

Rôzne spôsoby hodnotenia úspešnosti máp zosuvného hazardu: bivariačný verzus multivariačný štatistický model

Martin Bednarik¹, Peter Paudits² & Rudolf Ondrášik¹

¹Univerzita Komenského v Bratislave, Prírodovedecká fakulta, Katedra inžinierskej geológie, Mlynská dolina G, 842 15 Bratislava

²Štátny geologický ústav Dionýza Štúra, Oddelenie inžinierskej geológie, Mlynská dolina 1, 817 04 Bratislava

AGEOS Various techniques for evaluating landslide hazard maps reliability: bivariate vs. multivariate statistical model

Abstract: Systematic studies of geological hazard and risks were generated by interest from insurance companies during the 20th century. The first studies were linked to individual building structures and later also to landuse and environmental impact assessment. Data collected were transformed to maps of seismic zonation and landslide hazard maps. The paper is devoted to landslide hazard map quantification and verification. The landslide hazard assessment is based on the assumption that landslides will occur in the future under the same conditions as occurred in the past. In the model area of the Myjava Upland (Western Slovakia) statistical methods - bivariate statistical analysis and conditional multivariate analysis were applied to assess the landslide hazard. The necessity to evaluate the informative value of final maps has arisen recently; practically it means to verify them. In the 80-ties, when the first landslide susceptibility maps were created, they were verified by visual comparison of the prognostic maps with a map of registered slope deformations. Here in, methods of statistical accuracy and ROC (Receiver Operating Characteristic) curves are used for evaluation of both statistical models. 285,004 pixels selected from raster of registered landslides were evaluated and an equal number of pixels randomly selected from raster of landslide hazard map prepared using bivariate statistical analysis; in the case of conditional multivariate analysis, there were 285,030 pixels. The results illustrate that, according to most of the methods of statistical success used to set model performance, both prognostic maps correspond to quality configured statistical models. This comparison shows that the difference between the accuracy of these two approaches has a value of about 5% in favour of multivariate statistical analysis. The difference between the statistical methods represents less than two percent using ROC curves for model verification.

Key words: hazard, risk, landslide hazard maps, accuracy statistics methods, ROC curves

1. ÚVOD

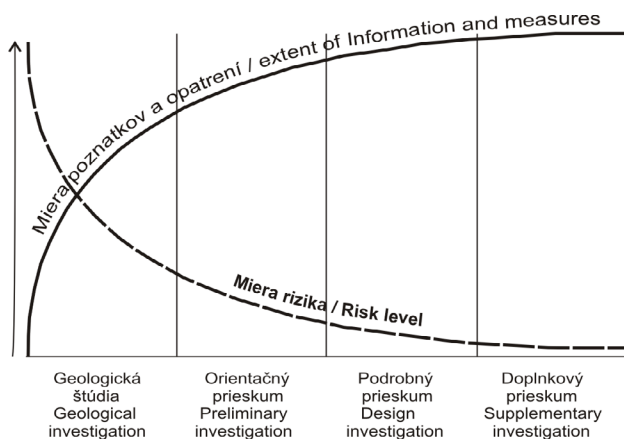
Prvé definície prírodného geologického hazardu (geohazardu) vznikli v oblasti poisťovní v USA. Zoznam niektorých geologických hazardov, najmä v súvislosti so zemetrasením a zosuvmi, sa objavil v kalifornských štátnych normách v roku 1971 (Smith, 1996). Spočiatku sa pod geologickým hazardom rozumela pravdepodobnosť výskytu potenciálne škodlivého prírodného javu súvisiaceho s výlučne s exogénnymi alebo endogénnymi procesmi (napríklad zemetrasenie, zosuv a pod.) v danej oblasti v určitom časovom období (Varnes, 1984; Petro et al., 2008). Zároveň sa však pojem geologický hazard zaužíval aj na označenie aktuálnych potenciálne nebezpečných geologických procesov (Ondrášik et al., 2011; Putiška et al., 2012). Štúdium geohazardov a upozornovanie na ich škodlivé účinky pomáhalo k poznaniu príčin ich vzniku a vývoja a účinnej prevencii, neriešilo však ich možný dopad na stavebnú činnosť a minimalizáciu následkov. Preto sa koncom 20. a začiatkom 21. storočia preniesla pozornosť na systematické riešenie možného dopadu geodynamických javov na stavebnú činnosť a opatrenia na minimalizáciu týchto dopadov. Na splnenie tohto cieľa bolo potrebné súčasne prehĺbiť štúdium geodynamických

procesov a ich systematický monitoring, čo umožňuje spresnenie našich poznatkov o dynamike vývoja zmien v geologickom prostredí, identifikáciu ich príčin a zameranie na elimináciu príčin a ochranu pred ničivými následkami, čo je ďaleko efektívnejšie, ako odstraňovanie následkov.

Jedna z prvých definícií geologického rizika vznikla na pôde Americkej geologickej služby (USGS) v roku 1977, v ktorej sa konštatovalo, že geologickým rizikom sa rozumie geologické podmienky, procesy alebo udalosti podmieňujúce potenciálne riziko pre zdravie, bezpečnosť alebo majetok pre skupinu obyvateľov, funkciu alebo ekonomiku spoločnosti (Galban, 2010).

Možno konštatovať, že pri hodnotení nebezpečných prírodných geodynamických javov hovoríme o geohazardoch a pri hodnotení možného dopadu prírodných alebo vyvolaných nebezpečných geodynamických javov na inžinierske diela alebo prírodné potenciály a spoločnosť hovoríme o georizikách.

Väčšina definícií charakterizuje georiziko ako kvalitatívne alebo kvantitatívne vyjadrenie funkcie pravdepodobnosti výskytu určitého geologického nebezpečenstva (geohazardu), stupňa porušenia alebo veľkosti strát ohrozených prvkov (zraniteľnosť), a vymedzenia priestoru, v ktorom sa nachádzajú ohrozené prvky



Obr. 1. Znáornenie miery poznatkov, preventívnych a sanačných opatrení a rizika v jednotlivých štádiách prieskumu.

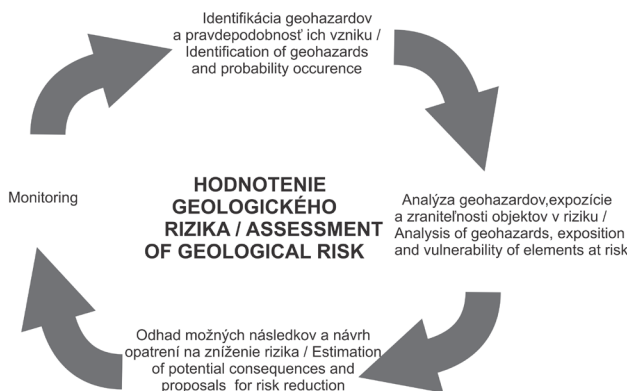
Fig. 1. Illustration of the information extent, remedial measures and risk at each stage of the survey.

(expozícia) v rámci určitého časového rozpätia (spravidla obdobia výstavby alebo životnosti stavebného diela):

$$\text{Riziko (Rz)} = \text{Hazard (Hz)} \times \text{Zraniteľnosť (Zr)} \times \text{Expozícia (Ex)} \quad (1)$$

Pre geohazard je potrebné stanoviť jeho typ (zemetrasenie, zosuv, erózia, presadavosť a pod.), pravdepodobnosť jeho výskytu, rozsah a veľkosť alebo intenzitu. Pri zraniteľnosti je potrebné stanoviť možný rozsah poškodenia, prípadne deštrukcie, citlivosť na daný typ geohazardu a prípadnú cenu finančných strát. Pri expozícii je potrebné stanoviť pravdepodobné množstvo ohrozených ľudí, stavebných objektov, plošný rozsah alebo dĺžku ohrozených úsekov komunikácie vo výstavbe alebo v prevádzke.

V jednotlivých etapách prieskumu je riziko nepriamo úmerné miere poznatkov a opatrení na zabezpečenie stability geologického prostredia a ohrozených prvkov. V počiatočných štádiách prieskumu je miera poznatkov najnižšia, stupeň neurčitosti najvyšší a riziko najväčšie. Preto výber staveniska alebo trasy komunikácie na základe geologickej štúdie je spojený s najväčšími rizikami a mal by ju vykonávať skúsený geológ s dobrými znalosťami regionálnej geológie. Počas prieskumu a projektovania sa



Obr. 2. Postup hodnotenia rizika.

Fig. 2. Procedure of risk assessment.

so zvyšovaním miery poznatkov miera rizika adekvátne znižuje (Obr. 1).

Pri hodnotení rizika sa postupuje najprv v rovine kvalitatívnej až potom nastupuje kvantifikácia rizika. Miera rizika sa v procese projektovania a prieskumu berie do úvahy od úvodných etáp projektovania, prijímajú sa určité opatrenia, takže riziko sa neustále mení s tendenciou jeho minimalizácie (Obr. 2), preto je potrebné jeho prehodnotenie po prijatí každého opatrenia.

Geologické hazardy, ako podstatná zložka georizík súvisia s charakterom geologického prostredia a tektonického režimu, geomorfologickými a klimatickými pomermi územia, ako aj stavebnými zásahmi do geologického prostredia. Georiziká rôznym spôsobom súvisia s ďalšími rizikami, ako sú ekonomické, technické, organizačné, stavebné a pod. V rámci rizikového manažmentu predstavujú súčasť environmentálnych a technologických (geotechnických) rizík a z veľkej časti sa eliminujú už výberom trasy vedení líniovej stavby a v priebehu projektovej prípravy. Geologické riziká majú veľký vplyv na výber staveniska, prípadne trasy komunikácie, projektovú prípravu, ako aj stavebné práce a v niektorých prípadoch i na prevádzku už vybudovaných inžinierskych stavieb. Georiziká existujú v každom území. Možný výskyt geohazardov sa dá identifikovať pred vývojom samotného potenciálne nebezpečného procesu a nasledujúce opatrenia na zníženie rizika môžu byť prijaté už v predstihu:

- vyhnúť sa výstavbe v ohrozených územiach;
- stavby a iné zariadenia upraviť tak, aby odolali účinkom geohazardu;
- vykonať ochranné opatrenia na zabránenie účinkov geohazardov;
- zlepšiť vlastností geologického prostredia s cieľom prevencie a zníženia účinkov potenciálne nebezpečných procesov.

V súčasnosti sa v rámci aktuálnych trendov zameriava pozornosť na tvorbu detailných máp zosuvného hazardu, kompatibilných s novými digitálnymi topografickými podkladmi (ZB GIS, ortofotomapy). Významné miesto medzi metódami hodnotenia zosuvného hazardu majú kvantitatívne metódy, medzi ktoré patria tiež štatistické metódy. Sú založené na porovnaní, následnom štatistickom spracovaní a zhodnotení vzťahov medzi relevantnými faktormi vplyvajúcimi na stabilitu svahov a reálnym výskytom svahových porúch. Štatistické metódy sa vyvíjali postupne od 70-tych rokov, najmä však v posledných dvoch desaťročiach, kedy bolo publikovaných množstvo prác prezentujúcich viaceré odlišné prístupy k riešeniu uvedenej problematiky. Vyčerpávajúci prehľad metód z tohto obdobia podávajú práce: van Westen, 1993; Carrara et al., 1991; Aleotti & Chowdhury, 1998.

Využívanie výkonnej dostupnej techniky (GIS, priestorové databázy), nevyhnutnej pri spracovaní často veľmi veľkého množstva údajov v štatistických súboroch, výrazne posunulo vývoj štatistických metód v hodnotení zosuvného hazardu, čo vyústilo do pomerne vysokej teoretickej a metodologickej úrovne ich rozpracovania v súčasnosti. Na Slovensku sa od prvých publikácií a štúdií zaoberajúcich sa hodnotením zosuvného hazardu s využitím štatistických metód (Pauditš & Bednarik, 2002; Pauditš, 2006; Bednarik, 2007; Petrydesová et al., 2012) vytvorilo niekoľko prác a máp náchylnosti na zosúvanie v rôznych mierkach (Jurko, 2003; Pauditš et al., 2006; Ondrášik et

Tab. 1. Výsledky bivariačnej analýzy: váhy parametrov vypočítané na základe metodického postupu podľa Vlčko et al. (1980).

Tab. 1. Results of bivariate analysis: weights of parameters are calculated according to Vlčko et al. (1980).

Parameter	z/m	Hj	Hj max	Ij	Pj	Vj
odtokový potenciál územia runoff potential of the territory	1,15	3,15	3,7	0,14855	3,5134	5,21931
krajinná pokrývka landcover	1,25	2,78	3,58	0,22498	2,01322	4,52936
litológia lithology	1	2,84	3,91	0,27229	1,46703	3,99454
sklon svahu slope angle	2,14	2,17	2,81	0,22599	1,62391	3,66982
dĺžka svahu slope length	2,5	2,11	2,58	0,18355	1,58841	2,91546
vzdialenosť územia od vodných tokov a erózných rýh distance from water streams and gullies	2,5	2,29	2,58	0,11095	2,12608	2,35887
ročný úhrn globálneho slnečného žiarenia na georeliefe annual global solar irradiation	2,5	2,1	2,58	0,09716	1,73267	1,68338
prispievajúca plocha contributing area	2,5	2,46	2,58	0,04809	2,12328	1,02108
geometrické formy reliéfu terrain-form units of georelief	1,67	1,99	2	0,00413	2,31748	0,09576
orientácia svahu aspect	1,88	2,99	3	0,003309	2,25989	0,06988
seizmická aktivita seismic activity	3,75	0,44	1	0,55809	0,68615	3,8293

al., 2005; Bednarik, 2007; Krumpálová, 2008; Magulová, 2009; Petrydesová, 2012 a i.).

Bednarik & Liščák (2010) vypracovali prvú prehľadnú celoslovenskú mapu zosuvného hazardu zostavenú bivariačnou štatistickou analýzou v prostredí GIS, na podkladoch v mierke 1:100 000 a 1:50 000. V podrobnej mierke (1:10 000) je rozsahom dosiaľ najkomplexnejšie mapové dielo zostavené v rámci pilotného projektu s názvom „Inžinierskogeologické mapovanie svahových deformácií v najohrozenejších územiach flyšového pásma“ (Grman et al., 2011). V rámci projektu bolo spracované územie s rozlohou 4 042 km² na 280 mapových listoch. Pri tvorbe máp zosuvného hazardu bola použitá bivariačná štatistická analýza.

Predkladaný príspevok sa zaoberá rôznymi postupmi verifikácie máp zosuvného hazardu z územia Myjavskej pahorkatiny a Bielych Karpát. V rámci prípravy a tvorby regionálnych máp geologických faktorov životného prostredia (Ondrášik et al., 2005) sa z tohto územia pripravil komplexný súbor údajov, vhodných ako podklad na overenie prezentovaného metodického postupu. Štúdiom vplyvu rôznych faktorov svahových pohybov sa zaoberali práce Marschalko & Kovář, 2003; Marschalko et al., 2008; Marschalko & Třeslín, 2009.

2. METODICKÝ POSTUP A VSTUPNÉ PARAMETRE

Štatistické prognózy výskytu zosuvov sú založené na hodnotení podobnosti súboru podmienok v postihnutých oblastiach. Vychádzajú z predpokladu, že zosuvy sa budú v budúcnosti vyskytovať v rovnakých podmienkach ako sa vyskytovali v minulosti a vyskytujú sa v súčasnosti. Z uvedeného predpokladu vyplýva postup prác od mapovania zosuvov, mapovania faktorov prírodného prostredia (parametrov), ktoré predpokladane súvisia s výskytom zosuvov, klasifikácie súboru faktorov podľa stupňa

náchylnosti územia na zosúvanie na základe štatistického vzťahu medzi jednotlivými faktormi a reálnym výskytom svahových porúch až po záverečnú syntézu a kompiláciu výslednej prognózy mapy.

Výsledné prognózne mapy rozdeľujú územie do stanoveného počtu rajónov náchylnosti na zosúvanie. Z týchto máp možno odvodiť kritické miesta, na ktorých sa dá v budúcnosti, za predpokladu výskytu príčinných udalostí, prednostne očakávať vznik svahových deformácií.

V modelovom území Myjavskej pahorkatiny je v súlade s cieľmi predkladaného príspevku aplikovaný metodický postup vybraných štatistických metód: *bivariačnej analýzy* (VanWesten, 1993; Aleotti & Chowdhury, 1998) *s váhou parametra ako celku* (Bednarik, 2007) a *multivariačnej podmienkovej analýzy* (Clerici, 2002). Na ich základe boli vytvorené prognózne mapy zosuvného hazardu, použité ako podklady pre navrhovaný metodický postup verifikácie.

Na tvorbu máp zosuvného hazardu bolo v záujmovom území Myjavskej pahorkatiny a Bielych Karpát hodnotených spolu 11 vstupných parametrov (Tab. 1): litológia, seizmická aktivita územia, sklon svahu, orientácia svahu, dĺžka svahu, geometrické formy reliéfu, prispievajúca plocha, vzdialenosť územia od vodných tokov a erózných rýh, odtokový potenciál územia, ročný úhrn globálneho slnečného žiarenia na georeliéfe a krajinná pokrývka. Z nich sme na základe štatistického zhodnotenia a porovnania s inventarizovaným výskytom svahových deformácií vybrali 5 najdôležitejších (Tab. 2). Každý vstupný parameter vstupuje do štatistickej analýzy v prostredí GIS formou rastrovej parametrickej mapy, ktorej technická príprava predpokladá precízny prístup: potrebné je brať ohľad tiež na zosúladenie všetkých vstupných parametrických máp z hľadiska geometrie gridu. V predkladanom riešení je veľkosť bunky zvolená na základe požadovanej presnosti a mierky na 10×10 m, čo v celej ploche územia (809,35 km²) predstavovalo 5304×6092 buniek.

Tab. 2. Výsledky bivariačnej analýzy: sekundárne zoradené vážené hodnoty tried vo vybraných parametroch.

Tab. 2. Results of bivariate analysis: secondary ordered weighted values of classes of the selected parameters.

Trieda Class		%	D	Recl 2	Wvalue
Odtokový potenciál územia Runoff potential of territory					
13	312-353 mm	4,22	7,73	12	72,27
12	260-312 mm	17,48	5,02	11	66,25
11	216-260 mm	21,97	4,41	10	60,22
10	180-216 mm	23,52	3,81	9	54,2
3	50-60 mm	0,92	1,76	8	48,18
4	60-72 mm	1,4	1,53	7	42,16
9	150-180 mm	9,05	1,37	6	36,13
8	124-150 mm	10,09	1,2	5	30,11
2	42-50 mm	0,24	1,1	4	24,09
7	103-124 mm	6,36	1,05	3	18,07
5	72-86 mm	2,88	1	2	12,04
6	86-103 mm	1,88	0,54	1	6,02
1	36-42 mm	0	0	0	0
Krajinná pokrývka Landcover					
11	prechodné lesokroviny woodland-shrubs	3,84	6,79	9	50,96
6	lúky pasienky pastures	4,3	4,42	8	45,29
7	mozaika poľí lúk a prírodzenej vegetácie complex cultivation patterns	26,01	4,17	7	39,63
5	ovocné sady a záhrady orchards and berry plantations	0,68	2,56	6	33,97
8	listnaté lesy broad-leaved forests	32,41	2,35	5	28,31
4	nezavlažovaná orná pôda non-irrigated arable lands	27,06	1,83	4	22,65
10	zmiešané lesy mixed forest	3,95	1,05	3	16,99
9	ihličnaté lesy coniferous forest	0,43	0,55	2	11,32
1	zastavané plochy, priemyselné a obchodné areály urban fabric, industrial or commercial units	1,31	0,43	1	5,66
12	vodné plochy a toky water courses and bodies	0	0	0	0
2	areály ťažby mineral extraction sites	0	0	0	0
3	areály športu a zariadení voľného času sport and leisure facilities	0	0	0	0
Litológia Lithology					
11	senón až paleogén, flyš s prevahou ílovitých hornín Senonian to Paleogene, flysch with claystones in prevail	45,81	4,42	15	59,92
5	kvartér, prevažne hlinito-kamenité deluviálne sedimenty Quaternary, predominantly loamy-stony slope debris	40,46	4,35	14	55,92
15	mezozoikum, pieskovce a bridlice Mesozoic, sandstones and shales	1,26	3,18	13	51,93
8	neogén, sedimenty s prevahou pieskovcov a zlepcov Neogene, sediments with predominance of sandstones and conglomerates	1,82	1,23	9	35,95
13	senón až paleogén, slieňa a slieňovce Senonian to Paleogene, marls and marlstones	4,13	1,11	8	31,96
10	senón až paleogén, prevažne pieskovce až zlepenca Senonian to Paleogene, predominantly sandstones and conglomerates	1,06	0,91	7	27,96
12	senón až paleogén, flyš s prevahou pieskovcov Senonian to Paleogene, flysch with predominance of sandstones and conglomerates	4,44	0,84	6	23,97

Trieda Class		%	D	Recl 2	Wvalue
7	kvartér, pleistocénne eolické sedimenty, spraše Quaternary, Pleistocene aeolian sediments, loess	0,33	0,63	5	19,97
6	kvartér, prevažne kamenité delúviá, sute a osypy Quaternary, predominantly stony debris, screes	0,1	0,4	4	15,98
3	kvartér holocénne proluviálne sedimenty Quaternary, holocene proluvial cones	0,05	0,31	3	11,98
2	kvartér holocénne fluvialne sedimenty vcelku Quaternary, holocene fluvial sediments (en bloc)	0,19	0,03	1	3,99
14	mezozoikum až paleogén: karbonátové sedimenty Mesozoic to Paleogene, carbonate sediments (limestones, dolomites)	0,21	0,05	1	3,99
1	kvartér, antropogénne, organické a chemogénne sedimenty Quaternary, anthropogenic, organic and chemogenic sediments	0	0	0	0
4	kvartér, pleistocénne terasy a vyššie proluviálne kužele Quaternary; Pleistocene terraces and upper proluvial cones	0	0	0	0
9	Neogén, sedimenty s prevahou ílov a slienovcov Neogene, sediments with predominance of clays and marls	0	0	0	0
Sklon svahu Slope angle					
5	13-18o	21,9	3,74	7	47,12
4	7-13o	51,8	3,58	6	54,97
3	3-7o	19,6	1,83	5	39,27
6	18-25o	4,6	1,54	4	31,41
2	1-3o	1,7	0,48	3	23,56
1	0-1o	0,3	0,05	2	15,71
7	>25o	0,1	0,14	1	7,85
Dĺžka svahu Slope length					
4	1 000 – 2 000 m	33,37	3,2	5	36,44
3	500 – 1 000 m	32,45	2,39	4	29,15
2	100 – 500 m	27,86	1,92	3	21,87
5	2 000 – 5 000 m	5,54	1,67	2	14,58
1	0 – 100 m	0,78	0,35	1	7,29
6	> 5 000 m	0	0	0	0

V prvých dvoch stĺpcoch tabuľky (Tab. 2) sú uvedené jednotlivé triedy parametrickej mapy. V treťom stĺpci je percentuálne vyjadrený podiel počtu buniek zosuvov v rámci triedy parametra k celkovému počtu buniek zosuvov v oblasti. Na základe vypočítanej intenzity výskytu zosuvov (D) v každej triede parametra bola každá vstupná mapa sekundárne reklasifikovaná. Jednotlivým triedam boli priradené nové numerické hodnoty pre každú bunku gridu (recl2), reprezentujúce poradie – stupeň náchylnosti triedy na zosúvanie v danom parametri.

2.1. Geologické pomery územia

Litológia. Priestorové rozloženie litologických typov hornín významnou mierou kontroluje vznik a výskyt svahových deformácií v záujmovom území. Hlavným faktorom pri posudzovaní stability svahov sú inžiniersko-geologické vlastnosti hornín – fyzikálne

(objemová hmotnosť, priepustnosť) a pevnostné – vyjadrené súdržnosťou a uhlom vnútorného trenia.

V modelovom území bola mapa litologických celkov odvodená primárne z účelovej geologickej mapy Myjavskej pahorkatiny a Bielych Karpát v mierke 1:50 000 (Potfaj, 2005). Z pôvodných 59 litologických jednotiek bolo po konzultácii so zostavovateľom mapy vyčlenených 15 tried na základe podobnosti inžiniersko-geologických vlastností hornín a ich plošného rozšírenia.

Najväčšie plošné rozšírenie v záujmovej oblasti majú senónske až paleogénne flyšové sedimenty so zastúpením pieskovcov a ílovitých sedimentov v pomere 1:1 spolu s nadložnými hlinito-kamenitými delúviami (spolu takmer 45 % rozlohy územia). V masíve Bielych Karpát sú výrazne zastúpené tiež flyšové útvary s prevahou pieskovcov. Karbonátové sedimenty mezozoika prevládajú na území Čachtických a Brezovských Karpát (JZ časť územia) ako aj v bradlovom pásme (spolu tvoria 10,5 % rozlohy).

Pozdĺž vodných tokov, väčšinou pravostranných prítokov Váhu, sa vyskytujú hlinito-štrkovité aluviálne sedimenty na 14,3 % rozlohy územia.

2.2. Geomorfologické pomery a parametre georeliéfu

Morfometrické parametre georeliéfu boli odvodené z digitálneho modelu (DMR), vytvoreného z výškopisných podkladov SVM 50.

Sklon svahov. Všeobecne za najdôležitejší geomorfologický faktor považujeme veľkosť sklonu svahov, ktorá ovplyvňuje významnou mierou stabilitu svahu. Každý svah má svoju kritickú hodnotu veľkosti sklonu, po prekročení ktorej už nie je stabilný a dochádza k zosúvaniu. Hodnota kritického sklonu svahu je ovplyvnená najmä množinou vlastností horninového prostredia podmienujúcich veľkosť aktívnych síl, resp. pomer aktívnych a pasívnych síl pôsobiach na svahu. V digitálnej forme predstavuje grid sklonu svahov maticu hodnôt veľkostí gradientov poľa nadmorských výšok v stupňoch. V predkladanom príspevku boli tieto hodnoty reklasifikované do 7 tried (Tab. 2) v zmysle metodiky LANDEP (Miklós & Izakovičová, 1997). Z tabuľky vyplýva, že v záujmovom území vysoko prevládajú sklony svahov v intervale 7–13°, tieto sú budované prevažne flyšovými horninami s prevahou ílovcov, a sklony 13–18°, v oblastiach budovaných flyšovými sedimentmi s prevahou pieskocov a karbonátových hornín.

Dĺžka svahu patrí medzi tzv. *chorické parametre georeliéfu* (Krcho, 1990). Keďže do určitej miery podmieňuje dynamiku povrchového toku vody na svahoch, používa sa najmä pri modelovaní vodnej plošnej a výmolevej erózie. Celková dĺžka svahu je daná dĺžkou spádovej krivky (trajektórie) od chrbtice po bod na reliéfe, reprezentovaný aktuálnou bunkou rastra, ku ktorej sa numerický údaj vzťahuje. Reklasifikácia výsledných hodnôt dĺžok svahov do tried vyplýva z tab. 2.

2.3. Hydrologické a klimatické pomery územia

Hydrologickou „osou“ územia je tok Váhu, ktorý spolu s mnohými pravostrannými prítokmi tvorí pomerne hustú hydrografickú sieť tokov, drénujúcich územie Myjavskej pahorkatiny a Bielych Karpát. Najväčšie z nich sú prítoky Klanečnica, Bošáčka, Drietomica a Blava. Západná časť územia je odvodňovaná najmä riekou Myjava a jej lavostrannými prítokmi do povodia Moravy.

Odtokový potenciál územia. Aj keď faktor zrážok patrí skôr medzi priame príčiny vzniku zosuvov (intenzívne zrážky s následným zvýšením hladiny podzemnej vody a vodnej erózie sú častým spúšťacím mechanizmom), možno všeobecné zákonitosti distribúcie úhrnov zrážok v hodnotenom území analyzovať tiež z hľadiska priestorového rozloženia podmienok vzniku zosuvov. Mapa odtokového potenciálu bola vytvorená na základe 3D modelu dlhodobého priemerného ročného úhrnu zrážok (Hofierka et al., 2002) a hodnoty potenciálneho výparu v záujmovom území. Výsledný model bol reklasifikovaný do 13 tried (Tab. 2).

2.4. Súčasná krajinná štruktúra

Parameter vyjadruje stav súčasnej krajinnnej pokrývky a aktuálne využitie územia, vrátane charakteru vegetačného porastu.

Vegetačná pokrývka vplyva na stabilitu svahov najmä zadržaním (retenciou) zrážok, rozdielnou schopnosťou výparu (evapotranspirácie) a tiež rozložením a hĺbkovým dosahom svojho koreňového systému. V nemalej miere vplyva stav vegetačného porastu aj na odolnosť územia voči vodnej erózii pôdy, ktorá tiež čiastočne ovplyvňuje stabilitu svahu. Problematika vplyvu vegetácie na stabilitu svahu je podrobne zhrnutá v práci Greenwaya (1987). Parametrická mapa prezentuje 12 reklasifikovaných tried uvedených v tab. 2.

2.5. Interpretácia svahových deformácií

Mapa zosuvov predstavuje v štatistickej analýze zosuvného hazardu dôležitú vstupnú premennú, s ktorou sa porovnávajú všetky ostatné parametrické mapy. Je reprezentovaná ako dichotomická premenná formou binárneho gridu (0/1).

V predkladanom príspevku bola zvolená interpretácia zosuvov formou línií reprezentujúcich predĺžené hlavné odlučné hrany. Tieto interpretujú náchylnú oblasť lepšie ako celé plochy telies zosuvov vrátane akumuláčnej časti (Bednarik & Pauditš, 2010).

3. PRINCÍPY POUŽITÝCH ŠTATISTICKÝCH METÓD A VÝSLEDKY

3.1. Bivariačná analýza s využitím váh vstupných premenných

V prípade bivariačnej analýzy sa porovnáva každá parametrická mapa s mapou zosuvov osobitne. Ide teda o porovnanie vždy dvoch vstupných parametrov, z ktorých jeden (mapa zosuvov) predstavuje dichotomickú premennú, reprezentovanú v mape hodnotami 0/1. Nezávislé premenné predstavujú triedy parametrických máp.

Keďže mapa zosuvov býva v rastrovej forme vyjadrená formou sekvencií buniek rastra reprezentujúcich líniu odlučnej hrany zosuvu, rozhodujúci bol počet buniek odlučných hrán v každej triede parametra. Na základe tohto počtu je možné stanoviť pre jednotlivé triedy intenzitu výskytu zosuvov, ktorá vyjadruje počet buniek v území so zosuvmi v každej triede parametra v pomere k celkovému počtu buniek v triede parametra (početnosť zosuvných udalostí v danej triede parametra). Hodnoty intenzity výskytu zosuvov tvoria hlavný vstup pri stanovení váh premenných, ako aj pri tzv. druhotnej reklasifikácii vstupných parametrických máp.

Výsledkom bivariačnej analýzy je finálna mapa náchylnosti územia na zosúvanie (Obr. 3), ktorá vznikne váženým súčtom všetkých druhotne reklasifikovaných parametrických máp (rovnica 2):

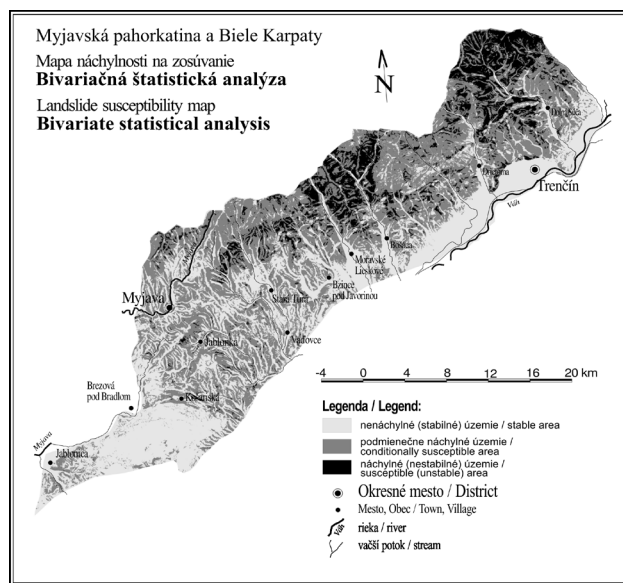
$$y = \sum_{i=1}^n \frac{z}{m} * C * V_j \quad (2)$$

kde:

y – hodnota vo finálnej mape;

i – číslo príslušnej parametrickej mapy (1,2,... n);

z – počet tried v parametrickej mape s najvyšším počtom kategórií;



Obr. 3. Mapa náchylnosti územia na zosúvanie zostavená na základe bivariačnej štatistickej analýzy.

Fig. 3. Landslide susceptibility map using bivariate statistical analysis.

m – počet tried v príslušnej parametrickej mape;
 C – hodnota triedy v druhej reklasifikovanej parametrickej mape;
 V_j – váha príslušného vstupného parametra.

Výsledok predstavuje spojitý interval hodnôt ohraničený súčtom najnižších a najvyšších hodnôt v každej parametrickej mape v celom záujmovom území. Uvedený interval hodnôt je potrebné na záver rozdeliť do stanoveného počtu tried náchylnosti. Pred samotným záverečným súčtom je nevyhnutné určiť váhu každého zo vstupných parametrov. Váha každej vstupnej premennej udáva jej informačnú hodnotu v analýze zosuvného hazardu: čím vyššia je váha premennej, tým je relevantnejšie jej použitie v analýze. V predkladanom príspevku je váha parametra stanovená na základe miery entropie systému, ktorého zložky tvoria hodnoty intenzít výskytu zosuvov v jednotlivých triedach parametrickej mapy (Vlčko et al., 1980). Váha (V_j) sa stanoví na základe súčinu informačného koeficientu (I_j) s priemernou hodnotou pravdepodobnosti (p_j). Tento spôsob je veľmi vhodný pre metodický postup v prostredí rastrových GIS.

Z tabuliek 1 a 2 je zrejmé, že najvyššie hodnoty intenzít výskytu zosuvov dosahujú zosuvne náchylné triedy tých parametrov, ktoré majú najvyššiu váhu, t. j. mapa odtokového potenciálu, krajinná pokrývka, litologických jednotiek a sklonu svahov.

Pomer z/m vyrovnáva počet tried jednotlivých vstupných parametrov vzhľadom na parameter s najvyšším počtom tried a je uvedený v treťom stĺpci tab. 1. Ak by tento počet nebol vyrovnaný, malo by to vplyv na implementáciu váh parametrov (váhy by boli podhodnotené) a výsledok súčtu by bol skreslený. Nasledujúce stĺpce tab. 1 uvádzajú postupne pre každý parameter vypočítané hodnoty entropií (H_j), maximálnych entropií (H_{jmax}), informačných koeficientov (I_j), priemerných hodnôt intenzít výskytu v jednotlivých triedach daného parametra (p_j)

a hodnôt samotných vypočítaných váh (V_j) v zmysle publikácie Vlčko et al. (1980).

Posledný stĺpec v tab. 2 uvádza váženú hodnotu (W_{value}), získanú ako súčin numerickej hodnoty po sekundárnej reklasifikácii, koeficientu z/m a váhy parametra (V_j). Výsledkom záverečného súčtu vážených hodnôt (rovnica 2) je spojitý interval hodnôt od 55,74 do 349,74, ktoré pokrývajú všetky bunky rastra v celej ploche záujmového územia. Získaný interval hodnôt bol rozdelený do piatich rájónov náchylnosti územia na zosúvanie na základe prirodzených hraníc (natural breaks), rozdeľujúcich záverečný súčet do rovnakých tried porovnaním súčtu rozdielov stvorcov na základe mediánu triedy.

3.2. Multivariačná podmienková analýza

Multivariačná analýza v širšom slova zmysle je založená na porovnaní všetkých vstupných parametrov súčasne ako nezávislých premenných s mapou zosuvov (dichotomickou premennou), z ktorej sa neberie do úvahy iba hodnota 1 (TRUE – prítomnosť zosuvu), ale aj hodnota 0 (FALSE – absencia zosuvu), ktorá má rovnako dôležitú výpovednú hodnotu.

V prípade podmienkovej analýzy získame vzájomnou kombináciou všetkých vstupných parametrov rozsiahlu tabuľku, obsahujúcu všetky kombinácie kategórií vo všetkých vstupných parametrických mapách, ktoré sú vo vzájomnej superpozícii. Kombinácie všetkých kategórií v parametrických mapách tvoria vo výslednej mape nové areálové prvky, predstavujúce kvázi-homogénne celky (unique conditional units – UCU).

Pred vstupom do multivariačnej analýzy nie je potrebná žiadna druhotná reklasifikácia ani žiadne váženie parametra. Podobne ako v prípade bivariačnej analýzy sa výsledné kombinácie, v ktorých sa nachádzajú zosuvy (hodnota 1 v mape zosuvov) opätovne zoradia na základe vypočítanej intenzity výskytu – pomeru počtu buniek UCU so zosuvmi k celkovej ploche UCU.

Výsledok po zoradení udáva v prvých riadkoch tabuľky také kombinácie kategórií zo vstupných parametrických máp, ktoré sú z hľadiska náchylnosti na zosúvanie najnebezpečnejšie. Naopak, v posledných riadkoch sa nachádzajú kombinácie, ktoré obsahujú veľmi malý počet buniek odlučných hrán zosuvov (hodnota 1). Tieto kombinácie môžu byť spôsobené tiež systematickými chybami a nedodržaním postupu počas prípravy parametrických máp. Hranica maximálneho počtu buniek, ktoré môžu ešte byť zapríčinené prípadnou chybou prípravy údajov sa musí určiť individuálne pre každý projekt, na základe posúdenia kvality a zdroja vstupných údajov.

Všetky zoradené UCU sme vo fáze záverečnej kategorizácie a tvorby prognózy mapy (Obr. 4) rozdelili do troch tried na základe stanovených pravidiel vychádzajúcich z princípu určenia priemernej hodnoty intenzity výskytu zosuvov v záujmovom území a hodnoty stredného intervalu rozdelenia (Clerici, 2002; Jurko, 2003).

V predkladanom príspevku bolo na základe určenia hustôt a váh vstupných parametrov pre podmienkovú analýzu vybraných 5 vstupných parametrov. Uvedené sú v nasledujúcom poradí: (1) potenciálny odtok, (2) krajinná pokrývka, (3) litológia, (4) sklon svahu a (5) dĺžka svahu.

V rámci uvedených parametrov sa v záujmovom území

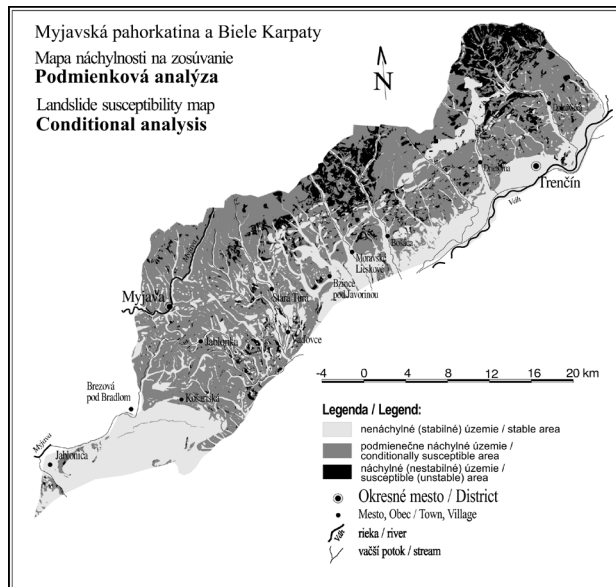
vyčlenilo spolu 10 344 UCU. Z nich 889 UCU obsahovalo kombináciu so zosuvmi, vo zvyšných 9 455 kombináciách sa zosuvy nevyskytujú. Celková rozloha územia tvorená kombináciami so zosuvmi je 337,7 km² (41,7 %). Zvyšných 58,3 % územia je tvorených UCU bez doterajšieho výskytu zosuvov. Pôvodná rozloha zosuvmi postihnutej oblasti v záujmovom území bola 28,82 km² (cca 3,6 % rozlohy územia).

Výsledná tabuľka (Tab. 3) obsahuje ukážku 20 vybraných záznamov – z hľadiska zosuvného hazardu významnejších UCU – zoradených podľa intenzity výskytu zosuvov v rámci UCU. V prvom stĺpci tabuľky je kombinácia hodnôt pôvodných tried parametrických máp v rámci UCU, vzájomne oddelených bodkami vo vyššie uvedenom poradí (vyplýva tiež z tab. 2). Druhý stĺpec tabuľky obsahuje počet buniek v danej UCU (N_{pix}), tretí stĺpec udáva počet buniek UCU so zosuvmi $N_{pix}(MSUE)$. Vo štvrtom stĺpci je uvedená intenzita výskytu zosuvov (D) v každej UCU, vypočítaná na základe podielu počtu buniek UCU so zosuvmi a celkového počtu buniek vyjadrená v promile. Piaty stĺpec (susc.5) udáva stupeň náchylnosti UCU na zosúvanie v päťstupňovej škále (Clerici, 2002) a v šiestom stĺpci (susc.3) je záverečná hodnota náchylnosti v trojstupňovej škále tak, ako je prezentovaná formou rajónov vo výslednej mape (Obr. 4).

Tab. 3. Výsledky multivariačnej podmienkovej analýzy podľa metodického postupu Clerici (2002).

Tab. 3. Results of multivariate conditional analysis according to Clerici (2002).

UCU	N_{pix}	$N_{pix}(MSUE)$	D	susc.5	susc.3
13.10.5.4.2	388	48	123.71	5	3
10.5.11.4.4	105	11	104.76	5	3
12.9.5.4.2	105	10	95.24	5	3
10.11.11.4.5	215	20	93.02	5	3
9.7.15.4.2	1 964	17	aug-65	4	2
11.4.11.4.4	6 628	57	8-jún	4	2
12.10.11.4.5	1 049	9	aug-58	4	2
12.7.5.4.4	3 989	34	aug-52	4	2
10.8.11.6.3	2 771	18	6-máj	3	2
9.11.14.4.3	770	5	jún-49	3	2
8.6.11.3.2	626	4	jún-39	3	2
11.8.5.5.2	6 585	42	jún-38	3	2
11.10.11.4.4	3 690	16	apr-34	2	2
12.10.12.6.4	3 236	14	apr-33	2	2
8.10.5.4.2	3 013	13	apr-31	2	2
4.4.5.4.2	7 187	31	apr-31	2	2
3.4.2.3.3	251	0	0	1	1
3.4.2.3.4	482	0	0	1	1
3.4.2.3.5	183	0	0	1	1
3.4.2.4.2	768	0	0	1	1



Obr. 4. Mapa náchylnosti územia na zosúvanie zostavená na základe multivariačnej podmienkovej štatistickej analýzy.

Fig. 4. Landslide susceptibility map using multivariate conditional statistical analysis.

4. VERIFIKÁCIA PROGNÓZNYCH MÁP

Po zostavení prognózneho mapy je nevyhnutné vyhodnotiť jej výpovednú hodnotu – teda mapu verifikovať. V 80-tych rokoch, v čase, keď vznikali prvé mapy náchylnosti územia na zosúvanie pomocou mapovej algebry implementovanej do GIS prostredia, boli tieto verifikované vizuálnym porovnaním prognózneho mapy s mapou registrovaných svahových deformácií (Brabb, 1984).

Najdôležitejším kritériom pre hodnotenie kvality prognózneho mapy je zostavenie modelu úspešnosti, ktorý posudzuje vzťah medzi prognózou a mapou registrácie svahových deformácií. Model úspešnosti vo všeobecnosti porovnáva hustotu zosuvov v mape registrácie svahových deformácií (prítomnosť resp. absencia svahovej deformácie, binárny grid 1/0) s rôznymi stupňami náchylnosti v prognózneho mapy náchylnosti na zosúvanie, resp. v mape zosuvného hazardu.

V literatúre možno nájsť viaceré techniky verifikácie prognózneho map (Bednarik & Liščák, 2010; Constantin et al., 2010; Frattini et al., 2010). Overené sú postupy pomocou metód štatistickej úspešnosti a ROC kriviek (Receiver Operating Characteristic curves).

4.1. Metódy štatistickej úspešnosti

Základom pri hodnotení úspešnosti je kontingenčná (vzťahová) tabuľka, ktorá porovnáva registrované a prognózované zosuvy, a to kombináciou správnych a nesprávnych pozitívnych a negatívnych zatriedení zosuvov náhodným výberom rovnakého počtu buniek z oboch rastrov. Pozitívne zatriedenie predstavujú nestabilné oblasti a negatívne zatriedenie predstavujú stabilné oblasti. Pri konštrukcii kontingenčnej tabuľky je nevyhnutné zadefinovať kritickú hodnotu – hranicu rozhodovania, mieru pravdepodobnosti

Tab. 4. Kontingenčná tabuľka pre hodnotenie úspešnosti modelu (Frattini et al., 2010)

Tab. 4. Contingency table used for landslide model evaluation (Frattini et al., 2010)

Registrované Registered	Prognózané Predicted		Celkom Total
	Negatívne stabilné $-_0$ Negative stable	Pozitívne nestabilné $+_1$ Positive unstable	
Negatívne stabilné $-_0$ Negative stable	(-/-) stabilné/stabilné, true negative, tn	(+/-) nestabilné/stabilné, false positive, fp	N
Pozitívne nestabilné $+_1$ Positive unstable	(-/+) stabilné/nestabilné, false negative, fn	(+/+) nestabilné/nestabilné, true positive, tp	P
Celkom Total	N_p	P_p	T

(cut-off value, decision level), ktorá rozdeľuje oblasti na stabilné a nestabilné. Potom sa zatriedenie získané z prognózných máp porovná so správnym, získaným z máp registrácie svahových deformácií podľa kontingenčnej tabuľky (Tab. 4).

Kontingenčná tabuľka analyzuje vzťah medzi dvoma alebo viacerými kategorickými premennými. Prvýkrát bola použitá Karolom Pearsonom v roku 1904. Kontingenčná tabuľka má toľko riadkov a stĺpcov, koľko je kategórií v prognóze. V našom prípade ide o dichotomickú premennú (dve kategórie – present/absence pre registrované zosuvy a stable/unstable v prognózne mape).

V súvislosti s verifikáciou prognózných máp možno použiť viaceré metódy štatistickej úspešnosti. Práce s touto tematikou nie sú veľmi frekventované, azda najkomplexnejšie sa v poslednej dobe uvedenou problematikou zaoberali Frattini et al. (2010), ktorí opisujú vo svojej práci najčastejšie používané metódy štatistickej úspešnosti (použité symboly v rovnicach zodpovedajú symbolom v kontingenčnej tab. 4):

Efektívnosť (Úspešnosť alebo Percentuálna správnosť, Efficiency – E, Accuracy or Percent correct) percentuálne hodnotí výskyt registrovaných zosuvov, ktoré sú korektne predpovedané v prognóznom modeli, podľa rovnice 3. Výsledok je značne ovplyvnený hustotou najväčšej triedy, väčšinou stabilných území.

$$E = \frac{tp + tn}{T} \quad (3)$$

Pravdivá pozitívna (TP, true positive rate) a nepravdivá pozitívna hodnota (FP, false positive rate) nie sú samostatné štatistické metódy na overenie úspešnosti modelu, pretože neberú do úvahy false positive (fp) a false negative (fn) hodnoty, ale sú nevyhnutné napr. pre konštrukciu ROC kriviek. Počítajú sa podľa nasledujúcich rovníc (4 a 5):

$$TP = \frac{tp}{tp + fn} = \frac{tp}{P} \quad (4)$$

$$FP = \frac{fp}{fp + tn} = \frac{fp}{N} \quad (5)$$

Kritický index úspešnosti (Threat score, Critical Success Index – CSI) hodnotí podiel registrovaných zosuvov a/alebo prognózané zosuvy, ktoré boli korektne predpovedané (rovnica 6).

$$CSI = \frac{tp}{tp + fn + fp} \quad (6)$$

Nezávislý kritický index (Equitable threat score, Gilbert skill score – GSC) hodnotí podiel registrovaných zosuvov a/alebo prognózané zosuvy, ktoré boli korektne predpovedané, modifikovaný pre územie nestabilné/nestabilné, náhodne vybraných pixelov – t_{random} (rovnica 7).

$$GSC = \frac{tp - t_{random}}{tp + fn + fp - t_{random}}, \text{ kde } t_{random} = \frac{(tp + fn)(tp + fp)}{T} \quad (7)$$

Pierceov kvalifikovaný odhad (Pierce's skill score – PSC, True skill statistic) pracuje so všetkými údajmi z kontingenčnej tabuľky, pričom zanedbáva opakovateľnosť výskytu jednotlivých zosuvných udalostí (rovnica 8).

$$PSC = \frac{tp}{tp + fn} - \frac{fp}{fp + tn} = TP - FP \quad (8)$$

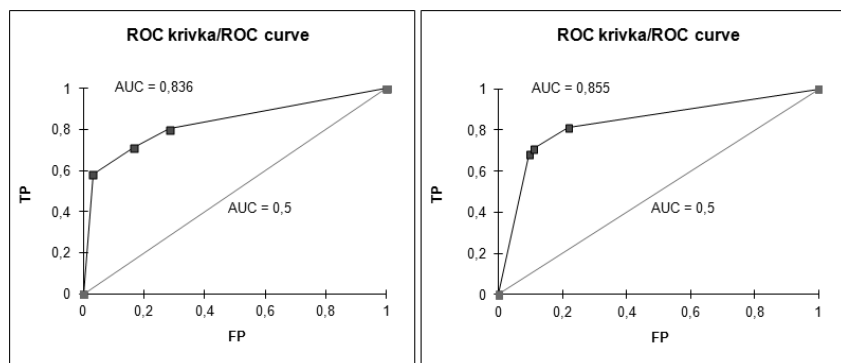
Heidkeho kvalifikovaný odhad (Heidke skill score – HSC, Cohen's kappa) hodnotí podiel korektných zatriedení (rovnica 9).

$$HSC = \frac{tp + tn - E}{T - E}, \text{ kde } E = \frac{1}{T} [(tp + fn)(tp + fp)(tn + fn)(tn + fp)] \quad (9)$$

Koeficient úspešnosti (Odds ratio – OR) hodnotí podiel medzi úspešnosťou pravdivej predpovede k nepravdivej prognóze (rovnica 10). *Odds ratio* znamená teda *podiel šancí*, pravdepodobnosť výskytu javu voči jeho **nevýskytu**. Táto štatistická metóda je založená na pravdepodobnosti výskytu zosuvnej udalosti, ale nemôže byť aplikovaná v prípade, ak niektorá z buniek kontingenčnej tabuľky je nulová.

$$OR = \frac{tp \cdot tn}{fn \cdot fp} \quad (10)$$

Kvalifikovaný koeficient úspešnosti (Odds ratio skill score – ORSS, Yule's Q) podobne ako koeficient úspešnosti hodnotí podiel medzi úspešnosťou pravdivej predpovede k nepravdivej prognóze, ale nadobúda hodnoty medzi -1 a 1 (rovnica 11).



Obr. 5. ROC krivky, vľavo: pre bivariačný model vpravo: pre multivariačný model.

Fig. 5. ROC curves, left: bivariate model right: multivariate model.

$$ORSS = \frac{tp \cdot tn - fp \cdot fn}{tp \cdot tn + fp \cdot fn} \quad (11)$$

4.2. ROC krivky

Správnosť, presnosť alebo precíznosť modelu je najčastejšie hodnotená pomocou ROC kriviek (ROC – Receiver Operating Characteristic). ROC analýza bola vyvinutá počas druhej svetovej vojny na hodnotenie účinnosti radarových prijímačov na detekciu cieľov. Veľkosť plochy pod krivkou (AUC – Area

Under Curve) určuje celkovú kvalitu prognózneho modelu; čím je plocha väčšia tým je model úspešnejší. Maximálna plocha grafu je 1 (ideálny model), plocha pre model s úspešnosťou 50 % má AUC = 0,5 (trivial model). To znamená, že čím je veľkosť plochy bližšia k hodnote 1, tým je model presnejší.

ROC krivka je konštruovaná pomocou kontingenčných tabuliek, počet tabuliek zodpovedá počtu hraničných hodnôt (cutoff values, threshold values, v tomto prípade 3). Následne sa pomocou rovníc 4 a 5 vypočíta pre každú kontingenčnú tabuľku pravdivá a nepravdivá pozitívna hodnota (FP a TP), teda tri číselné hodnoty definujú priebeh krivky (Obr. 5).

Tab. 5. Kontingenčné tabuľky na verifikáciu prognózneho modelu zostavenej pomocou bivariačnej štatistickej analýzy (hraničné hodnoty 0,4; 0,6 a 0,8).
Tab. 5. Contingency tables used for evaluation of bivariate statistical landslide hazard model (cutoff values 0,4; 0,6 and 0,8).

cutoff value, threshold 0,4			
Registrované Registered	Prognózané Predicted		Celkom Total
	Negatívne stabilné _ _ 0 Negative stable	Pozitívne nestabilné _ + 1 Positive unstable	
Negatívne stabilné _ _ 0 Negative stable	81392	2579	83971
Pozitívne nestabilné _ + 1 Positive unstable	203612	282425	486037
Celkom Total	285004	285004	570008

cutoff value, threshold 0,6			
Registrované Registered	Prognózané Predicted		Celkom Total
	Negatívne stabilné _ _ 0 Negative stable	Pozitívne nestabilné _ + 1 Positive unstable	
Negatívne stabilné _ _ 0 Negative stable	154656	30620	185276
Pozitívne nestabilné _ + 1 Positive unstable	130348	254384	384732
Celkom Total	285004	285004	570008

cutoff value, threshold 0,8			
Registrované Registered	Prognózané Predicted		Celkom Total
	Negatívne stabilné _ _ 0 Negative stable	Pozitívne nestabilné _ + 1 Positive unstable	
Negatívne stabilné _ _ 0 Negative stable	238258	94724	332982
Pozitívne nestabilné _ + 1 Positive unstable	46746	190280	237026
Celkom Total	285004	285004	570008

Tab. 6. Kontingenčné tabuľky na verifikáciu prognózne mapy zostavenej pomocou podmienkovej multivariačnej štatistickej analýzy (hraničné hodnoty 0,4; 0,6 a 0,8).

Tab. 6. Contingency tables used for evaluation of conditional multivariate statistical landslide hazard model (cutoff values 0,4; 0,6 and 0,8).

cutoff value, treshold 0,4			
Registrované Registered	Prognózované Predicted		Celkom Total
	Negatívne stabilné $-_0$ Negative stable	Pozitívne nestabilné $+_1$ Positive unstable	
Negatívne stabilné $-_0$ Negative stable	160919	17086	178005
Pozitívne nestabilné $+_1$ Positive unstable	124111	267944	392055
Celkom Total	285030	285030	570060

cutoff value, treshold 0,6			
Registrované Registered	Prognózované Predicted		Celkom Total
	Negatívne stabilné $-_0$ Negative stable	Pozitívne nestabilné $+_1$ Positive unstable	
Negatívne stabilné $-_0$ Negative stable	176196	21225	197421
Pozitívne nestabilné $+_1$ Positive unstable	108834	263805	372639
Celkom Total	285030	285030	570060

cutoff value, treshold 0,8			
Registrované Registered	Prognózované Predicted		Celkom Total
	Negatívne stabilné $-_0$ Negative stable	Pozitívne nestabilné $+_1$ Positive unstable	
Negatívne stabilné $-_0$ Negative stable	233956	64818	298774
Pozitívne nestabilné $+_1$ Positive unstable	51074	220212	271286
Celkom Total	285030	285030	570060

5. VÝSLEDKY VERIFIKÁCIE PROGNOZNYCH MÁP A DISKUSIA

Kontingenčné tabuľky (Tab. 5 a 6) veľkosti 2×2 boli vytvorené pre dve kategórie – present/absence pre registrované zosuvy a stable/unstable územia v prognózne mapy. Hraničné hodnoty boli zvolené na úrovni miery pravdepodobnosti 0,4; 0,6 a 0,8 (cutoff value, treshold). Tab. 5 predstavuje tri kontingenčné tabuľky na verifikáciu prognózne mapy zostavenej bivariačnou štatistickou analýzou a tab. 6 na verifikáciu prognózne mapy zostavenej pomocou podmienkovej multivariačnej analýzy. Hodnotených bolo 285 004 náhodne vybraných pixelov z rastra registrovaných zosuvov a rovnakých pixelov z rastra prognózy zosuvného hazardu zostavenej pomocou bivariačnej štatistickej analýzy, v prípade multivariačnej podmienkovej analýzy to bolo 285 030 pixelov.

Podľa kontingenčných tabuliek bola následne vypočítaná štatistická úspešnosť pre bivariačný a multivariačný model územia. Výsledky (Tab. 7) ilustrujú, že podľa väčšiny z metód štatistickej úspešnosti obe prognózne mapy zodpovedajú kvalitne zostaveným štatistickým modelom. Najnižšie hodnoty úspešnosti boli vypočítané pomocou Gilbertovho nezávislého kritického indexu, pri všetkých hraničných hodnotách a podľa Heidkeho kvalifikovaného odhadu pre hraničnú hodnotu

0,4. Toto však nemusíme považovať za neúspech, vzhľadom na obmedzenia vyplývajúce z definícií oboch výpočtov. Naopak vysokú mieru úspešnosti oboch modelov dokladujú hodnoty efektívnosti a kvalifikovaný koeficient úspešnosti. Pre hraničnú hodnotu 0,8 je miera úspešnosti 75 % resp. 82 % pri bivariačnej štatistickej analýze a 80 %, resp. 88 % pri použití podmienkovej multivariačnej analýzy. Z tohto porovnania vyplýva, že rozdiel úspešnosti medzi týmito dvoma prístupmi má hodnotu približne 5 % v prospech multivariačnej štatistickej analýzy.

Na konštrukciu ROC krivky (Obr. 5) boli použité rovnaké kontingenčné tabuľky, pre hraničné hodnoty 0,4; 0,6 a 0,8. Krivka je v tomto prípade definovaná tromi bodmi, na základe vypočítaných hodnôt FP a TP uvedených v tab. 7. Veľkosť plochy pod krivkou (AUC area under curve) má pre bivariačný model hodnotu 0,836 (83,6 %), čo spolu so strmou krivkou preukazuje úspešnosť prognózneho modelu zostaveného na základe bivariačnej štatistickej analýzy. Rovnako tak aj pre prognóznú mapu zostavenú pomocou podmienkovej multivariačnej analýzy úspešnosť dosahuje 85,5 %. Rozdiel medzi použitými štatistickými metódami predstavuje necelé dve percentá. Vysoká miera úspešnosti preukazuje vhodnosť výberu zvoleného metodického postupu na zostavenie prognózných máp. Veľkosť plochy pod krivkou bola vypočítaná pomocou softvéru MicroOpis 1.0 (Kovář & Kovářová, 2011).

Tab. 7. Výsledky štatistickej úspešnosti prognózných modelov bivariačný/multivariačný.

Tab. 7. Results of accuracy statistics for bivariate vs. multivariate model.

Metóda Method	hraničná hodnota threshold 0,4	hraničná hodnota threshold 0,6	hraničná hodnota threshold 0,8
Efektívnosť Efficiency	0,64/0,75	0,72/0,77	0,75/0,8
Pravdivá pozitívna hodnota true positive rate	0,58/0,68	0,66/0,71	0,8/0,81
Nepravdivá pozitívna hodnota false positive rate	0,03/0,09	0,17/0,11	0,28/0,22
Kritický index úspešnosti Critical Success Index	0,58/0,65	0,61/0,67	0,57/0,66
Nezávislý kritický index Gilbert skill score	0,16/0,34	0,28/0,37	0,34/0,42
Pierceov kvalifikovaný odhad Pierce's skill score	0,55/0,59	0,5/0,6	0,52/0,59
Heidkeho kvalifikovaný odhad Heidke skill score	0,28/0,51	0,44/0,54	0,5/0,59
Koeficient úspešnosti Odds ratio	43,77/20,33	9,86/20,12	10,24/15,56
Kvalifikovaný koeficient úspešnosti Yule's Q	0,96/0,91	0,82/0,91	0,82/0,88

Viacero autorov v rámci verifikácie prognózných máp používa najjednoduchší spôsob a to mapové resp. rastrové prekrytie mapy registrovaných svahových deformácií s prognóznou mapou (Bednarik, 2001, 2007; Nandi & Shakoor, 2009; Constantin et al., 2010). Na obr. 6 je znázornené percentuálne zastúpenie registrovaných zosuvov v jednotlivých stupňoch zosuvného hazardu pre bivariačný model ako aj pre multivariačný model. Z obrázku vyplýva, že úspešnosť bivariačného modelu je pre 4. a 5. stupeň hazardu

(t. j. vysoký a veľmi vysoký stupeň zosuvného hazardu) 89,25 %; tento výsledok je blízky aj hodnote AUC 83,6 %. Multivariačný model má podľa tohto porovnania úspešnosť 92,55 %. Rozdiel medzi použitými postupmi predstavuje len 3,3 %, čo aj v tomto prípade vypovedá o dobre zostavených modeloch prognózných máp.

6. ZÁVER

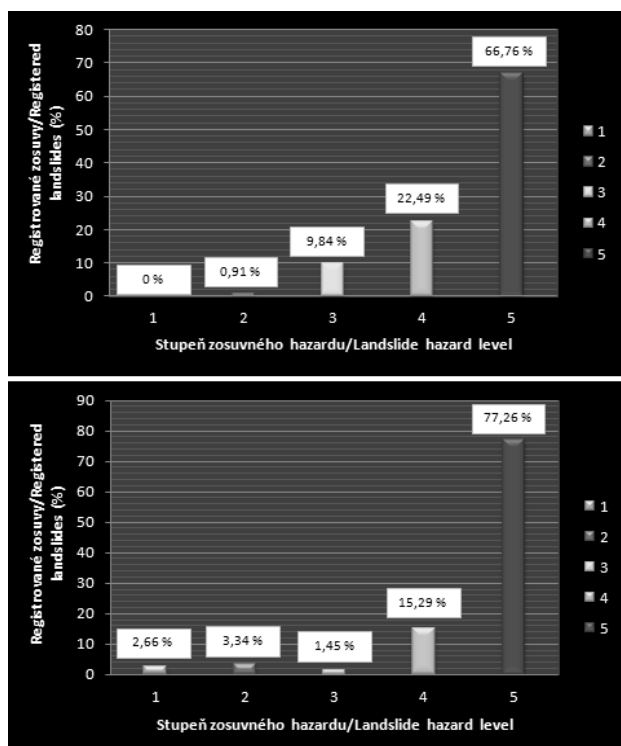
Napriek konštatovaniu, že prezentované metódy sú koncepčne jednoduché, ich aplikácia je pomerne komplikovaná a vyžaduje bohaté praktické skúsenosti, najmä s využitím výpočtovej techniky a geoinformačných systémov. Prezentované metódy sú oproti dosiaľ používaným empirickým postupom exaktnejšie a celkovo menej zaťažujú subjektívnym prístupom.

Uplatnenie predkladanej metodiky a techniky v hodnotení zosuvného hazardu v bežnej praxi má po ich zdokonalení pomerne dobrú perspektívu, najmä v súvislosti so zavádzaním geoinformačných technológií do odbornej praxe vďaka v súčasnosti prebiehajúcim legislatívnym zmenám.

Výsledky verifikácie bivariačného a multivariačného modelu zostaveného pre modelované zosuvné územie na základe metód štatistickej úspešnosti, ROC kriviek a rastrovým prekryvaním poukazujú na dobrú „vyladenosť“ oboch modelov. Konkrétnejšie možno konštatovať, že boli splnené nasledujúce kvalitatívne podmienky:

- ▶ vhodný výber územia pre štatistické spracovanie;
- ▶ vhodný výber faktorov vplyvujúcich na svahovú stabilitu;
- ▶ správne polohové spracovanie parametrických máp vo vektorovej a následne rastrovej forme;
- ▶ vhodné zvolené postupy pri reklasifikácii parametrických máp;
- ▶ vhodný spôsob určenia váh jednotlivých faktorov;
- ▶ vhodné zvolené rozdelenie intervalu zosuvného hazardu do 5 tried na základe prirodzených hraníc (natural breaks).

Na základe porovnania bivariačného a multivariačného štatistického modelu možno rovnako konštatovať, že obe metódy sú rovnocenne použiteľné. Bivariačný štatistický model je náročnejší z hľadiska časových nárokov oproti multivariačnému,



Obr. 6. Percentuálne zastúpenie registrovaných zosuvov v rôznych stupňoch prognózného zosuvného hazardu, hore: pre bivariačný model, dole: multivariačný model.

Fig. 6. Percentage of registered landslides in various landslide hazard levels, above: bivariate model below: multivariate model.

vstupuje tu proces určenia váhy jednotlivých faktorov ovplyvňujúcich stabilitu svahov.

Podakovanie: Táto práca bola podporovaná Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe zmluvy č. APVV-0129-12, APVV-0330-10 a projektom VEGA č. 1/0131/14.

Literatúra

-
- Aleotti P. & Chowdhury R., 1999: Landslide Hazard Assessment: Summary review and new perspectives. *Bulletin of Engineering Geology and Environment*, 58, 21–44.
- Bednarik M., 2001: Hodnotenie náchylnosti územia Handlovskej kotliny na svahové pohyby. KIG PRIF UK, Bratislava. Diplomová práca, 40 p.
- Bednarik M., 2007: Hodnotenie zosuvného rizika pre potreby územnoplánovacej dokumentácie. KIG PRIF UK Bratislava, Doktorandská dizertačná práca, 120 p.
- Bednarik M. & Liščák P., 2010: Landslide susceptibility assessment in Slovakia. *Mineralia Slovaca*, 42, 2, 193–204.
- Bednarik M. & Paudits P., 2010: Different ways of landslide geometry interpretation in a process of statistical landslide susceptibility and hazard assessment: Horná Súča (western Slovakia) case study. *Environmental Earth Sciences*, 61, 733–739.
- Brabb E.E., 1984: Innovative approaches to landslide hazard mapping. 4th International symposium on Landslides, 1, Toronto, 307–324.
- 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*, 16, 5, 427–445.
- Clerici A., 2002: GRASS GIS based shell script for landslide susceptibility zonation by the conditional analysis method. Proceedings of the Open source GIS – GRASS users conference 2002. Trento, Italy, CD-ROM.
- Constantin M., Bednarik M., Jurchescu M.C. & Vlaicu M., 2010: Landslide susceptibility assessment using the bivariate statistical analysis and the index of entropy in the Sibiciu Basin (Romania). *Environmental Earth Sciences*, 63, 2, 397–406.
- Fratini P., Crosta G. & Carrara A., 2010: Techniques for evaluating the performance of landslide susceptibility models. *Engineering Geology*, 111, 62–72.
- Galban L., 2010: Model for Geological Risk Management in the Building and Infrastructure Processes. Advances in Risk Management, Giancarlo Nota, CD-ROM.
- Greenway D.R., 1987: Vegetation and slope stability. Slope Stability, John Wiley & Sons Ltd., 187–229.
- Grman D., Boszák M., Magdošková M., Takáč P., Wanieková D., Žec B., Balážová R., Hajduková J., Syčev V., Udič M., Stercz M., Žubrej J., Bednarik M., Laho M., Liščák P., Páleník Mil., Páleník Mich., Sluka V., Smolka J., Smolka M., Šimeková J., Farkašovský R., Jacko S. & Janočko J., 2011: Inžinierskogeologické mapovanie svahových deformácií v najohrozenejších územiach flyšového pásma v M 1:10 000, orientačný inžinierskogeologický prieskum, ZS, GEO Slovakia, Košice.
- Hofierka J., Parajka J., Mitasova H. & Mitas, L. 2002: Multivariate interpolation of precipitation using regularized spline with tension. *Transactions in GIS*, 6, 2, 135–150.
- Jurko J., 2003: Mapa náchylnosti územia Liptovskej kotliny na zosúvanie. Diplomová práca, Katedra inžinierskej geológie PriF UK, Bratislava, 47 p.
- Krcho J., 1990: Morfometrická analýza a digitálne modely georeliéfu. Veda. Vydavateľstvo SAV, Bratislava, 432 p.
- Kovář J. & Kovářová K., 2011: MicroOpis 1.0
- Krumpálová M., 2008: Hodnotenie hrozby zosúvania v Breznianskej kotline. Diplomová práca. Katedra fyzickej geografie a geokológie PriFUK, Bratislava, 64 p.
- Magulová B., 2009: Použitie GIS pre tvorbu máp geohazardov ako podkladov pre urbanizačné plánovanie. *Acta Geologica Slovaca*, 1, 1, 25–32.
- Marschalko, M., Kovář, L., 2003: Inžinierskogeologický průzkum a sanace sesuvu Ostrava – Lhotka. *Geotechnika – časopis pro zakládání staveb, mechaniku zemin a inženýrskou geologii*, 3, 26–29.
- Marschalko, M., Hofrichterová L., Třeslín, L., 2008: Engineering-Geological Conditions of Landslide in the Ostrava-Karviná Coalfield. Transactions of the VŠB - Technical University of Ostrava, *Civil Engineering Series*. 8, 1, 393–403.
- Marschalko, M., Třeslín, L., 2009: Solution of the Engineering-geological Environment Changes Related to the Slope Deformation Affected by Underground Mining. *Acta Montanistica Slovaca*, 14, 3, 232–240.
- Miklós L. & Izakovičová Z., 1997: Krajina ako geosystém. Veda. Vydavateľstvo SAV, Bratislava.
- Nandi A. & Shakoor A., 2009: A GIS-based landslide susceptibility evaluation using bivariate and multivariate statistical analyses. *Engineering Geology*, 110, 11–20.
- Ondrášik M., Smolárová H., Gluch A., Marsina K., Siráňová Z., Kordík J., Slaninka I., Marcin D., Malík P., Švasta J., Potfaj M., Dlapa P., Ďuriš M., Juráni B., Mičuda R., Šimkovic I., Frankovská J., Dananaj I., Liščák P., Jelínek R., Paudits P., Ondrejka P., Šefčíková B., Iglárová L., Magalová D., Okoličányiová K., Pristaš J. & Hók J. 2005: Súbor regionálnych máp geologických faktorov životného prostredia regiónu Myjavská pahorkatina a Biele Karpaty. Záverečná správa. ŠGÚDŠ Bratislava.
- Ondrášik R., Vlčko J. & Fendeková M., 2011: Geologické hazardy a ich prevencia. Vydavateľstvo UK, Bratislava, 288 p.
- Paudits P. & Bednarik M., 2002: Using GIS in evaluation of landslide susceptibility in Handlovská kotlina basin. Proceedings of the 1st European conference on landslide, Swets & Zeitlinger, Lisse, Praha, Czech Rep., 437–441.
- Paudits P., 2006: Hodnotenie náchylnosti územia na zosúvanie s využitím štatistických metód v prostredí GIS. Geologické práce, Správy, 112, Bratislava, 41–58.
- Paudits P., Vlčko J. & Jurko J., 2006: Využitie štatistických metód v hodnotení náchylnosti územia na zosúvanie. *Mineralia Slovaca*, 37, 4, 529–538.
- Petro L., Frankovská J., Matys M. & Wagner P. (Eds.), 2008: Inžinierskogeologický a geotechnický slovník. ŠGÚDŠ Bratislava, 465 p.
- Petrydesová L., 2012: Hodnotenie zosuvného hazardu v modelovom území Hlohovec – Sereď. Dizertačná práca. Katedra inžinierskej geológie PriF UK, Bratislava, 206 p.
- Petrydesová L., Putiška R. & Liščák P., 2012: Stabilitné zhodnotenie zosuvného územia Bojničky na základe elektrickej odporovej tomografie (ERT) a geodetických GNSS meraní. *Acta Geologica Slovaca*, 4, 2, 171–184.
- Potfaj M., 2005: Účelová geologická mapa Myjavskej pahorkatiny a Bielych Karpát. Mierka 1:50 000. Súbor regionálnych máp geologických faktorov životného prostredia regiónu Myjavská pahorkatina a Biele Karpaty. ŠGÚDŠ Bratislava.
- Putiška R., Dostál I., Mojžeš A., Gajdoš V., Rozimant K. & Vojtko, R., 2012: The resistivity image of the Muráň fault zone (Central Western Carpathians) obtained by electrical resistivity tomography. *Geologica Carpathica*, 63, 3, 233–239.
- Smith K., 1996: Environmental Hazards: Assessing Risk. 2. edition; London and New York Routledge, 380 p.
- VanWesten, C.J., 1993: GISSIZ – Training Package for Geographic Information Systems in Slope Instability Zonation. Part 1: Theory. UNESCO-International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC). Project

on Geo-Information for Environmentally Sound Management of Natural Resources (ITC Publication Number 15). Application of Geographic Information Systems to Landslide Hazard Zonation.

Varnes D.J., 1984: Landslide hazard zonation: A Review of Principles and Practice. *Natural Hazards*, 3, 63 p.

Vlčko J., Wagner P. & Rychlíková Z., 1980: Spôsob hodnotenia stability svahov väčších územných celkov. *Mineralia Slovaca*, 12, 3, 275–283.

Summary: Geohazards study and attention to their harmful effects helped to recognize the causes of their formation and development, and effective prevention. However, the potential impact on construction activity and minimizes the consequences was not addressed in these studies. Therefore, by the end of the 20th century the focus was transferred to systematical tackling the potential impact of geodynamic phenomena on construction activities and measures to minimize these impacts. Currently, within the frame of actual trends the attention is focused in creating detailed maps of landslide hazard and risk, compatible with the newly developed topographic map (ZB GIS orthophoto). Quantitative methods have important place among the landslide hazard assessment methods, including statistical methods.

To produce maps of the landslide hazard, eleven input parameters have been studied within the area of the Myjava Upland and Biele Karpaty Mts. (Tab. 1): lithology, seismic activity, slope angle, slope aspect, slope length, geometric forms of relief, contributing areas, distance from the watercourses and erosion gullies, potential rainfall runoff, total annual global solar irradiation on georelief and the current landscape structure. Five most important of them have been selected (Tab. 2) based on the statistical evaluation and comparison with registered slope deformations. Each input parameter enters the statistical analysis within GIS environment in a form of parametric raster map; technical preparation requires a precise approach: it is necessary to prepare them in terms of the geometry of the grid. For the study purpose, the cell size was set based on the required accuracy and used scale to 10×10 m, the whole study area (809.35 km²) is represented by 5304×6092 cells.

In the case of bivariate statistical analysis each parameter map is compared with a landslide inventory map separately. It is therefore a comparison of the two input parameters, one of which is the landslide inventory map, presenting a dichotomic variable 0/1. Independent variables are represented by classes within parametric maps. The final landslide hazard map (Fig. 7) results from the weighted sum of all secondary reclassified parametric maps according to Eq. 2.

Conditional multivariate analysis is based on mutual combination of all input parameters. Large contingency table containing all the combinations of the categories for all input parametric maps, which are in mutual superposition, is obtained. Combination of all categories of parametric maps forms in the final map new areal elements, constituting quasi-homogeneous units (UCU). In the phase of creation of prognostic maps all ordered UCU's are divided into five classes based on determining the mean intensity of landslides in the study area and values of mean interval distribution (Clerici, 2002).

The most important criterion for assessing the quality of prognostic maps is the construction of a model of accuracy that assesses the relationship between prognosis and map of registered slope deformations. Model of performance generally compares the density of landslides within the landslide inventory map with various degrees of susceptibility within the prognostic landslide hazard map.

With regard to verification of prognosing maps multiple methods

of statistical accuracy may be used. Studies covering this topic are not very frequent; perhaps the most complex has been recently processed in Frattini et al. (2010), which describes most commonly used methods of statistical accuracy. The results (Tab. 7) illustrate that, according to most of the methods of statistical success both prognostic maps correspond to the quality set statistical model. This comparison shows that the difference between the accuracy of these two approaches has a value of about 5 % in favor of multivariate statistical analysis.

Correctness, accuracy or precision of the model is most commonly assessed using ROC curves (Receiver Operating Characteristic). Area below the curve (AUC) determines the overall quality of the prognostic model; the assumption is: the larger is the area the model is more successful. The maximum of area equals to 1 (an ideal model), the AUC for the model with a success rate of 50 % has a value 0.5 (trivial model). This means that the closer the size of the area is to the value 1, the more accurate is the model. The ROC curve is constructed according to the contingency tables, the number of points used for curve construction corresponds to the number of thresholds (cutoff values). Area under the curve for a bivariate model has value 0.836 (83.6 %), which together with the curve steepness shows high quality of prognostic model. Likewise, the prognosis for map compiled using conditional multivariate analysis reaches 85.5 %. The difference between the statistical methods represents less than two percent. The high success rate demonstrates also the appropriateness of the methods chosen to produce landslide hazard maps.