

Ocena ranljivosti vodonosnika s SINTACS modelom v GIS okolju

A GIS based SINTACS model for assessing aquifer vulnerability

Nina MALI & Mitja JANŽA

Geološki zavod Slovenije, Dimičeva 14, SI – 1000 Ljubljana, Slovenija
E-pošta: nina.mali@geo-zs.si
mitja.janza@geo-zs.si

Ključne besede: ranljivost, vodonosnik, SINTACS, vodni vir, Selniška Dobrava
Key words: vulnerability, aquifer, SINTACS, water resource, Selniška Dobrava

Povzetek

Določitev ranljivosti vodonosnega sistema je pomembna zaradi optimizacije zaščitnih ukrepov v varovanem zaledju vodnega vira. V članku je opisan postopek za oceno ranljivosti in izdelava karte ranljivosti prodnega vodonosnika Selniške Dobreve. Karta prikazuje možnost onesnaženja podzemne vode na osnovi hidrogeoloških pogojev. Večina geoloških in hidrogeoloških faktorjev, ki vplivajo na gibanje podzemne vode (v zasičeni in nenasičeni coni) so vključeni v SINTACS model ocene ranljivosti (Civita & De Maio 1997). Karto naravne ranljivosti vodonosnika smo izdelali s prekrivanjem hidro-geoloških podatkov v GIS (Geografski informacijski sistem) okolju. Za oceno morebitnega onesnaženja podzemne vode smo integrirali karto ranljivosti s karto rabe prostora kot dodatnim parametrom v SINTACS modelu. Ranljivost vodonosnika je razvrščena v šest razredov glede na intervalne vrednosti indeksa SINTACS od nizke (I) do zelo visoke (VI) ranljivosti. Severni del območja Selniške Dobreve je razvrščen v nizko do zmerno stopnjo ranljivosti (II, III.) z manjšim območjem visoke ranljivosti (IV). Območje glavnega vodonosnika, južni in zahodni del, pa je razvrščeno v visoko stopnjo ranljivosti vodonosnika (IV,V).

Abstract

Assessing aquifer vulnerability is very important because of optimization of restrictive measures in watershed protection area. This paper describes the procedure of aquifer vulnerability estimation and compilation of groundwater vulnerability map of Selniška Dobrava porous aquifer. The map presents areas of greatest potential for groundwater contamination on the basis of hydrogeological conditions and human impacts. All major geological and hydrological factors that affect and control groundwater movement (in unsaturated and saturated zone) were incorporated into SINTACS model of vulnerability map. A Geographical Information System (GIS) was used to create a groundwater vulnerability map by overlaying the available hydrogeological data. The resulting vulnerability map was then integrated with a map of land use as an additional parameter in the SINTACS model to assess the potential risk of groundwater pollution (Civita & De Maio 1997). Aquifer vulnerability was classified in six classes by interval values of SINTACS index from low (I) to very high (VI) vulnerability. The north part of Selniška Dobrava area is classified into low to moderate class (II, III). The south and west part, where the main aquifer is located, are classified into high aquifer vulnerability class (IV, V).

Uvod

Vedno večja ogroženost in obremenjevanje vodnih virov zahteva vse večje napore za zagotavljanje dobre kakovosti podzemne vode. Razvoj zajetij vodnih virov in uvajanje zaščitnih ukrepov na njihovem varovanem zaledju predstavlja vrsto omejitev človekovih dejavnosti. Za čim večjo učinkovitost zaščitnih ukrepov omejitev v varovanem zaledju je zelo pomembna podrobnejša določitev ranljivosti vodonosnega sistema, še zlasti na obsežnejših vodovarstvenih območjih.

Z ranljivostjo vodnega vira ocenjujemo možnost onesnaženja podzemne vode na osnovi hidrogeoloških pogojev. Večina geoloških in hidrogeoloških faktorjev, ki vplivajo na gibanje podzemne vode (v zasičeni in nenasičeni coni), so vključene v SINTACS model karte ranljivosti. Vključeni parametri so: globina do podzemne vode, infiltracija, vpliv nezasičene cone, lastnosti tal, hidrogeološke lastnosti vodonosnika, prepustnost vodonosnika in relief. Oceno ranljivosti smo izvedli s prekrivanjem hidrogeoloških slojev v GIS okolju.

Mariborski vodovod s svojim sistemom oskrbuje celotno regijo Maribor, Lenart, Pesnica, Ruše, Kungoto, Duplek, Šentilj in delno Radgono. Dnevno načrpa 42000 m³ do 56000 m³ pitne podzemne vode iz 29 vodnjakov iz 7 črpališč (Vrbanski plato, Bohova, Betnava, Dobrave, Ruše, Šentilj-Ceršak in Selnica). Ne glede na zmanjšanje porabe vode, se povečuje količina načrpane vode, posebno na črpališču Vrbanski plato, kjer je opazno dolgoročno upadanje gladin podzemne vode. Drugi problem v oskrbi s pitno vodo je njena kvaliteta (Juren et al., 1996; Jecelj, 2004). Zaradi potreb po zagotavljanju večjih količin kakovostne pitne vode od l. 1993 potekajo raziskave vodnega vira Selniške Dobrave (Mali, 1995). Raziskave so potrdile primernost vodnega vira za vodooskrbo Maribora in okolice. V letu 2000 se je pričelo poskusno črpanje iz raziskovalnega vodnjaka GV-1. V prihodnosti je predvidena možnost izvedbe črpališča za izkoriščanje 200 l/s vode. Za varovanje tega vodnega vira bo zaledje zavarovano z odlokom o vodovarstvenih območjih. Z uveljavitvijo odloka bo prišlo do omejevanja dejavnosti in posegov na tem območju, in s tem do določenih sprememb pri obstoječem in nadaljnjem načrtovanju rabe prostora.

Metoda SINTACS omogoča hiter in sistematičen pregled območij, ki so kritična za poseg v vodni vir. Za območje vodonosnika Selniške Dobrave smo po metodi SINTACS izdelali karto ranljivosti. Za oceno ogroženosti smo karto ranljivosti integrirali s karto rabe prostora kot dodatnim parametrom v SINTACS modelu. Namen ocene ranljivosti in ogroženosti vodonosnika Selniške Dobrave je uporabnost SINTACS modela za oceno ranljivosti medzrnskih vodonosnikov.

Ranljivost vodonosnika

Namen ocene ranljivosti napajalnega zaledja vodnega vira je pridobiti dodatne informacije predvsem o tem, kako občutljivo je to območje na napredovanje onesnaževala (polutanta) s površine do gladine podzemne vode na osnovi naravnih značilnosti območja. Metodologija določanja vodovarstvenih območij upošteva v splošnem le hitrosti napredovanja onesnaževala v vodoravni smeri od točke posega (razlitja) do izvira. Z metodologijo določanja ranljivosti pa dobimo ranljivost vodonosnika v vsaki točki na tem prostoru, ne glede na oddaljenost od zajetja. Na ta način lahko območje določenega vodovarstvenega območja podrobneje razčlenimo na bolj in manj ranljive predele. Taka razčlenitev nam zelo pomaga pri uvajanju dejavnosti ali posegov, za katere je potrebna dodatna presoja, in tudi pri načrtovanju prioritete izvajanja sanacijskih in zaščitnih ukrepov.

Koncept ranljivosti podzemne vode je bil predstavljen v Franciji konec 1960-tih za ozavešanje o možnosti onesnaženja podzemne vode (Vrba & Zaporozec, 1994). Ranljivost je definirana kot možnost pronicanja in širjenja onesnaževal od površja v sistem podzemne vode. Ranljivost podzemne vode upošteva samo hidrogeološke parametre in ne upošteva redčenje polutanta. Naravne hidrogeološke lastnosti različno vplivajo na različne polutante, odvisno od vzajemnega delovanja in kemijskih lastnosti. Ranljivost vodonosnika je naravna lastnost sistema podzemne vode, ki je odvisna od občutljivosti tega sistema na človekove in/ali naravne vplive (Zaporozec, 1994). Koncept ranljivosti temelji na predpostavki, da naravno okolje lahko zagotovi določeno stopnjo zaščite vodonosnika pred naravnimi in antropogenimi vplivi, posebej tistimi, ki



Sl. 1. Območje obdelave
Fig. 1. Study area

povzročajo prenos onesnaževala pod površje (Zaporožec, 1994). Ranljivost vodonosnika je relativna lastnost brez dimenzij, ki ni neposredno merljiva. Posledično prikazuje karta ranljivosti le relativno ranljivost območja, omejenega z mejami karte, ki ni primerljiva med različnimi kartami (Vrba & Civita, 1994).

Različni pristopi so bili razviti za oceno ranljivosti vodonosnika od metod procesiranja, statističnih metod, metod prikrivanja in indeksov (Tesoriero et al., 1998). Metode na osnovi procesiranja uporabljajo metodo simulacij za oceno migracije onesnaženja, pri tem pa predstavljajo težave pomanjkanje podatkov in izračuni (Barbash & Resek, 1996). Statistične metode uporabljajo statistike za določitev povezav med posameznimi spremenljivkami in posameznim pojavom polutanta v podzemni vodi. Premajhno število kemijskih analiz in drugih podatkov in izbor spremenljivk predstavlja omejitve uporabe statističnih metod. Metode prekrivanja in indeksov kombinirajo faktorje, ki kontrolirajo premikanje polutantov iz površine v zasičeno cono in rezultirajo v indekse ranljivosti na različnih lokacijah. Prednost teh metod je, da so nekateri faktorji kot padavine in globina do podzemne vode dosegljivi za večje površine in jih lahko uporabimo za regionalno oceno (Thapinta & Hudak, 2003). Kakorkoli, slaba stran je subjektivnost v oceni numeričnih

vrednosti za opis entitet in relativnih uteži za različne attribute.

Za oceno ranljivosti vodnih virov z indeks modelom se najpogosteje uporabljata modela DRASTIC (Babiker et al., 2005; Al-Adamat et al., 2003) in SINTACS (Uricchio et al., 2004; Di Martino et al., 2005). Rezultat obeh modelov je ocena ranljivosti različnih lokacij s kombinacijo različnih tematskih slojev. Indeks ranljivosti je linearna kombinacija faktorjev, ki kaže možnost izračuna v GIS-okolju (Fabbri & Napolitano, 1995). Z uporabo serij prekrivnih analiz podatkovnih plasti GIS omogoča izbor podatkov za predstavitev spremenljivk, ki opisujejo posamezne pojave (Bonham-Carter, 1996).

Ogroženost vodonosnika

Ocena ogroženosti je verjetnost škodljivih ekoloških vplivov, ki se lahko zgodijo ali so lahko rezultat izpostavljanja enemu ali več obremenitvam (Vrba & Zaporožec, 1994). V splošnem je ogroženost definirana kot kombinacija tveganja in ranljivosti (Varnes, 1984):

$$\text{Ogroženost} = \text{Ranljivost} \times \text{Tveganje}$$

Ranljivost predstavlja stopnjo slabosti obravnavanega naravnega sistema in tveganje

nje predstavlja verjetnost, da se bo pripetilo onesnaženje na določenem območju v nekem časovnem obdobju (Passarella et al., 2002). Ranljivost vodonosnikov glede na onesnaženje lahko določimo na osnovi značilnosti vodonosnika, ki se ne spreminjajo s časom. Na drugi strani je tveganje težko ovrednotiti zaradi številnih procesov, ki vplivajo na tveganje, so redko časovno neodvisni in so del nehomogenih spremenljivk (Passarella et al., 2002).

Obravnavano območje

Geografski opis

Širše območje Selnice ob Dravi leži v SV Sloveniji. Območje se nahaja na levem bregu Drave in sega do potoka Bistrica na vzhodu, na jugu je omejeno z Dravo, na severu preide v gričevnata Spodnji in Zgornji Boč (Rikanovič, 2005). Površje je izoblikovala Drava, ki je v južnem delu območja odložila več 10 metrov debele nanose proda, v severnem pa je zaradi erozije nastalo razgibano gričevje. Južni del območja je ravninski (slika 1), severno pa se površje hitro dviguje. Gričevje je močno preprejeno z dolinami in hudourniški grapami potokov. Zaradi hudourniškega značaja vodotokov prevladujejo denudacijski in erozijski procesi. Rodovitne prsti (rankerji, rjave, kisle rjave in izprane prsti) v nižini so ugodne za kmetijstvo. V gričevju zaradi slabše rodovitnih prsti prevladujejo travniki ter gozd. Hidrološko mrežo območja tvori Drava, največji vodotok širšega območja, ter njeni številni pritoki.

Podnebno pripada območje zmernemu celinskemu podnebnju osrednje Slovenije za katerega 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.

Gosto je poseljeno osrednje nižinsko območje, kjer se nahaja 6 naselij, ki so ob popisu prebivalstva leta 2002 šteje slabih 3000 prebivalcev. Severni del območja je bolj ali manj neposeljen.

V rabi tal je zaradi reliefnih značilnosti prisotna dvojnost. Kmetijska zemljišča prevladujejo na južnem ravninskem delu območja, kjer prevladujejo njive. Pomemben delež kmetijskih površin odpade na eksten-

zivne sadovnjake in travnike. Večino gričevja pokriva gozd, prav tako predele ob Dravi, kjer so obrečne prsti manj ugodne za kmetijsko rabo.

Geološki in hidrogeološki opis

Dravska dolina med Dravogradom in Mariborom je razmeroma mlada in je nastala z mladimi neotektonskimi premiki (Mioč & Žnidaršič et al., 1978). Kvartarne naplavine Drave Selniske Dobrave ležijo na mestu, kjer se Drava prebije iz ozke soteske pri Fali. Od tod dolvodno se dolina Drave do Maribora razširi na okoli 2 km in nato še bolj na Dravskem polju. Podlago kvartarnih naplavin Selniske 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. Pleistocenske sedimente na severovzhodnem obrobju Selniske Dobrave med Zg. Bočem in Janževo goro gradi pretežno rumeno rjava do rjava peščena in meljna glina, ki je ponekod pomešana s prodniki. Vse ostale naplavine Drave pripadajo holocenu. Sestavlja jih pretežno prod debele in srednje granulacije, vmes nastopajo tudi veliki bloki metamorfnih kamenin (premera 0,5 do 1 m), posamezni pa dosežejo volumen tudi preko 2 m³. Vmesni prostor med prodniki in nezaobljenimi bloki kamenin je zapolnjen s peskom, debelejšje granulacije. Finih frakcij melja, ali celo gline v teh naplavinah praktično ni. 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%). Področje predstavlja medzrnski vodonosnik iz dobro prepustnega materiala s prosto gladino podtalnice.

Glede na dosedanje raziskave govorimo na območju spodnje in zgornje terase Selniske Dobrave o dveh vodonosnikih, ki sta hidravlično povezana. Glavni vodonosnik predstavlja prodni zasip stare struge Drave na spodnji terasi. Vodonosnost zgornjega vo-

donosnika na zgornji terasi v primerjavi s spodnjim ni velika, je pa vodonosnik pomemben zaradi napajanja spodnjega vodonosnika in zaradi možnosti širjenja onesnaženja v spodnji vodonosnik. Zgornji vodonosnik se napaja iz padavin in iz poto- kov z zaledja Selniške Dobrave. S pretaka- njem napaja spodnji vodonosnik, ki se poleg infiltracije iz padavin napaja še iz Drave.

Stara struga poteka ob sedanjem toku Drave. Največjo debelino prodnega zasi- pa na območju glavnega vodonosnika ocenjuje- mo na 50 m. Gladina podzemne vode je v povprečju na globini od 25 do 37 m, tako ocenjujemo debelino omočenega sloja po osi vodonosnika od 7-14 m, v najglobljih prede- lih tudi več. Na podlagi dosedanjih raziskav ocenjujemo, da je koeficient prepustnosti glavnega vodonosnika 5.10^{-3} m/s, povpreč- na debelina vodonosnika 11 m in transmi- sivnost $T = 5,5 \cdot 10^{-3}$ m²/s (Mali et al., 2005).

Območje obdelave

Oceno ranljivosti s SINTACS metodo smo izvedli v območju celotnega prodnega zasi- pa, zgornjega in spodnjega vodonosnika od elektrarne Fala do naselja Selnica ob Dravi. Na severu je meja rob Janževe gore na jugu pa je območje omejeno z Dravo (slika 1). Gre za območje dolgo 2,6 km in široko 1,7 km, skupne površine 4,4 km². Območje obdelave obsega celotno drugo vodovarstveno območ- je črpališča Selniške Dobrave (Kopač et al., 2002).

Metodologija

Metoda SINTACS

Za oceno ranljivosti vodonosnika Selniške Dobrave smo uporabili SINTACS model v GIS okolju. SINTACS je metoda za oceno naravne ranljivosti vodonosnika (Civita & De Maio, 1997). Je prirejena različica ame- riške metode DRASTIC (Aller et al., 1987), ki je prilagojena hidrogeološki raznovrstno- sti italijanskega ozemlja (Civita, 1990). Od leta 1990, ko se je začel njen razvoj, je bila večkrat spremenjena, tako da trenutna peta verzija ohranja le majhen del ogrodja meto- de DRASTIC (Civita & De Maio, 1997).

Metoda temelji na konceptu hidroge- ološkega okvirja, ki je definiran kot sestav- ljen opis vseh glavnih geoloških in hidro- loških faktorjev, ki vplivajo in kontrolirajo gibanje podzemne vode skozi in iz območja (Aller et al., 1987). SINTACS metoda upo- rablja naslednje parametre (Tabela 1):

- globino do gladine podzemne vode,
- infiltracijo,
- lastnosti nezasičene cone,
- lastnosti tal,
- hidrogeološke lastnosti vodonosnika,
- prepustnost vodonosnika,
- nagib pobočja.

Rezultat modela je numerični indeks, ki ga izpeljemo iz nizov in uteži pripadajočih posameznemu od sedmih parametrov. Zna- čilni tipi ali razredi posameznih parametrov predstavljajo nize, ki so razvrščeni od 1 do 10 na osnovi njihovega relativnega vpliva na

Tabela 1. Parametri SINTACS modela z utežmi.

Table 1. The SINTACS model parameters and weights.

Parameter	Opis	Uteži
Globina do gladine podzemne vode	Predstavlja globino od površja do gladine podzemne vode, globlje je gladina, manjša je možnost onesnaženja	5
Infiltracija	Predstavlja količino vode, ki pronica iz površja in doseže gladino podzemne vode, napajanje podzemne vode omogoča transport polutantov	4
Vpliv nenasičene cone	Je definiran kot material nenasičene cone in vpliva na prehod in rečenje polutanta v nenasičeni coni	5
Lastnosti tal	Predstavlja zgornji preperinski sloj nenasičene cone (tla) in vpliva na količino vode, ki infiltrira	4
Hidrogeološke lastnosti vodonosnika	Predstavljajo lastnosti nasičene cone, ki nadzorujejo redčenje polutanta	3
Prepustnost vodonosnika	Predstavlja zmožnost vodonosnika za prenos vode, istočasno določa stopnjo toka onesnaženja v vodonosnem sistemu	3
Nagib pobočja	Zapoveduje odtok padavin in s tem določa možnost pronicanja polutanta	2

ranljivost vodonosnika. Tem sedmim parametrom predpišemo niz uteži razvrščenih od 1 do 5 glede na njihovo pomembnost. SINTACS indeks nato izračunamo z linearno kombinacijo vseh parametrov.

$$I_{SINTACS} = \sum (\text{Vrednosti parametrov} \times \text{Utež})$$

Model SINTACS uporablja relativno veliko število parametrov za izračun indeksa ranljivosti, kar zagotavlja dobro zastopanost hidrogeoloških lastnosti vodonosnika. Numerični nizi in uteži so dobro definirani in dobro uporabljani v stroki. S tem je model uporaben za izdelavo primerljivih kart ranljivosti tudi v regionalnem merilu. Na obravnavanem območju smo imeli dovolj podatkov za oceno parametrov. Analizo podatkov in izvedbo modela smo opravili v GIS – okoli s programskim orodjem Spatial Analyst v paketu ArcView.

Priprava podatkov

Za modeliranje karte ranljivosti po SINTACS metodi smo pripravili sloje za posamezne parametre. Različni tipi podatkov so bili uporabljeni za izvedbo sedmih tematskih slojev (tabela 1). V tabeli 2 je predstavljen povzetek vrste podatkov in njihov vir. Obravnavano območje ustreza območju hidrogeološkega modela MIKE SHE, območju celotnega prodnega zasipa, zgornjega in spodnjega vodonosnika. Pri delu smo uporabili velikost celice rastrskih informacijskih slojev 25 m.

Digitalni model višin smo izdelali z digitalizacijo in interpolacijo izohips topografskih kart merila 1:5000 (Geodetska uprava RS). Na osnovi geofizikalnih podatkov, izvrstanih piezometrov in po lastni interpretaciji

smo z metodo kriginga v Arc View modelirali podlago prodnega zasipa (Mali et al., 2005; Car & Stopar, 2005). Pri interpolaciji smo upoštevali tudi točke, kjer pride nepropustna podlaga na površje.

Matematičnim model vodonosnika Selniške Dobrave (Janža, 2000; Mali, 1996; Mali et al., 2005) smo uporabili za oceno osnovnih parametrov vodonosnika. Model je bil postavljen z integriranim programskim paketom MIKE SHE – MIKE 11. Ocene gladin podzemne vode v vodonosniku smo povzeli iz rezultatov matematičnega modela vodonosnika. V modelu so bili uporabljeni podatki večletnih ročnih in elektronskih meritev GeoZS na obstoječi mreži piezometrov in vodnjakov v različnih časovnih intervalih od l. 1997-2004 (32 merskih mest). V modelu so uporabljeni meteorološki podatki (ARSO, obdobje 1998-2004) in podatki o rečnem nivoju Drave (Dravske elektrarne, obdobje 1998-2004). Privzeli smo, da so modelirane vrednosti gladin dobre ocene dejanskega stanja. Za model ranljivosti smo za izračun parametra globine do podzemne vode upoštevali visoke gladine podzemne vode (2.12.2000), ko je ranljivost podzemne vode najvišja.

Z modelom smo ocenili parameter infiltracije in razporeditev vrednosti koeficienta prepustnosti. Višina infiltracije je razlika med višino padavin in evapotranspiracije. Izračunali smo jo s pomočjo hidrološkega modela (MIKE SHE), ki nam omogoča tudi njeno prostorsko porazdelitev. Model uporablja za izračun realne evapotranspiracije empirične enačbe (Kristensen & Jensen, 1975). Poleg meteoroloških podatkov in podatkov o vegetaciji upošteva model še vlago v nenasičeni coni. Modeliranje evapotranspiracije temelji na vhodnih meteoroloških podatkih in

Tabela 2. Uporabljeni podatki za pripravo parametričnih slojev.

Table 2. Data used for constructing parameters layers.

Vrsta podatkov	Vir	Format	Merilo	Datum
Podatki vrtin	GeoZS	Tabele		1994-2002
Podatki o nivojih podzemne vode	GeoZS	Tabele		1998-2004
Podatki geofizikalnih meritev	GeoZS - Geoinženiring	Tabele		1995,2005
Geološka karta	GeoZS	Karta, Tolmač		1978
Hidrogeološka karta	GeoZS	Digitalni podatki	1:5 000	2005
Topografska karta	GURS	Digitalni podatki	1:5 000	1978-1987
Orto-foto	GURS	Digitalni podatki	1:5 000	2002
Pedološka karta	BF	Digitalni podatki	1:25 000	2004
Koeficient prepustnosti	GeoZS	Tabele		2005
Padavine	ARSO	Tabele		1998-2002
Baza aglomeracij	MOP-FGG	Digitalni podatki		2003

Tabela 3. Vrednosti parametrov SINTACS za pedološke enote.

Table 3. SINTACS parameter values for pedological units.

Šifra PKE	Opis PKE	Vrednost parametra SINTACS
272	DISTRIČNA RJAVA NA METAMORFNIH KAMNINAH, KOLUVIALNA (100 %)	5
1480	EVTRIČNA RJAVA NA ALUVIALNO-KOLUVIALNEM NANOSU (50 %); DISTRIČNA RJAVA NA ALUVIALNO-KOLUVIALNEM NANOSU (50 %)	6
1481	EVTRIČNA RJAVA NA LEDENODOBNEM PRODU, PEŠČENIH ZASIPIH REK IN REČNEM VRŠAJU (100 %)	8
1482	OBREČNA, EVTRIČNA pl. (50 %); OBREČNA, EVTRIČNA sr.gl. (30 %); NERAZVITA OBREČNA (FLUVISOL), EVTRIČNA pl. (20 %)	10
1830	OBREČNA, EVTRIČNA sr.gl. NA PEŠČENO PRODNATEM ALUVIJU (50 %); OBREČNA, DISTRIČNA sr.gl. NA PEŠČENO PRODNATEM ALUVIJU (50 %)	9

podatkih o vegetaciji, povezaava s komponento nenasičene cone pa zagotavlja informacije o vlagi v tleh (koreninski coni). Uporabljene vrednosti so povprečne vrednosti infiltracije za modelirano obdobje od 1. 1. 1998 do 1. 1. 2004. Vrednosti parametra SINTACS smo določili na podlagi priporočene klasifikacije. Za določitev vrednosti parametra prepustnost vodonosnika smo uporabili prostorsko porazdelitev koeficienta prepustnosti, ki smo jo določili v fazi kalibracije hidrološkega modela s programom MIKE SHE.

Vrednosti parametrov lastnosti nenasičene cone in hidrogeoloških lastnosti vodonosnika smo določili na podlagi rezultatov dosedanjih raziskav (Mali et al. 2005).

Vrednosti parametra lastnosti tal smo določili na osnovi pedološke karte (Digitalna pedološka karta 1:25.000 (CPVO 2004). Posameznim pedokartografskim enotam (PKE) smo glede na njihove ocenjene hidrološke lastnosti pripisali vrednost parametra (Tabela 3). Rastrski informacijski sloj nagib pobočja smo izdelali na podlagi digitalnega modela višin. Na podlagi izračuna razlike višin med celicami smo s programom ArcView modelirali stopnjo nagiba v ° in ga klasificirali v vrednosti parametra SINTACS glede na stopnjo nagiba.

Za obtežitev parametrov smo uporabili niz uteži (tabela 4), ki so priporočena po modelu SINTACS (Civita & De Maio, 1997) za ravninska območja.

Integrirana karta ranljivosti – ocena ogroženosti

Oceno integrirane ranljivosti – ogroženosti izvedemo s prekrivanjem sloja možnih onesnaževalcev, ki so razdeljeni na osnovi

verjetnosti izvora onesnaženja (t.j. poseljena območja, poljedelske površine, drugače poraščene površine, industrijski objekti itd.), s slojem naravne ranljivosti. Karto ogroženosti smo izdelali s kombinacijo karte ranljivosti in slojem območij možnega onesnaženja, ki smo jih izločili iz karte rabe prostora, na podlagi ortofota in baze aglomeracij (MOP-FGG 2003).

Vemo, da je vsebnost nitratov v podzemni vodi povezana z aktivnostmi na kmetijskih površinah in manj s poseljenostjo. Glede na razpršeno in komunalno neurejeno poselitev smo na območju Selniške Dobrave na osnovi virov možnega onesnaženja podzemne vode določili tri različne stopnje tveganja. Ocenili smo, da ni posebnega tveganja v prostoru razen kmetijskih površin, naseljenih območij in dejavnosti v gozdu. Kmetijske površine predstavljajo visoko stopnjo tveganja vnosa onesnaženja iz površine (dušikova gnojila) nasproti poseljenim površinam. Kmetijskim površinam smo pripisali visoko stopnjo tveganja na možnost onesnaženja, naseljem srednjo stopnjo, gozdnim površinam smo pripisali zelo nizko stopnjo tveganja za možnost onesnaženja podzemne vode.

Rezultati

Karta ranljivosti

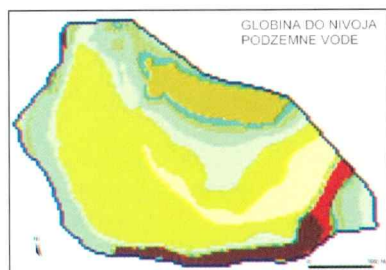
Rezultat opisanega modeliranja je karta naravne ranljivosti vodonosnika. Indeks ranljivosti SINTACS je seštevek obteženih parametrov, izdelan s prekrivanjem informacijskih slojev parametrov. Višje vrednosti indeksa ustrezajo večji ranljivosti. Zaradi boljše preglednosti smo vrednosti indeksa

normalizirali na interval od 1 do 100 in ga razdelili v šest razredov. Stopnje ranljivosti glede na intervalne vrednosti indeksa SINTACS so prikazane v tabeli 4.

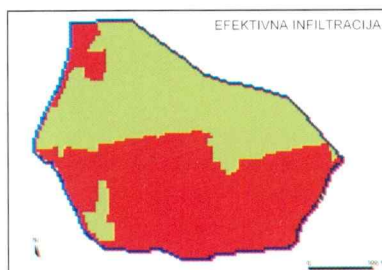
Globina do podzemne vode na območju Selniške Dobrave pada od severa proti jugu. Na območju glavnega vodonosnika je povprečna globina med 24 in 40 m, največja globina je 50 m. Na sliki 2a so prikazane vrednosti para-

metra SINTACS globine do podzemne vode. Najvišje vrednosti parametra SINTACS so na severnem delu in padajo proti jugu.

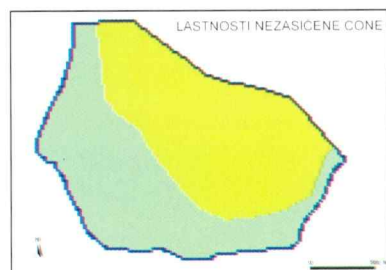
Infiltracijo smo ocenili na tem območju med 300 in 450 mm/leto. Območje smo razdelili v dva razreda, glede na vegetacijo. En razred predstavljajo površine prekrte z gozdom, drugi razred pa kmetijske površine in naselja. Vrednosti parametra SINTACS so



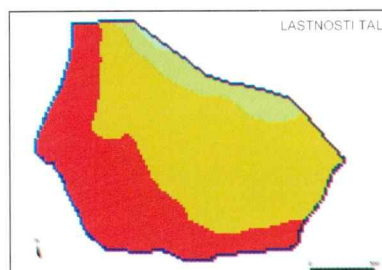
a.)



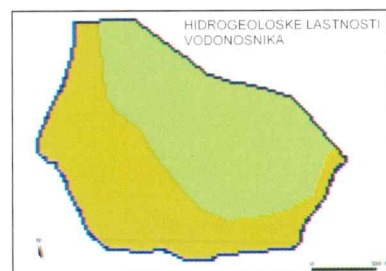
b.)



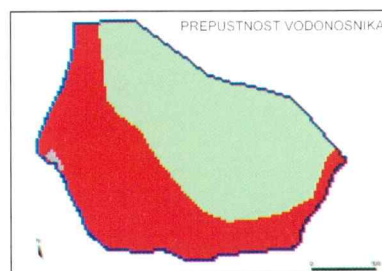
c.)



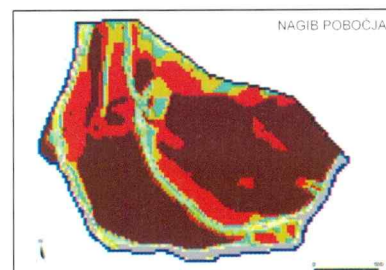
d.)



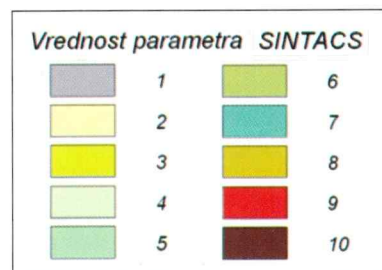
e.)



f.)



g.)



Sl. 2 a, b, c, d, e, f, g
Karte parametrov za izračun indeksa ranljivosti SINTACS.

Fig. 2 a, b, c, d, e, f, g
Parameters maps used to compute the SINTACS vulnerability index.

določene na območju gozda na 9 in na ostalih površinah 6 (slika 2b).

Vrednosti parametra SINTACS lastnosti nenasičene cone smo določili na podlagi ocenjene prepustnosti vodonosnika. Območje smo razdelili na dve kategoriji. Zgornjo teraso, ki ima slabše prepustno nenasičeno cono in spodnjo teraso s prepustnejšo nenasičeno cono. V prvem primeru smo pripisali območju vrednost parametra 3, v drugem pa 5 (slika 2c).

Parametre SINTACS za lastnosti tal smo določili na osnovi na osnovi pedološke karte (tabela 3). Tla na območju spodnje terase, obrežen rečno prodnat aluvij, imajo visoko vrednost parametra SINTACS 9, tla na zgornji terasi, slabše prepusten aluvij, so ocenjena z vrednostjo 8. Proti severu, kjer je na površju metamorfna neprepustna podlaga, vrednosti parametra padajo do 5 (slika 2d).

Tako kot v primeru nenasičene cone smo pri opredelitvi hidrogeoloških lastnosti vodonosnika območje razdelili v dve kategoriji. Območju zgornje terase, ki jo sestavlja bolj drobno zrnat naplavljen material, smo določili vrednost parametra 6. Spodnji terasi, ki jo gradi grobo zrnat aluvialni material, pa vrednost parametra 8 (slika 2e).

Za določitev vrednosti parametra prepustnost vodonosnika smo uporabili prostorsko porazdelitev koeficienta prepustnosti, ki smo jo določili v fazi kalibracije hidrološkega modela in se giblje od $1 \cdot 10^{-5}$ m/s do $5 \cdot 10^{-3}$ m/s. Celotnemu območju smo pripisali dva razreda SINTACS parametrov. Vrednost vodonosnika spodnje terase je 9, zgornjega območja pa 5 (slika 2f).

Celotno obravnavano območje je precej nižinsko z nagibom pobočja do 4° . Na robu

teras je nagib med 6° in 8° , ob Dravi pa tudi več kot 14° . Zaradi rahlega naklona večina vode ponikne. Večji del območja Selniške Dobrave ima visoko vrednost parametra SINTACS med 9 in 10. Na območju jež vrednost pade na 4 (slika 2g).

Normalizirane intervalne vrednosti indeksa SINACS smo razdelili na šest stopenj, od stopnje zelo nizke ranljivosti (I) do izjemno visoke ranljivosti (VI) (tabela 4). Karta ranljivosti z modelom SINTACS (slika 3a) jasno kaže, da je območje glavnega vodonosnika, kjer je predvidena izgradnja črpališča, visoko ranljivo (rdeča barva) in je ocenjeno s stopnjo V. Proti severu je stopnja ranljivosti nekoliko pada in je ocenjena na stopnjo visoke ranljivosti (IV). Vodonosnik zgornje terase je ocenjen s stopnjo zmerno ranljivosti (III) do nizke ranljivosti (II). Iz rezultatov je razvidno, da glede na precej enakomerno porazdelitev hidrogeoloških pogojev, na karto ranljivosti najbolj vplivajo parametri infiltracije, koeficient prepustnosti in nagib pobočja. Zaradi dokaj enakomerne porazdelitve globine do podzemne vode, ta parameter v našem primeru manj vpliva na oceno ranljivosti. Najmanj vplivata parametra lastnosti tal in vpliva nenasičene cone. Na celotnem območju prevladuje stopnja visoke do zelo visoke ranljivosti (51%), zmerno ranljivo je 28% območja in 20% območja je nizke stopnje ranljivosti (tabela 4).

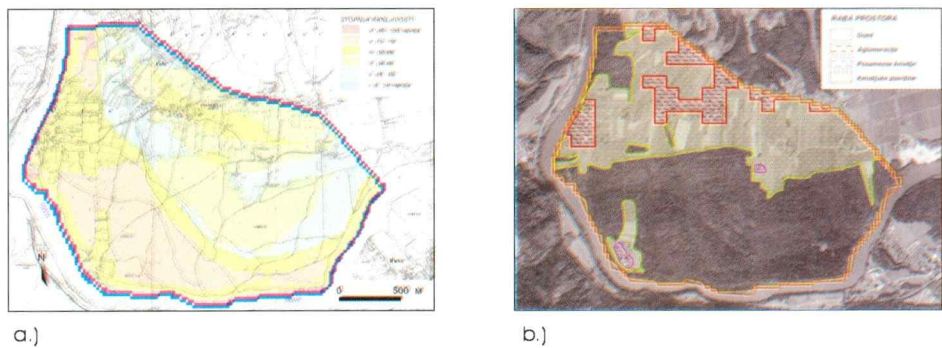
Ocena tveganja

Za oceno ogroženosti smo karto ranljivosti integrirali s slojem rabe prostora (slika 3). Z oceno ogroženosti vodonosnika ocenju-

Stopnje ranljivosti	Stopnje ranljivosti	Normalizirane intervalne vrednosti indeksa SINTACS	Delež površine(%)
VI.	izredno visoka	80-100	1
V.	zelo visoka	70-80	22
IV.	visoka	50-70	29
III.	zmerna	35-50	28
II.	nizka	25-35	18
I.	zelo nizka	0-25	2

Tabela 4. Stopnje ranljivosti glede na intervalne vrednosti indeksa SINTACS.

Table 4. Vulnerability levels according to SINTACS index values.



Sl. 3. Karta ranljivosti (a.) in karta tveganja (b.) vodonosnika Selniške Dobrave.
Fig. 3. Selniška Dobrava aquifer (a.) vulnerability and (b.) hazard maps.

jemo antropogeni vpliv na možnost onesnaženja vodonosnika. Ocenjevali smo možnost razpršenih in točkovnih virov onesnaženja. Kot razpršeni vir onesnaženja smo obravnavali kmetijske površine, točkovne vi-re onesnaženja pa predstavljajo naselja z ne-urejeno kanalizacijo, opuščene gramoznice in divja odlagališča, obrtna dejavnost in ce-ste. Vse dejavnosti smo razvrstili v tri skupi-ne tveganja. Kmetijske površine predstav-ljajo visoko možnost onesnaženja, aglomeracije in posamezne kmetije zmer-no možnost onesnaženja, dejavnosti v gozdu pa nizko stopnjo možnega onesnaženja.

Južni del Selniške Dobrave z območjem predvidenega črpališča na spodnjem vodo-nosniku je poraščen z gozdom, ki predstav-lja nizko tveganje za vodonosnik. Severni del Selniške Dobrave s severo-zahodnim de-lom glavnega vodonosnika prekrivajo kme-tijska zemljišča (njive, sadovnjaki in travni-ki), ki predstavljajo visoko stopnjo tveganja s stališča vnosa hranil in fitofarmacevtskih sredstev. Na območju kvartarnega nanosa se nahaja naselje Črešnjevec ob Dravi, ki je

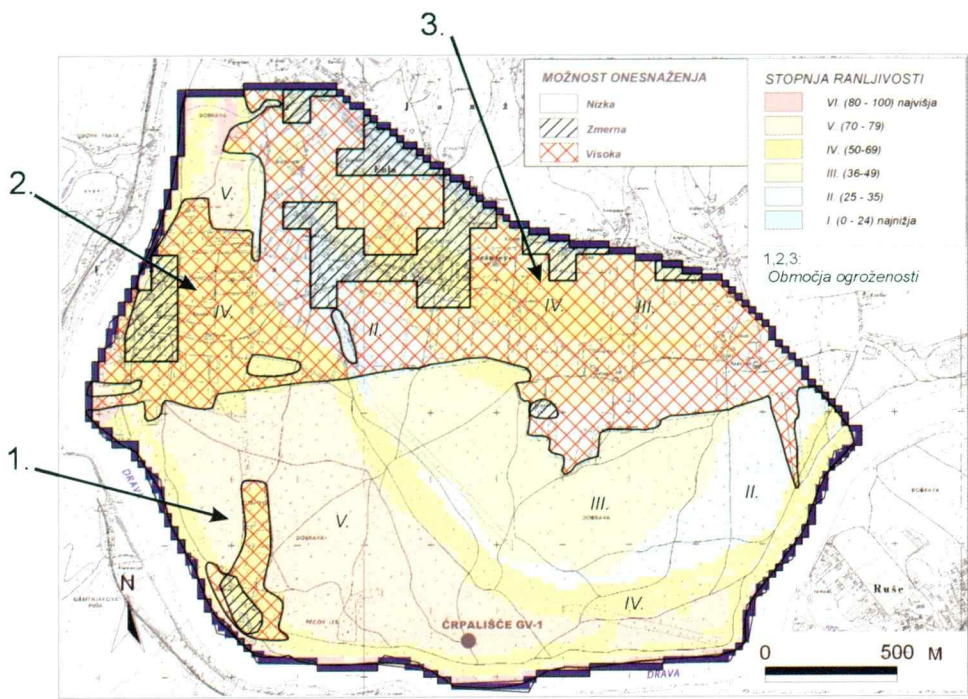
razpršeno po severnem delu. Naselje ni ko-munalno urejeno. Po celotnem območju so razporejene še posamezne večje kmetije. To so območja z zmerno stopnjo tveganja. 56% celotne površine Selniške dobrove prekriva gozd, ki je ocenjen z nizko stopnjo tveganja za onesnaženje podzemne vode, 35% pred-stavljajo kmetijske površine, ki predstavlja-jo visoko stopnjo možnega onesnaženja, le 9% območja prekrivajo aglomeracije in po-samezne kmetije, ki jih ocenjujemo z zmerno stopnjo tveganja (tabela 5).

Analiza ranljivosti in ogroženosti

Iz poznavanja hidrogeoloških značilnosti terena in iz karte ranljivosti lahko zaključimo, da je območje glavnega vodonosnika, ki je po količinah pomemben vodni vir, pretežno ocenjeno z visoko do zelo visoko stopnjo ranljivosti po metodi SINTACS. Območje zgornjega vodonosnika smo ocenili z nizko do pretežno zmerno stopnjo ranljivosti. V tabeli 6 smo podali razvrstitev in opis stop-

Tabela 5. Ocena ranljivosti vodonosnika po IAH.
Table 5. IAH aquifer vulnerability classes.

RAZRED RANLJIVOSTI	DEFINICIJE
Izjemna	Ranljivo na večino onesnaževal (polutantov) s hitrim vplivom po različnih scenarijih onesnaženja
Visoka	Ranljivo na veliko onesnaževal, razen tista z močno absorpcijo ali takojšnjim razpadom, po različnih scenarijih onesnaženja
Zmerna	Ranljivo na nekatera onesnaževala, vendar le kadar se neprestano izpirajo ali izlivajo
Nizka	Ranljivo samo na konzervativna onesnaževala v dolgoročnem obdobju, kadar se ta neprestano in prostrano izpirajo ali izlivajo
Zanemarljiva	Prisotnost zapornih plasti brez značilnega navpičnega pretakanja podzemne vode (prepuščanja)



Sl. 4. Karta ogroženosti vodonosnika Selniške Dobreave.
Fig. 4. Selniška Dobrava aquifer risk map.

nje ranljivosti, ki jo priporoča IAH. Če primerjamo oceno ranljivosti Selniške Dobreave z oceno ranljivosti IAH (tabela 6), vidimo, da se oba opisa ranljivosti dobro prekrivata. Na tej osnovi smo območje celotne Selniške Dobreave razdelili v dve kategoriji ranljivosti. Lahko rečemo, da je zgornji vodonosnik zmerno ranljiv, glavni vodonosnik pa je visoko ranljiv. Iz rezultatov je razvidno, da je SINTACS model ocene ranljivosti dober za

Tabela 6. Prostorska analiza ocene ranljivosti in ogroženosti vodonosnika.
Table 6. Aquifer vulnerability and risk analysis.

STOPNJA RANLJIVOSTI	Aglomeracije (%)	Gozd (%)	Kmetijske površine (%)	Posamezne kmetije (%)
I.	41	16	43	0
II.	11	36	53	1
III.	8	48	43	0
IV.	9	47	42	1
V.	0	97	2	0
VI.	0	97	3	0

	delež celotnega območja v %	Stopnja ranljivosti SINTACS					
		I.	II.	III.	IV.	V.	VI.
Aglomeracije	8	10	24	31	34	1	0
Posamezne kmetije	1	0	21	15	64	0	0
Gozd	56	1	12	25	24	37	2
Kmetijstvo	35	2	27	36	34	1	0

določanje stopnje ranljivosti na območju Selniške Dobrave. Lahko trdimo, da je to primarna metoda za oceno ranljivosti.

Iz analize karte ranljivosti (tabela 5) je razvidno, da 97% zelo visoko ranljivega in 47% visoko ranljivega območja pokriva gozd. 42% visoko ranljivih površin prekrivajo kmetijske površine. Območje zelo visoke in visoke ranljivosti skoraj v celoti sovpada z območjem glavnega vodonosnika. Na najbolj ranljivih predelih je najbolj tvegana dejavnost kmetijstvo. Na območju zmerne in nizke ogroženosti so kmetijske površine zastopane z deleži 43% in 53%, gozd pa z 48% in 36%.

Rezultati kažejo, da je območje glavnega vodonosnika, ki je ocenjeno z visoko stopnjo ranljivosti, v predelu, kjer se predvideva izgradnja novega črpališča, ocenjen z nizko stopnjo tveganja. 61% vsega gozda, 35% vseh kmetijskih površin in 35% aglomeracij prekriva visoko ranljivo območje (tabela 5). 37% gozda, 65% kmetijskih površin in 55% aglomeracij prekriva površine, ki so ocenjene z zmerno do nizko ranljivostjo. 35% vseh kmetijskih površin je ocenjeno z visoko stopnjo ranljivosti za podzemno vodo in predstavljajo zelo visoko tveganje za pitno vodo tudi v črpališču. Gre za kmetijske površine ob kmetiji Kraner in kmetijske površine med Dravo in jedrom naselja Črešnevec ob Dravi (slika 4).

Namen kart ranljivosti in ogroženosti je njihova uporaba pri upravljanju s prostorom in vodnimi viri. Iz kart lahko razberemo (sliki 3, 4), da so tri območja z visoko in zmerno možnostjo tveganja onesnaženja, pri kateri bo sanacija potencialnih onesnaževalcev prednostna. Najbližje črpališču je kmetija Kraner (1). Celotno območje kmetije je ocenjeno z visoko stopnjo ranljivosti in ogroženosti. Zaradi možnosti onesnaženja podzemne vode v črpališču, bo potrebno na tem območju uvesti ekološko kmetovanje, urediti komunalne in druge izpuste izven tega območja. Tudi za kmetijske površine na območju 2,3 (slika 4) priporočamo ekološko kmetovanje, saj s tem omejimo uporabo fitofermatcevtskih sredstev in zmanjšamo možnost onesnaženja. Celotno območje kvartarnega zasipa smo ocenili na zmerno do visoko stopnjo ranljivosti podzemne vode, zato bo potrebno aglomeracije na celotnem območju komunalno urediti, prednostno pa na območju 2, kjer je stopnja

ranljivosti visoka. Poleg tega je potrebno vse izpuste odpadnih vod speljati izven območja.

Rezultati ocen ranljivosti in ogroženosti so prikazani na tematskih kartah, ki služijo upravljavcem prostora in vodnega vira kot podpora pri odločanju o razvoju dejavnosti in sprejemanju ukrepov za zaščito podzemne vode (sliki 3, 4).

Zaključki

V prispevku smo poskušali z modelom SINTACS oceniti ranljivost vodonosnika Selniške Dobrave, ki bo v prihodnosti predstavljal pomemben vodni vir za oskrbo sistema Mariborskega vodovoda. Sedem parametrov smo uporabili za oceno hidrogeoloških lastnosti vodonosnega sistema Selniške Dobrave: globino do vode, infiltracijo, vpliv nenasičene cone, lastnosti tal, hidrogeološke lastnosti vodonosnika, koeficient prepustnosti in nagib terena. Iz SINTACS karte naravne ranljivosti smo ocenili, da imata južni in zahodni del območja Selniške Dobrave, to je območje glavnega vodonosnika, visoko stopnjo ranljivosti, severni del, območje zgornjega vodonosnika, pa smo ocenili z zmerno do nizko stopnjo ranljivosti (slika 3).

Karta ogroženosti kaže, da obstaja največja stopnja ogroženosti za onesnaženje podzemne vode na severnem in severovzhodnem delu obravnavanega območja, ki je visoko ranljivo in ima veliko stopnjo tveganja onesnaženja, ki izvira iz dejavnosti kmetijstva (slika 4). Visoko ranljiv južni del glavnega vodonosnika je manj ogrožen, saj ga v veliki meri prekriva gozd. Na območju Selniške Dobrave ne pričakujemo drugih virov onesnaženja kot poljedelstvo in poseljenost. V primeru vodonosnika Selniške Dobrave je raba prostora dobra ocena tveganja in s tem tudi stopnje ogroženosti vodonosnika. Rezultati kažejo, da bo potrebno pristopiti k sanacijskim ukrepom za zaščito kakovosti podzemne vode, pri razvrstitvi sanacijskih dejavnosti pa bodo v pomoč karta ranljivosti in ogroženosti.

Model SINTACS se je izkazal za primereno oceno ranljivosti vodonosnika. Integrirana karta ranljivosti z oceno tveganja je dobra ocena ogroženosti podzemne vode. Ocene ranljivosti in ogroženosti v obliki kart so

primerna podpora upravljavcem prostora in vodnega vira za načrtovanje razvoja dejavnosti, omejitvenih ukrepov za zaščito podzemne vode in sanacije. GIS tehnologija predstavlja učinkovito okolje za analizo in visoko zmoglost obdelave velike količine podatkov. Brez težav smo izračunali SINTACS stopnjo ranljivosti, ki je definirana kot linearna kombinacija sedmih parametrov. GIS je olajšal izvajanje ocen ranljivosti vodonosnih sistemov z modelom SINTACS, ki bi bilo drugače zelo nepraktično.

Literatura

- Al-Adamat, R.A.N., Foster, I.D.L. & Babin, S.M.J. 2003: Groundwater vulnerability and risk mapping for the Basaltic aquifer of the Azraq basin of Jordan using GIS, Remote sensing and DRASTIC. – *Applied Geography*, 23(4), 303-324.
- Baza aglomeracij, 2003: MOP & Univerza v Ljubljani, FGZ.
- Babiker, I.S., Mohamed, M.A.A., Hiya-ma, T. & Kato, K. 2005: A GIS-based DRASTIC model for assessing aquifer vulnerability in Kamighara Heights, Gifu prefecture, central Japan. – *Science of the Total Environment*, 345, 127-140.
- Barbash, J.E. & Resek, E.A. 1996: Pesticides in ground water. Distribution, trends and Governing factors. – *MI. Ann Arbor Press*, Chelsea.
- Bonham-Carter, G.F. 1996: Geographic information system for geoscientists: modelling with GIS. – *Computer Methods in the Geosciences*, vol.13, Pergamon/Elsevier Sci.Pub., 98 pp.
- Civita, M. & De Maio, M. 1997: SINTACS: Un sistema parametrico per la valutazione e la cartografia della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento. Metodologia e automatizzazione. Bologna: Pitagora Editrice, 191 str.
- Car, M. & Stopar, R. 2005: Geofizikalne preiskave pri Selnici (Selniška Dobrava). – *Geoinženiring d.o.o.*, Ljubljana
- CPVO 2004: – Digitalna pedološka karta 1:25.000, Univerza v Ljubljani, BF, Center za pedologijo in varstvo okolja.
- Di Martino, F., Sessa, S. & Loia, V. 2005: Afuzzy-based tool for modelization and analysis of the vulnerability of aquifers: a case study. – *International Journal of Approximate Reasoning*, 38(1), 99-111.
- Fabbri, A.G. & Napolitano, P. 1995: The use of database management and geographical information systems for aquifer vulnerability analysis. – *Contribution to the international Scientific Conference on the occasion of the 50th Anniversary of the founding of the Vysoka Skola Banska, Ostrava, Czech Republic.*
- Geodetska uprava Republike Slovenije: DOF 5–Ortofoto 1: 5.000 – Geodetska uprava Republike Slovenije, Ljubljana.
- Geodetska uprava Republike Slovenije, 1994: Skanogrami TTN 5 – topografske karte merila 1:5.000. Datum vira: 1978 – 1987. – Geodetska uprava Republike Slovenije, Ljubljana.
- Janža, M. 2000: Varovanje vodnega vira z uporabo GIS in hidrogeološkega modela : magistrsko delo. Ljubljana, 74 str.
- 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, Turkey
- Jecelj, S. 2004: Letno poročilo 2003 – Mariborski vodovod javno podjetje, d.d., Maribor.
- Juren, A., Mali, N., Jecelj, S. & Cajnkari, A. 1996: Outlines on the drinking water solution in Maribor. In: *1st International Conference The Impact of Industry on Groundwater Resources*, 22-24 May 1996, Villa Erba-Cernobbio (Como) : proceedings – 25-33. Villa Erba-Cernobbio (Como).
- Kopač, I., Ravnik, J. & Klepec, S. 2002: Tehnične osnove za določitev varstvenih pasov vodnih virov ter predlog teksta odloka o varstvenih pasovih in ukrepih za zavarovanje zaloga pitne vode v Občini Selnica ob Dravi. – *Institut za ekološki inženiring d.o.o.*, Maribor.
- Kristensen, K. J. & Jensen, S. E. 1975: A model for estimating actual evapotranspiration from potential evapotranspiration. *Royal Veterinary and Agricultural University, Nordic Hydrology*, 6, 170-188.
- Mali, N. 1996: Sinteza in analiza meritev za postavitve modela dinamike podzemne vode vodonosnika Selniške Dobrave. – *Geološki zavod Slovenije*, Ljubljana.
- Mali, N., Janža, M., Marinko, M., Rikanovič, R., Herič, J., Levičnik, L. & Moze-tič, S. 2005: Raziskave Selniške Dobrave – Raziskovalna dela z določitvijo lokacij vodnjakov in ogroženosti vodnega vira na Selniški Dobravi. – *Geološki zavod Slovenije*, Ljubljana.
- Mioč, P., Žnidarčič, M. & sodelavci 1978: OGK SFRJ 1: 100 000, list Slovenj Gradec, Zvezni geološki zavod, Beograd.
- Passarella, G., Vurro, M., D'Agostino, V., Giuliano, G. & Barcelona, M.J. 2002: A probabilistic methodology to assess the risk of groundwater quality degradation. – *Environmental Monitoring and Assessment* 79, 57-74.
- 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*. – *Geološki zavod Slovenije*, Ljubljana
- Thapinta, A. & Hudak, P. F. 2003: Use of geographic information systems for assessing groundwater pollution potential by pesticides in Central Thailand. – *Environ Int*, 29(1), 87-93
- Tesoriero, A.J., Inkpen, E. L. & Voss, F.D. 1998: Assessing ground-water vulnerability using logistic regression. – *Proceedings for the Source water assessment and Protection 98 Conference*, 157-165, Dallas.
- Uricchio, V.F., Giordano, R. & Lopez, N. 2004: A fuzzy knowledge-based decision support system for groundwater pollution risk evaluation – *Journal of Environmental Management* 73, 189-197.
- Varnes, D.J. 1984: Commission on Landslides and Other Mass-Movements-IAEG Landslide Hazard Zonation. A review of principles and Practice. The UNESCO Press, Paris.
- Vrba, J., & Civita, M. 1994: Assessment of Groundwater Vulnerability. In: *Vrba, J. & Zapo-*

rozec, A. (eds.), Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability. - IAH, International Contributions to Hydrology, Verlag Heinz Heise GmbH & Co KG, 16, 31-48, Hannover.

Vrba, J. & Zaporozec, A. 1994: Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability. - IAH, International Contributions to Hydrology, Verlag

Heinz Heise GmbH & Co KG, 16, 131 pp., Hannover.

Zaporozec, A. 1994: Concept of Groundwater Vulnerability. In: Vrba, J. & Zaporozec, A. (eds.), Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability. - IAH, International Contributions to Hydrology, Verlag Heinz Heise GmbH & Co KG, 16, 3-7, Hannover.