

## Hodnocení sesuvného ohrožení a metody tvorby map náchylnosti území ke vzniku svahových deformací

Jan Klimeš

*jklimes@centrum.cz*

*Ústav struktury a mechaniky hornin AV ČR, v.v.i., V Holešovičkách 41, 182 09, Praha*

**Jan Klimeš:** *Landslide hazard assessment and methods of landslide susceptibility mapping.* Importance and demand for spatial and temporal predictions of occurrence of dangerous slope failures is increasing in the recent years. Correspondingly the number of scientific papers concerning these questions is increasing without general agreement about definitions of basic terms used. This article tries to find most widely used definitions of terms such as landslide hazard and susceptibility maps. Overview of basic principles and methods used for landslide susceptibility assessment is also given. These methods are grouped into two main groups - qualitative and quantitative, according to degree of their subjectivity. Division into deterministic and statistic methods is based on the principles used for landslide susceptibility assessment.

**Key words:** landslide, susceptibility, hazard, GIS.

### 1 Úvod

Prostorová i časová predikce vzniku nebezpečných svahových deformací nabývá na důležitosti a to nejen vzhledem k probíhajícím klimatickým změnám, ale také ke zvyšující se zranitelnosti lidské společnosti na přírodní ohrožení. K řešení tohoto problému se využívá velké množství různých metodologických postupů (CHACÓN a kol. 2006) s nejednotnou terminologií. Tento článek proto uvádí definice základních pojmů a přehled nejčastěji používaných metod rajonizace sesuvného ohrožení.

### 2 Základní definice

Hlavním cílem hodnocení sesuvného ohrožení ("landslide hazard assessment") je rozdělení území do homogenních jednotek podle pravděpodobnosti vzniku svahových deformací během určitého období. Výsledkem jsou mapy sesuvného ohrožení („landslide hazard maps“) zobrazující místa současného i možného budoucího ohrožení svahovými deformacemi během definovaného časového období. Pokud výsledná mapa neobsahuje informace o pravděpodobnosti vzniku svahových deformací, jedná se o mapu náchylnosti území k sesouvání („landslide susceptibility map“), která je definována jako mapa zobrazující prostorové rozmístění oblastí s vhodnými podmínkami ke vzniku svahových deformací (GLADE, CROZIER 2005). Náchylnost území k sesouvání je podle těchto autorů funkcí míry vlastní, současné stability svahu a přítomnosti faktorů schopných snížit tuto stabilitu do takové míry, která vede ke vzniku sesuvu. Podle VAN WESTEN a kol. (2006) je náchylnost relativní ukazatel prostorové pravděpodobnosti výskytu svahové deformace v rámci studovaného území.

Posouzení vlivu sesuvného ohrožení na lidskou společnost představuje hodnocení sesuvného rizika („landslide risk assessment“). Zhodnocení rizika

výskytu svahových deformací na určitém území představuje: zhodnocení pravděpodobnosti vzniku nebezpečných svahových deformací v určitém časovém období (ohrožení) a předpokládaných škod způsobených těmito svahovými deformacemi na předmětech jimi potenciálně zasažitelnými (zranitelnost). Riziko lze také vyjádřit následujícím vztahem:

$\text{riziko} = \text{ohrožení} * \text{zranitelnost}$

Hodnocení sesuvného rizika v sobě zahrnuje tvorbu map náchylnosti (kroky 1-2) i ohrožení (kroky 1-3) a je možné jej rozdělit do následujících dílčích kroků: 1) zhodnocení míry nebezpečí jednotlivých typů svahových deformací, 2) předpovědět místa, kde může dojít k jejich vzniku nebo aktivaci, 3) na základě frekvence výskytu jednotlivých typů svahových deformací nebo jejich spouštějících faktorů, stanovit pravděpodobnost jejich vzniku pro studované území, 4) identifikovat objekty, které mohou být svahovými deformacemi poškozeny a 5) definovat škody které mohou na těchto objektech způsobit. Kroky 4-5 představují definici zranitelnosti. V obecné rovině je riziko úměrné velikosti ohrožení, technické zranitelnosti a zranitelnosti vyvolané počtem lidí (PROCHÁZKOVÁ 2004).

Ohrožení („hazard“) je potenciálně škodlivý proces (např. sesuv o určité velikosti a rychlosti pohybu) nebo situace (např. složité základové poměry) o určité pravděpodobnosti vzniku během definovaného časového období na studovaném území (např. povodí, správní jednotka, PROCHÁZKOVÁ 2004).

Zranitelnost („vulnerability“) jsou předpokládané ztráty/škody nebo újma na určitém předmětu způsobené přírodním procesem určité velikosti. Zranitelnost je tedy náchylnost ke vzniku škody (PROCHÁZKOVÁ 2004).

### **3 Přehled existujících metod tvorby map náchylnosti území ke vzniku svahových deformací**

Výběr a využití jednotlivých metod tvorby modelů náchylnosti území ke vzniku svahových deformací závisí kromě měřítka a typu hodnocených svahových deformací na dostupných vstupních datech. Nicméně podle některých autorů existuje hranice, nad kterou další zvyšování množství vstupních data a složitosti analýz výrazně nezlepší dosažené výsledky. To lze vysvětlit určitou mírou nahodilosti výskytu svahových deformací, kterou nelze předpovědět nebo absencí podstatných, studované jevy vystihujících informací, které nelze nahradit větší podrobností již použitých dat.

Soubor metod hodnocení náchylnosti území ke vzniku svahových deformací lze rozdělit na kvantitativní a kvalitativní. Kvalitativní metody jsou založeny na subjektivních kritériích vedoucích k popisu náchylnosti daného území, kdežto kvantitativní metody vytváří číselné odhady výskytu svahových deformací v určitých třídách náchylnosti založených na objektivních, reprodukovatelných kritériích. Kvantitativní metody používají tři základní přístupy (PETELY a kol. 2005): 1) hodnocení vzájemného poměru destabilizujících a stabilizujících sil na svahu, jehož výsledkem je výpočet indexu stability (IS); 2) svah je považován za hydrologický systém, ve kterém je cílem identifikovat místa vzniku vysokých pórových tlaků potenciálně narušujících stabilitu svahu; 3) používají informací o

rozmístění již existujících svahových deformací k určení rozhodujících podmínek a faktorů ovlivňujících stabilitu svahů v budoucnu. Fyzikální metody používají první dva přístupy nebo jejich kombinaci, kdežto třetí přístup je základním předpokladem pro statistické metody hodnocení náchylnosti území. Někteří autoři tento přístup nazývají „environmental similarity approach“ (CARRARA a kol. 1995) a za jeho hlavní nedostatky považují značnou nejistotu prostorového rozmístění svahových deformací obsažené v každé inventarizační mapě a také předpoklad, že podmínky prostředí a spouštěcí faktory ovlivňující vznik studovaných svahových deformací se výrazně nemění v čase, což neodpovídá realitě.

Mezi kvalitativní metody hodnocení náchylnosti území k sesouvání náleží heuristické metody a někteří autoři sem řadí i inventarizační mapy svahových deformací a to i přesto, že neobsahují informace o budoucím výskytu svahových deformací v místech, kde doposud nebyla registrována sesuvná aktivita.

### **3.1 Inventarizační mapy svahových deformací**

Inventarizační mapy lze rozdělit na ty, které zachycují svahové deformace vzniklé v důsledku jedné sesuvné události a historické (geomorfologické) inventarizace zachycující výsledek celé řady (často neznámého počtu) sesuvných událostí vzniklých na určitém území během desítek, stovek, ale i tisíců let (MALAMUD a kol. 2004). Důležitou vlastností takovýchto inventarizačních map je, že celá řada hlavně malých sesuvů byla díky erozi a lidské činnosti v průběhu času zcela zastřena, takže výsledná historická inventarizační mapa nemůže být kompletní.

Důležité je také si uvědomit a pokusit se kvantifikovat nepřesnosti a míru nejistoty prostorového rozmístění svahových deformací vycházející z procesu tvorby inventarizačních map – identifikace a klasifikace samotného jevu v terénu nebo na leteckém snímku, zanesení jeho tvaru a polohy do terénní mapy a následná digitalizace. Míru nejistoty související s inventarizačními mapami popisuje např. CARRARA a kol. (1995), který ukázal, že rozdíly v inventarizačních mapách stejného území zpracovaných různými autorskými kolektivy může dosáhnout 55 - 90 %. Realistické zhodnocení spolehlivosti inventarizačních map svahových deformací může být vzhledem k jejich možnému využití, např. pro územní plánování velmi důležité.

### **3.2 Heuristické metody**

U heuristických metod je míra náchylnosti definována expertem na základě informací o podmínkách prostředí, které získá a vyhodnotí buď přímo v terénu nebo na základě podrobné geomorfologické mapy (přímá heuristická metoda). Výsledná mapa náchylnosti může být také odvozena z kombinace několika parametrických (indexových) map, které jsou seřazeny a klasifikovány na základě expertních znalostí (nepřímá heuristická metoda). Ucelený přehled použití těchto metod v současné době je uveden např. v práci van WESTEN a kol. (2006).

Výsledky heuristických metod zcela závisejí na znalostech a zkušenostech jejich zpracovatele. Jedná se o subjektivní metody, kde kritéria pro klasifikaci částí reliéfu do různých tříd náchylnosti jsou subjektivní a často těžko identifikovatelná dalšími osobami, což téměř znemožňuje reprodukovat zpracované analýzy, případně identifikovat a odstranit jejich chyby. Na druhou stranu tato metoda umožňuje

velmi komplexní a individuální hodnocení stabilitních poměrů pro každou část studovaného území zvlášť, což při dostatečných zkušenostech a znalostech zpracovatele o mechanismu vzniku a vývoje svahových deformací, může vést k velmi dobrým výsledkům, kterých by bylo jen obtížně možné dosáhnout jinými metodami.

### 3.3 Deterministické metody

Deterministické metody vychází ze znalosti fyzikálních a chemických procesů vedoucích ke vzniku svahových deformací, z čeho plyne i jejich hlavní omezení, kterým je nedostatek věrohodných vstupních dat dostatečně popisujících variabilitu parametrů ovlivňující výsledky modelu. Za hlavní problém je považován odhad výšky hladiny podzemní vody a její změny během srážkové události, která má zásadní vliv na stabilitu svahu (VAN WESTEN a kol. 2006). Tento problém se pokusil vyřešit IVERSON 2000, jehož rovnice popisující horizontální a vertikální změnu pórových tlaků v závislosti na délce a intenzitě srážek byly úspěšně implementovány do některých modelů (BAUM a kol. 2005).

Deterministické metody používají k rajonizaci území vzhledem k náchylnosti ke vzniku svahových deformací hodnoty indexu stability (IS), jehož výpočet je většinou založen na kombinaci modelu stability svahu (nejčastěji používaným je nekonečný svahový model) a hydrologického modelu zaměřeného na odhad rozložení hodnot pórových tlaků, tedy úrovně hladiny podzemní vody (DIETRICH, MONTGOMERY 1998). Hydrologický model může být statický (např. PACK a kol. 1998) nebo dynamický (BAUM a kol. 2005), který modeluje horizontální i vertikální změnu pórových tlaků v zeminách během srážkové události. Některé modely (HAMMOND a kol. 1992) kombinují deterministický přístup s pravděpodobnostními metodami odhadu velikosti vstupních parametrů.

Výhodou deterministických modelů je, že nejsou závislé na mapách podmínek zachycujících stav prostředí ke dni mapování, jak je tomu u statistických metod, ale dokáží vytvářet scénáře rozložení stability svahů na základě předpokládané změny těchto podmínek.

### 3.4 Statistické metody

Statistické metody hodnocení náchylnosti území se dělí na dvourozměrné a vícerozměrné analýzy. Dvourozměrné analýzy používají mapy podmínek (např. geologických nebo půdních jednotek), které jsou porovnány s inventarizační mapou svahových deformací a pro každou plošnou jednotku na mapě faktorů je vypočítána hustota výskytu svahových deformací, která je převedena do bodového hodnocení - indexů. Plochy se stejným nebo vyšším počtem bodů než kde se vyskytují svahové deformace, ale bez známek dřívějších nebo současných svahových pohybů, jsou považovány za náchylné ke vzniku sesuvů v budoucnosti. Je nutné posuzovat každý typ svahových deformací zvlášť neboť jejich vznik je ovlivňován různými kombinacemi faktorů.

Klíčovou informací pro tvorbu statistických modelů náchylnosti („data driven“ modely) jsou inventarizační mapy. Výsledky statistických modelů jsou také do značné míry ovlivněny těmi plošně největšími deformacemi obsaženými v inventarizační mapě.

Vícerozměrné statistické analýzy posuzují najednou celý soubor podmínek ovlivňujících vznik svahových deformací, což mnohem lépe vystihuje reálnou situaci, kdy vznik deformací je ovlivněn současným působením celé řady podmínek a faktorů. K tomuto účelu se používají např. diskriminační analýza, logistická regrese nebo neurální sítě. Tyto analýzy jsou většinou zpracovávány mimo prostředí GIS. Určitou nevýhodou těchto postupů (zvláště pak neurálních sítí) je to, že pravidla modelu určující náchylnost jsou z velké části vytvářena uvnitř modelu na základě matematických pravidel bez výrazné možnosti jejich ovlivnění operátorem („black box models“).

#### 4 Závěr

Zcela zásadní pro využití vytvářených modelů náchylnosti území ke vzniku svahových deformací je hodnocení jejich spolehlivosti, které by mělo proběhnout na základě informací o sesuvech použitých pro jejich tvorbu a také na základě konfrontace s nově vzniklými sesuvy, které nebyly v době sestavení modelu známy. Model, který nebyl hodnocen je z praktického hlediska bezcenný.

#### Literatura

- BAUM, R. L., SAVAGE, W. Z., GODT, J. W. 2005. TRIGRS – A fortran program for transient rainfall infiltration and grid-based regional slope-stability analysis. Open-File Report 02-424, 2005, USGS, <http://pubs.usgs.gov/of/2002/ofr-02-424/>, (last visited July 3, 2006).
- CARRARA, A., CARDINALI, M., GUZZETTI, F., REICHENBACH, P. 1995. GIS technology in mapping landside hazard. In: Carrara, A., Guzzetti, F. (eds.): Geographical information systems in assessing natural hazards, Kluwer Acad. Publ., Dordrecht, s. 135–176.
- DIETRICH, W., E., MONTGOMERY, D. R. 1998. Shalstab – A digital terrain model for mapping shallow landslide potential. Technica report NCASI, <http://ist-socrates.berkeley.edu/~geomorph/shalstab/>, (last visited July 3, 2004).
- GLADE, T., CROZIER, M. J. 2005. The nature of landslide hazard impact. In: Glade, T., Anderson, M., Crozier, M. J. (eds.): Landslide hazard and risk. Wiley, s. 43–74.
- HAMMOND, C., HALL, D., MILLER, S., SWETIK, P. 1992. Level I stability analysis (LISA) documentation for version 2.0. Gen. Tech. Rep., INT-285., U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Research Station, Ogden, UT, 190 s.
- CHACÓN, J., IRIGARAY, C., FERNÁNDEZ, T. AND EL HAMDOUNI, R. 2006. Engineering geology maps: landslides and geographical information systems. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 65, 4, s. 341 – 411.
- IVERSON, R. M. 2000. Landslide triggering by rain infiltration. Water Resources Research, Vol. 36, s. 1897–1910.
- MALAMUD, B. D., TURCOTTE, D. L., GUZZETTI, F., REICHENBACH, P. 2004. Landslide inventories and their statistical properties. Earth Surface Processes and Landforms 29, s. 687–711.
- PACK, R. T., TARBOTON, D. G., GOODWIN, C. N. (1998): Terrain Stability Mapping with SINMAP, Technical Description and Users Guide for version 1.00. Report No. 4114–0, Terratech Consulting Ltd., Salmon Arm, Canada, 76 p.
- PETLEY, D. N., HIGUCHI, T., NG, K-Y., DUNNING, S. A., ROSSER, N. J., PETLEY, D. J., BULMER, M. H. K. 2005. Towards a new framework for the analysis of slope movements in weathered materials. Geophysical Research Abstracts, Vol. 7, Abstracts of the contributions of the EGU General Assembly Vienna, Austria, 24.–29. 4. 2005, CD ISSN: 1029-7006, EGU.

- PROCHÁZKOVÁ, D. 2004. Pojmy. Odborná zpráva č. 1 z projektu „Metodika pro odhad nákladů na obnovu majetku v územích postižených živelnou nebo jinou pohromou a návrh nouzových systémů komunikace mezi orgány veřejné zprávy při obnově.“ MS, Cityplan spol s.r.o. Praha, Ministerstvo pro místní rozvoj Praha, Praha, 45 s.
- VAN WESTEN, C. J., VAN ASCH, T. W. J., SOETERS, R. 2006. Landslide hazard and risk zonation – why is it still so difficult? Bull. Eng. Geol. Env. 65, Springer-Verlag, s. 167–184.