

VÍT VOŽENÍLEK

## DIGITÁLNÍ DATA V MODELOVÁNÍ SESUVŮ S VYUŽITÍM REGISTRU SVAHOVÝCH DEFORMACÍ GEOFONDU ČR

V. Voženílek: *Digital Data in Modelling of Landslide Risk Using the Register of Slope Deformations of the GEOFOND CR.* – Geografie-Sborník ČGS, 102, 4, pp. 254 – 269 (1997). – Landslides are an important landscape problem in the Carpathian part of the Czech Republic. In order to establish which slopes are most at risk, their spatial incidence can be modelled using techniques of geographical information systems together with a database describing past landslides. Three modelling strategies – rule-based modelling, ordinal modelling and categorical data modelling – are adopted and compared. It is suggested that the categorical data modelling approach is the most general and makes the best use of the available information.

KEY WORDS: GIS – modelling – digital data – data types – landslides.

### Úvod

Digitální data ve fyzickogeografických aplikacích jsou odvozena z dostupných dat o topografii, klimatu, půdních vlastnostech, geologii, využití půdy, vegetačním pokryvu, vodstvu, kvality životního prostředí apod. Každý z těchto zdrojů dat má při svém využití v geografických informačních systémech (GIS) specifické postavení související pochopitelně se specifickou skupinou problémů. Některé z těchto tematických jevů se mění v prostoru spojitě (např. hypsometrie, teplota vzduchu), jiné diskrétně (nespojitě, např. geologické zlomy, říční síť). Ovšem existují i jevy, které mohou náležet do obou těchto kategorií, a to podle úrovně abstrakce a podrobnosti (např. břehová čára). Tyto jevy se měří buď ve spojitých měřících (např. nadmořská výška, rychlost vsakování) nebo diskrétních měřících (např. horninový typ, barva půd). Protože data nemohou být digitálně uložena ve spojitě formě, je jedním ze základních úkolů použití digitálních prostorových dat v GIS docílení souladu mezi realitou, formou vyjádření užitou při sběru a uložení spojitých dat a formou, ve které se používají v systémech. Propojení mezi vyjadřovanou realitou a digitálními daty v databázích je velmi často slabé.

Nespojitá měřítka jsou typická například pro data popisující využití země, půdní, geologické a vegetační poměry. Takto klasifikovaná data musejí být pro využití dat v matematických modelech převedena na hodnoty použitelné v numerických výpočtech. Funkční vazby veličin v modelu často vyžadují definování intervalů nebo poměrových hodnot, které jsou většinou získány z tabulek, vztahujících se například k typům půd určených v databázích pro specifické charakteristiky (např. propustnost a erodibilita). Data označující kategorie se také používají při vývoji modelů ke stanovení hodnot parametrů.

Cílem příspěvku je nejenom demonstrovat možnost využití GIS při modelování ohrožení svahů sesuvy a různé přístupy tvorby těchto modelů, ale po-

ukázat i na nutnost klást důraz na odlišnou informační úroveň vstupních faktorů reprezentovaných různými typy digitálních prostorových dat.

## Digitální data

Při aplikacích GIS ve fyzické geografii se široce využívá všech typů geografických dat. Typy geografických dat se vymezují podle řady hledisek. Z hlediska základních aspektů geografického výzkumu se data dělí na prostorová (data prostorově určená v libovolném prostorovém systému souřadnic) a časová (data vztažená k určitému časovému okamžiku nebo období). V moderních GIS a prostorových analýzách se oba typy dat spojují v data časoprostorová (Wang, Unwin 1992).

Z pohledu uživatele informačního systému se data sémanticky dělí na *identifikační data*, určující především časoprostorové souřadnice studované územní jednotky (např. souřadnice a identifikátory objektů), *deskriptivní data* (nejrozšířenější typ), podrobně popisující jev či libovolnou studovanou tematiku (veškerá tematická data), dále *normovaná data*, což jsou předem stanovené a přijaté údaje, jimiž jsou limitovány nebo posuzovány určité jevy (roční průměry, standardy, hektarové výnosy) a *data kmenová*, představující relativně neměnná data rozvíjející data identifikační (např. názvy, hypsometrická data). Z výše uvedených typů geografických dat jsou ve fyzické geografii nejdůležitější data identifikační a deskriptivní, která musejí být vždy jednoznačně určena. Bez nich by nebyl možný záznam údajů o daném objektu či jevu. Vlastním nositelem informace jsou přitom deskriptivní data. Data identifikační, která sama o sobě nemají žádný informační obsah, přiřazují deskriptivní údaje určitým jevům či objektům.

## Typy digitálních dat

Různorodost fyzickogeografických jevů, jejich strukturovanost a stupeň poznání spolu s různou úrovní požadovaného zpracování aplikací podmiňuje vyčlenění digitálních dat do čtyř základních typů (Schetselaar 1995). Při realizaci fyzickogeografických aplikací se specifika těchto typů projevují ve všech etapách zpracování – od sběru dat, uložení, správy, analýzy až k jejich prezentaci. Digitální data se dělí na nominální, ordinální, intervalová a poměrová.

*Nominální data.* Každá hodnota představuje konkrétní kategorii, resp. třídu, vyjadřující označení nebo jméno jevu („spraš“, „kategorie 2“, „Vyškovská brána“, „klimatická oblast CH7“ apod.). Jediným požadavkem je disjunktnost jevů (tzn. jednotlivé nominální kategorie se nesmějí nepřekrývat). Každý objekt musí být zařaditelný alespoň do jedné kategorie („les“, „neles“) a žádný objekt nesmí spadat do více než jedné kategorie. Číslo označující kategorie 1, 2, 3, ...,  $n$  představují pouze symboly a nelze s nimi provádět žádné složitější operace, pouze operaci rovnosti (objekty se rovnají nebo nerovnají). Například: kategorie 1 – černozemě, kategorie 2 – podzoly, kategorie 3 – hnědé lesní půdy. Tato skutečnost omezuje jejich statistické a zčásti i kartografické zpracování, protože lze vyšetřovat pouze rozmístění a topologii. Nejjednoduššími příklady jsou data alternativních jevů (muž/žena, souše/oceán, s vegetací/bez vegetace aj.), které jsou nejčastěji vyjadřovány binárními symboly 0 a 1.

*Ordinální data.* V případě, že lze data seřadit do posloupnosti, nazývají se ordinální. Na rozdíl od nominálních dat, kde neexistuje žádný kvantitativní

vztah mezi kategoriemi, lze ordinální data uspořádat. Příklady představují klasifikace síly větru, řády vodních toků a bonita půd. U těchto tematik je známé pořadí, avšak nikoli rozdíl. Ordinální data mají díky možnosti provádět operace rovnosti a uspořádání dvě důležité vlastnosti: jsou asymetrická a tranzitivní.

*Intervalová data.* Vedle operací rovnosti a uspořádání umožňují intervalová data provádět i odečítání a tím lze definovat rozdíl mezi kategoriemi pomocí pevné stupnice. Příkladem intervalových dat je teplota vzduchu ve stupních Celsia. Zde je rozdíl mezi 16 °C a 29 °C stejný jako mezi 45 °C a 58 °C, což obecně neplatí u dat ordinálních. Stupnice intervalových dat obsahují ve svém středu „nulu“, která je ve své podstatě uměle vytvořená (0 °C x 0 °F) stejně jako celá stupnice a jí odpovídající jednotky.

*Poměrová data.* Data intervalová i poměrová umožňují realizovat operace rovnosti, uspořádání a odečítání pomocí pevné stupnice, navíc umožňují provádět operaci dělení. Odlišují se však přirozeným původem „nuly“. Příkladem poměrových dat je objem vodního tělesa, délka řeky, množství srážek aj. V případě intervalových dat znamená nula konkrétní hodnotu (např. 0 °C), zatímco u poměrových dat vyjadřuje „neexistenci“ jevu (např. 0 mm srážek). Stejně tak existuje odlišnost při vytváření poměrových stupnic. Na rozdíl od dat intervalových nelze provádět dělení poměrových dat. To znamená, že například lokalita s teplotou 20 °C (68 °F) není ve smyslu typů dat dvakrát teplejší nežli místo s teplotou 10 °C (50 °F), protože poměr závisí na zvolených jednotkách měření (tj.  $20\text{ °C}/10\text{ °C} = 2$ , zatímco  $68\text{ °F}/50\text{ °F} = 1,36$ ).

Přesto jsou intervalová a poměrová data většinou zpracovávána podle stejných aritmetických a statistických algoritmů, a proto je lze velmi často spojovat. Příklady výše uvedených typů digitálních dat obsahuje tabulka 1.

Tab. 1 – Typy digitálních dat

Typy dat	Objekty (počet rozměrů)			
	Bodové 0	Liniové 1	Plošné 2	Povrchové 3
Nominální	sídlo	komunikace	orografický celek	půdní typy
Ordinální	město velkoměsto	hlavní železniční tah vedlejší tah	pahorkatina vrchovina	půda bonity I půda bonity II
Intervalová/ poměrová	počet obyvatel města	propustnost železniční tratě	nejvyšší nadmořská výška	infiltrační schopnost půd

U výše uvedených typů digitálních dat lze vymezit odlišnosti v mnoha fyzikogeografických oblastech. Kartografické zdroje digitálních dat a jejich interpretace jsou úzce spojeny s typy kartografických děl (Voženílek 1996) – viz tabulka 2.

Digitální data by měla být pořizována, ukládána a zpracovávána na jednotné úrovni typů dat. Přesto je mnohdy možné (a občas i výhodné) převést je na úroveň nižší pro účely mapování a jejich kartografické interpretace. K tomu se v oboru GIS používá řada digitálních metod – reklasifikace, generalizace, interpolace aj. S daty vyššího typu nelze provádět analýzy a zpracování me-

Tab. 2 – Příklady map podle typů digitálních dat

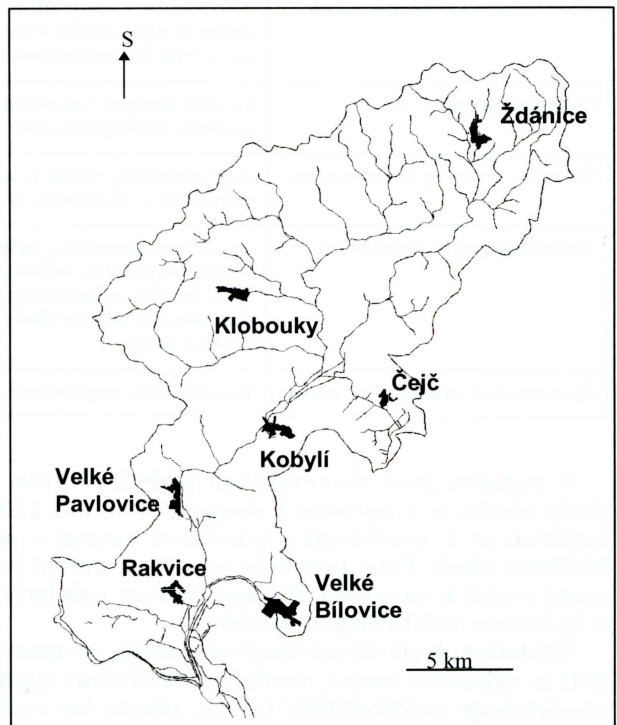
Typy dat	Mapy			
	Bodové 0	Liniové 1	Plošné 2	Povrchové 3
Nominální	bodové mapy	mapy sítí	typologické mapy	blokdigramy
Ordinální	kartodiagramy uspořádaných jevů	mapy hierarchicky uspořádaných sítí	mapy uspořádaných areálů	blokdigramy uspořádaných jevů
Intervalová/ poměrová	kartodiagramy, lokalizované diagramy	liniové kartogramy	kartogramy	pseudoprostorové kartogramy, pohledové mapy digitálních modelů reliéfu

todami určenými pro data nižší úrovně, protože vždy dochází ke ztrátě informací. Je možné pouze převádět intervalová a poměrová data na data ordinální (např. teplota nízká – střední – vysoká). Co však není dovoleno, je zpracování a analýza dat nižší úrovně metodami odpovídajícími digitálním datům vyšší úrovně. Nelze například počítat kategorie bonity půd nebo tvrdit, že mezi stupněm I a III Beaufortovy stupnice síly větru je stejný rozdíl jako mezi stupni V a VIII.

### Digitální data ve fyzikogeografic- kých aplikacích

Pro demonstraci významu informační hodnoty jsou v předloženém příspěvku popsány metody modelování potenciálního ohrožení svahů sesuvy v povodí Trkmanky (obr. 1). Povodí Trkmanky (377 km<sup>2</sup>) se rozkládá na pomezí okresů Břeclav, Hodonín a Vyškov. Trkmanka je levostranný přítok Dyje, pramení ve Ždánickém lese pod kótou 432 m U slepice, teče přibližně ze severu na jih a ústí do Dyje nad Břeclaví ve výšce 150 m n.m.

Obr. 1 – Povodí Trkmanky – studovaná oblast



Základním vstupem dat modelů byla rozsáhlá databáze již existujících sesuvů Geofondu ČR, geomorfologické poznatky o sesuvech jako svahových procesech a základní topologické informace z topografických map shromážděných v geografickém informačním systému. Zde použité modely lze úspěšně použít nejen v jiných regionech, ale i při modelování dalších geografických jevů.

### Databáze sesuvů

Terénní výzkum sesuvů a dalších svahových deformací v prostoru povodí Trkmanky prováděla řada institucí, nejvíce VÚG, Geofond ČR, GÚ ČAV a GEOTEST. Získané poznatky a informace jsou shromážděny v rozsáhlé databázi Geofondu ČR v Praze nazvané Registr svahových deformací. Součástí registru je i mapa svahových deformací vykreslená na podkladě Základní mapy ČR. Infomace obsažené v registru podrobně lokalizují a popisují všechny zaznamenané sesuvy. Jsou uspořádány v databázi podle položek v tabulce 3.

Tab. 3 – Popis struktury Registru svahových deformací

Registr svahových deformací	
Identifikační údaje	číslo, lokalita, okres, LZM (list Základní mapy ČR), mapa K-G (Topografické mapy ČR 1:25 000, SP (stupeň prozkoumanosti), klasifikace, S (stáří obecné), členitost deformace, tvar deformace, aktivita, plocha, mocnost
Numerické a popisné údaje	souřadnice x, souřadnice y, souřadnice z, určení sklonu, sklon svahu, rozdíl výšek, délka, šířka, expozice, vznik jevu, rok dokumentace a revize
Přírodní poměry (1)	využití terénu, taxonomická jednotka, stratigrafické podloží, geologická stavba svahu
Přírodní poměry (2) a sanace	stav povrchu, vztah k tokům, prameny, příčina, objekty porušené a ohrožené, sanace, rok sanace
Podrobný popis deformace	morfologie povrchu, intenzita porušení svahu, trhliny, smyková plocha, odlučná stěna, tvar odlučné stěny, VYS (výška odlučné plochy), CT (čerstvost tvaru deformace), okraje deformace, čelo deformace, VC (výška čela)
Zpracovatel, organizace, revize	zpracovatel, organizace, doplnil a revidoval

V registru jsou shromážděna podrobná data o existujících sesuvech. Pro účely studie je v registru k dispozici více než 110 záznamů s položkami vztahujícími se k morfologii a lokalizaci sesuvů v povodí Trkmanky a jeho nejbližšímu okolí. Tato data byla použita k určení faktorů souvisejících s náchylností svahů k sesuvům. Určené faktory pak byly použity v procesu sestavení a kalibrace počítačových modelů.

Vzhledem k relativní členitosti reliéfu se sesuvy vyskytují v celém jeho rozpětí (s výjimkou rovin), neváží se k žádnému typu reliéfu. *Orientace svahů* nepředstavuje nejdůležitější faktor, přesto lze vysledovat vyšší četnost sesuvů na severních, severozápadních a jihozápadních svazích. Oproti tomu *sklon*

*svahů* je jedním z nejdůležitějších faktorů. Více než 95 % všech sesuvů se vyskytuje na svazích se sklonem 15 – 40. Stejně tak i *litologie podloží svahu*, na kterém se sesuv vyskytuje, je velmi významným faktorem. Nejčastější výskyt sesuvů v povodí Trkmanky je vázán na flyšové horniny a spraše. Dále mocnější flyšové a sprašové souvrství jsou náchylnější k sesuvům nežli souvrství tenká. Ve studované oblasti jednoznačně převládají meteorologické faktory jako hlavní příčina sesuvů – 98 % všech případů výskytu. Výskyt rozsáhlých sesuvů často koresponduje s vysokým počtem sníženin a erozních rýh na svazích. V průběhu velkých srážkových událostí jsou tyto rýhy naplněny vodou a nasycují i okolní zeminu na povrchu. Toto nasycení je nejčastější příčinou sesuvů ve flyšových horninách. Tam, kde bezprostředně nedojde k sesuvům, může dojít k sesutí až po doprovodných deštích, které výrazně oslabují stabilitu svahů flyšových vrstev. Menší podíl na výskytu mají boční eroze vodních toků a antropogenní vlivy, zejména podkopání svahu. V povodí Trkmanky lze vyloučit výskyt sesuvů způsobených zemětřesením (Vaníček 1959). Dále je zřejmé, že údolní svahy a okraje strží mohou být snadněji podkopány.

### GIS při studiu sesuvů

Spolu s rozsáhlou databází starých sesuvů – Registru svahových deformací v Geofondu ČR – byl použit geografický informační systém PC ARC/INFO k vytvoření a správě souboru tematických vrstev popisující studované území povodí Trkmanky (tab. 4).

Tab. 4 – Použité mapové vrstvy a jejich zdroje

Vrstva	Zdroj
Využití země	topografické Základní mapy ČR 1:50 000 terénní výzkum letecké snímky
Povodí	topografické Základní mapy ČR 1:50 000
Říční síť	topografické Základní mapy ČR 1:50 000
Digitální model reliéfu	z digitalizovaných vrstevnic a výškových bodů (základní interval vrstevnic 10 metrů) a vygenerován ve struktuře TIN
Sklon reliéfu	odvozeno z digitálního modelu reliéfu
Orientace reliéfu	odvozeno z digitálního modelu reliéfu
Litologie	digitalizováno z geologických map 1:50 000 digitalizováno z autorských originálů vybraných studií

Hlavním cílem příspěvku je demonstrace využití digitálních dat. Proto byla použita pouze dostupná data. Využití země (land use/land cover) bylo vyhodnoceno podle topografické situace na Základních mapách ČR 1:50 000, terénním průzkumem a hodnocením leteckých snímků studovaného území. Digitální model reliéfu byl vytvořen ve struktuře nepravidelné trojúhelníkové sítě (TIN) v prostředí programu PC SEM, který je nadstavbou programu PC ARC/INFO. Z digitálního modelu reliéfu byly jako výsledky morfometrické



analýzy odvozeny vrstvy sklonů a orientace reliéfu. Sklony byly vyjádřeny ve stupních, orientace nejprve ve stupních (azimut) a pak reklasifikovány v osmidílné větrné růžici. Litologie byla digitalizována z různých zdrojů (dílní studie, geologické mapy aj.), protože komplexní geologická mapa celého povodí Trkmanky doposud neexistuje.

### Modely hodnocení ohrožení svahů sesuvy

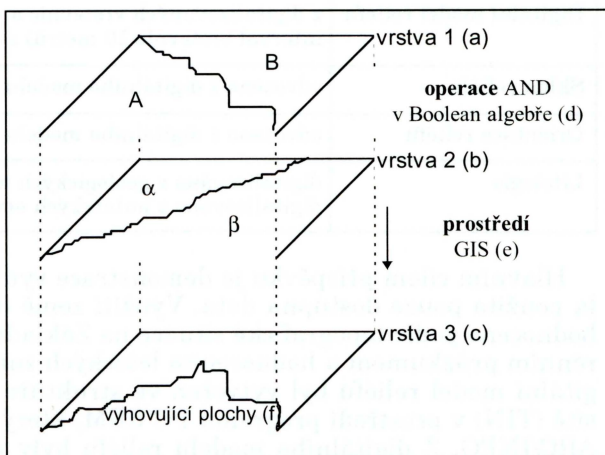
Modelování je důležitá, často i nevyhnutelná metoda při řešení mnoha problémů fyzické geografie. Pod pojmem modelování se rozumí všechny fáze procesu poznání, jehož výsledkem je ekvivalence matematického modelu a vyšetřování geografického systému ve vlastnostech a projevech zvolených za podstatné, a to s přesností postačující danému účelu. Ve fyzické geografii se používá značný počet různých typů modelů. Tyto modely by neměly být příliš složité, protože jinak jsou nevhodné pro pozorování a příliš obtížné pro formulaci závěrů. Naopak příliš jednoduchý model může snížit význam modelovaného jevu, tj. může převést mezi náhodné činitele řadu podstatně působících faktorů (Burrough 1995).

Dostupné informace a základní znalosti o sesuvech byly použity při sestavení modelů a určení nejrizikovějších oblastí v povodí z pohledu ohrožení sesuvy a k mapování odhadů stupně tohoto ohrožení. Modely jsou velmi účinným nástrojem pro popis a hodnocení nejen sesuvů, ale i dalších fyzickogeografických jevů (Voženílek 1991, 1994a, 1994b). Modelování probíhá podle všeobecných pravidel a přináší adekvátní výsledky (Burrough 1995, Dikau 1992). Tato skutečnost je ilustrována na třech základních metodách modelování a srovnání výsledků jejich použití. Jedná se o nominální, ordinální a ordinální regresní typy modelů.

#### Nominální model

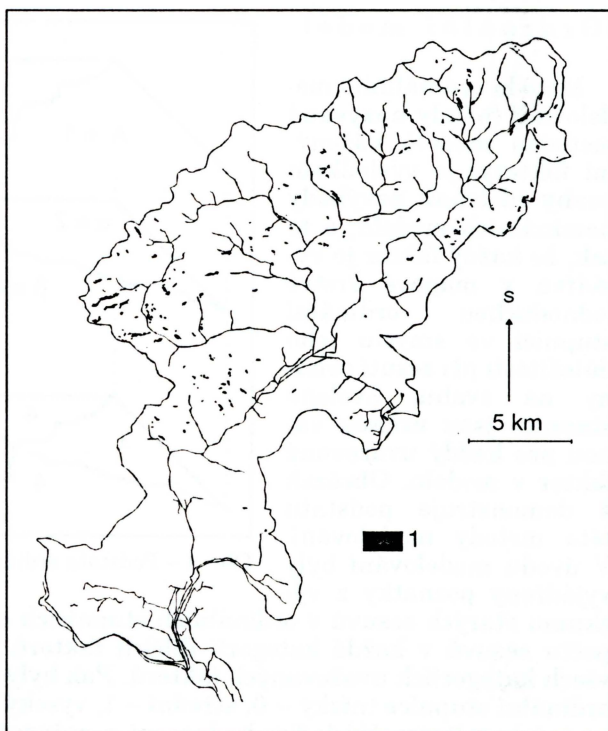
Nominální (logické) modely představují nejjednodušší druh modelů. Jejich podstata spočívá v definování vazeb mezi prvky a složkami pomocí logických operací Boolean algebry. Pro svoji jednoduchost jsou nominální modely snadno realizovatelné v prostředí GIS. Procedurním ekvivalentem v GIS je k nominálnímu modelování operace „sieve mapping“ (sítové mapování).

Metoda modelování „sieve mapping“ je jednou z nejtýpčtějších GIS operací. Je metodou velmi populární, má však řadu nevýhod. Přestože se jedná o metodu založenou na



Obr. 2 – Metoda modelování „sieve mapping“. Dílčím faktorům odpovídající vyhovující plochy – areál A ve vrstvě 1 a areál ve vrstvě 2 – vymezují vyhovující plochy ve vrstvě 3.

studiu starých sesuvů a dlouhodobých zkušenostech geomorfologů, jsou použité vrstvy dílčích faktorů příliš generalizované a v nich stanovené kategorie jevů jsou do jisté míry svévolné. Přes tyto zásadní problémy je nominální metoda „sieve mapping“ výhodná díky relativně snadnému použití téměř ve všech komerčních GIS, a to jak ve vektorových, tak i v rastrových datových strukturách. „Sieve mapping“ používá vrstvy jako vyjádření vhodnosti/nevhodnosti dílčích faktorů zkoumaného jevu. Studované území je v jednotlivých vrstvách rozděleno do dvou disjunktních kategorií – na oblasti velmi pravděpodobného výskytu sesuvů a oblasti s nízkou pravděpodobností výskytu. Podstatou metody „sieve mapping“ je vymezení ploch klasifikovaných ve všech vstupních vrstvách (faktorech) jako vhodné. Alternativní hodnocení dílčích faktorů, v tomto případě orientace, sklonu a litologie, reprezentované nominálním typem digitálních prostorových dat vytváří z faktorů kritéria. Metoda „sieve mapping“ sice umožňuje sestavení jednoduchého modelu a usnadňuje jeho použití, ale na druhé straně poskytuje výsledky na stejné informační úrovni (alternativní hodnocení sesuv/nesesuv) a ve stejném typu digitálních dat – nominálním. Metoda „sieve mapping“ byla vyvinuta pro analýzy rastrových dat, lze ji ovšem úspěšně použít i ve většině vektorových GIS jako jednoduchý případ skládání vrstev, známé jako „polygon overlay“. V rastrových systémech je však její provedení snažší a rychlejší, ať již při jejím vlastním použití nebo při aplikaci jako jednoduchého případu map algebry (Kirkby 1987). Obrázek 2 ilustruje operaci „sieve mapping“ v nejjednodušší podobě. Obrázek 3 zobrazuje plochy v povodí Trkmanky nejvíce ohrožené sesuvy odvozené tímto modelováním. Na základě hodnocení existujících sesuvů uložených v Registru svahových deformací byla zvolena následující kritéria: svahy na flyši a spraši, sklon svahů větší než 15 a orientace svahů S, SZ a JZ. Ta byla reprezentována samostatnými vrstvami. Stejně tak i použité logické operace jsou v podstatě deterministické a jejich dvouhodnotová podstata (ano/ne) vytváří prostorové diskontinuity, které neadekvátně odrážejí spojitou podstatu jak některých faktorů, tak i stupně ohrožení. Výsledná mapa na obrázku 3 vykazuje reálné hodnocení nejvyššího potenciálního ohrožení ve studované oblasti.



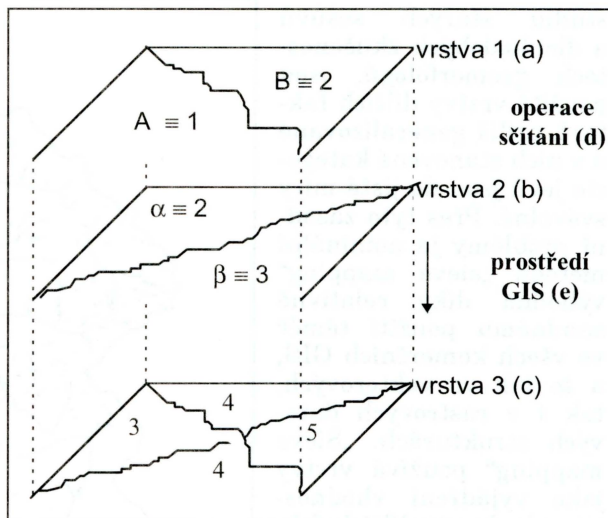
Obr. 3 – Výsledky modelování v povodí Trkmanky metodou „sieve mapping“. 1 – nestabilní svahy náchylné k sesutí.

ve všech vstupních vrstvách (faktorech) jako vhodné. Alternativní hodnocení dílčích faktorů, v tomto případě orientace, sklonu a litologie, reprezentované nominálním typem digitálních prostorových dat vytváří z faktorů kritéria. Metoda „sieve mapping“ sice umožňuje sestavení jednoduchého modelu a usnadňuje jeho použití, ale na druhé straně poskytuje výsledky na stejné informační úrovni (alternativní hodnocení sesuv/nesesuv) a ve stejném typu digitálních dat – nominálním. Metoda „sieve mapping“ byla vyvinuta pro analýzy rastrových dat, lze ji ovšem úspěšně použít i ve většině vektorových GIS jako jednoduchý případ skládání vrstev, známé jako „polygon overlay“. V rastrových systémech je však její provedení snažší a rychlejší, ať již při jejím vlastním použití nebo při aplikaci jako jednoduchého případu map algebry (Kirkby 1987). Obrázek 2 ilustruje operaci „sieve mapping“ v nejjednodušší podobě. Obrázek 3 zobrazuje plochy v povodí Trkmanky nejvíce ohrožené sesuvy odvozené tímto modelováním. Na základě hodnocení existujících sesuvů uložených v Registru svahových deformací byla zvolena následující kritéria: svahy na flyši a spraši, sklon svahů větší než 15 a orientace svahů S, SZ a JZ. Ta byla reprezentována samostatnými vrstvami. Stejně tak i použité logické operace jsou v podstatě deterministické a jejich dvouhodnotová podstata (ano/ne) vytváří prostorové diskontinuity, které neadekvátně odrážejí spojitou podstatu jak některých faktorů, tak i stupně ohrožení. Výsledná mapa na obrázku 3 vykazuje reálné hodnocení nejvyššího potenciálního ohrožení ve studované oblasti.



## Ordinální model

Metoda ordinálního modelování (někdy nazývaná metodou modelů váženými faktory) je výsledkem snahy odstranit nevýhody nominálních modelů, a to tak, že každý faktor je vyjádřen v mapové vrstvě jednoduchou ordinální stupnicí ve smyslu jeho důležitosti při sesutí zemi na svahu. Zvolené stupnice jsou určitou vahou pro každý uvažovaný faktor v modelu. Obrázek 4 demonstruje podstatu této metody modelování.



Obr. 4 – Podstata ordinálního modelování

V úvodu modelování byly vyjádřeny poznatky z výzkumu starých sesuvů v ordinálních stupnicích ohrožení na základě poměru počtu sesuvů v každé kategorii dílčích faktorů k průměrnému výskytu ve všech kategoriích uvažovaných faktorů. Pak byly faktory ohodnoceny třídami ordinální stupnice (nízký – 0, střední – 1, vysoký – 2) a ty v prostředí GIS po vrstvách sečteny. Výsledky hodnocení a zařazení do ordinálních stupnic je uvedeno v tabulce 5. Tím byl vypočten index ohrožení svahů sesuvy. Pro modelování byly použity čtyři vrstvy: litologie, sklon, orientace a využití půdy. Výsledné hodnoty všeobecného indexu se pohybovaly od 0 do 8.

Přestože přibližně stejných výsledků se dosáhne realizací modelování v rastrovém i vektorovém prostředí GIS (Gee, Anderson, Baird 1990), je výhodnější provádět modelování v rastrových systémech jako aplikace map algebry.

Při vyhodnocení výsledků ordinálního modelování sesuvů faktory byla použita další ordinální stupnice potenciálního ohrožení svahů sesuvy. Všeobecný index vypočtený součtem hodnot dílčích faktorů byl vyhodnocen ve třech ka-

Tab. 5 – Ordinální stupnice dílčích faktorů

Faktory	Riziko ohrožení svahů sesuvy dílčích faktorů		
	0 nízké	1 střední	2 vysoké
Litologie	fluviální sedimenty	neogenní písky, flyšové pískovce, jílovce a slepence	spraše, tégl, jíly
Sklon reliéfu	0 – 2°	2 – 15°	15° a více
Orientace svahů	J, JV, V	Z, SV	S, SZ, JZ
Využití země	vodní plochy	lesy, zastavěné plochy	orná půda, louky, pastviny, sady

tegoriích analogických ordinálním stupnicím vstupních faktorů. Nejrizikovější plochy představují oblasti s indexem 8 (maximální součet ze čtyřech vstupních faktorů). Svým rozmístěním se přibližují výsledkům modelování „sieve mapping“. Jejich rozsah je však menší díky zapojení faktoru využití země do modelu (obr. 5). Plochy se středním ohrožením jsou místa s celkovým indexem ohrožení 5, 6 a 7. Plochy s indexem 4 a menším představují plochy s nízkým potenciálním ohrožením svahů sesuvy.

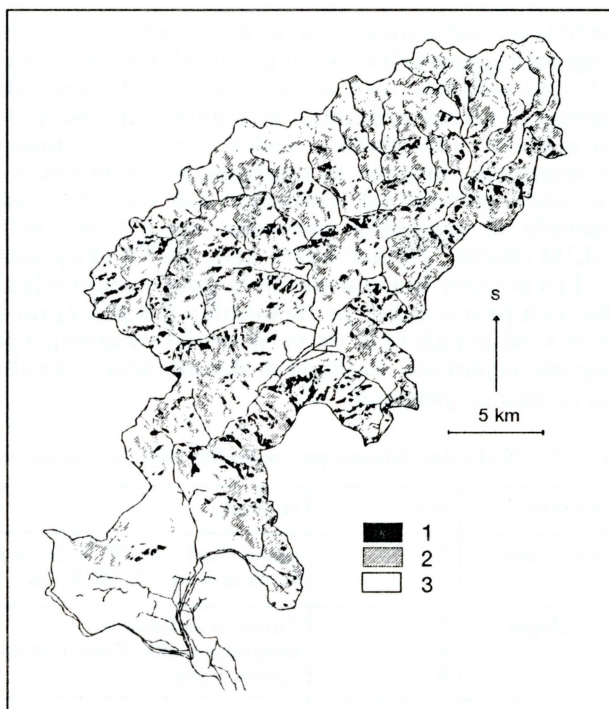
### Ordinální regresní model

Použití Bayesovy teorie pravděpodobnosti umožňuje převést expertní poznatky a zkušenosti do pravděpodobnostní stupnice. Je však zatíženo několika nedostatky. Neumožňuje totiž rozlišit, které datové vrstvy jsou důležité při sesuvu jako fyzickogeografickém jevu, které jsou podradnější a dále u kterých vrstev může být jejich podíl jistým způsobem potlačen nebo dokonce ignorován. Dále neumožňuje interakci mezi použitými faktory a dalšími důležitými faktory neuvažovanými v modelu. Modelování pomocí spojených funkcí je v současné době poměrně běžnou záležitostí. Jejich aplikací v problematice sesuvů se zabývalo již několik týmů (např. Luži, Fabbri 1995). Nejvhodnější aproximací spojených modelů pro modelování sesuvů na základě dostupných vrstev je ordinální regresní model. Ordinální regresní model využívá dostupné faktory a jim odpovídající data na jejich informačních úrovních. Chápe je jako jevy reprezentovatelné minimálně ordinálními a maximálně intervalovými digitálními daty (Gardziel, Voženilek 1995).

Ke kalibraci ordinálního regresního modelu, spojujícího pravděpodobnost výskytu sesuvů a s jednotlivými kategoriemi dílčích faktorů, se nejčastěji používá regresní analýza. Zde prezentovaný přístup je založen na analýze ordinálních dat. Model byl vytvořen ke kalibraci spojitě funkce ve tvaru:

$$P(\text{sesuv}) = f(\text{orientace, litologie, sklon}),$$

ve které jsou všechny nezávislé proměnné na pravé straně rovnice chápány jako kódované kategorie dílčích faktorů a reprezentované ordinálními digitálními daty. Tento přístup, který umožňuje zapojení souboru popisných dat starých sesuvů z Registru svahových deformací, poskytuje nejlepší podmínky pro



Obr. 5 – Výsledky ordinálního modelování. 1 – vysoké ohrožení svahů sesuvy; 2 – střední ohrožení svahů sesuvy; 3 – nízké ohrožení svahů sesuvy.

určení potenciálních sesuvů. Kalibrace tohoto modelu nemůže využít lineární regresi nejmenších čtverců minimálně ze dvou důvodů: 1. závislá proměnná je binární veličinou (0/1, sesuv/nesesuv), 2. nezávislá proměnná „litologie“ je vyjádřena vnitřně ordinální (kategorickou) veličinou. Tato skutečnost nedovolila sestavit „intervalový model“ využívající intervalová data faktorů sklonu a orientace, protože je nepřipustné používat v modelu data různých typů (v tomto případě jak ordinální, tak i intervalová). Odhad parametrů těchto modelů je nejčastěji prováděn speciálními softwarovými produkty, např. GLIM (Baker, Nelder 1978) nebo ECTA (Fay, Goodman 1975).

Pro potřeby modelování byla data o sesuvech přeuspořádána do třech ordinálních proměnných podle tabulky 6 a pak zpracována do tabulky 7. Předmětem studie pak bylo vytvořit model využívající jako nezávislé proměnné kategorie orientace, litologie a sklonu, které vystihují tyto pozorované výskyty co možná nejpřesněji.

Tab. 6 – Kódování faktorů pro ordinální regresní modelování

Faktory	Kódy	Hodnoty
Orientace	1	jihovýchod – J, JV, V, SV a roviny
	2	severozápad – S, SZ, Z, JZ
Litologie	1	fluviální sedimenty
	2	neogenní písky, flyšové pískovce, jílovce a slepence
	3	spraše a jíly
Sklon	1	0 – 2°
	2	2 – 15°
	3	15° a více

K dispozici byla jedna závislá proměnná (sesutí) a tři nezávislé proměnné. Počet možných modelů, které lze použít, není vysoký. Vstupní veličiny byly vyjádřeny v kódech kategorií tak, jak je uvedeno v tabulce 6. Základem vymezení bylo hodnocení starých sesuvů a expertní posouzení vlivu jednotlivých faktorů na ohrožení svahů sesuvy. Model byl vyjádřen rovnicí spojitě funkce:

$$P = f(x, y, z),$$

ve které  $P$  je nezávislá proměnná pravděpodobnosti sesutí svahu a  $x, y, z$  jsou závislé proměnné představující orientaci ( $x$ ), litologii ( $y$ ) a sklon ( $z$ ). Na základě vzájemných vztahů, povah jednotlivých veličin a jim odpovídajícího typu digitálních dat byla funkce  $P$  definována jednoduchým vztahem:

$$P = Ax + By + Cz,$$

kde  $A, B, C$  jsou konstanty vyjadřující důležitost při sesutí svahu. V úvodu modelování jsou konstanty označeny obecně písmeny, po té je jím kalibrací modelu (řešení soustavy lineárních rovnic a regresních závislostí) přiřazena jediná hodnota (absolutní nebo vážená – střed intervalu). Po té měla rovnice modelu tvar:

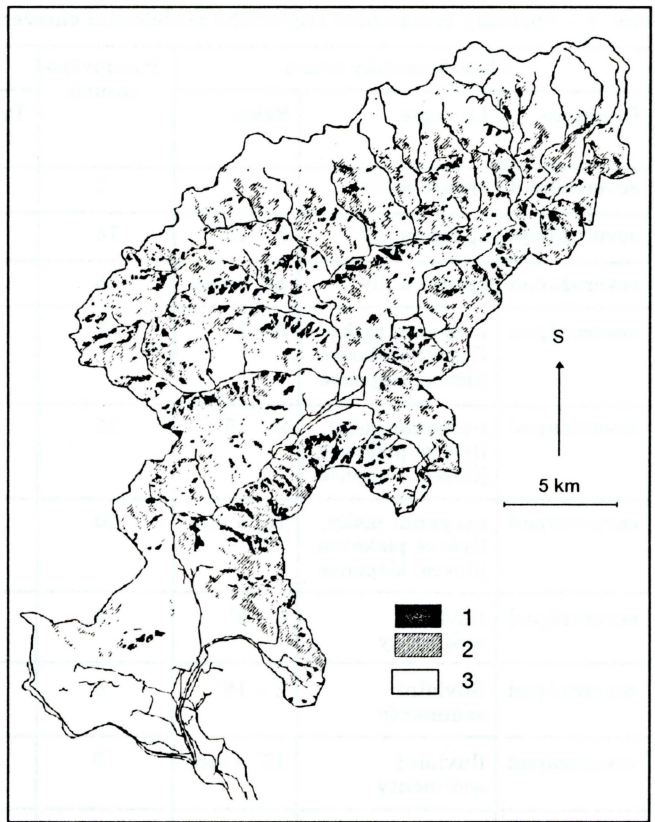
$$P = 0,018x + 0,165y + 0,151z.$$

Tab. 7 – Výsledky ordinálního regresního modelování ohrožení svahů sesuvy

Charakteristiky svahu			Pozorováno sesuvů	Výsledky modelu	
Orientace	Litologie	Sklon		Pravděpodobnost výskytu	Modelovaný odhad
severozápad	spraše a jíly	0 – 2°	2	0,017	0,348
severozápad	spraše a jíly	2 – 15°	14	0,120	0,499
severozápad	spraše a jíly	15° a více	35	0,299	0,650
severozápad	neogenní písky, flyšové pískovce, jílovce, slepence	0 – 2°	1	0,009	0,283
severozápad	neogenní písky, flyšové pískovce, jílovce, slepence	2 – 15°	12	0,103	0,334
severozápad	neogenní písky, flyšové pískovce, jílovce, slepence	15° a více	20	0,171	0,485
severozápad	fluviální sedimenty	0 – 2°	0	0	0,018
severozápad	fluviální sedimenty	2 – 15°	0	0	0,169
severozápad	fluviální sedimenty	15° a více	0	0	0,320
jihovýchod	spraše a jíly	0 – 2°	1	0,009	0,330
jihovýchod	spraše a jíly	2 – 15°	13	0,111	0,481
jihovýchod	spraše a jíly	15° a více	11	0,094	0,632
jihovýchod	neogenní písky, flyšové pískovce, jílovce, slepence	0 – 2	0	0	0,165
jihovýchod	neogenní písky, flyšové pískovce, jílovce, slepence	2 – 15	2	0,018	0,316
jihovýchod	neogenní písky, flyšové pískovce, jílovce, slepence	15 a více	6	0,051	0,467
jihovýchod	fluviální sedimenty	0 – 2	0	0	0
jihovýchod	fluviální sedimenty	2 – 15	0	0	0,151
jihovýchod	fluviální sedimenty	15 a více	0	0	0,302



Výsledná rovnice modelování odpovídá geomorfologickým poznatkům o problematice sesuvů v této části Karpat a je možné ji realizovat metodami GIS. Obrázek 6 ukazuje výsledky užití této metody modelování ve studovaném území. Výsledky modelování vyjadřují modelovaný odhad výskytu sesuvů na svazích (v tabulce 7 položka modelovaný odhad). Pravděpodobnost do 0,299 vymezila svahy s nízkým ohrožením, pravděpodobnost 0,3 až 0,599 svahy se středním ohrožením a nad 0,6 vysoké ohrožení. Mapa na obrázku 6 může být srovnána s výsledky předchozích metod modelování (obr. 3 a 5). Výsledky ordinálního regresního modelování jsou podobnější výsledkům metody ordinálního modelu nežli výsledkům „sieve mapping“.



Obr. 6 – Výsledky ordinálního regresního modelování. 1 – vysoké ohrožení svahů sesuvy; 2 – střední ohrožení svahů sesuvy; 3 – nízké ohrožení svahů sesuvy.

V tabulce 7 jsou uvedeny všechny možné kombinace ordinálních dat orientace, litologie a sklonu. V povodí Trkmanky se ovšem všechny kombinace nevyskytují (např. fluviální sedimenty se sklonem 15 a více) – viz položka „Pozorováno“. Přesto ordinální regresní model počítá všem kombinacím pravděpodobnost výskytu, která však není v reálu v plné míře naplněna.

Výsledky závěrečného modelování musejí být hodnoceny velmi kriticky. Dílčích faktorů podílejících se na sesuvech svahů je mnohem více než orientace, litologie a sklon (Foster, Wischmeier 1974). Přestože ordinální regresní model popisuje sesuvy nejpřesněji ze všech sestavených modelů, je pouze obecným přiblížením rozmístění sesuvů jako prostorového fyzikogeografického jevu. V tomto modelu chybějí důležité faktory jako jsou zejména tvar reliéfu, podkopání svahu, délka svahu, mocnost vrstev a typ obdělávání povrchu (Moore, Nieber 1989).

Z tabulky 7 je patrné, že vysoký rozsah modelovaného odhadu (0 – 0,302) u svahů se stejnou orientací a litologií je způsoben významným podílem sklonu na ohrožení svahů sesuvy, tj. razacího faktoru sklonitosti v modelu.



## Závěr

Prostředí geografických informačních systémů se ukazuje být velmi výhodným pro realizaci vytvořených modelů. GIS umožňují důkladně připravit vstupní data, provést vlastní modelování i odpovídající kartografickou prezentaci výsledků. Hlavním poznatkem příspěvku je ověření nutnosti klást důraz na odlišnou informační úroveň vstupních veličin reprezentovanou různým typem digitálních prostorových dat. Podle typu vstupů – nominálních, ordinálních a intervalových – je nutné vytvářet model na stejné informační úrovni, protože získanými výsledky jsou data stejné úrovně. Typy digitálních dat a jím odpovídající informační úrovně nelze zaměňovat nebo kombinovat.

Pro modelování ohrožení svahů sesuvy existuje více přístupů než demonstrováné tři základní metody modelování aplikované v povodí Trkmanky. Do modelování ohrožení svahů sesuvy lze zapojit další dílčí faktory. Velmi důležitými faktory jsou meteorologické aspekty, zejména rozmístění srážek, jejich intenzita a výskyt mimořádných srážkových událostí. Významný je podíl mocnosti a zrnitosti svrchních vrstev a jejich absorpční schopnost. V neposlední řadě mohou modely uvažovat i antropogenní ovlivnění, jako například podkopání svahů komunikačními úpravami nebo ovlivnění svahů ořesy v blízkosti železničních tratí. Složitější deterministické modely umožňují získat nejenom přesnější výsledky, ale v případě zapojení časovové rozměru dílčích faktorů i přiblížení časového určení nejvyššího ohrožení svahů sesuvy.

Z použitých přístupů byly nejpřesnější výsledky regresního ordinálního modelování díky maximálnímu využití poznatků ze studia starých sesuvů v povodí Trkmanky z Registru svahových deformací. Výsledky modelování jsou přínosné pro praktické rozhodování při hodnocení krajiny a přírodních a socioekonomických střetech zájmů.

## Literatura:

- BAKER, R. J., NELDER, J. A. (1978): The GLIM System: Release 3. Numerical Algorithm Group, Oxford.
- BURROUGH, P. A. (1995): Costs and Benefits of Environmental Modelling with GIS. Proceeding of First JECEGI, Haag, s. 253-262.
- DIKAU, R. (1992): Geomorphic Landform Modelling Based on Hierarchy Theory. In: Proceeding of International Conference on Spatial Data Handling, Charleston, s. 230-239.
- FAY, R. E., GOODMAN, L. A. (1975): The ECTA Program: Description for Users. Chicago, Department of Statistics, University of Chicago.
- FOSTER, G. R., WISCHMEIER, W. H. (1974): Evaluating irregular slopes for soil loss prediction. Trans. ASAE No. 17, Washington, s. 305-309.
- GARDZIEL, Z., VOŽENÍLEK, V. (1995): Computer Interpolation of Pre-Quaternary Surface. The Moravian Geographical Reports, 2, č. 1, Brno.
- GEE, D. M., ANDERSON, M. G., BAIRD, L. (1990): Large-Scale Floodplain Modelling. Earth Surface Processes and Landforms, 15, s. 515-523.
- KIRKBY, M. J. (1987): Computer Simulation in Physical Geography. John Wiley Sons, New York, 277 s.
- LUZI, L., FABBRI, A. G. (1995): Application of Favourability Modelling to Zoning of Landslide Hazard in the Fabriano Area, Central Italy. In: Proceeding of First JECEGI, Haag, s. 398-403.
- MOORE, I. D., NIEBER, J. L. (1989): Landscape Assessment of Soil Erosion and Nonpoint Source Pollution. Journal of Minnesota Academy of Science, 55, č. 1, Minnesota, s. 18-25.
- Registr svahových deformací. Praha, Geofond ČR.
- SCHETSELAAR, E. M. (1995): Computerized Field Data Capture and GIS Analysis for Geological Data Integration. In: First Joint European Conference and Exhibition on Geographical Information, Haag, s. 436-441.

- VANIČEK, V. (1959): Vodní erose a odtokové poměry v povodí Trkmanky. Ředitelství výstavby, rozvoje a správy vodohospodářských děl, Brno, 64 s. + 14 příl.
- VOŽENÍLEK, V. (1991): Digital Models in Geographical Research. Proceedings of EGIS 91, Brussel.
- VOŽENÍLEK, V. (1994a): Computer Models in Geography. Acta UPO, 118, Geographica-Geologica 33, PšF UP, Olomouc, s. 59-64.
- VOŽENÍLEK, V. (1994b): Data Format and Data Sources for Hydrological Modelling. In: Proceedings of RC IGU, Praha.
- VOŽENÍLEK, V. (ed.) (1996): Digitální data v informačních systémech. Vyškov, Antrim, 134 s.
- WANG, S. Q., UNWIN, D. J. (1992): Modelling landslide distribution on loess soils in China: an investigation. Int. Journal of GIS, 6, č. 5, s. 391-405.

## S u m m a r y

### DIGITAL DATA IN MODELLING OF LANDSLIDE RISK USING THE REGISTER OF SLOPE DEFORMATIONS OF THE GEOFOND CR

Catastrophic mass movements are important phenomena on loess and flysh rocks. In this paper several methods of modelling are presented to map, assess and predict the landslide hazard. The area under investigation is the Trkmanka catchment (377 km<sup>2</sup>) located in the SE part of the Czech Republic. As inputs the approach used a database of past landslides collected in the Register of slope deformations (Geofond of CR in Prague) and geomorphological findings together with topographical data forming an integrated Geographical Information System (GIS). Field surveys of several institutions led to the collection of a comprehensive landslide database which describes all major landslides of the region. These data were used to suggest which factors are the most associated with the disposition of slopes to landsliding.

In relation to the relative relief, landslides occur over the entire range. The slope aspect seems to be of minor importance, there is some evidence suggesting that N, NW and SW-facing slope aspects increase the probability of sliding. The slope angle is very important. About 95 % of these past landslides occur on steep slopes in the range of 15-40. Similarly, the lithology on which a slope is cut is also important. The existence of loess and flysh rocks is very important. In addition, thinner covers are more prone to sliding than thick ones.

To create, maintain and present a series of map coverages the system PC ARC/INFO was chosen. The digital elevation model of the Trkmanka catchment area was generated from digitized contour lines (interval 10 metres) in a structure of a triangle irregular network. The slope aspect and slope angle coverages were derived from the digital elevation model.

The aim of the work is to use the existing database and knowledge to predict which types of land surface in the area are most prone to landsliding and to map estimates of the degree of the risk involved. There are illustrated three general methods of modelling and their results are compared.

A rule-based (nominal) model represents a modelling known in the GIS terminology as sieve mapping. It is one of the few recognizable fundamental GIS operations. Using the GIS, the factors thought to be significant in landsliding are mapped and derivations showing those areas of the surface that are not susceptible according to each recognized criterion are overlaid on top of each other to leave as a residual those areas thought to be susceptible on all the criteria. Figure 3 shows the results of the rule-based model.

The ordinal modelling (modelling by weighting factors) is an attempt to reduce each map layer thought to be important to a single metric and then to add up the scores to produce an overall index. The metric chosen will be some arbitrary score for each category on the assumed underlying scale of susceptibility. The relative incidence of past landslides was converted into a risk index by taking the ratio of their incidence in each category of each factor and by dividing it by the average incidence of all categories of the factor concerned. These individual factor risk indices were then assigned to classes on an ordinal scale (low = 0, medium = 1, high = 2) and then summed to give an overall risk measure. The coverages used were: aspect, slope, lithology and land use. The final measure of the model had a range 0 - 8. The map of the potential landslide hazard can be seen in figure 4.

The Categorical data modelling allows the expert knowledge to be converted into a common scale based around the notion of probability. In this work, an attempt was made to ca-

librate a model of the form:  $P(\text{landslide}) = f(\text{slope aspect, lithology, slope angle})$  in which all the independent variables on the right-hand side of the equation consisted of coded categories. The dependent variable P is a binary (0/1, landslide/no landslide). For the purposes of analysis the data were reformed into the three categorical variables shown in table 4. The results of the model were classified as following: probabilities less than 0.3 as „low risk, 0.3 – 0.6 as „moderate risk“ and above 0.6 as „high risk“. The map representing these results is shown in figure 5.

This paper presents three approaches to the problem of codifying knowledge about landslides in loess and flysh materials for incorporation into models to predict the spatial incidence of landslides in a GIS framework. In particular, the use of categorical methods allows a very general methodology to be developed that enables each factor to be weighted in some optimal sense based on past information so as to maximize the predictive capability of the final maps.

Fig. 1 – The Trkmanka catchment – area under investigation.

Fig. 2 – Sieve mapping. Suitable areas corresponding to partial factors – A in layer 1 and in layer 2 make suitable area in layer 3. a – layer 1, b – layer 2, c – layer 3, d – 1, b – layer 2, c – layer 3, d – AND operation in Boolean algebra, e – GIS environment, f – suitable areas.

Fig. 3 – Results of modelling in the Trkmanka catchment area by the method of sieve mapping: 1 – unstable slopes prone to sliding.

Fig. 4 – Fundament of ordinal modelling. a – layer m1, b = layer 2, c – layer 3, d – addition, e – GIS environment.

Fig. 5 – Results of ordinal modelling: 1 – high risk of landslides, 2 – medium risk, 3 – low risk.

Fig. 6 – Results of ordinal categorical modelling: 1 – high risk of landslides, 2 medium risk, 3 – low risk

*(Pracoviště autora: katedra geografie Přírodovědecké fakulty UP, Svobody 26, 771 46 Olomouc.)*

*Do redakce došlo 13. 1. 1997*

*Lektorovali Petr Dobrovolný a Jan Kalvoda*