

Model stopnje ogroženosti plazov na osnovi multivariatne analize

Landslide-exposed areas modeling using the multivariate analysis

Marko KOMAC

Geološki zavod Slovenije, Dimičeva 14, SI – 1000 Ljubljana, Slovenija
E-pošta: marko.komac@geo-zs.si

Ključne besede: plazovi, geološko pogojena nevarnost, ogroženost, napovedovanje plazov, multivariatna analiza, Slovenija

Key words: landslides, geohazard, danger, landslide prediction, multivariate analysis, Slovenia

Povzetek

Pojavljanje plazov je pogojeno s številnimi prostorskimi in časovnimi dejavniki, ki jih delimo na povzročitelje in sprožitelje. Človeško poseganje v prostor sodi predvsem med slednje, ki pa so lahko tudi drugi ekstremni naravnih dogodkov. Za lažje razumevanje povzročiteljev dejavnikov, ki bolj pogojujejo lokacijo nastanka, se uporabljajo različne metode, vse pa temeljijo na GIS tehnologiji. Rezultati določijo lokacije, ki so bolj izpostavljene sprožitvenim dejavnikom, torej tudi dejavnostim človeka. Na podlagi rezultatov univariatne analize so podane stabilnostne lastnosti posameznih razredov opazovanih dejavnikov. Medsebojni odnosi med dejavniki so bili analizirani z metodami multivariatne statistike, ki so bili osnova za določitev njihovih relativnih prispevkov k nastanku oz. pojavu posameznih tipov opazovanega pojava. Rezultati analiz so služili za izdelavo modela napovedi tveganja pojavljanja plazov, na podlagi modela pa je bilo območje zahodnega dela osrednje Slovenije razdeljeno na stopnje ogroženosti zaradi plazov.

Abstract

Landslide occurrence is governed by numerous spatial and temporal factors that can be divided into the causes and the triggers. Human interaction with the environment coincides mainly with the triggers, which are also of natural origin. For a better understanding of the causing factors, which mainly influence the spatial distribution, several methods based on GIS technology are used. Results, derived from these methods, define areas that are more exposed to triggering factors, consequentially also to human activity. Based on the results of the univariate analysis the landslide occurrence specifics of the classes of factors under observation were defined. The interactions among spatial factors were analysed with multivariate statistics and their relative contribution to landslide occurrence were defined. Results were finally presented in the form of probability map (hazard map), and the area of the western central part of Slovenia was divided into the danger zones using five degree scale.

Uvod

Nenehno širjenje človekovega življenjskega prostora in poseganje na manj primernejša območja za različne dejavnosti povečuje potrebo strokovnjakov po napovedovanju

neprijetnih dogodkov, da bi s tem zmanjšali njihove neželene učinke ali se jim celo izognili. Neželeni učinki so večinoma povezani s škodo, ki nastane na infrastrukturi in objektih, na žalost pa so lahko povezani tudi s človeškimi žrtvami. Da bi se posledice takih

dogodkov zmanjšale na najmanjšo možno mero, se načrtovalci prostora poslužujejo kart tveganj pred opazovanimi naravnimi pojavi. Med povzročitelje škode sodijo tudi plazovi, ki jih je najprimerneje širši javnosti prikazati na kartah tveganj.

Vsak prostorsko pogojen pojav, tudi plaz, je rezultat soodvisnih dejavnikov, med katerimi so tudi taki, ki so neznani ali jih ni možno meriti (Carrara, 1983), zato obstajajo poleg, v tej metodologiji uporabljenih dejavnikov tudi taki, ki jih v metodologijo ni bilo možno vključiti. Za vključene dejavnike so bili z metodami univariatne statistike proučeni vplivi posameznih dejavnikov na pojavljanje posameznih tipov plazov (fosilnih, plazenj s prekinitvami, počasnih plazenj in trenutnih zdrsov) in plazov kot celoto. Na podlagi rezultatov univariatne analize so podane stabilnostne lastnosti posameznih razredov opazovanih dejavnikov. Naslednji korak je bila multivariatna analiza. Medsebojni odnosi med dejavniki so bili analizirani z metodami multivariatne statistike, ki so bili osnova za določitev njihovih relativnih prispevkov k nastanku oz. pojavu posameznih tipov opazovanega pojava. Rezultati analiz so služili za izdelavo modela napovedi tveganja pojavljanja plazov. Z vsakim korakom je bila izračunana napaka rezultatov in statistično tveganje.

Predstavljen model napovedi plazovitih območij upošteva medsebojne vplive prostorskih dejavnikov na pojavljanje plazov, ki jih je mogoče določiti z metodami multivariatne statistike. Na podlagi statističnih analiz podatkov so k napovedovanju plazov pristopili že Neuland (1976), Carrara et al. (1977a, 1977b in 1991), Carrara (1983), DeGraff & Romesburg (1984), Pack (1982), Bernkopf (1988), Pike (1988), Corominas (1992), Othman et al. (1992), Van Westen (1993), Atkinson & Massari (1996), Chung & Fabbri (1999), Halounova (1999), Sinha et al. (1999), Syarief et al. (1999), Chung & Shaw (2000), Gorsevski et al. (2000a), Gorsevski et al. (2000b), Dhakal et al. (2000) in Vestal (2002). Uporabili so različne statistične metode, bivariatno statistiko in multivariatno analizo. Omenjene metode in pristopi podrobneje opisujejo Van Westen (1993) in Resources Inventory Committee (1997). Na podlagi dosedanjih raziskav se trend napovedi plazovitih območij giblje k

uporabi metod multivariatne statistike s sočasno uporabo natančnejših podatkov.

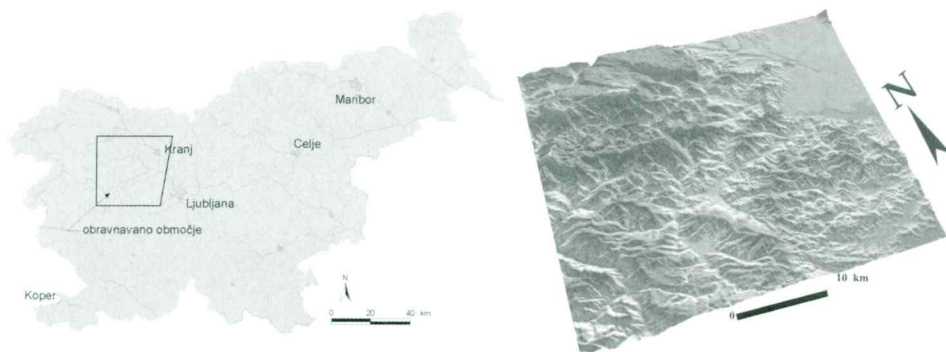
Natančnejši pristop k določitvi pomembnosti dejavnikov vpliva na pojave plazenj na območju Slovenije je do sedaj temeljil na izkustvenem pristopu (Petkovšek et al., 1993; Ribičič et al., 1995; Ribičič & Sinigoj, 1996; Janža & Ribičič, 1998; Vukadin & Ribičič, 1998; Urbanc et al., 2000) in na metodah umetne inteligence (Hafner, 1999), ki pa so močno prostorsko omejene – vezane na delovno območje in časovno zamudne.

Predstavljeno metodologijo je natančnejše opisal Komac (2003b).

Geografski opis

Obravnavano območje leži v osrednjem delu Slovenije (Slika 1a). Približno 35 km × 35 km veliko območje se razteza med geografskimi koordinatami (Gauß-Krügerjev koordinatni sistem) 5130.000, 5420.000 na severozahodu (okolica Bohinjske Bistrice), 5095.000, 5420.000 na jugozahodu (okolica Idrije), 5130.000, 5458.000 na severovzhodu (okolica Preddvora) in 5095.000, 5452.000 na jugovzhodu (Log pri Brezovici). 1222 km² veliko območje v celoti pokriva občine Dobrova – Horjul – Polhov Gradec, Gorenja vas – Poljane, Medvode, Železniki, Žiri, večino občine Kranj ter delno občine Bled, Bohinj, Brezovica, Cerklje na Gorenjskem, Cerkno, Idrija, Logatec, Naklo, Radovljica, Šenčur, Tolmin in Vrhnika. Večji del ozemlja je hribovit. Na območju med obema Sorama je položnejše kot drugod, v idrijsko-žirovskem hribovju, Polhograjskih dolomitih ter na območju Jelovice in Ratitovca pa strmejšje. Severovzhodni del, Sorško polje, in jugovzhodni del območja, Ljubljansko barje, sestavlja večinoma ravninski svet s posameznimi vzpetinami. Vodno omrežje na omenjenem območju sestavljajo reke Sava, Selška in Poljanska Sora v osrednjem delu ter Ljubljanica in Idrija v obrobni delih. Na območju živi po podatkih iz leta 1996 (Urad RS za prostorsko planiranje et al., 1997) okoli 135000¹ prebivalcev.

¹ Ocena je groba, saj je bila izračunana na podlagi podatkov o gostoti prebivalstva na 0,01 km². Ker so ti podatki razdeljeni v razrede po 10 prebivalcev, je bila privzeta srednja vrednost razreda. Največje možno odstopanje od podanega podatka je 25 % (103000–176000).



Slika 1. Položaj (a) in digitalni model višin (b) obravnavanega območja.

Večji mesti sta Kranj in Škofja Loka, večji kraji, ki ležijo na območju, pa so Idrija, Cerkno, Železniki, Žiri, Poljane in Horjul. Med njimi je zaradi razpršenosti prebivalstva po višje ležečih predelih dobro razpredena infrastruktura mreža. Slika 1b prikazuje digitalni model višin obravnavanega območja.

Geološki opis

Večina obravnavanega ozemlja leži na listu Kranj Osnovne geološke karte SFRJ merila 1:100.000, manjši del pa še na listih Tolmin, Gorica in Postojna. Tako so bili podatki o geološki zgradbi dela območja, ležečega na listu Kranj, povzeti po Gradu in Ferjančiču (1974), na listu Tolmin po Buserju (1987), na listu Gorica po Buserju (1968) in na listu Postojna po Buserju in sod. (1967). Preglednici (Preglednica 1 in Preglednica 2)

Preglednica 1. Pojavljanje litostratigrafskih enot na obravnavanem območju glede na geološko starost.

Starost	%	Površina (km ²)	Št. poligonov
Q	16,81%	205,562	87
Pl	5,04%	61,632	23
Ol	1,54%	18,832	44
E	0,03%	0,367	3
K	2,79%	34,118	20
J,K	1,45%	17,731	20
J	1,51%	18,465	39
T	48,49%	592,964	377
P	9,15%	111,891	161
C,P	13,18%	161,173	36
C	0,01%	0,122	3
Skupaj	100%	1222,857	813

podajata deleže in frekvenco pojavljanja litostratigrafskih enot na obravnavanem območju glede na njihovo geološko starost in glede na njihove inženirsko-geološke lastnosti.

Uporabljeni podatki

V namen izdelave napovedi plazovitih predelov omenjenega območja je bilo uporabljenih osem osnovnih podatkovnih slojev oziroma njihovih izpeljank: baza obstoječih plazov, digitalni model višin z ločljivostjo 25 metrov (Geodetska uprava Republike Slovenije, 2000) in njegove izpeljanke, satelitski posnetki (Statistični urad Republike Slovenije, 1993; Sovinformsputnik, 2001), geološka zgradba (viri so naštet v prejšnjem poglavju), količine padavin (HMZ R Slovenije, 2001), mreža površinskih vodnih tokov (Geodetska uprava Republike Slovenije, 1994) in raba tal po nomenklaturi CORINE (Hočevar et al., 2001).

Analiza podatkov

Podatki so bili analizirani z metodami univariatne (χ^2 (hi kvadrat), Kolmogorov-Smirnov test ter Studentov test t) in multivariatne statistike (faktorska analiza in večkratna regresijska analiza).

Rezultati metod univariatnih analiz so pokazali, da uporabljene spremenljivke, razen spremenljivk "Usmerjenost" in "Odd.struktur_ln", značilno vplivajo na prostorsko pojavljanje plazov. Pri metodah multivariatne statistike so analize pokazale, da statistični

Preglednica 2. Pojavljanje litostratigrafskih enot na obravnavanem območju glede na tip kamnine oz. zemljine, določene po inženirsko-geološki klasifikaciji (po Ribičič (2001) in Urbanc et al. (2000)).

Tip kamnine po IG	Opis IG	%	Površina (km ²)	Št. poligonov
ZEM-P	Pobočne zemljine	2,62%	32,039	39
ZEM-R	Ravninske zemljine	13,31%	162,762	35
ZEM-K	Kamenotvorne zemljine	1,88%	22,990	49
POL	Polhribine	5,58%	68,235	31
KLA	Klastične hribine	36,19%	442,552	258
KAR	Karbonatne hribine	37,76%	461,751	371
MAG	Magmatske hribine	2,66%	32,528	30
Skupaj		100%	1222,857	813

derivati spremenljivk oddaljenosti od linijskih elementov, t.j. od geoloških mej, struktur in od površinskih vod, pri glavnih pobočnih enotah nimajo večjega vpliva na pojavljanje plazov. Natančnejši rezultati analiz so podani v delih Komac (2003a in 2003b).

Pred začetkom analize je bilo naključno izbranih 2/3 vzorca. Podatki so služili kot osnova za izdelavo matematičnega modela, ki je bil kasneje testiran za kakovost napovedi plazovitih območij. Skupaj je učni niz sestavljalo 394 primerkov oz. 64,2 % vseh plazov.

Rezultati

Metodi faktorske in večkratne regresijske analize sta dali različne rezultate. Faktorska analiza je pokazala, da sta najpomembnejša dejavnika, ki vplivata na pojavljanje plazov, naklon in litologija, za nekoliko manj pomembne, pa so se izkazali površinski tipi, ukrivljenost pobočja in bližina površinskih vodnih tokov, bližina strukturnih elementov ter tip ukrivljenosti. Rezultati večkratne regresijske analize so dali nekoliko drugačne rezultate. Kot najpomembnejši dejavnik so se pokazale lastnosti površinskih tipov, največja ukrivljenost pobočja, njegova valovitost, največji naklon ter prevladujoča litološka enota. Pri dobršnem delu regresijskih enačb so podatke o litologiji nadomestili drugi prostorski podatki, a na račun natančnosti napovedi. Rezultati oz. prispevki, dobjeni s faktorsko in regresijsko analizo, so bili uporabljeni kot uteži za dejavnike pri izdelavi napovedovalnih modelov. Zanimivo je dejstvo, da se pri dobršnem delu rezultatov večkratne regresijske analize, podatki o litologiji ne pojavljajo med vplivnimi. Na-

domestijo jih drugi prostorski podatki, a je natančnosti napovedi plazovitih območij s tem seveda nekoliko slabša.

Rezultati metod multivariatne statistike so služili kot vhodni podatki pri izdelavi linearnih matematičnih napovedovalnih modelov in kot osnova za določitev uteži posameznih spremenljivk pri postopku analitične hierarhije (AHP) (Saaty, 1977). Izdelanih je bilo 28 modelov. Najosnovnejši pristop je vključeval izdelavo desetih linearnih matematičnih napovedovalnih modelov tveganja pred plazovi na osnovi rezultatov analiz multivariatne statistike, npr. koeficientov faktorskih vrednosti pri faktorski analizi ali enačb regresijske analize. Obenem je bilo po postopku analitične hierarhije (*ang. Analytical Hierarchy Process – AHP*), izdelano dodatnih osemnajst modelov tveganja pred plazovi. Med izdelanimi modeli se je za najprimernejšega izkazal tisti, dobljen s faktorsko analizo. Vsi modeli so podani v spodnji preglednici (Preglednica 3), najprimernejši model pa je opisan v nadaljevanju. Napake modelov se gibljejo med 6,89 in 31,8 %.

Za najboljša sta se izkazala modela Mu_vp_03 (št. modela 7) in njegova druga AHP različica, Mu_vp_03_2 (št. modela 9). Pri prvem so uteži določene s signifikativnim deležem variance spremenljivke, ki je pomnožen z vrednostjo komunalnosti in vrednostjo večkratnega korelacijskega koeficienta spremenljivke. V drugem so uteži iz prvega modela služile za izračun razmerij in bile na osno-

² Napaka modela je opredeljena kot delež plazov, ki se pojavljajo na pobočjih, pri katerih je verjetnost pojavljanja plazov manjša od srednje vrednosti verjetnosti za posamezni model. Srednja vrednost predstavlja teoretično ločnico med pojavljanjem oz. nepojavljanjem plazov. Na pobočjih, katerih vrednost verjetnosti pojavljanja je nižja od srednje vrednosti, je verjetnost nepojavljanja plazov večja od verjetnosti pojavljanja.

Preglednica 3. Opisi najboljših napovedovalnih modelov in rezultati testa njihove natančnosti.

Št. modela	Oznaka	Opis modela	CR/R ²	Napaka modela
7	Mu_vp_03	Mu_vp_02 × Rveč spremenljivk v glavnih osnovnih komponentah	-	6,89%
9	Mu_vp_03_2	AHP Mu_vp_03 – druga različica	CR = 0,06	6,89%
1	Mu_vp_01	Uteži, določene z % variance spremenljivke, pri signifikativnih faktorskih utežeh	-	7,71%
4	Mu_vp_02	Mu_vp_01 × Komunalnost spremenljivk v glavnih osnovnih komponentah	-	7,87%
8	Mu_vp_03_1	AHP Mu_vp_03 – prva različica	CR = 0,02	8,03%
2	Mu_vp_01_1	AHP Mu_vp_01 – prva različica	CR = 0,04	8,53%
6	Mu_vp_02_2	AHP Mu_vp_02 – druga različica	CR = 0,14	8,53%
5	Mu_vp_02_1	AHP Mu_vp_02 – prva različica	CR = 0,05	9,34%
3	Mu_vp_01_2	AHP Mu_vp_01 – druga različica	CR = 0,24	11,64%
12	Mu_vp_04_2	AHP Mu_vp_04 – druga različica	CR = 0,14	12,30%
11	Mu_vp_04_1	AHP Mu_vp_04 – prva različica	CR = 0,06	13,28%
28	Mu_vp_10	Vrednost faktorja (glavne komponente) × delež variance faktorja (glavne komponente)	-	13,44%
14	Mu_vp_05_1	AHP Mu_vp_05 – prva različica	CR = 0,03	16,23%
15	Mu_vp_05_2	AHP Mu_vp_05 – druga različica	CR = 0,04	17,71%
20	Mu_vp_07_1	AHP Mu_vp_07 – prva različica	CR = 0,03	17,87%
21	Mu_vp_07_2	AHP Mu_vp_07 – druga različica	CR = 0,09	18,69%
17	Mu_vp_06_1	AHP Mu_vp_06 – prva različica	CR = 0,09	19,02%
18	Mu_vp_06_2	AHP Mu_vp_06 – druga različica	CR = 0,1	19,67%
24	Mu_vp_08_2	AHP Mu_vp_08 – druga različica	CR = 0,16	25,08%
23	Mu_vp_08_1	AHP Mu_vp_08 – prva različica	CR = 0,1	25,57%
19	Mu_vp_07	Regresijski koeficienti (vključevanje značilnih regresorjev) – standardizirani koef. β	R ² = 0,7772	26,23%
27	Mu_vp_09_2	AHP Mu_vp_09 – druga različica	CR = 0,03	26,72%
13	Mu_vp_05	Regresijski koeficienti (standardna metoda) – standardizirani koef. β	R ² = 0,775	29,34%
25	Mu_vp_09	Regresijski koeficienti (vključevanje značilnih regresorjev) – standardizirani koef. β	R ² = 0,767	30,00%
26	Mu_vp_09_1	AHP Mu_vp_09 – prva različica	CR = 0,02	30,49%
22	Mu_vp_08	Regresijski koeficienti (izključevanje značilnih regresorjev) – nestandardizirani koef. B	R ² = 0,767	30,66%
10	Mu_vp_04	Regresijski koeficienti (standardna metoda) – nestandardizirani koef. B	R ² = 0,775	31,15%
16	Mu_vp_06	Regresijski koeficienti (vključevanje značilnih regresorjev) – nestandardizirani koef. B	R ² = 0,777	31,80%

vi ekspertne ocene prenesene v primerjalno matriko. Napaka² obeh modelov znaša 6,89 %. Pri nadaljnjem opisu vlog spremenljivk, se te vedno nanašajo na glavno pobočno enoto. Najpomembnejšo vlogo pri modelu Mu_vp_03 igrata mediana vseh litoloških enot (15,6 %) in prevladujoča litološka enota (15,5 %). Po pomembnosti sledijo največji (12,1 %) in povprečni naklon pobočja (9 %), mediana površinskih tipov (7,3 %), prevladujoči površinski tip (6,3 %), standardni odklon ukrivljenosti (5,7 %) in litološka raznolikost (5,2 %). Poleg omenjenih, igrajo v modelu manjšo

vlogo (manj od 5 %) še ostale spremenljivke, razen usmerjenosti in povprečne ukrivljenosti pobočja. Preglednica 4 vsebuje uteži za posamezne spremenljivke, vključene v modele. Modeli so v preglednici predstavljeni z zaporedno številko, najboljši med njimi pa so označeni z osenčenimi polji.

Ob upoštevanju vrednosti CR in ob izločitvi subjektivnega dejavnika, ki je prisoten pri določanju uteži modelov, izdelanih z AHP, se je za najboljšega izkazal model Mu_vp_03 (št. modela 7). V spodnji preglednici (Preglednica 5) je podan pomen posameznih pro-

Preglednica 4. Vrednosti uteži spremenljivk pri najboljših dveh modelih, št. 7 in št. 9.

Spremenljivka / Št modela	7	9	Spremenljivka / Št modela	7	9
CR	-	0,06	STR_MEAN	0,007	0,014
Napaka modela (%)	6,89	6,89	VOD_MEAN	0,011	0,022
NAKL_MAX	0,037	0,186	LITO_VAR	0,017	0,042
NAKL_MEAN	0,028	0,128	LITO_MAJ	0,047	0,164
NAKL_STD	0,014	0,043	LITO_MED	0,048	0,164
UKRIV_MAX_ABS	0,013	0,036	SAT_VAR	0,012	0,022
UKRIV_MEAN	0,008	0,019	SAT_MAJ	0,02	0,047
UKRIV	0,0054	0,011	SAT_MED	0,022	0,052
UKRIV_STD	0,017	0,05			

storskih dejavnikov pri pojavljanju plazov v primeru linearnega modela Mu_vp_03. Pri tem model igrajo litološke lastnosti glavnih pobočnih enot najpomembnejšo vlogo (31 %). Pomembno vlogo pri pojavljanju plazov igra tudi naklon pobočja z 21,2 %. Lastnosti površinskih tipov pobočja predstavljajo 13,7 % delež vpliva. Razgibanost oz. valovitost pobočja, ki se skriva v spremenljivkah standardnih odklonov nagibov in ukrivljenosti, vpliva na pojavljanje plazov z deležem med 10,1 %. Ukrivljenost glavne pobočne enote vpliva na pojavljanje plazov z nekoliko manjšim deležem kot dejavnik razgibanosti (8,6 %). Raznolikost litoloških enot na pobočju ima še manjšo vlogo (5,5 %). Podobno lahko trdimo za raznolikost površinskih tipov (3,9 %). Vpliv oddaljenosti pobočja do

Preglednica 5. Pomen prostorskih dejavnikov pri pojavljanju plazovih v primeru linearnih modelov.

Prostorski dejavnik	Vsi plazovi
Litološke lastnosti	31,0%
Naklon	21,2%
Površinski tipi	13,7%
Razgibanost pobočja	10,1%
Ukrivljenost	8,6%
Litološka raznolikost	5,5%
Raznolikost površinskih tipov	3,9%
Oddaljenost od vodnih tokov	3,6%
Oddaljenost od strukturnih elementov	2,3%

najbližjega površinskega vodnega toka ima vrednost 3,6 %, vloga oddaljenosti pobočja od najbližjega strukturnega elementa pa 2,3 %. Vpliva oddaljenosti od najbližje geološke meje in usmerjenosti sta zanemarljiva.

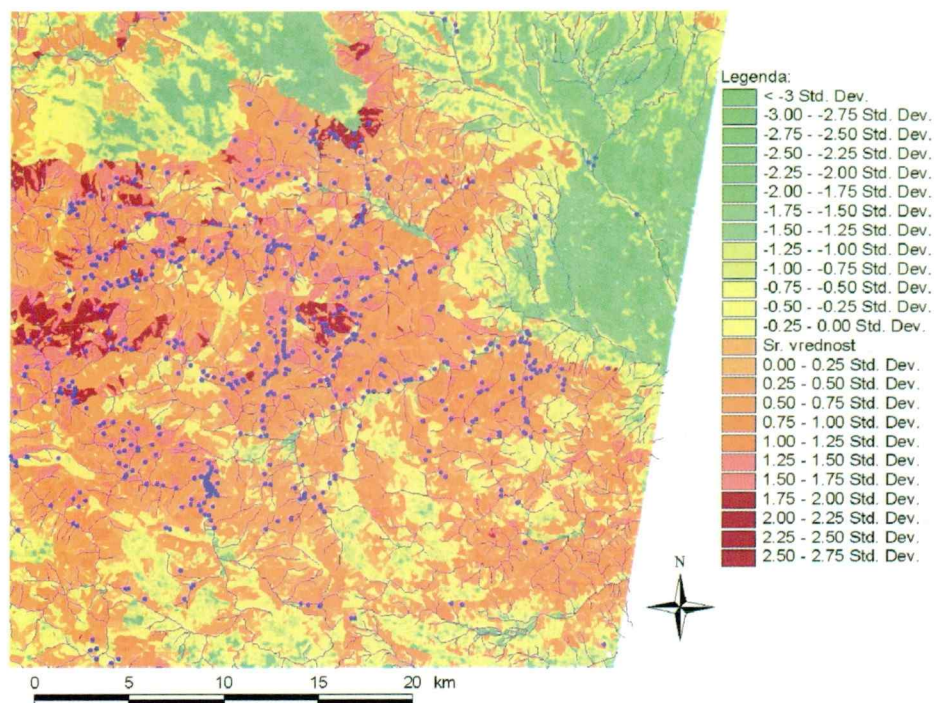
Rezultati se nekoliko razlikujejo od tistih, ki so povezani z lokacijami plazov. To je seveda razumljivo, saj so tu predstavljeni

rezultati vezani na podatke glavnih pobočnih enot in ne izključno na lokacijo plazov.

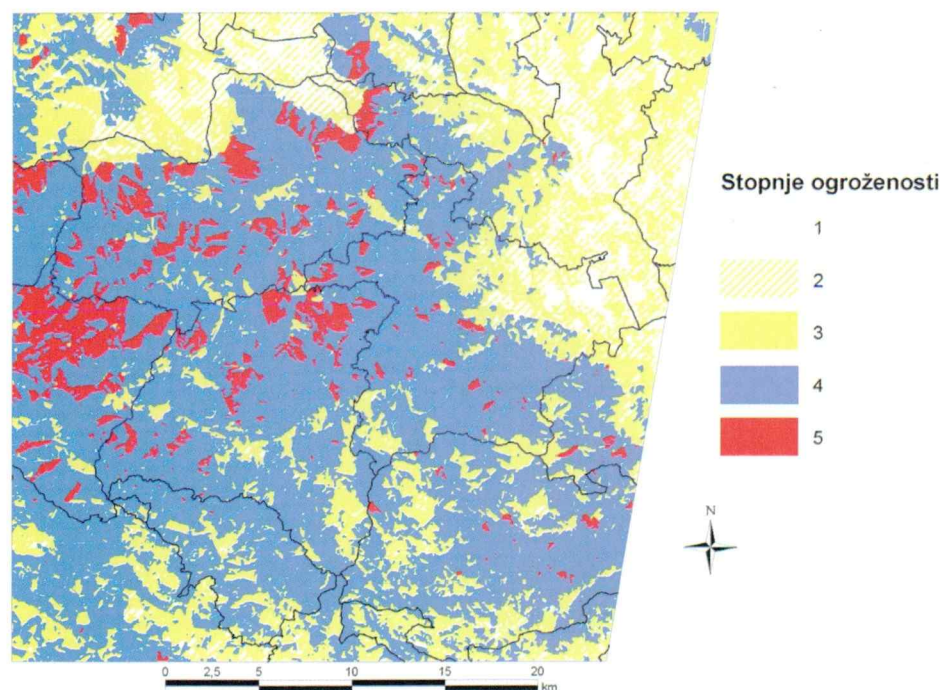
Na spodnji sliki (Slika 2) je prikazana slika pravkar opisanega modela. Vrednosti modela so razvrščene v razrede po 0,25 standardnega odklona (Std. Dev.). Vrednosti, večje od srednje vrednosti populacije (Sr. vrednost), predstavljajo območja z večjo verjetnostjo pojavljanja plazov. Prikazane so v odtenkih rdeče in oranžne barve. Temnejši odtenki označujejo večjo verjetnost pojavov plazov. Obratno velja za manjše vrednosti verjetnosti pojavljanja plazov. Te so na sliki prikazane v odtenkih rumene in zelene barve. Z modrimi točkami so označene lokacije kartiranih plazov. Za lažjo orientacijo so v slike vključeni površinski vodni tokovi.

Iz grafičnega prikaza najprimernejšega napovedovalnega modela je razvidno, da se območja z večjo možnostjo pojavljanja plazov in večjim tveganjem pojavljajo v hribovitih predelih obravnavanega območja. A tudi območja, ki ležijo na položnejših predelih, niso povsem brez možnosti nastanka plazov.

Model je bil razdeljen na 27 razredov po 0,25 standardnega odklona, kjer razredi do vključno 13. predstavljajo območja z zelo majhnim tveganjem nastanka plazov, 14. razred predstavlja srednjo vrednost (Sr. vrednost), in razredi od vključno 15. dalje predstavljajo območja, kjer je verjetnost nastanka plazov večja. Za namen določitve ogroženosti zaradi plazov je bilo 27 razredov tveganja nadalje združeno v pet stopenj ogroženosti, prikazanih na naslednji sliki (Slika 3) in v spodnji preglednici (Preglednica 6). Stolpec "Statistični opis" podaja statistični razpon posameznih stopenj ogroženosti, kjer "SD" pomeni standardni odklon in "Sr. vrednost" predstavlja srednjo vrednost populacije. Drugi stolpec, "Stopnja ogroženosti", podaja opis



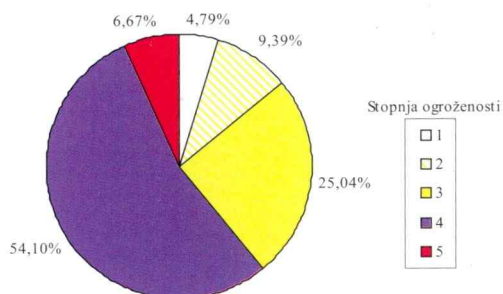
Slika 2. Grafični prikaz napovedovalnega modela Mu_vp_03, ki predstavlja verjetnost pojavljanja plazov.



Slika 3. Grafični prikaz napovedovalnega modela Mu_vp_03, razdeljenega na stopnje ogroženosti.

Preglednica 6. Razvrstitev rezultatov modelov po razredih tveganja in stopnjah ogroženosti.

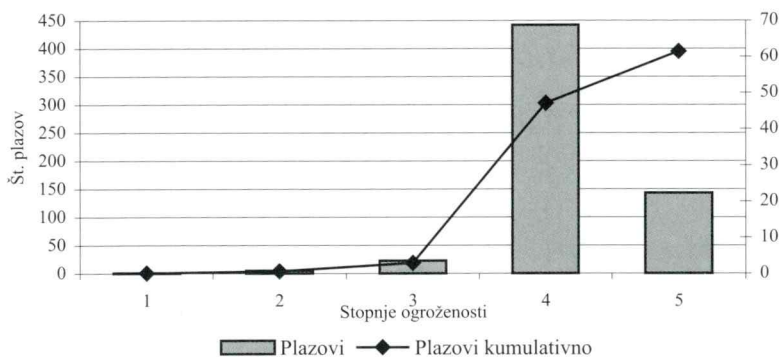
Statistični opis	St. ogrož.	Stopnja ogroženosti	Razredi tveganja	Površina (km ²)	Delež površja	Št. plazov	Delež plazov
< - 1,75 SD	1	Ni ogroženosti	1 – 6	58,52	4,79%	1	0,16%
- 1,75 SD – - 1 SD	2	Preostala ogroženost	7 – 9	114,71	9,39%	5	0,81%
- 1 SD – Sr. vrednost	3	Majhna ogroženost	10 – 13	305,93	25,04%	23	3,75%
Sr. vrednost – 1,5 SD	4	Srednja ogroženost	15 – 20	660,96	54,10%	442	71,99%
> 1,5 SD	5	Velika ogroženost	21 – 27	81,53	6,67%	143	23,29%



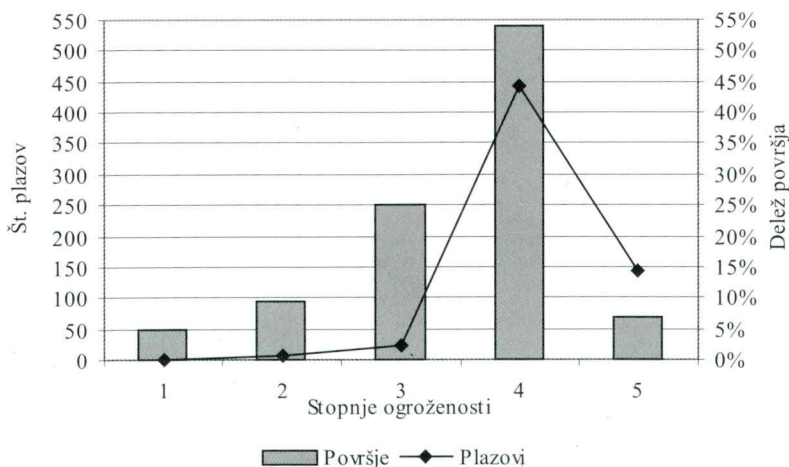
Slika 4. Porazdelitev površja obravnavanega območja glede na stopnje ogroženosti.

ogroženosti, zadnji stolpec pa podaja razrede tveganja, ki so bili preklasificirani v pripadajoče stopnje ogroženosti. Statistični opis modela je podan v nadaljevanju.

Ogroženost območja je razdeljena na pet stopenj. Najvišja stopnja ogroženosti (5) obsega območja, kjer je ogroženost velika, četrta stopnja (4) ogroženosti obsega območja s srednjo ogroženostjo, tretja stopnja (3) območja z majhno ogroženostjo, druga stopnja (2) obsega območja s preostalo ogroženostjo, prva stopnja (1) pa obsega območja, kjer z današnjim stanjem poznavanja ni ogroženosti.



Slika 5. Pojavljanje plazov po razredih stopnje ogroženosti obravnavanega območja (model Mu_vp_03).



Slika 6. Porazdelitev razredov ogroženosti obravnavanega ozemlja in pojavljanje deležev plazov po teh razredih (model Mu_vp_03).

Preglednica 7. χ^2 test napovedi pojavljanja plazov z modelom Mu_vp_03.

Plazovi – model Mu_vp_03				
$\chi^2 = 447,04$	df = 4	p < 0,0000000		
Razred	Dejan. plazov	Prič. plazov	D – P	$\chi^2 = (D-P)^2/P$
1	1	29,4141	-28	27,4481
2	5	57,65224	-53	48,08588
3	23	153,7617	-131	111,2021
4	442	332,1947	110	36,29562
5	143	40,97726	102	254,0102
Σ	614	614	0	477,04

sti ali obstaja zanemarljiva ogroženost (Mikoš et al., 2004).

Porazdelitev površja obravnavanega območja glede na stopnje ogroženosti je podana na naslednji sliki (Slika 4).

Za model je bila izvedena tudi analize korelacije pojavov plazov glede na razrede stopnje ogroženosti obravnavanega območja (Slika 5 in Slika 6). 29 plazov (4,72 %) se pojavlja na območjih, kjer je tveganje nastanka plazov majhno (1., 2. in 3. stopnja ogroženosti). Rezultati testa χ^2 (Preglednica 7) kažejo, da se značilno več plazov pojavlja na območjih, kjer je ogroženost zaradi plazov srednja do velika. Na območjih, kjer z današnjim stanjem poznavanja ni ogroženosti ali pa je ta zanemarljiva, se pojavlja le 1 plaz (0,18 %). Iz rezultatov testa χ^2 je možno sklepati, da je izbrani model precej zanesljiv, saj je tveganje minimalno (p < 0,000000).

Zaključki

Iz rezultatov primernosti modelov lahko povzamemo pomembnost posameznih prostorskih dejavnikov. Najpomembnejša dejavnika sta litološke lastnosti in naklon pobočja, sledijo površinski tipi (vegetacija, poraščenost itd.), valovitost terena ter bližina površinskih vodnih tokov in strukturnih elementov. Boljši rezultati modelov, dobljenih s faktorsko analizo so najverjetneje posledica podvrženosti metode regresijske analize ekstremom in majhnega števila vzorcev v učnem nizu nekaterih tipov plazov.

Statistični pristop nedvomno predstavlja raziskovalcem cenejši in hitrejši vpogled v opazovane procese. Z modeliranjem vpletenih dejavnikov je mogoče v primeru plazov uspešno napovedati stopnjo ogroženosti zaradi pojavljanja plazov. Metodologija izdelava

ve kart ogroženosti zaradi plazov s pomočjo statističnih metod je relativno enostavna in ekonomsko opravičljiva, v kombinaciji s praktičnim strokovnim znanjem inženirskega geologa pa predstavlja močno orodje pri obvladovanju nestabilnega prostora.

Predstavljena metoda izdelave kart tveganja pred plazovi je uporabna pri izdelavi prostorskih planov, pri načrtovanju vzdrževalnih del cestišč in celo pri določitvi osnove za zavarovalne premije na nepremičninah. Uporaba kart tveganja je široka zaradi enostavnosti prikaza in razlage oznak. Ne uporablja fizikalnih temveč opisne vrednosti, s čimer je razumljivejša širši javnosti, ki je tudi potencialno njen glavni uporabnik. Zavedati se je treba dejstva, da bo človek s svojimi dejanji vedno posegal v naravo in, da se bo ta vedno "upirala po svojih najboljših močeh". Z razumevanjem naravnih pogojev in danosti se je mogoče v večji meri izogniti neprijetnim posledicam nepremišljenih posegov v prostor.

Literatura

Atkinson, P. M. & Massari, R. 1996: Predicting the relative likelihood of landsliding in the central Appennines, Italy. - Extended Abstracts from the 1st International Conference on GeoComputation University of Leeds United Kingdom 17 – 19 September 1996, University of Leeds, Leeds. (<http://www.ashville.demon.co.uk/gc1996/abs005.htm>, 2002)

Bernkopf, R. L., Campbell, R. H., Brookshire, D. S. & Shapiro, C. D. 1988: A probabilistic approach to landslide hazard mapping in Cincinnati, Ohio, with applications for economic evaluation. - Bulletin of the Association of Engineering Geologists, Vol. XXV, No. 1, International Association of Engineering Geologists, 39–56, Dallas.

Buser, S. 1968: Osnovna geološka karta SFRJ, lista Gorica, 1:100.000. - Zvezni geološki zavod, Beograd.

- Buser, S. 1987: Osnovna geološka karta SFRJ, list Tolmin in Videm, 1:100.000. - Zvezni geološki zavod, Beograd.
- Buser, S., Grad, K. & Pleničar, M. 1967: Osnovna geološka karta SFRJ, list Postojna, 1:100.000. Zvezni geološki zavod., Beograd.
- Carrara, A., Catalano, E., Sorriso Valvo, M., Reali, C., Merenda, L. & Rizzo, V. 1977a: Landslide morphometry and typology in two zones, Calabria, Italy. - Bulletin of the Association of Engineering Geologists, Vol. XVI, International Association of Engineering Geologists, 8-13, Dallas.
- Carrara, A., Pugliese-Carratelli, E. & Merenda, L. 1977b: Computer-based data bank and statistical analysis of slope instability phenomena. - Zeitschrift für Geomorphologie N.F., Vol. 21(2), 187-222, Stuttgart.
- Carrara, A. 1983: Multivariate models for landslide hazard evaluation. - Mathematical Geology, Vol. 15, Kluwer Academic Publishers, 403-426, Dordrecht.
- Carrara, A., Cardinali, M., Detti, R., Guzzetti, F., Pasqui, V. & Reichenbach, P. 1991: GIS techniques and statistical models in evaluating landslide hazard. - Earth Surface Processes and Landforms, Vol. 16, British Geomorphological Research Group, John Wiley & Sons, 427-445, Chichester.
- Chung, C.-J. F. & Fabbri, A. G. 1999: Probabilistic Prediction Models for Landslide Hazard Mapping. - Photogrammetric engineering and remote sensing, Vol. 65(12), American Society of Photogrammetry and Remote Sensing, 1389-1399, Falls Church.
- Chung, C. F. & Shaw, J.M. 2000: Qualitative prediction models for landslide hazard mapping. - Natural Resources Canada, Mineral Resources Division, Spatial Data Analysis Laboratory, Ottawa. (http://www.nrcan.gc.ca/gsc/mrd/sdalweb/sdi_cd/, 2000)
- Corominas, J., Baeza, C. & Saluena, I. 1992: The influence of geometrical slope characteristics and land use on the development of shallow landslides. - Proceedings of the 6th International Symposium on Landslides, New Zealand Geomechanics Society, Christchurch, New Zealand, Vol. 2, 919-924, Christchurch.
- DeGraff, J. V. & Romesburg, H. C. 1984: Regional landslide susceptibility assessment for wildland management: a matrix approach. - In: Coates, D. R. & Vitak, J. (Eds.) Thresholds in geomorphology, Allen and Unwin, 401-414, Boston.
- Dhakal, A. S., Amada, T. & Aniya, M. 2000: Landslide hazard mapping and its evaluation using GIS: An investigation of sampling schemes for a grid-cell based quantitative method. - Photogrammetric engineering and remote sensing, Vol. 66(8), American Society of Photogrammetry and Remote Sensing, 981-989, Falls Church.
- Geodetska uprava Republike Slovenije, 1994: Skanogrami TK 50 - topografske karte merila 1:50.000. Datum vira: 1978 - 1987. - Geodetska uprava Republike Slovenije, Ljubljana.
- Geodetska uprava Republike Slovenije, 2000: InSAR DMV 25 (Digitalni model višin), Ljubljana.
- Gorsevski, P. V., Gessler, P. & Foltz, R. B. 2000a: Spatial prediction of Landslide hazard using discriminant analysis and GIS. - GIS in the Rockies 2000, Conference and Workshop, Denver.
- Gorsevski, P. V., Gessler, P. & Foltz, R. B. 2000b: Spatial prediction of Landslide hazard using logistic regression and GIS. - 4th International Conference on Integrating GIS and Environmental Modeling (GIS/EM4): Problems, Prospect and Research Needs, Banff, Alberta.
- Grad, K. & Ferjančič, L. 1974: Osnovna geološka karta SFRJ, list Kranj, 1:100.000. Zvezni geološki zavod, Beograd.
- Hafner, J. 1999: Integracija GIS-a in umetne inteligence v geologiji. Doktorska disertacija, FNT Montanistika, Oddelek za geologijo, 170 str., Ljubljana.
- Halounová, L. 1999: Landslide risk assessment maps using GIS tools. - 2nd International Symposium on Operationalization of Remote Sensing, Enschede, The Netherlands, 16-20 August, 1999, ITC, Enschede.
- HMZ R Slovenije, 2001: Karta povprečnih letnih padavin v Sloveniji za referenčno obdobje 1961 - 1990 & Maksimalne 24-urne padavine: 100 letna povratna doba. Hidrometeorološki zavod Republike Slovenije, digitalna oblika, Ljubljana.
- Hočevar, M., Kobler, A., Vrščaj, B., Poljak, M. & Kušar, B. 2001: Corine karta rabe tal in pokrovnosti Slovenije = Corine land cover phase project Slovenia: Podprojekt: Fotointerpretacija in rezultati: zaključno poročilo. Gozdarski inštitut Slovenije, 83 str., Ljubljana.
- Janža, M. & Ribičič, M. 1998: Prediction of landslide occurrence possibilities with spatial decision support system. - International Conference on GIS for Earth Science Applications, Ljubljana 98 - proceedings, IGGG, 91-99, Ljubljana.
- Komac, M. 2003a: Vpliv prostorskih dejavnikov na pojavljanje plazov (analiza prekrivanja). - Geologija, 45/1, 89-100, Ljubljana.
- Komac, M. 2003b: Napoved tveganja pred plazovi z analizo satelitskih in drugih prostorskih podatkov. Doktorska disertacija, NTF, Montanistika, 235 str., 85 str. pril., Ljubljana.
- Mikoš, M., Batistič, P., Đurovič, B., Humar, N., Janža, M., Komac, M., Petje, U., Ribičič, M. & Vilfan, M. 2004: Metodologija za določanje ogroženih območij in način razvrščanja zemljišč v razrede ogroženosti zaradi zemeljskih plazov : končno poročilo. FGG UL, Katedra za splošno hidrotehniko, 165 str., 47 preglednic, 53 slik, ilustr., graf. prikazi., Ljubljana.
- Neuland, H. A. 1976: A prediction model of landslides. - Catena, Vol. 3, Elsevier Science B.V., 215-230, Amsterdam.
- Othman, M. A., Hassan, N. R. N. & Aziz, H. M. A. 1992: A statistical approach to cut slope instability problems in Peninsular Malaysia. - Proceedings of the 6th International Symposium on Landslides, New Zealand Geomechanics Society, Christchurch, New Zealand, Vol. 2, 1379-1385, Christchurch.
- Pack, R. T. 1982: Selected annotated bibliography on factors controlling debris torrents and slope stability mapping for forest land. - MOF Unpublished Report, British Columbia Ministry of Forest, Victoria.
- Petkovšek, B., Fifer, K., Hafner, J., Volk, J., Hoblaj, R., Buser, I., Grubišič, Z., Čepin, D., Jakopin, D. & Ribičič, M. 1993: Poročilo o opravljeni raziskovalni nalogi o ogroženosti republike Slovenije pred zemeljskimi plazovi. Inštitut za geologijo, geotehniko in geofiziko, 7 str. + priloge, Ljubljana.
- Pike, R. J. 1988: The geometric signature: Quantifying landslide-terrain types from digital elevation models. - Mathematical Geology, Vol.

20, Kluwer Academic Publishers, 491–511, Dordrecht.

Resources Inventory Committee, Government of British Columbia, 1997: Terrain stability mapping in British Columbia – A review and suggested methods for landslide hazard and risk mapping.- Resources Inventory Committee, Canada. (www.for.gov.bc.ca/ric, 2001)

Ribičič, M. 2001 – osebni kontakt (jesen 2001).

Ribičič, M., Kočevar, M. & Popovič, Z. 1995: Ocena tveganja nastanka plazov in nestabilnih območij. Letno poročilo za leto 1995.- V Geologija okolja, Institut za geologijo, geotehniko in geofiziko, 12 str., Ljubljana.

Ribičič, M. & Šinigoj, J. 1996: Karte ogroženosti in tveganja zaradi plazov na območju Slovenije.- V Geografski informacijski sistemi v Sloveniji 1995–1996, Zveza geodetov Slovenije, 115–124, Ljubljana.

Saaty, T. L. 1977: A scaling method for priorities in hierarchical structures.- Journal of Mathematical Psychology, Vol. 15, Society for Mathematical Psychology, Academic Press, 234–281, New York.

Sinha, L.K., Paul, R.S. & Mehta, S.D. 1999: Landslide hazard zonation in a part of Giri basin, Sirmur district (H.P.) using remote sensing techniques & GIS.- GIS Forum South Asia'99, Centre for Spatial Database Management & Solutions, Katmandu. (http://www.csdm.org/tech-papers/gisf99_proceed.htm#sdmetha, 2001)

Sovinformsputnik, 2001: MK-4 images over Slovenia (10.9.1991). - Skanirani satelitski posnetki MK-4, Sovinformsputnik, Moskva.

Statistični urad Republike Slovenije, 1993: Georeferencirani mozaik Slovenije iz satelitskih

podatkov LandsatTM93. Skenirano pomladi '93. Statistični urad Republike Slovenije, Ljubljana.

Syarief, E.A., Nitihardjo, S. Siagian, Y.O.P. & Sugalang 1999: Landslides disaster in Indonesia and mitigation using remote sensing and geographic information system with sample area north of Bandung, West Java.- The Post Conference Proceedings Volume (Net Edition) of Geoinformatics: Beyond 2000 – An International Conference on Geoinformatics for Natural Resource Assessment, Monitoring and Management, Indian Institute of Remote Sensing, Dehradun. (<http://pages.hotbot.com/edu/geoinformatics/f146.html>, 2001)

Urad RS za prostorsko planiranje, Statistični urad Republike Slovenije & Geodetska uprava RS 1997: Gostota prebivalcev na hektar po razredih. - Podatkovna zbirka, 1,28 MB, Ljubljana.

Urbanc, J., Komac, M., Lapanje, A., Marinko, M., Rikanovič, R., Poljak, M. & Ribičič, M. 2000: Obdelava digitalnih geoloških prostorskih podatkov za potrebe Agencije RAO – hidrogeološka, tektonska in inženirsko-geološka karta. Geološki zavod Slovenije, 68 str., Ljubljana.

Van Westen, C. J. 1993: GISSIZ - Training package for geographic information systems in slope instability zonation. vol. 1, Theory.- ITC, 1993, ITC, 254 str., Enschede.

Vukadin, V. & Ribičič, M. 1998: Modelling of road construction risk and hazard assesment of current road-network in Slovenia from landslides and rock falling with GIS.- International Conference on GIS for Earth Science Applications, Ljubljana 98 – proceedings, IGGG, 195–205, Ljubljana.