

JAN KLIMEŠ

DETERMINISTICKÝ MODEL NÁCHYLNOSTI ÚZEMÍ KE VZNIKU SVAHOVÝCH DEFORMACÍ VE VSETÍNSKÝCH VRŠÍCH

J. Klimeš: *Use of the deterministic approach for the landslide susceptibility mapping, Vsetínské vrchy Highland, Czechia.* – Geografie–Sborník ČGS, 113, 1, pp. 48–60 (2008). – The work is seeking accurate spatial prediction of shallow landslide occurrence on regional scale, through field mapping of present day landslide activity and identifying the most susceptible parts of the study area by the means of the SINMAP susceptibility model. The SINMAP ArcView extension is also used to characterize shallow landslide and to study conditions for their spatial occurrence. The study area lays in the Outer Western Carpathians east of the city of Vsetín and it was subject of an avalanche like occurrence of mostly shallow landslides during the floods caused by heavy rains between the 4th and 8th and between the 17th and 21st of July, 1997.

KEY WORDS: susceptibility mapping – landslides – SINMAP – flysh Carpathians.

Úvod

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 ovšem 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 Glade, Crozier (2005) funkcí míry vlastní, současné stability svahu a přítomnosti faktorů schopných snížit tuto stabilitu do takové míry, která vede ke vzniku svahové deformace. Podle van Westen a kol. (2006) je náchylnost relativní ukazatel prostorové pravděpodobnosti výskytu svahové deformace v rámci studovaného území.

Deterministické metody vychází ze znalosti fyzikálních a chemických procesů vedoucích ke vzniku svahových deformací, z čeho plyne i jeho hlavní omezení, kterým bývá 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 srážkových událostí, které jsou velmi často spouštěcími faktory studovaných svahových deformací. Výška hladiny podzemní vody má zásadní vliv na stabilitu svahů (van Westen a kol. 2006).

Deterministické metody používají k rajonizaci území vzhledem k náchylnosti ke vzniku svahových deformací hodnoty indexu stability (IS).

Výpočet IS je většinou založen na kombinaci modelu stability svahu (nejčastěji používaným je nekonečný svahový model, Jelínek 2004) a hydrologického modelu zaměřeného na odhad rozložení hodnot pórových tlaků, tedy úrovně hladiny podzemní vody (Dietrich, Montgomery 1998; van Beek 2002). Hydrologický model může být statický (např. Pack a kol 1998) nebo dynamický (např. 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 hodnot vstupních parametrů.

Mělké sesuvy proudového a plošného tvaru spolu se zemními proudy tvořily významnou část svahových deformací vzniklých během povodňových událostí v červenci 1997 na území Vsetínských vrchů (Rybář 1999; Rybář a kol. 1999; Kircher, Krejčí 1997, 1998). Převážná část zdokumentovaných svahových deformací vznikla ve svahovinách (podle Krejčí a kol. 2002 až 84 % ze všech svahových deformací vzniklých v roce 1997) v důsledku jejich nasycení srážkovou vodou. Pro pochopení podmínek vzniku a prostorovou predikci budoucího poškození studovaného území těmito typy svahových deformací byla použita extenze SINMAP (Pack a kol. 1998) pro ArcView ESRI, která je volně dostupná na internetu (<http://hydrology.neng.usu.edu/sinmap/>). Tato extenze byla vybrána na základě zkušeností s jejím použitím v okolí města Aquasparta, Umbrie v Itálii (Klímeš 2002).

Model SINMAP byl použit v rámci geomorfologického podcelku Vsetínských vrchů a k němu přiléhající část Rožnovské brázdy (obr. 3), které jsou tvořeny tektonicky a litologicky velmi proměnlivými flyšovými horninami, silně náchylnými ke vzniku svahových deformací.

Model SINMAP

SINMAP je fyzikální model náchylnosti území ke vzniku mělkých svahových deformací¹, který spojuje statický hydrologický model založený na digitálním modelu reliéfu (DMR) s výpočtem stability svahu na základě nekonečného svahového modelu (Pack a kol. 1998). Jedná se v prostředí GIS o nejčastěji používaný model výpočtu stability svahů (Hammond, kol. 1992; Zaitchik, van Es 2003; Jelínek 2004). SINMAP je určen k predikci mělkých sesuvů a zemních proudů (dále jen sesuvů) vzniklých v důsledku akumulace podzemní vody ve zvětralinovém plášti odděleném od podloží výrazným rozhraním, které je považováno za smykovou plochu modelovaných svahových deformací. Materiál nad touto plochou je považován za homogenní. Model je určen pro sesuvy translačního typu, jejichž vznik nebyl významně ovlivněn strukturními poměry nebo např. erozí vodního toku nebo lidskou činností (Pack a kol. 1998). Jednotlivé sesuvy jsou v modelu reprezentovány bodem označujícím místo jejich vzniku, tedy pomyslným středem odlučné oblasti sesuvů. Tyto body vstupují do modelu v podobě inventarizační mapy sesuvů a jsou využívány k hodnocení výsledné mapy náchylnosti území k sesouvání (a tedy i ke kalibraci modelu), kdy je každý z těchto bodů zařazen do určité třídy náchylnosti.

¹ Jelínek (2004) definuje „mělké sesuvy“ jako sesuvy, u kterých poměr hloubky smykové plochy k délce musí být menší než 0,1.

Hlavním výstupem programu je rastrová mapa hodnot IS vypočítaných podle následujícího vzorce:

$$IS = \frac{C + \cos\theta \left[1 - \min\left(\frac{R}{T \sin\theta}, 1\right) r \right] \tan\phi}{\sin\theta}$$

kde C je koheze (N/m^2), T je transmisivita půdy (m^2/hod), a je specifická infiltrační oblast (m^2/m), R jsou srážky (m/hod), r je konstanta s hodnotou 0.5, ϕ je úhel vnitřního tření a θ je sklon svahu. IS jsou klasifikovány do tříd náchylnosti na základě výpočtu pravděpodobnosti, že posuzované místo je stabilní, při uvažovaném rovnoměrném rozložení hodnot parametrů v určitém intervalu. Intervaly jsou zadávány uživatelem pro vybrané parametry s cílem popsat nejistotu jejich reálných hodnot. Pixel s hodnotou IS menší než 1 je obecně považován za nestabilní, s vysokou pravděpodobností vzniku svahové deformace v budoucnosti. Definice hranic tříd náchylnosti je subjektivní a vychází spíše ze zkušenosti konkrétního pracovníka než z obecně platných pravidel (tab. 1). Výsledné hodnoty IS poskytují informace o relativně nejméně stabilních částech území za daných podmínek. Výsledky je tedy do určité míry možné interpretovat jako rekonstrukci stabilitních poměrů určité sesuvné události a zároveň jako predikci možného budoucího postižení území za podobných podmínek. Přesnost takovéto predikce záleží na věrohodnosti dat použitých k vytvoření modelu a jejich schopnosti vystihnout reálné podmínky studované oblasti.

Vstupní data modelu SINMAP

Základní vstupní informace pro výpočet IS jsou jednak odvozeny z DMR (záleží na sklonu svahu a specifické infiltrační oblasti definované jako plocha infiltrace vtažená na délku hrany pixelu) a jednak definovány uživatelem v podobě mechanických vlastností zemin (specifická hmotnost půdy, koeficient filtrace, soudržnost, úhel vnitřního tření). Hodnoty některých veličin (úhel vnitřního tření a soudržnost) mohou být zadávány v podobě intervalu, a to buď pro celou studovanou oblast nebo pro její části (tzv. kalibrační regiony) vymezené uživatelem na základě litologických nebo topografických charakteristik.

Základními vstupními daty modelu SINMAP jsou tedy DMR a inventarizační mapa svahových deformací. DMR s velikostí pixelu 10 m byl vytvořen v programu ArcView z výškopisných dat ZABAGED v originálním měřítku 1:10 000. Inventarizační mapa mělkých svahových deformací použitých pro tvorbu modelu SINMAP byla vytvořena na základě vlastního terénního mapování, které probíhalo na následujících mapových listech ZM 1:10 000: 25–23–19,

Tab. 1 – Definice tříd náchylnosti území ke vzniku svahových deformací na základě IS použitá pro Vsetínské vrchy

Hodnota indexu stability (IS)	Třída náchylnosti území k sesouvání
IS > 1,25 1,25 > SI > 1 1 > SI > 0	stabilní podmínečně stabilní nestabilní

25–23–20, 25–23–24, 25–23–25, 25–24–16, 25–24–21, 25–41–04, 25–41–05. Pro ostatní části studované oblasti byly použity inženýrsko-geologické mapy svahových deformací poskytnuty Českou geologickou službou, po-

bočka Brno. Z těchto map bylo nutné vybrat ty svahové deformace, pro které je určen model SINMAP. Výběr sesuvů se řídil následujícími pravidly:

Přednostně byly vybrány sesuvy menší než 50 m, které nebyly lokalizovány v bezprostřední blízkosti vodních toků, strží a silnic neboť na základě zkušeností z terénního mapování lze předpokládat, že takto lokalizované sesuvy vznikly díky erozi vodních toků a výrazné změně sklonu svahu v odřezu cest. Ze sesuvů větších než 50 m byly vybrány především menší sesuvy proudového tvaru s délkou nepřesahující 150 m a s průběhem po spádnicí. Průběh svahové deformace šikmo po svahu výrazně indikuje strukturní ovlivnění jejího vzniku. Drobné frontální sesuvy ležící v blízkosti vodních toků nebyly do použitého souboru také zařazeny. Celkový počet použitých sesuvů a zemních proudů pro vytvoření modelu SINMAP pro Vsetínské vrchy byl 714.

Informace o geotechnických parametrech svahovin byly získány z rešerší zpráv o podrobných geologických průzkumech vybraných sesuvů v rámci Vsetínských vrchů a z vlastních rozborů vzorků zemin z vybraných částí studované oblasti. Na základě těchto informací byly definovány následující hodnoty vstupních parametrů: úhel vnitřního tření $\varphi=20^{\circ}-30^{\circ}$, soudržnost $c=5-25$ kPa, koeficient filtrace $T=3.10^{-7}-10^{-9}$ m²/s, specifická hmotnost půdy $\rho_s=2732$ kg/m³.

Postup tvorby modelů SINMAP pro Vsetínské vrchy

Jednotlivé modely byly vytvářeny buď na základě interaktivních změn volitelných parametrů (parametr nasycení horninového prostředí vodou – T/R, kde R jsou srážky; soudržnost, úhel vnitřního tření; Pack a kol. 1998) a nebo byly hodnoty volitelných parametrů považovány za konstanty nastavené tak, aby co nejlépe, vystihovaly předpokládané podmínky, během kterých vznikly modelované svahové deformace během července 1997.

Výsledky modelu byly hodnoceny na základě podílu sesuvů zahrnutých do jednotlivých tříd náchylnosti a zároveň na podílu tříd náchylnosti na studované oblasti. Za nejvhodnější byl považován model, který na co nejmenší ploše nestabilní třídy náchylnosti vystihl největší množství sesuvů.

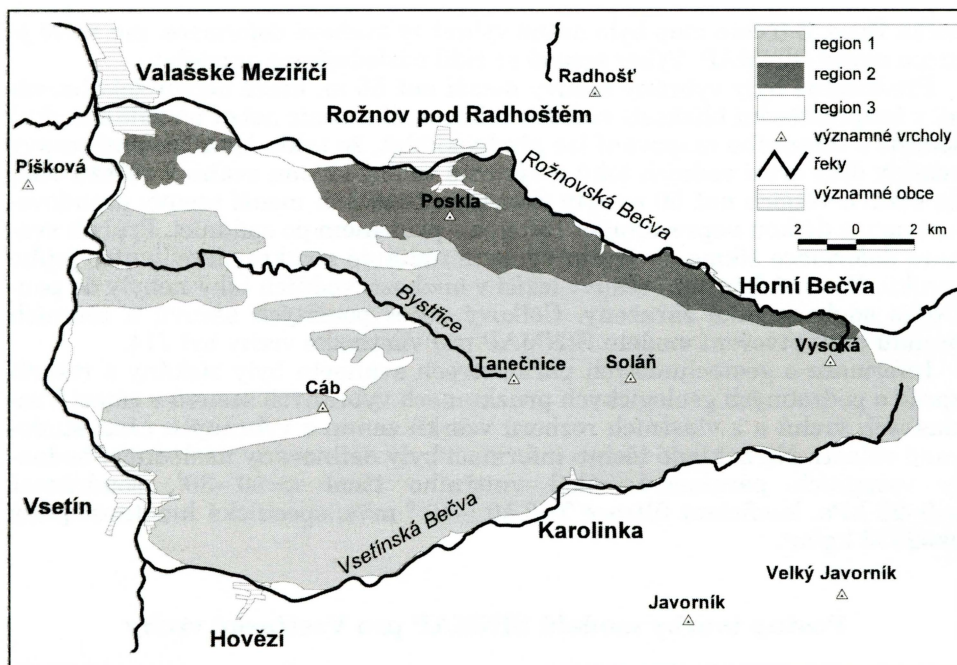
Vsetínské vrchy byly rozděleny na tři morfologicky odlišné kalibrační regiony definované manuálně na základě digitální mapy sklonů svahů. Jejich základní morfometrické parametry jsou uvedeny v tabulce 2 a jejich vymezení je uvedeno na obrázku 1.

První kalibrační region (region 1) má nejvyšší průměrný sklon svahů i převýšení ve čtverci 100x100 m a je převážně budován ráztockými vrstvami soláňského souvrství a vsetínskými vrstvami zlínského souvrství, které jsou na

Tab. 2 – Vybrané morfometrické parametry kalibračních regionů Vsetínských vrchů

Kalibrační region	Sklon svahů (°)			Rozsah nadmořských výšek (max.-min.)	Převýšení v rastu 100x100 m*		
	min.	max.	průměr		min.	max.	průměr
Region 1	0	50	18	718	0	43	16
Region 2	0	47	8	532	0	37	8
Region 3	0	49	13	524	0	32	12

Pozn.: *vypočteno pomocí funkce „neighborhood statistics” v programu ArcMap

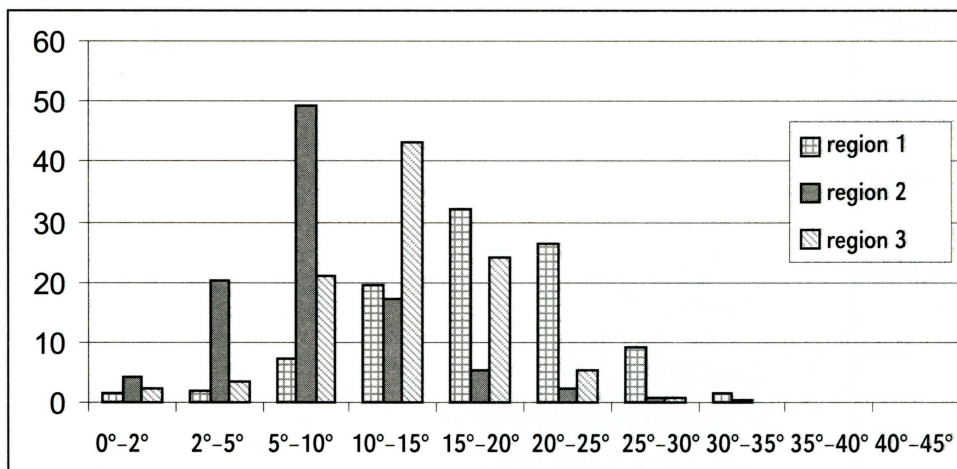


Obr. 1 – Rozdělení studované oblasti do kalibračních regionů pro účely modelu SINMAP

základě informací z literatury (Bíl 2002) považované za středně odolné (ve smyslu geomorfologické odolnosti hornin, Demek 1987). Jedná se o vrchovin-
ný reliéf se strmými svahy, relativně úzkými údolími a více méně pravidelně
(mřížovitě) vyvinutou říční sítí, jehož dominantou je hlavní rozvodní hřbet
Vsetínských vrchů s vrcholy Tanečnice (912 m n. m.) a Soláň (860 m n. m.).
Jedná se převážně o geomorfologické okrsky Soláňský hřbet a Hornobečevská
vrchovina. K tomuto kalibračnímu regionu byla přiřčena oblast v okolí vod-
ní nádrže Bystřička, kde se reliéf vyznačuje výraznými sklony svahů a převý-
šením díky výskytu velmi odolných rusavských vrstev zlínského souvrství
(budují např. vrch Klenov) a středně odolných újezdských vrstev zlínského
souvrství.

V silném kontrastu s výše popsanou částí Vsetínských vrchů je druhý ka-
librační region (region 2), který je představován mírně zvlněným pahorkatin-
ným reliéfem (hlavně Zašovská a Vigantická pahorkatina, které jsou součás-
tí Rožnovské brázdy) pokrytým ze 70 % kvarténními sedimenty, z nichž vy-
stupují výrazné suky (Bíl 2002, Prášek 1993) tvořené velmi odolnými
horninami svrchních godulských vrstev, istebňanským souvrstvím a vrstvami
ciezkowických pískovců (tyto horniny pokrývají 7 % plochy kalibračního regi-
onu). Z podložních hornin vychází dále na povrch celá řada litostratigrafic-
kých jednotek málo odolných hornin náležejících hlavně ke slezské jednotce
godulského příkrovu.

Poslední kalibrační region (region 3) zaujímá zbylé části Valašskobystřické
vrchoviny budované převážně středně nebo málo odolnými horninami (neroz-
lišené soláňské souvrství, ráztocké vrstvy soláňského souvrství, újezdské
vrstvy zlínského souvrství). Oblast je charakterizována mírnějšími svahy, je-
jichž větší sklony jsou podmíněny buď říční erozí (např. mezi přehradou Bys-



Obr. 2 – Zastoupení tříd sklonů svahů(%) v jednotlivých kalibračních regionech Vsetínských vrchů

tříčka a obcí Valašská Bystřice) nebo úzkým pruhem rusavských vrstev zlínského souvrství mezi toky Růžďka a Bystřička.

Odlišné sklony reliéfu ve výše definovaných kalibračních regionech velmi dobře vystihuje obrázek 2, který kromě postupného posunu nejrozšířenějšího sklonu svahů z intervalu 5°–10° u regionu 2 do intervalu 15°–25° u regionu 1, ukazuje velmi výraznou převahu sklonitostního intervalu 5°–10° v kalibračním regionu 2.

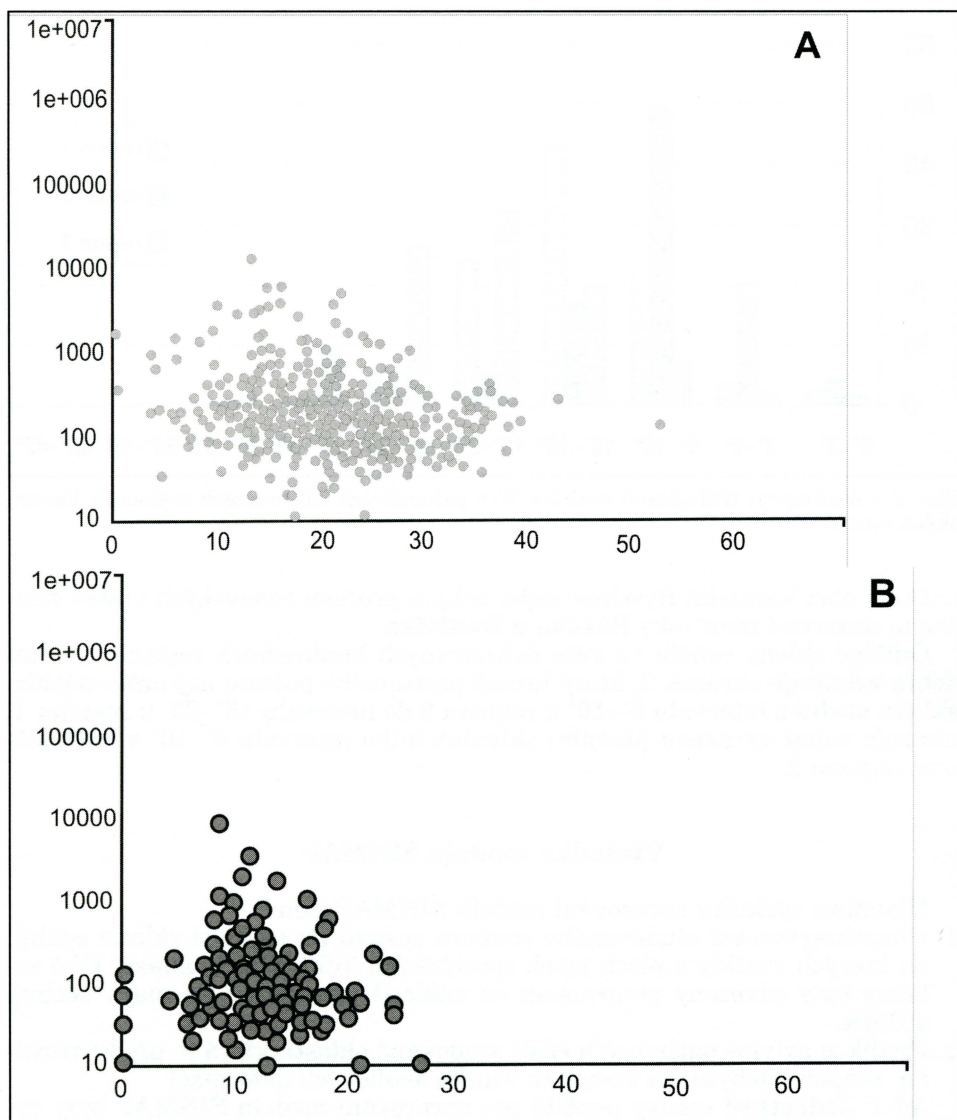
Výsledky modelu SINMAP

Hlavními výsledky zpracování modelu SINMAP jsou:

1. Charakterizování studovaného souboru sesuvů na základě sklonu svahů, na kterých vznikly a ploch jejich specifických infiltračních oblastí. Obě veličiny byly odvozeny programem na základě inventarizační mapy sesuvů z DMR.
2. Predikce nejvíce náchylných částí studované oblasti, která je představována mapou náchylnosti území ke vzniku svahových deformací.

Ad 1: Jednotlivé sesuvy použité pro zpracování modelu SINMAP byly vyneseny do grafu znázorňujícího sklon svahů (osa x) a specifické infiltrační oblasti vyjádřené v podobě délky přímého svahu rozvodnicí a odlučnou oblastí sesuvu (osa y, obr. 3). Výsledky byly porovnány s charakteristikami souboru sesuvů použitých pro zpracování modelu SINMAP v oblasti Aquasparta, Umbrie, Itálie (Klimeš 2002). Popisná statistika obou souborů sesuvů je uvedena v tabulce 3. Vyšší variabilita sklonů svahů, na kterých vznikly sesuvy ve Vsetínských vrších je dána rovnoměrnějším rozložením četností sklonů svahů ve studované oblasti bez výrazné převahy jednoho z intervalů (nezřetelné maximum rozložení četností je v intervalu 15°–20°). Rozložení četností sklonů svahů je v porovnání s normálním rozložením širší a méně špičaté.

V případě oblasti Aquasparta je zastoupení jednotlivých tříd sklonů svahů zúženo do intervalu 2°–15° s výrazným vrcholem v intervalu 5°–10° (kam spadá 48 % plochy všech svahů studované oblasti) a celkově je rozložení četností



Obr. 3 – Graf sklonů svahů a specifických infiltračních oblastí sesuvů ve Vsetínských vrších (A) a modelové oblasti Aquasparta, Umbrie, Itálie (B). Osa x – sklon svahu (°), osa y – specifická infiltrační oblast (m).

výskytu sklonů svahů výrazně užší a špičatější než normální rozložení četností.

Zastoupení sesuvů v jednotlivých třídách sklonů svahů v případě území Aquasparty, nekopíruje podíl jednotlivých sklonitostních tříd na celkové ploše studované oblasti. Více než polovina všech sesuvů (52 %) vznikla na svazích se sklonem 10° – 15° , který představuje pouze 19 % plochy všech svahů studované oblasti. Jinak je tomu v oblasti Vsetínských vrchů, kde zastoupení sesuvů v jednotlivých třídách sklonů do značné míry odpovídá jejich podílu na

Tab. 3 – Základní statistické charakteristiky sklonů svahů a specifických infiltračních oblastí pro sesuvy ve Vsetínských vrších a modelové oblasti Aquasparta, Itálie

Charakteristika	Sklony svahů sesuvů (°)		Specifické infiltrační oblasti sesuvů (m)	
	Vsetínské vrchy	Aquasparta, Itálie	Vsetínské vrchy	Aquasparta, Itálie
průměr	19,8	12,6	295,4	223,2
medián	19,8	11,9	144,1	86,9
směr. odchylka	6,2	4,1	701,9	702,6
rozptyl výběru	38,7	16,7	492 646,8	493 602,6
špičatost	0,5	1,6	137,7	109,6
minimum	3,3	4,2	10,0	10,0
maximum	48,9	27,3	12 426,2	8 540,0
počet	735	185	735	185

celkové ploše studované oblasti. Rozložení četností výskytu sesuvů na třídách sklonů je více rovnoměrné s maximem v intervalu 15°–25°, ve kterém se také nachází nezřetelné maximum rozložení četností sklonů svahů ve Vsetínských vrších.

Specifické infiltrační oblasti vykazují téměř shodnou variabilitu u souboru sesuvů ze Vsetínských vrchů a území Aquasparty. Podobná variabilita (tab. 3) ukazuje, že v obou případech byla dodržena základní podmínka modelu SIN-MAP pro výběr svahových deformací – oba soubory sesuvů vznikly v důsledku akumulace vody ve zvětralinovém plášti a nebyly výrazněji ovlivněny např. strukturními poměry způsobujícími anomálie v dotaci zvětralin podzemní vodou. V případě zařazení většího množství sesuvů, které neodpovídají této definici, by bylo možné u takového souboru očekávat zvýšenou variabilitu velikostí specifických infiltračních oblastí.

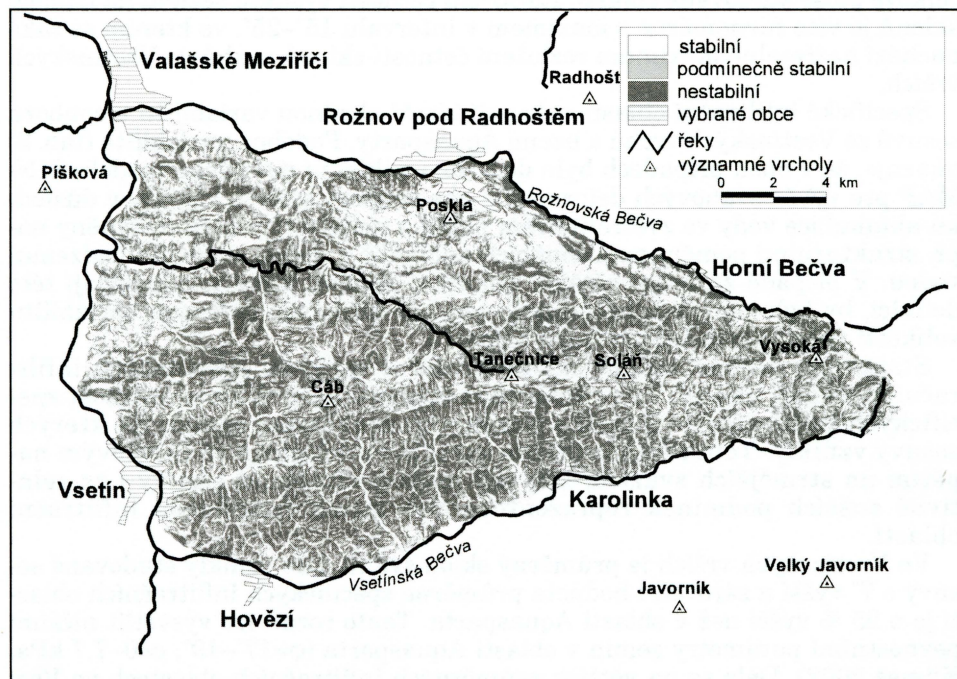
Statistický rozbor hodnot sklonů svahů a velikostí specifických infiltračních oblastí ukázal, že v rámci obou souborů sesuvů klesá velikost specifických infiltračních oblastí s narůstajícím sklonem svahů, na kterých sesuvy vznikly. Tento fakt je možné vysvětlit zvyšujícím se smykovým napětím na strmějších svazích, kde tak mohou vzniknout sesuvy i za relativně sušších podmínek reprezentovaných menší specifickou infiltrační oblastí.

Ve Vsetínských vrších je průměrný sklon svahů, kde vznikly studované sesuvy o 7° vyšší a zároveň i hodnota průměrné specifických infiltračních oblastí je o 25 % vyšší než v oblasti Aquasparta. Tento rozdíl lze vysvětlit nižšími pevnostními parametry zemin v oblasti Aquasparta ($\phi=17^{\circ}$ – 19° , $c=0$ – $7,7$ kPa, Klimeš 2002). Dále se na větších průměrných infiltračních oblastech ve Vsetínských vrších pravděpodobně odrážejí horší hydrologické vlastnosti půd a zvětralin, které mají uvažovaný rozsah koeficientu filtrace 10^{-7} – 10^{-9} m/s, kdežto v oblasti Aquasparta je rozsah 10^{-7} – 10^{-9} m/s. Dalším faktorem ovlivňujícím rozdílné průměrné velikosti infiltračních oblastí nutných ke vzniku mělkých sesuvů je celkově menší vertikální členitost studovaného území Aquasparta, kde neexistují dostatečně dlouhé svahy k vytvoření větších specifických infiltračních oblastí a odlišný původ a tedy i proces infiltrace vody, která byla spouštěným faktorem obou sesuvných událostí. V případě Vsetínských vrchů se jednalo o dešťové srážky, kdežto v oblasti Aquasparta došlo ke vzniku studovaných sesuvů v důsledku náhlého tání sněhu (Cardinali a kol. 1999).

Graf sklonů svahů a specifické infiltrační oblasti jednotlivých sesuvů (obr. 3) také odhalil nedostatky DMR v podobě sesuvů vzniklých na svazích

Tab. 4 – Vybrané výsledky modelu SINMAP pro kalibrační regiony, Vsetínské vrchy

Třída náchylnosti území k sesouvání	Region 1		Region 2		Region 3	
	$\varphi=27^{\circ}-29^{\circ}$ $c=0,09-0,9$ $T/R=0$ $\rho_s=2732 \text{ kg/m}^3$		$\varphi=9^{\circ}-13^{\circ}$ $c=0,09-0,9$ $T/R=0$ $\rho_s=2732 \text{ kg/m}^3$		$\varphi=17^{\circ}-19^{\circ}$ $c=0,09-0,9$ $T/R=0$ $\rho_s=2732 \text{ kg/m}^3$	
	% počtu sesuvů	% podíl plochy území	% počtu sesuvů	% podíl plochy území	% počtu sesuvů	% podíl plochy území
stabilní	25	52	24	64	23	51
podmínečně stabilní	35	36	11	14	24	25
nestabilní	40	22	65	22	53	24



Obr. 4 – Mapa náchylnosti studovaného území k sesouvání vytvořená pomocí modelu SINMAP

s nulovým sklonem nebo s velmi malými hodnotami specifických infiltračních oblastí, které jsou u sesuvů jejichž odlučná oblast (reprezentovaná v modelu SINMAP bodem) byla v důsledku nedokonalého DMR lokalizována na plochém údolním dně.

Ad 2: V případě použití kalibračních regionů byly volitelné parametry modelu SINMAP nastaveny tak, aby co nejlépe vystihovaly podmínky během srážkové události v červenci 1997. Konkrétní hodnoty a získané výsledky (podíl sesuvů zařazených do jednotlivých tříd náchylnosti) jsou uvedeny v tabulce 4. Obrázek 4 ukazuje mapu náchylnosti území k sesouvání

vytvořenou modelem SINMAP. Tuto mapu je díky použitým topografickým datům (ZABAGED 1:10 000) možné používat až do měřítka 1: 10 000.

Na základě znalostí vlastností zvětralinového pláště a srážkových úhrnů byly parametry T/R a soudržnost považovány za konstantní a jejich nastavení odpovídalo nasycení celého modelovaného profilu (mocnost 3 m) vodou. Nejlepší výsledky byly získány u regionu 2, kde 65 % sesuvů bylo zařazeno do nestabilní třídy, která zaujímal pouze 22 % z celkové plochy studované oblasti. Uspokojivého výsledku bylo dosaženo také pro region 3. Výsledky modelu získané pro region 1 však za uspokojivé považovat nelze.

Dále byla vytvořena celá řada modelů kalibračních regionů na základě interaktivní změny všech parametrů. Nejlepších výsledků bylo opět dosaženo pro kalibrační region 2, kdy na pouhých 13 % plochy modelem považované za nejvíce náchylné bylo zařazeno 53 % všech sesuvů a na 75 % stabilního území se nacházelo 26 %. Parametry modelu byly nastaveny následovně: $T/R=0-1500$ m, $c=0$ a $\varphi=16^{\circ}-18^{\circ}$.

Diskuse a závěry

Model SINMAP dosahuje v predikci náchylnosti území k sesouvání nejlepších výsledků v oblastech, kde jsou sesuvy vázány na horniny litologicky odlišné (odolnější), které vytváří strmé svahy zaujímající pouze malou část z celkové rozlohy studované oblasti (např. kalibrační region 2 nebo studovaná oblast Aquasparta, Itálie). Naopak v oblastech morfologicky i litologicky více homogenních (např. kalibrační region 1) jsou výsledky modelu horší a naznačují náhodný (z pohledu modelu) výskyt jednotlivých sesuvů. Z hlediska mechanismu vzniku těchto sesuvů se nejedná o náhodný proces, ale rozhodující faktory a podmínky nejsou buď v rámci modelu uvažovány nebo jsou v daném měřítku modelem nepostihnutelné.

Uspokojivé výsledky dosažené pro regiony 2 a 3 byly získány díky nízkým hodnotám úhlu vnitřního tření, které v případě regionu 2 nelze na základě výsledků laboratorních zkoušek zemin, považovat za reálné nebo se nacházejí při spodní hranici naměřených hodnot. Dá se tedy předpokládat, že hodnota soudržnosti v době vzniku sesuvů byla 0, což umožnilo vznik sesuvů v zemích s vyšším úhlem vnitřního tření, než který byl použit v modelu. Roli může hrát také tlak proudící vody.

Výsledky zařazení části sesuvů do tříd náchylnosti ukazují na vliv faktorů, které nejsou zahrnuty do modelu SINMAP a na jeho chyby. Jedná se především o rozdíly mezi DMR a skutečným reliéfem, místními geologickými a hydrologickými podmínkami a odlišnými geotechnickými parametry. Tyto rozdíly mohou vznikat např. v důsledku toho, že mechanické vlastnosti zemin v místě smykové plochy jsou odlišné od těch, které byly zjištěny laboratorními zkouškami. Program ignoruje prostorovou heterogenitu proudění vody v půdním prostředí vyvolanou dominantním podílem preferenčních cest při tvorbě odtoku z půdního profilu (Šanda 1998).

Nedokonalou reprezentaci skutečného reliéfu v digitální podobě a nejistotu spojenou s reprezentací plošného jevu (sesuvu) pouhým bodem je možné částečně odstranit vytvořením obalové zóny („buffer“) u každého sesuvu. Použitý poloměr obalové zóny byl 20 m. Pokud do obalové zóny s plochou $1\,256\text{ m}^2$ zasahoval alespoň jeden pixel o ploše 100 m^2 z více náchylné třídy, než do které byl sesuv původně zařazen bylo jeho zařazení změněno ve prospěch více náchylné třídy. Takovýmto způsobem byl podíl „špatně“ zařazených sesuvů (se-

suvy ve stabilní třídě) snížen o více než polovinu. Je tedy zřejmé, že hlavním omezením použití modelu SINMAP jsou nedostatky DMR a nedokonalá reprezentace sesuvu v podobě jednoho bodu. I přes tyto zjevné nedostatky je možné model SINMAP doporučit pro studium náchylnosti ke vzniku mělkých sesuvů na regionální úrovni.

Za podporu při zpracování této studie děkuji doc. ing. Janu Rybářovi, CSc. a RNDr. Oldřichu Krejčímu, Ph.D.

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/>, (3.7.2006).
- BÍL, M. (2002): Využití geomorfometrických technik při studiu neotektoniky. Disertační práce, Přírodovědecká fakulta, Masarykova Univerzita Brno, Brno, 100 s.
- CARDINALI, M., ARDIZZONE, F., GALLI, M., GUZZETTI, F., REICHENBACH, P. (1999): Landslides triggered by rapid snow melting: the December 1996 – January 1997 event in central Italy. In: Mediterranean Storms, Proceedings of the EGS Conference in Maratea, Italy, October 1999, Editoriale Bios, Cosenza, s. 439–448.
- DEMEK, J. (1987): Obecná geomorfologie. Praha, Academia, 480 s.
- 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/>, (3.7.2004).
- 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, Chichester, s. 43–74.
- HAMMOND, C., HALL, D., MILLER, S., SWETIK, P. (1992): Level I stability analysis (LI-SA) documentation for version 2.0. Gen. Tech. Rep., INT-285., U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Research Station, Ogden, UT, 190 s.
- JELÍNEK, R. (2004): Niektoré problémy vstupných parametrov deterministickej analýzy zosuvného hazardu. In: Klukanová, A., Frankovská, J. (eds.): Zborník vedeckých prác z konferencie Geológia a životné prostredie, Bratislava, ŠGÚDŠ, Bratislava, s. 40–45.
- KIRCHNER, K., KREJČÍ, O. (1997): Předběžná zpráva o studiu sesuvů aktivovaných během extrémní srážkové činnosti v červenci 1997 na okrese Vsetín. ČGÚ-Ústav geoniky AV ČR, Brno, 105 s.
- KIRCHNER, K., KREJČÍ, O. (1998): Předběžná zpráva o studiu sesuvů aktivovaných během extrémní srážkové činnosti v červenci 1997 na okrese Vsetín. ČGÚ, Ústav geoniky AV ČR, Brno, 27 s.
- KLIMEŠ, J. (2002): Inventory maps and modelling of slope movements using ArcView software. In: Kirchner, K., Rošťinský, P. (eds.): Geomorfologický sborník 1 – sborník příspěvků z mezinárodního semináře „Stav geomorfologických výzkumů v roce 2002“, Brno, 10.–11.6.2002, MÚ, Brno, s. 62–64.
- KREJČÍ, O., BAROŇ, I., BÍL, M., JUROVÁ, Z., HUBATKA, F., KIRCHNER, K. (2002): Slope movements in the Flysch Carpathians of Eastern Czech Republic triggered by extreme rainfalls in 1997: a case study. Physics and Chemistry of the Earth, 27, 2002, Pergamon, s. 1567–1576.
- 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 s.
- PRÁŠEK, J. (1993): Geomorfologie pramenné oblasti povodí Rožnovské Bečvy. Univ. Os-traviensis, Acta Facultatis Rerum Naturalium, Geographia/Geologia 1, 136, s. 21–32.
- Rybář, J. (1999): Rozbor příčin zvýšeného výskytu svahových deformací v České republice v červenci 1997. Geotechnika, 2, Praha, s. 7–14.
- RYBÁŘ, J. a kol. (1999): Hodnocení rizik nestability svahů v oblasti Valašského Meziříčí – Mikulůvka – Jablůnka – Malá Bystrice v Okrese Vsetín. ÚSMH AV ČR Praha, Praha, 100 s.
- ŠANDA, M. (1998): Proudění vody v půdním profilu na svahu horského povodí. Doktorské disertační minimum, ČVUT, FSV Praha, 56 s.

- van BEEK, R. (2002): Assessment of the influence of changes in land use and climate on landslide activity in a Mediterranean environment. Netherlands Geographical Studies, NGS 294, Utrecht, 363 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.
- ZAITCHIK, B. F., van ES, H. M. (2003): Applying a GIS slope-stability model to site-specific landslide prevention in Honduras. Journal of Soil and Water Conservation, 58, č. 1, s. 45–53.

Summary

USE OF THE DETERMINISTIC APPROACH FOR THE LANDSLIDE SUSCEPTIBILITY MAPPING, VSETÍNSKÉ VRCHY HIGHLAND, CZECHIA

The work is seeking accurate spatial prediction of shallow landslide occurrence on regional scale, through field mapping of present day landslide activity and identifying the most susceptible parts of the study area by the means of the SINMAP susceptibility model. The SINMAP ArcView extension is also used to characterize shallow landslide and to study conditions for their spatial occurrence.

The study area lays in the Outer Western Carpathians east of the city of Vsetín and it was subject to an avalanche like occurrence of mostly shallow landslides during the floods caused by heavy rains between the 4th and 8th and between the 17th and 21st of July, 1997. The area is formed by flysch rocks with highly variable portion of competent, permeable sandstone layers and plastic, rather impermeable claystones and siltstones.

Detailed field landslide inventory mapping and digital elevation model at the scale of 1:10 000 were used to prepare SINMAP models for three calibration regions. The regions were defined based on different morphological conditions within the study area. Information from detailed geological investigations was used to determine basic mechanical properties of the weathering mantle, where the studied landslides occurred. They include: angle of internal friction, cohesion, transmissivity and unit weight of the soil. All this information was used to calculate the factor of safety (FS) for each individual pixel from the resulting landslide susceptibility map. The values of FS were classified into three stability classes.

The SINMAP model gained the best results in the calibration region where landslide initiation areas are bound with steep slopes on more competent rocks which cover only a small portion of the calibration region. On the other hand, in some parts of the region under study, which are morphologically more homogenous, the use of the model gives the worst results. It is also due to the fact that the determining conditions for landslide occurrence in these regions are not included in the model calculation.

The model results are also determined by the definition of susceptibility classes. Apart from a partly subjective use of FS, susceptibility classes are also defined by validation criteria. If the only validation criteria were the portion of landslides included in the unstable susceptibility class, the model would obtain very good results. But at the same time, the major part of the study region could be designated as an unstable area. Therefore the used criterion was the largest portion of the studied landslides included in the unstable class, which covers the smallest possible portion of the study region. According to these validation criteria, the best results gave 65 % of the number of landslides in the unstable class, which covered only 22 % of the study area. The mistake of the model was defined by the portion of landslides (24 %) included in the stable susceptibility class which in this case covered 65 % of the study region.

Despite of certain simplicity of the SINMAP model, it proved to be good tool for study of shallow landslide distribution.

Fig. 1 – Calibration regions of the study area for the purpose of the SINMAP model. In key from above: region 1, region 2, region 3, important peaks, rivers, municipalities.

Fig. 2 – Slope dip distribution (%) in calibration regions of Vsetínské vrchy Highland.

Fig. 3 – Plot of the specific infiltration areas and slope dips of the starting points of landslides in the study area of the Vsetínské vrchy Highland (A) and study area of the Aquasparta, Umbria, Italy (B). Axis x – slope dip (°), axis y – specific infiltration area (m).

Fig. 4 – Landslide susceptibility map produced by the SINMAP model for the Vsetínské vrchy Highland. In the key from above: stable, conditionally stable, unstable, selected municipalities, river, important peaks.

Pracoviště autora: Ústav struktury a mechaniky hornin AV ČR, v.v.i., V Holešovických 41, 182 09, Praha 8; e-mail: jklimes@centrum.cz

Do redakce došlo 23. 3. 2007