

MODEL STOPNJE ZAKRASELOSTI ZA OBMOČJE SLOVENIJE

Karstification intensity model for the territory of Slovenia

Marko Komac *, Janko Urbanc ** UDK 556.3(497.4)

Povzetek	Abstract
<p>Več kot 45 odstotkov Slovenije pokrivajo kraška območja, nekatera so intenzivnejša, druga manj ali pa zgolj potencialno zakrasela. Prostorsko načrtovanje, upravljanje podzemnih naravnih virov ter postopki ukrepanja ob onesnaženjih ali podobnih nesrečah človeškega izvora so zelo odvisni od kamninske sestave danega območja. Zakrasela območja so izjemen naravni sistem, ki je zaradi načina kroženja podzemne vode z vidika omenjenih vplivov oziroma ekoloških pritiskov moderne družbe zelo ranljiv. Model stopnje zakraselosti za celotno Slovenijo, ki ga predstavljamo, je zelo koristna prva informacija pri soočanju z vprašanji o umeščanju objektov v prostor, izkoriščanju in varovanju vodnih virov ter načinu ukrepanja ob njihovi ogroženosti.</p>	<p>Almost half of Slovenian territory could be classified as a karstic terrain. Some areas are intensively karstified, some are less and some are potentially karstic areas. Geology of a given territory very much governs the spatial planning and groundwater resources management, and measures taken in the case of natural or anthropogenic disasters events. Karstic areas are unique natural system with a specific hydrological cycle that is extremely vulnerable to external disturbances such as pollution or similar anthropogenic driven menaces. The karstification intensity model presented here provides very useful first information to the end-users that intent to locate a suitable site for problematic infrastructure, to exploit the karstic water resources or to take measures to prevent them.</p>

Uvod

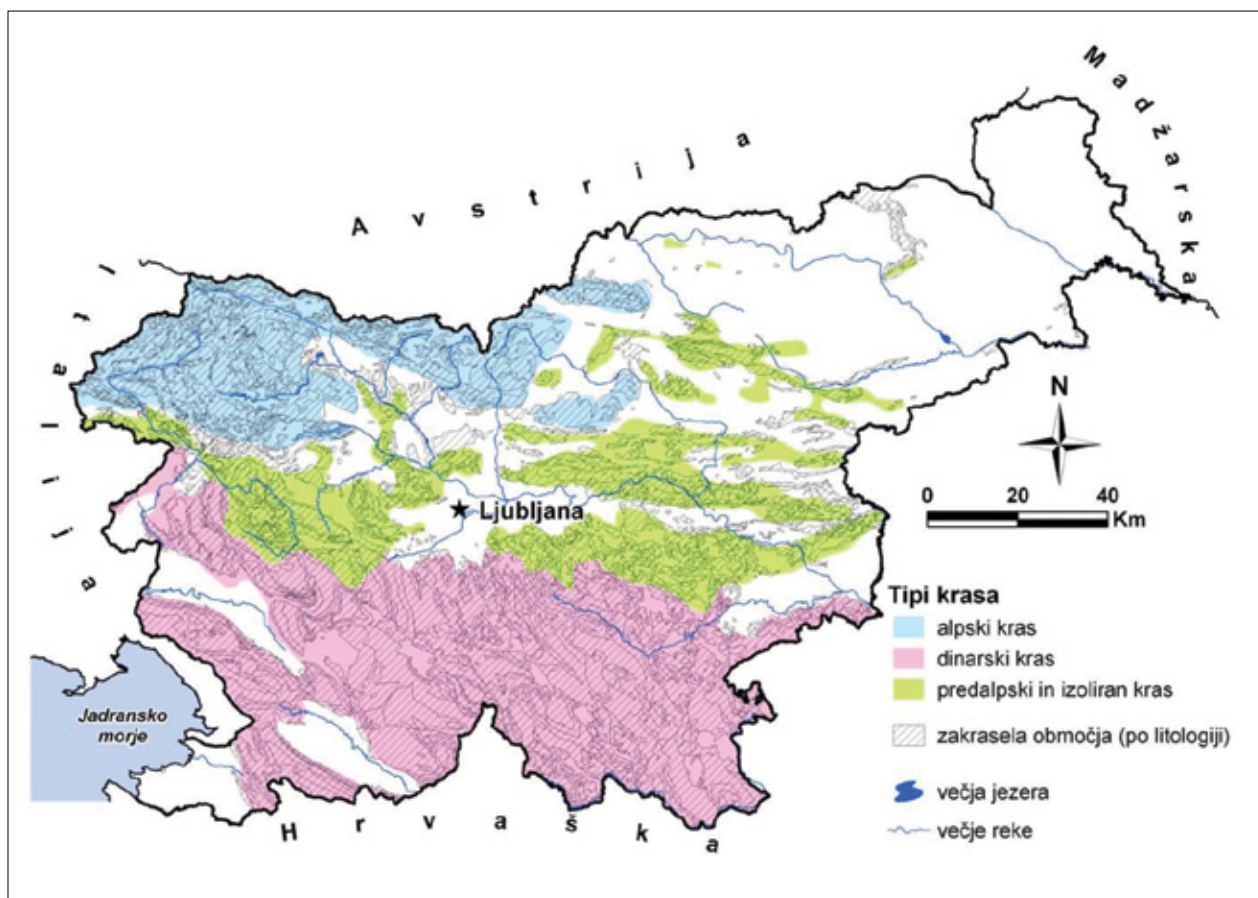
Kljub zapleteni geološki zgradbi Slovenije je z litološkega (kamninskega) vidika kar 45,6 % njenega ozemlja zakraseloga, od tega sta dobri dve tretjini intenzivno zakrasela, ena tretjina pa deloma (Komac in Urbanc, v tisku, 2013). Podobno, čeprav manj podrobno, je podvrženost slovenskega ozemlja kraškim procesom opredelil Gams (2003), ki meni, da je tega okrog 43 %. Gams (2003) je izdelal zemljevid poenostavljene razdelitve tipov krasa v Sloveniji. Njegov zemljevid smo prekrili z območji karbonatnih kamnin (po Buserju, 2010), ki so potencial za nastanek kraških pojavov (slika 1). Kraški pojavi in zaradi njih kraško površje nastanejo na območjih, kjer so v podlagi razpoklinski sistemi vodotopnih kamnin – karbonatov, sandre ali soli, pojavljajo pa se tudi v manj topnih kamninah, kot je na primer amorfnih silicijev dioksid – roženec. Kot omenjeno, je vpliv vode na raztapljanje kamnine poglavitni pri nastanku značilnega kraškega reliefa, izraženega s površinskimi pojavi, kot so vrtače, uvale, polja, škraplje in ponori, ter pri nastanku kraških podzemnih oblik, kot

so podzemni tokovi vode in jame (Monroe, 1970). V Sloveniji se kras pojavlja na kamninah, ki so izključno karbonatne (apnenec, dolomit), in na območju geoloških formacij, ki vsebujejo karbonatne kamnine (npr. debeložrnata apnenčeva breča z redkimi vložki fliša) (Komac in Urbanc, 2012). Kot intenzivno zakrasela smo obravnavali vsa območja, na katerih je bilo število opazovanih pojavov pri vsaj dveh od treh (jame, vrtače in prisotnost površinskih vodotokov) večje od števila, ki bi nakazovalo na naključno porazdelitev pojava znotraj obravnavanega območja. Vsa druga območja, ki jih na površini vsaj delno sestavljajo karbonatne kamnine, smo razvrstili med potencialno zakrasela. Pri upoštevanju kamninske sestave območij smo izbrali poenostavljen pristop in upoštevali le površinske lastnosti kamnin, zaradi česar so bila območja kraških polj, ki jih na površini prekrivajo recentni sedimenti, iz analize izločena, dejstvo pa ostaja, da so kraški pojavi prisotni v globini tudi na takih območjih.

Približno 98 % pitne vode v Sloveniji pridobivamo iz podzemnih virov (Urbanc in sod., 2011). Na kraških območjih leži številčno 42 % vseh zavarovanih vodnih virov in 53 % vseh vodovarstvenih območij v Sloveniji (Komac in Urbanc, v tisku, 2013). Zaradi tega je model stopnje zakraselosti slovenskega ozemlja pomembna podlaga za ukrepanje ob naravnih in drugih nesrečah. Sorazmerno

* dr., Geološki zavod Slovenije, Dimičeva ulica 14, Ljubljana, marko.komac@geo-zs.si

** dr., Geološki zavod Slovenije, Dimičeva ulica 14, Ljubljana, janko.urbanc@geo-zs.si



Slika 1: Tipi krasa (po Gamsu, 2003) in karbonatne kamnine (po Buserju, 2010) kot potencial za nastanek kraških pojavov
 Figure 1: Karst types (Gams, 2003) and carbonate rocks (Buser, 2010) as a potential for development of karstic phenomenon

preprost model omogoča hitre odgovore na vprašanja, pomembna za ukrepanje Civilne zaščite, kot so:

- kje so najbolj izpostavljena območja za onesnaženje podzemne vode,
- kje lahko pričakujemo potencialne udore tal (zaradi kraških pojavov),
- kateri viri pitne vode so najbolj izpostavljeni,
- kateri morebitni onesnaževalci so na območjih, ki so potencialno zakrasela, in na območjih, ki so intenzivno zakrasela.

Da bi prikazali zgolj eno možnost uporabe predstavljenega modela – določanje potencialnih virov onesnaženja kraških vodotokov in kraških ekosistemov, smo opravili analizo prekrivanja rezultatov modela stopnje zakraselosti in lokacij zavezancev IPPC [angl. *Integrated Pollution Prevention and Control*], komunalnih odlagališč, komunalnih čistilnih naprav in industrijskih odlagališč.

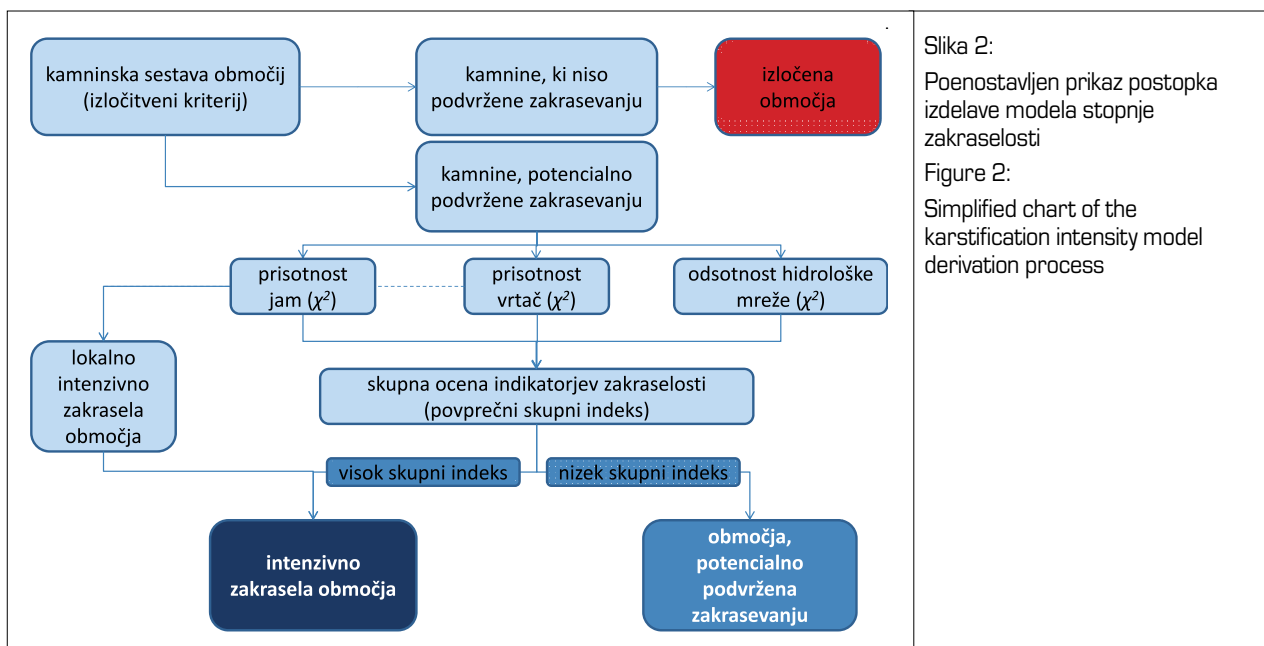
navati zaključeno celoto, ki jo omogočajo izbrano merilo (1 : 250.000) in dostopni podatki. Podatki, ki so bili uporabljeni za izdelavo modela, so bili kamninska podlaga (povzeto po Buser, 2010), skoraj 130.000 vrtač oziroma depresij na območju karbonatnih kamnin in formacij s karbonatnimi kamninami, izračunanih iz digitalnega modela višin z velikostjo celice 25 × 25 m (GURS, 2005), 8382 vhodov v jame (povzeto po katastru jam JZS, 2010) ter mreža površinskih vodotokov v merilu 1 : 50.000 v skupni dolžini 29.436 km (ARSO, 2005). Prostorska razširjenost kamnin, primernih za razvoj krasa, je služila kot izločitveni dejavnik za nadaljnjo določitev stopnje zakraselosti. Vir podatkov za potencialne onesnaževalce (lokacije zavezancev IPPC, komunalnih odlagališč, komunalnih čistilnih naprav in industrijskih odlagališč) so bili podatkovni nizi iz baze prostorskih podatkov ARSO (2009–2013).

Postopek izdelave modela

Od 114 kamninskih enot jih je bilo za potencialno zakraselo izbranih 47, ki se razprostirajo na 44,7 % površine Slovenije. Na teh območjih so bile z algoritmom (Mark, 1988) iz digitalnega modela višin avtomatično določene lokacije 129.458 središč vrtač, 7552 vhodov v jame (90 % vseh vhodov) in 5979 kilometrov površinskih vodo-

Kratek opis območja in uporabljeni podatki

Model stopnje zakraselosti je bil narejen za celotno ozemlje Slovenije, saj je za tak namen smiselno obrav-



Slika 2:
Poenostavljen prikaz postopka izdelave modela stopnje zakraselosti
Figure 2:
Simplified chart of the karstification intensity model derivation process

tokov (20 % vseh vodotokov). Izdelava modela je temeljila na hipotezi, da sta pogostejša prisotnost vrtač in vhodov v jame ter redkejša prisotnost površinskih vodotokov (njihova odsotnost) dovolj dober pokazatelj intenzivnosti oziroma stopnje zakraselosti nekega območja.

Vse analize so bile opravljene na območjih kamninskih tipov, primernih za razvoj krasa, trije analizirani pojavi pa so bili pred analizo normalizirani na podlagi površine posamezne kamninske enote, in sicer vrtače in vhodi v jame v število vrtač oziroma jam na kvadratni kilometer enote ter mreža vodotokov v kilometre dolžine vodotoka na kvadratni kilometer enote. Analize pojavljanja (ali odsotnosti) vsakega od treh pojavov so bile narejene z neparametrično metodo χ^2 (hi-kvadrat), ki je izračunana po enačbi $(D - P)^2 / P$, v kateri sta D dejansko število pojavov (tistih, ki jih najdemo na terenu) in P pričakovano število pojavov (hipotetično število pojavov glede na njihovo naključno prostorsko porazdelitev) znotraj vsakega od obravnavanih kamninskih tipov. Za vsak kamninski tip so bili izračunani trije indeksi, in sicer za vsak dejavnik vrednosti stopnje, ki nakazuje zakrasevanje. Vsaki vrednosti indeksa je bil na podlagi vpliva pripisan predznak, + ob povečanem in - ob zmanjšanem vplivu na zakrasevanje (pri površinskih vodotokih sta bila predznaka zamenjana). Ker vsak izmed treh dejavnikov po svoje določa zakraselost enote, je bil za določitev končne stopnje zakraselosti posamezne kamninske enote izračunan povprečni normalizirani indeks zakraselosti po treh dejavnikih. Podrobnosti analize so opisane in prikazane v Komac in Urbanc (2012). Poenostavljen postopek izdelave modela je prikazan na sliki 2.

Med analizo je bilo ugotovljeno, da nekatere enote, ki so bile razvrščene med manj zakrasela (potencialno zakrasela) območja, v manjšem obsegu pa tudi območja, ki niso bila razvrščena niti med potencialno zakrasela, obsegajo tudi območja intenzivnejše zakraselosti, ki se je kazala na površju v obliki lokalno povečane gostote vrtač ali povečanega števila vhodov v jame. Takih območij je bilo

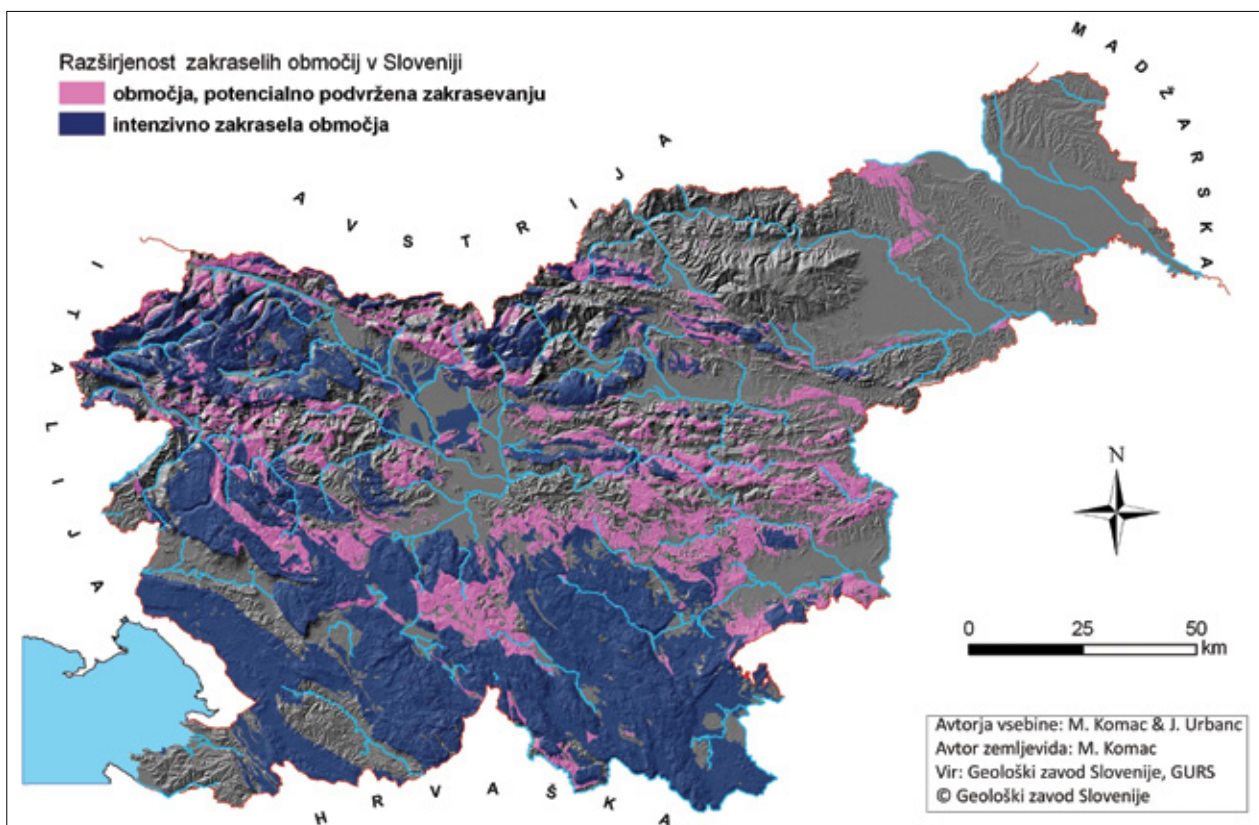
skupno za 1126,5 km² in so bila razvrščena med območja intenzivne zakraselosti.

Za prikaz ene izmed mogočih uporab modela stopnje zakraselosti smo model prekrili s potencialnimi lokacijami, ki bi lahko pomenile nevarnost onesnaženja. Analizo smo izvedli v GIS na rastrskih podatkih z velikostjo celice 25 × 25 metrov. Zaradi gostote lokacij zavezancev IPPC so bile analize prekrivanja za te podatke narejene na celicah 5 × 5 metrov. Tako podrobna analiza se morda ne zdi smiselna, a je namenjena zgolj vključitvi vseh zavezancev IPPC v rezultate analize, da bi tako čim natančneje prikazali njihove porazdelitve po območjih z različnimi stopnjami zakraselosti.

Rezultati in razprava

Vrednosti povprečnega normaliziranega indeksa zakraselosti se gibljejo med 0 in 1, natančneje med 0,072 in 0,871, pri čemer manjše vrednosti predstavljajo nižjo in večje višjo stopnjo zakraselosti. Vrednosti povprečnega normaliziranega indeksa zakraselosti so bile razdeljene na dva razreda. Glede na lastnosti indeksov in na prevoje v porazdelitvi vrednosti povprečnega normaliziranega indeksa so bila območja, katerih indeks je imel vrednost manjšo od 0,416, razvrščena med potencialno podvržena zakrasevanju, območja, katerih indeks je imel vrednost nad 0,435, pa na intenzivno zakrasela območja. Vmesne vrednosti so bile na podlagi strokovne kabinete in terenske ocene razvrščene v enega izmed omenjenih razredov. Po opravljeni strokovni oceni je površina razreda intenzivno zakraselih enot znašala 6455,26 km², skupna površina enot, potencialno podvrženih zakrasevanju, pa 2782,2 km² (slika 3).

Analize prekrivanja modela s potencialnimi onesnaževalci iz vse Slovenije so pokazale, da je na območjih, ki so



Slika 3: Zemljevid razširjenosti zakraselih območij v Sloveniji

Figure 3: Map of the karstified areas in Slovenia

Stopnja zakraselosti	Število komunalnih čistilnih naprav (od 306)	Število industrijskih odlagališč (od 24)	Število komunalnih odlagališč (od 60)
območja, potencialno podvržena zakrasevanju	16	6	5
intenzivno zakrasela območja	37	2	11

Preglednica 1: Pojavljanje različnih potencialnih onesnaževalcev glede na stopnjo zakraselosti ozemlja

Table 1: Distribution of various potential pollutants according to the areas with different karstification intensity

Stopnja zakraselosti	Zavezanci IPPC (od 1266*)			
	iztok na komunalno čistilno napravo	iztok v kanalizacijo brez komunalne čistilne naprave	iztok neposredno v vodotok	iztok v tla
območja, potencialno podvržena zakrasevanju	4	6	8	5
intenzivno zakrasela območja	57	10	43	13

* 1761 je skupno število vseh objektov z iztokom, ki jih upravljajo zavezanci IPPC (število iztokov, ki so tudi lokacijsko ločeni, torej imajo drugačne koordinate, pa je 1266).

Preglednica 2: Pojavljanje zavezancev IPPC glede na stopnji zakraselosti ozemlja, prikazani so zgolj zavezanci na zakraselih območjih.

Table 2: Distribution of IPPC subjects according to the areas with different karstification intensity. Only subjects located on karstic areas are included in the table.

potencialno podvržena zakrasevanju, 5,2 % [16] komunalnih čistilnih naprav, 25 % [6] industrijskih odlagališč, 8 % [5] odlagališč komunalnih odpadkov z različnimi statusi obratovanja (preglednica 1) ter 1,5 % [19] zavezan-

cev IPPC, ki z vidika čiščenja odpadnih voda nimajo urejenega iztoka (preglednica 2). Na intenzivno zakraselih območjih je 12 % [37] komunalnih čistilnih naprav, 8 % [2] industrijskih odlagališč, 18 % [11] odlagališč komunalnih

odpadkov z različnimi statusi obratovanja (preglednica 1) ter 4,5 % (57) zavezancev IPPC, ki imajo z vidika čiščenja odpadnih voda urejen iztok, in kar 66 (5,2 %) zavezancev IPPC, ki tega nimajo urejenega (preglednica 2). Odveč je poudariti, da bi morali na (vsaj intenzivno) zakraselih območjih imeti vsi potencialni onesnaževalci urejeno izcejanje odpadnih voda. S tako analizo jih je mogoče hitro določiti in ustrezno ukrepati, ob neljubem dogodku razlitja nevarne snovi na eni od teh lokaciji pa je mogoče z uporabo razvitega modela stopnje zakraselosti takoj določiti ukrepe za zavarovanje vodnih virov.

Sklepne misli

Rezultat prostorske analize v obliki modela stopnje zakraselosti za območje Slovenije kaže, da je 31,8 % površine Slovenije intenzivno zakrasele in da je dodatnih 13,7 % potencialno podvrženih zakrasevanju. Prevladujoči tip kamnine, ki je podvržen zakrasevanju, je apnenec, vendar se ob njem v primeru intenzivnega zakrasevanja vedno, sicer nekoliko manj, pojavlja tudi dolomit (Komac in Urbanc, 2012). Kadar je ta prevladujoč, je stopnja zakraselosti manjša. Model stopnje zakraselosti slovenskega ozemlja ima tudi širši praktični namen v smislu opozorilnega zemljevida, ki omogoča hitro analizo potencialno ogroženih kraških območij in njihovih podzemnih vodnih virov. Predstavljeni model še zdaleč ni končni, saj bi ga bilo mogoče v prihodnje nadgraditi z dodano (vsaj plitvo) globinsko razsežnostjo ali pa z določitvijo stopnje vodoprepustnosti posameznih kamninskih tipov, s čimer bi vsaj delno odgovorili na vprašanje časovnega zamika onesnaženja podzemnih vodnih virov na krasu ob nesrečah, ki jih povzroči človek.

Zahvala

Avtorja se zahvalujeta Javni agenciji za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije in Geološkemu zavodu Slovenije, finančnima podpornikoma študije, v okviru katere je bil narejen predstavljeni model. Zahvalujeta se tudi kolegoma dr. Matevžu Novaku in dr. Bogomirju Celarcu za informacije o zakraselosti nekaterih enot, vsem recenzentom za kritične pripombe ter vsem sodelavcem, ki so kakor koli pomagali pri izdelavi analiz ali pa so s svojim znanjem in izkušnjami svetovali pri nastanku prispevka.

Viri in literatura

1. ARSO, 2005. Evropsko okoljsko informacijsko in opazovalno omrežje: Ljubljana. Agencija Republike Slovenije za okolje (<http://nfp-si.eionet.europa.eu/Dokumenti/GIS/>, dostop 10. 4. 2010).
2. ARSO, 2009–2013. Prostorski podatki IPPC-zavezancev, komunalnih odlagališč, industrijskih odlagališč, komunalnih čistilnih naprav. Agencija Republike Slovenije za okolje (www.eionet-si.arso.gov.si/Dokumenti/GIS/, dostop od 2009–2013).
3. Buser, S., 2010. Geološka karta Slovenije 1 : 250.000. Geološki zavod Slovenije.
4. Gams, I., 2003. Kras v Sloveniji v prostoru in času. ZRC SAZU, 249.
5. GURS, 2005. Digitalni model višin – DMV25, 1998–2005. Geodetska uprava Republike Slovenije.
6. JZS, 2010. Kataster jam v Sloveniji. Jamarska zveza Slovenije.
7. Komac, M., Urbanc, J., 2012. Assessment of spatial properties of karst areas on a regional scale using GIS and statistics - the case of Slovenia. *J. caves karst stud.*, 74/3, 251–261. (doi: 10.4311/2010ESO188R).
8. Komac, M., in Urbanc, J. (v tisku, 2013). Zemljevid razširjenosti in stopnja zakraselosti območij v Sloveniji 1 : 250.000. Geološki zavod Slovenije.
9. Mark, D. M., 1988. Network Models in Geomorphology. V: *Modelling in Geomorphological Systems*, John Wiley, 73–97.
10. Monroe, W. H., 1970. A glossary of karst terminology. U.S. Geological Survey, Water-Supply Paper 1899, 26.
11. Urbanc, J., Mali, N., Prestor, J., 2011. Varovanje virov pitne vode v Sloveniji. V: Volfand, J. (ur.), *Upravljanje voda v Sloveniji* (Zbirka Zelena Slovenija). Celje: Fit media, 2011, 76–84.