiala s prosto gladino podtalnice.

Glavni vodni vir predstavlja prodni zasip stare struge Drave, ki poteka ob sedanjem toku. Na podlagi dosedanjih raziskav ocenjujemo, da je koeficient prepustnosti glavnega vodonosnika $5 \cdot 10^{-3}$ m/s, povprečna debelina vodonosnika 11 m in transmisivnost $T = 5,5 \cdot 10^{-3}$ m²/s (Mali et al., 2005).

Metodologija

Model vodonosnika Selniške Dobrave je bil izdelan v naslednjih korakih: (1) zbiranje

in obdelava podatkov; (2) izdelava konceptualnega modela; (3) izdelava hidrološkega modela; (4) kalibracija in validacija modela; in (5) izvedba simulacij modela za napoved vpliva posegov v vodonosnik v okviru postavitve novega črpalnišča. Hidrogeološki podatki uporabljeni v modelu so podani v tabeli 1.

Konceptualni model

Na podlagi dosedanjih raziskav ugotavljamo, da sta na območju spodnje in zgornje terase Selniške Dobrave dva vodonosnika, ki sta hidravlično povezana. Glavni spodnji vodonosnik predstavlja prodni zasip stare struge Drave na spodnji terasi. Izdatnost zgornjega vodonosnika v primerjavi s spodnjim ni velika, je pa zgornji vodonosnik pomemben zaradi napajanja spodnjega in zaradi možnosti širjenja onesnaženja v spodnji vodonosnik. Zgornji vodonosnik se napaja iz padavin in iz potokov z zaledja Selniške Dobrave. S pretakanjem napaja spodnji vodonosnik, ki se poleg z infiltracijo padavin napaja še iz Drave. Na severu je območje vodonosnega sistema omejeno z orografsko razvodnico zaledja, na jugu pa je meja reka Drava.

Numerični model - programsko orodje MIKE SHE

MIKE SHE je programski paket za modeliranje celotnega hidrološkega kroga (Abbott et al., 1986; Refsgaard & Storm, 1995), ki ga je izdelal Danski hidravlični inštitut - DHI. Je integriran sistem komponent ali modulov, ki omogoča modeliranje procesov hidrološkega kroga. Povezanost modulov in samodejni prenos podatkov med njimi omogočata modeliranje celotnega hidrološkega kroga, kar je bistvena prednost modela MIKE SHE.

Tabela 1. Osnovni podatki, uporabljeni v modelu

Table 1. Major information used in the model application

Vrsta podatkov	Vir	Format	Datum
Podatki vrtin	GeoZS	Tabele	1994-2002
Podatki o nivojih podzemne vode	GeoZS	Tabele- časovne serije	1997-2004
Podatki geofizikalnih meritev	GeoZS, Geoinženiring	Tabele	1995, 2005
Črpalni poskusi	GeoZS	Tabele- časovne serije	1996, 2005
Geološka karta	GeoZS	Karta, Tolmač	1978
Topografska karta	GURS	Digitalni podatki	1978-1987
Meteorološki podatki	ARSO	Tabele - časovne serije	1997-2003
Meritve pretokov potokov	GeoZS	Tabele- časovne serije	1997-2003
Profili in pretoki reke Drave	Dravske elektrarne	Tabele- časovne serije	1997-2003

Obravnavano območje je opredeljeno v modelu s horizontalnimi ravninami, sestavljenimi iz celic, kar tvori tri-dimenzionalno mrežo celic. Celice imajo obliko kvadra s kvadratno osnovno ploskvijo. Velikost osnovne ploskve celice in število horizontalnih ploskev določata natančnost modela. Diferencialne enačbe, ki opisujejo hidrološke procese, rešuje program numerično z uporabo metode končnih diferenc. Reševanje enačb poteka v določenih časovnih korakih, kar omogoča simuliranje dinamičnih procesov (npr. nihanje nivoja podzemne vode).

Kompleksnost obravnavanega naravnega sistema in želeno zanesljivost modela pogojeta uporabo različnih komponent. V obravnavanem modelu so bile vključene naslednje komponente, ki modelirajo:

- *realno evapotranspiracijo*, ki je izračunana je na podlagi meteoroloških podatkov, podatkov o vegetaciji in tleh;
- *površinski tok*, ki se pojavi po nasičenju zgornjega dela tal;
- *tok podzemne vode v nezasičeni coni*, ki opisuje proces enodimenzionalnega vertikalnega toka vode v nezasičeni coni;

- *tok podzemne vode v zasičeni coni*, ki opisuje procese tridimenzionalnega toka v zasičeni coni;

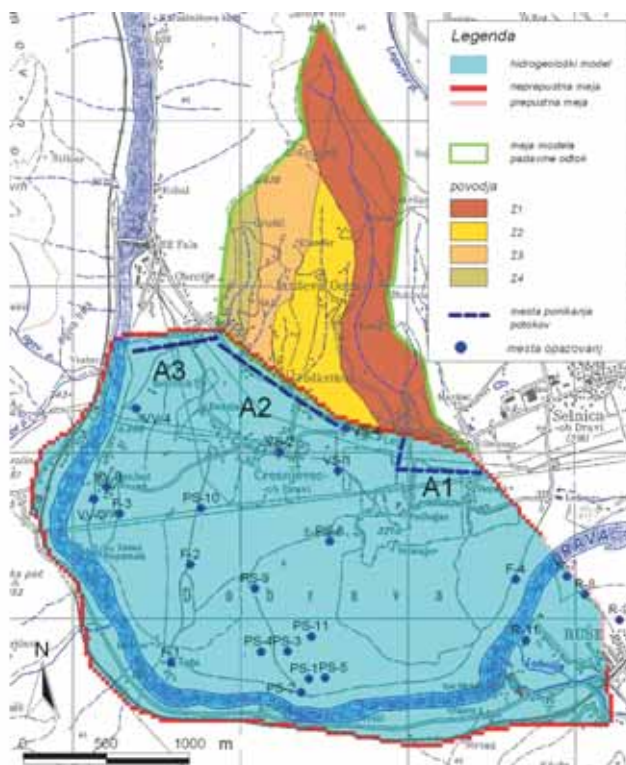
- *transport navideznih delcev* (sledenje delcev). Transport delcev temelji na hitrostih toka podzemne vode v zasičeni coni.

- *izmenjavo vode med vodonosnikom in reko*. Ta komponenta omogoča dinamično povezavo s programom za modeliranje površinskih voda MIKE 11.

Model vodonosnika Selniške Dobrave

Območje modela

Celotno območje modela je definirano na severnem delu z orografskimi razvodnicami potokov, ki napajajo zgornji vodonosnik, na jugu pa s skrajno južno mejo rečnih nanosov na desnem bregu Drave. Večji del obravnavanega območja smo v modelu omejili z neprepustno mejo, razen na jugovzhodnem delu (slika 1). Na tem delu voda izteka iz vodonosnika, zato smo jo v modelu obravnavali kot prepustno mejo, definirano s kon-



Sl. 1. Območje modela z robnimi pogoji

Fig. 1. Modelling area with boundary conditions

stantnim nivojem podzemne vode. Konstanten nivo ustreza povprečnemu nivoju podzemne vode, določenem na podlagi triletnih (1997-1999) meritev nivoja v bližini prepustne meje.

Meteorološki podatki

Vhodni meteorološki podatki v modelu so padavine, temperatura in potencialna evapotranspiracija. Padavine so najpomembnejša meteorološka spremenljivka v modelu. Potencialna evapotranspiracija se uporablja v modelu za oceno realne evapotranspiracije, temperatura pa je spremenljivka, ki določa obliko padavin in taljenje snega.

Padavine – Pri izdelavi modela smo razpolagali s podatki o dnevni višinih padavin s padavinske postaje Ruše za obdobje od 1. 1. 1997 do 31. 8. 2004. Podatke s postaje smo uporabili neposredno brez korekcij.

Potencialna evapotranspiracija in temperatura – V modelu smo uporabili podatke o ocenjeni dnevni evapotranspiraciji in povprečnih dnevni temperaturah iz meteoroloških postaj Maribor Tezno (1. 9. 1997 – 1. 11. 1999) in Maribor Letališče (1. 11. 1999 – 31. 12. 2004).

Struktura modela

Pri modeliranju podzemnih vod smo upoštevali tudi površinske vode. Hidrogeološke razmere so pogojevale izdelavo modela padavine-odtok na severnem delu območja in hidrogeološkega modela združenega z rečnim modelom na osrednjem delu območja (slika 1). Tako je bilo območje razdeljeno na dve kategoriji:

– severni del, kjer smo uporabili enovit hidrološki model padavine-odtok (ang. rainfall-runoff model) in

– območje aluvialnega zasipa, kjer smo uporabili hidrogeološki model, integriran z rečnim modelom Drave.

Model reke Drave

Drava v veliki meri pogojuje dinamiko podzemne vode v vodonosniku Selniške Dobrave, zato smo natančno definirali rečni režim. Pri izdelavi modela reke Drave smo uporabili:

– prečne preseke rečnega korita,

– meritve nivojev rečne gladine v hidroelektrarnah Fala in Mariborski otok (Fala spodnji nivo, Mariborski otok zgornji nivo),

– meritve pretokov v omenjenih hidroelektrarnah.

Model smo izdelali za celoten odsek reke med hidroelektrarnama. Uporabili smo 53 prečnih profilov ter dnevne meritve nivoja rečne gladine in pretokov. Uporabo navedenih podatkov so nam omogočile Dravske elektrarne Maribor. Rezultat modeliranja je dinamični model reke Drave, ki omogoča določitev pretoka in nivoja reke na poljubnem odseku reke (slika 2).

Model padavine-odtok

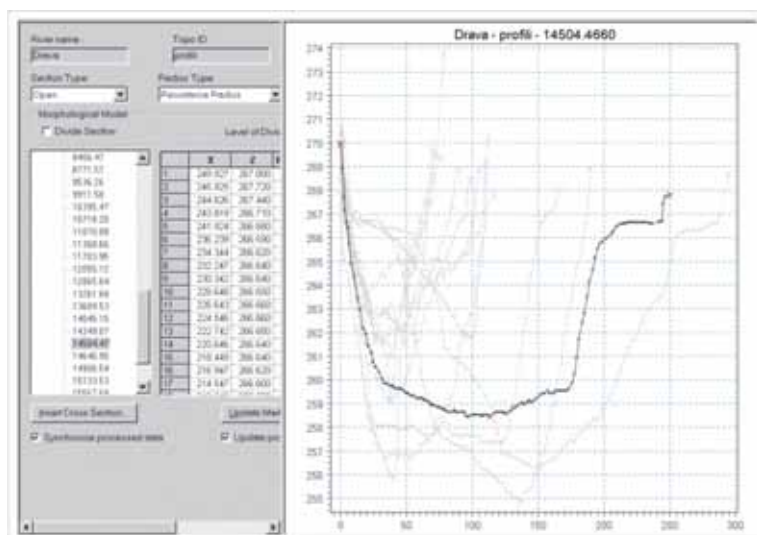
Na severnem delu območja (slika 1) smo uporabili model padavine-odtok, ki ga lahko uvrstimo v kategorijo determinističnih konceptualnih enovitih modelov. Model padavine-odtok simulira odtok z območja zaledja, ki je obravnavano kot ena enota. Parametri in spremenljivke so povprečne vrednosti za celotno zaledje in smo jih določili v procesu kalibracije. Za kalibracijo smo uporabili občasne terenske meritve pretokov na obravnavanem območju. Mejo zaledja smo določili na podlagi digitalnega modela reliefa z orografskimi razvodnicami. Površina tako določenega zaledja je 1,9 km². Rezultat modela je časovna serija odtoka iz območja zaledja (slika 3).

Hidrogeološki model

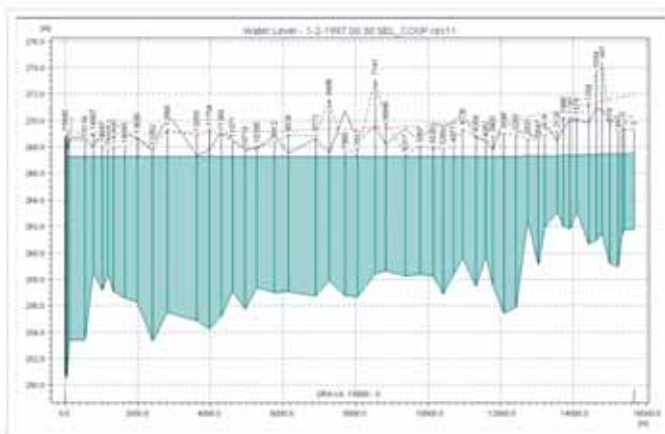
Pripravo prostorskih podatkov za hidrogeološko modeliranje smo izvedli z GIS orodji in jih nato s pomočjo vmesnika uvozili v program MIKE SHE. Ločljivost prostorskih podatkov v modelu je 25 m x 25 m, kar ustreza velikosti računske celice.

Hidrogeološki podatki – Uporabljeni hidrogeološki podatki za izdelavo modela so rezultat večletnih raziskav na območju Selniške Dobrave. Med njimi so za namene modeliranja najpomembnejši geofizikalni podatki kote podlage vodonosnika, meritve nivoja podzemne vode v opazovalnih vrtinah in črpalni poskusi.

V modelu smo uporabili podatke večletnih ročnih in elektronskih meritev nivojev podzemne vode, ki jih je izvajal GeoZS na obstoječi mreži piezometrov v različnih časovnih intervalih od 1.1997 naprej.



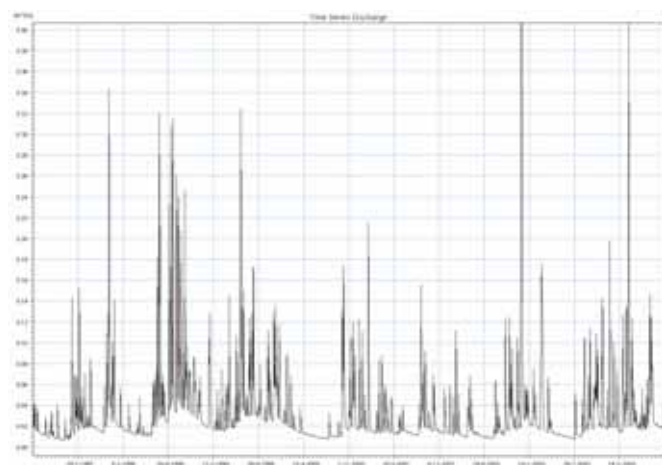
c)



b)

Sl. 2 a.) Prikaz prečnih profilov reke Drave b.) Model reke Drave.

Fig. 2 a.) River Drava cross-sections b.) River Drava model



Sl. 3. Časovna serija simuliranih odtokov iz celotnega območja modela padavine-odtok

Fig. 3. Time series of simulated runoff from the whole rainfall-runoff model area

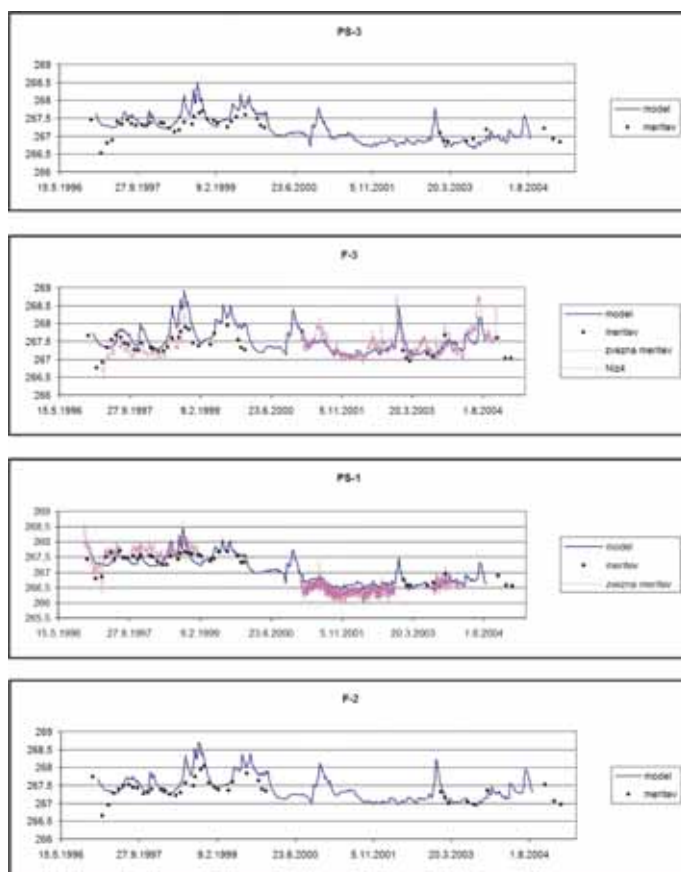
Vegetacija - Vegetacija je pomembna za modeliranje evapotranspiracije. Obravnavano območje smo na podlagi terenskega oglada razdelili na območja pokrita z gozdom, travnata območja in njive.

Tla - Lastnosti tal uporabljamo za modeliranje vertikalnega toka v nezasičeni coni. Celotno območje hidrogeološkega modela smo opredelili z enim pedološkim profilom, ki je sestavljen iz dveh plasti. Zgornja plast seže do globine 0.5 m in po svojih hidravličnih lastnostih ustreza humusni plasti. Pod to plastjo do nivoja podzemne vode je pedološka plast s hidravličnimi lastnostmi prodnega zasipa. Hidravlične lastnosti posamezne plasti smo opisali z retencijsko krivuljo in koeficientom prepustnosti v odvisnosti od stopnje zasičenja. Uporabili smo že izračunane retencijske krivulje in koeficiente prepustnosti (iz podatkovne zbirke DHI), ki so po hidravličnih lastnostih primerljivi z uporabljenima plastema.

Kalibracija (umerjanje) in validacija (vrednotenje) modela

Za hidrogeološki model na obravnavanem območju smo uporabili ročno kalibracijsko metodo. Primerjavo meritev in simuliranih rezultatov modela smo opravili grafično. Meritve naravnega sistema so časovni nizi merjenih (opazovanih) nivojev podzemne vode na mestih opazovalnih vrtin, simulirani rezultati modela pa časovni nizi simuliranega nivoja v celicah modela, ki ustrezajo meriskim mestom (slika 4).

Za kalibracijo modela smo uporabil podatke iz obdobja šestih let (1997 - 2000). Na podlagi testa občutljivosti smo ugotovili, da sta najbolj občutljivejša parametra v modelu koeficient prepustnosti geoloških plasti in parameter, ki opredeljuje prepustnost rečnega korita. S spreminjanjem vrednosti teh parametrov (kalibracijo) smo poskušali zagotoviti primerljivost meritev in rezultatov modela.



Sl. 4. Primerjava opazovanih in simuliranih nivojev podzemne vode v izbranih opazovalnih vodnjakih

Fig. 4. Comparison of observed and simulated groundwater levels at selected observation wells

Pri določitvi koeficienta prepustnosti v modelu smo se opirali na terenske meritve in konceptualno razumevanje hidrogeoloških razmer. Konceptualno razumevanje predvideva slabšo prepustnost severnega dela aluvialnega nanosa reke Drave (zgornje terase) v primerjavi z južneje ležečimi nanosi.

Validacijo modela smo opravili z oceno zanesljivosti modela v obdobjih, ki niso bila zajeta pri kalibraciji (2001 - 2003). Primerljiva zanesljivost modela (ujemanje meritev in rezultatov modela) v obdobju validacije in kalibracije zagotavlja ustreznost modela za simulacijo predvidenih scenarijev.

Simulacija modela

Izdelan model smo uporabili za namene napovedi spremembe dinamike podzemne v primeru črpanja iz predvidenih vodnjakov. Z modelom smo preizkusili različne postavitve vodnjakov in količine črpanja. Izvedli smo tri scenarije postavitve črpališča: črpališče 200 l/s prečno na smer toka podzemne vode, črpališče v dveh baterijah vodnjakov s skupno črpano količino 400 l/s, ter črpališče za 200 l/s vzdolžno na smer toka podzemne vode. Pri simulacijah smo upoštevali črpanje iz že izdelanega vodnjaka GV-1. Črpanje količine 25 l/s smo simulirali od leta 2000 naprej.

Rezultati simulacij so predstavljeni v obliki:

- simuliranih nivojev podzemne vode,
- potovanja navideznih delcev, ki definirajo prispevna območja za posamezne vodnjake,
- bilančnih ocen.

Rezultati

Z matematičnim modelom vodonosnika Selniške Dobrave smo ocenili lastnosti in

vodno bilanco vodonosnika. Različne scenarije črpanja smo simulirali z namenom določiti optimalne lokacije novih vodnjakov.

Geometrija vodonosnika

Podlago prodnega zasipa smo interpretirali na osnovi geofizikalnih podatkov, izvrstanih piezometrov in poznavanja geoloških značilnostih območja. Za interpolacijo smo uporabili metodo kriging. Širina s prodom zasute stare struge, ki poteka ob sedanjem toku Drave, je med 500 m in 900 m. Ocenjujemo, da je največja debelina prodnega zasipa na tem delu 50 m. Debelina omočenega sloja vodonosnika je v razponu od 7 m do 14 m, v najglobljih predelih tudi več.

Površinski dotoki

V hidrogeološkem modelu na območju prodnega zasipa smo upoštevali časovno odvisne količine ponikanja potokov s severnega dela zaledje. Mesta ponikanj so prikazana na sliki 1. Povprečni modelirani odtok iz celotnega območja modela padavine-odtok znaša 32.4 l/s. Delež ponikanja na posameznih mestih smo ocenil glede na delež zaledja posameznega potoka (na sliki 1 označeni z Z1, Z2, Z3, Z4) in na podlagi deleža, ki ponikne na območju hidrogeološkega modela, ocenjenega s terenskim ogledom. Ocene deležev so podane v tabelah 2 in 3.

Podzemna voda

Največje simulirano nihanje podzemne vode v zgornjem (severozahodnem) delu vodonosnika je 1,5 m, v spodnjem (jugovzhodnem) pa 1m (slika 5). Posebej je bilo obdelano obdobje ekstremno visokih vod konec 1.1998 in decembra 2000. Ocena hidravličnega gradienta glavnega vodonosnika je pri

Tabela 2. Površinski deleži zaledja potokov in povprečni odtoki
Table 2. Parts of stream surface recharge areas and average runoffs

Zaledje	Z1	Z2	Z3	Z4
Deleži površine	0.47	0.22	0.18	0.1
Povprečni odtok (l/s)	15.2	7.1	5.8	3.2

Tabela 3. Količinski deleži ponikanj potokov (kanalov).

Table 3. Quantity parts of sinking streams

Potok, kanal	A1	A2	A3
Deleži ponikanja	0.1	0.075	0.15
Povprečna količina ponikanja (l/s)	1.5	1	2.2

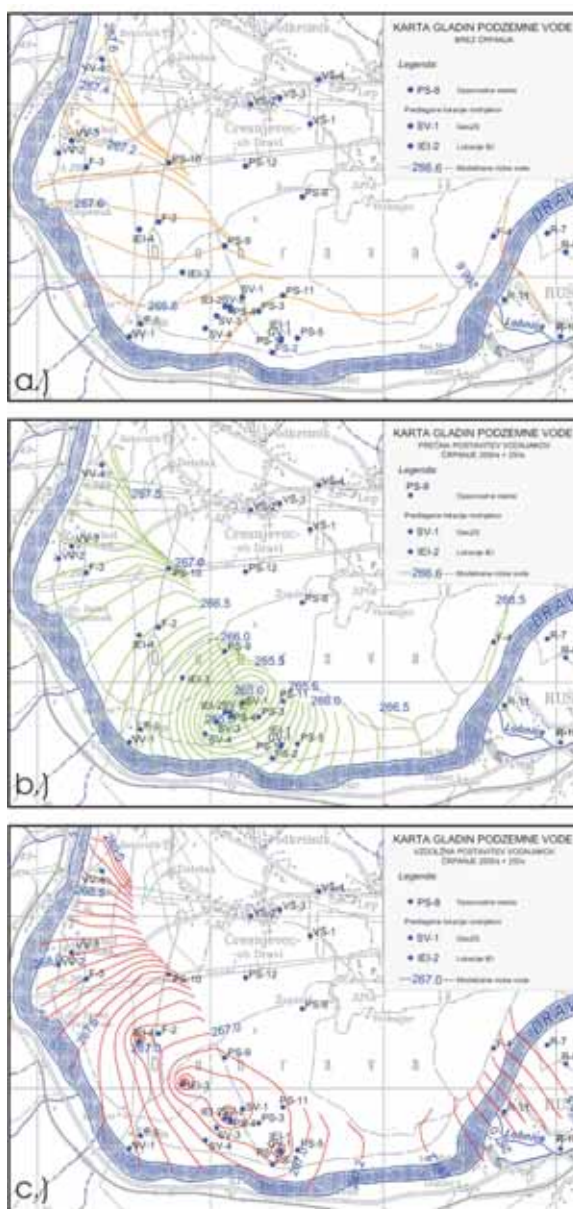
nizkih vodah 0,0004, pri visokih vodah pa 0,0005. Ocena horizontalnih hitrosti toka podzemne vode (v) pri učinkoviti poroznosti vodonosnika $n_e = 0,15$ je od 1,15 m/dan do 1,5 m/dan.

Za ista obdobja kot za oceno nivojev brez črpanja (ničelno stanje) smo z modelom ocenili nivo podzemne vode v primeru črpanja 200 l/s (slika 5). Ocena maksimalnega znižanja z modelom je 2,25 m. V primeru črpanja 200 l/s v bateriji vodnjakov je znižanje nivoja od zgornjega dela vodonosnika do črpališča 2,5 m do 3 m, hidravlični gradient pa je ocenjen na 0,002, ocena hitrosti pa je 5,8 m/dan.

Dinamične zaloge vodnega vira

Ocena vodne bilance je bila narejena za celotno območje kvartarnega zasipa (spodnji in zgornji vodonosnik), ter po posameznih sekvenčnih območjih, kar nam omogoča sledenje dotokov in odtokov iz posameznih delov vodonosnika (slika 6). Zgornji vodonosnik predstavlja območje 1, bilanco glavnega vodonosnika pa predstavljajo območja od 2 do 5, ki so skupno imenovana območje 6 (slika 6). S simulacijo modela smo ocenili dinamične zaloge za trenutno (ničelno) stanje s predpostavljenim črpanjem 25 l/s iz vodnjaka GV-1 od 1.2000 (za celotno obdobje je povprečje 10 l/s); za scenarij črpanja 200 l/s in 400 l/s iz baterije vodnjakov prečno na smer toka podzemne vode; ter scenarij zajema 200 l/s na lokacijah vzdolžno na smer toka podzemne vode. V tabelah 4 in 5 so predstavljene bilančne ocene celotnega sistema po posameznih letih za obdobje med leti 1998 in 2002, ter povprečne vrednosti za celotno obdobje po sekvenčnih območjih. V bilanci so upoštevani infiltracija padavin, dotoki iz severnega dela zaledja, napajanje iz Drave in dreniranje v Dravo, ter iztok iz vodonosnika proti Rušam. Sprememba količine vode v zasičeni coni zgornjega vodonosnika je posledica nastavitve začetnih pogojev v modelu in nima pomena v bilančni oceni.

Iz rezultatov modela ocenjujemo, da povprečju znaša infiltracija padavin na celotnem območju prodnega nanosa 63

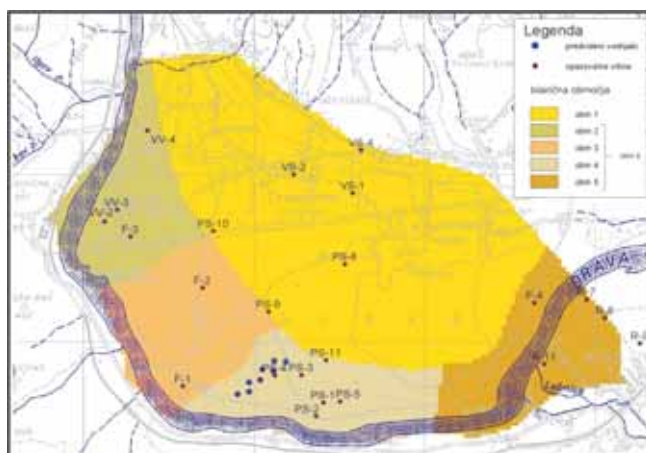


Sl. 5. Hidroizohipse nivojev podzemne vode - Modelirani nivoji za nizke vode

- a.) ničelno stanje pred črpanjem,
- b.) pri črpanju 200 l/s v vodnjakih prečno in
- c.) vzdolžno na tok podzemne vode

Fig. 5. General contour levels of groundwater - Modelling groundwater levels

- a.) before pumping,
- b.) after pumping 200 l/s from pumping stations located transverse and
- c.) along the groundwater flow direction



Sl. 6. Bilančna območja, upoštevana v modelu

Fig. 6. Balance areas included in the model

l/s, napajanje iz potokov iz severnega dela zaledja 5 l/s, dotok iz Drave 23 l/s, v Dravo pa se drenira 40 l/s. Podzemni iztok proti Rušam je ocenjen na 27 l/s. Skupne dinamične zaloge ocenjujemo na povprečno 91 l/s (v sušnem obdobju na 60 l/s in v vodnatem obdobju na 140 l/s) (tabela 4).

V primeru črpanja 200 l/s iz baterije vodnjakov prečno na smer toka podzemne vode se povečajo dotoki v vodonosnik iz Drave na 200 l/s. Vodonosnik se drenira v Dravo le še v zgornjem toku – severozahodnem delu (obm. 2 in 3). Povečanje dotokov je v glav-

nem v območju črpališča (132 l/s-obm. 4) in nad kmetijo Kraner (48 l/s –obm. 3). Dinamične zaloge v tem primeru ocenjujemo v povprečju na 270 l/s (v sušnem obdobju na 235 l/s in v vodnatem obdobju na 310 l/s) (tabela 5). V primeru črpanja 400 l/s na območju 3 pride do povečanja pretoka vode skozi celoten vodonosnik, povečajo pa se predvsem dotoki v vodonosnik iz Drave.

V primeru črpanja 200 l/s iz vodnjakov postavljenih vzdolžno na smer toka podzemne vode se odvzem vode iz vodonosnika razporedi na večje območje (po 100 l/s na

Tabela 4. Bilanca podzemne vode po območjih

Table 4. Groundwater balance by areas

leto	padavine mm/leto	padavine (l/s)	evapotranspiracija (l/s)	sprememba količine vode v zasičenih coni (l/s)	dotoki iz zaledja (model padavine-dotok)	podzemni iztok (l/s)	podzemni dotok (l/s)	črpanje (l/s)	infiltracija (l/s)	napajanje iz reke (l/s)	dreniranje iz vodonosnika v reko (l/s)	skupni dotok (l/s)	skupni odtok (l/s)
brez črpanja													
1998	1393	226	120	42	7	36	0	0	106	26	61	138	139
1999	1274	207	118	27	6	36	0	0	86	20	48	112	112
2000	813	132	102	-7	3	22	0	0	29	22	40	54	54
2001	933	151	116	-12	3	19	0	25	35	20	26	58	59
2002	1054	171	113	18	4	21	0	25	61	27	27	92	92
povprečje	1093	177	114	14	5	27	0	10	63	23	40	91	91
črpanje 200 l/s													
1998	1393	226	120	42	7	32	0	225	106	199	11	312	309
1999	1274	207	118	27	6	32	0	225	86	202	6	294	291
2000	813	132	102	-7	3	18	0	225	29	209	4	242	240
2001	933	151	116	-11	3	16	0	225	35	197	3	235	233
2002	1054	171	113	19	4	18	0	225	61	204	5	270	267
povprečje	1093	177	114	14	5	23	0	225	63	202	6	271	268
črpanje 400 l/s													
1998	1393	226	120	42	7	29	0	425	106	394	5	506	502
1999	1274	207	118	27	6	30	0	425	86	398	3	490	486
2000	813	132	102	-7	3	15	0	425	29	406	2	439	435
2001	933	151	116	-12	3	13	0	425	35	394	1	433	428
2002	1054	171	113	20	4	15	0	425	61	401	2	467	462
povprečje	1093	177	114	14	5	21	0	425	63	399	3	467	462
črpanje 200 l/s I&E													
1998	1393	226	120	42	7	33	0	200	106	171	6	283	281
1999	1274	207	118	27	6	33	0	200	86	175	4	267	264
2000	813	132	102	-7	3	19	0	200	30	183	2	216	214
2001	933	151	116	-12	3	17	0	200	35	171	2	209	207
2002	1054	171	113	19	4	19	0	200	61	178	4	244	242
povprečje	1093	177	114	14	5	24	0	200	63	176	4	244	242

Tabela 5. Bilanca vodonosnika po letih
Table 5. Aquifer water balance by years

del zaledja	scenarij	obdobje	padavine mm/meto	padavine (l/s)	evapotran spiracija (l/s)	spremem ba količine vode v zasičeni coni (l/s)	dotoki iz zaledja (model padavine- odtok)	podzemni iztok (l/s)	podzemni dotok (l/s)	črpanje (l/s)	infiltracija (l/s)	napajanje iz reke (l/s)	dreniranje iz vodonos nika v reko (l/s)	skupni dotok (l/s)	skupni odtok (l/s)
obm 1	brez črpanja	1.1.1998 - 1.1.2003	1093	88	56	14	5	23	1	0	31	0	0	37	36
obm 2		1.1.1998 - 1.1.2003	1093	22	13	0	0	12	10	0	8	2	8	20	20
obm 3		1.1.1998 - 1.1.2003	1093	23	15	0	0	12	19	0	8	4	18	30	30
obm 4		1.1.1998 - 1.1.2003	1093	22	15	0	0	8	15	10	7	8	13	31	31
obm 5		1.1.1998 - 1.1.2003	1093	22	14	0	0	27	10	0	8	10	1	28	28
obm 6		1.1.1998 - 1.1.2003	1093	90	58	0	0	4	-1	10	32	23	40	54	55
celotno obm			1093	177	114	14	5	27	0	10	63	23	40	91	91
obm 1	črpanje	1.1.1998 - 1.1.2003	1093	88	56	14	5	29	8	0	31	0	0	44	43
obm 2	200 l/s	1.1.1998 - 1.1.2003	1093	22	13	0	0	17	10	0	8	3	5	21	21
obm 3		1.1.1998 - 1.1.2003	1093	23	15	0	0	85	30	0	8	48	1	86	86
obm 4		1.1.1998 - 1.1.2003	1093	22	15	0	0	7	93	225	7	132	0	232	232
obm 5		1.1.1998 - 1.1.2003	1093	22	14	0	0	29	4	0	8	17	0	29	29
obm 6		1.1.1998 - 1.1.2003	1093	90	58	0	0	-6	-8	225	32	202	6	227	225
celotno obm			1093	177	114	14	5	23	0	225	63	202	6	271	268
obm 1	črpanje	1.1.1998 - 1.1.2003	1093	88	56	14	5	32	11	0	31	0	0	47	46
obm 2	400 l/s	1.1.1998 - 1.1.2003	1093	22	13	0	0	23	12	0	8	6	3	25	25
obm 3		1.1.1998 - 1.1.2003	1093	23	15	0	0	161	43	0	8	110	0	161	161
obm 4		1.1.1998 - 1.1.2003	1093	22	15	0	0	14	176	425	7	256	0	440	439
obm 5		1.1.1998 - 1.1.2003	1093	22	14	0	0	35	4	0	8	23	0	35	35
obm 6		1.1.1998 - 1.1.2003	1093	90	58	0	0	-12	-11	425	32	399	3	420	416
celotno obm			1093	177	114	14	5	21	0	425	63	399	3	467	462
obm 1	črpanje	1.1.1998 - 1.1.2003	1093	88	56	14	5	23	1	0	31	0	0	38	37
obm 2	200 l/s	1.1.1998 - 1.1.2003	1093	22	13	0	0	23	12	0	8	5	3	25	25
obm 3	IEI	1.1.1998 - 1.1.2003	1093	23	15	0	0	23	53	100	8	63	0	124	124
obm 4		1.1.1998 - 1.1.2003	1093	22	15	0	0	26	27	100	7	91	0	126	126
obm 5		1.1.1998 - 1.1.2003	1093	22	14	0	0	27	4	0	8	15	0	28	28
obm 6		1.1.1998 - 1.1.2003	1093	90	58	0	0	1	-1	200	32	176	4	206	205
celotno obm			1093	177	114	14	5	24	0	200	63	176	4	244	242

območjih 2 in 3). Točkovno znižanje nivoja podzemne vode je manjše. Prav tako je manjši gradient toka podzemne vode v primerjavi s črpanjem iz baterije vodnjakov prečno na smer toka podzemne vode, vendar znižanje prostorsko zavzema večje območje Selniške Dobrave. Napajanje iz Drave je nekoliko manjša, razporejeno pa je na daljši odsek.

Prispevno območje

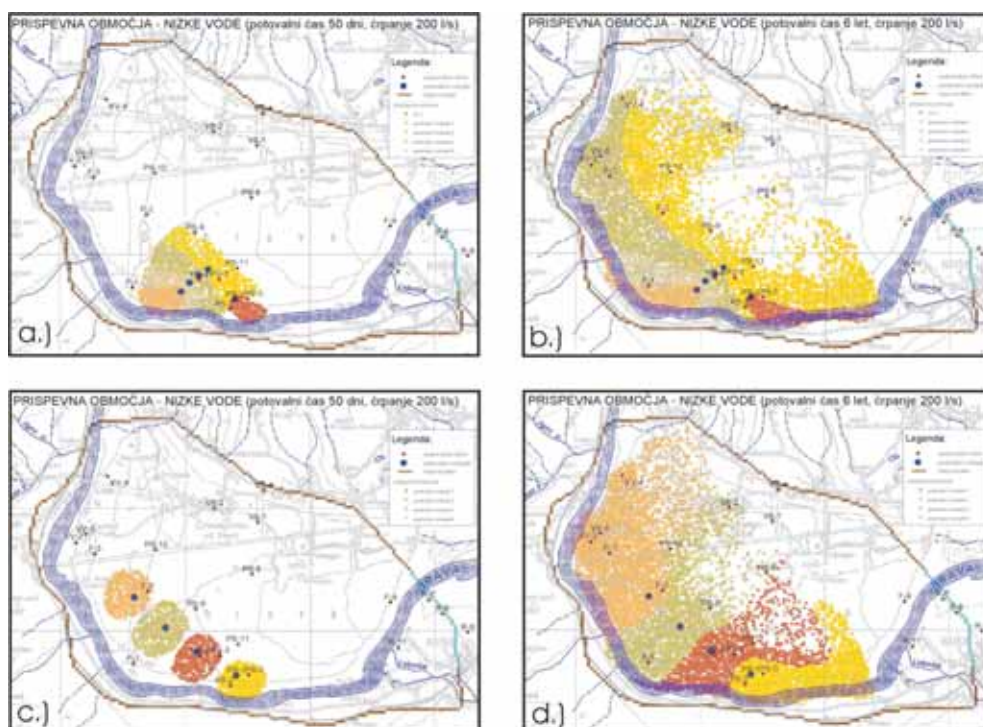
Za scenarija črpanja 200 l/s z baterijo vodnjakov postavljeno prečno in vzdolžno na smer toka podzemne vode smo z modelom simulirali prispevna območja za potovalne čase 50 dni (1. varstveni pas) in 6 let za stanje nizkega in visokega vodostaja (slika 7).

Iz rezultatov modela je razvidno, da se prispevna območja med visokimi in nizkimi vodami po svojem obsegu ne razlikujejo bistveno, razlikujejo pa se glede na postavitev vodnjakov. Prispevno območje 50 dni za baterijo vodnjakov prečno na smer toka podzemne vode je skupno za vse vodnjake, prispevna območja posameznega vodnjaka pa so porazdeljena v pasovih v smeri toka podzemne vode. V primeru lokacij vzdolžno na

smer toka podzemne vode prispevna območja vodnjakov v času 50 dni nimajo medsebojnega vpliva in so koncentrično porazdeljena okoli posameznega vodnjaka. V obeh primerih je vplivno območje v času 50 dni omejeno na spodnji vodonosnik. Vodnjaki v obdobju 6 let v obeh primerih zajamejo vodo iz območja spodnjega in zgornjega vodonosnika v različnih deležih na posamezen vodnjak. Vodnjaki v bateriji prečno na smer toka podzemne vode imajo različna prispevna območja. Vodnjak SV-1 (skrajno severni) zajema v glavnem vodo iz zgornjega vodonosnika, ostali pa zajemajo vodo Dravskega filtrata z različno oddaljenostjo od vira napajanja (Drave). Vsi vodnjaki v bateriji vzdolžno na tok podtalnice zajemajo vodo tako iz zgornjega kot spodnjega vodonosnika.

Lokacija črpališča

Rezultati matematičnega modela kažejo, da je možno izvesti baterijo vodnjakov za črpanje 200 l/s na južnem delu Selniške Dobrave na območju spodnjega vodonosnika. Pri določitvi lokacij smo upoštevali hidrogeološke pogoje, možnost optimalnega varovanja vodnega vira in stroške postavitve črpa-



Sl. 7. Prispevna območja črpaljšč za nizke vode pri črpanju 200 l/s + 25 l/s – a.) potovalni časi 50 dni, prečna postavitev; b.) potovalni časi 6 let, prečna postavitev; c.) potovalni časi 50 dni, vzdolžna postavitev; d.) potovalni časi 6 let, vzdolžna postavitev

Fig. 7. Pumping station capture zones for low groundwater levels for 200 l/s + 25 l/s pumping a.) travel time 50 days, transversal position of pumping station; b.) travel time 6 years, transversal position of pumping station; c.) travel time 50 days, alongside position of pumping station; d.) travel time 6 years, alongside position of pumping station;

lišča. Rezultati modela kažejo, da je pri postavitvi baterije vodnjakov prečno na smer toka podzemne vode prispevno območje 50 dni (najstrožjega režima varovanja) manjše in prostorsko omejeno na gozdne površine. Zaradi različnih deležev vode v vodnjakih glede na vir napajanja je možen selektiven izklop ogroženih vodnjakov. Nenazadnje so stroški izvedbe in vzdrževanja črpaljšča na manjšem območju nižji.

Zaključki

Dinamični matematični model vodonosnika Selniške Dobrave smo izdelali na podlagi sinteze podatkov, ki so rezultat večletnih raziskav. Programsko orodje za hidrogeološko modeliranje MIKE SHE smo izbrali, ker je primerno za opis dinamičnih interak-

cij med površinskimi in podzemnimi vodami, kar je bistvenega pomena pri obravnavanju vodnega vira.

Pri iskanju najugodnejše izvedbe novega črpaljšča na Selniški Dobravi smo s simulacijami modela preizkusili različne scenarije, ki predvidevajo črpanje 200 l/s in 400 l/s iz črpalnih vodnjakov na različnih lokacijah.

Z modelom ocenjene povprečne dinamične zaloge podzemne vode na celotnem območju za obdobje med leti 1998 in 2003 znašajo 91 l/s. Infiltracija padavin je ocenjena na 63 l/s, napajanje iz Drave 23 l/s in dreniranje v reko 40 l/s. V primeru črpanja 200 l/s v spodnjem (jugovzhodnem) delu vodonosnika, se dinamične zaloge podzemne vode povečajo v povprečju na 270 l/s na račun napajanja iz Drave (tabeli 4, 5). Določena so bila tudi prispevna območja vodnjakov (slike 7 a-d). Glede na rezultate modela,

možnosti varovanja vodnega vira in izvedbo vodnjakov smo predlagali izgradnjo baterije štirih vodnjakov izdatnosti po 50 l/s prečno na smer toka podzemne vode. Ta postavitev omogoča razširitev črpališča in s tem možnost črpanja 400 l/s.

S testom občutljivosti modela je bilo ugotovljeno, da sta najbolj občutljivejša parametra hidrogeološkega modela koeficient prepustnosti geoloških plasti in parameter, ki opredeljuje prepustnost rečnega korita. Za izboljšanje zanesljivosti modela bi bilo smotno opraviti meritve s katerimi bi pridobili podatke o prostorski porazdelitvi vrednosti teh parametrov. Z dodatnimi sistematično zbranimi meritvami v daljših časovnih obdobjih bi bilo dodatno zmanjšano tveganje pred odločitvami, ki bi imele nezaželene posledice na vodni.

Zahvala

Zahvaljujemo se Ministrstvu za visoko šolstvo, znanost in tehnologijo in Mariborskemu vodovodu, javno podjetje, d.d., ki sta financirala projekt Urbana hidrogeologija, v okviru katerega je bil postavljen matematični model vodonosnika Selniške dobrove. Prikazani rezultati simulacij v modelu Selniške Dobrove so del projekta izbora primerne lokacije vodnjakov, ki ga je financiral Mariborski vodovod, javno podjetje, d.d..

Literatura

- Abbot, M. B., Bathurst, J. C., Cunge, J. A., O'Connell, P. E. & Rasmussen, J., 1986: An Introduction to the European Hydrological System-Systeme Hydrologique Europeen, "SHE", 2: structure of a physically-based, distributed modelling system. - *Journal of Hydrology*, 87, 61-77.
- Brenčič, M. & Krivic, J. 2003: Geosphere mathematical models and calculations, In: PA/SA for generic location of LILW repository in the Republic of Slovenia. - Arhiv Geološkega zavoda Slovenije, Ljubljana.
- Brenčič, M. & Krivic, J. 2005: Analiza tveganja pred onesaženjem podzemne vode za izgradnjo plinovoda M2/1 Trojane-Vodice na območju vodnih virov Volčji potok in Nožice - Arhiv Geološkega zavoda Slovenije, Ljubljana.
- Brenčič, M. & Krivic, J. 2005: Analiza tveganja za izgradnjo avtoceste Slivnica-Draženci - Arhiv Geološkega zavoda Slovenije, Ljubljana.
- Brenčič, M., Ratej, J., Janža, M. & Krivic, J. 2005: Hidrogeološka bilanca odlagališča hidrometalurške jalovine Boršt - Rudnik Žirovski

vrh. - Arhiv Geološkega zavoda Slovenije, Ljubljana.

Jamnik, B., Refsgaard, A., Janža, M. & Kristensen, M., 2001: Water resources management model for Ljubljana City. In: 4th DHI Software Conference ŠCD-ROMC. - DHI Water & Environment, Elsinore.

Janža, M. 2000: Varovanje vodnega vira z uporabo GIS in hidrogeološkega modela : magistrsko delo. - Univerza v Ljubljani, NTF, 74 pp., Ljubljana.

Janža, M. 2000: Integration of GIS and hydrological modelling for groundwater protection. In: Proceedings of 2nd International conference on GIS for Earth science applications, 11-14 September, 2000. - 7 pp., Menemen-Izmir.

Janža, M. 2003: Modeliranje napajanja regionalnega vodonosnika z uporabo metod daljinskega zaznavanja: doktorska disertacija. - Univerza v Ljubljani, NTF, 139 pp., Ljubljana.

Janža, M. 2005: Nadgradnja hidravličnega modela podzemne vode Ljubljanskega polja (končno poročilo). - Arhiv Geološkega zavoda Slovenije, 37 pp., Ljubljana.

Jecelj, S. 2004: Letno poročilo 2003 - Mariborski vodovod javno podjetje, d.d., Maribor.

Juren, A., Mali, N., Jecelj, S. & Cajnkari, A. 1996: Outlines of the drinking water solution in Maribor. In: 1st International Conference The Impact of Industry on Groundwater Resources, Villa Erba-Cernobbio (Como) : proceedings - 25-33. Villa Erba-Cernobbio (Como).

Kristensen, M. & Andersson, U. 1999: Water Resources Management Model for Ljubljansko Polje and Ljubljansko Barje - Data Report. - DHI, 90 pp., Horsholm.

Kristensen, M. 1999: Water Resources Management Model for Ljubljansko Polje and Ljubljansko Barje - Progress Report No. 5. - DHI, 16 pp., Horsholm.

Kristensen, M., Andersson, U., Sorensen, H. R., Refsgaard, A. & Gustavsson, L. 2000: Water Resources Management Model for Ljubljansko Polje and Ljubljansko Barje - Final Report. Horsholm: DHI Water & Environment.

Krivic, J. & Brenčič, M. 2005: hidrogeološka bilančna analiza jalovišča hidrometalurške jalovine Boršt - Rudnik Žirovski vrh, 17. posvetovanje slovenskih geologov- Razprave in poročila, 67-70, Ljubljana.

Mali, N. 1996: Sinteza in analiza meritev za postavitev modela dinamike podzemne vode vodonosnika Selniške Dobrove. - Arhiv Geološkega zavoda Slovenije, Ljubljana.

Mali, N., Janža, M., Marinko, M., Rikanovič, R., Herič, J., Levičnik, L. & Mozečič, S. 2005: Raziskave Selniške Dobrove - Raziskovalna dela z določitvijo lokacij vodnjakov in ogroženosti vodnega vira na Selniški Dobravi. - Arhiv Geološkega zavoda Slovenije, Ljubljana.

Mioč, P. & Znidarčič, M. 1976: OGK SFRJ 1: 100 000, Tolmač za list Slovenj Gradec. - Zvezni geološki zavod, Beograd.

Prestor, J. & Janža, M. 2002: Vpliv ljubljanskega odlagališča komunalnih odpadkov Barje na podzemno vodo. - *Geologija*, 45, 2, 505-512, Ljubljana.

Prestor, J., Urbanc, J., Janža, M., Rikanovič, R., Bizjak, M., Medič, M. & Strojman, M. 2002: Preverba in dopolnitev strokovnih podlag za določitev varstvenih pasov vodnih virov centralnega sistema oskrbe s pitno vodo v MOL. -

Arhiv Geološkega zavoda Slovenije, 49 pp., Ljubljana.

Prestor, J., Janža, M., Urbanc, J. & Benčina, D. 2005: Poročilo o učinkih izvedenih ukrepov po uredbi o programu ukrepov sanacije onesnaženj dela vodonosnika Ljubljanskega polja s trikloroetenom na VVO Vodarne Hrastje. - Arhiv Geološkega zavoda Slovenije, 29 pp., Ljubljana.

Refsgaard, J. C. & Storm, B. 1995: MIKE SHE. In: V. P. Singh (ed.), Computer Models of Watershed Hydrology. - Water Resources Publications, 809-846, Highlands Ranch.

Rikanovič, R., 2005: Geografski opis območja Selniške Dobrave. V: Raziskave Selniške Dobrave - Raziskovalna dela z določitvijo lokacij vodnjakov in ogroženosti vodnega vira na Selniški Dobravi. - Arhiv Geološkega zavoda Slovenije, Ljubljana.

Urbanc, J., Janža, M., Prestor, J., Strojjan, M. & Bizjak, M. 2004: Ugotavljanje izvora in dinamike širjenja onesnaženja podzemne vode s trikloroetenom na območju med Savsko cesto in črpališčem Hrastje v Ljubljani. - Arhiv Geološkega zavoda Slovenije, Ljubljana.