

# Použitie bivariačnej a multivariačnej analýzy na hodnotenie zosuvného hazardu Kysuckého regiónu (Západné Karpaty)

Rudolf Tornyai & Martin Dunčko

Katedra inžinierskej geológie, Prírodovedecká fakulta, Univerzita Komenského v Bratislave, Mlynská dolina G, 842 15 Bratislava; tornyai@fns.uniba.sk

## AGEOS Using Bivariate and multivariate analysis to assess landslide hazard in Kysuce region (Western Carpathians)

**Abstract:** The study was realized in the Western Carpathians, in northern part of Slovakia, in Kysuce region. The main objective is to assess landslide hazard in the region, using a quantitative evaluation. For assessment two most used statistical analyzes had been applied: bivariate using the weights of input parameters and multivariate conditional analysis. In paper nine input parameters are evaluated which are presented within statistical processing in the form of parametric maps. Statistical evaluation was executed in environment of GRASS GIS. The output of this study are two prognostic landslide hazard maps constructed using the methods mentioned above. The results showed that the majority of the assessed area falls within the medium to very high degree of landslide hazard.

**Key words:** Západné Karpaty, Kysuce region, landslide hazard assessment, GRASS GIS, bivariate analysis, multivariate conditional analysis

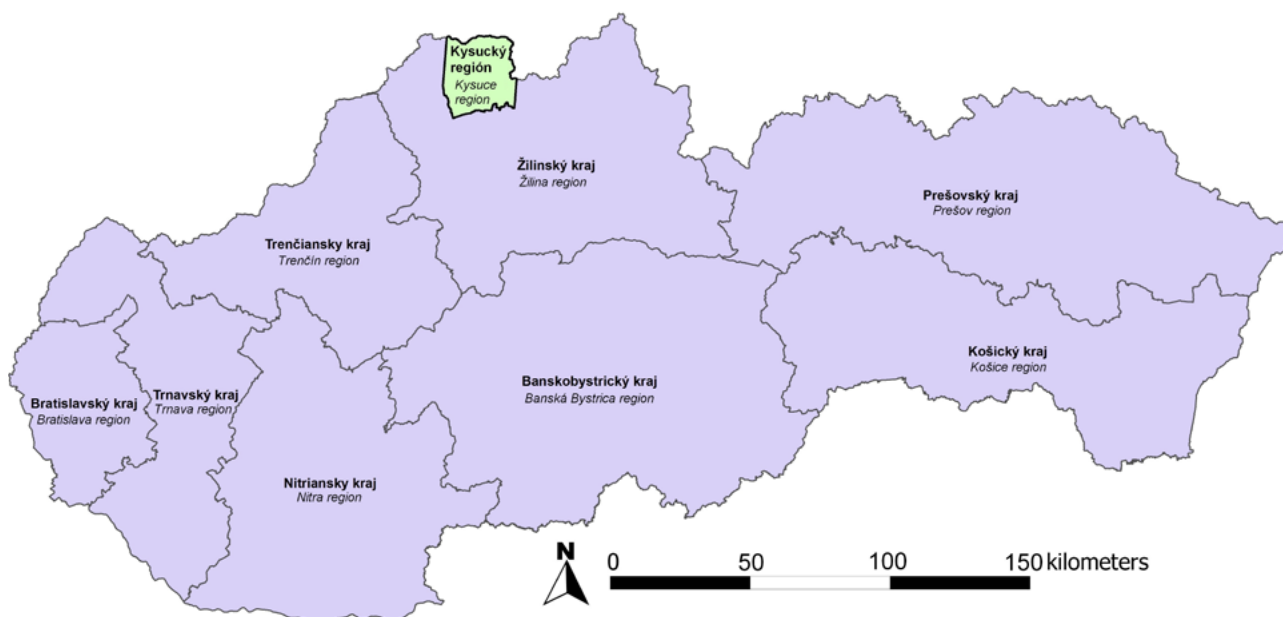
### 1. ÚVOD

V súčasnej dobe predstavujú zosuvy významnú environmentálnu hrozbu a to v mnohých oblastiach sveta. Práve preto vzbudzujú pozornosť mnohých odborníkov, ktorí sa orientujú najmä na analýzu faktorov ich vzniku. Cieľom je vytvorenie prognózy, na základe ktorej by sme boli schopní s vysokou pravdepodobnosťou predpovedať vznik zosuvov v budúcnosti. Metódy hodnotenia zosuvného hazardu delíme na kvalitatívne a kvantitatívne, medzi ktoré patria aj štatistické analýzy, ktoré sú v súčasnosti najpoužívanejšie. Sú založené na porovnaní a následnom štatistickom spracovaní a zhodnotení vzťahov medzi relevantnými faktormi vplývajúcimi na stabilitu svahov s reálnym výskytom svahových deformácií. Ako dôležité faktory, ktoré odrážajú vhodné podmienky pre vznik zosuvov je na základe doterajších skúseností s danou problematikou možné považovať geologickú stavbu (litológiu, seizmicko-tektonické a štruktúrne pomery), geomorfologické pomery, charakter georeliéfu, klimatické faktory, hydrogeologické pomery ako aj aktuálne využitie krajiny.

Prvé príklady použitia štatistických metód pri hodnotení zosuvného hazardu publikoval Carrara (1983, 1988), Carrara et al. (1990, 1991). Neskôr to boli napríklad práce: Guzzetti et al. (1999), Lee & Min (2001). V Európe to boli napríklad práce: Clerici (2002), Donati & Turrini (2002), Süzen & Doyuran (2004) alebo Constantin et al. (2011). Vo svete sú známe práce autorov: Dai et al. (2001), Ayalew et al. (2004), a i. U nás bolo v posledných rokoch publikovaných viacero prác venujúcich sa danej problematike, ako napríklad práce Pauditša (2005),

Bednarika (2007), Bednarik & Pauditš (2010), Bednarik et al. (2010). Nástup štatistických metód v analýzach zosuvného hazardu je podmienený hlavne rozvojom modernej výkonnej výpočtovej techniky, ktorej použitie je nevyhnutné pri spracovaní veľkého množstva potrebných údajov v štatistických súboroch. Samozrejme, že samotná výpočtová technika by nebola dostatočujúca bez adekvátneho softvérového vybavenia. V súčasnosti je spolu s prírodnými vedami, ktoré sa prevažne zaoberajú skúmaním priestorovo viazaných javov a objektov, úzko späté tiež využívanie geografických informačných systémov (GIS). Bez použitia GIS by bola aplikácia štatistických analýz veľmi náročná a neefektívna a práve vďaka GIS sa vývoj prognózovania zosuvného hazardu výrazne posunul.

Región Kysuce sa nachádza na severe Slovenska v Žilinskom samosprávnom kraji. Kysuce sú krajom dvoch oddelených častí: západnej (to sú Javomíky s Turzovskou vrchovinou a Moravsko - sliezskymi Beskydami), východnú časť územia vytvárajú Kysucké Beskydy, Kysucká vrchovina a Oravské Beskydy. V súčasnosti sú Kysuce rozdelené na dva okresy : okres Čadca a okres Kysucké Nové Mesto. Výškové rozmedzie je od 325 m n. m. v Kysuckej bráne pri Radoli až po vrchol Veľkej Rače 1236 m n. m. Na geologickej stavbe územia sa podieľajú tri základné tektonické geologické celky. Od severozápadu sú to: sliezsky príkrov, magurská jednotka a bradlové pásmo. Litofaciálno-tektonické jednotky tvoria: račianska (tvorená solánskym, belovežským a zlínskym súvrstvím), bystrická (belovežské súvrstvie, vychylovské súvrstvie, bystrické vrstvy zlínskeho súvrstvia), oravskomagurská (asi 1 km široký pruh pozdĺž severného okraja bradlového pásma) (Potfaj et al., 2003).



Obr. 1. Geografické umiestnenie Kysuckého regiónu

Fig. 1. Geographic location of Kysuce region

## 2. HODNOTENIE ZOSUVNÉHO HAZARDU V PROSTREDÍ GRASS GIS

Pre kvantitatívne hodnotenie zosuvného hazardu bol použitý systém GRASS GIS (Geographic Resources Analysis Support System) (GRASS Development Team, 2012). GRASS GIS bol u nás v minulosti v prognózovaní zosuvného hazardu a tvorbe máp náchylnosti na zosúvanie úspešne použitý vo viacerých prácach (napr. Paudítš & Bednarik, 2002; Bednarik et al., 2005). Systém bol vo svojich začiatkoch prevažne rastrovo orientovaný, ale v súčasnosti už obsahuje množstvo prepracovaných a užitočných vektorových funkcií. GRASS GIS patrí podľa licenčných podmienok použitia do kategórie tzv. Open Source programov, čo znamená, že je voľne distribuovaný spolu so zdrojovými kódmi, v rámci licencie GNU GPL (General Public License: <http://www.gnu.org/licenses/gpl.html>). Systém je možné prevziať prostredníctvom Internetu, voľne ho používať a to aj na komerčné účely a ďalej distribuovať.

V štúdiu boli použité dve metódy hodnotenia: multivariačná a bivariačná. Bivariačná štatistická analýza pracuje s jednou závislou premennou (mapa zosuvov) a s jednou nezávislou premennou (jednotlivé vstupné parametrické mapy). Výsledkom kombinácie je určenie celkového počtu buniek výpočtovej siete so zosuvmi a bez zosuvov v jednotlivých triedach parametrov, prepočítaných na jednotku plochy alebo percentá. Dvojkombinácie sú uložené v tabuľkovej forme, kde jedno z čísel predstavuje triedu v parametrickej mape a druhé číslo predstavuje prítomnosť resp. neprítomnosť zosuvu (0 – false, 1 – true). Veľký vplyv na presnosť výsledku má dôslednosť technickej prípravy parametrických máp, hlavne rozdiely v polohovej presnosti, superpozícií a geometrii výpočtovej siete. Na základe takto získaných kombinácií je nutné každú parametrickú mapu druhotne reklasifikovať. Pri druhotnej reklasifikácii sa existujúcim triedam

v každej parametrickej mape priradia nové numerické hodnoty reprezentujúce štatisticky určenú pravdepodobnosť na zosúvanie. Najvyššia číselná hodnota je priradená triede najviac náchylné na zosúvanie a naopak trieda s najnižšou numerickou hodnotou je najmenej náchylná na zosúvanie. Pred samotným sčítaním druhotne reklasifikovaných parametrických máp je nevyhnutné určenie váhy jednotlivých parametrov. Výsledkom bivariačnej štatistickej analýzy je mapa zosuvného hazardu, ktorá vznikne váženým súčtom druhotne reklasifikovaných parametrických máp. Záverečný súčet prezentuje rovnica 1 (Bednarik, 2011), ktorá má tvar:

$$y = \sum_{i=1}^n C * V_i \quad (1)$$

kde:

y – hodnota v závěrečnej mape zosuvného hazardu;

i – poradové číslo parametrickej mapy;

C – hodnota triedy;

$V_i$  – váha príslušného parametra.

Výsledkom váženého súčtu je potom spojený interval hodnôt reprezentujúci hodnotu stupňa zosuvného hazardu v modelovom území. Spojitý interval je nevyhnutné interpretovať a rozdeliť do tried, odrážajúcich stupeň zosuvného hazardu. Ako už bolo spomenuté, intervaly sú určované na základe rovnomerného rozdelenia na rovnaké časti alebo pomocou exaktnejších prístupov (medián, smerodajná odchýlka a pod.). Použitá je päťstupňová škála reprezentujúca veľmi nízky, nízky, stredný, vysoký a veľmi vysoký stupeň zosuvného hazardu (Bednarik, 2007, Bednarik et al., 2010, Constantin et al., 2011).

Multivariačná štatistická analýza je založená na kombinácii všetkých vstupných parametrických máp súčasne s následným rozšírením informácií na územie, kde neboli vymapované žiadne

zo svahových pohybov. Pri multivariačnej štatistickej analýze nevstupuje do hodnotenia geohazardu proces vázenia.

V prípade podmienkovej analýzy (Clerici, 2002) získame vzájomnou súčasnou kombináciou vstupných parametrických máp tabuľku, obsahujúcu všetky kombinácie kategórií vo všetkých vstupných mapách, ktoré sú vo vzájomnej superpozícii. Tieto kombinácie tvoria vo výslednej mape nové areálové prvky, predstavujúce kvázihomogénne celky (UCU – Unique Condition Units). Napr. ak máme nad sebou v mape sklonov svahov kategóriu 7 (17–20°), v litologickej mape kategóriu 6 (flyš – ílovcy v prevahe nad pieskovcami) a v mape aktuálneho využitia krajiny triedu 5 (lesy), výsledný kvázihomogénny celok bude tvoriť kombinácia 7–6–5 a podobne (Paudiš, 2005). Pred vstupom do multivariačnej analýzy nie je potrebná druhotná reklasifikácia ani žiadne vázenie parametra. Výsledné kombinácie, v ktorých sa nachádzajú zosuvy (hodnota 1, true v mape zosuvov) sa zoradia na základe vypočítanej intenzity výskytu – pomer počtu buniek UCU so zosuvmi k celkovej ploche UCU (výsledok usporiadaný zostupne uvádza kombinácie, ktoré sú z hľadiska zosúvania najnepriaznivejšie).

### 3. VSTUPNÉ PARAMETRE

Vo vybranom modelovom území (Obr. 1) s celkovou rozlohou 540,23 km<sup>2</sup> je hodnotených 9 vstupných faktorov, ktoré určitým spôsobom vplývajú na nestabilitu svahov. Každý z faktorov vstupuje do štatistických analýz vo forme parametrickej mapy. Hodnotenými parametrami sú: geologické pomery, morfometrické parametre reliéfu (model nadmorských výšok, sklon svahov, orientácia svahov, dĺžky svahov a prispievajúce plochy, krivosti reliéfu), súčasná krajinná štruktúra a existujúce svahové deformácie. Parametrické mapy boli vypracované zo 4 vektorových máp (výškopisu, polohopisu, svahových deformácií a litologických celkov), ktoré boli k dispozícii v mierke 1:10 000.

#### 3.1. Geologické pomery

Geologická stavba územia je jedným z najdôležitejších faktorov vplývajúcich na vznik a vývoj svahových deformácií. Väčšina územia patrí do flyšového pásma. Flyš predstavuje niekoľko sto až tisíc metrov mocné súvrstvie prevažne paleogénnych hornín, v ktorom sa rytmicky striedajú vrstvy mäkkších ílovcov - bridlíc a tvrdších pieskovcov. Flyšové horniny na území patria k magurskej tektonickej jednotke. Sú to paleogénne horniny, u ktorých sa tu vyskytujú zlínske vrstvy. Je to súvrstvie, v ktorom prevládajú ílovcové vrstvy, hrubé od niekoľko centimetrov do desať metrov. Pieskovce v zlínskych vrstvách vytvárajú polohy od 1 cm do 6 metrov. Sú jemno a strednozrnité a rôzne sfarbené. Na stavbe flyšového pásma sa podieľali aj horotvorné procesy alpskeho vrásnenia. Počas neho sa sedimenty, ktoré vznikli vo vnútornom sedimentačnom priestore (tzv. magurský flyš), nasunuli severným smerom na vonkajšie pásmo (miestami až na vzdialenosť 10 km). Po vyvrásnení flyšového pásma a jeho vynorenie nastali v mladších trefohorách (neogén) procesy postupného rozrušovania komplexov a erózia. Erózia postupne rozčleňovala i rozčleňuje povrch na terajšie zoskupenia povrchových tvarov. Striedajú sa tu dlhé a pomerne úzke pásy pieskovcov, z ktorých vznikli

dlhé chrbty, a ílovcov, v ktorých sa zahĺbili erózo-denudačné brázdy s pásmami vrstvových vrchov po stranách. V týchto líniách pozdĺž dlhých chrbtov pretekajú vodné toky, pritekajú do nich potoky, ktoré narezali vrstevné sledy naprieč. Na miestach tektonického styku jednotiek, či miestach s väčším výskytom ílovcov sa vymyli erózne kotlinky. V priebehu štvrtohôr (kvartér) sa pozdĺž hlavných tokov (najmä Váh a Kysuca) vytvorili nízke a stredné terasy (Potfaj et al., 2003).

V zmysle inžinierskogeologickej rajonizácie Slovenskej republiky môžeme v posudzovanom území vyčleniť nasledovné inžinierskogeologické rajóny: rajón flyšoidných hornín, rajón údolných riečnych náplavov a rajón deluviálnych sedimentov. Rajón flyšoidných hornín je charakteristický pre územie regiónu karpatského flyša a je vyčlenený v územiach, kde k povrchu vystupujú v rôznej miere zbridlčnené ílovcovo - prachovcové, prípadne i slieňovcové horniny, striedajúce sa rytmicky s pieskovcami, prípadne zlepenkami alebo karbonátmi, pričom celkové zastúpenie ílovcovo-prachovcových hornín je 30-70 %. Hrúbka vrstiev jednotlivých litologických typov spravidla nepresahuje 1-2 m. Flyšoidné súvrstvia rajónu sú spravidla zvrásnené a značne tektonicky porušené.

Z hornín zastúpených v rajóne sú relatívne dobre priepustné pieskovcové, zlepenkové a karbonátové horniny, ktoré sú spravidla dobre priepustné puklinovou a pórovou priepustnosťou. Striedanie priepustných a menej priepustných hornín spôsobuje, že územie rajónu je málo zvodnené s plytkým obehom podzemných vôd, ktorých dotácia je bezprostredne závislá na atmosférických zrážkach.

Morfologický ráz rajónu je charakteristický miernymi až strednými svahmi a plochými chrbtami. Vďaka intenzívnemu periglaciálnemu zvertrávaniu došlo na mnohých miestach k nakypreniu povrchových častí horninových komplexov. Malou odolnosťou voči zvertrávaniu, značnou namrzavosťou, rozpadavosťou a nestálosťou v styku s vodou sa vyznačujú najmä zbridlčnené polohy ílovcov.

Energia reliéfu, zrážková voda, hydrogeologické pomery a vlastnosti hornín podmieňujú pomerne častý vznik zosuvov. Vyskytuje sa jednak zosúvanie po plochách vrstevnatosti súbežných so svahom, ale vyskytujú sa i zosuvy v prípadoch, keď vrstvy zapadajú do svahu.

Rajón údolných riečnych náplavov vytvárajú náplavy povrchových tokov Kysuca, Oščadnica, Bystrica a ich prítokov. Sú charakterizované nedostatočne diferencovaným faciálnym vývojom sedimentov. Prevládajú tu veľmi rôznorodé hrubozrnné sedimenty riečneho koryta, ktoré sú pokryté málo mocnou vrstvou hlinitých a hlinítopiesčitých sedimentov. Pre fáciu riečneho koryta sú charakteristické menej opracované hrubozrnné až balvanité štrky. Piesčité výplň tu často absentuje, prípadne je nahradená hlinitou. Náplavy týchto tokov sú trvalo zvodnené a sú v priamej hydraulikej spojitosti s hladinou v povrchovom toku, od ktorej sa odvíja aj hĺbka hladiny podzemnej vody. Priepustnosť štrkovitých materiálov sa dá charakterizovať súčiniteľom filtrácie 10<sup>-4</sup> až 10<sup>-3</sup> m.s<sup>-1</sup>.

Rajón deluviálnych sedimentov - tieto sedimenty v závislosti od charakteru predkvartérneho podkladu, strmosti a relatívnej polohy vo svahu a klimatických pomerov vytvárajú litologicky i hrúbkou rozdielne akumulácie. Pri úpäti svahov a vo svahových depresiách dosahujú hrúbky niekoľko metrov, zatiaľ čo na

eleváciach, v strmých a horných častiach svahov je hrúbka delúvií malá. Charakter delúvií zodpovedá charakteru predkvartérneho podkladu. Obsahujú úlomky hornín podkladu. V závislosti od minerálneho zloženia, tektonického porušenia a stupňa zvetrania vznikajú ílovito-hlinité, piesčité a piesčito-štrkovité delúviá. V deluviálnych sedimentoch sa len zriedkavo vytvára súvislý horizont podzemnej vody. Častejšie sú akumulácie podzemných vôd v nižších častiach svahov, najmä na prechode do nížin a kotlín, resp. fluviálnych sedimentov. K intenzívnej erózií a častým zosuvom dochádza najmä v delúviách na flyšovom podloží, kde sú zvyčajne akumulované hrubé ílovito-hlinité a ílovito-piesčité delúviá s premenlivým obsahom úlomkov.

Rozsiahlymi procesmi soliflukcie zdôraznené rozhrania delúvií a podkladu vytvára predpoklady na vytváranie šmykových plôch po povrchu podkladu. Veľkú úlohu pri vytváraní zosuvov a erózných javov hrá relatívne nepriepustné podložie a veľké množstvo atmosférických zrážok vyskytujúce sa vo flyšových hornatinách a vrchovinách (Potfaj et al., 2003).

Parametrická mapa litologických pomerov územia máva väčšinou aj najväčšiu váhu v procese určovania váh jednotlivých parametrov. Fyzikálno-mechanické vlastnosti vyplývajúce z litologického zloženia horninového prostredia sú dôležitým faktorom vplyvujúcim na stabilitu svahov. Podkladom na získanie informácie o geologickej stavbe modelového územia regiónu Kysuce

Tab. 1. Plošná distribúcia litologických celkov.

Tab. 1. Areal distribution of lithological units.

Kategória Category	Genetický typ Genetic type	Litologická charakteristika Lithological characteristics	Plocha [km <sup>2</sup> ] Area [km <sup>2</sup> ]	Plocha [%] Area [%]
1	antropogénne sedimenty anthropogeneous sediments	depónie anorganického a org. materiálu anorganic and organic material	0,12	0,02
2	deluviálne sedimenty diluvial sediments	íl, hlina, suť clay, loam, debris	212,71	39,37
3	proluviálne sedimenty proluvial sediments	íl, hlina, štrk proluviálnych kuželov clay, loam, gravels of proluvial fans	2,78	0,51
4	fluviálne sedimenty fluvial sediments	aluviálne sedimenty – íl, piesok, štrk alluvial sediments – clay, sand, gravel	45,13	8,35
5	fluviálne sedimenty fluvial sediments	íl, hlina, pleistocénny terasový štrk clay, loam, Pleistocene terrace gravel	15,98	2,96
6	flyšový vývoj flysch-type sediments	ílovce v prevahe nad pieskovicami claystones dominate over sandstones	188,44	34,88
7	flyšový vývoj flysch-type sediments	pieskovce v prevahe nad ílovcami sandstones dominate over claystone	75,00	13,88
8	morský vývoj marine sediments	slieňovce, vápence, radiolarity marlstones, limestones, radiolites	0,02	0,00
9	morský vývoj marine sediments	radiolarity, radioláriuové vápence, oolitické a krinoidové vápence radiolarites, radiolarian limestones, oolitic and crinoidal limestones	0,06	0,01

Tab. 2 Plošná distribúcia intervalov nadmorských výšok terénu.

Tab. 2. Areal distribution of altitudes field intervals.

Kategória Category	Interval [m n. m.] Interval [m asl.]	Plocha [km <sup>2</sup> ] Area [km <sup>2</sup> ]	Plocha [%] Area [%]
1	(339–438)	54,98	10,18
2	<438–538)	140,13	25,94
3	<538–638)	151,30	28,01
4	<638–738)	108,03	20,00
5	<738–838)	59,81	11,07
6	<838–938)	17,78	3,29
7	<938–1038)	6,08	1,12
8	<1038–1138)	1,66	0,31
9	<1138–1239)	0,47	0,09

Tab. 3. Plošná distribúcia sklonov svahov.

Tab. 3. Areal distribution of slope angle.

Katégoria Category	Interval Interval [°]	Plocha Area [km <sup>2</sup> ]	Plocha Area [%]
1	(< 2)	33,30	6,16
2	[2–3)	8,38	1,55
3	[3–5)	16,48	3,05
4	[5–7)	24,32	4,50
5	[7–11)	83,34	15,43
6	[11–17)	176,73	32,71
7	[17–20)	78,02	14,44
8	[20–31)	113,50	21,01
9	[> 31)	6,14	1,14

bola digitálna mapa inžinierskogeologických pomerov v mierke 1:10 000 (Grman et. al, 2011). Digitálna mapa inžinierskogeologických pomerov bola vo vektorovom tvare a v súradnicovom systéme S-JTSK. Reklasifiková mapa inžinierskogeologických pomerov obsahuje 9 litologických celkov a použitím príkazu v.to.rast bola konvertovaná do rastrovej formy s celkovým počtom buniek 9 750 000 (3250 radov, 3000 stĺpcov), s veľkosťou základnej bunky 10x10 m.

Najväčšie plošné rozšírenie v modelovom území regiónu Kysuce (až 88,13 %) tvoria sedimenty veľmi náchylné na zosúvanie. Konkrétne sú to deluviálne sedimenty, ktoré tvoria 39,37 %, nasledované paleogénnymi sedimentmi flyšového vývoja, ktoré spolu budujú takmer 49 % modelového územia (Tab. 1).

### 3.2. Morfometrické parametre reliéfu

Reliéf reprezentuje kontaktnú plochu medzi atmosférou a hydrosférou na jednej strane a litosférou, resp. pedosférou na druhej strane. Tvar reliéfu je výslednicou súčasného pôsobenia endogénnych síl, exogénnych síl a antropogénnej činnosti. Z uvedených dôvodov je nevyhnutné reliéf v prostredí GRASS GIS čo najpresnejšie vymodelovať a zistiť tak jeho morfometrické charakteristiky, ktoré reprezentujú geometrické vlastnosti reliéfu a ovplyvňujú procesy v krajine, vrátane geodynamických javov (Hofierka, 2003). Krcho (1990, 1999) definuje reliéf ako spojité skalárne pole nadmorských výšok, ktoré možno analyzovať metodickým aparátom diferenciálnej geometrie.

#### 3.2.1. Model nadmorských výšok

Model nadmorských výšok (MNV) predstavuje súbor čísel obsiahnutých v pamäti počítača vyjadrujúcich priestorovú distribúciu hodnôt nadmorských výšok, obvyčajne formou dvojzmernej matice. Každé číslo v súbore reprezentuje určitú plochu (pixel) formou diskretnej prezentácie reliéfu. Takto pripravený MNV je dostatočne spojitý a vhodný na odvodenie vyššie spomínaných morfometrických parametrov reliéfu pomocou analytických nástrojov rastrových GIS (Hofierka, 2003).

Zdrojom vstupných údajov pre zostavenie a výpočet MNV na modelovom území boli vrstevnice (vo forme línií) z topogra-

fických máp v M 1:10 000, ktoré sú distribuované Geodetickým a kartografickým ústavom (GKÚ) v Bratislave.

MNV pre modelové územie regiónu Kysuce bol vytvorený v prostredí GRASS GIS pomocou príkazu v.surf.rst. Tento príkaz predstavuje interpolačnú metódu regularizovaného splajnu s tenziou (*regularized spline with tension*) na zostrojenie MNV.

Takto zostavený model je možné reklasifikovať do celočíselných hodnôt (integer) hypsografických stupňov. MNV bol reklasifikovaný do 9 tried. Zvolený krok stupňa predstavoval 100 výškových metrov. Najväčšia časť územia spadá do nadmorských výšok od 438 do 738 m n. m., ktoré tvoria takmer 74 % územia (Tab. 2). Výškový rozdiel medzi najvyššou a najnižšou hodnotou nadmorskej výšky na modelovom území je 895,6 m.

#### 3.2.2. Sklon svahov

Vo všeobecnosti možno konštatovať, že sklon svahov územia je jeden z najdôležitejších morfometrických parametrov. V digitálnej forme predstavuje raster sklonu svahov maticu hodnôt veľkostí gradientov skalárneho poľa nadmorských výšok, odvodenú z digitálneho modelu reliéfu (Hofierka, 2003). Veľkosť sklonu svahu uvádzame v stupňoch (interval 0–90°) alebo v percentách, prípadne v promile. Sklon svahu významne ovplyvňuje v kombinácii s ďalšími parametrami stabilné pomery svahu.

Aplikovaná bola klasifikácia sklonov svahov podľa Hrašnu (1980, in Matula et al., 1983), ktorá je zvyčajne používaná aj v inžinierskogeologickom mapovaní. Sklony svahov sú rozdelené do 9 kategórií prezentovaných v tab. 3 v stĺpci interval.

Viac ako 32 % modelového územia predstavuje kategória sklonov svahov od 11 do 17°. Ďalšie dôležité kategórie vo vzťahu k zosuvnému hazardu zaberajú takmer 23 % celkovej plochy modelového územia (Tab. 3). Tieto svahy možno považovať za veľmi náchylné na zosúvanie, ktoré dohromady na modelovom území tvoria viac ako 55 % plochy.

#### 3.2.3. Orientácia svahov

Orientácia svahov voči svetovým stranám býva často zohľadňovaná v súvislosti s poveternosťnými a meteorologickými podmienkami v študovanom území. Reprezentuje napr. prevládajúci smer vetra, ktorý spolu s úhrom slnečného žiarenia

výrazne ovplyvňuje napr. evapotranspiráciu, stav pôdnej vlhkosti a pod. (Pauditš, 2005).

Parametrická mapa orientácie svahov voči svetovým stranám predstavuje spojitú dátové pole udávajúce hodnoty uhla od určitej svetovej strany (najčastejšie od severu, v GRASS GIS sa výpočet začína od východu), v protismere otáčania hodinových ručičiek. Orientácia svahov bola reklasifikovaná do 8 semikvadrantov (9 trieda predstavuje územia bez vzťahu ku svetovým stranám, t.j. roviny (flats)) príkazom `r.reclass`.

V modelovom území je zastúpenie orientácií svahov voči svetovým stranám približne rovnomerne distribuované (Tab. 4). Možno vidieť len veľmi malú prevahu svahov orientovaných juhovýchodne a západne.

### 3.2.4. Dĺžky svahov a prispievajúce plochy

Dĺžka svahu v metroch sa vyjadruje formou spojitých výpočtovej siete, v ktorej každá bunka rastra udáva celkovú dĺžku spádovej (gradientovej) línie od najvyššieho bodu na svahu (vrcholu kopca, hrebeňa a pod.). Spádová krivka je súčasne aj trajektóriou potenciálneho najkratšieho smeru toku vody po svahu (zvyčajne kolmo na priebeh vrstevníc). Hustota spádových kriviek býva vyjadrená s ohľadom na ich smer, ak je vyjadrená proti smeru prúdenia vody, udáva výpočtová sieť hustoty spádnic tzv. prispievajúcu plochu, v metroch štvorcových. Prispievajúca plocha vyjadruje celkovú plochu mikropovodia, z ktorého steká voda po svahu do daného bodu (Pauditš, 2005).

Tab. 4. Plošná distribúcia orientácií svahov.

Tab. 4. Areal distribution of slope orientation.

Kategória Category	Interval Interval [°]	Plocha Area [km <sup>2</sup> ]	Plocha Area [%]
1 (flat)	(-1)	0,0	0,0
2 (N)	[0–22,5), [337,5–360)	61,65	11,41
3 (NE)	[22,5–67,5)	60,47	11,19
4 (E)	[67,5–112,5)	65,73	12,17
5 (SE)	[112,5–157,5)	73,35	13,58
6 (S)	[157,5–202,5)	65,88	12,19
7 (SW)	[202,5–247,5)	71,28	13,19
8 (W)	[247,5–292,5)	73,14	13,54
9 (NW)	[292,5–337,5)	68,74	12,72

Tab. 5. Plošná distribúcia dĺžok svahov.

Tab. 5. Areal distribution of slope length.

Kategória Category	Interval Interval [m]	Plocha Area [km <sup>2</sup> ]	Plocha Area [%]
1	[0–100)	59,454	11,01
2	[100–500)	270,7072	50,11
3	[500–1000)	166,8686	30,89
4	[1000–1500)	36,7195	6,80
5	[1500–2000)	5,8557	1,08
6	[> 2000)	0,6243	0,12

Tab. 6 Plošná distribúcia prispievajúcich plôch.

Tab. 6. Areal distribution of contributing areas.

Kategória Category	Interval Interval [m <sup>2</sup> ]	Plocha Area [km <sup>2</sup> ]	Plocha Area [%]
1	[0–100)	488,6228	90,4472971
2	[100–500)	26,3635	4,88005741
3	[500–1000)	6,2769	1,16189551
4	[1000–1500)	3,0267	0,5602621
5	[1500–2000)	1,7961	0,33246993
6	[> 2000)	14,1433	2,61801794

Tab. 7 Plošná distribúcia reklasifikovaných foriem krivosti reliéfu.

Tab. 7. Areal distribution of reclassified curvature forms of relief.

Katégorie Category	Interval Interval	Plocha Area [km <sup>2</sup> ]	Plocha Area [%]
1	< - 0,00025	239,0482	44,2493956
2	- 0,00025–0,00025	59,9316	11,0937337
3	> 0,00025	241,2495	44,6568707

Tab. 8. Plošná distribúcia prvkov súčasnej krajiny štruktúry.

Tab. 8. Areal distribution of present landuse.

Katégorie Category	Plocha Area [km <sup>2</sup> ]	Plocha Area [%]
1	4,83	0,89
2	30,92	5,72
3	101,39	18,77
4	79,46	14,71
5	321,30	59,48
6	0,00	0,00
7	1,73	0,32
8	0,58	0,11

Tab. 9. Plošná distribúcia jednotlivých typov svahových deformácií.

Tab. 9. Areal distribution of slope deformations types.

Katégorie Category	Typ svahovej deformácie Type of slope failure	Plocha Area [km <sup>2</sup> ]	Plocha Area [%]
1	frontálny zosuv	23,57	19,65
2	plošný zosuv	72,71	60,61
3	prúdový zosuv	1,56	1,30
4	blokový zosuv	18,37	15,31
5	nečlenené blokové pole	0,09	0,07
6	povrchové plazenie	3,67	3,06

Tieto parametre majú význam najmä z hydrogeologického hľadiska (napr. modelovanie povrchového šírenia kontaminácie v teréne z konkrétneho bodu a modelovanie erózie). Z hľadiska hodnotenia zosuvného hazardu má význam hlavne parameter dĺžky svahu v súvislosti s hodnotením potenciálneho vektora zosuvov, kde pri numerickom modelovaní je dĺžka svahu nevyhnutným vstupom. Na odvodenie vyššie spomenutých parametrov sa v prostredí GRASS GIS používa príkaz *r.flow*.

V modelovom území dominujú dĺžky svahov od 100 do 500 metrov, ktoré tvoria viac ako 50 % plochy územia (Tab. 5). Ďalšou významnou kategóriou sú svahy s dĺžkou 500 až 1000 m, ktoré tvoria takmer 31 % plochy modelového územia. Pri prispievajúcich plochách jednoznačne dominujú mikropovodia s rozlohou do 100 m<sup>2</sup> (Tab. 6).

### 3.2.5. Krivosti reliéfu

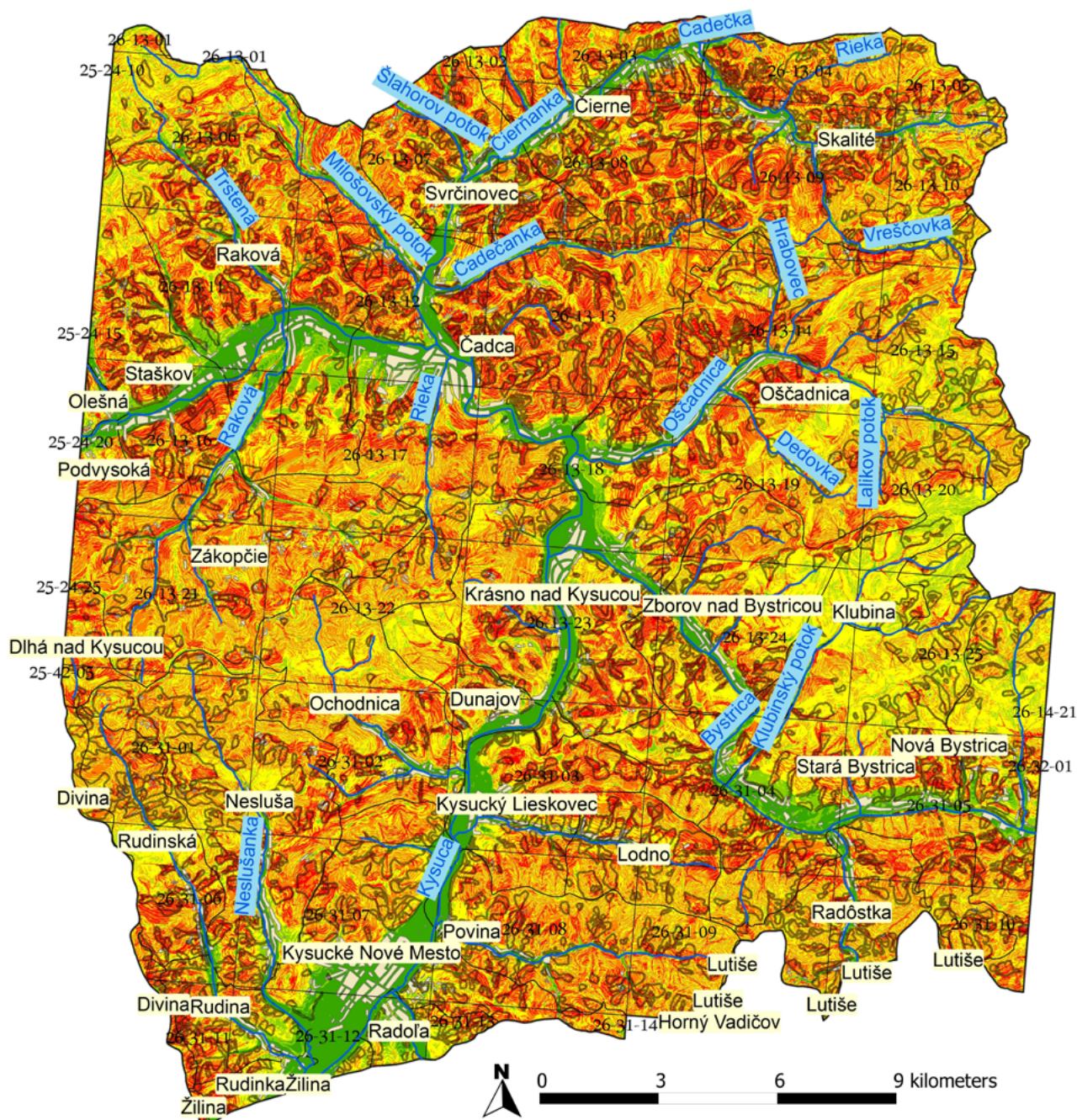
Tento parameter reprezentuje dynamiku povrchového toku vody po reliéfe (spomaľovanie, zrýchľovanie, konvergenciu

a divergenciu) a využíva sa pri hodnotení náchylnosti územia na rôzne druhy vodnej plošnej a výmolinej erózie pôdy (Mitášová et al., 1995). Ide o kombináciu horizontálnej a vertikálnej roviny a pre účel tejto štúdie boli výsledné krivosti reklasifikované do troch kategórií – konvexnej (kladné hodnoty), konkávnej (záporné hodnoty) a lineárnej (inflexné oblasti, hodnoty blízke 0). Krivosti reliéfu boli generované vo forme rastra príkazom *v.surf.rst*. Spojnice inflexných bodov (s hodnotou krivosti = 0) udávajú izolínie s nulovým zakrivením reliéfu a oddeľujú od seba konvexné a konkávne formy, ktoré sú z hľadiska posudzovania náchylnosti územia na zosúvanie najdôležitejšie (Paudiš, 2005). Pre reklasifikáciu boli použité intervaly:

1. konkávne formy: < - 0,00025;
2. lineárne formy: - 0,00025 až 0,00025;
3. konvexné formy: > 0,00025.

V modelovom území regiónu Kysuce sú konkávne a konvexné formy reliéfu zastúpené rovnomerne s veľmi malou prevahou konvexných foriem, ako je viditeľné v tab. 7.





### Stupeň hazardu/Landslide hazard:

■ veľmi nízky / very low  
 ■ nízky / low  
 ■ stredný / medium  
 ■ vysoký / high  
■ veľmi vysoký / very high

Ostatné/Others:  osídlenie/settlement  
 vodné toky/streams  
 zosuvy/landslides

26-13-22 listoklad ZM 1: 10 000 / index map ZM 1: 10 000

Obr. 2. Prognózná mapa zosuvného hazardu regiónu Kysúc zostavená bivariačnou štatistickou analýzou

Fig. 2. Prognostic landslide hazard map of Kysuce region using bivariate statistical analysis



### 3.3. Súčasná krajinná štruktúra

Súčasná krajinná štruktúra vyjadruje aktuálne využitie krajiny, vrátane vegetačného porastu. Tento parameter je veľmi dynamický, podlieha relatívne rýchlo zmenám v čase, a preto je nevyhnutné používať čo najaktuálnejšie podklady pri jeho spracovaní. Jednoznačne najspoľahlivejším zdrojom sú aktuálne letecké a družicové snímky, resp. ortofotomapy modelového územia.

Podkladom pre spracovanie parametrickej mapy súčasnej krajinnnej štruktúry bola vektorová mapa polohopisu spracovaná na základe ortofotomáp v mierke 1:5 000. Prevedenie vektora na raster prebehlo príkazom v.to.rast.

V modelovom území je vyčlenených 8 prvkov súčasnej krajinnnej štruktúry: (1) cestná sieť, (2) osídlenie, (3) lúky, (4) orná pôda, (5) lesy, (6) záhrady, (7) vodné toky a (8) železničná sieť.

Z plošnej distribúcie prvkov súčasnej krajinnnej štruktúry vyplýva, že najväčšiu časť modelového územia pokrývajú lesy (59,48 %), lúky (18,77 %) a orná pôda (14,71 %). Osídlenie je koncentrované len na ploche menšej ako 31 km<sup>2</sup>, čo predstavuje menej ako 6 % plochy územia (Tab. 8).

### 3.4. Svahové deformácie

Mapa svahových deformácií bola poslednou mapou, ktorá vstúpila do štatistického hodnotenia, či už pri bivariačnej alebo multivariačnej analýze. V modelovom území regiónu Kysuce predstavuje mapa svahových deformácií binárnu závislú (dichotomickú) premennú, s ktorou sa v procese štatistickej analýzy porovnávajú všetky vstupné parametrickej mapy súčasne pri multivariácii, alebo samostatne pri bivariácii. Binárna rastrová mapa svahových deformácií obsahuje iba hodnoty typu boolean 0 a 1 (False/True), kde hodnota 1 predstavuje existenciu zosuvu v bunke rastra a hodnota 0 jeho absenciu. Zosuvy boli vektorizované vo forme polygónov bez rozlíšenia odlučných hrán, teda ako celé zosuvné telesá (Bednarik & Pauditš, 2010)

Aktuálne je svahovými deformáciami postihnutých 22,21 %, čo predstavuje 119,98 km<sup>2</sup> plochy modelového územia regiónu Kysuce. Prevládajú najmä plošné zosuvy, ktoré tvoria viac ako 60 % aktuálne registrovaných zosuvov. Takmer 20 % tvoria zosuvy frontálne. (Tab. 9).

## 4. VÝSLEDKY

### 4.1. Bivariačná analýza s určením váh jednotlivých parametrov

Pri hodnotení zosuvného hazardu bivariačnou štatistickou analýzou bolo potrebné určiť váhy jednotlivých parametrov. Pre študované územie bol použitý matematický prístup s určením váh parametra ako celku, podľa postupu autorov Vlčko et al. (1980). Spôsob určenia váhy parametra ako celku vychádza z definovania miery entropie, ktorá predstavuje mieru priblíženia k normálnemu rozdeleniu pravdepodobnosti ( $p_{ij}$ ). Entropia predstavuje mieru neusporiadanosti systému, určitý stupeň chaosu. Vyjadruje teda, ktorá zo zložiek systému prírodného prostredia

je najnáchylnejšia vyvolať svahové pohyby. Celý postup určenia váh je opísaný v nasledujúcich desiatich bodoch:

1. Zadefinovanie počtu základných zložiek systému ( $m$ ) prírodného prostredia vytvárajúcich podmienky na vznik svahových pohybov (litologické celky, sklony svahov, hypsografické stupne – nadmorské výšky a ďalšie).
2. Rozdelenie základných zložiek do tried ( $s_j$ ) – prvotná reklasifikácia, kde  $j = 1, \dots, n$
3. Určenie pravdepodobnosti vzniku svahových deformácií v rámci jednotlivých tried ( $p_{ij}$ ),  $i = 1, \dots, m$ ,  $j = 1, \dots, n$   
 $p_{ij}$  – je diskretná funkcia, vyjadrujúca pomer plochy svahových deformácií  $P_{sd}$  k celkovej ploche príslušnej triedy  $P_t$ :

$$p_{ij} = \frac{P_{sd}}{P_t} \quad (2)$$

4. Výpočet hustoty pravdepodobnosti ( $p_{ij}$ ). Hustota pravdepodobnosti predstavuje pomer pravdepodobnosti vzniku svahových deformácií v istej triede k sume pravdepodobností v rámci celej skúmanej zložky prostredia:

$$(p_{ij}) = \frac{P_{ij}}{\sum_{j=1}^{s_j} p_{ij}} \quad (3)$$

5. Určenie hodnoty entropie, ktorá predstavuje mieru priblíženia k normálnemu rozdeleniu pravdepodobnosti ( $p_{ij}$ ), teda určuje, ktorá zo zložiek systému prírodného prostredia je najnáchylnejšia vyvolať svahové pohyby:

$$H_j = -\sum_{i=1}^{s_j} (p_{ij}) \log_2 (p_{ij}), j = 1, \dots, n \quad (4)$$

6. Výpočet maximálnej entropie:

$$H_{j\max} = \log_2 s_j, s_j - \text{počet tried} \quad (5)$$

– maximálnu hodnotu má entropia pre  $p_{ij} = 1$

7. Následne, rozdiel medzi  $H_{j\max}$  a  $H_j$  udáva informáciu o nerovnorodosti prostredia. Čím je tento rozdiel väčší, tým je pravdepodobnosť vzniku svahových pohybov väčšia.
8. Stanovenie informačného koeficientu ( $I_j$ ):

$$I_j = \frac{H_{j\max} - H_j}{H_{j\max}}, I = (0,1), j = 1, \dots, n \quad (6)$$

Čím sa hodnota  $I$  blíži viac k hodnote 1, tým väčšia je možnosť porušenia stability systému.

9. Výpočet priemernej pravdepodobnosti jednotlivých tried  $\bar{p}_{ij}$ .
10. Určenie váhy – váha vyjadruje náchylnosť skúmaných zložiek prírodného prostredia na vznik svahových pohybov:

$$V_j = I_j \bar{p}_{ij} \quad (7)$$

Tab. 10. Váhy jednotlivých parametrov vstupujúcich do bivariablej analýzy (podľa Vlčka et al., 1980).

Tab. 10. Weights of the parameters entering bivariate analyzes (according to Vlčko et al., 1980).

Zložky Constituents	Triedy Class	Pij	(Pij)	Hj	Hj max	Priem.Pij	Ij	Vj
litologické celky lithological units	1	0,0061	0,0075	2,1654	3,1699	0,0903	0,3169	0,0286
	2	0,3137	0,3861					
	3	0,0129	0,0158					
	4	0,0136	0,0168					
	5	0,0918	0,1130					
	6	0,2093	0,2576					
	7	0,1561	0,1921					
	8	0,0000	0,0000					
	9	0,0090	0,0111					
využitie krajiny landuse	1	0,1195	0,1162	2,6035	3,0000	0,1285	0,1322	0,0170
	2	0,1028	0,1000					
	3	0,2593	0,2521					
	4	0,2207	0,2146					
	5	0,2249	0,2187					
	6	0,0500	0,0486					
	7	0,0059	0,0058					
	8	0,0452	0,0440					
mnv dmr	1	0,1372	0,0847	3,0768	3,1699	0,1800	0,0294	0,0053
	2	0,2568	0,1585					
	3	0,2376	0,1467					
	4	0,2200	0,1358					
	5	0,1933	0,1193					
	6	0,1991	0,1229					
	7	0,1806	0,1115					
	8	0,1464	0,0904					
	9	0,0490	0,0302					
sklon svahov slope	1	0,0041	0,0029	2,7862	3,1699	0,1552	0,1211	0,0188
	2	0,0208	0,0149					
	3	0,0607	0,0434					
	4	0,1202	0,0860					
	5	0,2282	0,1633					
	6	0,2645	0,1893					
	7	0,2631	0,1883					
	8	0,2319	0,1660					
	9	0,2037	0,1458					

Zložky Constituents	Triedy Class	Pij	(Pij)	Hj	Hj max	Priem.Pij	Ij	Vj
orientácia svahov aspect	1	0,3750	0,1742	3,1405	3,1699	0,2392	0,0093	0,0022
	2	0,1939	0,0901					
	3	0,2281	0,1060					
	4	0,2309	0,1073					
	5	0,2437	0,1132					
	6	0,2383	0,1107					
	7	0,2344	0,1089					
	8	0,2139	0,0994					
	9	0,1942	0,0902					
krivosť reliéfu curvature of relief	1	0,3610	0,5540	1,4036	1,5850	0,2172	0,1144	0,0248
	2	0,1920	0,2947					
	3	0,0985	0,1513					
dĺžky svahov slope lengths	1	0,1358	0,1084	2,5637	2,5850	0,2088	0,0082	0,0017
	2	0,2040	0,1629					
	3	0,2328	0,1859					
	4	0,2354	0,1879					
	5	0,2191	0,1749					
	6	0,2255	0,1800					
prispievajúce plochy contributing area	1	0,1250	0,0926	2,4468	2,5850	0,2250	0,0534	0,0120
	2	0,3030	0,2244					
	3	0,3756	0,2782					
	4	0,2605	0,1929					
	5	0,1838	0,1361					
	6	0,1023	0,0758					

Takto vypočítané hodnoty váh jednotlivých parametrických máp sú dosadzované ako hodnota  $V_i$  do rovnice záverečného súčtu pri bivariačnej štatistickej analýze (rovnica 1). Celý výpočet určenia váhy pre jednotlivé parametre je uvedený v tab. 10.

Výsledná mapa zosuvného hazardu bola vytvorená súčtom súčtov sekundárne reklasifikovaných parametrických máp a hodnôt váh jednotlivých parametrov. Mapa bola vytvorená pomocou príkazu `r.mapcalc`. Pri tvorbe mapy zosuvného hazardu na modelovom území regiónu Kysuce bola použitá rovnica 1.

Výsledkom súčtu je spojitý interval hodnôt od 0,205930497 do 0,787055845, reprezentujúcich rôzny stupeň zosuvného hazardu. Tento interval je potrebné vizualizovať do piatich konvenčne dohodnutých tried, ktoré reprezentujú náchylnosť územia na zosúvanie.

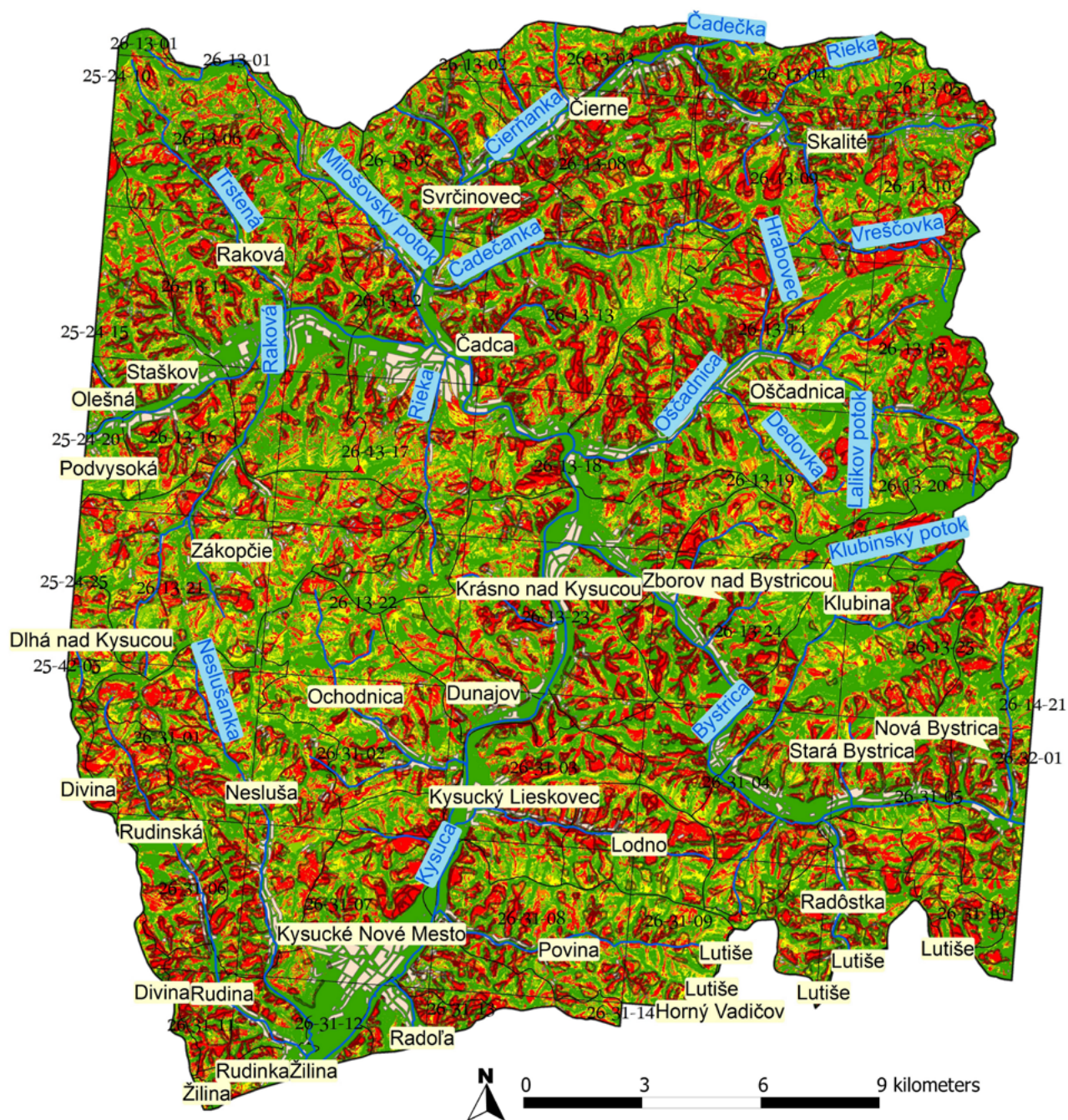
Aplikáciou bivariačnej štatistickej analýzy bolo z jednotlivých výsledkov hodnotenia zosuvného hazardu na modelovom území regiónu Kysuce zistené, že najpriaznivejšie podmienky pre vznik svahovej deformácie vytvárajú deluviálne sedimenty, nadmorské výšky od 438 do 538 m n. m., svahy dĺžky 100–500 m

orientované na západ so sklonom 11–17° pri konkávných formách reliéfu s prispievajúcimi plochami (mikropovodiami) o veľkosti 100–500 m<sup>2</sup> v oblastiach kde sa krajina využíva ako lúka.

Najstabilnejšie podmienky v modelovom území vytvárajú sedimenty morského vývoja (slienovec, vápence, radiolarity), nadmorské výšky od 1138 do 1239 m n. m., svahy dĺžky viac ako 2000 m, orientované na východ (pokiaľ roviny neberieme do úvahy), sklony menej ako 2°, pri lineárnych formách reliéfu, s prispievajúcimi plochami (mikropovodiami) s rozlohou viac ako 2000 m<sup>2</sup>, v oblastiach kde sa krajina využíva ako záhrada. Výsledná mapa zosuvného hazardu zostavená bivariačnou metódou je zobrazená na obr. 2.

#### 4.2. Multivariačná podmienková analýza

Zo skupiny multivariačných štatistických analýz bola aplikovaná podmienková analýza, ktorá je založená na kombinácii všetkých vstupných parametrických máp súčasne (litológia, sklony svahov územia, nadmorské výšky, a iné), s následným



### Stupeň hazardu/Landslide hazard:

- veľmi nízky / very low   
 ■ nízky / low   
 ■ stredný / medium   
 ■ vysoký / high  
■ veľmi vysoký / very high

- Ostatné/Others:**   osídlenie/settlement   
  vodné toky/streams   
   zosuvy/landslides

26-13-22 listoklad ZM 1: 10 000 / index map ZM 1: 10 000

Obr. 3. Prognózná mapa zosuvného hazardu regiónu Kysuce zostavená multivariálnou štatistickou analýzou

Fig. 3. Prognostic landslide hazard map of Kysuce region using multivariate statistical analysis

Tab. 11. Úspešnosť prognóznjej mapy zosuvného hazardu zostavenej bivariačnou metódou.

Tab. 11. Success of prognostic landslide hazard map using bivariate statistical analysis.

Stupeň zosuvného hazardu Landslide hazard degree	Zastúpenie registrovaných svahových deformácií v jednotlivých triedach prognóznjej mapy Representation of registred slope deformations in the various classes of prognostic maps
veľmi nízky very low	0,09 %
nízky low	1,34 %
stredný intermediate	13,06 %
vysoký high	39,42 %
veľmi vysoký very high	46,10 %

Tab. 12 Úspešnosť prognóznjej mapy zosuvného hazardu zostavenej multivariačnou metódou.

Tab. 12. Success of prognostic landslide hazard map using multivariate statistical analysis.

Stupeň zosuvného hazardu Landslide hazard degree	Zastúpenie registrovaných svahových deformácií v jednotlivých triedach prognóznjej mapy Representation of registred slope deformations in the various classes of prognostic maps
veľmi nízky very low	4,16%
nízky low	8,70%
stredný intermediate	10,85%
vysoký high	12,21%
veľmi vysoký very high	64,08%

rozšírením informácií na územie, kde neboli vymapované žiadne zo svahových pohybov. Pri multivariačnej štatistickej analýze nevstupuje do hodnotenia geohazardu proces vázenia.

Kombinované boli rastrové modely obsahujúce priestorové informácie o geologických pomeroch, morfometrické parametre reliéfu (model nadmorských výšok, sklon svahov, orientácia svahov, dĺžky svahov a prispievajúce plochy, krivosti reliéfu), súčasná krajinná štruktúra a svahové deformácie. Z tejto kombinácie vznikli spomínané kvázihomogénne jednotky (UCU) jednoduchým preložením rastrových modelov. V dôsledku vysokého počtu vstupných parametrov vstupujúcich do štatistického hodnotenia mapa UCU obsahovala viac ako 200 000 možných kombinácií vstupných parametrov. Multivariačná analýza bola spracovaná pomocou príkazu r.stats.

Aplikáciou multivariačnej metódy bolo zistených až 3908 možných kombinácií vstupných parametrov so 100 % pravdepodobnosťou vzniku svahovej deformácie. Toto vysoké číslo je spôsobené vysokým počtom vstupných parametrov. Ako príklad je uvedená kombinácia 6 2 3 3 2 1 3 3, ktorá predstavuje flyšové sedimenty v oblasti osídlenia, nadmorské výšky od 451 do 610 m n. m., sklon svahov od 5 do 7° orientovaných na sever, konkávne formy reliéfu, s dĺžkou svahov a veľkosťou prispievajúcich plôch od 500 do 1000 m respektíve m<sup>2</sup>. Výsledná prognóznja mapa zosuvného hazardu pre región Kysúc vypracovaná multivariačnou štatistickou analýzou je zobrazená na obr. 3.

## 5. INTERPRETÁCIA A DISKUSIA

Výsledné zhodnotenie zosuvného hazardu bolo vypracované pomocou prognóznnych rastrových máp s veľkosťou základnej

bunky 10x10 m. Záverečné rozdelenie do tried náchylnosti prebehlo zaužívaným semaforovým spôsobom do 5 tried s rozdelením územia na veľmi nízky, nízky, stredný, vysoký a veľmi vysoký stupeň zosuvného hazardu.

Na verifikáciu stupňa úspešnosti zostavených prognóznnych máp zosuvného hazardu bol použitý jednoduchý, ale veľmi účinný spôsob overenia prognóznnej mapy a to porovnanie resp. prekrytie s rastrovou mapou registrovaných svahových deformácií. Pri verifikácii sa porovnáva plocha zosuvov z rastrovej mapy registrovaných svahových deformácií s plochou, ktorú zaberá vysoký a veľmi vysoký stupeň zosuvného hazardu teda trieda 4 a 5 v prognóznnej mape.

Prognóznja mapa zosuvného hazardu zostavená bivariačnou metódou má úspešnosť 85,52 % (Tab. 11), čo znamená, že viac ako 85 % aktuálne registrovaných svahových deformácií sa nachádza v triedach 4 a 5, teda v triedach s vysokým resp. veľmi vysokým stupňom zosuvného hazardu. Rovnaký spôsob overenia bol použitý aj pri prognóznnej mape zosuvného hazardu zostavenej multivariačnou metódou. Úspešnosť tejto mapy je 76,21 % (Tab. 12). Napriek tomu, zhodnotením dosiahnutých výsledkov vyplynula výhoda multivariačnej podmienkovej analýzy, ktorá zobrazila náchylnosť územia na vznik svahovej deformácie detailnejšie a hranice medzi jednotlivými triedami stupňa sú presnejšie a citlivejšie. Aj keď celková úspešnosť prognóznnej mapy zosuvného hazardu zostavenej multivariačnou metódou je nižšia, jej úspešnosť v oblastiach s veľmi vysokým stupňom zosuvného hazardu je oproti prognóznnej mape zostavenej bivariačnou metódou vyššia o takmer 18 %. Na základe toho možno konštatovať, že prognóznja mapa zosuvného hazardu zostavená bivariačnou metódou je mierne predimenzovaná, čo môže byť spôsobené najmä vysokým počtom vstupných parametrov,



pretože rozdelenie do tried náchylnosti na zosúvanie prebehlo pri oboch mapách rovnakým spôsobom a to použitím rozdelenia na základe natural breaks.

V práci Pauditša (2005) sa multivariačná analýza javí takisto presnejšia, ako tomu bolo v prípade tejto štúdie. V práci Pauditša a Bednarika (2002) a Bednarika (2011) boli úspešne použité obe metódy.

## 6. ZÁVER

V štúdiu bol zosuvný hazard spracovaný kvantitatívnymi metódami, z ktorých najpoužívanejšie sú štatistické analýzy. Bola použitá bivariačná a multivariačná analýza. Podobne ako väčšina metód hodnotenia územia na svahové deformácie aj tieto metódy vychádzajú z princípu aktualizmu, teda z predpokladu, že svahové poruchy sa budú v budúcnosti vyskytovať s väčšou pravdepodobnosťou v podmienkach, v ktorých vznikali v minulosti, alebo vznikajú v prítomnosti. Multivariačná analýza je založená na kombinácii všetkých vstupných parametrov súčasne ich vzájomným prekrytím. V prípade bivariačnej analýzy boli porovnávané a štatisticky vyhodnocované všetky parametrické mapy s mapou svahových deformácií. Pri oboch analýzach vstupovalo do štatistického hodnotenia 8 parametrov v podobe parametrických rastrových máp. Konkrétne to boli: geologické pomery (mapa litologických celkov), morfometrické parametre reliéfu (model nadmorských výšok, sklon svahov, orientácia svahov, dĺžky svahov a prispievajúce plochy, krivosti reliéfu) a súčasná krajinná štruktúra. Parametrické mapy definuje 3250x3000 buniek s veľkosťou základnej bunky 10x10 m Celková rozloha modelového územia je 540,2 km<sup>2</sup>.

Štatistické hodnotenie bolo spracované v prostredí GRASS GIS, ktorý patrí do kategórie tzv. Open Source programov, čo znamená, že je voľne distribuovaný. Systém je možné prevziať prostredníctvom Internetu, voľne ho používať a to aj na komerčné účely a ďalej distribuovať. Zdrojové kódy, ako aj prekompilované verzie pre OS Linux aj komerčné operačné systémy (vrátane Microsoft Windows./Cygwin) sú k dispozícii na súčasnej domovskej internetovej stránke (<http://grass.fbk.eu/>). V štúdiu je opísaný postup vypracovania prognózne mapy zosuvného hazardu vrátane použitých príkazov.

Zo štúdie vyplynulo, že najstabilnejšie podmienky v modelovom území vytvárajú sedimenty morského vývoja (sliedovce, vápence, radiolarity), nadmorské výšky od 1138 do 1239 m n. m., svahy dĺžky viac ako 2000 m, orientované na východ (pokiaľ roviny neberieme do úvahy), sklony menej ako 2°, pri lineárnych formách reliéfu, s prispievajúcimi plochami (mikropovodiami) s rozlohou viac ako 2000 m<sup>2</sup>, v oblastiach kde sa krajina využíva ako záhrada. Naopak najpriaznivejšie podmienky pre vznik svahovej deformácie vytvárajú deluviálne sedimenty, nadmorské výšky od 438 do 538 m n. m., svahy dĺžky 100–500 m orientované na západ so sklonom 11–17° pri konkávných formách reliéfu s prispievajúcimi plochami (mikropovodiami) o veľkosti 100–500 m<sup>2</sup> v oblastiach kde sa krajina využíva ako lúka.

**Podakovanie:** Príspevok vznikol s podporou projektov Agentúry na podporu výskumu a vývoja č. APVV-0330-10 a VEGA č. 1/0910/11

financovaných Ministerstvom školstva, vedy, výskumu a športu Slovenskej republiky a Grantu UK/30/2013.

## Literatúra

- Ayalew L., Yamagishi H. & Ugawa, N., 2004: Landslide susceptibility mapping using GIS based weighted linear combination, the case in Tsugawa area of Agano River, Niigata Prefecture, Japan. *Landslides*, 1, 73–81.
- Bednarik M., Clerici A., Tellini C. & Vescovi, P., 2005: Using GIS GRASS in evaluation of landslide susceptibility in Termina valley in the Northern Apennines (Italy). In: *Proceedings of the Conference on Engineering Geology: Forum for young engineering geologists* (Moser, M. ed.). DGGT Erlangen-Nürnberg, Fridrich – Alexander – University of Erlangen-Nürnberg, April 6<sup>th</sup> to 9<sup>th</sup>, 19–24.
- Bednarik M., 2007: Hodnotenie zosuvného rizika pre potreby územnoplánovacej dokumentácie. Bratislava: PRIF UK, Kandidátska dizertačná práca.
- Bednarik M., Magulová B., Matys M. & Marschalko M., 2010: Landslide susceptibility assessment of the Kralovany–Liptovský Mikuláš railway case study. In: *Physics and Chemistry of the Earth*, Vol. 35, issues 3-5, Elsevier Ltd., ISSN 1474-7065.
- Bednarik M. & Pauditš P., 2010: Different ways of landslide geometry interpretation in a process of statistical landslide susceptibility and hazard assessment: Horná Súča (western Slovakia) case study. In: *Environmental Earth Sciences*. - Vol. 61, No. 4, 733-739.
- Bednarik M., 2011: Štatistické metódy pri hodnotení zosuvného hazardu a rizika. Bratislava: PRIF UK, Habilitačná práca.
- Carrara A., 1983: Multivariate models for landslide hazard evaluation. *Mathematical Geology*, 15(3):403-427.
- Carrara A., 1988: Landslide hazard mapping by statistical method: A „Black Box“ approach. In: *Proceedings of workshop on Natural Disaster in European Mediterranean Countries*, Conzilio Nazionale delle Ricerche, Perugia, Italy, 205-224.
- Carrara A., Cardinali M., Detti R., Guzzetti F., Pasqui V. & Reichenbach, P., 1990: Geographical information systems and multivariate models in landslide hazard evaluation. In: *ALPS 90 (Alpine Landslide Practical Seminar) Proceedings of the 6th International Conference and Field Workshop on Landslide*. Università degli Studi de Milano, Italy, August 31-September 12, 17-28.
- 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: A GRASS GIS based shell script for landslide susceptibility zonation by the conditional analysis method. In: Ciolli, M., Zetelli, P. (eds.), *Proceedings of the Open source GIS GRASS users conference*, Trento, Italy.
- Constantin M., Bednarik M., Jurchescu M. & Vlaicu M., 2011: Landslide susceptibility assessment using the bivariate statistical analysis and the index of entropy in the Sibiciu Basin (Romania). *Environmental Earth Sciences*. - Vol. 63, No. 2, 397-406.
- Dai F.C., Lee C.F. & Xu Z.W., 2001: Assessment of landslide susceptibility on the natural terrain of Lantau island, Hong Kong. *Environmental Geology*, 40(3):381-391.
- Donati L. & Turrini M.C., 2002: An objective method to rank the importance of the factors predisposing to landslides with the GIS methodology: application to an area of the Apennines (Valnerina; Perugia, Italy). *Engineering Geology*, 63:277-289.
- GRASS Development Team, 2012. Geographic Resources Analysis Support System (GRASS) Software, Version 6.4.2. Open Source Geospatial Foundation. <http://grass.osgeo.org>

- Grman D., Boszák M., Magdošková M., Takáč P., Waníková 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. Objednávateľ: MŽP SR
- Guzzetti F., Carrara A., Cardinali M. & Reichenbach P., 1999: Landslide hazard evaluation: A review of current techniques and their application in a multi-case study, central Italy. *Geomorphology*, 31:181-216.
- Hofierka J., 2003: Geografické informačné systémy a diaľkový prieskum Zeme. Vysokoškolské učebné texty. Prešovská Univerzita. Fakulta humanitných a prírodných vied. ISBN 80-8068-219-4.
- Káčer Š., Antalík M., Lexa J., Zvara I., Fritzman R., Vlachovič J., Bystrická G., Brodianska M., Potfaj M., Madarás J., Nagy A., Maglay J., Ivanička J., Gross P., Rakús M., Vozárová A., Buček S., Boorová D., Šimon L., Mello J., Polák M., Bezák V., Hók J., Teťák F., Konečný V., Kučera M., Žec B., Elečko M., Hraško L., Kováčik M. & Pristaš, J., 2005: Digitálna geologická mapa Slovenskej republiky v M 1 : 50 000 a 1 : 500 000. MŽP SR, ŠGÚDŠ.
- Krcho J., 1990: Morfometrická analýza a digitálne modely georeliéfu. VEDA. Vydavateľstvo SAV, Bratislava.
- Krcho J., 1999: Modelling of georelief using DTM – the influence of point configuration of input points field on positional and numeric accuracy. In: *Geografický časopis*, 51 (3), 225 – 260.
- Lee C.F. & Min K., 2001: Statistical analysis of landslide susceptibility at Yongin, Korea. *Environmental Geology*, 40:1095-1113.
- Matula M., Ondrášik R., Holzer R., Wagner P., Hrašna M. & Letko V., 1983: Metódy inžinierskogeologického výskumu. Vysokoškolské skriptá. PRIF UK Bratislava.
- Mitasova H., Mitas L., Brown W. M., Gerdes D. P., Kosinovsky I. & Baker T., 1995: Modelling spatially and temporally distributed phenomena: New methods and tools for GRASS GIS. *International journal of GIS*, 9(4):433 - 446.
- Paudits P. & Bednarik M., 2002: Using GRASS in evaluation of landslide susceptibility in Handlovská kotlina basin. In: Proceedings of the Open source GIS - GRASS users conference, Trento, Italy.
- Paudits P., 2005: Hodnotenie náchylnosti územia na zosúvanie s využitím štatistických metód v prostredí GIS. Bratislava: PRIF UK, Kandidátska dizertačná práca.
- Potfaj M. (ed.), Šlepecký T., Maglay J., Hanzel V., Boorová D., Žecová K., Kohút M., Nagy A., Teťák F., Vass B., Sandanus M., Buček S., Sýkora M., Kohler E., Fejdiová O., Kandra K., Samuel O., Bubík M., Beleš F. Vysvetlivky ku geologickej mape regiónu Kysuce 1: 50 000. ŠGÚDŠ, Bratislava, 2003. 5-193
- Süzen M.L. & Doyuran V., 2004: A comparison of the GIS based landslide susceptibility assessment methods: multivariate versus bivariate. *Environmental Geology*, 45(5):665-679.
- Vlčko J., Wagner P. & Rychlíková Z., 1980: Spôsob hodnotenia stability svahov väčších územných celkov. *Mineralia Slovaca*, 12(3):275-283.

**Summary:** Landslides are an environmental phenomenon of great socio-economic significance in many world regions. For this reason they attract the interest of a wide range of professionals, including engineers, geologists, geomorphologists, planners and policy makers. Besides the studies to improve investigation techniques and mitigative measures, there has been a constant development of quantitative methods to assess the probability of future landslide occurrence. These methods can be divided into two main distinct categories: the deterministic and the statistical methods. The former base their predictions on empirical

geotechnical laws that require the collection of geotechnical parameters. The extreme variability in three dimensional space of geotechnical characteristics means that their application to wide areas tends to be expensive and so this kind of analysis is usually limited to small areas and, more often than not, to single slopes. The statistical methods, on the other hand, and especially the multivariate ones, appear to be better suited for assessing landsliding probability on a regional scale. In recent decades a remarkable leap forward has been made with these methods because of the diffusion of progressively more efficient and cheaper GISs.

In this study one of the best GIS softwares called GRASS GIS (Geographic Resources Analysis Support System) was used. GRASS GIS is free Geographic Information System software used for geospatial data management and analysis, image processing, graphics/maps production, spatial modeling, and visualization. Originally it was developed by the branch of the US Army Corp of Engineers, as a tool for land management and environmental planning by the military, GRASS GIS has evolved into a powerful utility with a wide range of applications in many different areas of scientific research. GRASS GIS is currently used in academic and commercial settings around the world, as well as by many governmental agencies and environmental consulting companies.

The methodology of landslide hazard assessment using statistical methods in a GIS environment is based on an appropriate choice of the factors affecting the stability of slopes. Statistical processing of landslide hazard assessment is based on the geological principle of phenomena and processes, that is true, that landslides will occur in places where they occurred in the past respectively in present because of similar activation conditions. Selected factors, which can create or develop slope movements are processed into a form of parametric maps and like this they are entering into the process of statistical evaluation using map algebra in GIS the environment. According to the chosen statistical method a comparison of parametric maps factors with the landslide inventory map of model area is following. Conclusions resulting from statistical comparisons are extrapolated to the whole area of Kysuce region and the result is a prognostic hazard map.

The statistical methods are the best if we are working in a regional scale. In this case the area is region Kysuce. Kysuce region has an area of 935 square kilometers. Elevation range is from 325 m n. m. in up to 1236 m n. m. In the study two statistical analyses were used: multivariate conditional analysis and bivariate analysis using the weights of input parameters.

Applying bivariate statistical analysis was founded that the most favorable conditions for the development of slope deformation are creating diluvial sediments, altitude 438-538 m n. m., slope length from 100 to 500 m west-oriented with slope of 11 to 17 ° in concave relief forms with contributing areas from 100 to 500 square meters in areas where the land is used as grassland. The most stable conditions in the model area form marine sediments (marly limestone, radiolarite), altitude from 1138 to 1239 m n. m., slope length greater than 2000 m, oriented to the east with repose less than 2° in linear forms of relief, with contributing areas bigger than 2000 m<sup>2</sup>, in areas where land used as a garden.

Applying multivariate conditional analysis 3908 possible combinations of input parameters with a 100% probability of slope failures were identified. This high number is due to the high number of input parameters. As an example is provided a combination of 6 2 3 3 2 1 3 3, which represents the flysch sediments in the settlement area, altitude from 451 to 610 meters above sea level with slope from 5 to 7 ° oriented to the North, concave landforms, slope length and sizes of conducive areas from 500 to 1000 meters respectively square meters.