

Práce se snaží o co nejlepší prostorovou predikci výskytu svahových deformací v regionálním měřítku prostřednictvím mapování současné i předchozí sesuvné aktivity a modelů náchylnosti území ke vzniku svahových deformací s využitím technologie GIS. K tomuto účelu bylo použito několik modelů náchylnosti, jejichž výsledky byly vzájemně porovnány a použity k vytvoření nové metody tvorby map náchylnosti území ke vzniku svahových deformací studované oblasti.

Studovaná oblast zaujímá geomorfologický podcelek Vsetínské vrchy a k němu přiléhající část Rožnovské brázdy, které jsou tvořeny tektonicky a litologicky velmi proměnlivými flyšovými horninami, silně náchylnými ke vzniku svahových deformací. Terénní práce byly realizovány ve východní části zpracovaného území v katastru obcí Karolinka, Velké Karlovice, Hutisko-Solanec a Horní Bečva. Na studovaném území vzniklo velké množství svahových deformací díky extrémním srážkám v červenci 1997 (Rybář, Stemberk 2000).

Jako modely náchylnosti území ke vzniku svahových deformací byly použity historická inventarizační mapa svahových deformací, sklonová mapa, fyzikální model SINMAP (Pack et al. 1998) a statistický bi-variantní model (Carrara et al. 1995). Zvlášť byla také hodnocena pomocí výpočtu tzv. „failure rate“ (Wieczorek 1994), náchylnost jednotlivých podmínek prostředí ovlivňujících vznik svahových deformací.

Hodnocení výsledků jednotlivých modelů náchylnosti bylo provedeno jednak výpočtem hustoty výskytu svahových deformací v jednotlivých třídách náchylnosti a také výpočtem jejich predikční schopnosti podle Chung, Fabbri 2003.

Výsledky

Porovnání velikosti (magnituda podle Malamud a kol. 2004) sesuvné události z července 1997 na území Vsetínských vrchů s případy hromadného vzniku svahových deformací z různých částí světa ukázalo, že se nejednalo o výrazně extrémní událost. Její výjimečnost z regionálního pohledu je ovšem jednoznačná. Metodika pro hodnocení velikosti sesuvných události navržená Malamudem a kol. (2004) je vhodná pro srovnání více událostí pouze tehdy, pokud při tvorbě inventarizačních map byla v porovnávaných případech stanovena stejná hranice nejmenšího rozměru (plochy nebo délky či šířky) svahových deformací zahrnutých do inventarizace. V praxi je tato podmínka jen obtížně splnitelná. Z tohoto důvodu je také porovnání sesuvné události z července 1997 s událostmi uváděnými v práci Malamud a kol. (2004) jen orientační. Význam nejmenšího rozměru svahových deformací zahrnutých do inventarizační mapy se ukázal v případě události z července 1997 odlišnými hodnotami výsledného magnituda vypočteného na základě plochy zmapovaných svahových deformací a jejich počtu. Plocha je v případě této inventarizace známa pouze u 20% z celkového počtu 1486 zjištěných deformací na území Vsetínských vrchů. Hodnoty magnituda vypočteného na základě plochy (2,9) a počtu (3,2) svahových deformací se sice liší, ale jejich rozdíl není příliš výrazný. Znamená to, že neznámá plocha svahových deformací vzniklých v červenci 1997 není velká.

Dílčí hodnocení náchylnosti jednotlivých podmínek prostředí pro sesuvy a zemní proudy z července 1997 ukázalo, že nejvíce náchylná třída sklonu svahů je 33° - 39°. Celkově však svahy se sklony nad 33°

zaujímají pouze 0,4% z celkové rozlohy Vsetínských vrchů, proto je pro tvorbu map náchylnosti důležitější druhý nejvíce náchylný interval sklonů svahů $12^\circ - 15^\circ$. Náchylnost svahů se sklony nad 33° je možné vysvětlit vysokým smykovým napětím a přítomností vhodného materiálu pro vznik svahových deformací. Vysokou náchylnost svahů se sklony $12^\circ - 15^\circ$ je možné dát do souvislosti s dostatečnou infiltrací srážkové vody při dostatečně vysokém smykovém napětí způsobeném sklonem svahů. Dále bylo zjištěno, že nejvíce náchylné na vznik svahových deformací z července 1997 jsou následující litostratigrafické jednotky: belovežské souvrství, drobně rytmický flyš istebňanského souvrství a svahové sedimenty. Svahové sedimenty jsou náchylné díky svým hydrologickým vlastnostem a rozšíření hlavně v konkávních částech reliéfu, což umožňuje zvýšenou koncentraci podzemní vody. Vyšší náchylnost ke vznik svahových deformací také vykazují svahy, kde směry sklonů vrstevních ploch odpovídají jejich orientacím. Spolehlivá identifikace těchto svahů v regionálním měřítku je však v důsledku omezené dostupnosti spolehlivých výchozů horninového podloží a vysoké proměnlivosti strukturálních podmínek Vsetínských vrchů problematická. Vysoká náchylnost ke vzniku svahových deformací z července 1997 byla dále zjištěna u glejových půd, za které je zodpovědné jejich zamokření a výskyt v blízkosti vodních toků. Ke vzniku drobných (s rozměry do 50 m) sesuvů a zemních proudů jsou velmi náchylné břehy vodních toků a erozní svahy v jejich blízkosti (do 40 m od vodních toků).

Výsledky porovnání hodnot FR („failure rate“; Wiczorek 1994) pro jednotlivé třídy podmínek prostředí pro odlučné a akumulární části svahových deformací ukázaly největší rozdíly pro sklony svahů a

litostratigrafické jednotky. V některých případech se ukázalo, že náchylnost litostratigrafických jednotek byla způsobena pouze výskytem akumulací svahových deformací. U těchto litostratigrafických jednotek (např. drobně rytmický flyš istebňanského souvrství, tesácké vrstvy) tedy lze předpokládat, že nereprezentují podmínky důležité pro vznik svahových deformací. V jiných případech byla náchylnost litostratigrafických jednotek definovaná na základě odlučných oblastí výrazně vyšší než při hodnocení celých ploch svahových deformací (např. újezdské vrstvy a hrubě rytmický flyš istebňanského souvrství). Vzhledem k tomu, že se ukázalo, že vytvořený statistický model náchylnosti území ke vzniku svahových deformací je silně závislý právě na litostratigrafických jednotkách, mohly výše zmiňované rozdíly v náchylnosti mezi odlučnými a akumulárními oblastmi být spoluzodpovědné za jeho relativně špatné výsledky. Použití pouze odlučných oblastí pro tvorbu statistického modelu náchylnosti by z výše uvedených důvodů bylo vhodnější. Výsledky statistického modelu také ukázaly, že proměnlivé litologické a strukturální poměry hornin ve Vsetínských vrších lze jen velmi obtížně zachytit v regionálním měřítku a dostupné geologické podklady jsou z tohoto pohledu nedostatečné. Zároveň relativně monotónní (velmi pravidelné zastoupení jednotlivých intervalů sklonů svahů, nízké zastoupení strmých svahů nad 30° a malé rozšíření výrazných lomů spádu svahů) sklonitostní poměry studované oblasti působí, že podmínky vzniku studovaných svahových deformací jsou homogenní na relativně velkých plochách a vymezení areálů s nejhodnějšími podmínkami pro jejich vznik je velmi obtížné.

Přehlednou a srozumitelnou formou prezentace nejvíce náchylných oblastí v rámci studovaného území jsou mapy náchylnosti území ke vzniku svahových deformací vytvořené zvlášť pro mělké sesuvy (model SINMAP) a svahové deformace z července 1997. Nicméně nejlepší výsledků při predikci výskytu svahových deformací dosáhla upravená historická inventarizační mapa svahových deformací, která do 14% nestabilní třídy náchylnosti zahrnuje (tedy správně předpověděla) výskyt 70% plochy nově vzniklých (červenec 1997) svahových deformací. Oblasti studovaného území definované jako stabilní jsou dostatečně odolné části reliéfu, kde žádná ze sesuvných událostí zaznamenaných v inventarizační mapě nedokázala narušit jejich stabilitu. Obecně to ovšem neznamená, že by na těchto „stabilních“ částech území nemohly být podmínky pro vznik svahových deformací vhodné jako tam, kde k sesouvání již došlo. Důvodů proč plochy s podobně vhodnými podmínkami pro vznik svahových deformací jako ty, kde již deformace byly zaznamenány nejsou porušeny sesouváním je pravděpodobně více. Jedním z vysvětlení je, že za současného stavu prozkoumanosti daného území nebo současné úrovně znalosti procesů vzniku svahových deformací, není možné odlišné podmínky identifikovat. Pozorovateli se tak zdá, že podmínky na porušené a neporušené části svahu jsou stejné, i když se ve skutečnosti liší. Za „těžko identifikovatelné“ podmínky vzniku svahových deformací lze považovat proudění (zvlášť pak preferenční proudění, Šanda 1998) a výšku hladiny podzemní vody nebo místní litologické a strukturní podmínky. Dalším vysvětlením může být tzv. „supply“ nebo „weathering-limited“ teorie vývoje svahů (Summerfield 1991, Hovius a kol. 2000), z které vyplývá,

že vývoj svahů je omezen rychlostí zvětvávání, tedy tvorby materiálu vhodného pro transport. Materiálem vhodným pro transport se rozumí nejen určitá mocnost svahovin, ale také jejich určité vlastnosti (např. zrnitost, propustnost, ulehlost, obsah jílových minerálů, soudržnost), které se mohou výrazně měnit i na relativně malých vzdálenostech. Dalším vysvětlením proč sesouváním v rámci jedné sesuvné události bývá postižena pouze část území se shodnými podmínkami pro vznik svahových deformací, je prostorová stálost („spatial persistency“) vzniku nových svahových deformací (Malamud a kol. 2004). Prostorová stálost v sobě zahrnuje změnu podmínek v důsledku dřívě vzniklých svahových deformací zahrnující vznik predisponovaných ploch nespojitosti s výrazně sníženými pevnostními charakteristikami (např. smyková pevnost může odpovídat reziduálním hodnotám), změnu hydrologických poměrů a změnu textury, struktury a úložných poměrů hornin i sedimentů přemístěných svahovými pohyby. Tato změna podmínek, se v důsledku dlouhého časového úseku, který mohl uplynout od předchozí sesuvné události, nemusí na povrchu morfologicky projevovat a nemusí být při terénním mapování rozpoznána. Použití historické inventarizační mapy svahových deformací pro oblast Vsetínských vrchů ukázalo důležitost znalosti výskytu svahových deformací v minulosti pro identifikaci míst s opakovanou aktivitou, které je možné považovat za velmi náchylné i ke vzniku svahových deformací v budoucnu. Potvrdila se tak důležitost vytváření, uchovávání a doplňování regionálních databází svahových deformací v průběhu dlouhého časového období. Bylo prokázáno, že terénní mapování nebo interpretace leteckých snímků jsou vhodnými nástroji pro sestavování těchto databází. Získané hodnoty prostorové

stálostí nově vzniklých svahových deformací dokazují, že předešlé svahové deformace vytvářejí velmi důležité podmínky pro vznik nových deformací a že tyto podmínky hrají zásadní roli v náchylnosti Vsetínských vrchů ke vzniku svahových deformací.

Odlíšné přístupy tvorby modelu SINMAP (interaktivní volba parametrů nebo volba parametrů popisujících předpokládané podmínky vzniku studovaných sesuvů) vedly k výsledkům, potvrzujícím, že se jedná o vhodný nástroj pro tvorbu map náchylnosti území ke vzniku „mělkých“ sesuvů a zemních proudů a také studia podmínek jejich vzniku. Výsledky modelu SINMAP byly nejvíce ovlivněny reliéfem použitých kalibračních regionů, které se navzájem lišily průměrným sklonem a převýšením ve čtverci 100x100 m. Nejlepších výsledků dosáhl model v území (kalibrační region 2) s nejnižším průměrným sklonem a převýšením a to díky výskytu strukturálně podmíněných suků a hřbetů, na které je vázán vznik svahů s výrazně vyššími sklony než jaké se vyskytují na většině plochy tohoto kalibračního regionu. Podstatně horších výsledků bylo dosaženo v kalibračních regionech s vyššími průměrnými hodnotami sklonů svahů a převýšení, ale s mnohem menšími kontrasty sklonů svahů. Při porovnání výsledků modelu SINMAP s mapou náchylnosti vytvořenou pouze na základě sklonu svahů se ukázalo, že přestože je model SINMAP silně závislý na DMR (a tedy i sklonech svahů) dosáhl mnohem lepších výsledků než mapa náchylnosti vytvořená pouze na základě sklonů svahů. Model SINMAP dosáhl lepších výsledků hlavně díky výpočtu specifických infiltračních oblastí a jejich využití při výpočtu stability svahů. Výsledky modelu jsou výrazně ovlivňuje umístění bodů reprezentujících odlučné oblasti svahových deformací.

V této souvislosti se ukázal graf sklonů svahů a specifických infiltračních oblastí jednotlivých sesuvů jako velmi dobrý nástroj pro rychlé a snadné odhalení nedostatků použitého DMR. Právě vysoká závislost výsledků modelu SINMAP na kvalitě použitého DMR nedovolila podrobnější hodnocení vztahu výsledků modelu a reálných geotechnických parametrů zemín.

Nejhorších výsledků dosáhl dvourozměrný statistický model, což bylo pravděpodobně způsobeno nedostatečným prostorovým rozlišením tříd jednotlivých vstupních map podmínek prostředí a omezenou platností principu „environmental similarity“, který je základem předpokladem pro tvorbu statistických modelů. Omezení platnosti tohoto principu je způsobeno výskytem svahových deformací různých typů v rámci historické inventarizační mapy, která byla použita pro tvorbu statistického modelu. Pro zlepšení predikce budoucího výskytu svahových deformací by bylo nutné vytvořit zvlášť modely pro různé typy svahových deformací což je vzhledem k nejednotnosti použitých zdrojů pro vytvoření historické inventarizační mapy složité. Tento fakt by měl být brán v úvahu při sestavování inventarizační svahových deformací v budoucnu. V opodstatněných případech lze spojit několik digitálních map podmínek prostředí do jedné vrstvy, čímž lze částečně odstranit nevýhodu, která je společná pro všechny dvourozměrné statistické modely náchylnosti území k sesouvání. Touto nevýhodou je postupné porovnávání vždy pouze jedné nezávisle proměnné (mapa podmínek prostředí) se závisle proměnou (inventarizační mapou svahových deformací). V případě studované oblasti by bylo vhodné spojit litostratigrafické jednotky s agregovanými půdními typy, které

v některých případech mohou doplnit informace o vlastnostech povrchové části zvětralínového pláště, která je velmi důležitá pro rozvoj mělce založených (do 4 - 5 m) svahových deformací.

Přestože pro hodnocení výsledků jednotlivých modelů náchylnosti území ke vzniku svahových deformací byly použity nejrůznější metody ukázalo se, že se jedná pouze o různé způsoby výpočtu relativního zastoupení¹ (ve smyslu plochy) svahových deformací ve studovaném území. Výjimkou je metoda hodnocení úspěchu a chyby jednotlivých modelů, která je ovšem do značné míry subjektivní. Vzájemné porovnání výsledků jednotlivých modelů náchylnosti je vzhledem k odlišným východiskům metod jejich tvorby velmi složité. Některé metody rozdělují studované území pouze na dvě třídy náchylnosti – nestabilní a stabilní (historická inventarizační mapa svahových deformací), jiné se naopak snaží rozdělit studované území podle míry náchylnosti do několika rajónů.

Nejlépeším způsobem posouzení náchylnosti území ke vzniku svahových deformací je pravděpodobně terénní šetření zkušeného pracovníka. Tento přístup je však velmi nákladný a časově náročný. Je proto praktické vytvářet metody umožňující hodnocení náchylnosti území v regionálním měřítku s minimální časovou i finanční náročností. Hlavní výhodou těchto modelů je jejich opakovatelnost díky zcela jednoznačným kritériím tvorby, které jsou v prostředí GIS aplikovány stejně vždy na celé studované území. Digitálně zpracované modely náchylnosti umožňují velmi snadnou změnu kritérií jejich tvorby např. v důsledku

¹ Jedná se o poměr hustoty výskytu svahových deformací v jednotlivých třídách map podmínek prostředí k hustotě jejich výskytu v rámci celého studovaného území.

změny podmínek prostředí nebo znalostí o studovaném území či jevu. Jejich další výhodou je možnost získání celé řady informací o studované oblasti, které je možné terénním šetřením doplnit a případně opravit a které je možné využít při tvorbě modelu náchylnosti. Největším omezením modelů náchylnosti území k sesouvání na regionální úrovni je kvalita a stupeň generalizace (tedy měřítko) vstupních dat, které mimo jiné určují měřítko výsledných map náchylnosti, které nesmí být podrobnější než nejméně podrobná mapa vstupních data.

Zásadním omezením využitelnosti modelů náchylnosti území k sesouvání je to, že žádný z nich se neobejde bez co možná nejvíce spolehlivé a podrobné inventarizace svahových deformací. Vznik takovéto inventarizace je v podmínkách Vsetínských vrchů (a velké části České republiky) možný prakticky pouze detailním terénním šetřením. Použití metod dálkového průzkumu Země je velmi silně limitováno lesními porosty.

Inventarizační mapa svahových deformací pro vytvoření modelů náchylnosti území ke vzniku svahových deformací by měla zobrazovat jejich akumulační a odlučné části, typ, příčiny vzniku, opakování jevu, relativní stáří nebo dobu vzniku, aktivitu, stádium vývoje, plochu a v případě nemožnosti plošného zákresu i délku a šířku deformací. Jednotlivé třídy svahových deformací je potom možné definovat na základě kombinace výše uvedených kritérií.

Mapy náchylnosti území v regionálním měřítku nemohou nahradit mapy vznikající na základě podrobného terénního mapování, ale mohou výrazně přispět k efektivitě jejich tvorby a prevenci potenciálně vzniklých škod způsobených svahovými deformacemi. Za určitých

podmínek je například možné vytvořit mapu náchylnosti pro rozsáhlou oblast na základě podrobnější znalosti pouze její části (tzv. trénovací oblasti). Dále je možné využít mapy náchylnosti např. spolu s územními plány k identifikaci potenciálně nejvíce ohrožených částí studované oblasti.