

Použití logistické regrese pro hodnocení náchylnosti k sesouvání ve střední části Chřibů (Česká republika)

Aleš Havlín¹, Martin Bednarik², Barbora Magulová² & Ján Vlčko²

¹Česká geologická služba, Leitnerova 22, Brno 658 69; ales.havlin@geology.cz

²Katedra inžinierskej geológie, Prírodovedecká fakulta, Univerzita Komenského v Bratislave, Mlynská dolina G, 842 15 Bratislava

AGEOS Application of logistic regression for landslide susceptibility assessment in the middle part of Chriby Mts. (Czech Republic)

Abstract: The paper presents use of logistic regression and analysis tools implemented in the Geographic Information System (GIS) environment for landslide susceptibility assessment. As a case study, the middle part of the Chriby Mountains (Czech Republic) widely affected by landslides was selected, with a total area of 147 km². The landslide susceptibility assessment is based on the comparison and statistical elaboration of territorial dependence on input factors influencing the instability of the slopes. In this study, the lithology, slope angle, distance to stream, hypsographic level, and the current land cover were evaluated as the factors influencing slope stability and their susceptibility to sliding. The comparison shows that the high susceptibility to sliding is primarily in the areas of potential landslides and active, while 62 % of existing slope failures are created in areas highly susceptible to sliding, 32 % are in areas susceptible to moderate sliding. The remaining 6 % of the landslides are located in low areas prone to sliding. This may be the accumulation parts of landslide bodies. An overall assessment of the 33 % of the area can be classified as having a high degree of susceptibility to the sliding surface and 35 % as moderately susceptible to landsliding. Low degree of susceptibility to sliding represents the remaining 32 % area of the territory.

Key words: landslide susceptibility assessment, logistic regression, Geographic Information System, Chriby Mountains, Czech Republic

1. ÚVOD

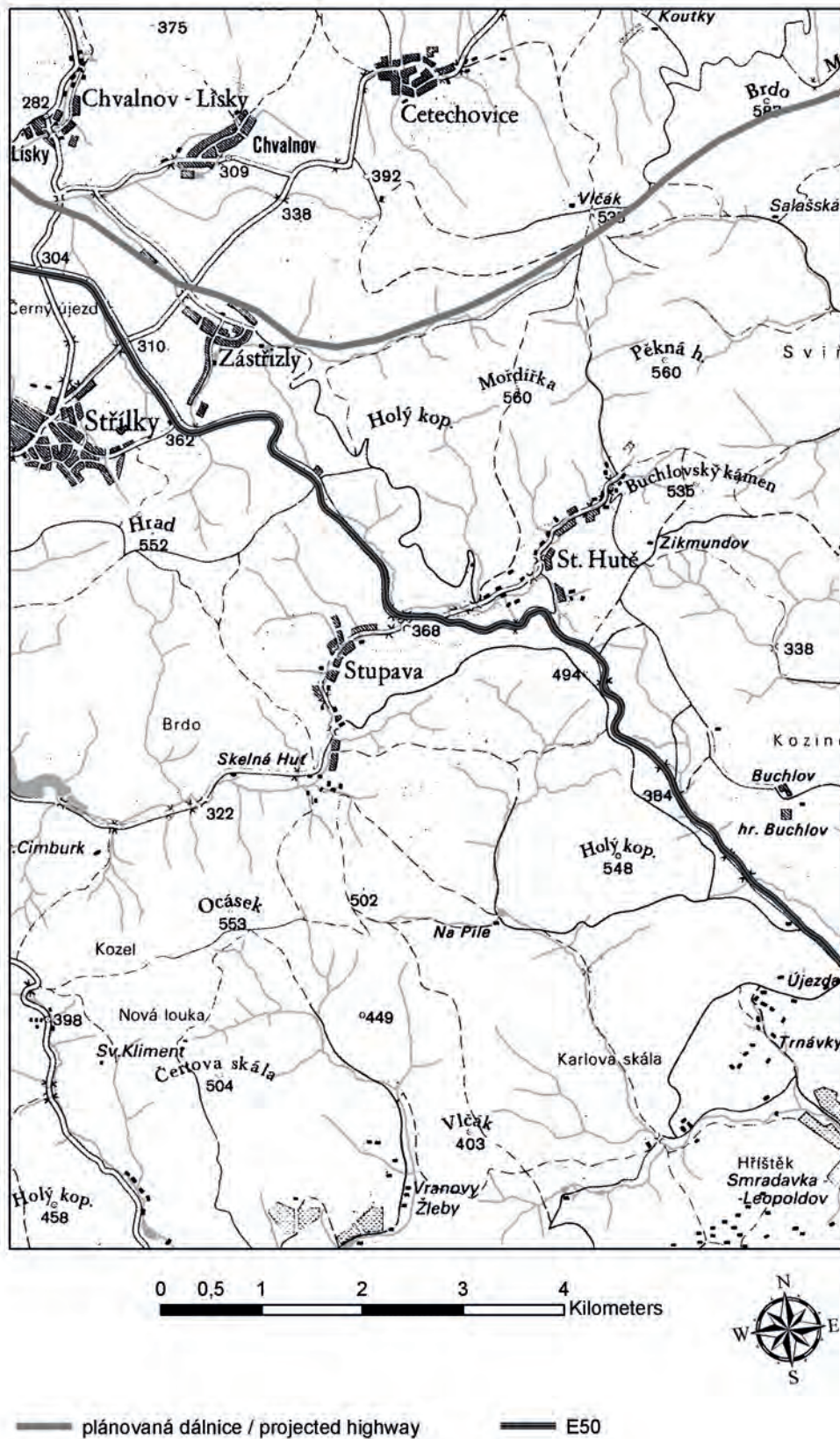
Hodnocení náchylnosti geologického prostředí k sesouvání má v současné době čím dál větší význam především v souvislosti se stále častějšími extrémními srážkovými událostmi následovanými nejen reaktivací množství sesuvů, ale i významným podílem tvorby nových svahových deformací. Nejčastější a neefektivnější způsoby hodnocení náchylnosti k sesouvání jsou založené na principech statistických metod pomocí mapové algebry v prostředí GIS. Tyto vycházejí z principu aktualismu geologických jevů a procesů, tedy platí, že sesuvy se budou pravděpodobně vyskytovat na místech, kde se vyskytovaly v minulosti resp. v současnosti za podobných podmínek aktivizace.

V zahraniční literatuře se problematice hodnocení a tvorby map sesuvného hazardu, náchylnosti a rizika pomocí GIS prostředků věnuje mnoho odborníků již po přibližně tři desetiletí. Mezi nejvýznamnější patří práce Carrary (1983, 1988), Carrary et al. (1990, 1991, 1995, 1999). Carrarova metodika byla později úspěšně aplikovaná mnoha autory (e.g. Guzzetti et al., 1999; Dai et al., 2002; Castellanos Abella & Van Westen, 2007 a Nandi & Shakoor, 2010). Na Slovensku se ve svých pracích touto tematikou zabývali Jurko (2003), Paudiš (2005), Bednarik (2007), Bednarik et al., (2008, 2010) a Magulová (2010). Z českých autorů tuto tematiku zpracovával Klimeš (2007) na příkladech Vsetínských vrchů, dále např. na území Kostariky Metelka

& Kycl (2006) a Havlín et al. (2009) pro modelové území po obou stranách česko-slovenské hranice.

Předkládaný příspěvek se zabývá hodnocením náchylnosti k sesouvání s použitím logistické regrese. Jako modelové území byla zvolena část pohoří Chřiby (Obr. 1), kterým prochází silnice I. třídy č. 50, která je významnou spojnicí mezi Českou a Slovenskou republikou. V této oblasti byla v roce 1939 zahájena také stavba dálnice, která měla spojit území Čech, Moravy, Slovenska a Podkarpatskou Rus. Stavba byla přerušena v průběhu druhé světové války a později nebyla obnovena mimo jiné z důvodu výskytu rozsáhlých svahových deformací v plánované trase dálnice. Rozestavěné těleso dálnice je dodnes v terénu dobře patrné, je zachováno několik mostků a propustí, které jsou stále ve dobrém technickém stavu.

V současnosti používaná silnice vede územím s komplikovanou geologickou stavbou, kde dochází k častému střídání flyšových sedimentů rozdílných geotechnických vlastností, několika různých souvrství, navíc výrazně tektonicky porušených (Čížek et al., 1982, Woznica, 1980^a, 1980^b, 1981, 1983). Hydrogeologická charakteristika území s výskytem četných pramenů a zamokřených míst také podporuje vznik svahových deformací. K iniciaci svahových deformací v bezprostředním okolí silnice E50 přispívá kromě přírodních faktorů nepochybně i hustá doprava těžkých nákladních vozidel, způsobujících otřesy a vibrace, a tím i zvýšené namáhání vozovky a jejího okolí.



Obr. 1. Lokalizace území.

Fig. 1. Localization map.

2. HODNOCENÍ NÁCHYLNOSTI K SESOUVÁNÍ POMOCÍ LOGISTICKÉ REGRESE

Ze skupiny statistických metod byla vybrána pro hodnocení náchylnosti k sesouvání v prostředí GIS logistická regrese, podobně jako například v pracích Bai et al. (2010), Olhamecher & Davis (2003), nebo Chen & Wang (2007). Logistické regresní modely patří mezi **zevšeobecněné lineární modely** (Generalized Linear Models), které se používají na predikci závislé proměnné Y , která má diskrétní rozdělení (může nabývat pouze omezený počet hodnot od 0 po 1) a má nelineární vztah k prediktoru X . Odhaduje tak pravděpodobnost určité události, jako je např. vznik sesuvu, přičemž využívá sledované faktory spojené s výskytem, a nebo absencí události, aby modelovala pravděpodobnost výskytu vzhledem k různým faktorům. Přesnost metody závisí na vhodném výběru faktorů, které mají vliv na stabilitu svahů. Tyto vstupní faktory jsou zpracovány do formy parametrických map v prostředí GIS, a takto vstupují do procesu statistického hodnocení pomocí mapové algebry. Při použití logistické regrese na modelování sesuvné náchylnosti geologického prostředí dochází k vzájemné kombinaci všech vstupních parametrů ovlivňujících stabilitu svahu, které v tomto případě představují prediktor X , a jejich následným porovnáním s mapou distribuce sesuvů, která v tomto případě představuje závislou proměnnou Y .

Vysvětlení logistické regrese začíná objasněním logistické funkce:

$$f(y) = \frac{e^y}{e^y + 1} = \frac{1}{1 + e^{-y}}$$

kde vstup je y a výstup je $f(y)$. Na proměnnou y působí určitý soubor nezávislých proměnných, přičemž $f(y)$ představuje pravděpodobnost daného výsledku při působení této množiny proměnných. Proměnná y je míra celkového příspěvku všech nezávislých proměnných použitých v modelu, známá jako logit.

Vzhledem k množství nezávislých proměnných p ($x_1, x_2, x_3, \dots, x_p$) definujeme vektor $X = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_p)$. Podmíněná pravděpodobnost, že dojde k sesuvu je vyjádřena jako $P(y = 1/X)$. Průběh logistické funkce vícenásobných modelů logistické regrese je definován jako:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \dots + \beta_k x_k$$

kde β_0 je konstantou rovnice a $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ jsou koeficienty proměnných x_1, x_2, \dots, x_k .

Pravděpodobnost $P(y = 1/X)$ může být vyjádřena v modelu logistické regrese jako:

$$P(y = 1/X) = \frac{1}{1 + e^{-(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \dots + \beta_k x_k)}}$$

3. VSTUPNÍ PARAMETRY

Bylo použito 5 vstupních faktorů, které určitým způsobem ovlivňují stabilitu svahů. Tyto hodnocené parametry odrážejí geo-

logické, klimatické a hydrologické poměry území, morfometrické charakteristiky reliéfu a současně využití krajiny. Zastoupení jednotlivých vstupních faktorů na území je zobrazeno na obr. 2. V prvním sloupci je zobrazený podíl jednotlivých reklasifikovaných kategorií v každém ze vstupních faktorů (Obr. 2.1a až 2.5a), v druhém sloupci je zobrazená hustota pravděpodobnosti výskytu svahových deformací v jednotlivých kategoriích tříd (Obr. 2.1b až 2.5b). Ta představuje poměr pravděpodobnosti vzniku svahových deformací v dané třídě k celkové sumě pravděpodobnosti v rámci celé zkoumané složky prostředí.

3.1. Geologické poměry

Geologická stavba území je jedním z nejdůležitějších faktorů ovlivňujících vznik a vývoj svahových deformací. Podkladem k získání informací o geologické stavbě modelového území byla geologická mapa v měřítku 1:50 000 (Stráník, 1998). Pro statistické zpracování problematiky náchylnosti k sesouvání bylo nezbytné zredukovat původní množství litologických celků do menšího počtu tříd. Tento proces se označuje jako prvotní reklasifikace, jejímž cílem je zjednodušit původní mapu a zachovat při tom důležité informace, které se vztahují k náchylnosti k sesouvání. Při prvotní reklasifikaci geologické mapy jsou obvykle hlavním kritériem fyzikální a mechanické vlastnosti hornin.

Na základě podobných fyzikálně-mechanických vlastností horninového prostředí byl původní počet litologických celků (24), reklasifikován na 7 litologických celků (kategorií). Výsledkem je reklasifikovaná parametrická mapa litologických celků na modelovém území střední části Chřibů, která byla použita jako jedna ze vstupních parametrických map pro hodnocení náchylnosti k sesouvání. Z obr. 2.1a vyplývá, že největší plošné rozšíření v modelovém území (více než 51 %) mají paleogenní sedimenty flyšového pásma Západních Karpat s převahou pískovců a slepenců (třída 6), následované velmi rozšířenými kvarténními deluviálními sedimenty, které pokrývají více než 20 % území. Tyto sedimenty představují zároveň nejzranitelnější kategorii geologického prostředí, neboť nejvyšší hustota pravděpodobnosti vzniku sesuvů je právě v deluviálních sedimentech (Obr. 2.1b).

3.2. Současné využití území

Pro zohlednění antropogenního vlivu slouží mapa krajinných prvků. Krajinná struktura informuje především o vegetačním pokryvu, jehož nedostatek nepřímo ovlivňuje vznik a vývoj svahových deformací. Tento parametr je velmi dynamický, podléhá relativně rychle změnám v čase, a proto je při jeho zpracování nevyhnutelné používat co nejaktuálnější podklady. Podkladem byly digitální mapové vrstvy ZABAGED v měřítku 1:10 000 z roku 2008. Vegetační pokryv ovlivňuje stabilitu svahů hlavně zadržováním (retencí) srážek, rozdílnou schopností výparu a také rozložením a hloubkovým dosahem kořenového systému.

V modelovém území byly vyčleněny následující prvky současné krajinné struktury: (1) zahrady, (2) cesty, (3) zastavěné plochy, (4) louky, (5) vodní plochy, (6) orná půda a (7) les.

Následně byla vektorová forma konvertována do rastrové parametrické mapy s velikostí základní buňky 10 x 10 m.

Z plošného rozšíření jednotlivých prvků aktuálního využití krajiny vyplývá, že téměř 67 % celkové plochy představují lesy; pole tvoří více než 19 % modelového území a louky zaujímají přibližně 8 % celkového využití krajiny (Obr. 2.2a). Zbývajících téměř 6 % krajiny je využíváno jako zahrady. Cesty, osídlení a jiné zastavěné plochy pokrývají jen necelé procento území. Jak je zřejmé z obr. 2.2b, nejzranitelnějšími třídami krajinného pokryvu jsou území pokrytá lesy a loukami, nezanedbatelná je však i vysoká hustota pravděpodobnosti vzniku svahových deformací i na pozemcích využívaných jako zahrady a také v okolí pozemních komunikací.

3.3. Vzdálenost od vodního toku

Vzdálenost svahů (území) od vodního toku může být považována za jeden z nejdůležitějších vstupních faktorů ovlivňujících náchylnost svahů na sesouvání, především v důsledku snížené stability poderodováním paty svahů, a nebo jejich zvýšené saturace vodou (Dai et al., 2001; Saha et al., 2002; Čevik & Topal, 2003).

Parametrická mapa vzdáleností od vodního toku byla vypočítána jako vícenásobný prstenec v intervalech 100, 200, 300, 400, 500 a 700 m okolo všech toků, nezávisle na velikosti jejich průtoku anebo počtu přítoků. Data o vodních tocích byly získána z topografické mapy v měřítku 1:10 000. Rozdělení tříd jednotlivých vzdáleností svahů k vodnímu toku je znázorněno na obr. 2.3a. Z obrázku je zřejmé, že většina (75 %) území je situována ve vzdálenosti do 300 m od vodního toku, přičemž 29 % svahů se nachází v zóně do 100 m od vodního toku. Vypočítaná hustota pravděpodobnosti vzniku svahových deformací potvrdila, že oblasti blízko od vodních toků jsou z hlediska náchylnosti na sesouvání nebezpečnější než oblasti vzdálenější (Obr. 2.3b).

3.4. Sklony svahů

Obecně lze konstatovat, že velikost sklonu svahu je z hlediska hodnocení sesuvné náchylnosti nejdůležitější morfometrický parametr. Sklon svahu ovlivňuje v kombinaci s dalšími parametry významně stabilitní poměry svahu.

Z digitálního modelu reliéfu území byla vypočítána síť (grid) sklonů svahů (interval po 1°), který byl následně reklasifikován do 9 kategorií. Z obr. 2.4a vyplývá, že 30 % území je tvořeno svahy se sklonem od 7° do 11°. Nejvyšší hustotu pravděpodobnosti vzniku svahových deformací mají však svahy se sklonem od 17° do 20°, které pokrývají cca 7 % území, následované svahy se sklonem 11–17° (Obr. 2.4b). Tyto svahy pokrývají cca 29 % území, což představuje poměrně rozsáhlou plochu s vysokým předpokladem pro tvorbu svahových deformací z hlediska sklonitosti svahů.

3.5. Digitální model reliéfu (DMR)

Povrch terénu, jako kontaktní plocha mezi atmosférou a hydrosférou na jedné straně, a litosférou na straně druhé, je považován

za další faktor ovlivňující vznik svahových deformací v zájmovém území. Nadmořská výška přímo ovlivňuje klimatické poměry daného území, např. úhrn srážek a nebo průměrnou roční teplotu v oblasti. Nejčastěji používaná forma zobrazení zemského povrchu pomocí GIS je digitální model reliéfu (digital elevation model – DEM). Ten je reprezentován souborem digitálních dat o nadmořských výškách terénu, které jsou vyjádřeny maticí výškových údajů terénu ve vztahu k definovanému polohovému a výškovému systému. Je zobrazený prostřednictvím pravidelné sítě (grid, rastr), kde je ke každé buňce přiřazena příslušná nadmořská výška (Hofierka, 2003).

Podkladem pro výpočet DEM byly topografické mapy v měřítku 1:10 000. Relativní výškové stupně představují relativní převýšení reliéfu na daném území vůči nejnižšímu bodu na daném území. V zájmovém území bylo vytvořeno devět výškových intervalů. Výškový rozdíl mezi nejnižším a nejvyšším bodem je 368 m. Většina území se nachází ve třech třídách, v třídě 4 (16 %), 3 (15 %) a ve třídě 5 (14 %), v rozmezí nadmořských výšek 315 až 409 m n. m (Obr. 2.5a, b).

3.6. Svahové deformace

Parametrická mapa svahových deformací v zájmovém území představuje binární závislou (dichotomickou) proměnnou, se kterou se v procesu logistické regrese porovnávají všechny vstupní parametrické mapy. Binární grid (rastr) svahových deformací obsahuje pouze hodnoty 0 a 1 (False/True), kde hodnota 1 představuje existenci svahových deformací v základní buňce a hodnota 0 jeho absenci.

Zdrojem informace o distribuci svahových deformací byly mapy inženýrskogeologických poměrů v měřítku 1:10 000 (Havlín, 2007^a, 2007^b, 2008^a, 2008^b, 2008^c; Slavík 2007^a, 2007^b; Vít 2007).

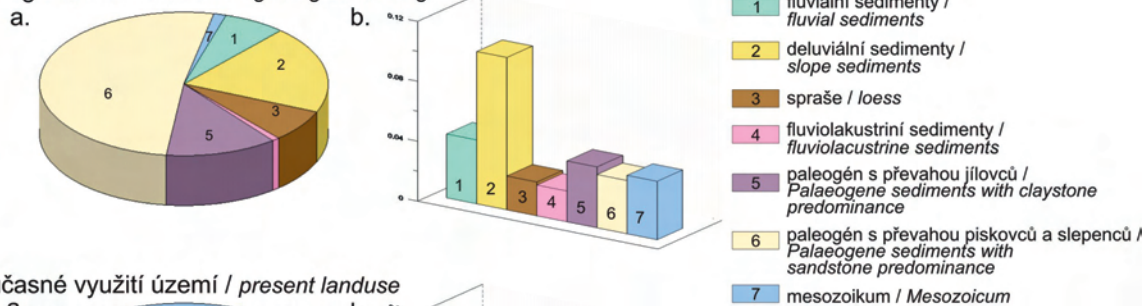
Vymapované svahové deformace na studovaném území pokrývají plochu cca 7,16 km².

4. VÝSLEDKY A DISKUSE

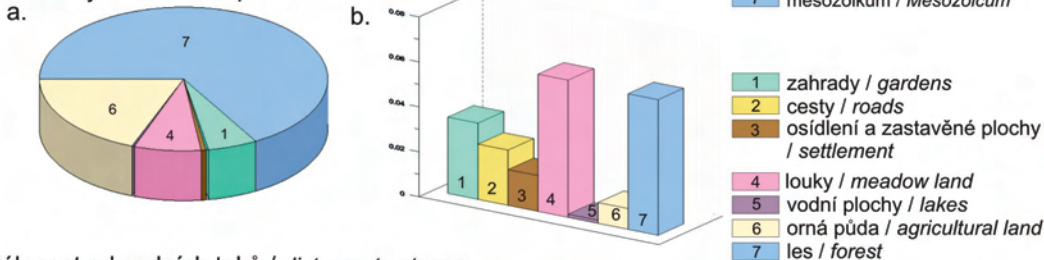
Výsledkem hodnocení náchylnosti k sesouvání pomocí logistické regrese je spojitá síť (grid), obsahující hodnoty v rozmezí 0–1, přičemž každá hodnota reprezentuje pravděpodobnost vzniku sesuvu. V zájmovém území se tyto hodnoty pohybují od 0,002 až do 0,43, a tato síť (grid) byla na základě kvantilového rozdělení rozčleněna do tří tříd reprezentujících nízký, střední a vysoký stupeň náchylnosti k sesouvání v modelovém území (Obr. 3). Na ověření úspěšnosti mapy byl použit nejjednodušší způsob verifikace výsledku, a to porovnání s parametrickou mapou svahových deformací.

Z porovnání vyplývá, že vysoká náchylnost k sesouvání je především v místech výskytu potenciálních a aktivních sesuvů, přičemž 62 % existujících svahových deformací se vytvořilo v oblastech vysoce náchylných na sesouvání, 32 % jich je v oblastech středně náchylných na sesouvání. Zbýlých 6 % sesuvů se nachází v oblastech nízké náchylnosti na sesouvání. Často se jedná např. o akumulační části těles. Z celkového hodnocení území můžeme 33 % oblasti klasifikovat jako území s vysokým

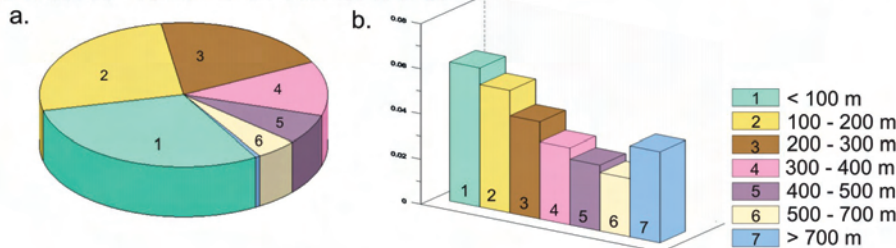
1. geologická stavba území / geological setting



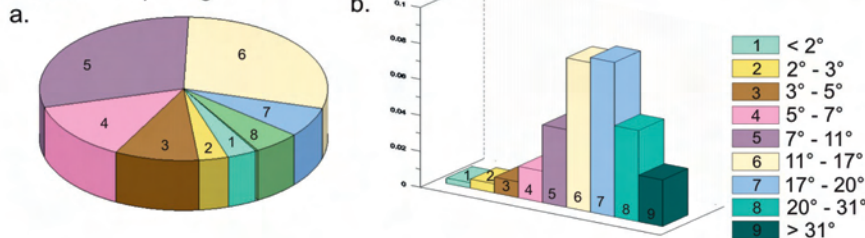
2. současné využití území / present landuse



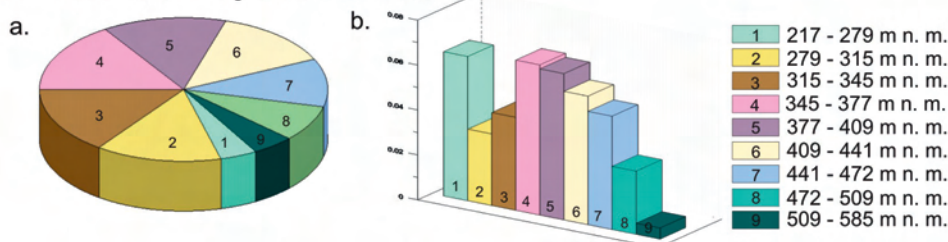
3. vzdálenost od vodních toků / distance to stream



4. sklon svahu / slope angle

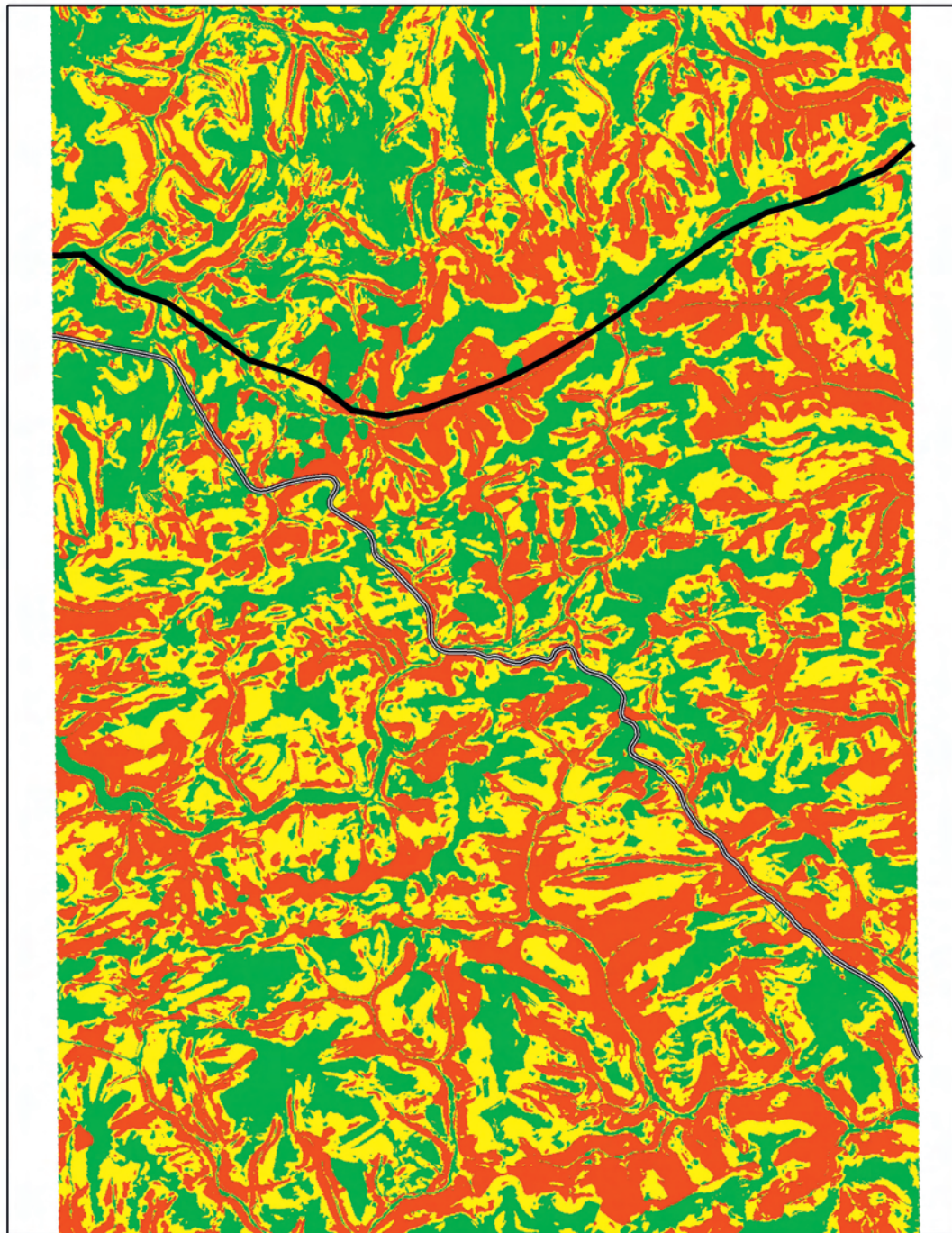


5. digitální model reliéfu / digital elevation model



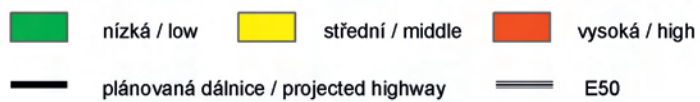
Obr. 2. a) prostorová distribuce jednotlivých reklasifikovaných kategorií vstupných faktorů b) hustota pravděpodobnosti výskytu svahových deformací v jednotlivých třídách vstupných faktorů.

Fig. 2. a) spatial distribution of individual reclassified categories b) density of probability of slope deformations occurrence within individual classes.



Náchylnost k sesouvání

Landslide susceptibility assessment



Obr. 3. Mapa náchylnosti k sesouvání ve střední části Chřibů (Česká republika).

Fig. 3. Landslide susceptibility map in the middle part of Chřiby Mts. (Czech Republic).

stupněm náchylnosti k sesouvání a 35 % plochy jako středně náchylné na sesouvání. Nízký stupeň náchylnosti k sesouvání představuje zbývajících 32 % plochy zájmového území.

Při porovnání mapy náchylnosti k sesouvání s reklasifikovanou geologickou mapou území lze konstatovat, že největší procento území s nízkou náchylností k sesouvání je pokryto paleogenními horninami s převahou pískovců (65 % oblastí nenáchylných k sesouvání). Tato nejrozšířenější geologická formace v zájmovém území se jeví jako poměrně nenáchylné k sesouvání, jelikož 40 % z této třídy spadá do území s nízkou náchylností k sesouvání a dalších 41 % do třídy středně náchylné k sesouvání. Jen zbylých 19 % třídy spadá do oblastí vysoce náchylných k sesouvání. Rozdílná je situace v oblastech budovaných paleogenními sedimenty s převahou jílovců. Ty se jeví spíše jako středně až vysoce náchylné k sesouvání, když pouze 29 % třídy spadá do oblasti s nízkou náchylností. Podle předpokladů, nejzajímavější z hlediska náchylnosti k sesouvání jsou oblasti tvořené deluviálními sedimenty, které pokrývají až 44 % vysoce náchylných oblastí. Tato třída se jeví v dané oblasti jako vysoce riziková, neboť až 72 % oblastí pokryté deluviálními sedimenty jsou vysoce náchylné k sesouvání. Dalších 20 % deluviálních pokryvů je středně náchylných na sesouvání. Jen zbylých 8 % třídy je nízce náchylných, pravděpodobně vlivem nízkých sklonů svahů v daných oblastech.

Z hlediska vzdálenosti náchylných území od vodních toků se podle předpokladu náchylnost k sesouvání snižuje v závislosti na zvyšující se vzdálenosti vodního toku, přičemž 47 % vysoce náchylných území se nachází ve vzdálenosti do 100 m od vodního toku, 26 % vysoce náchylných území se nachází ve vzdálenosti do 200 m od vodního toku a 14 % ve vzdálenosti do 300 m od vodního toku.

Z hlediska nadmořské výšky jsou oblasti vysoce náchylné k sesouvání poměrně rovnoměrně rozložené s nejvyšší rozlohou v nadmořských výškách v intervalech 316–345 m n. m. a 345–377 m n. m., kde v obou třídách pokrývají po 17 % území.

Z hlediska využití území je největší část vysoce náchylných území pokryta lesem (83 %), ornou půdou (9 %) a loukami (5 %).

Z hlediska posouzení existujících liniových staveb 51 % současných cest prochází oblastmi nenáchylnými na sesouvání, 29 % cest prochází středně náchylnými svahy a 20 % cest prochází vysoce náchylnými svahy.

5. ZÁVĚR

Tato studie prezentuje možnosti statistických metod pro hodnocení náchylnosti k sesouvání v modelovém území Chřibů v České republice. Tímto způsobem se hodnotí nejen současný stav a aktivita stávajících svahových deformací, ale poukazuje i na místa se zvýšenou náchylností k sesouvání. Poskytuje tak informace, které nelze najít v inženýrskogeologické mapě nebo inventarizační mapě sesuvů.

Hodnocení náchylnosti k sesouvání získává stále větší důležitost jak v územním plánování, tak v krizovém řízení, neboť v posledních dvou dekádách dochází k nárůstu extrémních klimatických jevů a s nimi úzce spojenému nárůstu svahových

deformací, a to jak nových, tak i k reaktivaci starších. Svahové deformace potom ohrožují nejen obydlí, ale i infrastrukturu (dopravní stavby, rozvodné sítě a produktovody). Aplikace uvedených postupů v praxi tak pomůže vytipovat nejzranitelnější místa z hlediska náchylnosti k sesouvání nejen v okolí současných liniových staveb, ale i kritické úseky z hlediska plánování výstavby infrastruktury.

Pokud by byla tato metoda k dispozici v době plánování nedokončené dálnice, byly by pravděpodobně použity jiné technologie, popř. by byla dálnice vedena jinou trasou a nebyly by zbytečně vynakládány finanční prostředky na projekční a stavební práce. Výsledkem toho, že tyto techniky nebyly k dispozici a při přípravných pracích nebyly svahové deformace brány dostatečně v potaz, jsou technické památky v podobě stop po zemních pracích, nedokončené stavby mostů a propustků, které se nachází především v celé trase dálnice procházející zájmovým územím, které se staly turistickou atrakcí pro dobře informované zájemce o historii výstavby pozemní dopravní infrastruktury.

Při použití statistických metod pro hodnocení náchylnosti k sesouvání nelze odpovědět na otázku, kdy dojde k porušení stability svahu, neboť toto je v podmínkách střední Evropy vázáno především na srážkovou činnost, popř. na jarní tání sněhové pokrývky, avšak lze plošně vymezit ohrožená území a pravděpodobnost vzniku tohoto jevu.

Na základě výsledků logistické regrese v trase silnice E50 lze konstatovat, že z celkové délky silnice v zájmovém území 14 km, se 3 km nacházejí v prostoru s nízkou náchylností k sesouvání. V prostoru se střední náchylností k sesouvání se nachází 4 km silnice. Nejdelší úsek silnice, tj. 7 km, probíhá územím s vysokým stupněm náchylnosti k sesouvání.

V případě plánované a částečně rozestavěné dálnice, jejíž délka v zájmovém území je 11 km na základě logistické regrese se 4 km úsek dálnice nachází v prostoru s nízkou náchylností k sesouvání. Úsek se střední náchylností k sesouvání je dlouhý 3,4 km a délka úseku s vysokou náchylností je 3,5 km.

Podakovanie: Publikácia vznikla s podporou úlohy Agentúry na podporu výskumu a vývoja č. APVV-0330-10 a projektu VEGA č. 1/0910/11 financovaných Ministerstvom školstva, vedy, výskumu a športu Slovenskej republiky.

Literatúra

- Bai S.B., Wang J., Lü G.N., Zhou P.G., Hou S.S. & Xu S.N., 2010: GIS based logistic regression for landslide susceptibility mapping of the Zhongxian segment of the Three Gorges area, China. *Geomorphology*, 115, 1-2, 23-31.
- Bednarik M., 2007: Hodnotenie zosuvného rizika pre potreby územnoplánovacej dokumentácie. Doktorandská dizertačná práca, PRIF UK, Bratislava. 130 p.
- Bednarik M., Magulová B., Matys M. & Marschalko M., 2010: Landslide susceptibility assessment of the Kralovany–Liptovský Mikuláš railway case study. *Physics and Chemistry of the Earth*, 35, 3-5, 162-171.
- Bednarik M., Magulová B., Matys M. & Rysávková J., 2008: Hodnotenie zosuvného hazardu pre líniové stavby na príklade posudzovanej trasy železnice. 1-8. Zborník konferencie Geotechnika 2008 – Geotechnics. 12. Ročník Medzinárodnej konferencie, Podbánske 10. – 12. september 2008, Orgware Stupava, Fakulta stavební VŠB – TU Ostrava, ČR.

- Carrara A., 1983: Multivariate models for landslide hazard evaluation. *Mathematical Geology*, 15, 3, 403-427.
- Carrara A., 1988: Landslide hazard mapping by statistical methods: a "Black Box" approach. In: Workshop on Natural Disaster in European Mediterranean Countries. Perugia: Consiglio Nazionale delle Ricerche. 205-224.
- Carrara A., Cardinalli 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. Milano: Università degli Studi di Milano. 17-28.
- Carrara A., Cardinalli 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.
- Carrara A., Cardinalli M., Guzzetti F. & Reichenbach P., 1995: GIS technology in mapping landslide hazard. *Geographical information systems in assessing natural hazards*, 5, 135-175.
- Castellanos Abella E.A. & Van Westen C.J., 2007: Generation of a landslide risk index map for Cuba using spatial multi-criteria evaluation. *Landslides*, 4, 4, 311-325.
- Çevik E. & Topal T., 2003: GIS-based landslide susceptibility mapping for a problematic segment of the natural gas pipeline, Hendek (Turkey). *Environmental Geology*, 44, 8, 949-962.
- Chen Z. & Wang J., 2007: Landslide hazard mapping using logistic regression model in Mackenzie Valley, Canada. *Natural Hazards*, 42, 75-89.
- Čížek P., Jurášová F., Menčík E., Novák Z., Pěsť V., Pěsťová H., Plička M. & Stráník Z., 1982: Zpráva o geologických poměrech území pro výstavbu dálnice D1 Brno – Trenčín ve Chřibech. Ústřední Ústav Geologický, Praha, 1-20.
- Dai F.C., Lee C.F., Li J. & Xu Z.W., 2001: Assessment of landslide susceptibility on the natural terrain in Lantau Island, Hong Kong. *Environmental Geology*, 40, 381-391.
- Dai F.C., Lee C.F. & Ngai Y.Y., 2002: Landslide risk assessment and management: an overview. *Engineering Geology*, 64, 65-87.
- Guzzetti F., Carrara A., Cardinalli 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.
- Havlín A., 2007^a: Vysvětlivky k účelové inženýrskogeologické mapě stabilitních poměrů 1:10 000, 25-44-09. Manuskript, Ministerstvo Životního Prostrédí, Praha, Česká Geologická Služba, Brno, 1-17.
- Havlín A., 2007^b: Vysvětlivky k účelové inženýrskogeologické mapě stabilitních poměrů 1:10 000, 25-44-15. Manuskript, Ministerstvo Životního Prostrédí, Praha, Česká Geologická Služba, Brno, 1-34.
- Havlín A., 2008^a: Vysvětlivky k účelové inženýrskogeologické mapě stabilitních poměrů 1:10 000, 25-44-04. Manuskript, Ministerstvo Životního Prostrédí, Praha, Česká Geologická Služba, Brno, 1-3.
- Havlín A., 2008^b: Vysvětlivky k účelové inženýrskogeologické mapě stabilitních poměrů 1:10 000, 25-44-10. Manuskript, Ministerstvo Životního Prostrédí, Praha, Česká Geologická Služba, Brno, 1-18.
- Havlín A., 2008^c: Vysvětlivky k účelové inženýrskogeologické mapě stabilitních poměrů 1:10 000, 25-44-14. Manuskript, Ministerstvo Životního Prostrédí, Praha, Česká Geologická Služba, Brno, 1-9.
- Havlín A., Bednarik M. & Urbanová K., 2009: Hodnocení sesuvného rizika na Slezsko-Slovenském pomezí aneb sesuvy nerespektují státní hranice. In: Baroň I. & Klimeš J. (Eds.): Sborník Svahové deformace a pseudokras 2009. Česká geologická služba, Ústav struktury a mechaniky hornin, AkademieVěd České Republiky, Vsetín, 1-28.
- Hofierka J., 2003: Geografické informačné systémy a diaľkový prieskum Zeme. Vysokoškolské učebné texty, Fakulta humanitných a prírodných vied, Prešovská Univerzita, 116 p. ISBN 80-8068-219-4.
- Jurko J., 2003: Landslide susceptibility map of Liptovská kotlina Basin. MSc. Thesis, Faculty of Natural Sciences, Comenius University, Bratislava, 47 p.
- Klimes J., 2007: Analýza podmínek vzniku svahových deformací ve Vsetínských vrších. Dizertacní práce, Katedra fyzické geografie a geoekologie, Přírodovědecká fakulta, Univerzita Karlova, Praha, 151 p.
- Magulová B., 2010: Natural hazards assessment of Levoča region within GIS tools. PhD. Thesis, Faculty of Natural Sciences, Comenius University, Bratislava, 97 p.
- Metelka V. & Kycl P., 2007: Mapování náchylnosti svahů k sesouvání v prostředí GIS, Miramar, Kostarika. In: Baroň I., Klimeš J. & Kašperáková D. (Eds.): Sborník Svahové deformace a pseudokras 2007. Česká Geologická Služba, Ústav struktury a mechaniky hornin AkademieVěd České Republiky, Vsetín, 1-15.
- Nandi A. & Shakoor A., 2010: A GIS-based landslide susceptibility evaluation using bivariate and multivariate statistical analyses. *Engineering Geology*, 110, 1-2, 11-20.
- Ohlmacher G.C. & Davis J.C., 2003: Using multiple logistic regression and GIS technology to predict landslide hazard in northeast Kansas, USA. *Engineering Geology*, 69, 331-343.
- Pauditš P., 2005: Hodnotenie náchylnosti územia na zosúvanie s využitím štatistických metód v prostredí GIS. Doktorandská dizertační práca, Přírodovědecká fakulta, Univerzita Komenského, Bratislava, 153 p.
- Saha A.K., Gupta R.P. & Arora M.K., 2002: GIS – based landslide hazard zonation in the Bhagirathi (Ganga) valley, Himalayas. *International Journal of Remote Sensing*, 23, 357-369.
- Slavík M., 2007^a: Vysvětlivky k účelové inženýrskogeologické mapě stabilitních poměrů 1:10 000, 25-44-05. Manuskript, Ministerstvo Životního Prostrédí, Praha, Česká Geologická Služba, Brno, 7 p.
- Slavík M., 2007^b: Vysvětlivky k účelové inženýrskogeologické mapě stabilitních poměrů 1:10 000, 25-44-20. Manuskript, Ministerstvo Životního Prostrédí, Praha, Česká Geologická Služba, Brno, 13 p.
- Stráník Z., 1998: Geologická mapa ČR, list 24-44 Bučovice. Český Geologický Ústav, Praha.
- Vít J., 2007: Vysvětlivky k účelové inženýrskogeologické mapě stabilitních poměrů 1:10 000, 25-44-19. Manuskript, Ministerstvo Životního Prostrédí, Praha, Česká Geologická Služba, Brno, 12 p.
- Woznica L., 1980^a: Dálnice D1 Brno – Trenčín, km 25,0-30,0. Zástřizly – I. etapa. 1 část. Předběžný geologický průzkum. Manuskript, GEOTest, Brno, 36 p.
- Woznica L., 1980^b: Závěrečná zpráva o předběžném inženýrskogeologickém průzkumu trasy dálnice D1 v úseku km 25,0 - 30,0 (Zástřizly, 2. část). Manuskript, GEOTest, Brno, 6 p.
- Woznica L., 1981: Závěrečná zpráva o předběžném inženýrskogeologickém průzkumu trasy dálnice D1 v úseku km 25,0-30,0 (Zástřizly, 3. část). Manuskript, GEOTest, Brno, 7 p.
- Woznica L., 1983: Podrobný inženýrskogeologický průzkum sesuvu silnice I. třídy č. 50 v km 41,2, km 42,7 a km 43,0 (Lokalita Buchlovské hory). Manuskript, GEOTest, Brno, 12 p.

Summary: In recent years, population and settlement expansion are increasingly confronted with extreme rainfall events and their impacts. Therefore geological hazards are often evident because of resultant landslides. Causing great economical losses; there is a need for a comprehensive evaluation of geological environment, focused on landslide

susceptibility assessment. In this case study, analysis tools implemented in the Geographic Information System (GIS) environment and statistical methods were used for landslide susceptibility assessment. Statistical models for susceptibility assessment are based on the assumption that future geological events will be more likely to occur under similar conditions which led to past and present instability. For evaluated hazard, factors which play a dominant role in environmental system behaviour were selected and implemented to the GIS environment in a vector or raster form of parametric map. For landslide hazard evaluation, the logistic regression was adopted. Many authors in geosciences, such as Bai et al. (2010), Olhamecher & Davis (2003) and Chen & Wang (2007) use logistic regression for landslide hazard assessment. Generally, logistic regression is used for prediction of the probability of the occurrence of an event by fitting data to a logit function logistic curve. In hazard assessment, this allows formation of a multivariate regression relationship between a dependent variable and several independent variables (Atkinson & Massari, 1998). Independent variables are represented by an input parametric map of factors influencing the occurrence of landslide, while the dependent variable in this study consists of the concomitant presence or absence of these phenomena.

The following factors for hazard evaluation and assessment were selected in the Chriby Mountains: geology, digital elevation model and slope angle, and distance to stream, present land cover and spatial distribution of current landslides. As a result, the landslide susceptibility maps were compiled with the three different zones of low, medium and high landslide susceptibility. The verification of the success map was used the simplest method of verification results - compared with parametric map of slope deformations.

The comparison shows that the high susceptibility to sliding is primarily in the areas of potential landslides and active, while 62 % of existing slope failures are created in areas highly susceptible to sliding, 32 % are in areas susceptible to moderate sliding. The remaining 6 percent of the landslides are located in low areas prone to sliding. This may be the accumulation parts of landslide bodies. An overall assessment of the 33 % of the area can be classified as having a high degree of susceptibility to the sliding surface and 35 % as moderately susceptible to landsliding. Low degree of susceptibility to sliding represents the remaining 32 % area of the territory.